

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Ricardo Andrés
Castillo Estepa E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 02.07.2010

Joaquim Manoel Rosário
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Ricardo Andrés Castillo Estepa

**Proposta de Arquitetura de Supervisão e
Controle para uma Plataforma Automatizada
(WebLab) orientada à Formação e Pesquisa em
Automação e Robótica**

Campinas, 2010

Ricardo Andrés Castillo Estepa

Proposta de Arquitetura de Supervisão e Controle para uma Plataforma Automatizada (WebLab) orientada à Formação e Pesquisa em Automação e Robótica

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Orientador: Dr. João Mauricio Rosário

Campinas
2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

C278p Castillo Estepa, Ricardo Andrés
Proposta de arquitetura de supervisão e controle para uma plataforma automatizada (WebLab) orientada à formação e pesquisa em automação e robótica / Ricardo Andrés Castillo Estepa. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.

Orientador: João Mauricio Rosário.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Automação. 2. Sistemas flexíveis de fabricação. 3. Modelagem de processos. 4. Robótica. 5. Dispositivos lógicos programáveis. I. Rosário, João Mauricio. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Supervision and control architecture proposal for automation and robotics training on platform

Palavras-chave em Inglês: Automation, Flexible manufacturing systems, Process modeling, Robotics, Programmable logic devices

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: João Vilhete Viegas D'Abreu, Francisco Carlos Parquet Bizarria

Data da defesa: 02/07/2010

Programa de Pós Graduação: Mestrado em Engenharia Mecânica

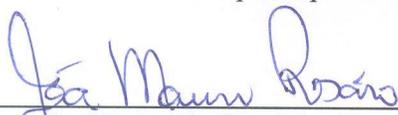
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECANICO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

Proposta de Arquitetura de Supervisão e Controle para uma Plataforma Automatizada (WebLab) orientada à Formação e Pesquisa em Automação e Robótica

Autor: Ricardo Andrés Castillo Estepa
Orientador: Dr. João Mauricio Rosário

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. João Mauricio Rosário, Presidente
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP / FEM / DPM



Prof. Dr. João Vilhete Viegas D'Abreu
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP / NIED



Prof. Dr. Francisco Carlos Parquet Bizarria
Comando Geral de Tecnologia Aeroespacial - Instituto de Aeronáutica e Espaço

Campinas, 02 de Julho de 2010

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais Reinel de Jesus Castillo e Julieta Estepa Rodriguez

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de Deus e de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Aos meus pais Reinel e Julieta pelo incentivo e grande apoio em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador Dr. João Mauricio Rosário, pela sua amizade, conselho e suas sugestões em relação a este trabalho.

Ao Dr. Oscar Fernando Avilés pela sua grande colaboração e amizade.

À Universidad Militar Nueva Granada (Bogotá – Colômbia) pela confiança depositada em mim e o apoio financeiro.

A todos os funcionários, professores e colegas do Departamento de Projeto Mecânico da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP e do laboratório LAIR, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

*O SENHOR é a minha luz e a minha
salvação; a quem temerei? O SENHOR é
a força da minha vida; de quem me
recearei?*

Salmo 27:1

Resumo

Este trabalho propõe uma arquitetura genérica de supervisão e comando para uma plataforma automatizada de experimentação modular com capacidade de utilização remota, concebida para apoiar e complementar os processos de formação e pesquisa em Automação Industrial e Robótica, descrevendo sua concepção, modelagem dinâmica e implementação hardware - software. A integração de tecnologias e dispositivos industriais existentes no mercado (Controladores Lógicos Programáveis - CLP, diversos tipos de sensores e atuadores industriais, processamento de imagens, sistemas supervisórios e dispositivos robóticos de movimentação) em uma única plataforma implementada através de uma arquitetura modular de Sistema Automatizado de Produção Colaborativo (CSAP/ADACOR) permite que alunos e pesquisadores possam interatuar com essas tecnologias realizando atividades de modo a automatizar, supervisionar e comandar um processo completo de produção. Uma plataforma desenvolvida utilizando esta arquitetura genérica permite aos estudantes e pesquisadores trabalhar dentro de um ambiente educacional, mas que retrata a maioria dos aspectos encontrados em um Sistema Automatizado de Manufatura real, tais como Integração Tecnológica, Redes de Comunicação, Controle de Processos e Gestão da Produção. Além disso, é possível realizar o controle e supervisão do processo completo que ocorre na plataforma automatizada por meio de uma conexão remota que utiliza a internet – WEBLAB (Laboratório Remoto); possibilitando que usuários e grupos em diferentes lugares possam utilizar a plataforma e compartilhar informação rapidamente. Pode-se destacar também que as características de Modularidade e Flexibilidade da plataforma permitem futuras modificações tanto do software quanto do hardware da mesma.

Palavras Chave

Automação, Sistemas flexíveis de fabricação, Modelagem de processos, Robótica, Dispositivos lógicos programáveis.

Abstract

This work proposes a generic supervisory and command architecture for an experimentation modular automated platform equipped with remote access capacities which is conceived with the aim of improve training and research processes on Automation and Robotics, this study describes the platform's design, dynamic modeling and implementation stages. The technologic and industrial devices integration (Programmable Logic Controllers - PLC, several types of sensors and actuators, image processing, supervisory systems and robotic manipulation devices) in a single platform which is implemented following a modular Collaborative Automatic Production System (CAPS/ADACOR) architecture allows students and researchers to interact with it by means of doing practices in order to successfully automate, supervise and manage a complete production process. Therefore, class acquired theoretical concepts are supported so improving user's professional skills. A platform developed using the here proposed generic structure allows users to work within an educational environment coping with most of the encountered aspects in a real Manufacturing Automation System, such as Technologic Integration, Communication Networks, Process Control and Production Management. Furthermore it is possible to command the entire assembly process taking place at the platform by a remote network connection using the internet – WEBLAB (Remote Laboratory), enabling individual users and groups in different places in order to use the platform and quickly interchange information. In addition it is important to outstand that both the Modularity and Flexibility of the platform can allow readily any further hardware or software enhancement.

Key Words

Automation, Flexible manufacturing systems, Process modeling, Robotics, Programmable logic devices.

Lista de Ilustrações

Figura 1. Arquitetura de Sistema Automatizado de Produção (SAP)	10
Figura 2. Conceito de Automação Industrial Colaborativa	13
Figura 3. Modelo da arquitetura ADACOR	15
Figura 4. Formas de Apoio aos Processos de Formação e Pesquisa em Automação	16
Figura 5. Descrição do Problema	32
Figura 6. Diagrama Gerador da Estrutura Proposta	33
Figura 7. Tecnologias Integradas na Plataforma	34
Figura 8. Esquema de Integração para a Estrutura Proposta	36
Figura 9. Integração Proposta - Arquitetura de Sistema Automatizado de Produção Colaborativo e Holônico (CSAP/ADACOR)	37
Figura 10. Arquitetura Proposta para a Integração da Plataforma – Modularidade CSAP	38
Figura 11. Níveis da Arquitetura ADACOR Considerados	40
Figura 12. Estrutura de um Hólon Operacional	41
Figura 13. Arquitetura Proposta para a Integração da Plataforma– Modularidade ADACOR	44
Figura 14. Funcionamento de uma Rede de Petri (MURATA, 1989)	50
Figura 15. Exemplo de Conflito e Concorrência em uma Rede de Petri	51
Figura 16. Exemplo de diagrama GRAFCET	56
Figura 17. Modelagem de Sistemas de Controle de Manufatura (LEITAO, 2004)	58
Figura 18. Etapas da Modelagem e Especificação da parte de Comando	59
Figura 19. Processo de Modelagem e Análise Dinâmica com RdP	60
Figura 20. Modelo em RdP da Estação de Classificação	61
Figura 21. Modelo em RdP da Estação de Montagem	64
Figura 22. Modelo em RdP da Estação de Inspeção	66
Figura 23. Modelo em RdP da Estação de Controle de Qualidade	68
Figura 24. Modelo em RdP da Estação de Movimentação	71
Figura 25. Modelo em RdP da Cadeia de Alimentação e a Esteira de Movimentação	73

Figura 26. Integração dos Modelos em RdP das Estações em um CSAP / ADACOR	85
Figura 27. Esquema Geral da Plataforma Implementada	88
Figura 28. Célula de manufatura BYTRONIC - ICT3	89
Figura 29. Placa de Controle Original da Célula de Manufatura	90
Figura 30. Detalhe das conexões na Célula de Manufatura	90
Figura 31. Manipulador Cartesiano	91
Figura 32. Sistemas de Coordenadas e Espaço de Trabalho do Manipulador	92
Figura 33. Esquema de Implementação de um Hólon Operacional ADACOR	95
Figura 34. Implementação do Painel de Comando	98
Figura 35. Etapas para Implementação da Logica da parte de Comando	99
Figura 36. Especificação GRACET Funcional do Sub-Processo Classificação	100
Figura 37. Especificação GRACET Funcional do Sub-Processo Montagem	101
Figura 38. Especificação GRACET Funcional do Sub-Processo Inspeção	101
Figura 39. Especificação GRACET Funcional do Sub-Processo Controle de Qualidade	102
Figura 40. Especificação GRACET Funcional do Sub-Processo Movimentação	103
Figura 41. Diagrama de Integração utilizado na Validação dos Sub – Processos	106
Figura 42. Instrumento Virtual de Supervisão e Comando Desenvolvido	107
Figura 43. Diagrama de Blocos do Instrumento Virtual Desenvolvido	109
Figura 44. Diagrama de Blocos do Sistema de Controle de Qualidade	111
Figura 45. Imagem Original Capturada pela Câmera	111
Figura 46. Processos Realizados Sobre a Imagem	112
Figura 47. Identificação da Peça	112
Figura 48. Arquitetura Geral do Laboratório Remoto	113
Figura 49. Diagrama de Blocos para Configuração da Realimentação de Vídeo	114
Figura 50. Diagrama de Blocos de Configuração da Conectividade Remota	114
Figura 51. Áreas de Aplicação da Arquitetura Proposta	118
Figura 52. Aplicações da Arquitetura Proposta em Processos de Pesquisa	121
Figura 53. Estação de Classificação	124
Figura 54. Robô manipulador de 2 GL	126
Figura 55. Especificação GRACET Tecnológico do Sub-Processo Classificação	140
Figura 56. Especificação GRAFCET Tecnológico do Sub-Processo Montagem	140

Figura 57. Especificação GRAFCET Tecnológico do Sub-Processo Inspeção	141
Figura 58. Especificação GRAFCET Tecnológico do Sub-Processo Controle de Qualidade	141
Figura 59. Especificação GRAFCET Tecnológico do Sub-Processo Movimentação	142

Lista de Tabelas

Tabela 1. Lugares no Modelo em RdP da Estação de Classificação	62
Tabela 2. Transições no Modelo em RdP da Estação de Classificação	62
Tabela 3. Lugares no Modelo em RdP da Estação de Montagem	64
Tabela 4. Transições no Modelo em RdP da Estação de Montagem	65
Tabela 5. Lugares no Modelo em RdP da Estação de Inspeção	67
Tabela 6. Transições no Modelo em RdP da Estação de Inspeção	67
Tabela 7. Lugares no Modelo em RdP da Estação de Controle de Qualidade	69
Tabela 8. Transições no Modelo em RdP da Estação de Controle de Qualidade	69
Tabela 9. Lugares no modelo em RdP da Estação de Movimentação	71
Tabela 10. Transições no modelo em RdP da Estação de Movimentação	72
Tabela 11. Lugares no Modelo em RdP da Estação da Cadeia de Alimentação e Esteira de Movimentação	74
Tabela 12. Transições no Modelo em RdP da Cadeia de Alimentação e Esteira de Movimentação	74
Tabela 13. Parâmetros Denavit-Hartenberg do Manipulador	93
Tabela 14. Relação Entradas-Saidas Utilizadas para o Comando da Célula de Manufatura	104
Tabela 15. Relação Entradas-Saidas Utilizadas para o Comando do Manipulador	105
Tabela 16. Indicadores Implementados no Sistema Supervisor	108
Tabela 17. Controles Implementados no Sistema Supervisor	109
Tabela 18. Tarefas Disponibilizadas pela Arquitetura Proposta	119

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras Latinas

a - Distância entre os eixos x de dois sistemas de coordenadas

d - Distância entre os eixos z de dois sistemas de coordenadas

m - Número de lugares em uma Rede de Petri

n - Número de transições em uma Rede de Petri

r - Posto da matriz de Incidência

u_k - Vetor de controle de disparo

w - Peso do arco em uma Rede de Petri

A - Matriz de incidência de uma Rede de Petri

B_f - Matriz fundamental de circuito de uma Rede de Petri

I - Matriz identidade

M - Vetor de marcação

P - Conjunto de lugares de uma Rede de Petri

PN - Notação matemática de uma Rede de Petri

R - Matriz de transformação entre sistemas de coordenadas

T - Conjunto de transições de uma Rede de Petri

Letras Gregas

α - Ângulo entre os eixos x de dois sistemas de coordenadas

θ - Ângulo entre os eixos z de dos sistemas de coordenadas

Superescritos

+ - Sentido do arco em uma Rede de Petri

Subscritos

i - Identificação de uma transição

j – Identificação de um lugar

k - Iteração

Abreviações

ADACOR - ADAPtive holonic COntrol aRchitecture for distributed manufacturing systems

AI - Inteligência Artificial

ARE - Ambiente de Robótica Educacional

CAD - Projeto Assistido por Computador

CAI - Instrução Assistida por Computador

CAT - Teste Assistido por Computador

CIM - Manufatura Integrada por Computador

CLP - Controlador Lógico Programável

CMM - Gerenciamento de Manufatura Colaborativa

CNC - Controle Numérico Computadorizado

ComC - Componente de Comunicação

CPS - Sistema de Produção Colaborativo

CSAP - Sistema Automatizado de Produção Colaborativo

DeC - Componente de Decisão

DEVS - Especificação de Sistemas a Eventos Discretos

DSC - Ferramentas de Registro de dados e Controle Supervisorio

EAD - Educação a distância

EAP - Estrutura Analítica de Projeto

EJ - Empresa Junior

EMC - Educação mediada por computador

FBD - Diagrama de blocos Funcionais

FMC - Células Flexíveis de manufatura

GL - Grau de Liberdade

GRAFCET - Grafo Funcional de Comando Estado - Transição

IMH - Interfase Homem - Máquina

HMS - Sistema de Manufatura Holônico

HO - Holon Operacional

HP - Holon de Produto
HS - Holon Supervisor
HT - Holon de Tarefa
IES - Instituição de Ensino Superior
IL - Lista de Instruções
IMS - Sistema Inteligente de Manufatura
IP - Protocolo de Internet
LAN - Rede de Área Local
LCD - Dispositivo Lógico de Controle
LD - Diagrama Ladder
MG - Grafo Marcado
OLE - Vinculação e Incorporação de Objetos
OPC - OLE para Controle de Processos
PBL - Aprendizagem Baseada em Problemas
PD & I - Pesquisa, Desenvolvimento e Informação
PC - Parte de Comando
PIC - Componente de Interface Física
PO - Parte Operativa
RdP - Rede de Petri
RLL^{PLUS} - Lógica de Contactos Ladder com estágios
RTP - Protocolo de transporte em Tempo Real
SA - Sistema Automatizado
SAP - Sistema Automatizado de Produção
SCADA - Aquisição de dados, controle e Supervisão
SED - Sistema de Eventos Discretos
SFC - Diagrama de Funcionamento Seqüencial
SI - Sistema inteligente
SM - Máquina de estados
ST - Texto Estruturado
TCP - Protocolo de Controle de Transmissão
TIC - Tecnologias da Informação e Comunicação

UML - Linguagem Unificada de modelagem

VI - Instrumento Virtual

Siglas

ADEPA - Agência Nacional para o Desenvolvimento da Produção Automatizada

AFCET – Associação Francesa de Cibernética Econômica e Técnica

DPM – Departamento de Projeto Mecânico

FEM – Faculdade de Engenharia Mecânica

IEC – Comissão Internacional de Eletrotécnica

LAIR – Laboratório de Automação Integrada e Robótica

NIED – Núcleo de Informática Aplicada à Educação

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

.....

SUMÁRIO

RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	IX
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XIII
1. INTRODUÇÃO E APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.1. Justificativa	2
1.2. Objetivo Geral	4
1.3. Objetivos Específicos	4
1.4. Metodologia Proposta	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1. Conceitos Básicos	8
2.1.1. Automação Industrial	8
2.1.2. Sistemas Automatizados de Produção (SAP)	9
2.1.3. Sistemas de Produção Colaborativos (CPS)	12
2.1.4. Sistemas de Manufatura Holônicos (HMS)	13

2.2. Integração de Dispositivos Mecatrônicos para a Formação em Automação e Robótica	16
2.2.1. Formas de Apoio aos Processos de Formação e Pesquisa em Automação e Robótica	16
2.2.2. Tecnológicas Industriais Utilizadas no Processo de Formação em Automação	19
2.2.3. Tecnologias da Informação e Comunicação nos Processos de Formação em Automação e Robótica	21
2.2.4. Laboratórios Remotos ou a Distância (e-Laboratories ou WEBLAB)	24
2.3. Aplicações de Plataformas Integradas na Automação e Robótica	25
2.3.1. Plataformas para a Formação e Pesquisa em Automação	25
2.3.2. Plataformas WEBLAB Para Formação e Pesquisa em Robótica	28
2.4. Considerações Sobre o Capítulo 2	29
3. CONCEPÇÃO DA ARQUITETURA PROPOSTA PARA A INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS	31
3.1. Descrição da Problemática	31
3.2. Tecnologias em Automação e Robótica Propostas para Serem Integradas	34
3.3. Considerações na Proposta de Arquitetura de Integração	35
3.4. Arquitetura Proposta e Integração Hardware – Software	36
3.4.1. Projeto da Integração no Primeiro Nível de Modularidade (CSAP)	38
3.4.2. Projeto da Integração no Segundo Nível de Modularidade (CSAP/ADACOR)	40
3.5. Considerações Sobre o Capítulo 3	46
4. ESTUDO E MODELAGEM DINÂMICA DA ARQUITETURA PROPOSTA	47
4.1. Sistemas Dinâmicos de Eventos Discretos	47
4.2. Redes de Petri (RdP)	47
4.2.1. Definição de uma Rede de Petri	48

4.2.2.	Funcionamento de uma RdP	50
4.2.3.	Análises do Sistema Utilizando a Modelagem com RdP	51
4.3.	Grafo de Comando Etapa e Transição – GRAFCET	53
4.3.1.	Conceitos Básicos Metodologia Grafcet	55
4.3.2.	Funcionamento do GRAFCET	55
4.4.	Modelagem da arquitetura ADACOR	57
4.4.1.	Metodologia Para a Modelagem da Arquitetura ADACOR Proposta	59
4.5.	Modelagem com RdP dos Sub-Processos na Arquitetura Proposta	60
4.5.1.	Modelagem da Estação de Classificação	61
4.5.2.	Modelagem da Estação de Montagem	63
4.5.3.	Modelagem da Estação de Inspeção	66
4.5.4.	Modelagem da Estação de Controle de Qualidade	68
4.5.5.	Modelagem da Estação de Movimentação	70
4.5.6.	Modelagem da Cadeia de Alimentação e Esteira de Movimentação	73
4.6.	Análise de Alcançabilidade dos Modelos em RdP	75
4.6.1.	Análise de Alcançabilidade para Modelo em RdP da Estação de Classificação	76
4.6.2.	Análise de Alcançabilidade para Modelo em RdP da Estação de Montagem	78
4.6.3.	Análise de Alcançabilidade para Modelo em RdP da Estação de Inspeção	79
4.6.4.	Análise de Alcançabilidade para Modelo em RdP da Estação de Controle de Qualidade	80
4.6.5.	Análise de Alcançabilidade para Modelo em RdP da Estação de Movimentação	82
4.6.6.	Análise de Alcançabilidade para Modelo em RdP da Cadeia de Alimentação e Esteira de Movimentação	84
4.7.	Integração dos Modelos – Modelo em RdP de Um CSAP / ADACOR Funcional	85
4.8.	Considerações Sobre o Capítulo 4	86
5.	VALIDAÇÃO DA ARQUITETURA PROPOSTA ATRAVÉS DA IMPLEMENTAÇÃO DE PLATAFORMA AUTOMATIZADA	88

5.1. Descrição da Plataforma Utilizada para Validação	88
5.2. Projeto e Implementação da Parte Operativa (PO) da Plataforma	89
5.2.1. Célula de Manufatura	89
5.2.2. Sistema Robótico de Movimentação	91
5.3. Especificação e Implementação da Parte Comando (PC) da Plataforma Proposta	94
5.3.1. Implementação da Interface de Comando - Arquitetura CSAP / ADACOR	94
5.3.2. Implementação da Lógica da Parte de Comando	98
5.4. Implementação do Módulo de Supervisão e Comando	107
5.4.1. Projeto e Implementação do Módulo de Controle de Qualidade e Posicionamento	110
5.5. Teleoperação e WEBLAB	112
5.6. Considerações Sobre o Capítulo 5	115
6. UTILIZAÇÃO DA ARQUITETURA PROPOSTA PARA FORMAÇÃO E PESQUISA	117
6.1. Aplicação da Plataforma nos Processos de Formação e Pesquisa	117
6.2. Tarefas a Serem Disponibilizadas Através de Práticas	119
6.2.1. Aplicações Orientadas à Formação em Áreas Específicas	120
6.2.2. Aplicações em Processos de Pesquisa	121
6.3. Atividades Propostas no Curso de CLP da UNICAMP	122
6.3.1. Preparação das Atividades	122
6.3.2. Metodologia para o Desenvolvimento das Atividades	123
6.3.3. Avaliação do componente Prático das Atividades	123
6.3.4. Atividade Implementada com a Estação de Classificação da Célula de Manufatura	124
6.3.5. Atividade Implementada com o Sistema Robótico de Manipulação	125
6.4. Considerações Sobre o Capítulo 6	126

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	128
7.1. Conclusões do Trabalho de Dissertação	128
7.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	129
a) Trabalhos de pesquisa em educação, ciências sociais e psicologia	130
b) Comparação de diferentes modelos de ensino-aprendizagem	130
c) Implementação de um simulador de atividades práticas	130
d) Propostas de controle on-line da plataforma automatizada	131
e) Aproveitamento das características da arquitetura ADACOR	131
REFERÊNCIAS	132
ANEXO A – ESPECIFICAÇÃO GRAFCET TECNOLÓGICO DOS SUB-PROCESSOS PROPOSTOS NAS ESTAÇÕES	140
ANEXO B – PROGRAMA IMPLEMENTADO NO CLP DA CÉLULA DE MANUFATURA	143
ANEXO C – PROGRAMA IMPLEMENTADO NO CLP DO MANIPULADOR	148
ANEXO D – DIAGRAMA LÓGICO DO CIRCUITO MULTIPLEXADOR	158

1. INTRODUÇÃO E APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

A integração de dispositivos industriais junto com as modernas Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC's) motiva o desenvolvimento de novas ferramentas de apoio focadas no âmbito educacional, permitindo o surgimento de novas abordagens para formação em áreas com uma grande ênfase tecnológica como são a automação industrial e a robótica (DOMÍNGUEZ, 2005), (TZAFESTAS, 2006); dentro desse contexto o processo de ensino e treinamento completo e eficiente nestas disciplinas além da fundamentação teórica obtida nas salas de aula, precisa-se desenvolver em laboratórios didático-pedagógicos que possibilitem aos estudantes o desenvolvimento interativo e motivado de conhecimentos, habilidades e atitudes, levando em conta várias áreas correlacionadas de conhecimento tecnológico (D'ABREU, 2002) de tal forma a preparar profissionais competentes para o mercado do trabalho. Este desenvolvimento construtivista de atividades didáticas em Automação e Robótica oferece também um meio propício para que os pesquisadores nestas áreas possam formular e avaliar as suas hipóteses. (CHELLA, 2002), (YU, 2003).

Atualmente existem no mundo diversos fabricantes de dispositivos automatizados voltados à formação e pesquisa em áreas tecnológicas, os quais disponibilizam algumas funcionalidades em seus sistemas de controle. No entanto, a maioria dessas plataformas tem um elevado custo de aquisição, não apresentam arquitetura aberta ao desenvolvimento de novas práticas experimentais, nem abrangem normalmente as necessidades demandadas pelos pesquisadores. Estes pesquisadores, muitas vezes para escapar das limitações mecânicas próprias e particulares desses produtos, investem muito tempo em adaptações que acabam prejudicando o resultado final de sua pesquisa.

Ressaltam ainda, situações nas quais por causa destes dispositivos ou plataformas não integrarem normalmente mais de duas tecnologias, a faixa de aplicações experimentais que podem se realizar neles fica limitada a uma só área do conhecimento. Assim estas atividades não refletem situações normalmente vivenciadas na realidade do âmbito industrial atual, onde os Sistemas Automatizados de Manufatura exigem cada vez mais a integração tecnológica desde a

sua concepção até a sua implementação e manutenção. Do mesmo modo, tanto a proposta quanto os resultados de atividades de pesquisa ficam retidos a campos acadêmicos muito específicos.

Também, hoje em dia, muitas plataformas no mercado não disponibilizam capacidades de supervisão ou controle remoto via rede (LAN/INTERNET), por conseguinte essas só oferecem possibilidades para realizar práticas presenciais com horários, organização e duração pré-estabelecidos. Deste modo, a utilização e aproveitamento desses dispositivos ficam restritos a um número reduzido de pessoas (SAIRE, 2008), (ARIZA, 2008).

Todas estas limitações dificultam assim os processos de formação e pesquisa integral em Automação e Robótica. Isto direciona a necessidade de desenvolvimento de ferramentas e dispositivos automatizados facilmente re-configuráveis e de baixo custo de forma a dotar os centros de PD&I (Pesquisa, Desenvolvimento e Informação) de capacidades de formação, pesquisa e prestação de serviços à comunidade. Neste contexto, a modelagem e desenvolvimento de uma plataforma de experimentação através da integração modular de diversas tecnologias que ainda ofereça capacidade de implementação de Laboratórios Remotos, voltada para a formação e pesquisa em Automação e Robótica é bem-vinda dentro do contexto de aproveitamento de recursos e arquitetura aberta, mesmo que o ambiente adotado seja aquele que ofereça um menor custo da base mecânica, porém, permita realização de aplicações experimentais em automação.

A partir do desenvolvimento desse trabalho pretende-se estabelecer mecanismos de cooperação científica e tecnológica, na área de Automação Industrial, a partir da integração de tecnologias direcionadas segundo uma arquitetura de Sistema Automatizado de Produção (SAP).

1.1. Justificativa

Com o desenvolvimento deste trabalho se proverá ao LAIR (Laboratório de Automação Integrada e Robótica) da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP de uma plataforma modular com arquitetura de controle e supervisão genérica e aberta, baixo custo e funcionalidades operativas diferenciadas da maioria das plataformas existentes; a qual estará

orientada a apoiar e complementar a formação integral de estudantes e pesquisadores de graduação, pós-graduação e extensão nas áreas de: Controle e Automação, Robótica, Mecatrônica ou ainda Computação.

A proposta de integração tecnológica em uma única aplicação de arquitetura genérica é validada através da modelagem, análise e desenvolvimento de uma plataforma automatizada de experimentação que oferecerá a possibilidade de realizar aplicações práticas em função da Modularidade e Flexibilidade da arquitetura proposta. Essas atividades práticas vão utilizar a integração de diferentes tecnologias, ao contrário de tecnologias isoladas, normalmente utilizadas nos cursos de Automação e Robótica convencionais. A arquitetura holônica de Sistema Automatizado de Produção Colaborativo - CSAP/ADACOR (apresentada na secção 2.1.4.) proposta na integração permitirá experimentos práticos completos dentro de um ambiente de aprendizagem que exemplifica tarefas rotineiras (Movimentação, Classificação, Montagem, Inspeção, Controle de Qualidade e Supervisão) dos Sistemas de Manufatura Industrial atuais.

A motivação para o desenvolvimento desta plataforma surge do anseio de disponibilizar e aproveitar recursos tecnológicos de forma a facilitar e complementar o processo de construção não só de conhecimento, mas de competências em Automação Industrial a estudantes de forma tanto presencial quanto a distância. Aliás, esta integração tecnológica possibilita uma pesquisa estruturada onde a versatilidade, e a modularidade (ao contrário das aplicações comerciais e com arquitetura fechada existentes) estimula a concepção e realização de atividades práticas e a troca de informações entre as diferentes áreas da Automação.

A capacidade de realizar o monitoramento e/ou comando do processo completo de montagem que tem lugar na plataforma por meio de uma conexão remota via rede (Laboratório Remoto - WebLab), permitirá que usuários e grupos de ensino e pesquisa em diferentes lugares possam realizar práticas com a plataforma e compartilhar informação rapidamente. Por outro lado, a iniciativa do projeto propõe um dispositivo experimental que contribui ao aproveitamento dos resultados de grupos isolados de formação e capacitação profissional, acelerando o seu desenvolvimento e gerando assim uma massa crítica que melhor atenda a indústria.

Os recursos utilizados na pesquisa (custos, hardware e software) são otimizados direcionando-os à integração de tecnologias CSAP no projeto proposto. Assim, este trabalho tem como ponto de partida o desenvolvimento deste tipo de aplicações ao invés de depender de soluções proprietárias de alto custo envolvido e difíceis de serem modificadas.

1.2. Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho de pesquisa é: Propor uma arquitetura para a integração de diversas tecnologias em Automação em uma plataforma automatizada de experimentação, a qual permita a proposição de atividades práticas de forma a apoiar os processos de formação e pesquisa em Automação Industrial e Robótica.

1.3. Objetivos Específicos

Para cumprir o objetivo proposto, os seguintes objetivos específicos deverão ser alcançados:

1. Integrar em uma única plataforma as tecnologias de: Sensores e Atuadores Industriais, Manipuladores Robóticos, Processamento de Imagens, Supervisão e Controle; por meio de eletrônica reprogramável estruturada através de uma arquitetura modular de Sistema Automatizado de Produção Colaborativo (CSAP);
2. Modelar, analisar e simular o comportamento dinâmico dos sub-processos em cada modulo da arquitetura proposta, considerando-os como Sistemas de Eventos Discretos (SED), visando uma implementação de controle modular que permita flexibilidade na integração de processos complexos;
3. Validar a arquitetura proposta implementando-a completamente em uma Plataforma Automatizada (hardware - software);

4. Possibilitar a proposta de diferentes atividades experimentais (presenciais e remotas) em Automação e Robótica a partir da modularidade e flexibilidade da plataforma desenvolvida.

1.4. Metodologia Proposta

O desenvolvimento deste trabalho será realizado no LAIR (Laboratório de Automação Integrada e Robótica), Departamento de Projeto Mecânico da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. A validação da arquitetura levará em conta tanto a modelagem, análise e simulação dos sub-processos em cada módulo projetado quanto a implementação hardware - software da arquitetura proposta e dos sub-processos modelados anteriormente. O trabalho é desenvolvido levando em consideração várias etapas de estudos e de implementações, organizadas segundo a Estrutura Analítica de Projeto (EAP) apresentada a seguir:

1) Revisão Bibliográfica e Fundamentação Teórica

Nesta etapa são apresentados os conceitos básicos da automação e dos sistemas automatizados de produção desde uma arquitetura centralizada CIM (Manufatura Integrada por Computador) até as arquiteturas holônicas e distribuídas que permitem a estes sistemas se adaptar rapidamente às mudanças do ambiente. Também são discutidas algumas tecnologias que têm sido integradas a fim de apoiar os processos de formação em Automação e Robótica. Finalmente, são apresentados alguns exemplos de plataformas existentes que servem a este propósito.

2) Concepção da Arquitetura Proposta para Integração de Tecnologias

Na concepção da plataforma automatizada é feita uma seleção das tecnologias e da arquitetura através da qual estas tecnologias são integradas em uma única aplicação, de forma a exemplificar um processo de manufatura real. A tecnologia chave para realizar esta integração em uma arquitetura CSAP (Sistema Automatizado de Produção Colaborativo) é a eletrônica reprogramável estruturada. A forma de realizar esta integração leva em conta que cada tecnologia é agregada através de um módulo e cada um desses por sua vez aporta uma área de aplicação à plataforma, esta integração é realizada segundo duas abordagens (Tecnológica e Pedagógica),

portanto cada módulo pode ser utilizado para realizar atividades experimentais de forma independente dos outros ou integrado total ou parcialmente na aplicação.

3) Estudo e Modelagem Dinâmica da Arquitetura Proposta

Nesta etapa é realizado um estudo das Redes de Petri (RdP) como uma ferramenta gráfica e matemática para realizar a modelagem dinâmica, simulação e análise de sistemas de eventos discretos, e do grafo de etapas e transições (GRAFCET) para a especificação do funcionamento de processos, orientada à implementação em dispositivos de controle. Também é feita uma descrição e representação em RdP de cada um dos sub-processos na arquitetura proposta visando uma posterior modelagem e análise de alcançabilidade dos mesmos. Assim, as principais atividades desenvolvidas nesta etapa foram as seguintes:

- Estudo das Redes de Petri para a modelagem de sistemas de eventos discretos;
- Estudo do grafo GRAFCET para a especificação do funcionamento de sistemas automatizados;
- Modelagem com RdP dos sub-processos na arquitetura proposta levando em conta uma arquitetura holônica (CSAP / ADACOR);
- Análise de alcançabilidade de cada sub-processo;
- Integração dos modelos em RdP em um sistema CSAP / ADACOR.

4) Validação da Arquitetura Proposta através da Implementação de Plataforma Automatizada

O projeto e implementação da interface de comando leva em conta tanto o tipo quanto o número de entradas e saídas que são necessárias para o funcionamento de cada módulo e para a integração e comunicação dos dois módulos da parte operativa (Célula de Manufatura e Manipulador Robótico). A implementação do software em eletrônica reprogramável estruturada é direcionado pelas premissas de modularidade e de estrutura aberta a fim de facilitar modificações futuras e novas atividades e iniciativas de pesquisas. Na implementação da parte operativa são realizadas atividades tanto de projeto e implementação quanto de modificação nos dispositivos existentes no LAIR, com o intuito de desenvolver os módulos a serem integrados através de uma

arquitetura de sistema automatizado de produção. As principais atividades desenvolvidas nesta etapa foram:

- Projeto e implementação das modificações ao sistema de controle fechado de uma célula de manufatura, substituindo a sua placa de controle existente por um sistema aberto;
- Projeto e montagem de um manipulador robótico para manipulação de peças na plataforma;
- Modificações no projeto mecânico, através da construção e implementação de novas peças;
- Projeto e implementação da interface física de comando da plataforma;
- Modelagem matemática do manipulador robótico de dois graus de liberdade;
- Especificação e implementação da lógica da parte de comando:
 - a) Levantamento de entradas e saídas e determinação das variáveis necessárias no processo de montagem e movimentação de produtos;
 - b) Seleção dos Controladores Lógicos Programáveis (CLP's) e distribuição das entradas e saídas necessárias;
 - c) Especificação dos programas dos sub-processos em cada módulo utilizando eletrônica reprogramável estruturada.
- Projeto e implementação do módulo de supervisão e comando, e do seu modulo associado de controle de qualidade;
- Disponibilização da plataforma através de Laboratório Remoto (WebLab);
- Testes para verificação da funcionalidade do projeto integrado.

5) Utilização da Arquitetura Proposta para Formação em Automação

Nesta etapa são descritas a metodologia da proposta, a preparação e o desenvolvimento de algumas atividades experimentais com a plataforma, de forma a apoiar os processos de formação nas áreas de Automação e Robótica. Foram desenvolvidas as seguintes atividades:

- Proposição e descrição de atividades para apoio aos processos de formação e pesquisa em Automação Industrial e Robótica;
- Programação e realização de atividades propostas em um curso de pós-graduação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Conceitos Básicos

A automação surge da substituição de operadores humanos em atividades de controle de máquinas e processos, empregando para isto diferentes elementos tecnológicos mecânicos e/ou eletrônicos para obter as informações necessárias (sensores), processá-las (elemento de decisão) e efetuar as ações calculadas sobre o processo (atuadores). O conceito de Automação é diferente do conceito de Automatização, este último está ligado à realização de movimentos mecânicos e repetitivos dos atuadores sem levar em consideração informações do meio sobre o qual esses estão atuando (ação cega e sem capacidade de correção), portanto é sinônimo de mecanização. Na automação o sistema é capaz atuar levando em conta as informações dos sensores (realimentação) podendo então executar ações corretivas e aumentando a eficiência do processo, sendo assim capaz de se comportar como um operador humano (AIHARA, 2000).

2.1.1. Automação Industrial

A automação assim definida aplicada ao setor de manufatura nas linhas de produção denomina-se Automação Industrial, sendo esta uma área multidisciplinar que envolve linguagens de programação (computação), plataforma de comando (eletrônica) e dispositivos de atuação (mecânica). A Automação Industrial pode ser dividida em três categorias segundo o volume de produção e a flexibilidade da linha de produção devida à informatização: rígida, flexível e programável (AIHARA, 2000).

Entre os elementos que constituem os Sistemas Automatizados além dos sensores e atuadores estão: sistemas de controle e supervisão, sistemas de transmissão e coleta de dados e aplicações de software para a programação do funcionamento do processo. A automação também pode proporcionar um fluxo contínuo de informação entre os diferentes departamentos de uma empresa, requerendo a conectividade adequada entre todos os setores da pirâmide CIM (Manufatura Integrada por Computador); visando desta forma uma maior produtividade e,

sobretudo, uma maior flexibilidade (MARTINS, 1998) alcançando assim uma integração entre a gestão e a produção. Atualmente as aplicações da automação não só estão focadas no setor industrial, mas também nos setores comercial, residencial e financeiro.

Dentro deste contexto, a aplicação e modernização da automação nas indústrias são para estas a única possibilidade de sobrevivência, fazendo com que os sistemas de produção se tornem mais eficientes (menor consumo de recursos energéticos, materiais, humanos e financeiros) e possibilitando um maior controle de qualidade, repetibilidade, velocidade na produção, facilidade de manipulação e alívio nas condições de trabalho dos operários, segurança, confiabilidade e produtividade do processo; melhorando assim a competitividade dos produtos manufaturados no mercado atual onde as exigências dos consumidores são cada vez mais importantes e os produtos são muito diferenciados e com um menor ciclo de vida (ARAUJO, 1997).

2.1.2. Sistemas Automatizados de Produção (SAP)

Quando se aplica a Automação para transformar e modernizar os Sistemas de Produção a fim de automatizar não só tarefas ou processos individuais, mas conjuntos de processos integrados surgem os SAP como uma evolução dos Sistemas Automatizados (SA), ao empregar a filosofia de Manufatura Integrada por Computador (CIM); integrando desta forma as atividades de supervisão e gestão à produção para obter uma maior flexibilidade e produtividade do Sistema de Produção. Em um SAP existe fluxo de produtos, energia, informações e matéria prima. (BAFFI, 2001).

2.1.2.1. Arquitetura de um SAP

Visando uma padronização a IEC (International Electrotechnical Commission) estabeleceu uma nomenclatura internacional para a correta especificação dos SA. A norma internacional IEC 61131-3 considera os SA compostos de duas partes (AIHARA, 2005), como se observa na Figura 1.

Parte Operativa (PO): Corresponde à parte física do sistema a automatizar, que opera sobre a matéria prima e o produto. Ela é constituída pelos atuadores (pistões, motores, bombas, etc) que realizam operações agindo sobre os materiais para transformá-los, transportá-los ou armazená-los.

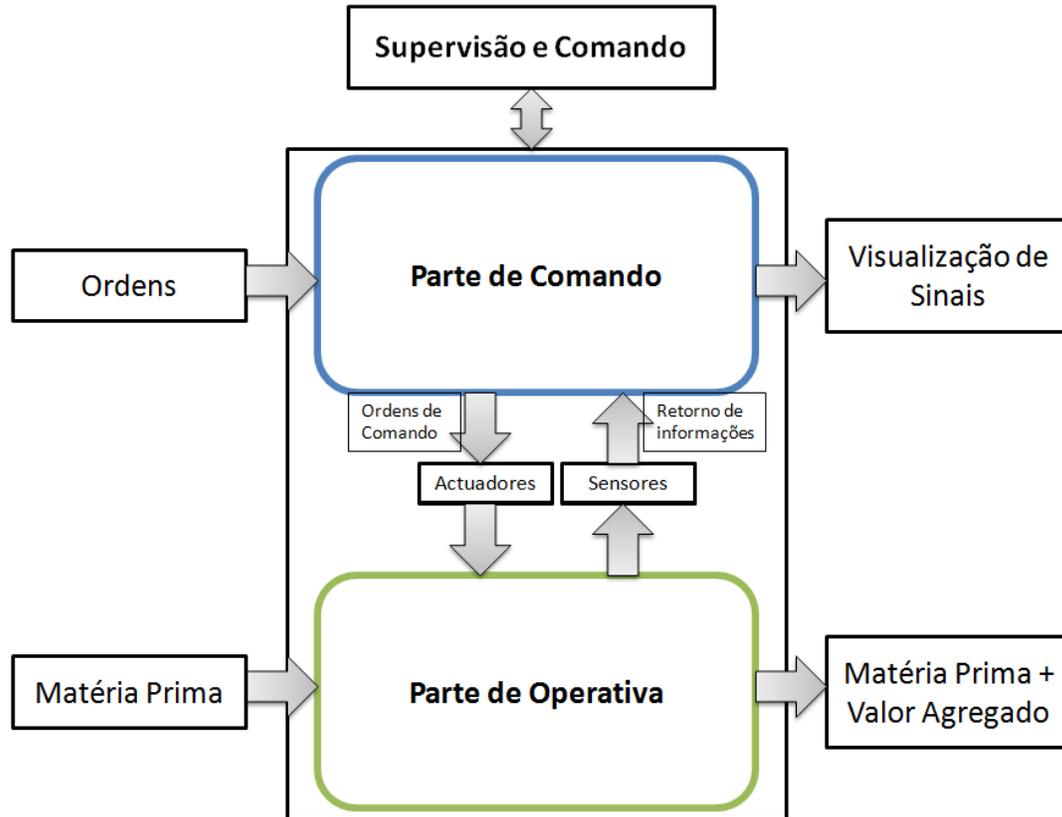


Figura 1. Arquitetura de Sistema Automatizado de Produção (SAP)

Parte de comando (PC): É a responsável pelo controle do sistema. Recebe as informações vindas do processo a ser controlado e/ou do operador, e as processa gerando sinais de aviso e enviando informações (Ordens de Comando) aos atuadores coordenando assim as ações da parte operativa (PO), (ROSARIO, 2005).

Levando-se em consideração que os sinais de saída de todos os sensores e os sinais de entrada que vão para todos os atuadores são conectadas à parte de comando, pode se perceber a importância da comunicação de dados nos SA. (MARTINS, 1998).

Os Sistemas Automatizados podem ser classificados como:

- **Automatismos Combinatórios:** O estado das saídas depende do estado atual das entradas;
- **Automatismos Seqüenciais:** O estado das saídas além do estado atual das entradas no instante (t) depende também do estado das entradas no instante ($t-1$).

2.1.2.2. Especificação de SA

Para especificar corretamente um SA seqüencial utiliza-se o caderno de tarefas (AIHARA, 2005). O caderno de tarefas de um SAP é a descrição do comportamento do mesmo em função da evolução das etapas e os eventos do processo a ser automatizado. Esta descrição é dividida em dois níveis sucessivos e complementares.

Nível 1 – Especificação Funcional: Descreve de forma literal as funções que o automatismo deve realizar em função das diferentes situações que podem acontecer.

Nível 2 – Especificação Tecnológica e Operacional: Descreve detalhadamente os dispositivos tecnológicos e materiais utilizados em cada etapa do processo, como a natureza exata de sensores e atuadores, e as informações acerca do ambiente de atuação que possam alterar o processo (temperatura, umidade, pressão, etc), (ARAUJO, 1997).

Os CSAPs atuais possuem certas características que têm que ser corretamente representadas por qualquer metodologia selecionada para especificá-los:

- 1) Possuem estados e transições;
- 2) Estão equipados com sensores e atuadores;
- 3) Estão governados por relações causais;
- 4) Possuem comportamento determinístico;
- 5) Alguns dos estados do sistema podem-se repetir (EL RHALIBI, 1994).

Por isto uma linguagem orientada à especificação destes sistemas deve atender as seguintes características:

- Possuir uma base formal, visando uma interpretação exata e precisa;
- Clareza, visando facilitar a comunicação entre todos os envolvidos na modelagem;
- Possibilitar a construção de modelos que obedeçam ao principio de contextualização e totalidade.

Levando em consideração essas necessidades para uma especificação (Gráfica e/ou Textual) sem ambigüidade no processo de implementação e manutenção da parte de comando (PC) dos SAP, foi criada a IEC, esta comissão foi a responsável pela especificação das linguagens baseadas na hipótese de sincronismo, e orientadas à implementação do sistema de controle dos SAP. Segundo a norma IEC 1131-3 existem cinco linguagens padronizadas para

especificar formalmente a parte de comando dos SAP, visando sua implementação em Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) (AIHARA, 2005).

Linguagens Gráficas:

1. Diagrama de Funções Seqüenciais (SFC - Sequential Function Chart) também conhecidos como GRAFCET;
2. Diagrama Ladder (LD - Ladder Diagram) ou diagrama de contatos;
3. Diagrama de Blocos de Funções (FBD - Function Block Diagram).

Linguagens Textuais:

4. Lista de Instruções (IL - Instruction List) ou mnemônicos, baseados em comandos - load, store, move, add; esta é uma linguagem de baixo nível;
5. Texto Estruturado - (ST - Structured Text) ou parâmetros idiomáticos. É uma linguagem de alto nível similar ao Pascal.

2.1.3. Sistemas de Produção Colaborativos (CPS)

Devido à mudança de uma perspectiva econômica local para uma economia global, desde a última década do século XX os ambientes de manufatura também têm evoluído nas suas dimensões econômica, técnica e organizacional; fazendo com que as tendências na Automação Industrial tenham que se adaptar a uma necessidade de produção em pequenos e medianos lotes, com uma incrementada diferenciação de famílias de partes e/ou produtos, sendo estes quase customizados às necessidades de cada cliente e acrescentando também valor ao componente intangível dos produtos (software, serviços de ajuda incluídos, suporte on-line, etc).

Portanto novos paradigmas como a Gestão da Manufatura Colaborativa (CMM) e conseqüentemente os Sistemas Automatizados de Produção Colaborativos (CSAP) surgem como uma evolução e uma resposta às novas necessidades não satisfeitas completamente pelo conceito original CIM; o qual proporcionava aos SAP um grau muito pequeno de flexibilidade e integração de hardware e software, baseado em uma arquitetura de controle fortemente hierárquica¹ e centralizada e em uma estrutura de planejamento seqüencial, que não permitia a estes sistemas se adaptar rapidamente às mudanças do ambiente.

¹ Hierárquica = Ordenada ou organizada (verticalmente) de acordo a determinados critérios.

Os CSAP além de melhorar as características anteriores (flexibilidade e possibilidade de integração) acrescentam agilidade, modularidade, tolerância a falhas, possibilidade de reutilização, interação entre componentes e gestão da rentabilidade aos Sistemas de Produção. Desta forma os CSAP podem atingir os objetivos globais e locais de manufatura, baseados em uma estrutura já não hierárquica, mas heterárquica². Esta nova abordagem está baseada no desenvolvimento e integração de tecnologias emergentes como: controle orientado a objetos (descentralizado), Sistemas Inteligentes de Manufatura (IMS) e Mecatrônica, Figura 2. As características de controle e arquitetura modular, distribuída e descentralizada destes CSAP exigem também a implementação de capacidades de supervisão e controle locais e remotas. (COLOMBO et al., 2004).

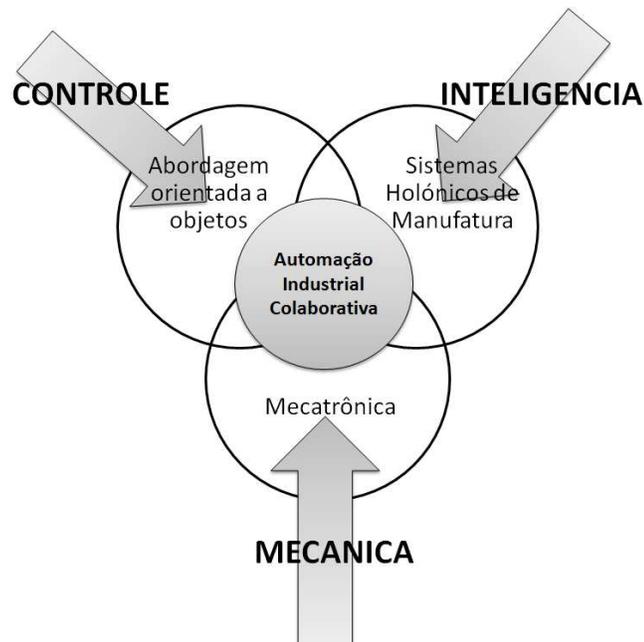


Figura 2. Conceito de Automação Industrial Colaborativa

2.1.4. Sistemas de Manufatura Holônicos (HMS)

Dentro dos IMS, os Sistemas de Manufatura Holônicos (HMS) têm uma estrutura holárquica³ ou holônica que faz com que os CSAP possuam uma grande modularidade (hardware - software), isto permite tanto a *Autonomia* quanto a *Cooperação* entre os distintos hólons, os quais são controlados de forma distribuída (VAN BRUSSEL et al, 1998). Por conseguinte, os HMS possibilitam capacidades de auto-configuração e facilidades de ampliação e modificação.

² Heterárquica = Com **distribuição** (vertical e horizontal) de funções e responsabilidades (COLOMBO et al, 2004).

³ Holárquica = Baseada em um sistema de **hólons** que podem cooperar para alcançar um objetivo global (VAN BRUSSEL et al, 1998).

Uma das arquiteturas propostas na literatura de modo a exemplificar a abordagem HMS / CSAP é a arquitetura colaborativa ADACOR (ADAPtive holonic COntrol aRchitecture for distributed manufacturing systems) (COLOMBO et al., 2004) a qual é descrita a seguir.

2.1.4.1. Sistemas Automatizados de Produção com Arquitetura ADACOR

A confiabilidade, agilidade e o grau de flexibilidade de um CSAP não é só condicionado pela confiabilidade, agilidade e flexibilidade dos seus componentes mecatrônicos individuais, mas depende fundamentalmente da confiabilidade e flexibilidade do controle e da arquitetura de automação (hardware). Um CSAP com arquitetura ADACOR organiza a utilização dos seus módulos (hólons), sincronizando a utilização de recursos, sendo dinamicamente reconfigurável e, portanto, capaz de produzir um grande número de produtos e/ou famílias de peças com mínimo esforço na mudança dos seus componentes físicos (flexibilidade). Desta forma um CSAP / ADACOR poderá se adaptar facilmente a um ambiente industrial estocástico, caracterizado pela ocorrência freqüente de perturbações inesperadas (LEITAO, 2005). A arquitetura de controle colaborativa ADACOR foi proposta, desenvolvida e implementada no Instituto Politécnico de Bragança (Portugal) levando em conta um conjunto de hólons (definição apresentada a seguir).

Definição de Hólon

Um hólon é um módulo autônomo, mas com capacidade de cooperação quando integrado para formar (construir ou integrar) um sistema de manufatura. É formado por um componente de processamento de informação e muitas vezes também por um componente físico (recurso físico). Cada hólon pode representar um componente de manufatura que pode ser físico (máquinas de Controle Numérico Computadorizado - CNC, robôs, etc) ou uma entidade lógica (produto, ordem, etc). Um hólon também pode ser parte de outro hólon (VAN BRUSSEL et al, 1998) contribuindo com seu funcionamento local aos objetivos globais de controle (LEITAO, 2006). Um hólon ADACOR genérico, Figura 3 é composto de:

- **Dispositivo Lógico de Controle (LCD):** É o responsável pelas atividades do hólon e é formado por três componentes principais: Decisão (DecC), Comunicação (ComC) e Interface Física (PIC).
- **Recurso Físico:** Caso exista um recurso físico, este deverá ser capaz de executar tarefas de manufatura.

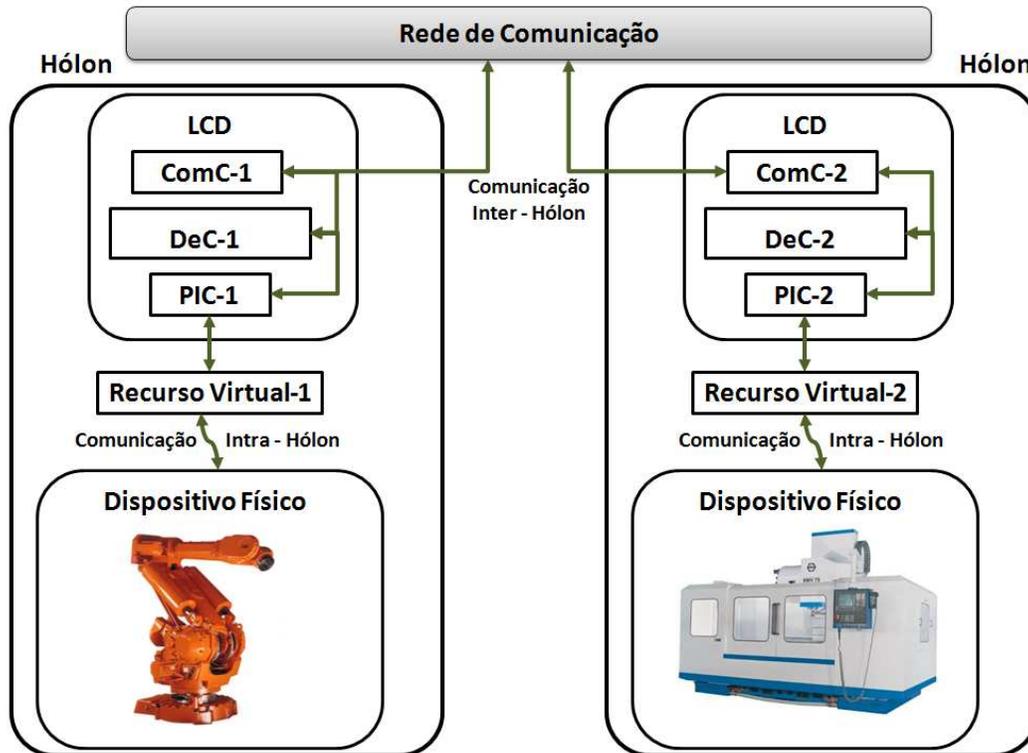


Figura 3. Modelo da arquitetura ADACOR

A arquitetura ADACOR adiciona o elemento de supervisão e controle à arquitetura holônica genérica (VAN BRUSSEL, 1998), definindo desta forma na sua arquitetura quatro classes com o intuito de criar objetos (hólons): Hólón de Produto (HP), Hólón de Tarefa (HT), Hólón Operacional (HO) e Hólón Supervisor (HS), esse último introduz cooperação e otimização global dentro do controle descentralizado.

Os CSAP / ADACOR não são completamente descentralizados nem hierárquicos, mas possuem um equilíbrio dinâmico entre a centralização e a total distribuição. Estes sistemas podem mudar seu estado entre estacionário ou transiente dependendo da aparição de perturbações, em cujo caso a sua arquitetura vai se tornar heterárquica enquanto o sistema voltar a seu estado original, se adaptando assim às perturbações de um ambiente volátil. A modelagem completa da arquitetura ADACOR será apresentada no Capítulo 4. Uma arquitetura ADACOR faz com que o sistema permita uma fácil e rápida integração de qualquer novo dispositivo assim como a melhora de holóns existentes, sem ter que reinicializar ou reprogramar o processo completo, significando em uma maior flexibilidade e reconfigurabilidade do sistema projetado (LEITÃO, 2005), (COLOMBO, 2004).

2.2. Integração de Dispositivos Mecatrônicos para a Formação em Automação e Robótica

Muitas vezes, na formação tradicional verifica-se que a preocupação maior está centrada somente na apresentação na sala de aula dos conceitos contidos em um currículo, provocando assim um distanciamento cada vez maior entre o que é ensinado e a realidade industrial do mundo moderno, fazendo com que o estudante embora entenda a teoria, fique incapaz de desenvolver as competências necessárias para aplicar esses conhecimentos na solução eficiente de um problema (COSMA, 2003). No entanto, uma formação com uma grande presença de metodologias ativas de interação e experimentação, segundo Felder (1995) vai refletir em uma maior e mais eficiente assimilação do conhecimento no estudante (lembra-se 20% do que se ouve, mas 90% do que se faz e se diz).

2.2.1. Formas de Apoio aos Processos de Formação e Pesquisa em Automação e Robótica

Na atualidade com o intuito de complementar a instrução teórica, as Instituições de Ensino Superior (IES) implementam várias estratégias no sentido de propiciar a integração dos estudantes com as tecnologias usadas no meio industrial (Figura 4).

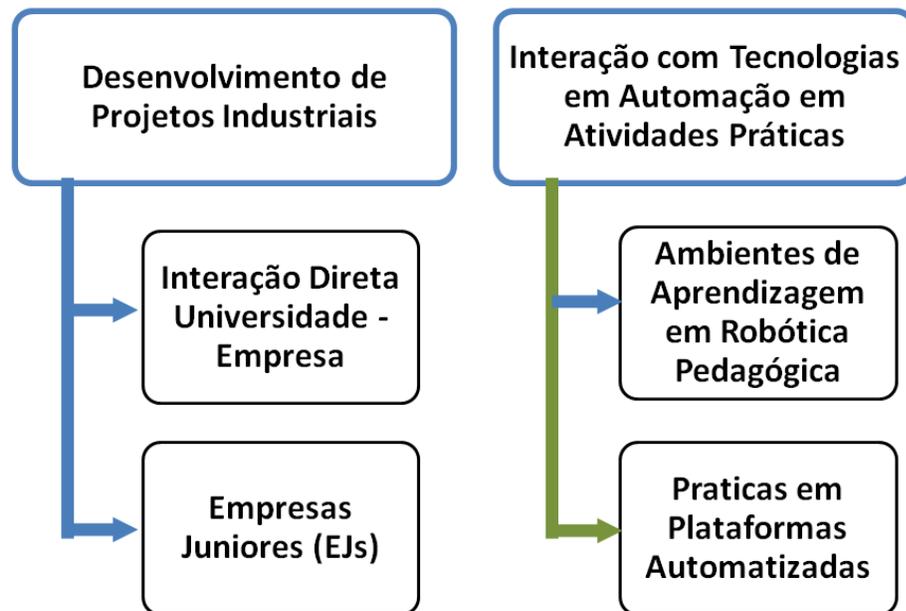


Figura 4. Formas de Apoio aos Processos de Formação e Pesquisa em Automação

2.2.1.1. Desenvolvimento de Projetos Industriais

A primeira estratégia pedagógica está focada no sentido de trazer a Indústria à Faculdade, pode-se citar a implantação da Florida's First Coast Manufacturing Innovation Partnership (MIP) implementada pela University of North Florida (UNF) e indústrias de manufatura da região do norte da Florida, esta interação colaborativa Indústria - Faculdade promoveu nos estudantes a capacidade empreendedora ao desenvolverem projetos conjuntos de aplicação real (COX, 2006).

Outro enfoque utilizado para preencher a lacuna entre o campo teórico e prático na formação tem sido a implementação de Empresas Juniores (EJs) no interior das IES, as quais funcionam como um laboratório educacional inovador orientado por professores, onde o estudante vai desenvolver habilidades fundamentais para sua vida profissional como: disciplina profissional, atividades de trabalho em equipe, liderança, comunicação interpessoal e negociação tendo contato com o mundo corporativo e adquirindo a experiência exigida pelo mercado do trabalho enquanto desenvolve projetos na sua área de formação, consultorias, assessorias e assiste a cursos de capacitação profissional (BARBOSA, et al., 2006).

2.2.1.2. Interação com Tecnologias em Automação em Atividades Práticas

Na atualidade a integração de dispositivos industriais junto com as tecnologias modernas da informação e comunicação (TIC's) motiva o desenvolvimento de novas ferramentas de apoio focadas no âmbito educacional, permitindo o surgimento de novas abordagens para formação em áreas com uma grande ênfase tecnológica como a automação industrial e a robótica (TZAFESTAS, 2006).

Em automação industrial o desenvolvimento de atividades práticas segundo uma abordagem construtivista, de forma a possibilitar a interação dos estudantes com as tecnologias integradas utilizadas nos sistemas de produção propicia um ambiente de aprendizagem ativa e colaborativa, na qual o estudante além de realizar atividades práticas pode também formular hipóteses e validá-las por meio da experimentação (D'ABREU, 2002). Esta metodologia de apoio à formação e pesquisa utilizando uma integração de dispositivos mecatrônicos é aplicável em uma variedade de engenharias tais como mecânica, elétrica, mecatrônica, industrial, computação, automação e controle (YU, 2003).

No caso da formação de conceitos iniciais em áreas tecnológicas, um enfoque que pode ser aplicado facilmente à formação básica de crianças e jovens está fundamentado no CONSTRUCIONISMO, o qual propõe um aprendizado baseado na construção ativa por parte do aprendiz de objetos significativos para ele e sua comunidade. Um exemplo desse enfoque é a Robótica Pedagógica (CHELLA, 2002), a qual é definida como uma atividade de concepção, construção e operação, para fins pedagógicos, de objetos tecnológicos sendo estes reproduções reduzidas, fiéis e significativas dos processos e instrumentos robóticos utilizados normalmente no ambiente industrial (PAPERT, 1994 apud D'ABREU, 2002), (ODORICO, 2005). Esta abordagem, utilizada por profissionais na área da informática aplicada à educação oferece apoio no processo de aquisição de conceitos em ambientes de aprendizagem formais e não formais, ampliando e diversificando ainda mais a utilização do computador como ferramenta auxiliar no processo de formação (D'ABREU, 2002).

O fundamento pedagógico que motiva a interação com tecnologias industriais através da realização de atividades práticas, a fim de apoiar eficazmente os processos de formação e pesquisa em Automação está baseada na teoria cognitiva do CONSTRUTIVISMO de Jean Piaget, a qual propõe que o conhecimento não é algo que possa ser transmitido, mas vai se construindo de maneira pessoal através da experimentação e manipulação por parte do indivíduo dos objetos de estudo, construindo novos conceitos com base nos anteriores (SEITZINGER, 2006).

A partir desta última abordagem, uma estratégia eficaz para propiciar um complemento prático ao processo de formação em Automação e Robótica é a interação dos estudantes com tecnologias industriais mediante plataformas integradas de aprendizagem que possibilitem a realização de práticas experimentais com diversos dispositivos industriais. Esta estratégia levada em consideração neste trabalho requer que essas plataformas possuam uma arquitetura de hardware e controle que possa representar os SAPs atuais com o intuito de exemplificar fielmente a problemática industrial. Assim, estas atividades práticas poderão exemplificar situações usualmente encontradas no âmbito profissional, desenvolvendo nos estudantes não só um conhecimento teórico, mas também competências tecnológicas para afrontar o mercado do trabalho. A realização destas atividades poderá ser presencial e/ou ainda via internet (DOMÍNGUEZ, 2005).

2.2.2. Tecnológicas Industriais Utilizadas no Processo de Formação em Automação

A relevância das tecnologias presentes no contexto industrial moderno faz indispensável o conhecimento aprofundado destas, mas já não de forma isolada senão integradas de maneira sinérgica visando o projeto de Sistemas Automatizados de Produção Colaborativos (CSAP), essa integração deve ser apresentada no conteúdo curricular das cátedras de Automação Industrial e Robótica ministradas nas IES com o intuito de formar profissionais que realmente possam atender as necessidades e o mercado do setor industrial, onde a integração das máquinas, tarefas e processos completos em Células Flexíveis de Manufatura (FMC) substituíram há muito tempo às estações de trabalho isoladas no chão de fábrica (ARAUJO, 1997).

2.2.2.1. Tecnologias no Processo de Formação em Automação Industrial

Dentro das tecnologias “reais” da área da Automação de manufatura que são utilizadas como ferramenta de complemento ao processo de formação em Automação podem-se destacar: Robótica modular, Manipuladores industriais, Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), Sensores e Atuadores, Sistemas de Supervisão, Monitoramento e Controle, Laboratórios Remotos, Visão Artificial, Ferramentas de simulação da produção, Modelamento e desenvolvimento de sistemas avançados de manufatura, entre outras (MOLINA, 2007).

Também são utilizadas ferramentas de software para o desenvolvimento, modelagem e simulação de sistemas e processos na área de Automação de Manufatura como: LabVIEW™, MATLAB™, Automation Studio™, Working Model, integradas há algum tempo no processo de formação (SAIGYN, 2004).

Além disso, na atualidade são integradas cada vez mais no processo de formação em automação as tecnologias de Aquisição de Dados, Controle e Supervisão (SCADA); um exemplo foi a implementação de práticas de laboratório na Faculdade de Engenharia Elétrica e Eletrônica do Polytechnic of Bari-Italy (ADAMO et al, 2007) que utiliza o software LabVIEW™ junto com um Datalogging and Supervisory Control Toolset (DSC) com o intuito de desenvolver uma Interface Homem – Máquina (HMI) para realizar o controle do nível do líquido de um tanque. Sistemas de Supervisão e Controle também são implementados junto com tecnologias de Telepresença e Teleoperação, visualização e transmissão de imagens e dados para o controle de

SAPs (COSSO, 2002). Com o intuito de solucionar o problema da conectividade entre os diferentes componentes de um SAP são empregadas há muito tempo tecnologias como: barramento de campo e de controle, Ethernet Industrial, Redes de Área Local (LAN) sem fio e protocolos de troca de dados.

2.2.2.2. Tecnologias no Processo de Formação em Robótica Industrial

A Robótica Industrial dentro do contexto educacional propicia a aquisição de conceitos através da realização de atividades com dispositivos mecânicos/eletrônicos e software, permitindo desenvolver o raciocínio lógico e a criatividade, sendo uma ferramenta multidisciplinar de aprendizagem. Embora os robôs móveis fossem os primeiros a serem utilizados no processo de formação, hoje em dia, está-se acrescentando a utilização de manipuladores robóticos dentro dos trabalhos práticos experimentais que suportam os cursos de Automação, Robótica e ainda Computação nos centros de formação e pesquisa. Existem dois enfoques bem conhecidos na utilização desses robôs como apoio ao processo de formação em Robótica Industrial.

O primeiro deles considera a Robótica Industrial como uma integração previa de diversas disciplinas, nesta abordagem os manipuladores industriais são utilizados para realizar movimentos previamente programados (CHELLA, 2002). Este enfoque traz consigo a possibilidade de estudar conceitos que seriam quase impossíveis de apresentar de uma maneira só teórica ou com tecnologias isoladas, sem a sua implementação baseada na interação com um robô industrial, tais como modelagem e controle de manipuladores industriais e planejamento de trajetórias (COSMA, 2003).

Um segundo enfoque está baseado na implementação de ambientes educacionais dentro do contexto da Robótica Pedagógica para propiciar o estudo de diversos conceitos envolvidos no funcionamento de um robô (mecânica, cinemática, dinâmica, eletrônica, informática, inteligência artificial entre outras). Isto é alcançado por meio da realização de atividades de construção e programação destes dispositivos. Existem diversos kits de desenvolvimento como LEGOTM, ROBIXTM, etc, os quais se podem utilizar no processo de formação dentro deste segundo enfoque (MAIA, 2008).

A abordagem aqui apresentada considera os robôs não de forma isolada, mas sendo integrados como parte fundamental dentro dos CSAP modernos, neste contexto surge a grande possibilidade de apresentar a Robótica como uma área fundamental na formação tecnológica atual, cuja exposição não pode se afastar do meio industrial no qual sempre está fortemente inserida.

Através dessa última abordagem torna-se possível o estudo dos manipuladores industriais contemplando sua implementação e a programação das suas atividades, de modo que estes possam ser integrados dentro de uma linha de produção automatizada, realizando diferentes tarefas, por exemplo: posicionamento por meio de visão artificial para movimentação de materiais em Células Flexíveis de Manufatura (FMC), projeto de garras e/ou efetuadores finais, robótica cooperativa, etc. Desta forma é possibilitada a interação dos estudantes com a Robótica e portanto com diversas tecnologias dentro de uma abordagem interdisciplinar.

2.2.3. Tecnologias da Informação e Comunicação nos Processos de Formação em

Automação e Robótica

Durante a última década o amadurecimento das Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) existentes baseadas na informática, junto com o rápido desenvolvimento de novas tecnologias promovidas pela internet como a Telerobótica (conceito apresentado na secção 2.2.3.3.) têm possibilitado uma grande mudança na maneira de formar eficazmente estudantes com competências em áreas tecnológicas, tanto de forma presencial quanto a distância (AIHARA, 2005).

2.2.3.1. A Informática na Formação em Automação Industrial

O ensino por intermédio da informática caracteriza-se pelo uso do computador como ferramenta de ensino-aprendizagem de propósito geral (D'ABREU, 2002). A aprendizagem nesse caso é possibilitada por meio da Educação Mediada pelo Computador (EMC), a qual permite a interação do aluno com o conhecimento, dentro de metodologias ativas – colaborativas, individuais ou grupais baseadas no aprender fazendo (ROSCHELLE, 2003 apud TAHA, 2005). Podem-se encontrar algumas aplicações que incluem a utilização de sistemas multimídia e de simulação no processo ensino-aprendizagem, como no caso do laboratório de ensino de

automação com pneumática, implementado no Departamento de Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto (SANTOS, 2004).

Esse enfoque relativamente novo é apoiado pelo desenvolvimento de sistemas computacionais interativos e a internet que permitem aos usuários o aproveitamento de um conjunto significativo de vantagens (interação, visualização gráfica de dados, processamento, simulação bi e tridimensional, etc) (SANTOS, 2004). O desenvolvimento destes sistemas inicia-se com a proposição de um paradigma conhecido como Instrução Assistida pelo Computador (CAI) cujo objetivo principal é a apresentação automática de certos conhecimentos que se desejam ensinar/transmitir (SALIBA, 2003).

Ao longo dos últimos anos, também têm surgido uma série de ferramentas de ensino baseadas na capacidade de processamento dos computadores modernos, como a Inteligência Artificial (AI), as quais facilitam a interação homem-máquina; neste caso o estudante/utilizador, trabalha junto com o Sistema Inteligente (SI) para solucionar um problema (CHENG, 2009). Dentro das modalidades de ensino por intermédio da informática também podem-se incluir os ambientes baseados em robótica pedagógica (cuja definição foi apresentada na seção 2.2.1.2).

2.2.3.2. e-Learning através de Internet

A Educação a Distância (EAD) é uma aprendizagem planejada que normalmente ocorre em um lugar diferente ao de ensino, portanto requer técnicas específicas de planejamento de curso, comunicação, e administração de forma a entregar conhecimento satisfazendo as necessidades atuais dos estudantes (AIHARA, 2005), (COPINGA, 2000 apud SAYGIN, 2004). O e-learning determina a terceira geração da EAD; sendo a primeira geração identificada com o uso de materiais impressos enviados por correio e a segunda por ter acrescentando o uso da televisão, do rádio, de fitas de áudio e vídeo e da telefonia.

A terceira geração é a mais revolucionária e está baseada principalmente na internet como uma ferramenta para a convergência de mídias, flexibilizando radicalmente o processo de formação em tempo e espaço. Dentro deste contexto, nesta geração as novas metodologias de formação não são mais passivas, a informação já não flui somente em uma direção senão que aparece uma realimentação e uma verdadeira interatividade, assim sendo, agora existe a

possibilidade de oferecer ao aluno uma aprendizagem colaborativa e significativa. Como exemplo pode se citar o sistema WebDIDATA da Universidade Estadual de Maringá (MEDEIROS, 2003).

Nesse contexto a internet abre novas possibilidades e motivações para o desenvolvimento de atividades de formação e pesquisa ao diversificar os espaços de construção do conhecimento, transformar processos e metodologias de aprendizagem tradicionais e apresentar ao usuário novas e inúmeras possibilidades, podendo ser estas potencializadas através de uma interface amigável (recursos de som, imagens, vídeos, animações) possibilitada pela informática (SALIBA, 2003). Esforços de tal forma a transformar a metodologia tradicional e disponibilizar uma grande quantidade de cursos via Web foram padronizados por diversas instituições como o MIT com o desenvolvimento do iCenter em 2003 (ABELSON, 2008).

2.2.3.3. Telerobótica

Hoje em dia as TIC baseadas na internet possibilitam a interação com manipuladores robóticos em ambientes de aprendizagem a distância por meio da Teleoperação e a Telepresença, surgindo desta forma a Telerobótica.

- A *Teleoperação* é um modo de controle de um sistema físico onde cada um dos comandos dados pelo operador é transmitido para ser executado pelo teleoperador (dispositivo remoto). Existem dois tipos de Teleoperação direta ou contínua e teleoperação indireta ou tele programação, dependendo se os comandos são transmitidos ao escravo de forma ON-LINE ou OFF-LINE respectivamente.
- A *Telepresença* é possível quando existe uma realimentação ON-LINE de Vídeo e de Dados desde o dispositivo Remoto até o operador (Supervisão).
- Desta maneira a *Telerobótica* é uma forma avançada de Teleoperação pela qual um operador supervisiona robô(s) através da mediação de um computador. Estas tecnologias têm evoluído desde sua utilização para manipular robôs em ambientes perigosos até sua standardização nos sistemas de realidade virtual, (HARRIS, 2008).

2.2.4. Laboratórios Remotos ou a Distância (e-Laboratories ou WEBLAB)

Já que os dispositivos mecatrônicos de experimentação muitas vezes não estão disponíveis devido ao seu elevado custo de aquisição, ao número reduzido de equipamentos nas IES e à limitada disponibilidade dos laboratórios, muitos centros de formação não conseguem implementar um componente prático eficaz nos seus cursos oferecidos, aliás muitas vezes por questões de tempo a avaliação presencial prática dos estudantes pode-se ver perturbada. Neste caso a internet possibilita outras formas de apoio às atividades de experimentação que precisam uma interação com dispositivos tecnológicos, incrementando o serviço dos laboratórios disponíveis e o número possível de práticas a serem realizadas (SAIRE, 2008). Um laboratório remoto (WebLab) é formado por um conjunto de dispositivos físicos que podem ser operados e/ou controlados a distância por meio de uma interface determinada (DOMINGUEZ, 2005), (ANDRIA, 2007).

Os Laboratórios Remotos podem ser didáticos e/ou versões de laboratório de dispositivos industriais (ALIANE, 2007) e possibilitam uma experimentação que pode ser Virtual e/ou Remota, em ambientes de aprendizagem relativos à programação, operação e controle de dispositivos mecatrônicos complexos (PRIETO, 2008); acrescentando e flexibilizando os serviços prestados nas instalações físicas das IES em termos de: Locação, Horários, Ritmo de aprendizagem, Organização e Duração. De acordo com isto, os laboratórios remotos acarretam benefícios evidentes desde um ponto de vista socioeconômico e desde uma perspectiva educacional, relacionada à completitude e qualidade das práticas a distância que podem ser desenvolvidas por estudantes. As aplicações dos laboratórios remotos no processo de formação em engenharia vão desde eletrônica e controle até aplicações em Mecânica e Química (GARCIA, 2005).

O projeto e desenvolvimento de laboratórios remotos e virtuais é possível devido à disponibilidade de tecnologias como a Telepresença e a Teleoperação as quais permitem operar e controlar dispositivos através da internet enviando dados, áudio e vídeo não só em um sentido, mas tendo realimentação (SAIGYN, 2004). A administração destes laboratórios usualmente requer o uso de servidores para gerenciar tanto a utilização do sistema pelos usuários quanto os equipamentos integrados nesse sistema (DORMIDO, 2004 apud ALIANE, 2007).

Segundo Aliane (2007), dentre os projetos mais relevantes com fins de incentivar aplicações com laboratórios remotos podem-se encontrar: o projeto CYBERLAB desenvolvido pela união européia que culminou na criação de um provedor de serviços para integração de laboratórios via rede, o projeto PEARL que aplica e avalia a utilização pedagógica dos laboratórios remotos, e o projeto MARVEL que desenvolve um entorno misto combinando laboratórios remotos e virtuais. O projeto ReLAX (Remote Laboratory eXperimentation Trial) da comunidade européia estuda a factibilidade de utilizar laboratórios remotos como um componente da experimentação a distância, desde o ponto de vista tecnológico e econômico. O projeto eMersion estuda a aplicação de cenários pedagógicos flexíveis remotos ou virtuais em internet de forma a complementar o processo de formação.

2.3. Aplicações de Plataformas Integradas na Automação e Robótica

Embora desde os anos noventa muitos trabalhos têm sido gradualmente desenvolvidos a fim de projetar e disponibilizar diferentes tecnologias em automação industrial junto com TICs, estudando o impacto desses sistemas como complemento ao processo de formação em áreas tecnológicas, estes esforços mostravam tecnologias muito isoladas. A integração de várias tecnologias de uma forma consistente em plataformas experimentais e sua disponibilização através de laboratórios remotos é neste momento uma área em desenvolvimento, devido à dificuldade de interconectar via rede dispositivos tecnológicos de diferentes características, para permitir mais de um tipo de prática; aliás, ainda não existe uma arquitetura standard de comando para estas plataformas, encontrando-se diferentes propostas dependendo do tipo de tecnologias a serem integradas e do tipo de experimento a ser realizado (TZAFESTAS, 2006). A seguir são apresentadas algumas das soluções existentes na atualidade.

2.3.1. Plataformas para a Formação e Pesquisa em Automação

O projeto e implementação de plataformas de automação voltadas à educação é principalmente desenvolvido no interior das IES e centros de pesquisa, um exemplo deste tipo de aplicações é a plataforma PIPEFA (Plataforma Industrial de Ensino, Pesquisa e Formação em

Automação) implementada no Laboratório de Automação Integrada e Robótica (LAIR) da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP (IORIO, 2002) com intuito de exemplificar os processos de montagem e desmontagem de produtos; no LAIR também foi desenvolvida e implementada uma plataforma didática com arquitetura de Sistema de Produção (SP) para mistura de cores (AIHARA, 2000). Estas duas aplicações, compostas por diferentes estações de trabalho integradas envolvem CLPs, sensores e atuadores utilizados frequentemente no meio industrial. Em Baffi (2001) é descrito o projeto e implementação de uma plataforma colaborativa constituída por dois manipuladores e uma mesa de transferência como elemento de ligação entre eles constituindo um SP que possibilita práticas experimentais a fim de propiciar a formação em automação industrial.

Em D’Abreu (2002) são apresentados três projetos desenvolvidos com o intuito de criar ambientes integrados de aprendizagem em automação utilizando os kits de desenvolvimento Lego-MINDSTORMS e ROBIX™: sistema para triagem de produtos em uma linha de produção, sistema automatizado de produção e máquina de solda por ponto.

Na Universidade Federal de Santa Catarina foi desenvolvida uma bancada didática para trabalhar com atuadores eletro-hidráulicos no sentido de permitir aos estudantes realizar análises teóricas e experimentais, esta bancada integra CLPs, uma unidade potência hidráulica, uma bancada para montagem de circuitos e um sistema de aquisição e controle VXI / LABVIEW™ (DE SOUZA, 2007). A Universidade Federal do São João Del Rei em parceria com a empresa Junior EJEL desenvolveu bancadas de apoio acadêmico no campo da automação industrial (BARBOSA et al., 2006), a Universidade Tecnológica Federal do Paraná implementou um sistema de controle programável para sistemas distribuídos, baseado em um sistema de produção modular da empresa FESTO™ (SELESKI, 2006) com o intuito de automatizar um processo e aplicar conceitos de distribuição de tarefas para evitar o controle centralizado.

2.3.1.1. Plataformas Integradas WEBLAB para Formação e Pesquisa em Automação

A integração em plataformas experimentais de tecnologias industriais junto com as TIC e os laboratórios remotos (e-Laboratories) com o intuito de disponibilizar as práticas através da internet começou desde o ano 2001. Algumas destas plataformas são descritas a seguir.

O projeto LABNET apresenta aplicações de laboratórios remotos na formação em automação e controle disponibilizando três experimentos para realizar práticas remotas com eles: controle de nível, temperatura e servomotores (ALIANE, 2007). Na universidade espanhola de León foram implementadas várias aplicações reais em automação industrial possibilitando a realização de tarefas de controle e supervisão remotas, utilizando diferentes tipos de sensores e atuadores, aliás, foi disponibilizada uma realimentação de vídeo e gráficos de evolução de algumas variáveis através de Applets (DOMINGUEZ, 2005). Na universidade Militar (Bogotá - Colômbia) foi desenvolvida uma interface de laboratório remoto para um laboratório de CIM com o intuito de disponibilizar aos estudantes práticas de forma a realizar a montagem de um atuador pneumático (ARIZA, 2008). Na universidade de Patras (Grécia) foi desenvolvido o (RMCLab) o qual permite aos estudantes o projeto e teste de circuitos eletrônicos de maneira remota (KARADIGMAS, 2007).

Outras experiências implementando e disponibilizando serviços WebLab são: o Campus Project desenvolvido no Instituto de Tecnologia de Massachussets com financiamento de Microsoft e o TELELAB do Instituto Tecnológico de Monterrey que permite o acesso remoto de estudantes ao seu laboratório de automação. O projeto AS-1 disponibiliza serviços WebLab para o módulo comercial ADIRO, permitindo a realização de atividades com um cilindro pneumático de duplo efeito e disponibilizando ao mesmo tempo realimentação de vídeo e dados, além disso também podem ser utilizados três CLP (SAIRE, 2008).

O projeto AIP Primeca-RAO desenvolvido por oito universidades na França disponibiliza um conjunto de módulos práticos para o ensino da automação por meio de laboratórios remotos integrando equipamento industrial, um sistema CAD e um módulo de comunicação (COQUARD, 2007).

Esforços de forma a aproveitar de maneira conjunta os recursos físicos de múltiplas IESs têm dado sucesso ao agrupar plataformas integradas em diferentes países por meio de laboratórios remotos, tendo cada uma destas plataformas funcionalidades específicas. Um exemplo é o projeto colaborativo desenvolvido entre universidades em Barcelona (Espanha), Manaus (Brasil) e Santiago de Cuba (Cuba), na plataforma de Barcelona é possível realizar

práticas com motores DC e motores de passo, na plataforma de Manaus podem-se realizar atividades com acionamentos pneumáticos, elétricos, máquinas ferramentas e robôs, a bancada em Santiago de Cuba permite a experimentação com controladores de velocidade de motores DC. Estas três plataformas possuem CLPs e permitem Telepresença por meio de realimentação de vídeo e dados aos usuários (MOLAS, 2006).

Já que alguns experimentos utilizando laboratórios remotos podem se tornar instáveis devido ao tempo de movimentação da informação através de internet (tempo de latência) entre o dispositivo remoto e o usuário, atividades de pesquisa nessas áreas podem ser propostas no sentido de desenvolver algoritmos para compensar ou reduzir os efeitos desse tempo.

2.3.2. Plataformas WEBLAB Para Formação e Pesquisa em Robótica

A utilização de laboratórios remotos como complemento à formação no campo da robótica iniciou-se com a utilização de robôs móveis para apresentar princípios de sensores e controle, os primeiros exemplos deste tipo de aplicação foram os projeto Mercury e Puma (COSMA, 2003), mas são bem poucos os que têm trabalhado com a robótica de manipuladores.

Dentro dos primeiros desenvolvimentos de aplicações orientadas à formação na área da robótica no Brasil encontra-se um dispositivo de interface hardware desenvolvido no grupo NIED da Universidade Estadual de Campinas UNICAMP em 1989 que permite o controle de motores, este contava com diferentes sensores e comunicava-se com o computador. O Ambiente de Robótica Educacional (ARE) chamado de SIROS foi desenvolvido também no NIED / UNICAMP, este implementou uma plataforma que permite o controle de servomotores, a utilização de diversos tipos de sensores e interfaces de comunicação com o computador, e também possibilita a interação com o bloco RCX da empresa LEGOTM, este trabalho implementa os princípios do construcionismo (PAPERT, 1985 apud CHELLA, 2002) e da robótica pedagógica. A plataforma SIROS pode ser acessada via web de modo a disponibilizar serviços de laboratório remoto.

Podem-se também destacar algumas aplicações de controle remoto de robôs móveis Khepera, desenvolvidas no final dos anos noventa no instituto Federal de Tecnologia da Suíça,

permitindo a realimentação de vídeo e dados dos sensores do robô. O Projeto RedRover utilizou um robô móvel controlado de forma remota para apoio a cursos de telemática na Universidade RH Ravensburg (Alemanha). Existem também aplicações comerciais que permitem a interação com tecnologias por meio da construção e programação de dispositivos didáticos utilizando Kits de desenvolvimento como Lego-MINDSTORMS, o qual permite a programação de um pequeno computador RCX utilizando uma linguagem de programação de alto nível e os Kits de desenvolvimento ROBIX™. Outro laboratório disponibilizando os recursos de LEGO™ de forma remota é o CrAutoLab do Politécnico de Milan (LEVA, 2008).

No campo da robótica industrial algumas tentativas têm utilizado manipuladores de 2 Graus de Liberdade (GL) enviando comandos ao robô enquanto este segue uma trajetória. Em Tzafestas (2006) é apresentada uma plataforma que permite uma experimentação de forma tanto virtual quanto remota para o controle teleoperado de um robô Scara AdeptOne-MV de 4 GL disponibilizando controle direto (Teleoperação) e controle indireto (Teleprogramação).

2.4. Considerações Sobre o Capítulo 2

Neste capítulo foram apresentados os conceitos básicos dos Sistemas Automatizados de Produção, mostrando como estes têm evoluído ao longo do tempo, devido a: uma mudança acelerada do ambiente de manufatura industrial, para atender já não uma economia local, e sim uma economia global, e às tecnologias emergentes que apareceram na segunda metade do século XX. Assim estes sistemas deixaram de ser centralizados, com uma arquitetura rígida fundamentada no paradigma CIM, para evoluir até Sistemas de Produção que acrescentam um componente colaborativo, fundamentados na flexibilidade, reconfigurabilidade e descentralização da arquitetura holônica, a qual permite a estes se adaptar rapidamente as mudanças do ambiente industrial moderno.

Foram estudadas também as formas existentes de apoio aos processos de formação e pesquisa em automação e robótica, identificando como este trabalho está inserido dentro do

paradigma de interação com tecnologias através da realização de atividades práticas com plataformas automatizadas, de forma a desenvolver um ambiente de aprendizagem multitecnológico colaborativo e cooperativo.

Levando em consideração a revisão da literatura realizada neste capítulo, foi identificado que a grande maioria de plataformas automatizadas para apoio à formação e pesquisa não estão desenvolvidas com uma arquitetura aberta, o qual não permite a integração de tecnologias; além disso, muitas destas plataformas ainda não disponibilizam capacidades WebLab (laboratórios remotos) o qual dificulta a sua faixa de aplicação como apoio ao componente experimental em áreas de formação tecnológica. Levando em consideração estes conceitos, vantagens e necessidades dos SAP atuais, no Capítulo 3 será apresentado o projeto e concepção de uma plataforma automatizada, integrada através da arquitetura ADACOR.

3. CONCEPÇÃO DA ARQUITETURA PROPOSTA PARA A INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS

3.1. Descrição da Problemática

Considerando a revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2, pode-se concluir que uma grande parte dos dispositivos direcionados à realização de experimentos práticos utiliza somente componentes tecnológicos orientados a tarefas muito específicas na automação. Alguns laboratórios tentam solucionar este problema, desenvolvendo vários dispositivos de experimentação, mas não plataformas integradas. Essa falta de integração de várias tecnologias em plataformas colaborativas reduz a faixa de áreas nas quais estes dispositivos com tecnologias isoladas são realmente úteis, e conseqüentemente as práticas com eles não vão exemplificar fielmente situações comumente encontradas em um sistema de manufatura real, onde existe uma grande integração tecnológica hardware - software. Esta mesma situação apresenta-se nas aplicações comerciais existentes, onde os poucos produtos disponíveis no mercado não são abertos ao melhoramento das suas características, portanto não podem ser modificados nem integrados em aplicações multitecnológicas. Isto limita o número possível de práticas presenciais (locais) nos laboratórios.

É importante ressaltar que além da integração de tecnologias industriais mencionada anteriormente, evidencia-se a necessidade dos laboratórios nas IES para acrescentar sua capacidade de prestação de serviços permitindo não só uma experimentação presencial, mas também à distância; integrando de modo eficaz suas plataformas experimentais com as TIC de modo a disponibilizar os serviços destes laboratórios de uma maneira remota por meio da Internet (Laboratórios Remotos). Na revisão bibliográfica apresentada se pode perceber que esta integração WebLab tem sido realizada, mas quase sempre para dispositivos comerciais existentes ou aqueles desenvolvidos mas com aplicação muito específica na Automação.

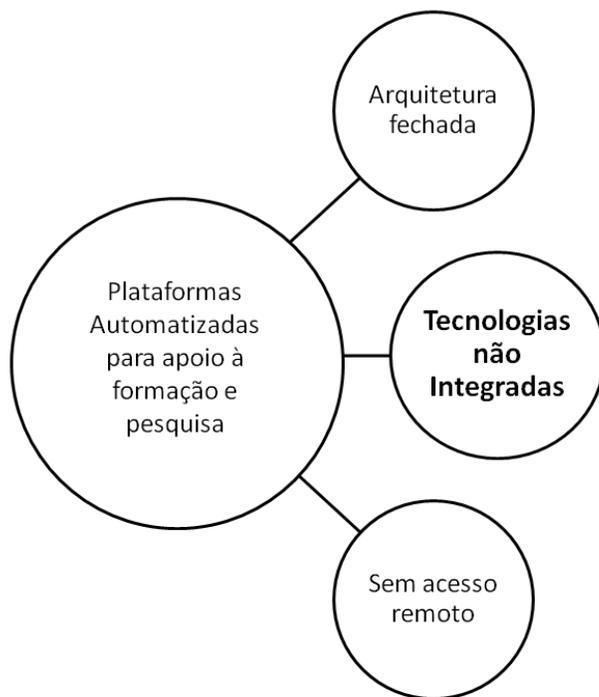


Figura 5. Descrição do Problema

No caso de plataformas colaborativas a integração WebLab é uma área em constante desenvolvimento, e não existe ainda uma arquitetura padronizada que direcione a implementação e comando destes dispositivos (TZAFESTAS, 2006), sendo em muitos casos esta arquitetura dependente do tipo de tecnologias a serem integradas e do tipo de experimentos a serem realizados. A Figura 5 descreve o problema apresentado nesta dissertação. Uma parte do objetivo deste trabalho é propor uma estrutura que possa exemplificar um Sistema Automatizado de Produção (SAP) moderno permitindo a proposta de práticas em Automação que realmente correspondam com a evolução atual dos sistemas de manufatura. De acordo com isto, no Capítulo 2 foi realizada uma síntese da evolução dos SAP ressaltando e detalhando a necessidade atual destes para acrescentar um componente colaborativo, obtendo-se assim os Sistemas Automatizados de Produção Colaborativos (CSAP).

Levando em conta a direção atual do desenvolvimento da Automação Industrial e visando o projeto de uma ferramenta experimental em Automação e Robótica, pode-se identificar o problema em estudo e o campo de aplicação onde vai ser utilizada a plataforma. Após estudar as tecnologias industriais que podem ser integradas em Automação e Robótica (Capítulo 2) e os

modelos atuais dos CSAP, é proposta uma arquitetura hardware - software de tipo holônico (HMS), especificamente com arquitetura ADACOR (ADaptive holonic COntrol aRchitecture for distributed manufacturing systems). A integração tecnológica proposta e direcionada através desta arquitetura é validada por meio de análises e simulações dinâmicas dos sub-processos que podem ser implementados nessa arquitetura e com a posterior implementação de uma plataforma automatizada (apresentado no Capítulo 5) que permite a proposição de atividades práticas (baseadas nos sub-processos), de modo a exemplificar situações cotidianas encontradas nos CSAP presentes na maioria das indústrias. A Figura 6 apresenta a sistemática utilizada para o desenvolvimento da plataforma em estudo.

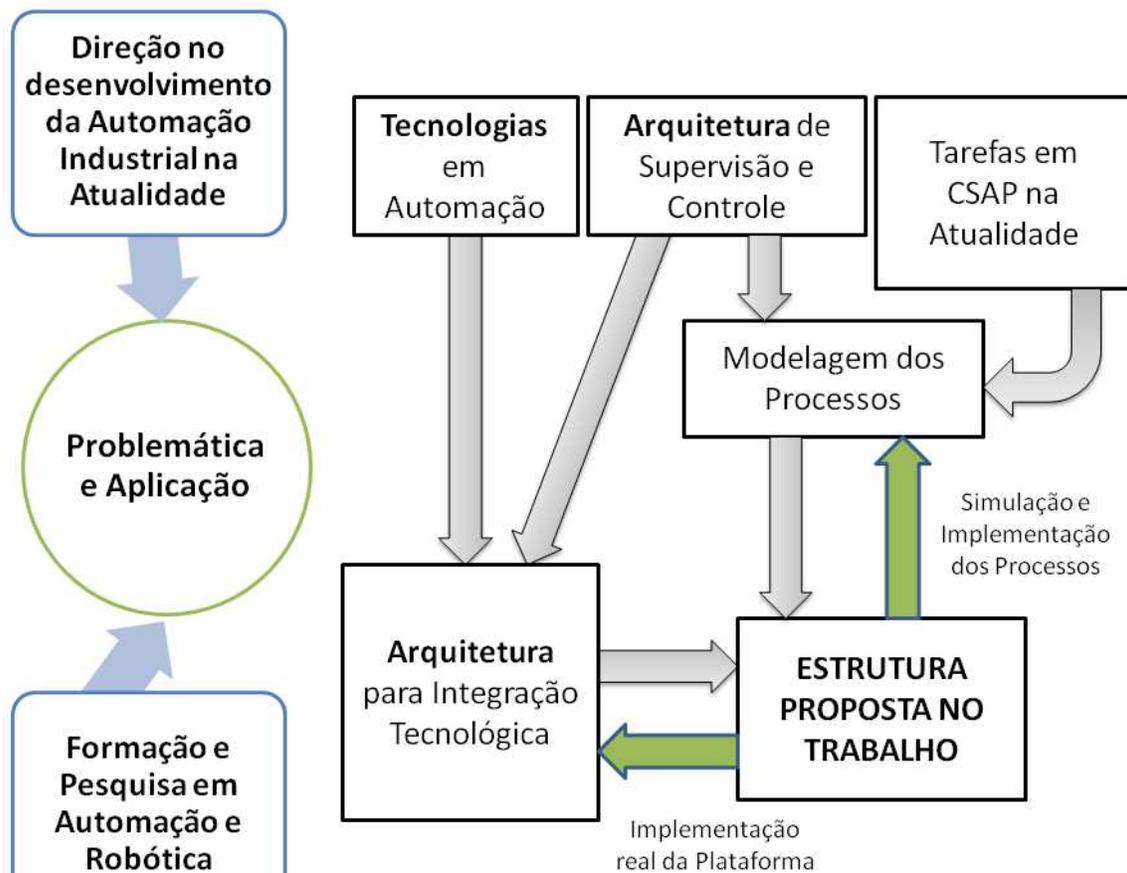


Figura 6. Diagrama Gerador da Estrutura Proposta

Na proposição da estrutura são consideradas:

- a) Tecnologias em Automação Industrial a serem integradas;
- b) Arquitetura Hardware - Software para integração.

3.2. Tecnologias em Automação e Robótica Propostas para Serem Integradas

A seleção das tecnologias que vão ser integradas na plataforma colaborativa leva em consideração que estas estão presentes de maneira integrada nos SAPs atualmente implementados nas empresas. Aliás, estas tecnologias oferecem a possibilidade de propor e realizar inúmeras práticas experimentais, e na atualidade são utilizadas de forma separada na maioria de cursos de Automação e Robótica demonstrando sua eficácia como complemento para a assimilação de conceitos isolados, mas denotam uma baixa eficiência como apoio na aquisição das competências necessárias para lidar com SAPs modernos. Conseqüentemente a sua utilização de maneira integrada possibilitará a criação de um ambiente interdisciplinar que estimulará a participação ativa dos estudantes nos processos de formação e pesquisa ao interior das IES. As principais tecnologias selecionadas para serem integradas neste trabalho são:

- Sensores e Atuadores Industriais;
- Manipuladores Robóticos;
- Processamento de Imagens;
- Supervisão, Comando e Comunicação;
- Eletrônica Re-programável Estruturada.

A Figura 7 apresenta uma síntese destas tecnologias.



Figura 7. Tecnologias Integradas na Plataforma

As tecnologias de sensores e atuadores industriais junto com os manipuladores robóticos (à direita e esquerda no diagrama e representadas na cor verde) correspondem à Parte Operativa (PO) de um SAP enquanto as tecnologias de supervisão, comando e comunicação junto com o processamento de imagens (na parte superior e inferior no diagrama, e representadas na cor azul) estão associadas à Parte de Comando (PC). A parte de comando da plataforma cujo objetivo é integrar e comunicar entre si às outras tecnologias é implementada através de eletrônica reprogramável estruturada.

3.3. Considerações na Proposta de Arquitetura de Integração

A escolha da arquitetura para a integração das tecnologias considera duas perspectivas: um ponto de vista tecnológico e outro pedagógico. Desde um ponto de vista tecnológico, a integração das cinco tecnologias descritas visa alcançar uma representação fiel da arquitetura CSAP que predomina nos sistemas de manufatura atuais, a qual possa oferecer não só a possibilidade de um controle centralizado, mas também permita certo nível de autonomia entre os sub-sistemas componentes sem perder completamente a colaboração e cooperação entre estes (controle descentralizado ou distribuído).

Procura-se então propor uma estrutura genérica nas suas partes de comando e operativa que tenha um alto grau de *FLEXIBILIDADE*, *MODULARIDADE* e reconfigurabilidade, que seja aberta (hardware - software) a qualquer melhoramento ou modificação futura tanto da parte operativa quanto da parte de comando (estrutura e lógica de programação) de maneira fácil e escalável. É projetado também um comando e monitoramento *online* do funcionamento da plataforma, disponibilizando ao usuário realimentação de vídeo e dados por parte de um sistema de supervisão e comando permitindo assim a configuração dos processos. A flexibilidade da estrutura proposta será refletida na possibilidade de reprogramação da lógica estruturada utilizada na implementação, na possibilidade de montagem de diferentes produtos utilizando a mesma plataforma, e na reconfigurabilidade da estrutura física. O esquema de integração proposto para a plataforma pode ser observado na Figura 8.

Desde um ponto de vista pedagógico, a integração da estrutura desenvolvida de essa maneira reflete a modularidade proposta no sentido que cada um dos hólons pode atingir uma das áreas principais de aplicação descritas no objetivo do trabalho (Automação e Robótica), embora também possam ser realizadas atividades atingindo muitas outras áreas da engenharia, utilizando combinações entre os hólons quando for requerido; alcançando de este modo uma experimentação independente, mas complementar com cada Sub-Sistema. A flexibilidade desde a perspectiva pedagógica vai ser refletida na possibilidade de propor práticas com diferentes níveis de dificuldade englobando diferentes áreas e níveis de formação dos estudantes, desde os conceitos básicos de sensores e atuadores industriais, manipuladores robóticos, mecatrônica, até os níveis de comando, supervisão e gerenciamento de uma linha de produção completa. Além disso, a flexibilidade será exemplificada também na possibilidade que oferecem os Laboratórios Remotos na definição de horários, locação, duração, ritmo de aprendizagem e organização das práticas. A arquitetura desenvolvida visa oferecer tanto possibilidades de experimentação presencial (local) quanto a distância (remota), as quais poderiam propiciar o desenvolvimento de competências (conhecimentos, habilidades e atitudes) necessárias no mercado laboral. A integração proposta desde esta perspectiva é descrita na Figura 8.

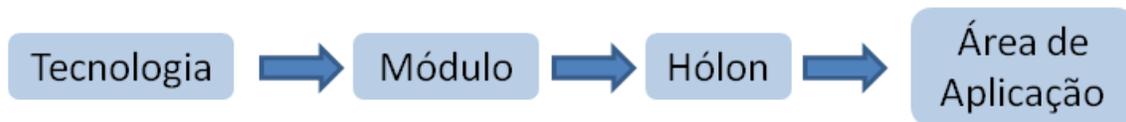


Figura 8. Esquema de Integração para a Estrutura Proposta

3.4. Arquitetura Proposta e Integração Hardware – Software

Levando em consideração a discussão anterior, é necessária uma estrutura que além de permitir flexibilidade e adaptação às mudanças do entorno, apresente também características de reutilização, tolerância a falhas, atenção a objetivos de manufatura locais e globais, arquitetura de controle distribuída e descentralizada e facilidades de ampliação e modificação. No sentido de satisfazer estas necessidades, neste trabalho foi selecionada uma arquitetura colaborativa – holônica do tipo ADACOR. Embora esta arquitetura seja focada principalmente no sistema de supervisão e controle direciona também a arquitetura para a integração dos módulos tecnológicos (hardware) com o intuito de formar hólons completos segundo o modelo descrito no Capítulo 2.

A integração proposta é concebida segundo uma arquitetura na qual cada uma das cinco tecnologias industriais descritas na Figura 7 é exemplificada através de um módulo, e estes por sua vez são integrados através de dois níveis de modularidade, em um primeiro nível (macro) estes são associados para formar um Sistema Automatizado de Produção Colaborativo CSAP, e ainda procurando uma consideração de modularidade maior, em um segundo nível (micro) este conceito é levado também ao interior das partes constituintes do CSAP. Isto é atingido definindo agentes totalmente funcionais, que irão-se integrar em uma arquitetura heterárquica - holônica tipo ADACOR (LEITAO, 2004) dentro da plataforma, estes agentes chamados de hólons estão formados de um Recurso Físico e um Dispositivo de Controle Lógico (LCD) que pode ser programado de forma ao hólón executar processos de maneira independente, mas também colaborativa de modo a alcançar objetivos conjuntos, nesse caso a integração é gerenciada em um nível superior por um sistema de supervisão e comando (Figura 9).

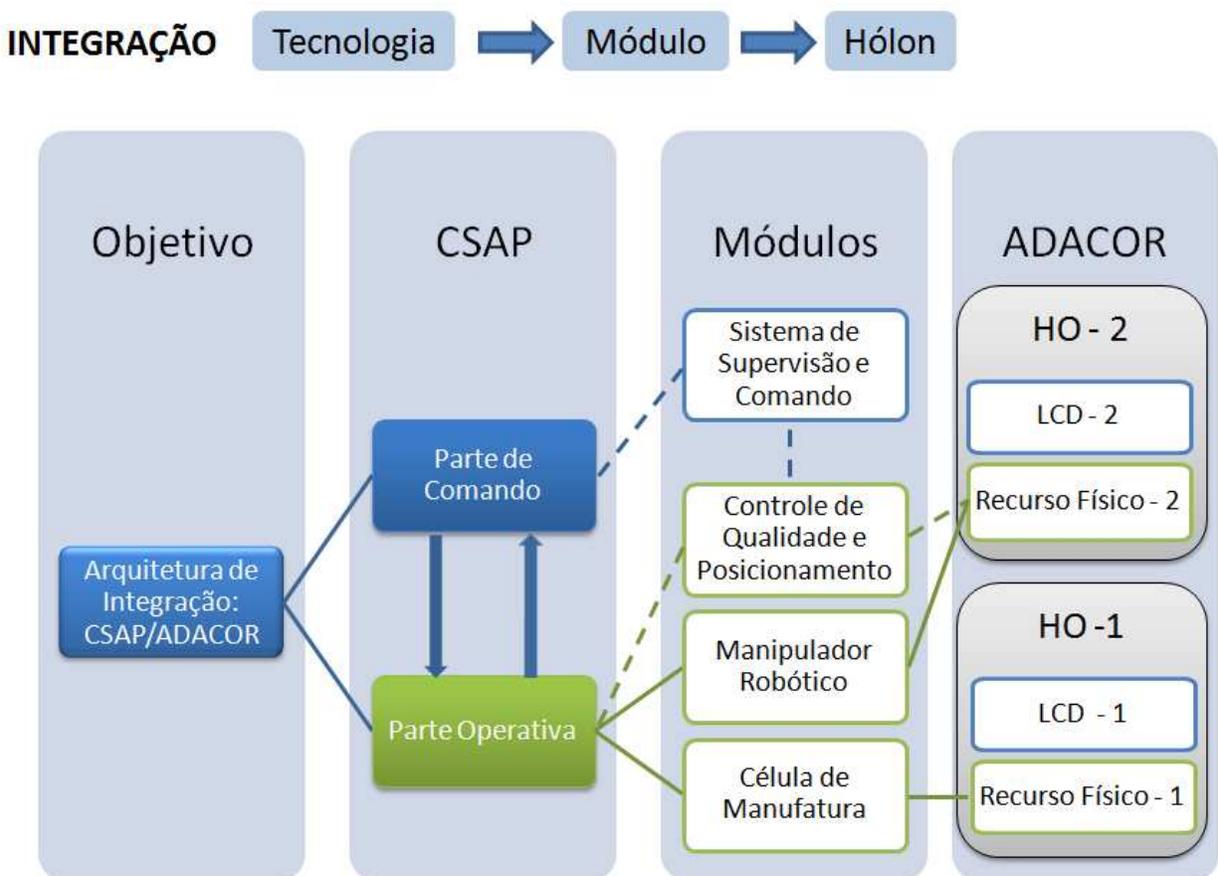


Figura 9. Integração Proposta - Arquitetura de Sistema Automatizado de Produção Colaborativo e Holônico (CSAP/ADACOR)

Esta arquitetura de integração é validada através de:

- Modelagem modular das diferentes estações de trabalho que compõem a arquitetura proposta e posterior análise dinâmica dos sub-processos que podem ocorrer dentro de cada uma delas (Capítulo 4);
- Especificação e Implementação completa (hardware – software) de uma plataforma automatizada modular que disponibilize os sub-processos de montagem, inspeção e movimentação de produtos (Capítulo 5).

3.4.1. Projeto da Integração no Primeiro Nível de Modularidade (CSAP)

A plataforma quando integrada através do primeiro nível de modularidade constitui um CSAP completo com partes operativa e de comando (Figura 10). O CSAP proposto disponibiliza também sua utilização via LAN/Internet por meio da implementação de um Laboratório Remoto.

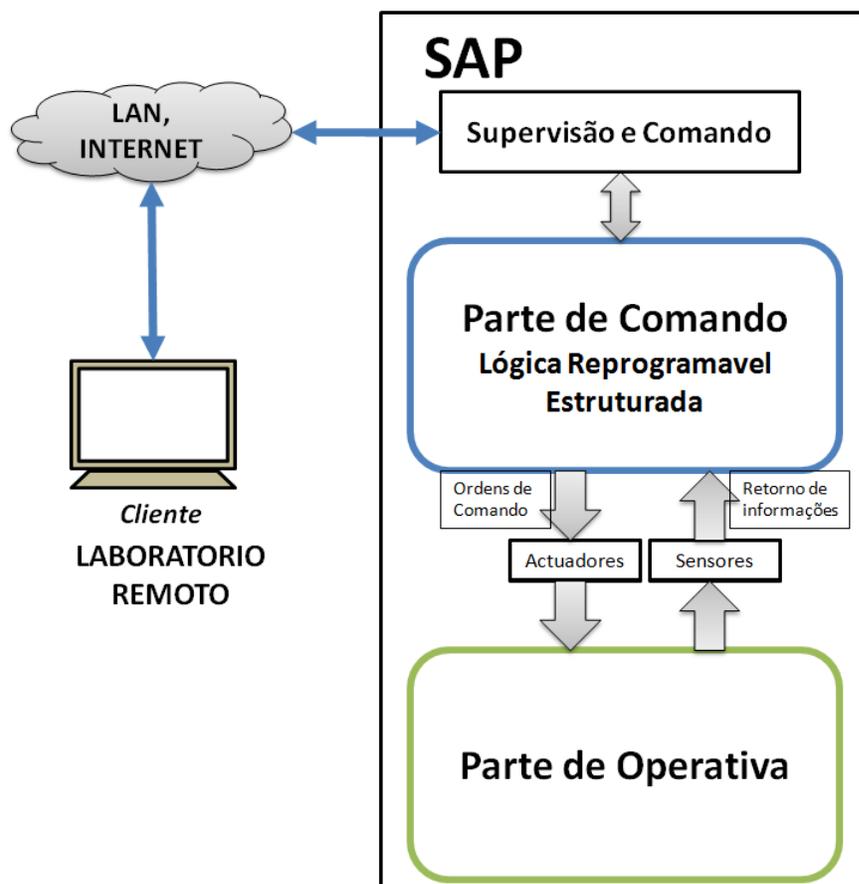


Figura 10. Arquitetura Proposta para a Integração da Plataforma – Modularidade CSAP

A seguir são descritos os módulos que integram as partes: operativa e de comando.

3.4.1.1. Parte Operativa (PO)

É composta a partir da integração de dois módulos tecnológicos:

- **Módulo - Célula de Manufatura:** Integra a tecnologia de sensores e atuadores industriais, cuja disposição é organizada em estações de trabalho dedicadas que executam uma tarefa específica;
- **Módulo - Sistema Robótico de Movimentação:** Integra a tecnologia de manipuladores industriais permitindo um ciclo contínuo de funcionamento quando é associado com a célula, já que este possibilita um fluxo contínuo de matérias entre a primeira e a última estação da célula de manufatura.

A descrição detalhada da implementação destes dois módulos é apresentada no Capítulo 5 desta dissertação.

3.4.1.2. Parte Comando (PC)

A parte de comando é a responsável pela integração dos dois módulos tecnológicos através de lógica reprogramável estruturada, aqui são implementados de maneira modular os programas para o funcionamento dos sub-processos na célula de manufatura e no sistema robótico de movimentação. Além disso, a PC é composta de dois módulos associados:

- **Módulo - Sistema de Supervisão e Comando:** Oferece uma interface gráfica e interativa para o monitoramento e comando dos sub-processos que ocorrem na parte operativa. Além disso, este sistema contém o módulo de controle de qualidade e posicionamento;
- **Módulo - Controle de Qualidade e Posicionamento:** Este módulo é o responsável pela captura das imagens dos produtos montados. Esta informação é logo enviada ao módulo de supervisão e comando para:
 - a) *Processamento e Classificação* das imagens das peças ou produtos, capturadas pela câmera, determinando se estes materiais devem ser rejeitados ou aceitos;
 - b) *Detecção Fina da Posição* sobre a esteira (com respeito ao primeiro GL do sistema de movimentação) da peça ou produto; esta informação de posição será utilizada pelo manipulador robótico para pegar e movimentar estes materiais.

3.4.1.3. Laboratório Remoto (WEBLAB)

Este sistema disponibiliza o sistema de supervisão e comando através de uma rede de comunicação internet rápida permitindo a estudantes e pesquisadores localizados em qualquer parte do mundo a realização de atividades práticas a distancia com a plataforma.

3.4.2. Projeto da Integração no Segundo Nível de Modularidade (CSAP/ADACOR)

A plataforma vista através da perspectiva do segundo nível (micro) de modularidade pode ser estudada como um sistema formado por sua vez de dois subsistemas totalmente autônomos, funcionais e independentes, mas que podem cooperar entre si; estes subsistemas são projetados e implementados segundo os conceitos da arquitetura holônica ADACOR. Nesta arquitetura proposta são considerados três níveis:

- Nível operacional com o Hólon Operacional (HO);
- Nível de coordenação com o Hólon de Supervisão (HS);
- Nível de Gerenciamento considerando o Hólon de Tarefa (HT), (Figura 11).

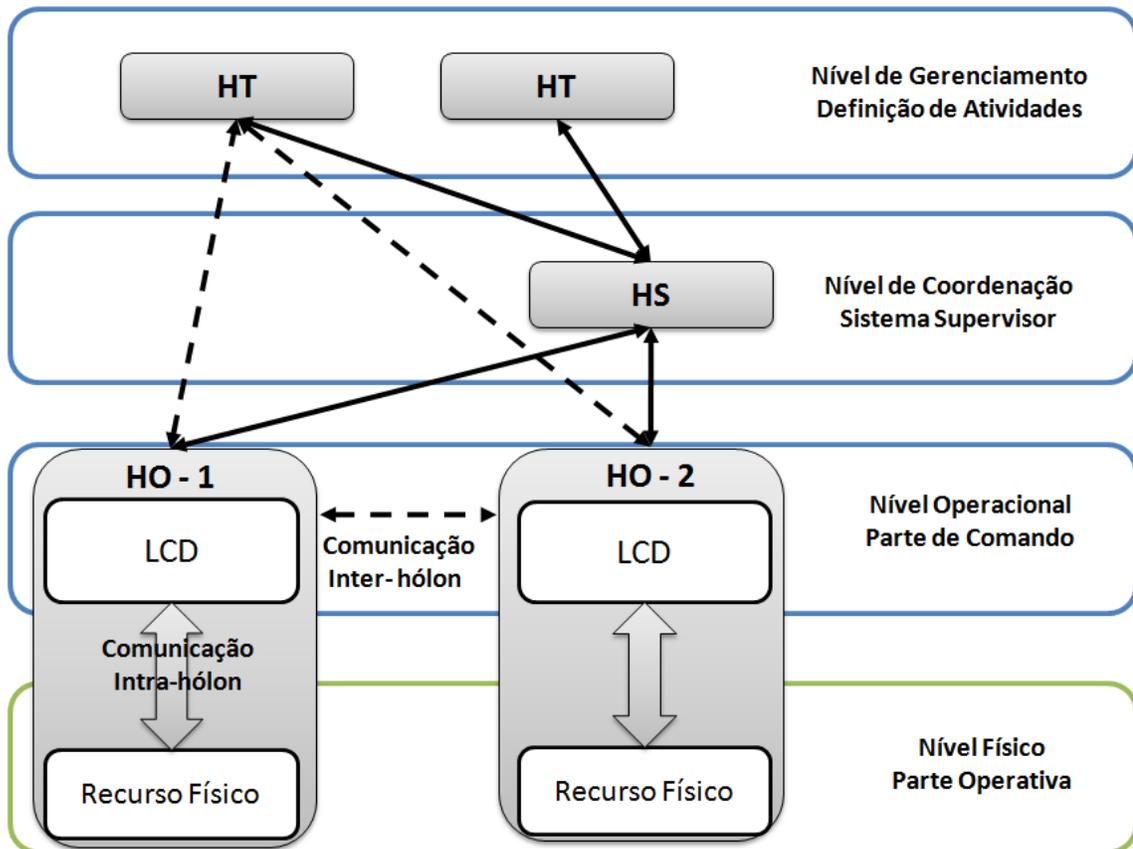


Figura 11. Níveis da Arquitetura ADACOR Considerados

Um Hólon Operacional é composto de um LCD (Logical Control Device – Dispositivo Lógico de Controle) e um Recurso Físico ou parte operativa (PO) (LEITAO, 2004) como é apresentado na Figura 12. Dentro desta estrutura heterárquica cada LCD se comunica diretamente com seu recurso físico por meio da denominada *Comunicação Intra-Hólon*, a qual permite o movimento bidirecional de informação desde os sensores até o LCD e desde o LCD até os atuadores do hólon.

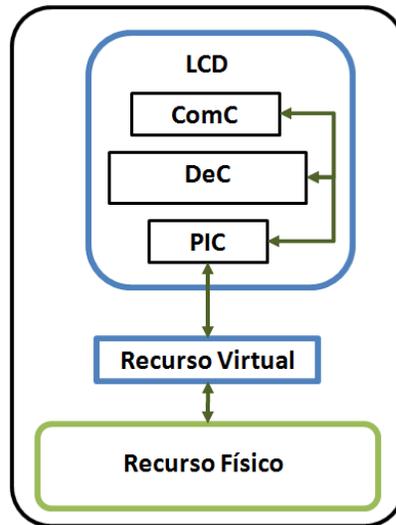


Figura 12. Estrutura de um Hólon Operacional

Neste trabalho a arquitetura holônica projetada considera dois hólons operacionais (HO-1 e HO-2), um hólon de supervisão (HS) e um hólon de tarefa (HT), neste caso os HOs vão representar componentes de manufatura enquanto os HS e HT representarão entidades lógicas. A composição detalhada de cada um destes hólons é descrita a seguir.

3.4.2.1. Projeto do Hólon Operacional de Montagem e Inspeção (HO – 1)

Este hólon possibilita a ocorrência dos sub-processos de classificação, montagem e inspeção de materiais. É composto de:

- **Dispositivo de Controle Lógico LCD-1:** É o responsável por comandar todas as atividades ao interior deste hólon, o LDC tem três componentes principais:
 1. **Componente de Decisão (DeC-1):** É projetado para conter a lógica de alto nível que abstrai o funcionamento desejado do hólon, do recurso físico e dos detalhes dependentes do hardware específico utilizado (Célula - Sensores e Atuadores);

2. **Componente de Comunicação Bidirecional (ComC-1):** É projetado como sendo o responsável pela comunicação inter-hólon, neste trabalho é proposta uma conectividade mestre – escravo entre os dois hólons; neste sentido no ComC-1 é proposto um estagio de comunicação onde este LCD-1 é definido como mestre e o LCD-2 como escravo;
3. **Componente de Interface Física (PIC-1):** É projetado para funcionar como uma interface entre os dois níveis (alto e baixo) da lógica projetada; assim pode-se conceber como um cliente que envia as informações necessárias ao recurso virtual-1 de tal forma que a célula de manufatura execute uma tarefa, e que recolhe os dados retornados por este recurso virtual (servidor) logo após a célula realizar a tarefa programada;

Recurso Virtual-1: É projetado para ser implementado em lógica de baixo nível, assim pode-se conceber como um servidor que processa cada um dos requerimentos do PIC-1 e negocia diretamente com o Recurso Físico-1 (célula de manufatura) para esta executar qualquer uma das tarefas requeridas; cada hólon operacional deve implementar um recurso virtual de forma a ser independente do hardware utilizado na parte de comando, portanto a implementação deste recurso incrementa a reconfigurabilidade e escalabilidade da estrutura proposta;

- **Recurso Físico-1:** É composto do hardware (sensores e atuadores) do *Módulo - Célula de Manufatura*, no entanto este recurso pode ser facilmente trocado por outro só tendo que ser modificado o componente Recurso Virtual-1 descrito acima. Sua implementação detalhada é apresentada no Capítulo 5.

3.4.2.2. Projeto do Hólon Operacional de Movimentação (HO – 2)

Este hólon possibilita a ocorrência do sub-processo de movimentação de peças ou produtos montados entre a primeira e a última estação da célula de manufatura, sendo composto de:

- **Dispositivo de Controle Lógico LCD-2:** É o responsável por comandar todas as atividades ao interior deste hólon, é composto de:
 1. **Componente de Decisão (DeC-2):** É projetado para conter a lógica de alto nível que abstrai o funcionamento desejado do hólon, do recurso físico e dos detalhes dependentes do hardware específico utilizado (Manipulador de 2 GL - Câmera);

2. **Componente de Comunicação bidirecional (ComC-2):** É projetado para conectar o DeC-2 (considerando este como escravo) com o DeC-1 sendo este o mestre. Desta forma, dentro deste componente a informação recebida e enviada é organizada em pacotes de forma a obter uma transferência rápida;
 3. **Componente de Interface Física (PIC-2):** É projetado para funcionar como uma interface entre os dois níveis (alto e baixo) da lógica projetada; assim pode-se conceber como um cliente que envia as informações necessárias ao recurso virtual-2 para o sistema robótico de movimentação executar uma tarefa e que recolhe os dados retornados por este recurso virtual logo após o manipulador realizar a atividade programada;
Recurso Virtual-2: É projetado para ser implementado em lógica de baixo nível, pode-se conceber como um servidor que processa cada um dos requerimentos do PIC-2 e negocia diretamente com o Recurso Físico-2 (manipulador de 2 GL) para este executar qualquer uma das tarefas requeridas;
- **Recurso Físico-2:** É composto do hardware (atuadores e câmara) do *Módulo – Sistema Robótico de Movimentação*, no entanto este recurso pode ser facilmente trocado por outro só tendo que ser modificado o Recurso Virtual-2 descrito acima.

Cada hólón operativo (HO) tem uma vista parcial do sistema, e por sua vez estes podem trabalhar cooperativamente entre si ao serem integrados através de uma interface de rede, sendo comandados pelo módulo de supervisão e comando. O HS junto com o HT gerenciarão as ações de cada hólón de forma a desenvolver um processo completo de classificação, montagem, inspeção e movimentação de produtos, atingindo assim os objetivos globais do sistema. A integração holônica proposta para a plataforma é apresentada na Figura 13.

3.4.2.3. Comunicação Inter-Hólón entre os LCD

Com o intuito de comunicar os dois hólóns entre si é projetada uma conexão em rede entre os LCD, assim em um modo de funcionamento normal e integrado, estes se comunicam através do hólón de supervisão enviando e recebendo informação. Desta forma, o hólón-1 poderá detectar quando começar ou parar o funcionamento dos seus sub-processos e o hólón-2 enviará e receberá os dados necessários para o posicionamento fino do sistema de movimentação segundo a

informação do módulo de controle de qualidade. No modo de funcionamento independente dos hólons, esta comunicação também permite que o hólón operacional-2 funcione de forma individual comunicando-se somente com o supervisor.

Em um modo de funcionamento gerado por uma perturbação (falha) externa que impossibilite a comunicação com o hólón de supervisão (HS), os HOs poderão continuar funcionando, neste caso a comunicação inter-hólón ainda permitira a transferência de informação de posição entre os hólons operacionais, possibilitando a ocorrência do processo completo, mas sem a característica de posicionamento fina nem o controle de qualidade.

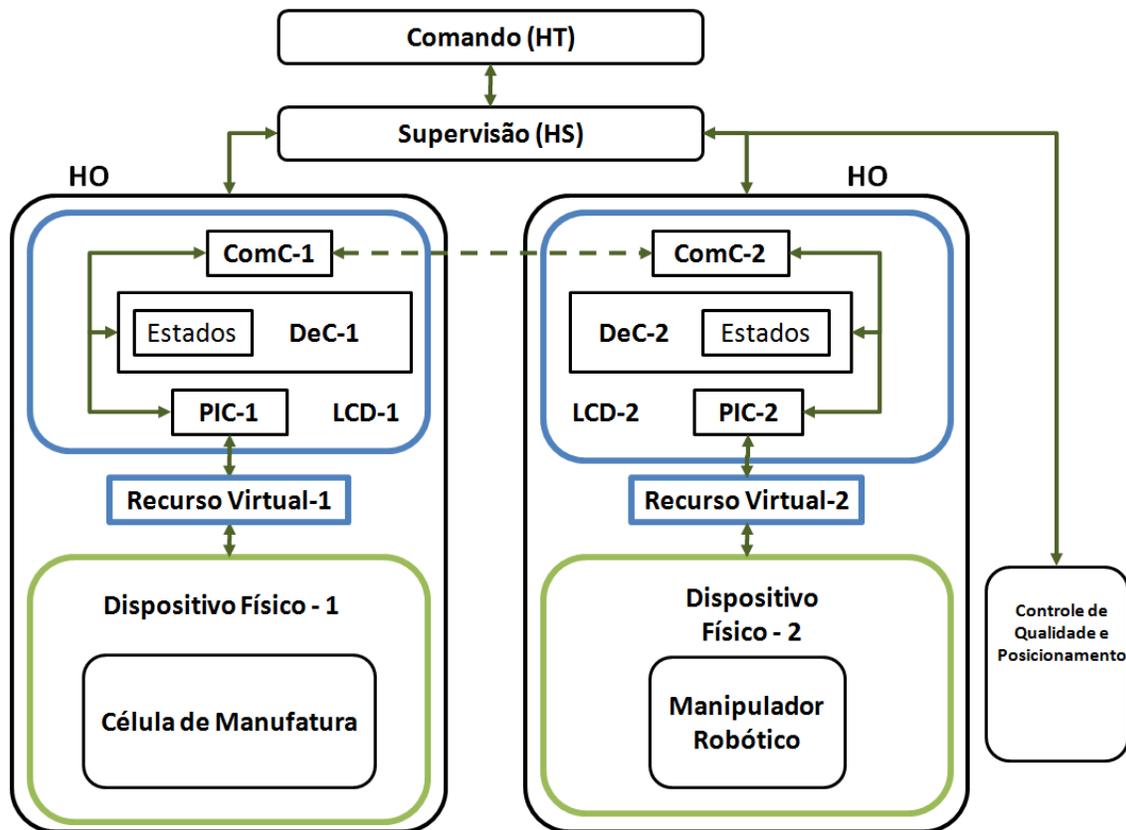


Figura 13. Arquitetura Proposta para a Integração da Plataforma– Modularidade ADACOR

3.4.2.4. Projeto do Hólón de Supervisão (HS)

O Hólón de Supervisão é formado pelo *Modulo – Sistema de Supervisão* responsável pela coordenação, comunicação e funcionamento dos HOs no sentido de cumprir os objetivos globais de produção quando o sistema é integrado em uma arquitetura de controle distribuída (modo

normal). Ao mesmo tempo, o HS vai organizar e apresentar para um operador humano informações importantes que de outra forma seria difícil de conhecer, referentes ao estado atual de certas variáveis fornecidas pelos hólons operacionais. Caso o sistema for obrigado para trabalhar sem o supervisor devido a uma falha, cada um dos LCD terá que tomar conta do seu recurso físico comunicando-se entre si sem ajuda deste sistema.

O HS atua simultaneamente como um servidor e um cliente, como um servidor fornecendo informações solicitadas pelos dois hólons operacionais e como um cliente recebendo as informações do seu módulo associado de controle de qualidade e posicionamento, para determinar a rotina que o hólón operacional de movimentação deve executar.

3.4.2.5. Projeto do Hólón de Tarefa (HT)

Este sistema é formado pelo *Módulo – Sistema de Comando* e permite uma interatividade entre o processo e um operador humano, de forma que este último possa comandar a execução de determinadas operações e determinar o tipo de produto que o sistema deve montar. Cada ordem gerada automaticamente ou introduzida por um operador humano para a manufatura de certo tipo de produto é representada por um hólón de tarefa (HT), o qual será responsável pelo comando e execução dessa ordem; este hólón compreende as seguintes partes: decomposição da ordem, planejamento da alocação de recursos e execução da alocação de recursos. Para seu funcionamento o hólón de tarefa requisita um sistema de alimentação de materiais e um sistema de movimentação de produtos para uma área de armazenagem, no sistema de movimentação devem existir as peças necessárias para realizar a montagem do produto a ser produzido.

Neste sentido, o hólón de tarefa determina primeiro a operação de manufatura a ser realizada interagindo com o hólón de supervisão e o hólón operacional, e depois executar essa operação de acordo com as informações recebidas destes hólons. No modo normal de funcionamento o HT interatua diretamente com HS e este por sua vez com os HOs como é apresentado na Figura 13.

A implementação do HS e o HT os quais correspondem ao *Modulo – Sistema de Supervisão e Comando* é apresentada de maneira detalhada no Capítulo 5.

3.5. Considerações Sobre o Capítulo 3

A modularidade projetada na concepção da plataforma permitiu a integração dos quatro módulos tecnológicos propostos, através de dois níveis de modularidade um primeiro (macro) para formar um sistema automatizado de produção CSAP e um segundo (micro) para formar hólons em uma arquitetura holônica de tipo ADACOR.

As características de flexibilidade e modularidade foram consideradas na etapa da concepção desta arquitetura de modo a atender a duas perspectivas: tecnológica e pedagógica. A possibilidade de funcionamento e controle distribuído da arquitetura, a reconfigurabilidade e escalabilidade hardware - software, e a utilização de lógica reprogramável estruturada promovem uma variedade de atividades práticas, as quais incrementam o seu nível de complexidade na medida em que aumenta o grau de integração utilizado dentro da plataforma, aliás a disponibilização de laboratórios remotos promove atividades práticas a distância, flexibilizando ainda mais a utilização da plataforma.

No Capítulo 4 desta dissertação será discutida a modelagem da arquitetura proposta atendendo a uma metodologia modular que permita uma análise detalhada de cada uma das estações, módulos e hólons de tal forma que seus modelos possam ser depois utilizados (e implementados) de forma individual ou integrados para formar um processo contínuo.

4. ESTUDO E MODELAGEM DINÂMICA DA ARQUITETURA PROPOSTA

4.1. Sistemas Dinâmicos de Eventos Discretos

A base para a modelagem de Sistemas Automáticos de Manufatura se fundamenta na teoria de Sistemas de Eventos Discretos (Discrete Events Dynamic Systems - SED), estes são sistemas cuja evolução dentro de um conjunto de estados discretos é determinada por eventos geralmente não sincrônicos (DAVID, 1995), (CHARBONIER, 1999). Não somente para realizar análises formais, mas para projetar e implementar algoritmos de funcionamento para esses sistemas em lógica reprogramável estruturada é requerida uma representação determinista, na qual para uma seqüência de valores na entrada corresponda uma e só uma seqüência de valores na saída (PANETTO, 1994).

Atualmente, existem muitas técnicas para especificação, descrição e modelagem de SED, dentre elas o GRAFCET (SFC - Sequential Flow Chart), Ladder, etc, especificadas através da norma IEC 1131-3 (Ver Capítulo 2), focadas para a implementação dos algoritmos em Controladores Lógicos Programáveis (CLP). Outros formalismos, como Redes de Petri (RdP), Especificação de Sistemas de Eventos Discretos (DEVS), Autômatos, permitem representar formal e matematicamente o sistema, possibilitando realizar posteriormente a análise estrutural e dinâmica do mesmo.

4.2. Redes de Petri (RdP)

As RdP são uma ferramenta de modelagem, tanto gráfica quanto matemática, adequada para descrever e estudar a dinâmica de sistemas de processamento de informação concorrentes, assíncronos, distribuídos, não determinísticos ou estocásticos. Como uma ferramenta gráfica as RdP podem ser usadas como um complemento esquemático no entendimento e análise do processo, similar aos fluxogramas e diagramas de blocos, além

disso a utilização de uma marcação por meio de fichas permite simular graficamente a dinâmica e as atividades concorrentes no sistema. Como uma ferramenta matemática as RdP permitem estabelecer equações de estado, equações algébricas, entre outras que descrevem o comportamento e a arquitetura do sistema (MURATA, 1989).

Devido a estas características, a análise do modelo do sistema em RdP revela informação importante sobre a estrutura e o fluxo de dados e recursos dentro do mesmo, permitindo de esta forma o estudo do comportamento dinâmico do SED modelado. Aliás, sua aplicação é adequada para representar concorrências e paralelismo de atividades, desta forma a utilização de RdP abrange desde a análise de sistemas de computação até sistemas de produção e comunicação. A teoria inicial das RdP foi desenvolvida por Karl Adam Petri, através da sua tese de doutorado em 1962 na Technical University of Darmstadt (Alemanha). Originalmente as RdP estão baseadas na teoria de *bags* a qual é uma generalização da teoria de conjuntos, permitindo a existência mais de um elemento dentro destas estruturas (*bags*) (VALETTE, 2002), (PETTERSON, 1989), (CARDOSO, 1999).

Na utilização de RdP podem se considerar duas abordagens uma primeira somente focada na modelagem e análise do sistema e uma segunda que acrescenta também o projeto e/ou melhora do sistema modelado utilizando a realimentação obtida na etapa de análise (EL RHALIBI, 1995), (PETERSON, 1989).

4.2.1. Definição de uma Rede de Petri

Formalmente uma Rede de Petri (RdP) é um grafo bipartido e dirigido, que pode apresentar também um estado inicial conhecido como Marcação Inicial M_0 . O grafo bipartido inicial N é composto de dois tipos de nós: Lugares e Transições unidos entre si por meio de arcos. Matematicamente uma RdP marcada é representada por uma 5-tupla:

$$PN = (P, T, F, W, M_0) \quad (1)$$

onde

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ é um conjunto finito de lugares

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ é um conjunto finito de transições

$F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ é um conjunto de vértices onde $P \cap T = \emptyset; P \cup T \neq \emptyset$

$W : F \rightarrow \{1,2,3,\dots\}$ é uma função de pesos

$M_0 = P \rightarrow \{0,1,2,3,\dots\}$ é uma marcação inicial

Considerando uma RdP N , sem nenhuma marcação inicial, uma RdP marcada também pode-se representar como:

$$PN = (N, M_0) \quad (2)$$

Em uma RdP os lugares estão relacionados às condições possíveis do sistema e as transições estão relacionadas aos eventos que podem ocorrer dentro do mesmo, fazendo-o conseqüentemente mudar de estado. Estes conceitos são detalhados a seguir:

- **Lugar:** Descreve um estado do sistema, estando relacionado a uma condição que pode ser verdadeira ou falsa. Gráficamente os lugares são representados por círculos;
- **Transição:** Descreve um evento que pode ter lugar no sistema produzindo uma mudança no seu estado. Para que um evento ocorra têm que ser cumpridas certas condições chamadas de *Pré-condições*, assim *habilitando* a transição, após o evento ocorrer são ativadas suas *Pós-condições*. Gráficamente as transições são representadas por uma barra ou por uma caixa;
- **Arcos:** Conectam os lugares e as transições. Em uma RdP os arcos somente podem ir de um lugar para uma transição ou de uma transição para um lugar, estes podem estar acompanhados de um número inteiro positivo indicando seu *Peso*. Uma RdP é chamada de *RdP Pura ou Ordinária* se os pesos de todos seus arcos são iguais a 1;
- **Marcação:** Está relacionada com o(s) estado(s) do sistema que estão ativos (suas condições associadas são verdadeiras), estes são identificados por meio de *Fichas* ou pontos pretos no seu interior. Uma marcação pode ser denotada por M um m -vetor coluna, onde m é o número de lugares na RdP, o p -componente do vetor M é representado por $M(p)$ indicando o número de fichas no lugar p . A marcação é necessária para analisar a dinâmica (evolução dos estados) do sistema. As fichas dentro de uma RdP podem representar tanto o fluxo de informação dentro do sistema quando a movimentação de recursos dentro do mesmo. Se o número de fichas dentro de uma RdP está limitado a um número inteiro k esta é chamada de RdP k -limitada, uma RdP que é 1-Limitada é conhecida como *RdP Segura* (IORDACHE, 2008).

Uma transição tem associados lugares de entrada e saída relacionados às pré-condições e pós-condições do evento, uma RdP pura onde todas as transições tem somente uma pré-condição e uma pós-condição é conhecida como *Máquina de Estado (SM)*, uma RdP pura onde cada lugar tem somente uma transição de entrada e uma de saída se denomina *Grafo Marcado (MG)*. Se a RdP tem um limite para a quantidade de fichas que podem existir em um lugar se denomina *RdP com capacidade finita*.

4.2.2. Funcionamento de uma RdP

Com o intuito de simular a dinâmica ou comportamento do sistema modelado com uma RdP é utilizada a regra de disparo de transições, a qual determina a mudança do estado ou marcação da RdP, esta regra é descrita a seguir:

- 1) Uma transição t está *habilitada* se cada um dos seus lugares de entrada p está marcado pelo menos com $w(p, t)$ fichas sendo este valor o peso do arco desde o lugar p até a transição t ;
- 2) Uma transição habilitada pode ou não ser disparada, dependendo da ocorrência do evento associado;
- 3) O disparo de uma transição t remove $w(p, t)$ fichas de cada um dos seus lugares de entrada e adiciona $w(p, t)$ a cada um dos seus lugares de saída.

Se a dinâmica de funcionamento leva em conta a capacidade limite de fichas em um lugar, esta se denomina *Regra de Transição Estrita*, caso contrário se denomina *Regra de Transição Fraca*.

O funcionamento de uma RdP pode ser exemplificado na Figura 14.

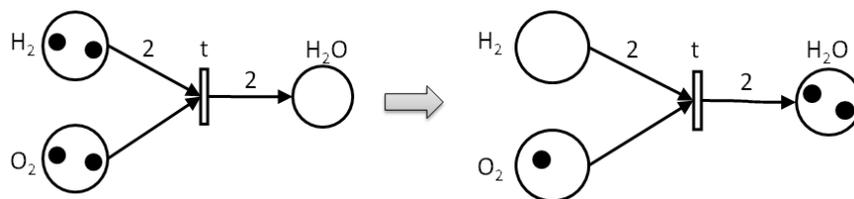


Figura 14. Funcionamento de uma Rede de Petri (MURATA, 1989)

Quando um lugar de uma RdP tem mais de uma transição de saída apresenta-se o *Conflito*, esta situação junto com a *Concorrência* (ou paralelismo) são representadas

conforme a Figura 15. Quando em uma RdP para qualquer par de transições habilitadas, o disparo de uma delas não desabilita a outra esta rede é chamada de *RdP Persistente*.

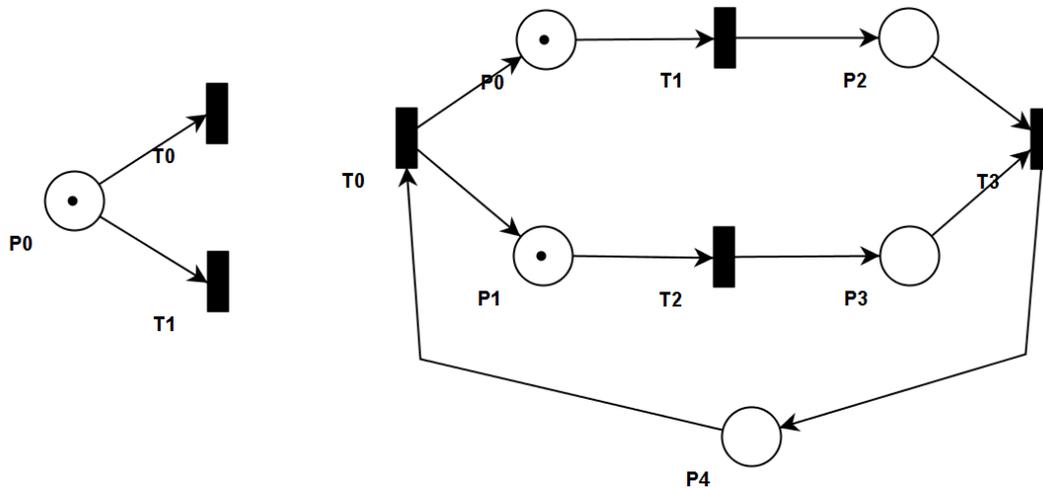


Figura 15. Exemplo de Conflito e Concorrência em uma Rede de Petri

A concorrência e o conflito fazem com que as RdP não sejam completamente deterministas (LEE, 2007). Embora não exista um determinismo absoluto na ordem de ativação das transições habilitadas, o ordenamento parcial na qual esta ativação pode ocorrer é único (dependente da estrutura de RdP). Como apresentado acima, qualquer máquina de estados (SM) pode ser representada por meio de uma RdP, aliás, estas últimas oferecem uma vantagem com respeito às SM já que os modelos em RdP podem ser combinados de forma serial e paralela, de forma a modelar sistemas complexos formados por vários sub-sistemas, sem a necessidade de acrescentar estados ou transições auxiliares para acoplar os modelos. (PETTERSON, 1989), (VALETTE, 2002).

4.2.3. Análises do Sistema Utilizando a Modelagem com RdP

A modelagem de um Sistema de Eventos Discretos (SED) utilizando RdP é o ponto de partida para o estudo do mesmo, inicialmente mediante uma análise independente da marcação (análise estática ou estrutural) e logo através de uma segunda análise dependente da marcação com fichas (análise dinâmica ou de funcionamento), podendo-se estudar através desta última, propriedades como: alcançabilidade, capacidade, segurança, vida ou ausência de pontos mortos, reversibilidade, persistência, distância sincrônica, etc. (RUSSO, 2005).

Em geral os métodos de análises de SED a partir do seu modelo com RdP podem ser divididos em três grandes grupos:

- Arvore de alcançabilidade;
- Abordagem Matriz – Equação;
- Técnicas de Redução ou decomposição.

A abordagem matriz - equação está fundamentada no conceito de modelar completamente o comportamento de sistemas concorrentes a partir de equações, porém em alguns casos a solução destas equações fica restringida devido à natureza não determinística das RdP e à busca por uma solução considerando somente números inteiros positivos. Uma RdP N (só o grafo sem marcação) com n transições e m lugares, pode ser descrita através de uma matriz A ($n \times m$) denominada matriz de incidência, cujos elementos são obtidos a partir da recorrência:

$$a_{ij} = a_{ij}^+ - a_{ij}^- \quad (3)$$

onde:

$a_{ij}^+ = w(i,j)$ é o peso do arco desde a transição i até seu lugar de saída j ;

e

$a_{ij}^- = w(j,i)$ é o peso do arco desde o lugar de entrada j até a transição i .

Segundo esta notação a transição i está habilitada para ser disparada se:

$$a_{ij}^- \leq M(j) \quad j = 1,2,3,\dots, m \quad (4)$$

Por meio da abordagem da matriz de incidência é possível descrever a dinâmica de funcionamento de uma RdP por meio da seguinte equação de estado:

$$M_k = M_{k-1} + A^T u_k, k = 1,2,\dots \quad (5)$$

Onde M_k ($m \times 1$) é um vetor coluna de marcação da rede, u_k ($n \times 1$) é um *vetor de controle de disparo* das transições, que somente tem um dos seus componentes em 1, indicando a transição disparada.

4.2.3.1. Condição necessária de Alcançabilidade

No caso que seja desejável alcançar uma condição de marcação M_d partindo desde uma condição de marcação inicial M_0 , através do disparo de uma seqüência de transições

$\{u_1, u_2, u_3, \dots, u_d\}$, será possível analisar matematicamente este processo levando em consideração a equação (5) e empregando a seguinte relação:

$$M_d = M_0 + A^T \sum_{k=1}^d u_k \quad (6)$$

que pode ser reescrita na forma:

$$A^T X = \Delta M \quad (7)$$

Para que o estado M_d possa ser alcançado desde M_0 deve-se cumprir que:

$$B_f \Delta M = 0 \quad (8)$$

com

$$B_f = [I_\mu \ : \ -A_{11}^T (A_{12}^T)^{-1}] \quad (9)$$

Onde I_μ é a matriz identidade de ordem $\mu = m - r$

Nesta definição a matriz de incidência A tem sido particionada em quatro blocos levando em conta o seu posto (r)

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \quad (10)$$

A matriz A_{11} tem dimensões ($r \times (m-r)$) e a matriz A_{12} é de dimensões ($r \times r$).

Uma RdP é completamente controlável se o seu posto é igual ao número de lugares: $r = m$, neste caso a equação 7 teria uma solução X para qualquer ΔM .

Várias extensões das RdP tem sido desenvolvidas e utilizadas para o estudo de problemas específicos, entre as mais importantes variações derivadas das RdP ordinárias estão as RdP coloridas, RdP de alto nível, RdP com tempo, RdP estocásticas, entre outras.

4.3. Grafo de Comando Etapa e Transição – GRAFCET

O formalismo GRAFCET apresentado a seguir pode ser considerado como um tipo de RdP segura, baseada em uma hipótese de sincronia forte, que faz com que este possua o

determinismo necessário para ser implementado em CLPs, por isso na atualidade este formalismo é muito utilizado em ambientes industriais.

O funcionamento do GRAFCET é baseado em cinco regras de evolução, nas quais a hipótese de sincronismo forte supõe que a reação ao estímulo é instantânea (as ações, o tempo de desativação de uma transição e ativação de uma etapa têm duração quase nula), isto postulado junto com as cinco regras de evolução assegura o determinismo do modelo (PANNETO, 1994).

O GRAFCET (GRaphe Fonctionnel de Commande Etapes-Transitions) foi desenvolvido em 1977 pela AFCET (Association française de cybernétique économique et technique) junto com a ADEPA (Agence nationale pour le DEveloppement de la Production Automatisée) (BAKER, 1987), como um método gráfico para modelar ou descrever a evolução de sistemas seqüenciais, especialmente sistemas complexos de manufatura, sem ambigüidade e com uma alta clareza na representação. Em 1988 o diagrama funcional GRAFCET foi padronizado na França pela norma NFC03 – 190 (A EL RELIBI, 1995), (BAKER, 1987), e virou padrão internacional pela IEC (International Electrotechnical Commission) na norma IEC-848 “Preparation of Function Charts for Control Systems” onde foi denominado SFC (Sequential Function Chart).

Atualmente, as linguagens que utilizam o formalismo do GRAFCET são adequadas para especificar o funcionamento de sistemas, além de outras abordagens como o Ladder, que são mais focadas na implementação física (BAKER, 1987). Desde uma perspectiva de representação do funcionamento do sistema, o GRAFCET consegue uma representação mais voltada à programação de CLP’s devido ao seu sincronismo, do que uma descrição somente literal, ou uma representação booleana não muito geral. Em contrapartida, os diagramas de fluxo, as máquinas de estado ou as RdP estão baseadas em uma hipótese assíncrona (DAVID, 1995). O potencial deste grafo funcional reside em sua capacidade para descrever o comportamento do sistema em relação às informações recebidas, de uma forma rigorosa evitando assim incoerências, bloqueios ou conflitos durante o funcionamento do mesmo. Algumas vantagens desta ferramenta são:

- 1) Permite a descrição de qualquer Sistema de Automação;
- 2) É facilmente compreendida por qualquer pessoa envolvida em Automação Industrial (A EL RELIBI, 1995);
- 3) Representação clara, legível e sintética;
- 4) Metodologia de programação estruturada, "Top-Down" (de forma descendente) que permite o desenvolvimento conceitual do geral para o particular;
- 5) Introduce um conceito "tarefa" de forma hierarquizada.

4.3.1. Conceitos Básicos Metodologia Grafcet

O grafo GRAFCET (Figura 16) tem sua origem nas RdP, sendo composto de:

- **Etapas:** Representam estados parciais do sistema, uma etapa **está associada a uma ação (não sempre acontece o mesmo em relação às RdP)**. Em determinado momento uma etapa pode estar ativa ou inativa, a ação associada à etapa só acontece no caso a etapa esteja ativa. As etapas são representadas por uma caixa com um número no seu interior;
- **Transições:** controlam a ativação ou desativação das etapas dependendo do valor lógico da receptividade ou condição associada (função booleana dos sensores e variáveis internas do sistema). No caso existam duas ou mais etapas depois de uma transição disparada, estas serão ativas ao mesmo tempo. As transições são representadas no diagrama GRAFCET como linhas horizontais. Para representar uma etapa ativa pode-se colocar uma ficha no seu interior;
- **Ligações Orientadas:** conectam uma etapa a uma transição ou vice-versa, a diferença das RdP, no GRAFCET estes arcos não possuem um peso associado (FERREIRA, 2006).

4.3.2. Funcionamento do GRAFCET

O comportamento dinâmico do grafo GRAFCET foi definido na norma IEC-848 em cinco regras de evolução, como se descreve a seguir:

Regra 1 - Situação Inicial: Definida pelas etapas ativas antes do início do processo. No caso dos processos cíclicos é definida como um estado de repouso do sistema.

Regra 2 – Disparo de uma Transição: Uma transição está *validada* se todas as etapas imediatamente precedentes (etapas conectadas à transição) estão ativas, caso contrário a transição está *não validada*. No caso que uma transição esteja validada e o valor da sua receptividade associada seja verdadeiro, essa transição será disparada. A duração do disparo transição é considerada infinitamente pequena, mas não nula (A EL RHALIBI, 1994).

Regra 3 – Evolução das Etapas Ativas: Quando uma transição é disparada à/às etapa(s) imediatamente seguinte(s) à mesma são ativadas e as etapas imediatamente precedentes à mesma são desativadas simultaneamente.

Regra 4 – Disparo Simultâneo de Transições: Todas as transições com possibilidade de disparo simultâneo são disparadas simultaneamente.

Regra 5 – Ativação e desativação simultânea de uma etapa: No caso que uma etapa seja simultaneamente ativada e desativada, esta permanecerá ativa sem interrupção (BIEREL, 1995).

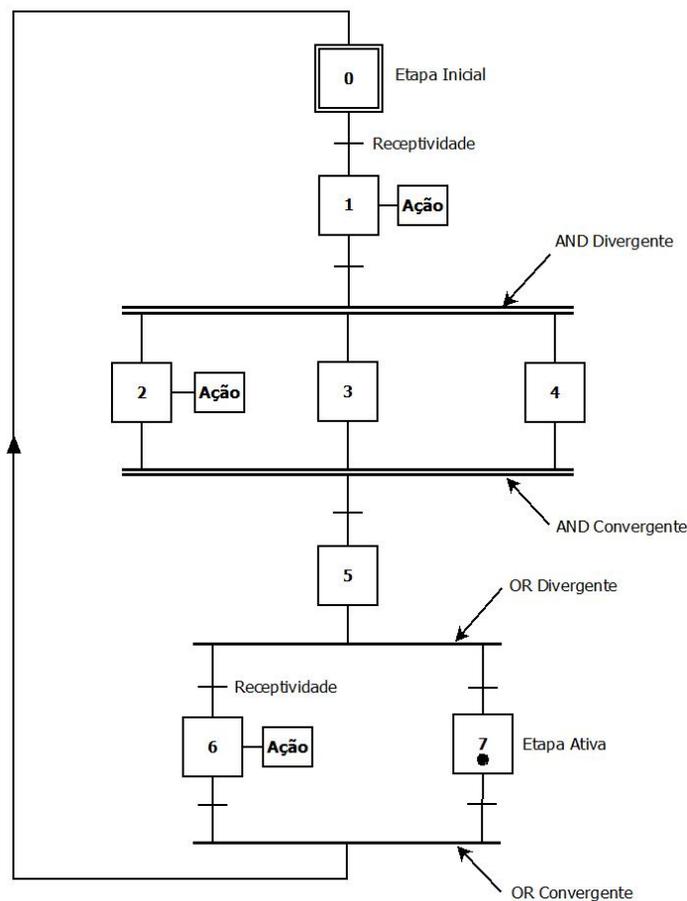


Figura 16. Exemplo de diagrama GRAFCET

4.4. Modelagem da arquitetura ADACOR

Este trabalho apresenta uma proposta de integração de tecnologias para uma plataforma automatizada colaborativa direcionada segundo uma arquitetura holônica do tipo ADACOR (ADAPtive holonic COntrol aRchitecture for distributed manufacturing systems). A seguir, é apresentada a modelagem dinâmica completa da plataforma levando em consideração os dois hólons operacionais projetados (Capítulo 3), um primeiro focado em uma célula automatizada contendo sensores e atuadores industriais, e outro focado em um sistema robótico de movimentação junto com um sistema de visão artificial.

Conforme (LEITAO, 2005), embora a UML (Linguagem Unificada de Modelagem) seja adequada para descrever a estrutura estática do sistema, não permite modelar seu comportamento dinâmico nem validar ou verificar formalmente seu funcionamento. A modelagem do comportamento dinâmico de um sistema requer uma ferramenta que possa capturar as características de concorrência, paralelismo, distribuição, operações assíncronas, bloqueios, conflitos ou compartilhamento de recursos, as quais estão presentes nos HMS, com o intuito de validar formalmente as características estruturais, o funcionamento e rendimento do SED e detectar possíveis bloqueios.

Ao atender os requisitos anteriores e oferecer uma especificação formal rigorosa, as RdP resultam uma ferramenta adequada para projetar, modelar e analisar CSAPs que seguem uma arquitetura holônica (Figura 17). Assim a dinâmica de um sistema holônico completo pode ser modelada levando em consideração a modelagem de cada um dos hólons individuais que o compõem (FLOCHOVA, 2003), (LEITAO, 2006). Esta modelagem é bem fundamentada matematicamente e tem a capacidade para representar formalmente e graficamente os conceitos e características típicas dos HMS nomeadas anteriormente. Deste modo, as RdP são utilizadas para projetar, formalizar e analisar a estrutura e o comportamento dinâmico do sistema, particularmente a interação e cooperação entre os hólons distribuídos, permitindo também projetar e validar o comportamento do sistema de controle e também analisar outros aspectos importantes como o rendimento do mesmo.

No caso específico dos CSAP / ADACOR cada hólón é modelado com uma RdP que permite estudar o comportamento dinâmico do componente, e o controle global é descrito mediante a coordenação e sincronização entre esses modelos individuais (LEITAO, 2006). Na modelagem com RdP, os lugares irão representar o estado dos hólons enquanto as transições irão representar: os eventos que podem acontecer, a sincronização entre os distintos hólons ou entre fios dentro de um hólón. As fichas irão representar: recursos, partes dentro do sistema ou o controle lógico (LEITAO, 2004). Assim com o intuito de analisar o modelo com RdP, este deve incluir informação significativa tanto do Sistema de Produção quanto das operações de controle, planos de processo, recursos, disposição do SP, comandos, leis de controle e as inter-relações entre eles (LEE, 2005).

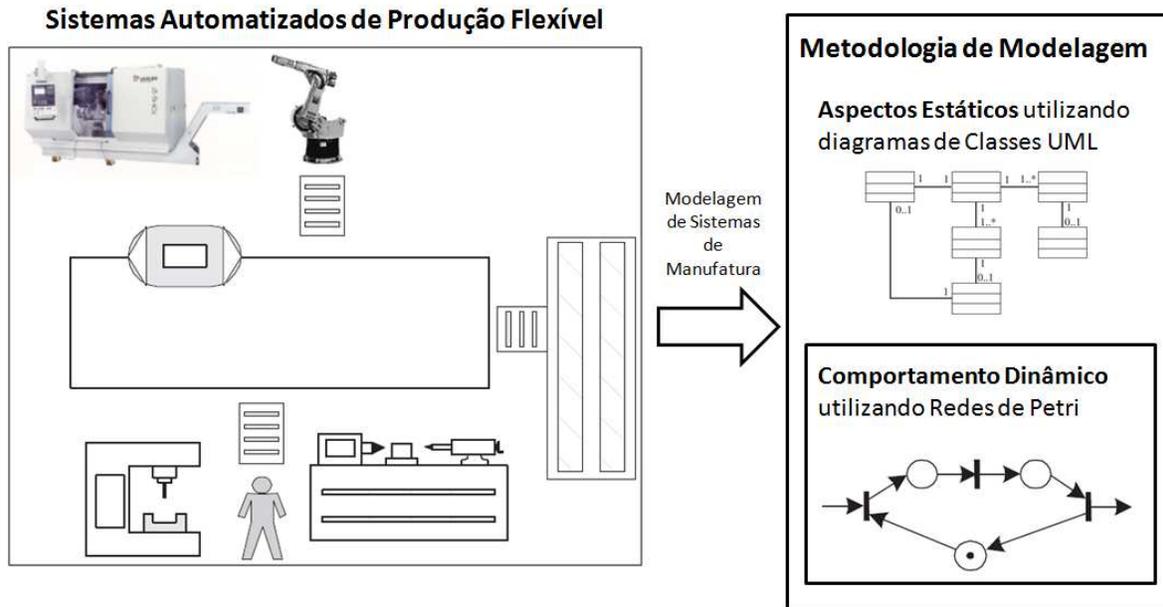


Figura 17. Modelagem de Sistemas de Controle de Manufatura (LEITAO, 2004)

Desta forma é possível obter um modelo passível de ser simulado computacionalmente e validado analiticamente. Basicamente existem duas possíveis análises a realizar com o modelo do sistema: análise qualitativa e análise quantitativa. A primeira análise visa verificar o cumprimento das especificações desejadas dos componentes do sistema e do seu comportamento, por exemplo: ausência de bloqueios, descrição dos ciclos, número finitos de estados do sistema, disponibilidade de recursos, possíveis seqüências de controle, distância entre componentes e/ou atividades do sistema. A segunda análise (quantitativa) ou de rendimento leva em conta análises de índices como:

período de produção, utilização percentual de um recurso relacionado à produção de uma parte, partes manufaturadas por unidade de tempo, etc (LEITAO, 2006).

4.4.1. Metodologia Para a Modelagem da Arquitetura ADACOR Proposta

A metodologia para a modelagem da plataforma implementada com intuito de validar a estrutura neste trabalho levou em consideração duas abordagens, uma a continuação da outra: a primeira utilizando Redes de Petri (apresentada neste capítulo) de forma a descrever, analisar formalmente e avaliar a dinâmica da estrutura holônica proposta, e logo uma segunda abordagem que utiliza o grafo GRAFCET, visando obter uma especificação da parte de comando facilmente implementável através de lógica reprogramável estruturada (esta segunda abordagem será detalhada no Capítulo 5 desta dissertação). O fluxograma da Figura 18 descreve a seqüência de etapas para a modelagem, especificação e implementação da lógica da parte de comando.

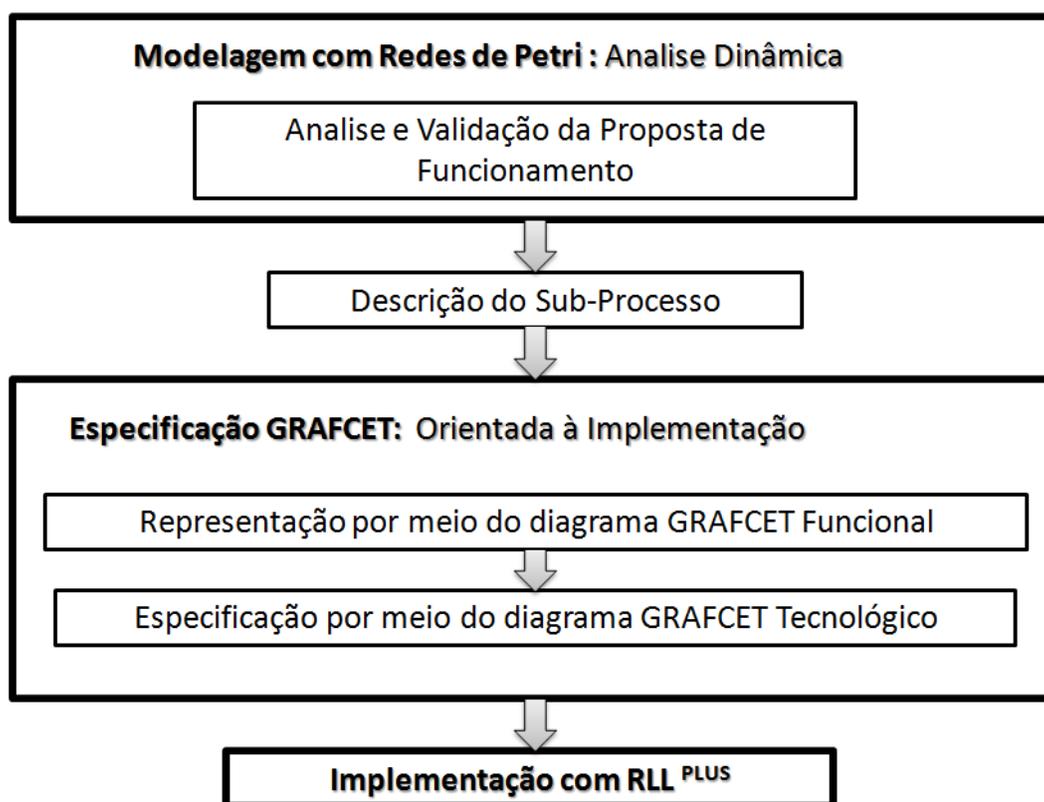


Figura 18. Etapas da Modelagem e Especificação da parte de Comando

4.5. Modelagem com RdP dos Sub-Processos na Arquitetura Proposta

No caso da primeira abordagem (utilizando RdP), e visando uma modelagem modular que permita a obtenção de modelos de processos complexos de uma maneira simples, o sistema é decomposto em suas unidades funcionais básicas: *Estações de Trabalho*.

Cada estação pode executar uma tarefa específica de um CSAP, e para cada uma delas é desenvolvido o modelo completo com RdP (Representação gráfica e matemática) e as análise de alcançabilidade das propostas de funcionamento; na parte final do capítulo é apresentada a integração destes modelos atômicos de maneira a formar hólons e em um nível superior uma estrutura colaborativa ADACOR. A modelagem em RdP permite que os modelos das estações individuais possam ser facilmente integrados sem necessidade de acrescentar estados nem transições adicionais (MURATA, 1989). O fluxograma que descreve o processo para a modelagem e análise dinâmica é apresentado na Figura 19.

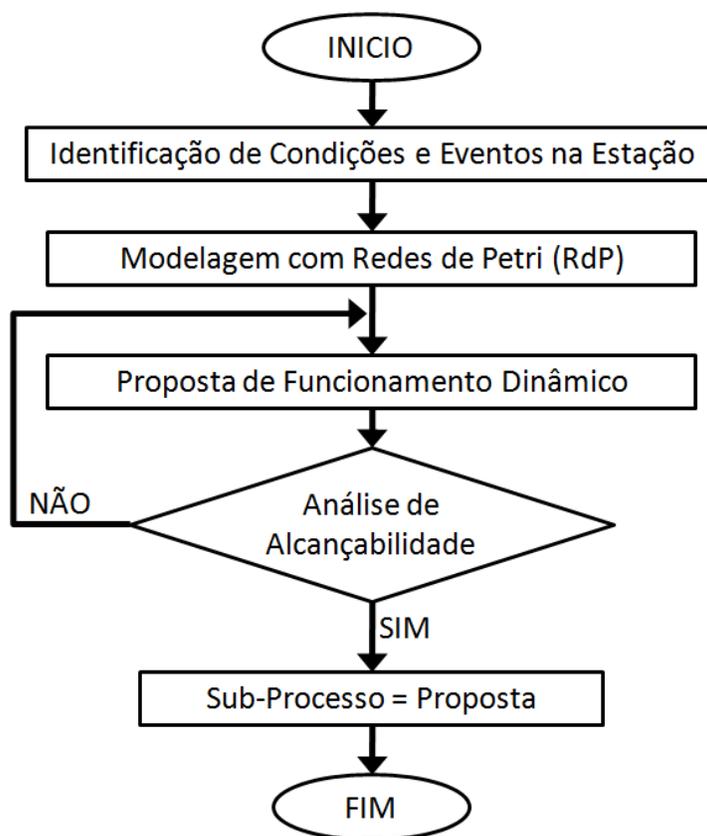


Figura 19. Processo de Modelagem e Análise Dinâmica com RdP

4.5.1. Modelagem da Estação de Classificação

4.5.1.1. Entradas e Saídas

O modelo em RdP da estação de classificação, possui uma entrada representando as peças que vêm da cadeia de alimentação, e tem duas saídas representando o deslocamento através de rampas diferentes das peças que podem ser metálicas ou plásticas. Essas saídas podem ser conectadas à estação de montagem quando for necessário integrar essas duas estações em um processo. A estação de classificação é composta de sensores (2 indutivos e 1 fotoelétrico) e atuadores (1 solenóide linear). O modelo da estação de classificação é apresentado na Figura 20, e a Tabela 1 e Tabela 2 apresentam a definição das variáveis de lugares e transições correspondentes a este modelo.

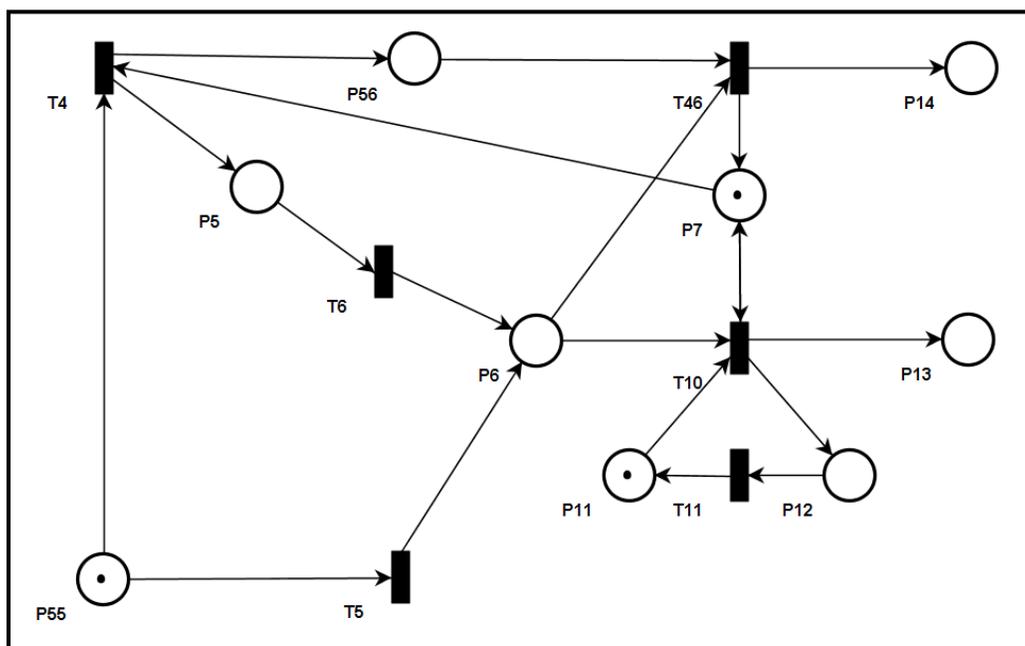


Figura 20. Modelo em RdP da Estação de Classificação

4.5.1.2. Considerações na Modelagem com RdP da Estação de Classificação

Marcação Inicial e Final

Com o intuito de simular o comportamento dinâmico da estação de classificação, é necessário definir um estado inicial no seu modelo em RdP, por meio de uma marcação que irá evoluindo de acordo com o disparo das transições. Os estados inicialmente ativos são identificados ou marcados por meio de fichas no seu interior, assim dos nove estados na estação de classificação três são inicialmente ativados: P7 (Variável de controle de presença

de peça metálica inativa), P11 (Solenóide está recuado) e P55 (Peça se movimentando para a estação de Classificação). Nesta estação são definidas duas propostas de funcionamento cada uma tendo uma marcação final: na primeira são ativos os estados P11, P7 e P13 (Peça plástica se deslocando pela rampa); na segunda marcação final são ativos P11, P7 e P14 (Peça metálica saindo da estação de classificação).

Tabela 1. Lugares no Modelo em RdP da Estação de Classificação

LUGAR	ID.	CAP.	TRANSIÇÃO ENTRADA	TRANSIÇÃO SAÍDA
Peça se movimentando para a estação de Classificação	P55	1	T2 (Cadeia de Alimentação)	T4, T5
Contagem do tempo desde ativação de sensor indutivo até Sensor Fotoelétrico (0,4s)	P5	1	T4	T6
Variável de controle de presença de peça metálica ativa (3s*).	P56	1	T4	T46
Sensor fotoelétrico esta ativo.	P6	1	T5, T6	T46, T10
Variável de controle de presença de peça metálica inativa.	P7	1	T46, T10	T4, T10
Solenóide está recuado.	P11	1	T11	T10
Solenóide está avançado (0,5s*)	P12	1	T10	T11
Peça Plástica se deslocando pela rampa (0,6s)	P13	1	T10	T19 (estação de Montagem)
Peça metálica saindo da estação de classificação (4s)	P14	1	T46	T16 (estação de Montagem)

Tabela 2. Transições no Modelo em RdP da Estação de Classificação

TRANSIÇÃO	ID.	Prioridade de Disparo	LUGAR ENTRADA	LUGAR SAIDA
Sensor indutivo é ativado, peça metálica é detectada na estação de classificação.	T4	1	P55, P7	P5, P56
Sensor Fotoelétrico é ativado.	T5	1	P55	P6
Sensor fotoelétrico é ativado por peça metálica.	T6	2	P5	P6
Tempo de variável de controle de peça metálica termina.	T46	1	P56, P6	P14, P7
Peça plástica é detectada na estação de classificação.	T10	1	P6, P7, P11	P7, P13, P12
Tempo de avanço de solenóide termina.	T11	2	P12	P11

Lugares

Devido à concepção da parte mecânica da célula de manufatura, as peças irão chegar uma de cada vez, através da cadeia de alimentação até a estação de classificação. Os sensores também só irão detectar uma peça de cada vez. Assim, a maioria dos lugares onde as fichas estão representando a movimentação de recursos (peças) são definidos como tendo capacidade unitária. Os lugares onde é possível a presença de várias peças ou produtos não têm limite na sua capacidade (Tabela 1).

Transições

O disparo de algumas transições é realizado após um tempo *fixado* de estarem habilitadas, para definir essas transições no modelo é utilizada uma *Prioridade de Disparo*, a qual é atribuída levando em consideração o tempo no qual realmente podem ocorrer os eventos no sistema físico. Assim, as transições que representam eventos que ocorrem primeiro têm prioridade maior que do que as outras, de modo ao modelo em RdP garantir uma correta representação do funcionamento do sistema real. Na estação de classificação, as transições T6 (Sensor fotoelétrico é ativado por peça metálica) e T11 (Tempo de avanço de solenóide termina) são definidas como tendo prioridade de disparo de 2 (Tabela 2).

4.5.2. Modelagem da Estação de Montagem

4.5.2.1. Entradas e Saídas

O modelo em RdP da estação de montagem possui três entradas, duas representando a chegada à estação de peças metálicas e plásticas provenientes da estação de classificação e uma correspondente ao funcionamento da esteira de movimentação. O sistema possui uma saída correspondente aos produtos montados ou peças metálicas que abandonam a estação, esta saída pode ser conectada à estação de inspeção caso seja necessário integrar estas duas estações. A estação de montagem é composta de sensores (1 fotoelétrico) e atuadores (1 solenóide de rotação). O modelo da estação de montagem é apresentado na Figura 21, e a Tabela 3 e Tabela 4 apresentam a definição de variáveis de lugares e transições correspondentes a este modelo.

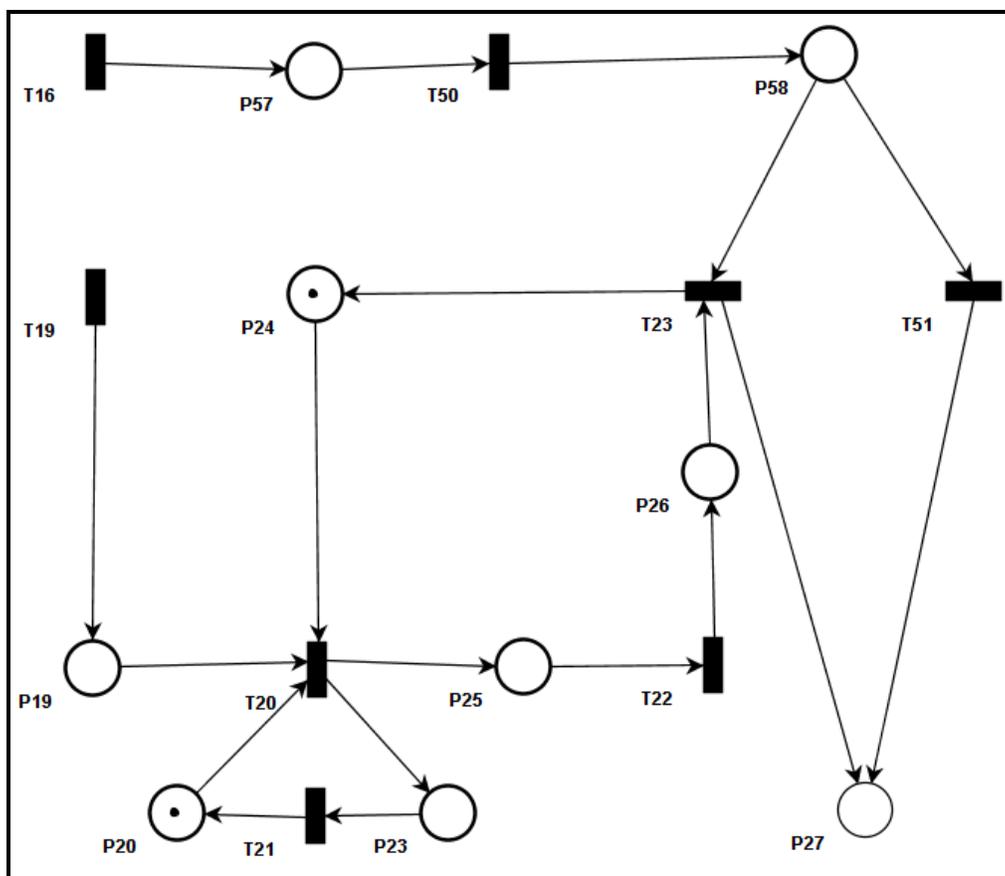


Figura 21. Modelo em RdP da Estação de Montagem

Tabela 3. Lugares no Modelo em RdP da Estação de Montagem

LUGAR	ID.	Cap .	TRANSIÇÃO ENTRADA	TRANSIÇÃO SAÍDA
Peças plásticas antes da comporta de Montagem.	P19	4	T19	T20
Peças metálicas na rampa de deslocamento de peças metálicas.	P57	4	T16	T50
Comporta de montagem está aberta (0,5s*).	P23	1	T20	T21
Comporta de montagem está fechada.	P20	1	T21	T20
Peça plástica caindo em estação de Montagem.	P25	1	T20	T22
Peça Plástica está na estação de montagem.	P26	1	T22	T23
Peça metálicas se movimentando para a estação de inspeção	P58	1	T50	T23, T51
Estação de montagem está vazia.	P24	1	T23	T20
Produto ou peça metálica sobre a banda transportadora depois da estação de montagem.	P27	1	T23, T51	T24 (Estação de Inspeção)

Tabela 4. Transições no Modelo em RdP da Estação de Montagem

TRANSIÇÃO	ID.	Prioridade de Disparo	LUGAR ENTRADA	LUGAR SAIDA
Peça metálica chega à banda transportadora	T16	1	P14 (estação de Classificação)	P57
Peça plástica termina deslocamento	T19	1	P13 (Estação de Classificação)	P19
Comporta de montagem deve ser aberta	T20	1	P19, P24, P20	P23, P25
Tempo de abertura da comporta termina.	T21	1	P23	P20
Peça metálica começa movimentação para a estação de montagem	T50	1	P57	P58
Peça plástica é detectada em estação de Montagem.	T22	2	P25	P26
Estação de montagem é esvaziada	T23	1	P26, P58	P24, P27
Tempo para sair de estação de montagem cumprido	T51	1	P58	P27

4.5.2.2. Considerações na Modelagem com RdP da Estação de Montagem

Marcação Inicial e Final

Com o intuito de simular o comportamento dinâmico da estação de montagem, é definida uma marcação inicial. Assim dos nove estados na estação de montagem, dois são inicialmente ativados: P20 (comporta de montagem está fechada) e P24 (a estação de montagem está vazia). Nesta estação é definida uma proposta de funcionamento com uma marcação final: nesta marcação são ativos P20, P24 e P27 (Produto ou peça metálica sobre a banda transportadora depois da estação de Montagem).

Lugares

Devido à concepção da parte mecânica da célula de manufatura, só existem dois lugares onde pode se apresentar uma acumulação de peças, estes lugares são a rampa de deslocamento de peças plásticas e a rampa de deslocamento de peças metálicas respectivamente, por isso no modelo com RdP também só existem dois lugares com capacidade de fichas maior do que um: P19 (Peças plásticas antes da comporta de montagem, capacidade = 4) e P57 (Peças metálicas na rampa de deslocamento de peças metálicas, capacidade = 4). Os outros lugares da estação de montagem são modelados tendo uma capacidade unitária de fichas (Tabela 3).

Transições

Na modelagem com RdP da estação de montagem só há uma transição com prioridade disparo maior do que um: T22 (Peça plástica é detectada em estação de montagem, prioridade = 2), (Tabela 4).

Já que não é implementado um sensor que indique se existem anéis plásticos antes da comporta de montagem, é preciso definir uma variável auxiliar que indique esta situação quando for necessário utilizar a estação de montagem adequadamente sem integrá-la com outras estações.

4.5.3. Modelagem da Estação de Inspeção

4.5.3.1. Entradas e Saídas

O modelo em RdP da estação de inspeção tem uma entrada representando o início da movimentação das peças ou produtos através da esteira de movimentação até a estação de inspeção, além disso esta estação tem duas saídas representando o início da movimentação das peças ou de produtos logo que estes tem sido inspecionados e etiquetados na estação. Essas saídas podem ser conectadas às entradas da estação de controle de qualidade caso for necessário integrar as duas estações. A estação de inspeção é composta de sensores (1 indutivo, 1 capacitivo). O modelo da estação de inspeção é apresentado na Figura 22, e a Tabela 5 e Tabela 6 apresentam a definição de variáveis para os lugares e as transições correspondentes a este modelo.

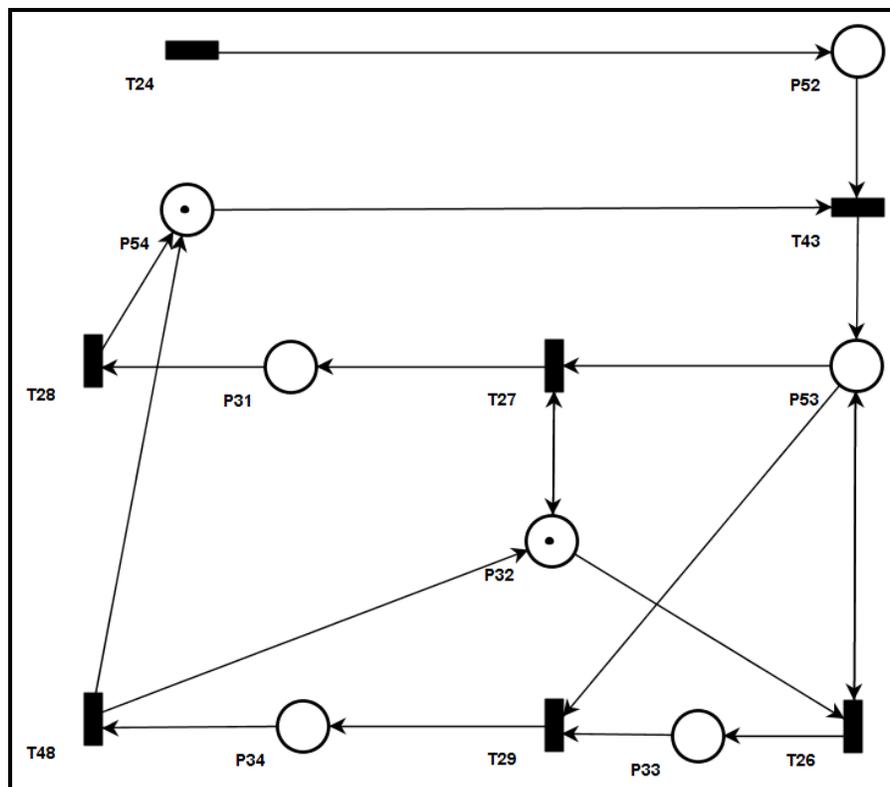


Figura 22. Modelo em RdP da Estação de Inspeção

Tabela 5. Lugares no Modelo em RdP da Estação de Inspeção

LUGAR	ID.	TRANSIÇÃO ENTRADA	TRANSIÇÃO SAIDA
Peças se movimentando para a estação de inspeção.	P52	T24	T43
Sensor indutivo está ativo.	P53	T43, T26	T27, T29, T26
Sensor indutivo está inativo.	P54	T28, T48	T43
Peça metálica na estação de inspeção.	P31	T27	T28
Sensor capacitivo esta inativo.	P32	T27, T48	T27, T26
Sensor capacitivo está ativo.	P33	T26	T29
Produto montado na estação de inspeção.	P34	T29	T48

Tabela 6. Transições no Modelo em RdP da Estação de Inspeção

TRANSIÇÃO	ID.	LUGAR ENTRADA	LUGAR SAIDA
Peça metálica chega à banda transportadora	T24	P27 (estação de Montagem), P36 (esteira de movimentação)	P36 (esteira de movimentação), P52
Peça plástica termina deslocamento	T43	P52, P4	P53
Comporta de montagem deve ser aberta	T26	P32, P53	P33, P53
Tempo de abertura da comporta termina.	T27	P32, P53	P31, P32
Peça metálica começa movimentação para a estação de montagem	T28	P31	P54
Estação de montagem é esvaziada	T29	P33, P53	P34
Tempo para sair de estação de montagem cumprido	T48	P34	P32, P54

4.5.3.2. Considerações na Modelagem com RdP da Estação de Inspeção

Marcação Inicial e Final

Com o intuito de simular o comportamento dinâmico da estação de inspeção, é definida uma marcação inicial. Assim dos sete estados na estação dois são inicialmente ativados: P32 (Sensor capacitivo está inativo) e P54 (Sensor indutivo está inativo). Nesta estação são definidas duas propostas de funcionamento, cada uma tendo uma marcação final: na primeira são ativos os estados P31 (Peça metálica na estação de inspeção) e P32 (Sensor capacitivo está inativo); na segunda marcação final é ativo P34 (Produto montado na estação de inspeção).

Lugares

Devido à disposição dos sensores na estação de inspeção, só é possível a detecção de uma só peça ou um só produto quando este estiver atravessando a estação, desta forma, todos os lugares no modelo em RdP da estação de inspeção têm capacidade somente para uma ficha (Tabela 5).

Transições

Na modelagem com RdP da estação de inspeção todas as transições têm a mesma prioridade, de forma que a ordem na qual essas podem ser disparadas depende unicamente do tipo de peça ou produto na estação (Tabela 6).

4.5.4. Modelagem da Estação de Controle de Qualidade

4.5.4.1. Entradas e Saídas

O modelo em RdP da estação de controle de qualidade tem duas entradas representando cada uma a movimentação de peças ou produtos para a estação, e uma entrada representando o estado vazio desta estação. Ao mesmo tempo, a estação tem quatro saídas: uma representando a esteira de movimentação parada, e outras três representando a definição do avanço do primeiro GL do sistema robótico de movimentação para pegar: um produto correto, um produto incorreto ou uma peça metálica. A estação é composta de sensores (1 câmera). O modelo desta estação é apresentado na Figura 23, e a Tabela 7 e Tabela 8 apresentam a definição de variáveis de lugares e transições correspondentes a este modelo.

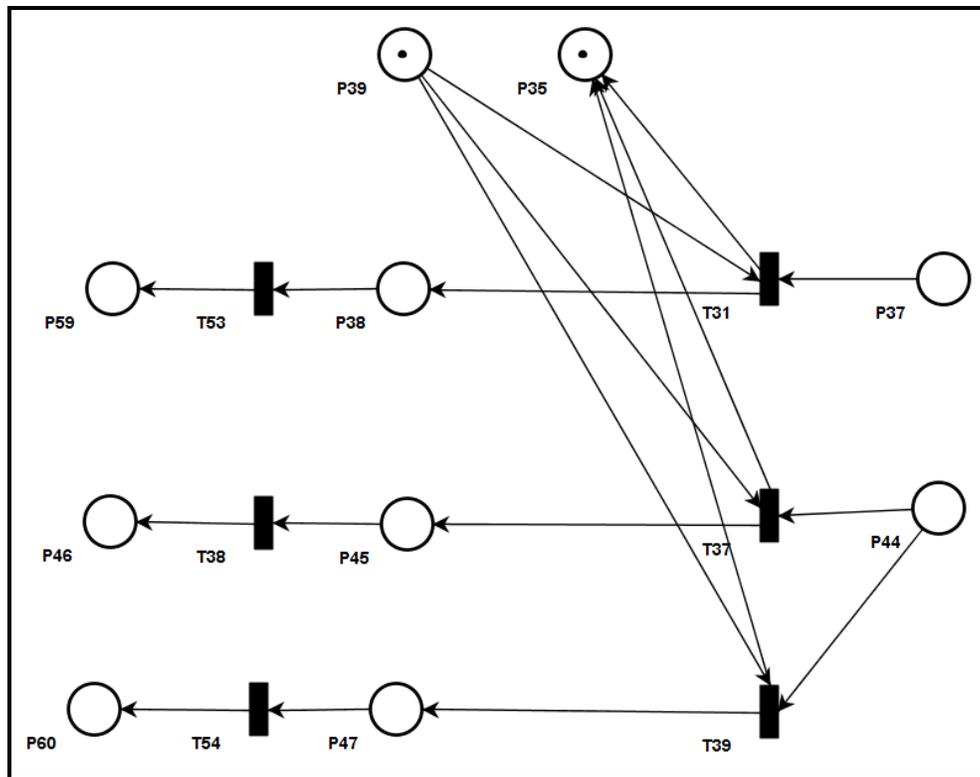


Figura 23. Modelo em RdP da Estação de Controle de Qualidade

Tabela 7. Lugares no Modelo em RdP da Estação de Controle de Qualidade

LUGAR	ID.	TRANSIÇÃO ENTRADA	TRANSIÇÃO SAIDA
Esteira de movimentação parada.	P35	T31, T37, T39	T32 (Esteira de Movimentação)
Peça metálica se movimentando para a estação de controle de qualidade.	P37	T28 (Estação de Inspeção)	T31
Peça metálica em estação de controle de qualidade.	P38	T31	T53
Estação de controle de qualidade vazia.	P39	T45, T47 (Estação de Transporte), T32 (esteira de movimentação)	T32 (Esteira de Movimentação), T31, T37, T39
Produto se movimentando para a estação de controle de qualidade.	P44	T48 (Estação de Inspeção)	T37, T39
Produto incorreto em estação de controle de qualidade.	P45	T37	T38
Produto correto em estação de controle de qualidade.	P47	T39	T54
Avanço para pegar peça metálica está definido.	P59	T53	T47 (Estação de Transporte)
Avanço para pegar peça plástica está definido.	P46	T38	T41 (Estação de transporte)
Avanço para pegar produto correto está definido.	P60	T54	T45 (Estação de Transporte)

Tabela 8. Transições no Modelo em RdP da Estação de Controle de Qualidade

TRANSIÇÃO	ID.	LUGAR ENTRADA	LUGAR SAIDA
Peça é detectada na estação de controle de qualidade.	T31	P36 (esteira de movimentação), P37, P39	P35, P38
Produto incorreto é detectado na estação de controle de qualidade.	T37	P36 (esteira de movimentação), P44, P39	P35, P45
Produto correto é detectado na estação de controle de qualidade.	T39	P36 (esteira de movimentação), P44, P39	P35, P47
Detecção da posição da peça metálica.	T53	P38	P59
Detecção da posição da peça plástica.	T38	P45	P46
Detecção da posição de produto correto.	T54	P47	P60

4.5.4.2. Considerações na Modelagem com RdP da Estação de Controle de Qualidade

Marcação Inicial e Final

Com o intuito de simular o comportamento dinâmico da estação de controle de qualidade, são definidas duas marcações iniciais. Assim dos dez estados na estação de controle de qualidade um é inicialmente ativado quando é integrada com a estação de inspeção: P39 (Estação de controle de qualidade vazia). Quando a estação de controle de qualidade vai funcionar de maneira individual requer além de P39, de um só dos seguintes estados ativos: P37 (Peça metálica se movimentando para a estação de controle de qualidade) ou P44

(Produto se movimentando para a estação de controle de qualidade). Nesta estação são definidas três propostas de funcionamento cada uma tendo uma marcação final: na primeira são ativos os estados P35 (Esteira de movimentação parada) e P59 (Avanço para pegar peça metálica está definido); na segunda marcação final são ativos P35 e P46 (Avanço para pegar peça plástica está definido), e na terceira marcação são ativos P35 e P60 (Avanço para pegar produto correto está definido).

Lugares

Devido à disposição da câmera na estação de controle de qualidade, é possível a detecção de uma só peça ou um só produto quando este estiver atravessando a estação. Assim, todos os lugares no modelo em RdP da estação de controle de qualidade tem capacidade somente para uma ficha (Tabela 7).

Transições

Na modelagem com RdP da estação de controle de qualidade todas as transições têm a mesma prioridade, de forma que a ordem na qual essas podem ser disparadas depende unicamente do tipo de produto (correto ou incorreto) ou peça metálica que estiver atravessando a estação (Tabela 8).

4.5.5. Modelagem da Estação de Movimentação

4.5.5.1. Entradas e Saídas

As entradas do modelo em RdP da estação de movimentação são: uma representando o estado inicial de posicionamento do manipulador, outra representando o início da movimentação de produtos na região de trabalho correspondente aos produtos aceitos, outra representando o início da movimentação de peças plásticas e finalmente, uma entrada correspondente ao início da movimentação de peças metálicas para a cadeia de alimentação. O modelo tem uma saída correspondente ao estado de posicionamento do robô, e outra correspondente à quantidade de peças sobre a cadeia de alimentação de forma que o processo integrado possa funcionar de forma contínua. A estação de movimentação é composta de atuadores (3 motores de passo, um para cada GL de um manipulador cartesiano). O modelo desta estação é apresentado na Figura 24, e a Tabela 9 e Tabela 10 apresentam a definição de variáveis de lugares e transições correspondentes a este modelo.

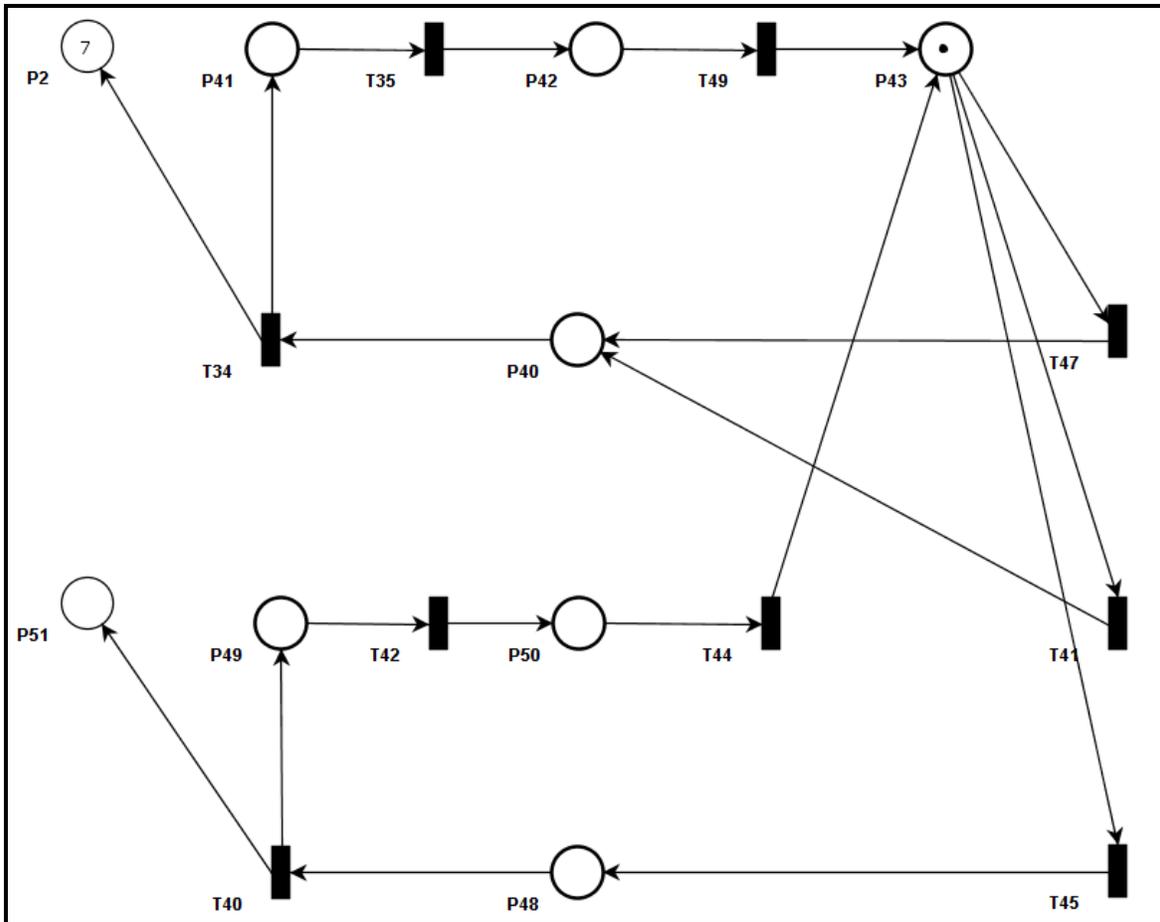


Figura 24. Modelo em RdP da Estação de Movimentação

Tabela 9. Lugares no modelo em RdP da Estação de Movimentação

LUGAR	ID.	TRANSIÇÃO ENTRADA	TRANSIÇÃO SAIDA
Manipulador movimentando peça.	P40	T41, T47	T34
Manipulador avançado até cadeia de alimentação.	P41	T34	T35
Manipulador está recuando.	P42	T35	T49
Manipulador parado na posição inicial.	P43	T32 (esteira de movimentação), T49, T44	T32 (esteira de movimentação), T41, T45, T47
Manipulador movimentando produto.	P48	T45	T40
Manipulador avançado até zona de produtos aceitos.	P49	T40	T42
Manipulador recuando de zona de produtos aceitos.	P50	T42	T44
Produtos aceitos em zona de produtos aceitos.	P51	T40	
Peças sobre a cadeia de alimentação.	P2	T34	

Tabela 10. Transições no modelo em RdP da Estação de Movimentação

TRANSIÇÃO	ID.	LUGAR ENTRADA	LUGAR SAIDA
Manipulador começa movimentação de peça plástica para cadeia de alimentação.	T41	P43, P46 (estação de controle de qualidade)	P38 (estação de controle de qualidade), P40
Manipulador deixa peça na cadeia de alimentação.	T34	P40	P41, P2
Manipulador começa recuo desde a cadeia de alimentação.	T35	P41	P42
Manipulador termina recuo desde a cadeia de alimentação.	T49	P42	P43
Manipulador começa movimentação de peça metálica para cadeia de alimentação.	T47	P59 (estação de controle de qualidade), P43	P39 (estação de controle de qualidade), P40
Manipulador começa movimentação de produto para zona de produtos aceitos.	T45	P60 (estação de controle de qualidade), P43	P39, P48
Manipulador deixa produto em zona de produtos aceitos.	T40	P48	P49, P51
Manipulador começa recuo desde zona de produtos aceitos.	T42	P49	P50
Manipulador termina recuo desde zona de produtos aceitos.	T44	P50	P43

4.5.5.2. Considerações na Modelagem com RdP da Estação de Movimentação

Marcação Inicial e Final

Com o intuito de simular o comportamento dinâmico da estação de movimentação, é definida uma marcação inicial. Assim dos nove estados na estação de movimentação, um é inicialmente ativado: P43 (Manipulador parado na posição inicial). O estado P2 (Peças sobre a cadeia de alimentação) tem que ter pelo menos uma ficha para possibilitar o início de um processo integrado que utiliza todas as estações da plataforma. Quando a estação de movimentação funciona de maneira independente sem estar integrada, não irá precisar do estado P2 ativado. Nesta estação são definidas duas propostas de funcionamento cada uma tendo uma marcação final: na primeira são ativos os estados P2 e P43; na segunda marcação final são ativos P43 e P51 (Produtos aceitos em zona de produtos aceitos).

Lugares

Considerando que a garra do manipulador tem a capacidade de realizar a prensão de uma peça ou um produto de cada vez, com o intuito de movimentar esses materiais para a cadeia

de alimentação ou para a zona de produtos aceitos respectivamente, somente dois lugares têm a possibilidade de conter mais de uma ficha: P2 (Peças sobre a cadeia de alimentação) e P51 (Produtos aceitos em zona de produtos aceitos) (Tabela 9).

Transições

Na modelagem com RdP da estação de movimentação todas as transições têm a mesma prioridade, de forma que a ordem na qual essas podem ser disparadas depende unicamente do tipo de produto (correto ou incorreto) ou peça que estiver sendo movimentada pelo manipulador, Ver Tabela 10.

4.5.6. Modelagem da Cadeia de Alimentação e Esteira de Movimentação

4.5.6.1. Entradas e Saídas do Modelo da Estação

O modelo em RdP desta estação tem três pontos que funcionam tanto como entradas quanto como saídas: uma transição representando o início do funcionamento da esteira de movimentação, um estado representando o funcionamento da esteira e uma transição representando o início do transporte de peças pela cadeia de alimentação. Esta estação é vital em processos que associam mais de duas estações constituindo-se como o elemento integrador mais importante na célula de manufatura. A cadeia de alimentação e esteira de movimentação é composta de sensores (botão ON, botão OFF) e atuadores (2 motores de corrente contínua). O modelo em RdP correspondente é apresentado na Figura 25, a Tabela 11 e Tabela 12 apresentam a definição de variáveis de lugares e transições correspondentes a este modelo.

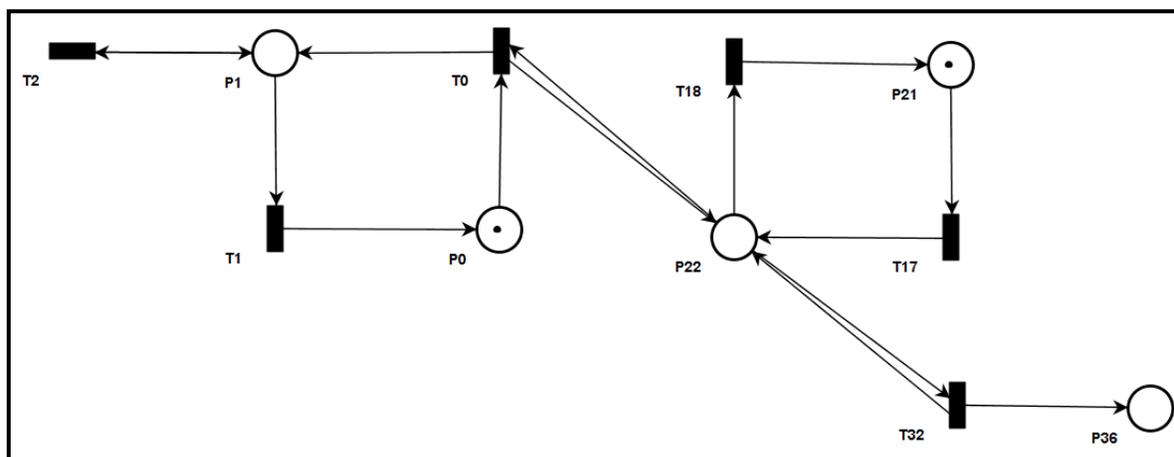


Figura 25. Modelo em RdP da Cadeia de Alimentação e a Esteira de Movimentação

Tabela 11. Lugares no Modelo em RdP da Estação da Cadeia de Alimentação e Esteira de Movimentação

LUGAR	ID.	TRANSIÇÃO ENTRADA	TRANSIÇÃO SAIDA
Cadeia de alimentação parada.	P0	T1	T0
Cadeia de alimentação funcionando.	P1	T0, T2	T1, T2
Célula de manufatura inativa.	P21	T18	T17
Célula de manufatura ativa.	P22	T0, T17, T32	T0, T18, T32
Esteira de movimentação funcionando.	P36	T32, T50 (estação de montagem), (T24, T28, T48) (estação de inspeção)	T50 (estação de montagem), (T24, T28, T48) (estação de inspeção), (T31, T37, T39) (estação de controle de qualidade)

Tabela 12. Transições no Modelo em RdP da Cadeia de Alimentação e Esteira de Movimentação

TRANSIÇÃO	ID.	LUGAR ENTRADA	LUGAR SAIDA
Cadeia de alimentação começa funcionar.	T0	P0, P22	P1, P22
Cadeia de alimentação deixa de funcionar.	T1	P1	P0
Botão ON é apertado.	T17	P21	P22
Botão OFF é apertado.	T18	P22	P21
Esteira de movimentação começa funcionar.	T32	P22, (P35, P39) (estação de controle de qualidade), P43 (estação de movimentação)	P22, P36, P39 (estação de controle de qualidade), P43 (estação de movimentação)

4.5.6.2. Descrição do Sub-Processo

Quando o processo é iniciado, tanto a cadeia de alimentação quanto a esteira de movimentação começam a funcionar. Caso seja detectada alguma peça na estação de controle de qualidade, a esteira de movimentação fica parada até o manipulador levar o material para a zona correspondente e recuar de novo para a sua posição inicial.

4.5.6.3. Considerações na Modelagem com RdP da Cadeia de Alimentação e Esteira de Movimentação

Marcação Inicial

Com o intuito de simular o comportamento dinâmico da cadeia de alimentação e a esteira de movimentação, as quais são vitais para possibilitar o funcionamento de todas as outras estações que integram a plataforma, é definida uma marcação inicial. Assim, dos cinco estados na estação de movimentação, dois são inicialmente ativados: P0 (Cadeia de alimentação parada) e P21 (Célula de manufatura inativa). Considerando que o funcionamento desta estação não é único nem definido por poucas possibilidades, não são definidas marcações finais desejadas para a mesma.

Lugares

As fichas na cadeia de alimentação e a esteira de movimentação não estão representando nem peças nem produtos, mas os estados de parada ou funcionamento destes sistemas. Portanto, a capacidade destes lugares na RdP está limitada a somente uma ficha (Tabela 11).

Transições

Na modelagem da cadeia de alimentação e a esteira de movimentação através de RdP, todas as transições têm a mesma prioridade, de forma que a ordem na qual essas podem ser disparadas depende do funcionamento que o usuário estabeleça para o sistema, considerando que todas as estações na plataforma dependem da movimentação de matérias para realizar as suas atividades (Tabela 12).

4.6. Análise de Alcançabilidade dos Modelos em RdP

Esta análise considera a representação matemática da RdP por meio da matriz de incidência, e utiliza a dinâmica de funcionamento descrita na equação 6 para estudar formalmente se existe um processo (seqüência de disparos de transições) que possa levar o

modelo em RdP de cada estação desde uma marcação inicial até uma marcação final. Levando isto em consideração, as propostas das marcações iniciais e finais foram definidas anteriormente para cada estação, procurando atender um funcionamento que possa exemplificar uma tarefa básica realizada em um CSAP atual. As etapas no desenvolvimento da análise de alcançabilidade para cada estação são descritas a seguir:

- a) Representação Matemática do Modelo em RdP: Matriz de Incidência, Marcações inicial e final;
- b) Cálculo da matriz B_f e o vetor ΔM e posterior substituição de estes na equação 8, para averiguar se é satisfeita a condição necessária de alcançabilidade. Desta forma é possível validar ou garantir a existência de uma seqüência de transições que permita a evolução desejada de estados na rede. Caso seja satisfeita a equação de alcançabilidade, esta seqüência de transições poderá ser apreciada como um processo plausível de ser realizado na estação e, portanto poderá ser considerada como uma unidade básica de funcionamento na arquitetura proposta ou um *Sub-Processo*;
- c) Com o objetivo de obter a ordem da seqüência de transições do sub-processo, é realizada uma simulação do modelo em RdP de cada uma das estações utilizando o software: Platform Independent Petri Net Editor, version 2.5. Com o intuito de conferir os resultados da análise dinâmica em cada estação, pode-se introduzir cada uma das transições do sub-processo na equação 5, na ordem determinada pela etapa de simulação, ou substituir o vetor completo Σu_k na equação 6.

Como resultado desta análise, é garantido que cada um dos sub-processos ao interior de cada estação poderá ser especificado e depois implementado em lógica reprogramável estruturada, como será descrito detalhadamente no Capítulo 5 desta dissertação de mestrado.

4.6.1. Análise de Alcançabilidade para Modelo em RdP da Estação de Classificação

Representação Matemática do Modelo em RdP

Lugares e Transições

$$P = \{P11, P6, P7, P12, P13, P14, P5, P55, P56\}$$

$$T = \{T10, T4, T46, T5, T11, T6\}$$

Matriz de Incidência

$$A_C^T = \begin{matrix} & \begin{matrix} T10 & T4 & T46 & T5 & T11 & T6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P11 \\ P6 \\ P7 \\ P12 \\ P13 \\ P14 \\ P5 \\ P55 \\ P56 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Marcação Inicial

$$M_0 = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$$

Marcação Final Desejada

$$M_{d1} = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$M_{d2} = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

então:

$$\Delta M_1 = M_{d1} - M_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0]$$

$$\Delta M_2 = M_{d2} - M_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ -1 \ 0]$$

Decompondo a matriz de incidência segundo a equação 10 levando em consideração o seu posto ($r = 6$), e em seguida calculando B_f por meio da equação 9 obtém-se:

$$B_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Substituindo os valores de B_f e ΔM_1 e ΔM_2 na condição de alcançabilidade (equação 8) verifica-se então que existe uma seqüência de transições tanto para a primeira quanto para a segunda marcação desejada desde a marcação inicial.

No caso da estação de classificação, para alcançar as duas marcações requeridas foi encontrado através da simulação:

- Desde M_0 até M_{d1} , é preciso disparar na ordem indicada: T4, T6 e T46, o vetor que representa o disparo destas transições é: $\Sigma u_{k1} = [0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]^T$
- Desde M_0 até M_{d2} , é preciso disparar na ordem indicada: T5, T10 e T11, o vetor que representa o disparo destas transições é: $\Sigma u_{k2} = [1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0]^T$

4.6.2. Análise de Alcançabilidade para Modelo em RdP da Estação de Montagem

Representação Matemática do Modelo em RdP da Estação de Montagem

Lugares e Transições

$$P = \{P23, P26, P19, P20, P24, P25, P27, P57, P58\}$$

$$T = \{T16, T19, T20, T21, T22, T23, T50, T51\}$$

Matriz de Incidência

$$A_M^T = \begin{matrix} & \begin{matrix} T16 & T19 & T20 & T21 & T22 & T23 & T50 & T51 \end{matrix} \\ \begin{matrix} \left[\begin{array}{cccccccc} 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 \end{array} \right] \end{matrix} & \begin{matrix} P23 \\ P26 \\ P19 \\ P20 \\ P24 \\ P25 \\ P27 \\ P57 \\ P58 \end{matrix} \end{matrix}$$

Marcação Inicial

$$M_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Marcação Final Desejada

$$M_d = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$$

então:

$$\Delta M = M_d - M_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$$

Decompondo a matriz de incidência segundo a equação 10 levando em consideração o seu posto ($r = 7$), e em seguida calculando B_f por meio da equação 9 obtém-se:

$$B_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Substituindo os valores de B_f e ΔM na condição de alcançabilidade (equação 8) verifica-se então que existe uma seqüência de transições para ir até a marcação desejada desde a marcação inicial.

Realizando a simulação do Modelo em RdP, visando obter a ordem da seqüência de transições para alcançar a marcação final requerida foram encontradas duas seqüências de disparo de transições:

- Desde M_0 até M_d , é preciso disparar na ordem indicada: T16, T50 e T51, o vetor que representa o disparo destas transições é: $\Sigma u_{k1} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1]^T$
- Desde M_0 até M_d , também pode se disparar na ordem indicada: T19, T20, T22, T21, T16, T50 e T23 o vetor que representa o disparo destas transições é: $\Sigma u_{k2} = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0]^T$

4.6.3. Análise de Alcançabilidade para Modelo em RdP da Estação de Inspeção

Representação Matemática do Modelo em RdP da Estação de Inspeção

Lugares e Transições

$$P = \{P31, P32, P33, P34, P52, P53, P54\}$$

$$T = \{T24, T26, T27, T28, T29, T43, T48\}$$

Matriz de Incidência

$$A_f^T = \begin{array}{cccccc} & T24 & T26 & T27 & T28 & T29 & T43 & T48 & \\ \left[\begin{array}{cccccc} 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 1 \end{array} \right] & \begin{array}{l} P31 \\ P32 \\ P33 \\ P34 \\ P52 \\ P53 \\ P54 \end{array} \end{array}$$

Marcação Inicial

$$M_0 = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

Marcação Final Desejada

$$M_{d1} = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$M_{d2} = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

então:

$$\Delta M_1 = M_{d1} - M_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1]$$

$$\Delta M_2 = M_{d2} - M_0 = [0 \ -1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ -1]$$

Decompondo a matriz de incidência segundo a equação 10 levando em consideração o seu posto ($r = 5$), e em seguida calculando B_f por meio da equação 9 obtém-se:

$$B_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Substituindo os valores de B_f e ΔM_1 e ΔM_2 na condição de alcançabilidade (equação 8) verifica-se então que existe uma seqüência de transições tanto para a primeira quanto para a segunda marcação desejada desde a marcação inicial.

Realizando a simulação do Modelo em RdP, visando obter a ordem da seqüência de transições para alcançar as duas marcações finais requeridas foi encontrado:

- Desde M_0 até M_{d1} , é preciso disparar na ordem indicada: T24, T43 e T27, o vetor que representa o disparo destas transições é: $\Sigma u_{k1} = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$
- Desde M_0 até M_{d2} , é preciso disparar na ordem indicada: T24, T43, T26 e T29, o vetor que representa o disparo destas transições é: $\Sigma u_{k2} = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0]^T$

4.6.4. Análise de Alcançabilidade para Modelo em RdP da Estação de Controle de Qualidade

Representação Matemática do Modelo em RdP da Estação de Controle de Qualidade

Lugares e Transições

$$P = \{P35, P38, P44, P47, P46, P60, P37, P39, P45, P59\}$$

$$T = \{T31, T37, T39, T53, T38, T54\}$$

Matriz de Incidência

$$A_{CC}^T = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{T31} & \text{T37} & \text{T39} & \text{T53} & \text{T38} & \text{T54} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \left[\begin{array}{cccccc} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{array} \right] \end{matrix} & \begin{matrix} \text{P35} \\ \text{P38} \\ \text{P44} \\ \text{P47} \\ \text{P46} \\ \text{P60} \\ \text{P37} \\ \text{P39} \\ \text{P45} \\ \text{P59} \end{matrix} \end{matrix}$$

Marcação Inicial

$M_{01} = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0]$ Peça metálica chega a controle de qualidade

$M_{02} = [0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0]$ Produto montado chega a controle de qualidade

Marcação Final Desejada

$M_{d1} = [1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1]$

$M_{d2} = [1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$

$M_{d3} = [1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0]$

então:

$$\Delta M_1 = M_{d1} - M_{01} = [1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ -1\ -1\ 0\ 1]$$

$$\Delta M_2 = M_{d2} - M_{02} = [1\ 0\ -1\ 0\ 1\ 0\ 0\ -1\ 0\ 0]$$

$$\Delta M_3 = M_{d3} - M_{02} = [1\ 0\ -1\ 0\ 0\ 1\ 0\ -1\ 0\ 0]$$

Decompondo a matriz de incidência segundo a equação 10 considerando o seu posto ($r = 6$), e em seguida calculando B_f por meio da equação 9 obtém-se:

$$B_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Substituindo os valores de B_f e ΔM_1 , ΔM_2 e ΔM_3 na condição de alcançabilidade (equação 8), verifica-se que existe uma seqüência de transições tanto para a primeira marcação desejada partindo desde a primeira marcação inicial, quanto para a segunda e terceiras marcações desejadas partindo desde a segunda marcação inicial.

Realizando a simulação do Modelo em RdP, visando obter a ordem da seqüência de transições para alcançar as marcações finais requeridas foi encontrado:

- Desde M_{01} até M_{d1} , é preciso disparar na ordem indicada: T31 e T53, o vetor que representa o disparo destas transições é: $\Sigma u_{k1} = [1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T$;
- Desde M_{02} até M_{d2} , é preciso disparar na ordem indicada: T37 e T38, o vetor que representa o disparo destas transições é: $\Sigma u_{k2} = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$;
- Desde M_{02} até M_{d3} , é preciso disparar na ordem indicada: T39 e T54, o vetor que representa o disparo destas transições é: $\Sigma u_{k3} = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]^T$

4.6.5. Análise de Alcançabilidade para Modelo em RdP da Estação de Movimentação

Representação Matemática do Modelo em RdP da Estação de Movimentação

Lugares e Transições

$$P = \{P50, P2, P41, P43, P49, P51, P40, P42, P48\}$$

$$T = \{T34, T40, T42, T45, T49, T35, T41, T44, T47\}$$

Matriz de Incidência

$$A_{MV}^T = \begin{array}{cccccccccc} & T34 & T40 & T42 & T45 & T49 & T35 & T41 & T44 & T47 & \\ \left[\begin{array}{cccccccccc} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] & \begin{array}{l} P50 \\ P2 \\ P41 \\ P43 \\ P49 \\ P51 \\ P40 \\ P42 \\ P48 \end{array} \end{array}$$

Marcação Inicial

$$M_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Marcação Final Desejada

$$M_{d1} = [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$M_{d2} = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

então:

$$\Delta M_1 = M_{d1} - M_0 = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$\Delta M_2 = M_{d2} - M_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Decompondo a matriz de incidência segundo a equação 10 considerando o seu posto ($r = 8$), e em seguida calculando B_f por meio da equação 9 obtém-se:

$$B_f = [1 \quad 0 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad 0 \quad -1 \quad -1 \quad -1]$$

Substituindo os valores de B_f e ΔM_1 e ΔM_2 na condição de alcançabilidade (equação 8), verifica-se que existe uma seqüência de transições tanto para a primeira marcação quanto para a segunda marcação desejada partindo desde marcação inicial.

Realizando a simulação do Modelo em RdP, visando obter a ordem da seqüência de transições para alcançar as marcações requeridas foi encontrado:

- Desde M_0 até M_{d1} , é preciso disparar na ordem indicada: T47, T34, T35 e T49, o vetor que representa o disparo destas transições é: $\Sigma u_{k1} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]^T$;
- Também é possível outra seqüência para alcançar M_{d1} desde M_0 , nesta segunda possibilidade é preciso disparar na ordem indicada: T41, T34, T35 e T49, o vetor que representa o disparo destas transições é: $\Sigma u_{k2} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0]^T$;
- Desde M_0 até M_{d2} , é preciso disparar na ordem indicada T45, T40, T42 e T44, o vetor que representa o disparo destas transições é: $\Sigma u_{k3} = [0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$.

4.6.6. Análise de Alcançabilidade para Modelo em RdP da Cadeia de Alimentação e Esteira de Movimentação

Representação Matemática do Modelo em RdP da Cadeia de Alimentação e Esteira de Movimentação

Lugares e Transições

$$P = \{P0, P1, P21, P22, P36\}$$

$$T = \{T0, T1, T17, T18, T2, T32\}$$

Matriz de Incidência

$$A_{CE}^T = \begin{array}{cccccc} T0 & T1 & T17 & T18 & T2 & T32 \\ \left[\begin{array}{cccccc} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] & \begin{array}{l} P0 \\ P1 \\ P21 \\ P22 \\ P36 \end{array} \end{array}$$

Marcação Inicial

$$M = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$$

Na arquitetura proposta, a cadeia de alimentação e a esteira de movimentação são comandadas desde o sistema de supervisão e controle, não sendo projetada a implementação de seu funcionamento dentro dos LCD nos hólons operacionais. Também não é especificada para estas nenhuma marcação final ou objetivo considerando que a marcação final não vai ser definida sempre como fixa, ou seja, a mesma pode mudar em função do processo ser ou não integrado e também em função das ordens de comando que um operador pudesse inserir em qualquer momento desde o sistema de supervisão. Assim, o sistema da cadeia de alimentação e esteira de movimentação é implementado partindo da sua representação genérica em RdP, a qual considera mais de uma possibilidade de funcionamento.

4.7. Integração dos Modelos – Modelo em RdP de Um CSAP / ADACOR Funcional

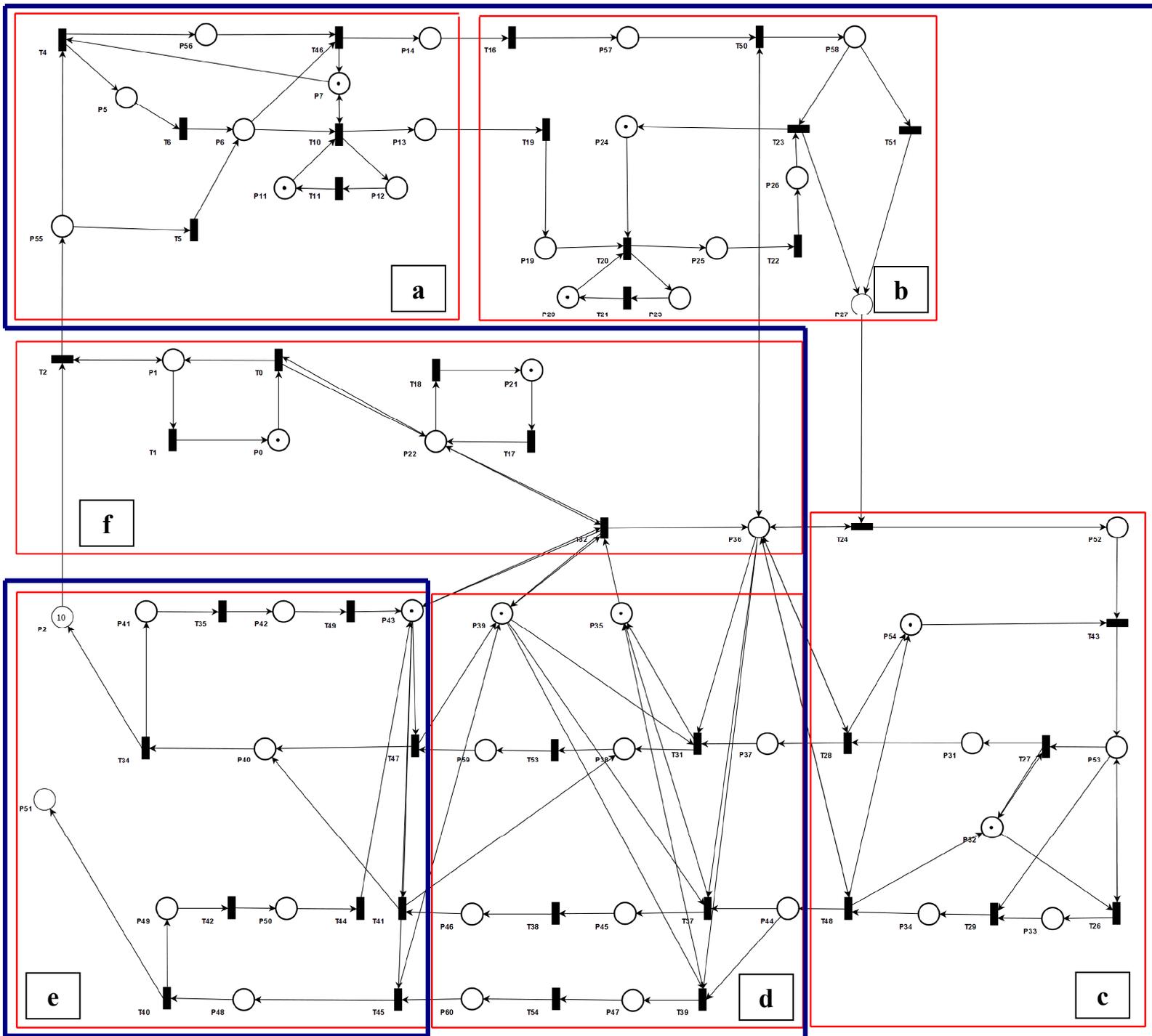


Figura 26. Integração dos Modelos em RdP das Estações em um CSAP / ADACOR

Levando em consideração os modelos em RdP de cada uma das estações e as propostas de funcionamento que foram validadas para serem implementadas como sub-processos plausíveis de serem realizados, é possível então integrar um processo completo CSAP de Classificação, Montagem, Inspeção, Controle de Qualidade e Movimentação somente conectando as saídas do modelo de uma estação às entradas da seguinte.

Ao integrar os modelos das três primeiras estações deste processo é obtido o modelo do primeiro hólón operativo HO-1 (célula de manufatura) enquanto o modelo da estação de movimentação corresponde ao segundo hólón operativo HO-2 (manipulador). Ao integrar o modelo da cadeia de alimentação e esteira de movimentação com seu respectivo comando junto com a estação de controle de qualidade é obtido o modelo do hólón de supervisão HS.

A integração completa dos modelos em RdP é apresentada na Figura 26. Nesta figura é representando o modelo em RdP do processo integrado utilizando todas as estações de trabalho (os modelos de cada uma das estações estão ressaltados pelo quadrados com linha fina, na cor vermelha) assim: a) Classificação, b) Montagem, c) Inspeção, d) Controle de Qualidade, e) Movimentação, f) Cadeia de Alimentação e Esteira de Movimentação. Os dois hólóns operacionais são integrados através do hólón de supervisão (os modelos dos hólóns operacionais estão ressaltados por quadrados com linha grossa na cor azul).

4.8. Considerações Sobre o Capítulo 4

Para o estudo da parte de comando da arquitetura, foi proposta uma divisão da plataforma em unidades funcionais básicas: As estações de trabalho (nestas ocorre uma primeira integração de dispositivos industriais), nas quais foi possível desenvolver tarefas básicas de um CSAP. Conseqüentemente, a modelagem em RdP foi realizada para cada uma das estações por separado, levando em consideração suas entradas e saídas, sendo obtidos modelos atômicos de funcionamento os quais foram depois integrados para modelar um sistema mais complexo que permite a execução de várias tarefas.

A modelagem de cada uma das estações como um sistema a eventos discretos (SED) utilizando RdP permitiu realizar uma análise formal (matemática) dos seus modelos, nesta análise foi utilizada a matriz de incidência para representar a parte estática do modelo e as marcações inicial e final para representar a dinâmica de uma proposta de funcionamento. Para validar se uma determinada proposta era realmente plausível de ser implementada foi realizado um estudo de alcançabilidade, caso desta proposta descrevesse um funcionamento possível, foi designada de sub-processo, o qual pode depois ser utilizado na proposta de atividades.

O grafo GRAFCET (SFC) foi identificado como uma ferramenta adequada para a especificação do funcionamento seqüencial desejado de um SED, pela sua forma clara, precisa e sem ambigüidades na descrição de um sistema automatizado. Por isto utilizou-se através de uma metodologia orientada à implementação, por meio de lógica reprogramável estruturada em CLPs industriais utilizando a linguagem RLL^{PLUS} muito próxima à norma SFC.

No Capítulo 5, como parte da validação deste trabalho, será descrita a implementação real (hardware – software) de uma plataforma automatizada de experimentação que utiliza os sub-processos validados no Capítulo 4 de forma a implementá-los em CLPs, de modo que possam ser utilizados de maneira individual ou integrados em processos complexos.

5. VALIDAÇÃO DA ARQUITETURA PROPOSTA ATRAVÉS DA IMPLEMENTAÇÃO DE PLATAFORMA AUTOMATIZADA

5.1. Descrição da Plataforma Utilizada para Validação

Com o intuito de validar a integração ADACOR proposta, apresentada no Capítulo 3 deste trabalho, e a modelagem dos sub-processos concebidos para serem realizados utilizando essa arquitetura (Capítulo 4), é realizada a implementação tanto hardware (PC) quanto software (PC) de uma Plataforma Automatizada na qual cada um dos sub-processos é especificado e implementado em CLPs (Figura 27). Neste sentido, para avaliar não só a modelagem de cada um dos hólons, mas também a integração dos mesmos, é proposto e implementado um processo completo de classificação, montagem, inspeção e movimentação de produtos, no qual os sub-processos estão associados. Essa integração é especificada por meio do GRAFCET com o intuito de implementá-la posteriormente utilizando linguagem Ladder com estágios em CLPs industriais, da mesma forma modular na qual foi realizada a modelagem através de RdP.

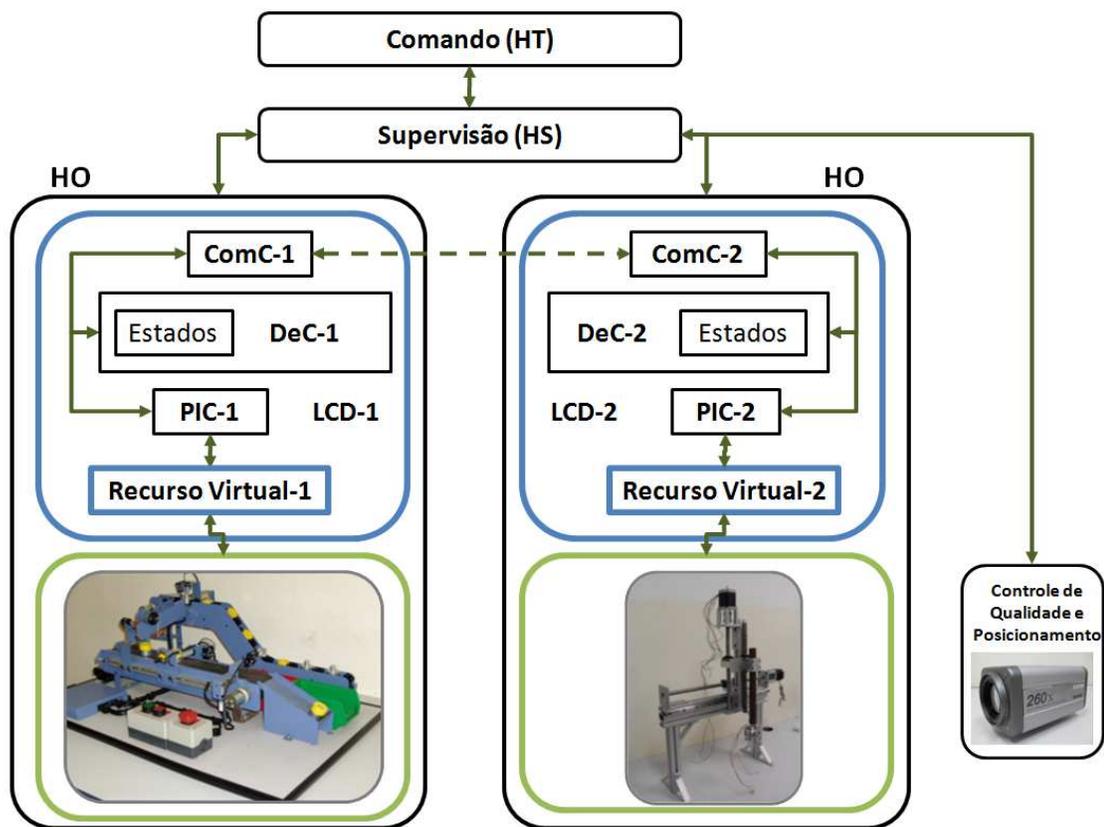


Figura 27. Esquema Geral da Plataforma Implementada

5.2. Projeto e Implementação da Parte Operativa (PO) da Plataforma

5.2.1. Célula de Manufatura

A célula de manufatura integrada na plataforma projetada, como validação da estrutura proposta corresponde ao modelo ICT-3 da empresa BYTRONIC™ (Figura 28). Esta conta com sensores (4 sensores indutivos, 4 fotoelétricos e 1 capacitivo), e atuadores (2 motores DC e 2 solenóides, botões Liga/Desliga e de emergência). Este equipamento operativo, programado de forma apropriada permite a realização da montagem e inspeção de um produto composto por dois tipos de peças (uma base metálica de alumínio e um anel plástico que é encaixado nesta base). Na célula de manufatura, originalmente as peças têm que passar consecutivamente por várias estações: Classificação, Montagem, Inspeção e Rejeição. Na proposta de arquitetura apresentada em este trabalho só serão utilizadas as estações de Classificação, Montagem e Inspeção.

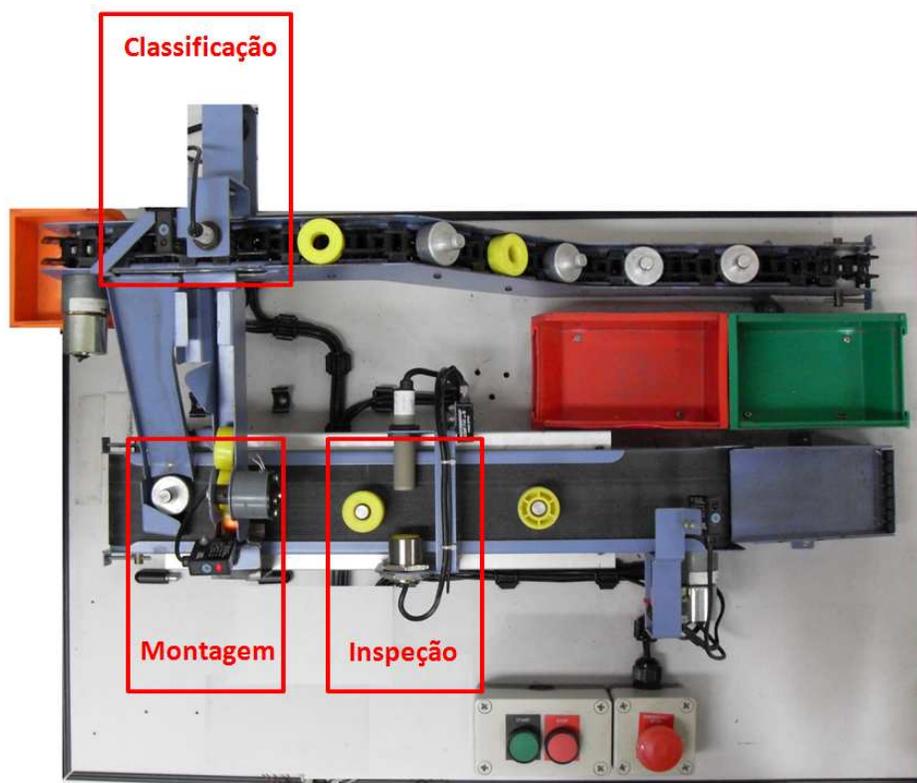


Figura 28. Célula de manufatura BYTRONIC - ICT3

Com o intuito de implementar uma plataforma de experimentação flexível, que permita aos usuários uma reconfigurabilidade na integração dos seus diferentes sub-processos e portanto também a proposta e desenvolvimento de diferentes atividades práticas, a interface física de

comando original desta plataforma (ICT-3 INTERFACE v. 1.20) na Figura 29, foi substituída por uma interface de comando projetada e implementada, possibilitando assim uma programação aberta em lógica reprogramável estruturada, utilizando para isto dois controladores lógicos programáveis CLPs da empresa Automation Direct™ com referência Koyo DL-05.

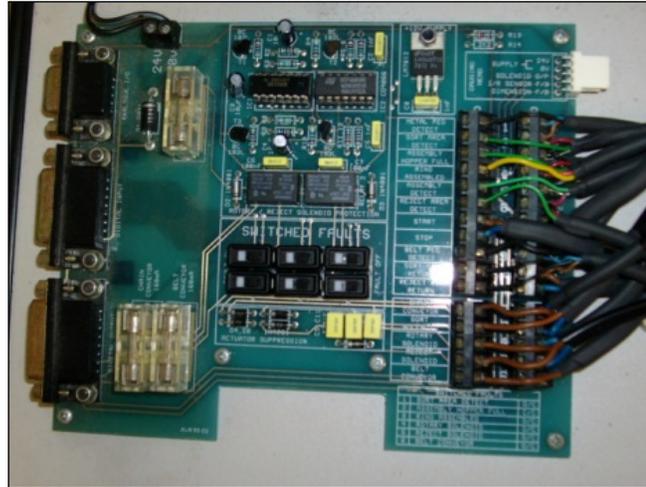


Figura 29. Placa de Controle Original da Célula de Manufatura

Assim, os sinais dos sensores e atuadores desta célula, Figura 30, são utilizados como entradas e saídas da lógica implementada.

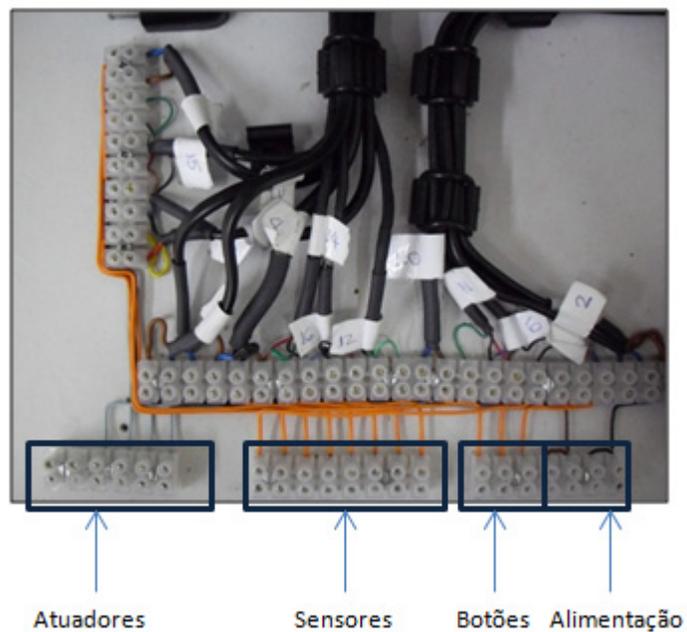


Figura 30. Detalhe das conexões na Célula de Manufatura

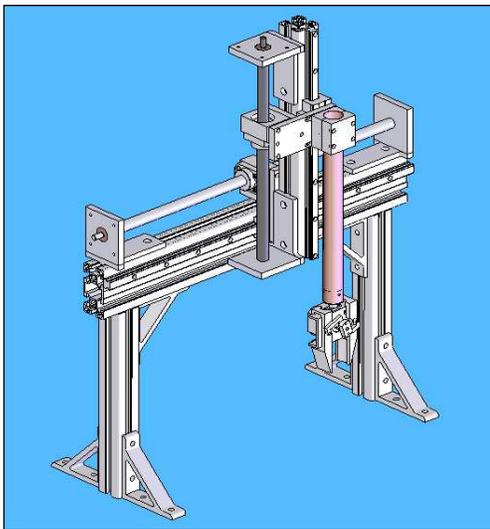
5.2.2. Sistema Robótico de Movimentação

O sistema robótico de movimentação é composto de um manipulador cartesiano com 2 Graus de Liberdade (GL) cada um deles acionado através de um motor de passo, possibilitando os movimentos de translação: lateral (direção X) e vertical (direção Y). Este robô é concebido para realizar a alimentação e movimentação de peças ou produtos montados, logo após os mesmos atravessarem o módulo de controle de qualidade. Os produtos são levados desde a esteira transportadora até uma zona de armazenamento se estes ficarem corretos, caso contrário, estes são desmontados pelo manipulador que leva então as peças individuais até a cadeia de alimentação, sobre a qual, elas podem ser encaixadas iniciando novamente o processo.

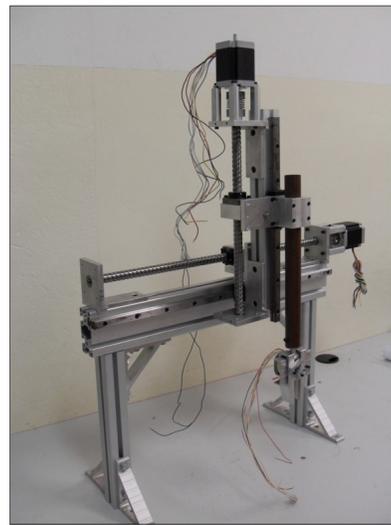
A prensão das peças é realizada a partir da abertura e fechamento de uma garra robótica acionada também com um motor de passo. O projeto mecânico inicial do manipulador utilizado e a construção das peças foram realizados no Departamento de Projeto Mecânico da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. Como parte da implementação da plataforma foram realizadas as atividades a seguir:

- Modificações e Projeto de novas peças para as juntas prismáticas;
- Construção de novas peças;
- Montagem final do manipulador.

A Figura 31 apresenta o manipulador robótico construído, depois das atividades listadas acima.



a) Modelagem CAD



b) Implementação Final

Figura 31. Manipulador Cartesiano

O manipulador construído apresenta as seguintes características que fazem com que este possa ser facilmente integrado à plataforma:

- **Facilidade na Movimentação do Equipamento (Modularidade):** Devido às dimensões, à configuração (cartesiana) e ao seu peso, o robô pode ser facilmente integrado ao processo da célula de manufatura para trabalhar de forma conjunta, ou também pode ser utilizado de forma isolada para exemplificar processos de movimentação de materiais;
- **Orientação Constante do Efetuador Final:** Já que os 2 GL do robô são cartesianos e a garra só apresenta movimento de abertura e fechamento, o vetor Z_1 nunca vai mudar de direção nem sentido. O espaço de trabalho do manipulador é um plano (representado na cor verde semitransparente) na Figura 32;
- **Simplicidade do Robô na Movimentação das Peças:** Devido às duas características anteriores, conjuntamente com a decisão de movimentar só um GL cada vez, a velocidade da garra ao longo da trajetória depende só do valor (pulsos/s) fixado no programa de comando, mudando somente sua direção.

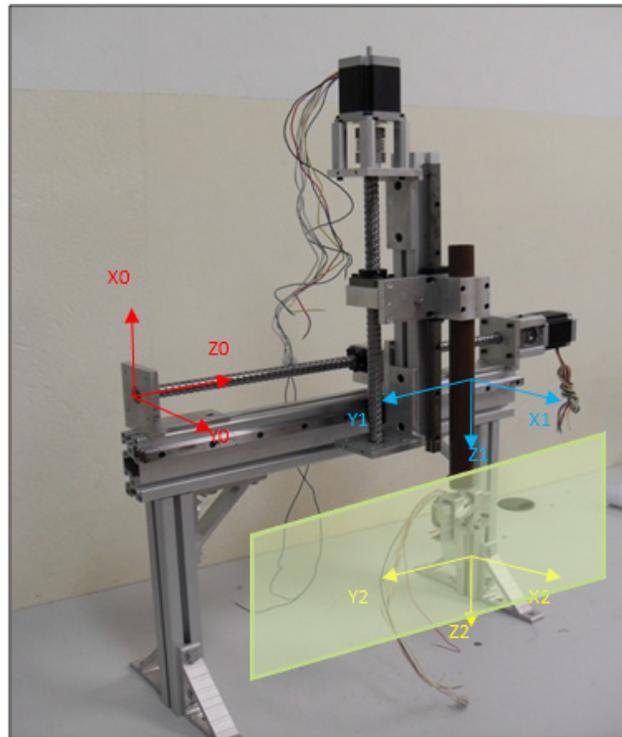


Figura 32. Sistemas de Coordenadas e Espaço de Trabalho do Manipulador

5.2.2.1. Modelagem Cinemática

Com o objetivo de movimentar automaticamente o manipulador robótico para posições conhecidas, torna-se imprescindível a obtenção do modelo cinemático do mesmo. Através da utilização deste modelo será possível comparar as posições: do material entregue pelo sistema de controle de qualidade e do efetuador final calculada através do modelo cinemático; de forma o manipulador corrigir o erro de posição para segurar as peças ou produtos de maneira adequada.

Para realizar a modelagem cinemática do manipulador cartesiano, inicialmente são definidos os sistemas de referência locais, segundo a convenção de Denavit-Hartenberg, conforme é mostrado na Tabela 13.

Tabela 13. Parâmetros Denavit-Hartenberg do Manipulador

Art.	θ (graus)	d	a	α (graus)
1	90	L_1+d_1	a_1	-90
2	0	L_2+d_2	a_2	0

onde: a_1, a_2, L_1, L_2 são conhecidos como Parâmetros Estruturais do robô, neste caso esses valores são:

$$L_1=31.5; L_2=300; a_1=108; a_2=45$$

A matriz de transformação homogênea associada aos sistemas de referência é apresentada a seguir (SICILANO et al., 2009):

$$R_{i-1,i} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

A equação de transformação desde o sistema de coordenadas da base (sistema 0, em vermelho) até o sistema de coordenadas associado ao efetuador final (sistema 2, em amarelo) é obtida pós-multiplicando as matrizes de transformação $R_{0,1}$ e $R_{1,2}$ como apresentado a seguir:

$$R_{0,2} = R_{0,1} * R_{1,2} \quad (12)$$

$$R_{0,2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & a_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 + L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 + L_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -L_2 - d_2 \\ 1 & 0 & 0 & a_1 + a_2 \\ 0 & -1 & 0 & L_1 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

5.3. Especificação e Implementação da Parte Comando (PC) da Plataforma Proposta

Na implementação completa da PC, foi realizada como primeira etapa a substituição da placa eletrônica de controle da célula de manufatura, fornecida originalmente pela empresa BYTRONIC™. Esta interface original que permitia somente a ativação ou desativação de alguns sensores como única possibilidade de interação com o usuário, foi substituída por uma interface física de comando baseada em eletrônica reprogramável estruturada, com o intuito de desenvolver uma arquitetura totalmente reconfigurável e aberta ao usuário para modificações futuras.

5.3.1. Implementação da Interface de Comando - Arquitetura CSAP / ADACOR

Visando uma implementação holônica da PC, são utilizados dois controladores Lógicos Programáveis CLP, cada um deles focado no controle de um hólón operacional. Cada CLP implementa completamente o LCD (Dispositivo de Controle Lógico) do hólón com suas partes de decisão, comunicação e recurso virtual, como foi projetado no Capítulo 3, segundo a arquitetura ADACOR.

Com esta divisão pode-se alcançar uma maior MODULARIDADE e, portanto a possibilidade de reconfigurar e trabalhar mais rápido e facilmente com qualquer um dos hólons da arquitetura proposta, por conseguinte significando também em uma FLEXIBILIDADE fundamentada na possibilidade de propor e implementar facilmente diferentes atividades que podem ser realizadas para a formação (em automação utilizando a célula de manufatura, em robótica com o manipulador robótico ou em mecatrônica utilizando o sistema integrado). Considerando esta arquitetura holônica, é possível também testar diferentes modelos de comunicação em rede entre os hólons propostos, ampliando ainda mais a utilidade da plataforma.

A Figura 33 apresenta em detalhe o esquema implementado para integrar cada hólón segundo a arquitetura proposta ADACOR.

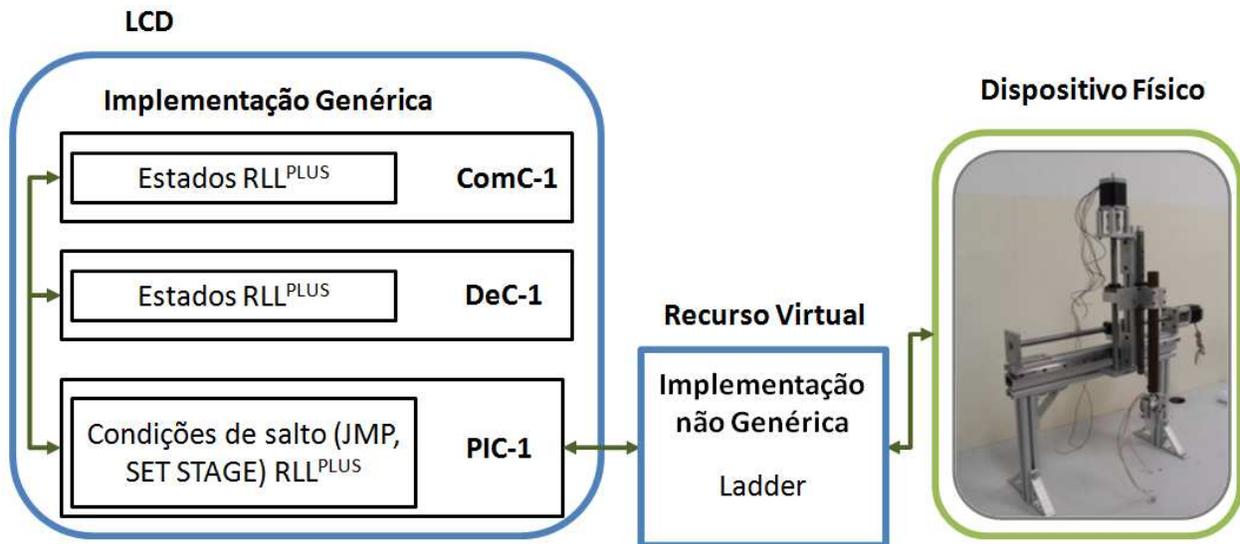


Figura 33. Esquema de Implementação de um Hólón Operacional ADACOR

5.3.1.1. Implementação do LCD do Hólón Operacional - 1

Este LCD-1 é implementado por meio de eletrônica reprogramável estruturada no CLP que comanda a célula de manufatura, a implementação dos seus três componentes é apresentada a seguir:

- a) **Dec-1:** É implementado a partir dos estágios (lugares no modelo em Rdp) definidos para os sub-processos na célula de manufatura, os quais são logo especificados pelos GRAFCETs funcional e tecnológico, para depois serem programados em RLL^{PLUS} em um CLP;
- b) **ComC-1:** É implementado a partir da criação de uma etapa de comunicação entre os dois CLPs, neste trabalho o CLP correspondente à célula de manufatura o qual implementa esta etapa é definido, configurado e programado como mestre, e o CLP correspondente ao manipulador é o escravo. A programação realizada no interior da etapa de comunicação é baseada na linguagem Ladder básica (Relay Ladder Logic - RLL) junto com funções para: carregar dados em memória (LD e LDD), ler uma posição de memória (RX) e escrever em uma posição de memória (WX);
- c) **PIC-1:** É implementada através das funções SET STAGE e JUMP no interior do DeC-1 utilizando lógica reprogramável estruturada por meio de Lógica de Contatos Ladder com Estágios (RLL^{PLUS}).

Recurso Virtual-1: É implementado pela lógica existente (programada em linguagem Ladder básica) dentro de cada um dos estágios (etapas) do programa implementado no DeC-1, além disso, é composto de uma interface elétrica de comunicação (reles e fontes de alimentação) entre o LCD-1 e os sensores e atuadores da célula de manufatura, ver Figura 34.

5.3.1.2. Implementação do LCD do Hólon Operacional - 2

Este LCD-2 é implementado por meio de eletrônica reprogramável estruturada no CLP que comanda o sistema robótico de movimentação, a implementação dos seus três componentes é apresentada a seguir:

- a) **Dec-2:** É implementado a partir dos estágios (lugares no modelo em Rdp) do sub-processo de movimentação, o qual é logo especificado pelos GRAFCETs funcional e tecnológico, para depois ser programado em RLL^{PLUS} em um CLP;
- b) **ComC-2:** O LCD-2 é definido como sendo o escravo dentro da comunicação inter-hólon, dentro deste são organizadas as variáveis em endereços de memória, de forma que possam ser facilmente acessíveis desde o LCD-1 mestre. A implementação realizada visando a movimentação dos dados para posições específicas de memória é baseada na linguagem Ladder básica;
- c) **PIC-2:** É implementada através das funções SET STAGE e JUMP no interior do DeC-2 utilizando lógica reprogramável estruturada por meio da linguagem RLL^{PLUS}.

Recurso Virtual-2: É implementado pela lógica existente (programação em linguagem Ladder básica) dentro de cada um dos estágios (etapas) do programa implementado no DeC-2. Além disso, este recurso virtual é composto da interface eletrônica de comunicação entre o LCD-2 e os motores de passo correspondentes a cada um dos GL do robô manipulador: Um circuito de controle para os graus de liberdade 1 e 2 (Applied Motion Products, Model: 1035D), e outro para o controle do motor de passo do efetuador final (Applied Motion Products, Model: 2035O), junto com um circuito multiplexador (implementado com portas lógicas AND) que encaminha para cada circuito de controle: um sinal de pulso de alta velocidade e um sinal de sentido de giro.

O painel que implementa a parte física da interface de comando é apresentado na Figura 34 e o diagrama lógico do circuito multiplexador é apresentado no Anexo D.

5.3.1.3. Implementação da Comunicação entre os Hólons

A comunicação entre os dois CLPs utilizados, projetada no Capítulo 3, deverá ser necessariamente implementada, considerando que a arquitetura holônica ADACOR requer a presença de módulos (hólons) que possam trabalhar de modo individual, mas também que permitam sua integração no sentido de formar um sistema de Produção Colaborativo CSAP. A implementação da comunicação, é apresentada a seguir:

- *Comunicação Inter-Hólon:* É implementada por meio de uma rede mestre/escravo entre os dois CLP baseada no protocolo de comunicação DirectNET da empresa Automation Direct™ e uma etapa de configuração em linguagem Ladder no dispositivo mestre. A implementação física é baseada na especificação serial RS-232C e a interface física desta conexão foi implementada por meio de um cabo com um conector de 6 pinos RJ-12 em seus dois extremos. Com esta rede é possível transferir dados de maneira bidirecional entre os dois CLPs, eliminando também a necessidade de um terceiro CLP para comandar os dois hólons, assim são aproveitados os recursos disponíveis. As etapas para a configuração da comunicação no CLP mestre são:
 - a) Identificação do porto de endereçamento a ser utilizado para comunicação com o computador e do porto de endereçamento utilizado para se comunicar com o escravo;
 - b) Determinação do número de bits a serem enviados ou recebidos;
 - c) Especificação do endereço de memória do mestre no qual estão os dados a serem lidos ou escritos;
 - d) Leitura (RX) ou escritura (WX) dos dados especificando a área de memória destino no dispositivo escravo.
- *Comunicação entre os Hólons e o Sistema Supervisor:* Esta comunicação bidirecional utiliza o CLP mestre para realizar a transferência de informação com o computador, o mestre funciona como uma ponte para a troca de informações de posição no caso da comunicação entre o supervisor e o CLP escravo. Desta forma, no dispositivo mestre é implementada uma etapa de configuração e direcionamento dos pacotes de dados para serem corretamente enviados e recebidos. No computador é utilizado um OPC (OLE for Process Control) para obter uma comunicação ON-LINE entre o sistema supervisor e as variáveis do processo. A leitura e escritura de variáveis entre o supervisor e os dois hólons são configuradas definindo

no diagrama de blocos de LabViewTM os endereços de memória do dispositivo mestre a serem utilizados. A implementação física deste componente utiliza a especificação serial RS-232C e o protocolo DirectNET.

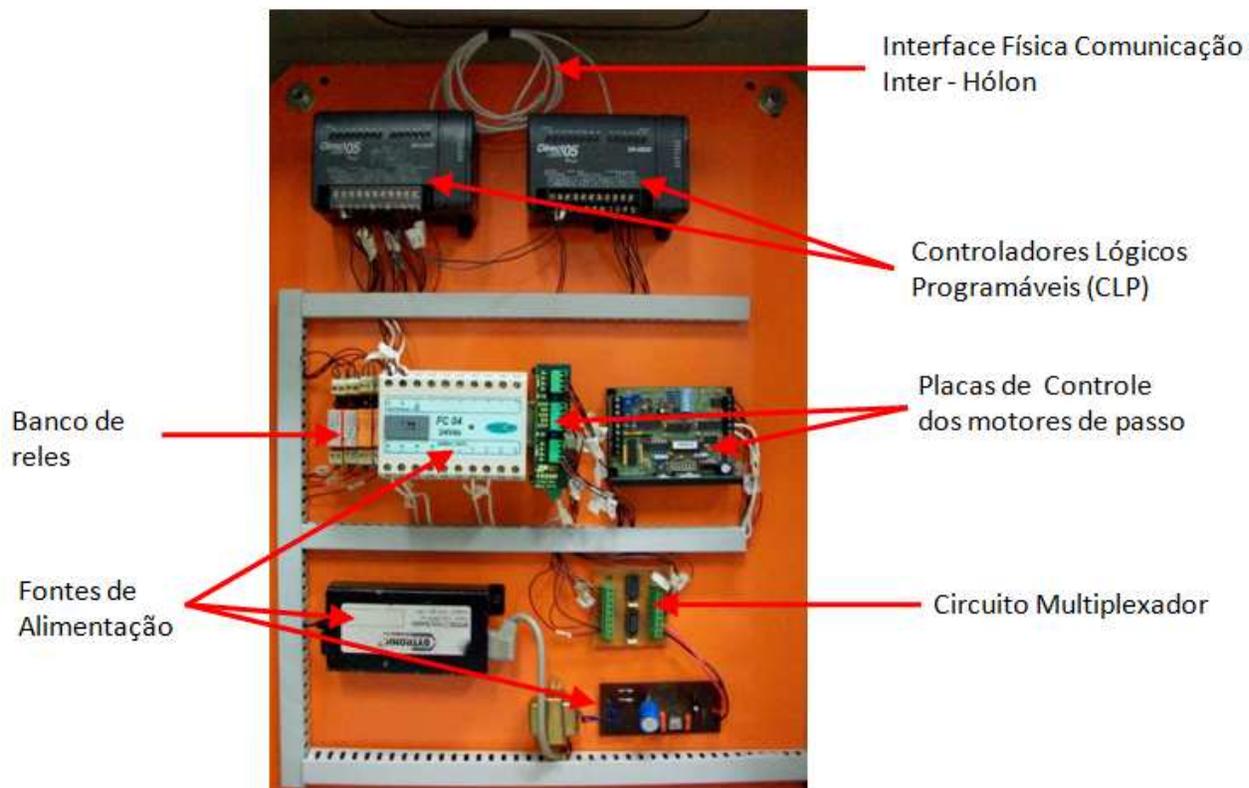


Figura 34. Implementação do Painel de Comando

5.3.2. Implementação da Lógica da Parte de Comando

Depois da modelagem de todas as estações do sistema utilizando RdP, levando em conta que é seguida uma abordagem de Sistemas de Eventos Discretos (SED), é necessário empregar um formalismo de maneira a especificar estes modelos visando agora sua implementação através de eletrônica reprogramável estruturada utilizando CLPs, completando assim a implementação da PC da plataforma.

Neste trabalho é usado inicialmente o GRAFCET Funcional (Nível 1) para descrever as etapas do processo, e posteriormente o GRAFCET Tecnológico (Nível 2) para especificar detalhadamente quais as entradas e saídas que são utilizadas finalmente na integração e implementação dos programas em CLPs. O diagrama da Figura 35 descreve as etapas para a especificação e implementação dos sub-processos na parte de comando.

5.3.2.1. Descrição e Especificação dos Sub-Processos na Parte de Comando

Com base na modelagem através de RdP realizada no Capítulo 4 e a partir da simulação dinâmica de funcionamento proposto, a qual garante o funcionamento de cada sub-processo partindo de uma marcação inicial para alcançar uma marcação desejada (validação realizada através da análise de alcançabilidade) são descritos e especificados todos estes sub-processos propostos de forma a implementá-los nos dispositivos de controle CLPs. Desta forma, é apresentada a seguir a descrição e a especificação funcional de cada um destes sub-processos utilizando para isto o GRAFCET de nível 1.

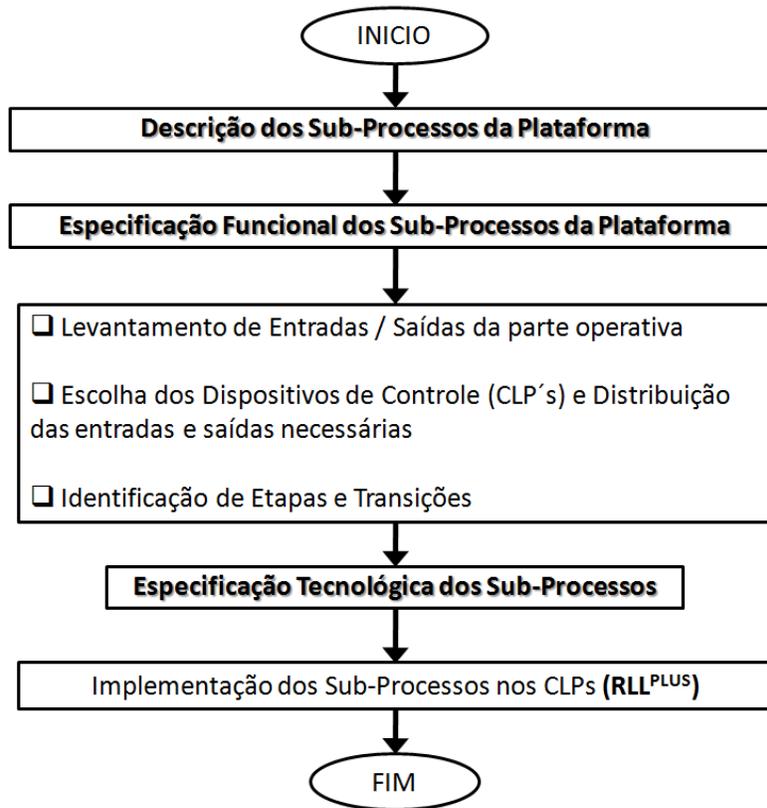


Figura 35. Etapas para Implementação da Lógica da parte de Comando

Descrição e Especificação do Sub-Processo na Estação de Classificação

1. O sub-processo na estação inicia quando as peças metálicas ou plásticas estão se movimentando através da cadeia de alimentação para a estação de classificação através de duas situações:
 - a) Caso 1: Se uma peça metálica (pino) é detectada na estação, não será feita nenhuma ação até esta atravessar completamente a estação e se deslocar pela rampa correspondente;

- b) Caso 2: Sé uma peça plástica (anel) é detectada na estação, esta deverá ser empurrada para se deslocar pela rampa correspondente (Figura 36).

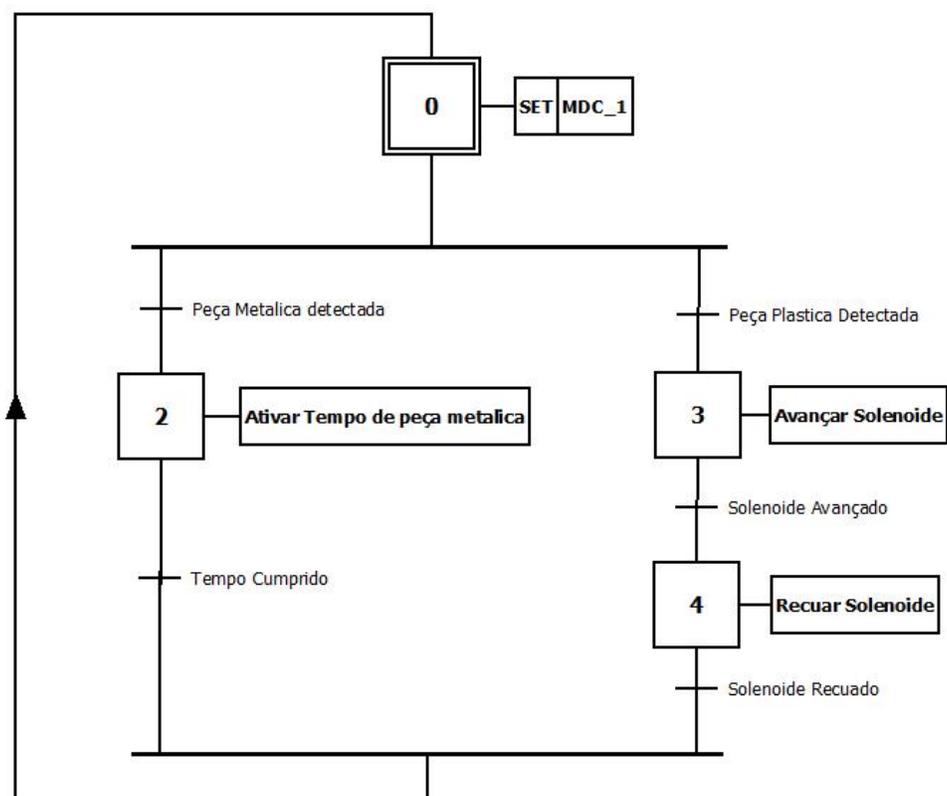


Figura 36. Especificação GRACET Funcional do Sub-Processo Classificação

Descrição e Especificação do Sub-Processo na Estação de Montagem

1. Quando um anel plástico chega à comporta de montagem:

a) Caso a estação estiver vazia, a comporta é aberta e o anel plástico é liberado na estação de montagem;

b) Caso a estação não estiver vazia, os anéis vão se acumulando antes da comporta e serão liberados um de cada vez na medida em que a estação vai ficando vazia.

2. Caso que um pino metálico atravesse a estação de montagem e houver um anel nela, a montagem de um produto será realizada (Figura 37).

Descrição e Especificação do Sub-Processo na Estação de Inspeção

1. Na estação de inspeção, a operação de montagem é testada para determinar se foi realizada com sucesso ou não:

- a) Caso seja detectado somente um pino metálico, a estação ativará uma variável para indicar isto;
- b) Caso seja detectado um anel plástico montado sobre um pino metálico, a estação ativará outra variável indicando que uma montagem tem sido realizada (Figura 38).

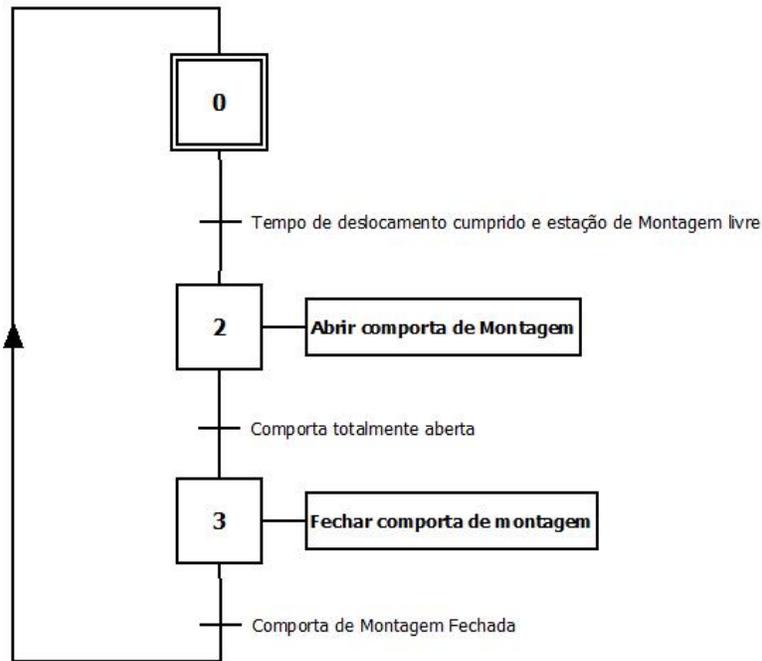


Figura 37. Especificação GRACET Funcional do Sub-Processo Montagem

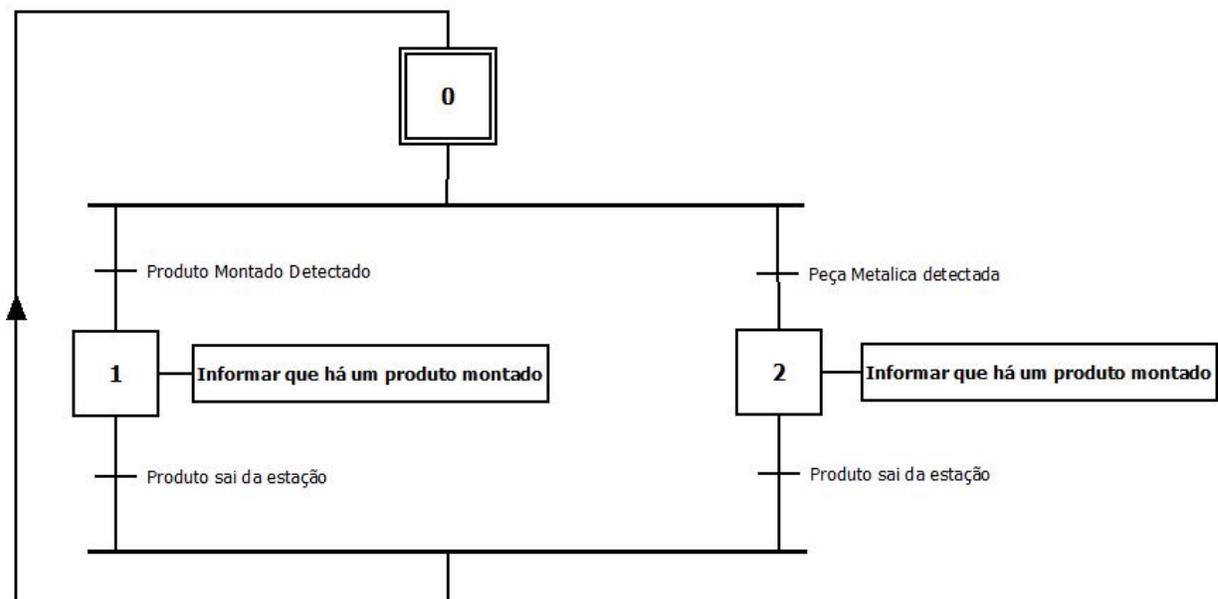


Figura 38. Especificação GRACET Funcional do Sub-Processo Inspeção

Descrição e Especificação do Sub-Processo na Estação de Controle de Qualidade

1. Na estação de controle de qualidade é detectado se o produto foi montado correta ou incorretamente, ou se simplesmente há uma peça metálica sem montar.

- a) Caso seja detectada uma peça metálica na estação, deve-se indicar isto além da posição da peça (respeito ao primeiro grau de liberdade) para esta ser pega pela garra do manipulador;
- b) Caso seja detectado um produto incorreto na estação, deve-se indicar isto além da posição da peça plástica (respeito aos dois graus de liberdade) para esta ser pega pela garra do manipulador;
- c) Caso seja detectado um produto correto na estação, deve-se indicar isto além da posição do produto (respeito ao primeiro grau de liberdade) para este ser pego pela garra do manipulador (Figura 39).

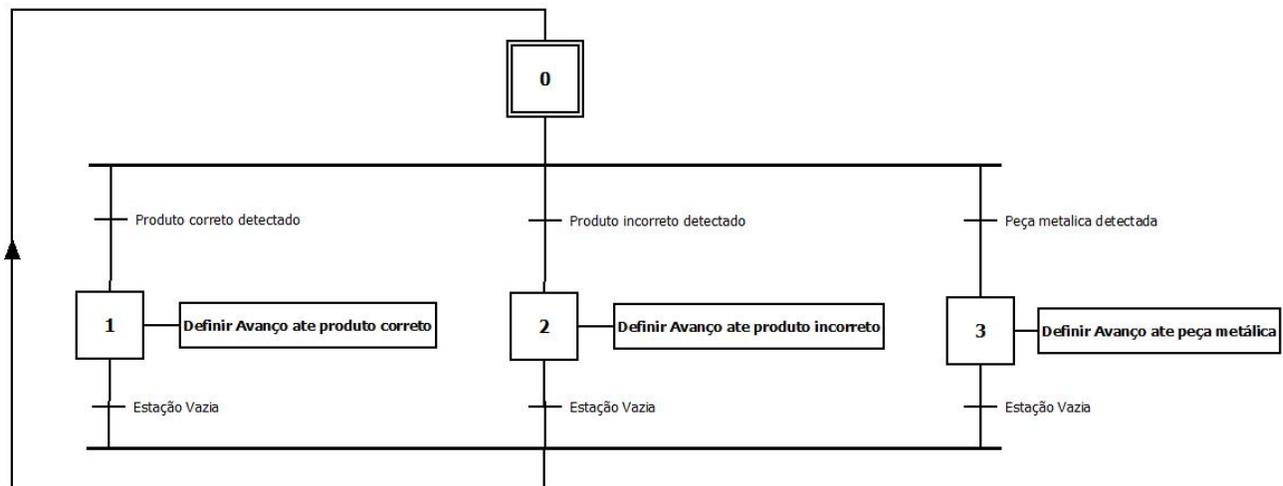


Figura 39. Especificação GRACET Funcional do Sub-Processo Controle de Qualidade

5.3.2.2. Descrição e Especificação do Sub-Processo na Estação de Movimentação

- a) Caso uma peça metálica sem montar seja detectada, o manipulador tem que pegar e levar esta para a cadeia de alimentação;
- b) Caso um produto incorreto seja detectado, o manipulador terá que levar primeiro a peça plástica e depois a peça metálica para a cadeia de alimentação;
- c) Caso um produto correto seja detectado, o manipulador terá que levá-lo para a zona de produtos aceitos (Figura 40).

5.3.2.3. Seleção dos Dispositivos de Controle

Com base na especificação funcional de cada sub-processo proposto, é realizado um levantamento das entradas e saídas da plataforma que são necessárias para a implementação destes em lógica reprogramável estruturada.

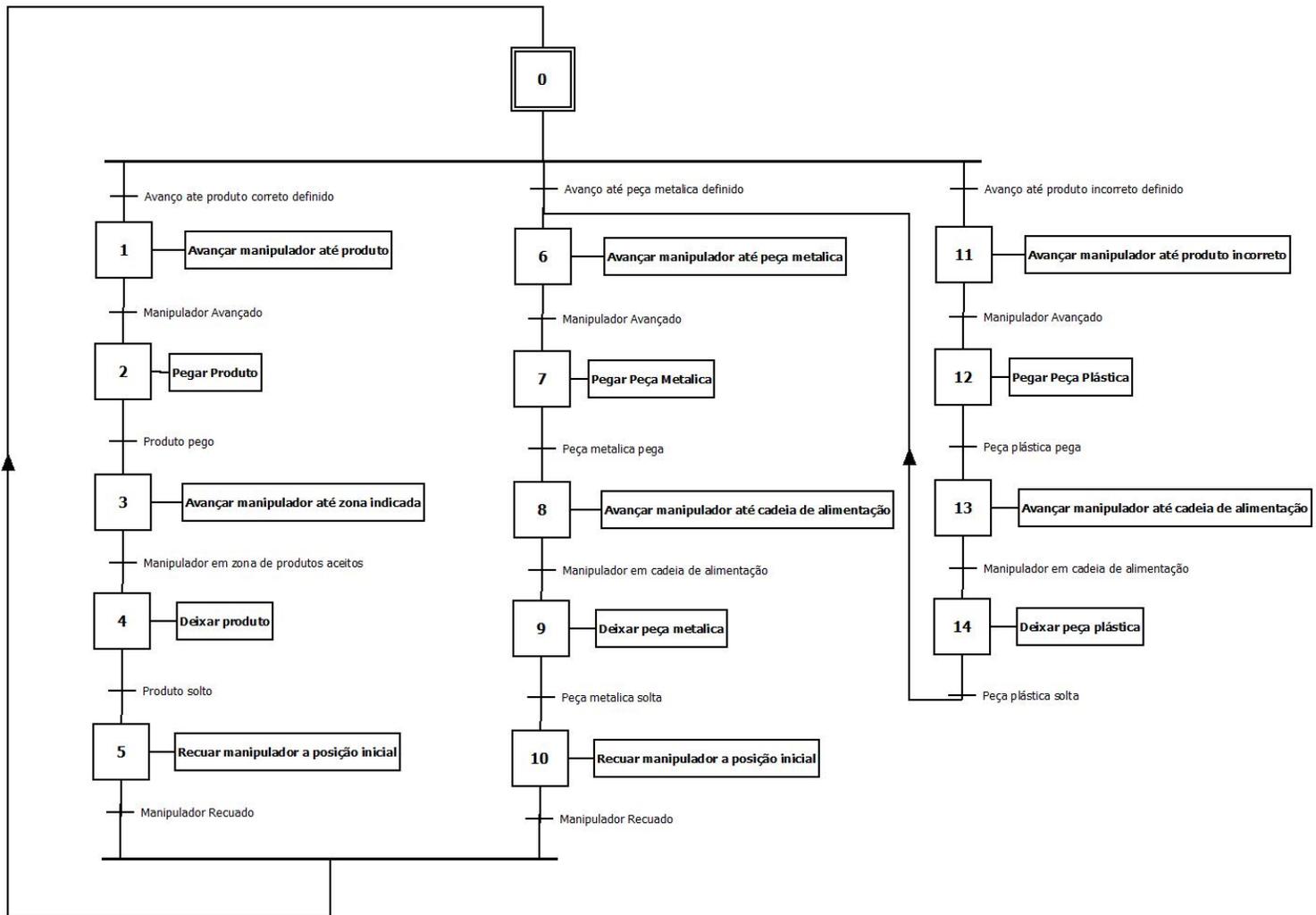


Figura 40. Especificação GRACET Funcional do Sub-Processo Movimentação

A seleção dos dispositivos para implementar a lógica reprogramável estruturada é realizada visando uma parte de comando (PC) aberta a modificações. Deste modo, foram selecionados dois CLPs industriais, cuja escolha foi baseada nas premissas de baixo custo, aproveitamento de recursos existentes, e de utilizar dispositivos apenas com o número de entradas e saídas necessárias no projeto; aliás, também foi considerado que esses CLPs tivessem as mesmas características evitando assim futuros problemas na comunicação entre eles.

Os dois CLPs selecionados correspondem à referência DL05 Micro CLP da empresa DirectLogic™, cada um deles possui oito entradas e seis saídas. No CLP correspondente à célula de manufatura as entradas são digitais, permitindo a conexão direta dos sensores (3 sensores indutivos, 3 sensores fotoelétricos, 1 sensor capacitivo e 1 botão start/stop) e todas as saídas são por relê (DR), portanto essas resultam adequadas para o acionamento de 2 motores DC e 2 solenóides. A distribuição das entradas e saídas deste dispositivo é apresentada na Tabela 14.

Tabela 14. Relação Entradas-Saídas Utilizadas para o Comando da Célula de Manufatura

RELAÇÃO DE ENTRADAS		
VARIÁVEL DO CLP	ELEMENTO	DESCRIÇÃO
X0	SENSOR INDUTIVO 1	Detecta uma peça metálica no sistema de classificação
X1	SENSOR INDUTIVO 2	Detecta a posição recuada do solenóide de classificação
X2	SENSOR FOTOELETRICO 1	Detecta uma peça (metálica ou plástica) no sistema de classificação
X3	SENSOR FOTOELETRICO 2	Detecta uma peça plástica no sistema de montagem
X4	SENSOR INDUTIVO 3	Detecta uma peça metálica no sistema de inspeção.
X5	SENSOR CAPACITIVO	Detecta um anel plástico acima da peça metálica no sistema de inspeção.
X6	SENSOR FOTOELETRICO 3	Detecta um produto ensablado ou peça sem ensamblar no sistema de rejeição.
X7	BOTÃO START / STOP	Inicia e detém o processo
RELAÇÃO DE SAÍDAS		
VARIÁVEL DO CLP	ELEMENTO	DESCRIÇÃO
Y0	MOTOR DC1	Movimento da cadeia de alimentação
Y1	MOTOR DC2	Movimento esteira de movimentação
Y2	SOLENOIDE 1	Empurra um anel plástico para a rampa de deslocamento de peças plásticas
Y3	SOLENOIDE DE ROTAÇÃO	Abre comporta para liberar peça plástica no sistema de montagem

No CLP correspondente ao manipulador, são utilizados como entradas os sinais das variáveis auxiliares de comunicação, posicionamento do material sobre a esteira de movimentação e posicionamento contínuo do primeiro GL do manipulador; estas informações são fornecidas desde o sistema supervisor. Neste caso as saídas deste dispositivo são todas digitais (DD), permitindo a este CLP determinar qual dos 3 motores de passo vai ser ativo e

controlar logo para este motor o seu sentido de rotação e a sua velocidade por meio da frequência de pulso de um sinal de saída de alta velocidade. A distribuição das entradas e saídas deste dispositivo é apresentada na Tabela 15.

Tabela 15. Relação Entradas-Saídas Utilizadas para o Comando do Manipulador

RELAÇÃO DE ENTRADAS (Supervisor – Mestre – Escravo)		
VARIÁVEL	ELEMENTO	DESCRIÇÃO
V1400	POSIÇÃO MATERIAL	Posição respeito ao primeiro GL
V1420	CONTROLE DE POSIÇÃO CONTINUA	Posição continua do primeiro GL
V40601 Ou VC20	VARIÁVEIS AUXILIARES	Variáveis de comando e comunicação desde supervisor e mestre
RELAÇÃO DE SAÍDAS		
VARIÁVEL	ELEMENTO	DESCRIÇÃO
Y0	PULSOS MOTOR A PASSO	Envia os pulsos para o funcionamento de um motor de passo
Y1	SENTIDO MOTOR A PASSO	Indica o sentido de giro de um motor de passo
Y2	SAIDA Y2	Ativa o primeiro motor de passo
Y3	SAIDA Y3	Ativa o segundo motor de passo
Y4	SAIDA Y4	Ativa o terceiro motor de passo

5.3.2.4. Especificação Tecnológica dos Sub-Processos

A especificação Tecnológica de cada um dos Sub-Processos pode-se observar no Anexo A.

5.3.2.5. Implementação dos Sub-Processos nos CLPs

A implementação destes programas é realizada de forma estruturada partindo da especificação GRAFCET e levando em conta a arquitetura de tipo ADACOR proposta para a integração. Neste sentido foi utilizada a linguagem (Ladder com estágios) RLL^{PLUS} para implementar as etapas do programa que formam o componente DeC genérico de cada hólón operacional (lógica de alto nível), e a lógica de contatos Ladder básica para implementar os sub-programas dentro de cada estágio (lógica de baixo nível) obtendo-se assim o Recurso Virtual dependente do dispositivo físico.

Conseqüentemente no caso de modificações ou substituição do recurso físico, somente os sub-programas em Ladder ao interior dos estágios precisariam de ser novamente implementados

enquanto o DeC manteria a sua a estrutura, organização genérica e modularidade. A implementação dos programas com RLL^{PLUS} também permite que os sub-processos quando for necessário possam ser facilmente associados entre eles e com o sistema de supervisão e comando para integrar um processo completo de classificação, montagem e inspeção (célula de manufatura) e movimentação de produtos (manipulador robótico) na parte operativa da plataforma. É importante ressaltar que uma especificação com as características anteriormente mencionadas facilita a implementação dos programas nos CLP, a qual é imediata ao associar as etapas no programa com as etapas no diagrama GRAFCET tecnológico, garantindo a modularidade e generalidade. Para realizar a edição e compilação do programa para cada CLP foi usado o software: DirectSOFT – Programming, Versão 2.4a.

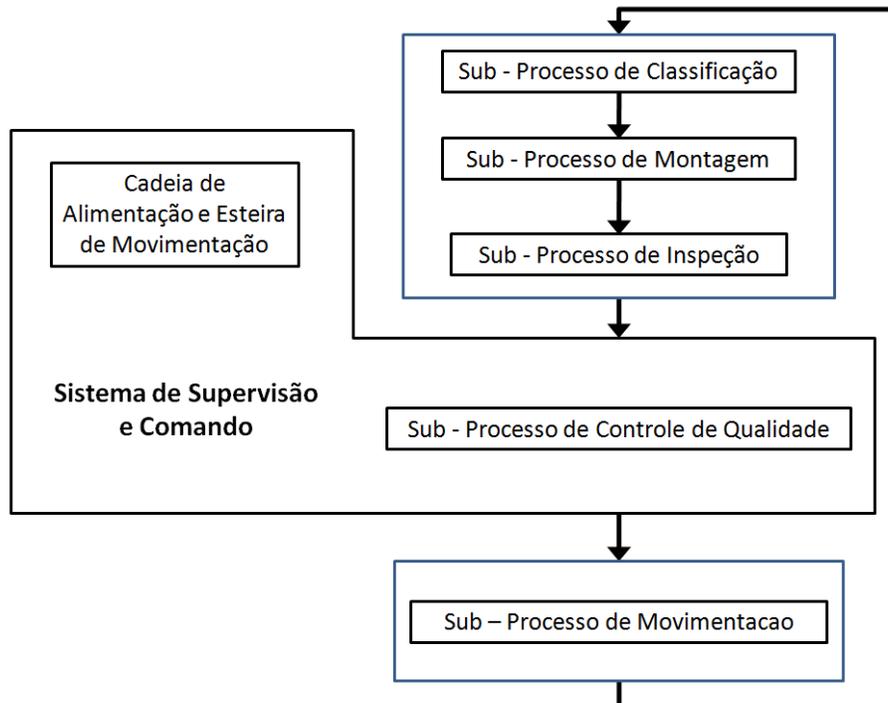


Figura 41. Diagrama de Integração utilizado na Validação dos Sub – Processos

A validação dos sub-programas em linguagem RLL^{PLUS} correspondentes a cada sub-processo é realizada através da implementação de um processo completo e de funcionamento contínuo (comandado pelo botão START/STOP) que os integra (a modelagem em Rdp deste processo integrado foi apresentada no Capítulo 4), utilizando para isto os dois CLPs e a interface de comando e adicionando o sistema de Supervisão e Comando. O funcionamento de cada um dos hólons operacionais é programado no CLP correspondente. O diagrama de integração proposto na validação dos sub-processos, o qual descreve a implementação do processo completo

em lógica reprogramável estruturada pode-se observar na Figura 41 (os dois hólons operacionais ADACOR integrados a traves dos HS e HT estão ressaltados dentro dos quadrados grandes superior e inferior, na cor azul). A implementação em RLL^{PLUS} deste processo pode-se encontrar no Anexo B (programa implementado no CLP-1) e no anexo C (programa implementado no CLP-2).

5.4. Implementação do Módulo de Supervisão e Comando

Este módulo corresponde aos hólons HS e HT, os quais foram projetados no Capítulo 3. O sistema de supervisão apresenta por meio de *Indicadores* em uma tela esquemática o estado das variáveis significativas do processo, informando ao usuário sobre o que esta acontecendo na parte operativa da plataforma e permitindo-lhe comandar por meio de *Controles* um funcionamento desejado, este sistema emula um Instrumento Virtual (VI). A Figura 42 apresenta a tela do módulo de Supervisão e Controle no ambiente LABVIEWTM.

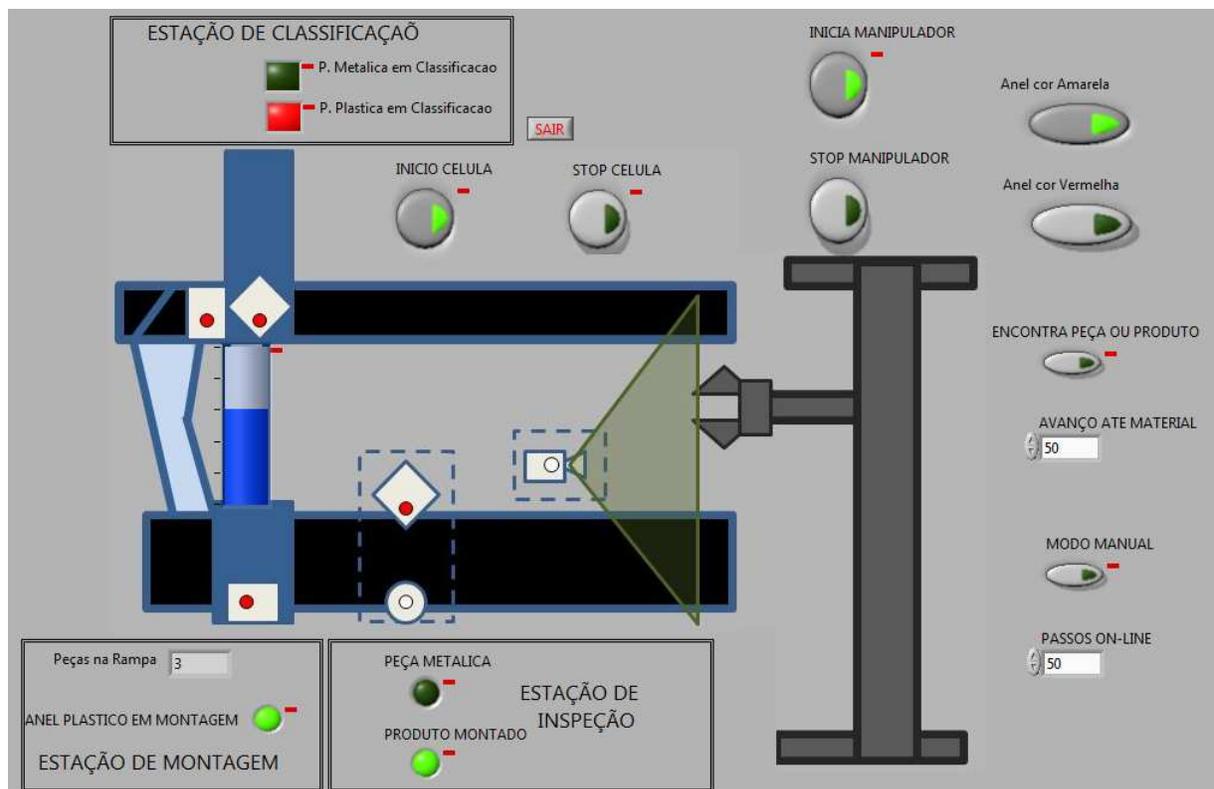


Figura 42. Instrumento Virtual de Supervisão e Comando Desenvolvido

O software de supervisão e controle foi estruturado através de blocos com funções básicas, (Figura 43), sendo criadas de forma esquemática e modular as seguintes fases:

- **Comunicação com a Parte Operativa:** Permite a troca de informações entre certos elementos e suas variáveis associadas na plataforma automatizada, (Tabela 16 e Tabela 17) através de uma interface computacional flexível, de forma a permitir a formação em automação e o estudo de novas e tradicionais arquiteturas de comando. O sistema de comunicação deve suportar o volume de informações oriundo das variáveis do processo e garantir um tratamento ON-LINE segundo o ambiente definido;

Tabela 16. Indicadores Implementados no Sistema Supervisor

ESTAÇÃO DE CLASSIFICAÇÃO	
INDICADOR	VARIÁVEL NO CLP
Peça metálica em classificação	C1
Peça plástica em classificação	C4
ESTAÇÃO DE MONTAGEM	
INDICADOR	VARIÁVEL NO CLP
Peças na rampa	V1000
Anel plástico em montagem	X3
ESTAÇÃO DE INSPEÇÃO	
INDICADOR	VARIÁVEL NO CLP
Peça metálica	C25
Produto montado	C26
CADEIA DE ALIMENTAÇÃO E ESTEIRA DE MOVIMENTAÇÃO	
INDICADOR	VARIÁVEL NO CLP
Cadeia de alimentação funcionando	Y0
Esteira de movimentação funcionando	Y1

- **Integração dos Hólons Operacionais:** O sistema supervisor mantém uma conexão bidirecional com o CLP mestre, de forma a transferir informação entre este e os dois hólons operacionais tanto de forma individual quanto integrada. Quando o sistema estiver neste último tipo de funcionamento o HS integrará a célula de manufatura com o manipulador utilizando o sistema de controle de qualidade;
- **Iniciação e Posicionamento do Manipulador:** O HT permite a inicialização da posição do manipulador de forma a definir um ponto de HOME, avançando ou recuando o primeiro GL de forma manual, utilizando para isto um controle na tela do supervisor.

Depois da definição de uma posição de HOME é possível mudar ao modo de funcionamento automático, o qual permite ao sistema de posicionamento pegar os materiais da esteira de movimentação a partir da informação de posição final, levando em consideração o sistema de controle de qualidade.

Tabela 17. Controles Implementados no Sistema Supervisor

CONTROL	VARIÁVEL NO CLP
Início célula	C2
Stop célula	C3
Anel na cor amarela	C30
Anel na cor vermelha	C31
Início manipulador	C20
Stop manipulador	Variável Auxiliar
Encontra peça ou produto	C21
Modo manual	C22
Avanço até material	Variável auxiliar e V2310
Passos ON-LINE	Variável auxiliar e V2317

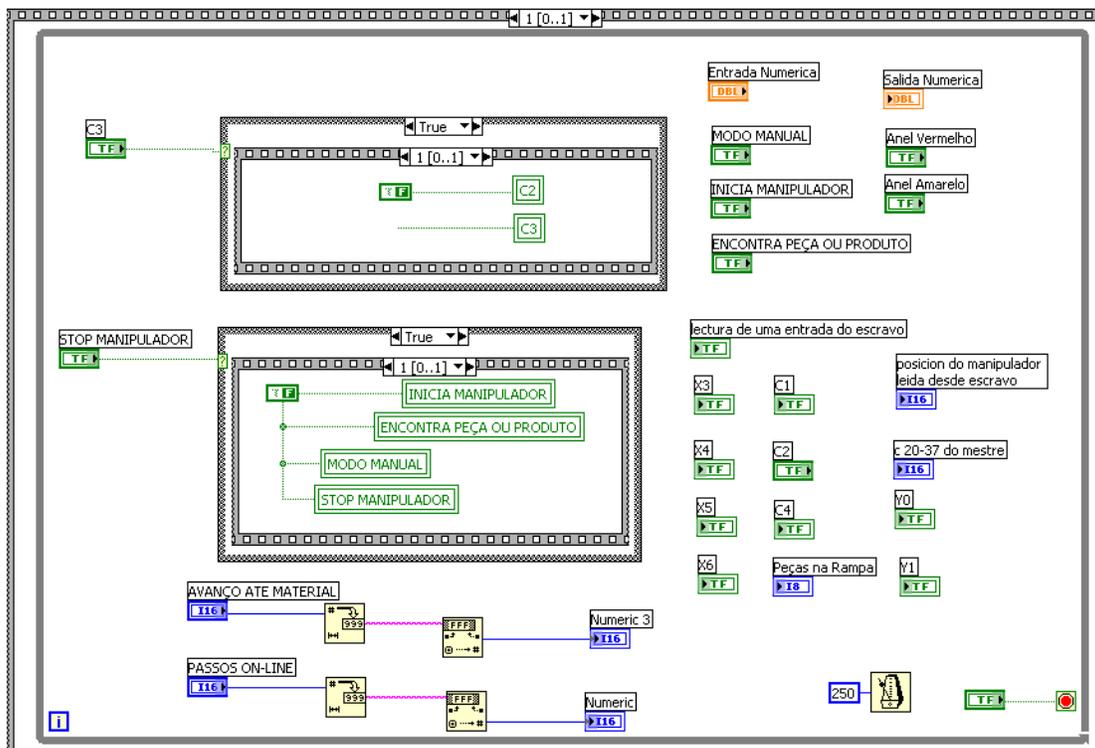


Figura 43. Diagrama de Blocos do Instrumento Virtual Desenvolvido

5.4.1. Projeto e Implementação do Módulo de Controle de Qualidade e Posicionamento

Este módulo está associado ao sistema de supervisão e comando para permitir a integração entre os dois hólons operacionais, oferecendo a possibilidade de realizar a detecção de produtos diferenciados pela cor do anel plástico acima do pino metálico. Portanto, a utilização deste módulo, associado dentro de um processo integrado permite o desenvolvimento de várias atividades em mecatrônica, acrescentando flexibilidade à proposta de atividades com a plataforma.

O algoritmo de processamento de imagem foi desenvolvido para o sistema de controle de qualidade, permitindo a detecção de diferentes materiais quando estes se movimentam através da esteira como é descrito a seguir:

- Uma peça metálica sem anel acima;
- Um produto correto montado, a cor do anel (amarela ou vermelha) acima de peça metálica determina se o produto é correto ou não;
- Um produto incorreto montado, cuja cor do anel não é a determinada pelo usuário.

Além do processamento das imagens para a classificação de materiais, este sistema detecta a posição do produto respeito ao primeiro GL do manipulador, essa posição é logo comparada com a posição atual (ON-LINE) do manipulador (determinada por meio do seu modelo cinemático), de forma a este corrigir o erro e pegar a peça. Assim, quando este sistema detecta a presença de materiais sobre a esteira de movimentação, informa ao módulo de supervisão para parar o movimento da esteira até o manipulador pegar e levar o material para a zona adequada e voltar para sua posição de recuo. O sistema de controle de qualidade confere as informações calculadas pela estação de inspeção, e quando for necessário também pode funcionar sem depender desta. A informação do sistema de controle de qualidade também poderia ser utilizada de maneira estatística em um trabalho futuro com o intuito de testar e estudar modelos de gestão da produção.

A implementação do software de processamento de imagem para o módulo de controle de qualidade é realizada utilizando o software: NI - Vision Builder for Automated Inspection da NATIONAL INSTRUMENTS™, o qual fornece ferramentas de forma que o algoritmo desenvolvido possa logo ser facilmente integrado no diagrama de blocos do sistema supervisor

implementado em LabVIEW™. Dentro do diagrama de blocos, a aquisição das imagens é realizada utilizando as ferramentas do componente NI-IMAQ Vision Acquisition Software (Figura 44). A parte física do módulo foi implementada com uma câmera (KOCOM 260x Power Zoom Camera, Modelo: kzc-261), conectada ao computador através de uma interface IMAQ PCI-1405.

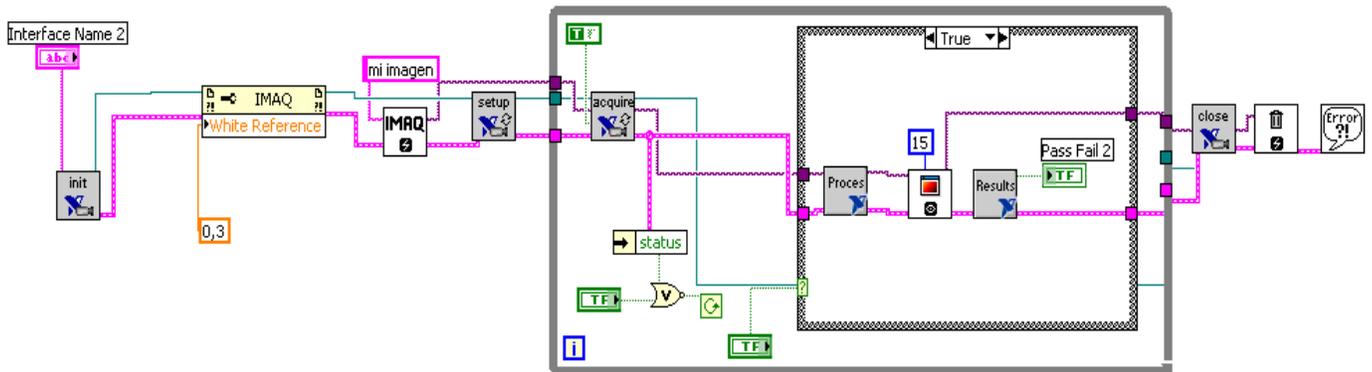
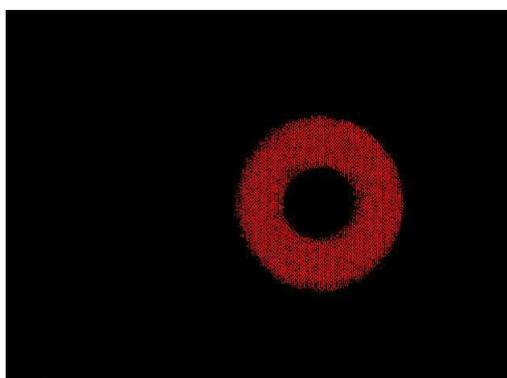


Figura 44. Diagrama de Blocos do Sistema de Controle de Qualidade

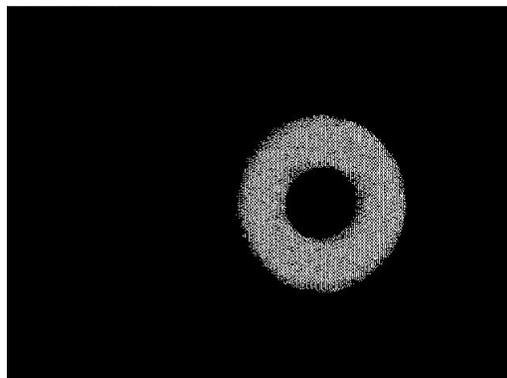
O algoritmo de processamento de imagem leva em consideração uma seqüência de operações sobre a imagem original tirada pela câmera (Figura 45). Na primeira parte do processo, são selecionadas dentro da imagem somente as partes com a cor desejada para o anel na montagem final, isto é realizado através das operações de limiarização (Figura 46a) e binarização (Figura 46b). Logo o sistema busca na imagem resultante por qualquer contorno circular dentro de uma área determinada (Figura 47a), de forma a identificar um anel plástico quando está atravessando a estação de controle de qualidade. Caso seja detectado um anel dentro da área circular selecionada, o sistema informa sua posição desde o extremo superior da imagem (Figura 47b), de maneira a enviar logo esta informação para o manipulador pegar a peça ou produto de maneira adequada.



Figura 45. Imagem Original Capturada pela Câmera

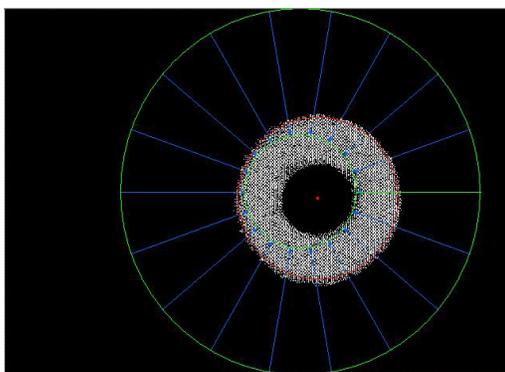


a) Limiarização

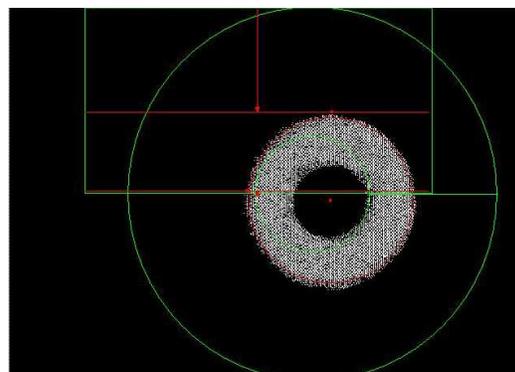


b) Binarização

Figura 46. Processos Realizados Sobre a Imagem



a) Detecção de Contorno Circular



b) Obtenção da Posição da Peça

Figura 47. Identificação da Peça

Já que este módulo (controle de qualidade e posicionamento), o qual utiliza a estação de controle de qualidade (hardware) poderá ser integrado às outras estações, são usadas duas informações para implementar a comunicação entre o mesmo e o módulo de supervisão e comando: o tipo de material atravessando a esteira (associada com três lugares no modelo em RdP) e a posição deste material com relação ao primeiro GL do manipulador. A implementação do algoritmo que calcula as variáveis necessárias para representar estas informações foi realizada com o componente NI - Vision Builder for Automated Inspection através de blocos funcionais.

5.5. Teleoperação e WEBLAB

O sistema de supervisão e controle remoto (WebLab) permitirá o comando e supervisão dos processos na plataforma implementada disponibilizando o instrumento virtual através da internet

(ou LAN) (Figura 48), desta forma o usuário pode obter uma realimentação tanto de dados (apresentados através de indicadores) utilizando sockets⁴ baseados no protocolo orientado à transmissão TCP (Protocolo de Controle de Transmissão) /IP (Protocolo de Internet) e disponibilizados pelo software LabVIEWTM, quanto de vídeo *online* por meio da utilização de uma câmera IP que mostra todo o sistema e cuja operação está baseada no Protocolo de Transmissão em Tempo Real (RTP). O usuário pode também comandar o sistema, utilizando para isto os controles disponibilizados na tela do supervisor (Tabela 17). Neste trabalho um usuário trabalhando de forma remota tem os mesmos privilégios de interação com o sistema de supervisão e comando que um usuário in-situ local).

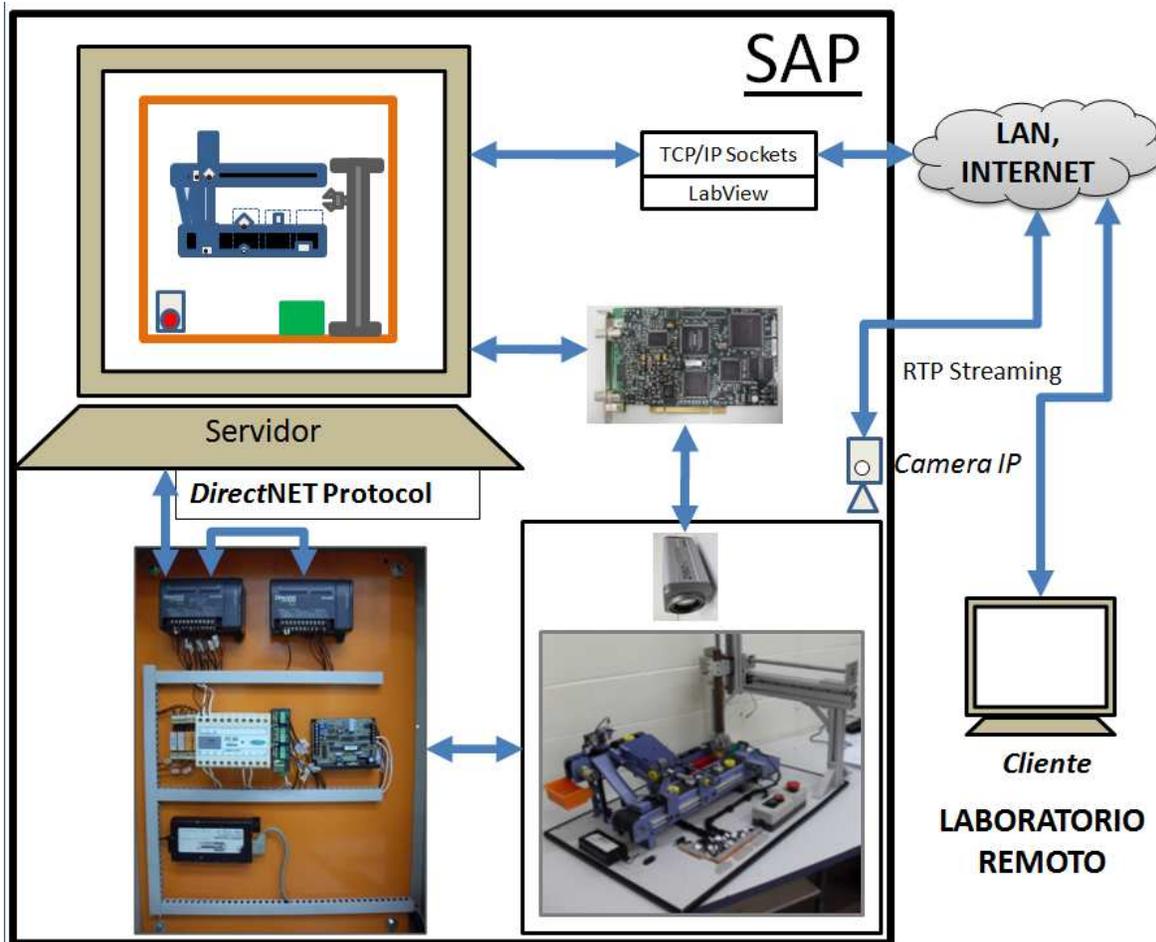


Figura 48. Arquitetura Geral do Laboratório Remoto

⁴ Socket = É utilizado como um enlace pelo qual dois programas (pode ser um programa cliente e um programa servidor, ainda em computadores distintos) podem intercambiar um fluxo de dados de maneira fiável e ordenada, um socket é definido por uma direção IP, um protocolo e um identificador de porto.

A câmera IP é acessada desde o sistema supervisor através de um algoritmo implementado com diagramas de blocos (Figura 49), no qual é utilizado o método *Navigate* da classe *IWebBrowser*, sendo configurado dentro deste método o parâmetro *URL*; de modo que quando o usuário ativar o controle booleano *Atualizar Web*, o sistema tem acesso ao endereço <http://143.106.9.151> correspondente à câmera IP. Assim um usuário a distância poderá obter uma realimentação de vídeo na mesma tela do instrumento virtual enquanto realiza atividades com a plataforma automatizada.

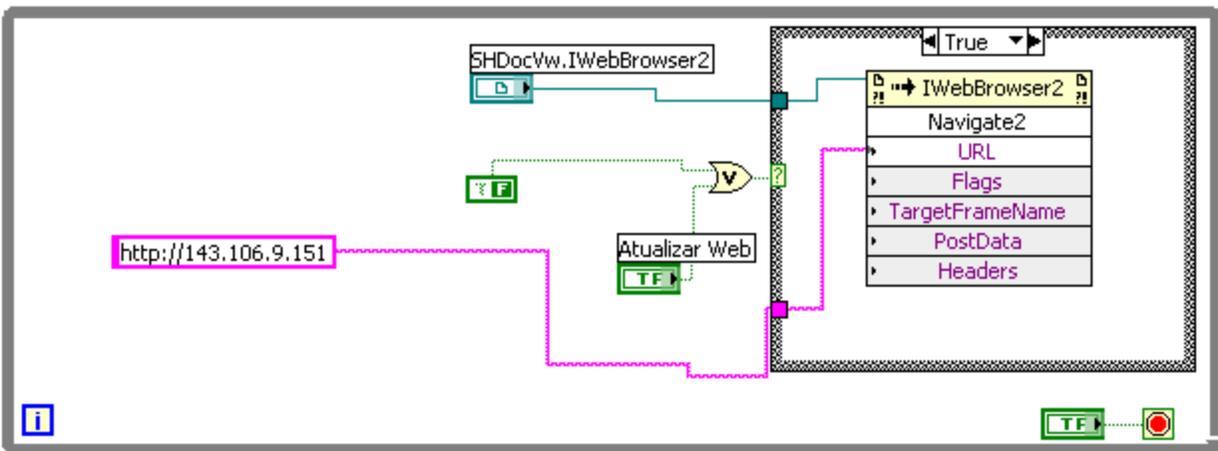


Figura 49. Diagrama de Blocos para Configuração da Realimentação de Vídeo

O módulo para conectividade remota é implementado no mesmo programa do sistema supervisor na forma de diagrama de blocos (Figura 50).

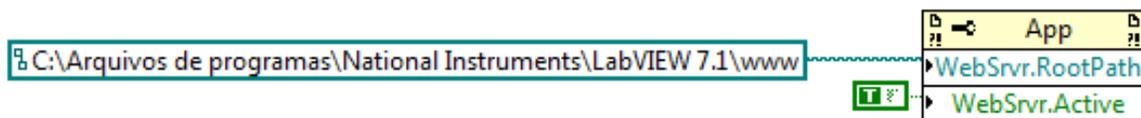


Figura 50. Diagrama de Blocos de Configuração da Conectividade Remota

Na configuração da conectividade remota do dispositivo, é utilizado um módulo de propriedades (*Property Node*) no qual são configuradas duas propriedades descritas a seguir:

- **WebServer:Root Directory Path:** Especifica a rota desde a qual o servidor Web carrega os arquivos que vão ser requeridos pelo dispositivo cliente. Esta propriedade não pode ser acessada por um dispositivo remoto.
- **WebServer:Server Active:** Especifica se o servidor Web está ou não ativo, recebe como entrada uma constante booleana (TRUE ou FALSE). Esta propriedade também não pode ser acessada ou modificada por uma aplicação remota.

Desta forma é alcançada uma teleoperação do dispositivo, podendo este ser utilizado por um usuário à distância como um laboratório remoto, no dispositivo remoto (cliente) deverão ser instaladas algumas bibliotecas do software LabVIEW™ de forma a este executar todas as funções disponibilizadas no terminal local.

5.6. Considerações Sobre o Capítulo 5

A implementação da plataforma descrita neste trabalho foi realizada considerando as premissas de arquitetura hardware – software aberta a modificações, aproveitamento de recursos disponíveis, baixo custo e integração tecnológica.

A arquitetura de integração proposta e implementada na plataforma automatizada significou em uma modularidade hardware – software que possibilitou a integração das estações para formar módulos, dos módulos para formar hólons e dos hólons para formar um CSAP completo. Esta integração através de diversas configurações promove uma flexibilidade no momento da proposta de uma atividade. Nas áreas de automação e robótica as atividades utilizam separadamente algum dos dois hólons, e a partir da utilização do sistema CSAP integrado podem ser propostas atividades diversas em mecatrônica e gestão da produção.

A utilização de dois CLPs com as mesmas características facilitou a configuração da comunicação inter-hólon na arquitetura proposta, através da implementação de uma rede mestre-escravo entre os mesmos. A configuração destes dispositivos dessa forma permitiu a não

dependência de um terceiro CLP para o estabelecimento da comunicação do CSAP com o sistema supervisor.

A implementação do sistema de supervisão e controle através de uma interface amigável com o usuário (Instrumento Virtual) possibilitou o monitoramento *online* do estado de determinadas variáveis, facilitando assim o conhecimento do sistema. Aliás, a disponibilização de controles, permitiu a interatividade do usuário com a plataforma de forma a configurar ou modificar o seu funcionamento.

No Capítulo 6 desta dissertação serão discutidas as aplicações da plataforma automatizada como ferramenta de apoio nos processos de formação e pesquisa em automação e robótica, apresentando as atividades que podem ser propostas nestas áreas e descrevendo duas práticas que foram propostas e desenvolvidas em um curso de pós-graduação.

6. UTILIZAÇÃO DA ARQUITETURA PROPOSTA PARA FORMAÇÃO E PESQUISA

Esta proposta de uma arquitetura genérica para integrar tecnologias muito utilizadas em Automação Industrial, leva em conta que com esta integração seja possível propor atividades experimentais orientadas à formação e pesquisa utilizando não somente dispositivos tecnológicos simples e isolados como sensores ou atuadores, mas também componentes integrados, para apoio à formação em campos com uma grande integração de conceitos como Automação Industrial, Robótica e ainda Mecatrônica. Como foi apresentado no Capítulo 2, nestas áreas a utilização de dispositivos que possibilitem uma *experimentação ativa* fundamentada nos princípios do *construtivismo* e *construcionismo* (conceitos apresentados na seção 2.2.1.2.) dentro de um ambiente de aprendizagem multidisciplinar motiva aos estudantes no seu processo de formação e treinamento e possibilita uma maior assimilação dos conceitos (FELDER, 1995), (DOMINGUEZ, 2005), (TZAFESTAS, 2006).

6.1. Aplicação da Plataforma nos Processos de Formação e Pesquisa

A possibilidade de realizar propostas de práticas nestas áreas, utilizando a plataforma integrada segundo a arquitetura ADACOR está fundamentada em duas características principais: a flexibilidade e a modularidade, as quais foram estudadas desde uma perspectiva tecnológica e outra pedagógica no Capítulo 3. Considerando essas características e levando em consideração o esquema de integração proposto na Figura 8, cada um dos hólons operacionais desenvolvidos oferece baseado nas tecnologias que o integram, a possibilidade de propor práticas focadas em uma área sugerida no objetivo do trabalho: o hólón da Célula de Manufatura em Automação e o hólón do manipulador em Robótica (Figura 51).

Neste trabalho foi proposta e implementada uma arquitetura hardware – software que permite a realização de atividades de experimentação que exemplificam tarefas encontradas em

um CSAP atual, o trabalho é validado de duas formas: através da modelagem e análise dinâmica de propostas de funcionamento de forma a garantir sub-processos realizáveis, e também através da própria implementação hardware - software de uma plataforma que segue a arquitetura ADACOR junto com a especificação e posterior implementação em lógica reprogramável estruturada dos sub-processos propostos.

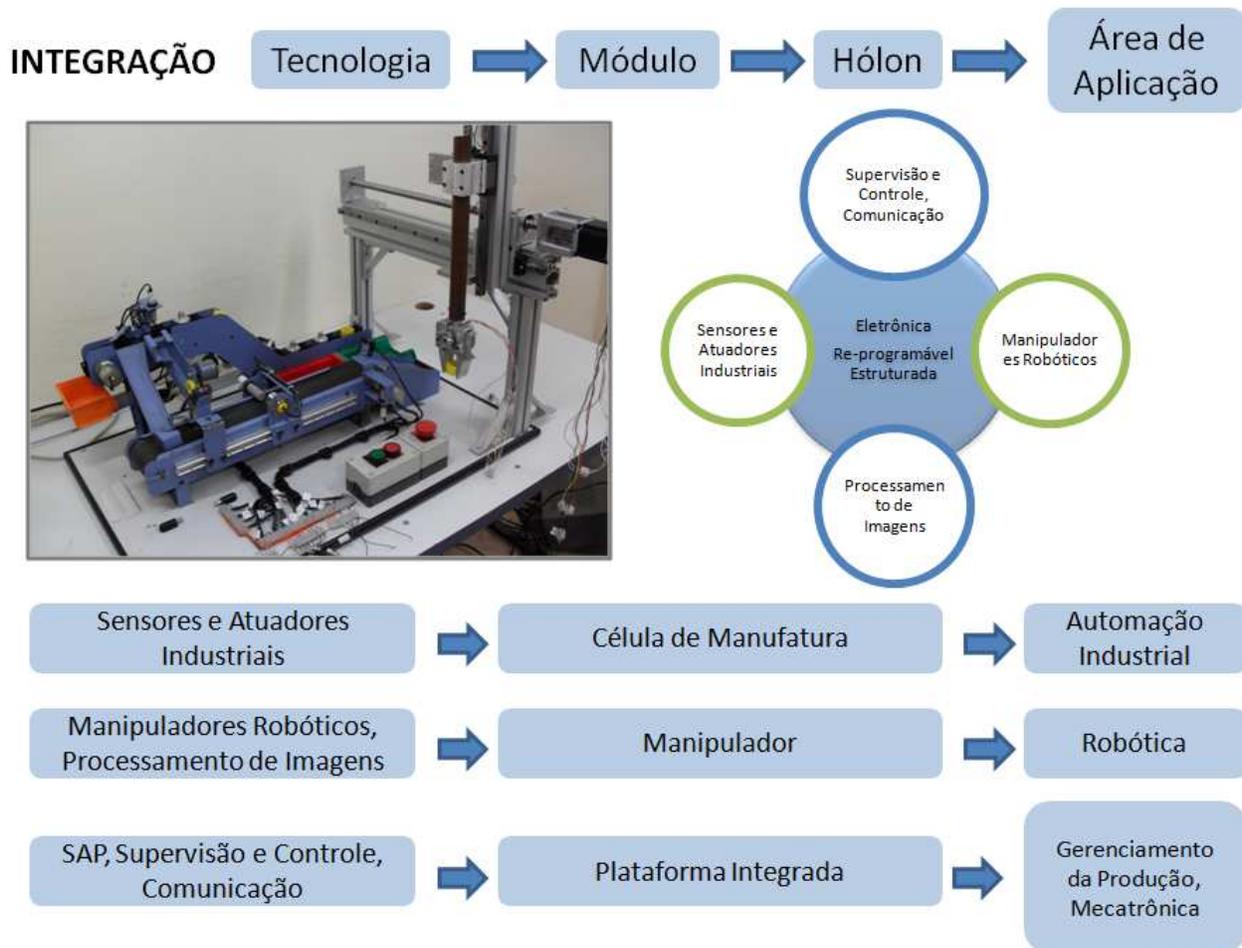


Figura 51. Áreas de Aplicação da Arquitetura Proposta

Como uma sugestão para um trabalho futuro, pode se considerar a utilização da arquitetura proposta, modular, flexível e totalmente funcional que é o objetivo desta dissertação, e partindo desse ponto estudar novas e/ou melhores metodologias que utilizem esta ferramenta de forma a propiciar o desenvolvimento de competências em áreas tecnológicas nos estudantes, é importante ressaltar que esse estudo pedagógico aprofundado está além do objetivo deste trabalho. Porém, a

seguir são apresentados como uma primeira aproximação da utilização da plataforma, alguns exemplos de atividades que podem ser propostas e implementadas em cursos de automação e/ou robótica.

6.2. Tarefas a Serem Disponibilizadas Através de Práticas

Levando em consideração a modularidade da modelagem (Capítulo 4) e da implementação hardware e software (Capítulo 5), além da possibilidade de experimentação com cada hólón em separado, é também possível definir atividades dentro de cada um deles considerando as unidades básicas de funcionamento ou sub-processos, os quais representam tarefas similares às encontradas em CSAPs e cuja realização foi validada como sendo possível através da modelagem em RdP segundo o critério de alcançabilidade. Estes sub-processos podem ocorrer dentro das unidades menores de hardware, que neste trabalho recebem o nome de estações (Tabela 18).

Tabela 18. Tarefas Disponibilizadas pela Arquitetura Proposta

TAREFAS INDIVIDUAIS DISPONIBILIZADAS PELA PLATAFORMA	
Tarefas com a Parte Operativa	Tarefas com a Parte de Comando
<ul style="list-style-type: none"> • Alimentação de matéria prima • Classificação de matéria prima • Montagem de produtos • Inspeção de produtos • Controle de qualidade • Transporte de produtos terminados 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoramento de processos individuais • Contagem de peças e produtos montados • Programação de manufatura de mais de um produto • Monitoramento e controle de processos Integrados

Desta forma, com a arquitetura proposta é possível a formulação de atividades práticas com três níveis de complexidade (de experimentação e validação) de forma a aplicar os conhecimentos teóricos adquiridos na sala de aula:

- a) Nível A: Focado no conhecimento do funcionamento de sensores e atuadores e sua aplicação em tarefas individuais, utilizando como hardware físico os sensores ou atuadores isolados;

- b) Nível B: Focado na implementação de sub – processos, que podem ser individuais em uma estação ou integrados ao associar várias estações até formar um hólón, para assim compor processos operativos complexos;
- c) Nível C: Focado na implementação de processos completos, integrando os hólons em um CSAP que executa atividades de produção atendendo a uma demanda definida.

O objetivo das práticas de nível B que podem ser propostas está baseado nas marcações iniciais e finais em uma estação (apresentadas no Capítulo 4). No caso das atividades práticas que integram várias estações, mesmo sendo de hólons diferentes, é definindo como objetivo geral da atividade o estado correspondente à marcação desejada da última estação partindo desde a marcação inicial da primeira. Para selecionar as estações a serem integradas, deve-se considerar que as saídas de uma estação estão conectadas às entradas da seguinte, portanto o número de saídas da primeira estação deve ser igual ao número de entradas na segunda. Para propor atividades práticas de nível C devem-se integrar os dois hólons completos em um CSAP.

6.2.1. Aplicações Orientadas à Formação em Áreas Específicas

A seguir são listadas as atividades com cada uma das áreas mencionadas no objetivo deste trabalho, atendendo aos três níveis descritos acima:

Atividades Práticas em Automação Industrial

- a) Atividades práticas em Instrumentação Industrial (Sensores, Atuadores), utilização e minimização de funções lógicas;
- b) Desenvolvimento de algoritmos em lógica reprogramável, modelagem de sistemas SED;
- c) Desenvolvimento de Sistemas de Supervisão para aplicações industriais.

Atividades Práticas em Robótica

- a) Acionamento de motores de passo;
- b) Atividades práticas de posicionamento do efetuator final a partir de visão artificial, cinemática direta e inversa, aquisição e classificação de imagens;
- c) Atividades práticas de planejamento de trajetórias e controle de movimento, práticas de identificação e movimentação de produtos.

Integrando os dois hólons como foi apresentado na Figura 26, também é possível propor atividades práticas em mecatrônica e gerenciamento da produção:

Atividades Práticas em Mecatrônica

- Integração dos quatro módulos da plataforma em um processo contínuo de classificação, montagem, inspeção e movimentação de produtos;
- Desenvolvimento de seqüências de controle;
- Atividades de desenvolvimento de arquiteturas de supervisão.

Gerenciamento da Produção

- Planejamento e definição da seqüência de atividades de todos os módulos da plataforma completa e gestão na movimentação das peças, de forma a satisfazer uma determinada demanda de produtos e um tempo de produção.

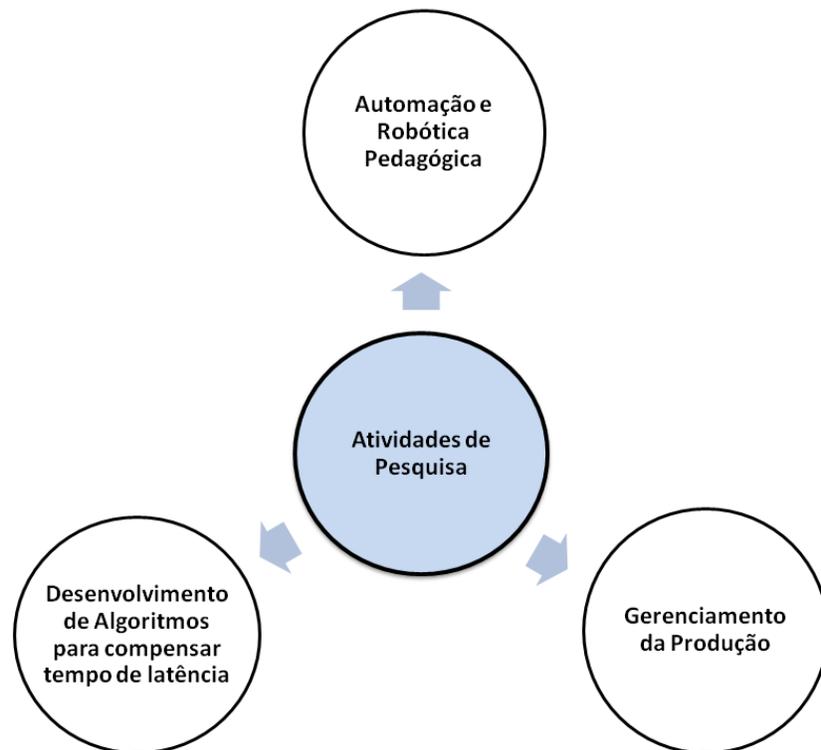


Figura 52. Aplicações da Arquitetura Proposta em Processos de Pesquisa

6.2.2. Aplicações em Processos de Pesquisa

Além das atividades práticas apresentadas anteriormente, a plataforma também pode oferecer apoio aos pesquisadores da área de educação em engenharia nos seus processos de pesquisa, de forma a eles formularem e avaliarem suas hipóteses projetando atividades em áreas

como: automação, robótica pedagógica e modelos de gerenciamento da produção enxuta (Just-In-Time, Kanban) (MA, 2009), (TREADWELL, 2005) (Figura 52), e logo desenvolvendo estas atividades utilizando a plataforma. É também possível utilizar este dispositivo para propor atividades de pesquisa focadas no desenvolvimento de algoritmos para garantir a integridade da informação transferida (COSMA, 2003) desde a plataforma desenvolvida até o sistema de supervisão e controle, e também para compensar o tempo de latência nessa transmissão; essas aplicações seriam necessárias para práticas subseqüentes voltadas ao comando e controle direto ou teleoperação do manipulador.

6.3. Atividades Propostas no Curso de CLP da UNICAMP

No desenvolvimento da disciplina do programa de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, IM333 - Controladores Programáveis Industriais, ministrada no primeiro semestre de 2010, foram propostas duas atividades que utilizaram a plataforma desenvolvida neste trabalho, de forma a incluir um componente experimental ativo para acompanhar os conceitos apresentados sobre a programação de tarefas utilizando lógica reprogramável estruturada. A seguir são apresentadas para as duas atividades: preparação das atividades, metodologia de desenvolvimento das atividades, forma de avaliação das atividades; e para cada uma delas: objetivo da atividade, elementos utilizados e descrição da atividade.

6.3.1. Preparação das Atividades

As atividades foram propostas na parte final do curso, depois do professor ter apresentado os conceitos de: sistemas automatizados de produção, especificação de funcionamento de SAPs utilizando diagramas GRAFCET, programação através de lógica de contatos Ladder e programação utilizando Ladder com estágios (RLL^{PLUS}). As etapas na preparação das atividades são descritas a seguir:

- a) Motivação para a realização da atividade através de apresentação oral do instrutor;
- b) Descrição da parte operativa (PO) e de comando (PC) da arquitetura utilizada (plataforma);

- c) Descrição dos componentes específicos (sensores, atuadores, estação correspondente, interface de comando) da plataforma a serem utilizados e da forma de interconexão destes com os dispositivos de controle lógicos (CLPs);
- d) Tarefa a ser realizada utilizando a arquitetura descrita;
- e) Definição dos itens *Entregáveis*: Especificação do Processo (GRAFCET funcional e tecnológico), relação de entradas/saídas utilizando os mnemônicos da CLP, programa em linguagem RLL^{PLUS} do sub-processo desenvolvido.

Para as duas atividades, esta etapa foi realizada através de uma apresentação oral do instrutor para os estudantes, depois os estudantes puderam observar a plataforma no Laboratório de Robótica LAIR para se familiarizarem com o equipamento e solucionar as dúvidas que possam aparecer levando em consideração a apresentação oral.

6.3.2. Metodologia para o Desenvolvimento das Atividades

- a) No dia da apresentação da atividade foram formados grupos de dois estudantes, todos os grupos iriam entregar os itens definidos anteriormente, com um prazo de uma semana para seu desenvolvimento, durante essa semana os estudantes não poderiam ter contato com a plataforma nem com nenhum simulador para testar o funcionamento dos seus programas, de forma que o instrutor pudesse logo controlar no laboratório o tempo real que cada um dos grupos demorou interagindo com a plataforma;
- b) Depois de entregar os itens requeridos, nas últimas duas horas da seguinte aula os grupos de estudantes realizaram a parte prática da atividade, tendo a oportunidade de testar as suas implementações no CLP correspondente para cada prática, para observar o funcionamento da estação de classificação no caso da primeira atividade ou do manipulador no caso da segunda, utilizando o programa desenvolvido por eles;
- c) As atividades de interação com a plataforma foram desenvolvidas com a supervisão do instrutor que solucionou as dúvidas dos estudantes; caso o tempo para um grupo esgotasse, e este não alcançasse a implementar a tarefa objetivo, seria finalizada sua interação com a plataforma para permitir ao seguinte grupo realizar a atividade prática.

6.3.3. Avaliação do componente Prático das Atividades

A atividade foi avaliada atendendo o modelo de Pedersen (2000) o qual considera o treinamento em áreas tecnológicas como um processo dinâmico de três dimensões

(conhecimentos, habilidades e atitudes), desta maneira foram selecionados e apresentados os entregáveis antes de cada prática, para que partindo destes fosse desenvolvida a experimentação.

Levando isto em conta, a especificação GRAFCET Funcional propicia aos estudantes elaborar “Criar” um plano de ação para solucionar um problema propiciando o desenvolvimento de habilidades, a especificação GRAFCET Tecnológica utilizando os mnemônicos permite “implementar” esse plano, propiciando o desenvolvimento de atitudes, e finalmente a elaboração da tabela de entradas / saídas junto com a implementação em Ladder propicia o “saber” baseado nos conhecimentos de programação de CLPs.

6.3.4. Atividade Implementada com a Estação de Classificação da Célula de Manufatura

6.3.4.1. Objetivo da Atividade

Permitir aos estudantes a validação de conceitos teóricos através da interação real com sensores (indutivos e fotoelétricos), lógica reprogramável estruturada e atuadores (motores DC e solenóide) utilizados no meio industrial, motivando o desenvolvimento de uma tarefa de classificação de materiais em dois tipos: peças metálicas e peças plásticas.

6.3.4.2. Elementos Utilizados

Estação de classificação da plataforma implementada como parte da validação deste trabalho, ver Figura 53.

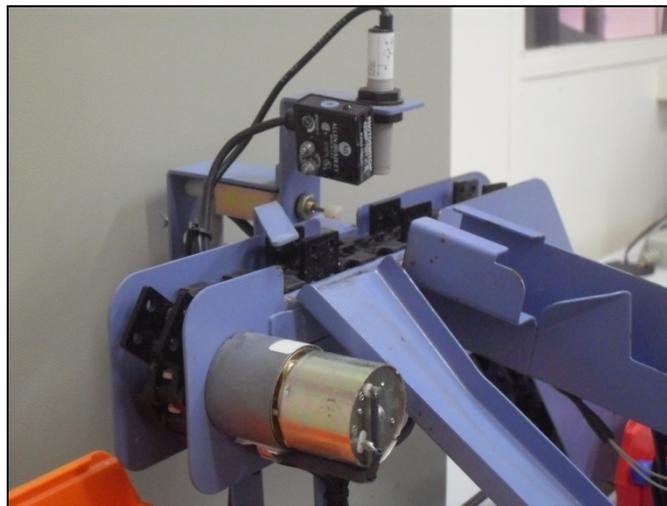


Figura 53. Estação de Classificação

6.3.4.3. Descrição da Atividade

A atividade desenvolvida no curso foi de tipo ativo - PBL (Aprendizagem Baseada em Problemas) e é classificada de acordo com sua complexidade como sendo de nível B, a atividade está baseada na especificação e posterior implementação real de um dos sub-processos possíveis, utilizando o equipamento hardware da célula de manufatura e a interface de comando implementada segundo a arquitetura proposta neste trabalho.

O sub-processo na estação inicia quando as peças metálicas ou plásticas estão se movimentando através da cadeia de alimentação para a estação de classificação.

- a) Caso uma peça metálica (pino) seja detectada na estação, não será feita nenhuma ação até esta atravessar completamente a estação e se deslocar pela rampa correspondente;
- b) Caso uma peça plástica (anel) seja detectada na estação, esta deverá ser empurrada para se deslocar pela rampa correspondente.

6.3.5. Atividade Implementada com o Sistema Robótico de Manipulação

6.3.5.1. Objetivo da Atividade

Permitir aos estudantes a validação dos conceitos teóricos de configuração e programação do acionamento de motores de passo por meio de lógica reprogramável estruturada (CLPs), através da interação com um robô manipulador de forma a programar os movimentos dos seus 2 GL.

6.3.5.2. Elementos Utilizados

Robô manipulador cartesiano com 2 GL acionados através de motores de passo, (Figura 54).

6.3.5.3. Descrição da Atividade

A atividade desenvolvida no curso foi de tipo ativo - PBL (Aprendizagem Baseada em Problemas) e é classificada de acordo com sua complexidade como sendo do nível B, está baseada na especificação e posterior implementação real de uma tarefa, utilizando a estrutura hardware do manipulador e a interface de comando, juntos implementados segundo a arquitetura proposta neste trabalho. A tarefa definida para ser desenvolvida na estação de movimentação é a seguinte:



Figura 54. Robô manipulador de 2 GL

- a) Movimentar o primeiro e o segundo motor de passo, de forma a avançar e recuar os 2 GL do manipulador em uma seqüência que faça com que o efetuator final descreva um quadrado;
- b) Repetir a primeira seqüência de forma ao efetuator final descrever um quadrado menor dentro do primeiro.

6.4. Considerações Sobre o Capítulo 6

Como foi apresentado neste capítulo, através da utilização de ferramentas multitecnológicas para apoio aos processos de formação e pesquisa de forma a complementar os conceitos teóricos apresentados na sala de aula, implementou-se um ambiente de aprendizado envolvendo as áreas de automação e robótica, no qual o estudante foi motivado através da interação real com tecnologia para observar e validar suas soluções a problemas propostos.

A plataforma implementada permitiu atividades em três níveis de dificuldade, que estão associados ao grau de integração dos dispositivos dentro da mesma. Em um primeiro nível foram utilizados dispositivos tecnológicos isolados, o segundo nível foi focado no desenvolvimento de tarefas encontradas nos CSAP utilizando uma ou várias estações associadas entre si, e no terceiro nível as tarefas são realizadas através da integração dos dois hólons o qual permite definir objetivos globais de produção.

No Capítulo 7 desta dissertação serão apresentadas as conclusões deste trabalho de mestrado e algumas sugestões para trabalhos futuros (dissertações de mestrado ou teses de doutorado) que podem-se desenvolver utilizando arquitetura e a plataforma automatizada proposta e implementada neste trabalho.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1. Conclusões do Trabalho de Dissertação

Neste trabalho de pesquisa foi proposta uma arquitetura genérica de Supervisão e Comando para uma plataforma automatizada de experimentação modular com capacidade de utilização remota, concebida para apoiar e complementar os processos de formação e pesquisa em Automação Industrial e Robótica através do projeto, modelagem e implementação de uma arquitetura holônica do tipo ADACOR para a integração de tecnologias em uma plataforma automatizada, na qual é possível propor atividades que vão exemplificar tarefas rotineiras de CSAPs usados no ambiente industrial moderno.

Foram estudados os conceitos básicos dos Sistemas Automatizados de Produção (SAP) e sua evolução ao longo do tempo, e também as formas existentes de apoio aos processos de formação e pesquisa em automação e robótica; identificando como este trabalho está inserido dentro do paradigma de interação com tecnologias integradas, através da realização de atividades práticas com plataformas automatizadas de arquitetura aberta, de forma a desenvolver um ambiente de aprendizagem multitecnológico colaborativo e cooperativo.

As características de flexibilidade e modularidade foram consideradas na etapa de concepção desta arquitetura de modo a atender a duas perspectivas: tecnológica e pedagógica. A possibilidade de funcionamento e controle distribuído da arquitetura, a reconfigurabilidade e escalabilidade hardware - software, e a utilização de lógica reprogramável estruturada promovem uma variedade de atividades práticas, as quais incrementam o seu nível de complexidade na medida em que aumenta o grau de integração utilizado dentro da plataforma, aliás, a disponibilização de laboratórios remotos promove atividades práticas a distância, flexibilizando ainda mais a utilização da plataforma.

A modelagem de cada uma das estações como um sistema a eventos discretos (SED) utilizando RdP permitiu realizar uma análise formal (matemática) dos seus modelos, nesta análise foi utilizada a matriz de incidência para representar a parte estática do modelo e as marcações inicial e final para representar a dinâmica de uma proposta de funcionamento. Para validar se uma determinada proposta era realmente plausível de ser implementada foi realizado um estudo de alcançabilidade, caso desta proposta descrevesse um funcionamento possível, foi designada de sub-processo, o qual pode depois ser utilizado na proposta de atividades.

A integração da plataforma através de uma arquitetura ADACOR permitiu que esta tivesse uma parte de comando genérica, independente dos recursos físicos utilizados na implementação dos hólons. Isto possibilitará rapidez e facilidade na troca dos recursos físicos, necessitando apenas da implementação de um novo recurso virtual associado a cada um dos hólons, conservando ao mesmo tempo, os estágios lógicos do programa implementado em RLL^{PLUS}.

Foram propostas duas atividades práticas como exemplo de utilização da plataforma, as quais foram desenvolvidas pelos estudantes de um curso de pós-graduação. Nestas, os grupos de estudantes tiveram que especificar e posteriormente implementar uma tarefa em cada holon utilizando o CLP correspondente. Os grupos de estudantes manifestaram um interesse no desenvolvimento das atividades revisando e aprofundando os conceitos estudados nas aulas teóricas, motivados pela visualização do funcionamento real do hardware operativo. Isto foi propiciado devido às práticas não serem aplicações isoladas, mas estarem imersas dentro de uma plataforma funcional e realmente acessível para eles.

7.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

O trabalho desenvolvido nesta dissertação poderá ser um ponto de partida para pesquisa aplicada nas áreas de automação, robótica e aprendizagem as quais poderão aproveitar as características de flexibilidade e modularidade da arquitetura proposta e implementada. A seguir são descritos possíveis trabalhos futuros a serem desenvolvidos:

a) Trabalhos de pesquisa em educação, ciências sociais e psicologia

Desenvolvimento de novas metodologias pedagógicas para apoio à formação através da realização de práticas com uma plataforma automatizada funcional; visando uma MELHOR aquisição de conhecimentos, habilidades e atitudes no processo de aprendizagem dos estudantes que as alcançadas com as metodologias e ferramentas não integradas utilizadas atualmente em cursos de graduação e pós-graduação.

b) Comparação de diferentes modelos de ensino-aprendizagem

Propor atividades nas quais seja possível avaliar a aquisição de competências dos estudantes, baseadas em modelos de ensino-aprendizagem onde é possível mudar: a forma de acompanhamento das atividades práticas, o critério e forma de avaliação de tarefas, o método de interação dos alunos com a plataforma (individual e/ou grupos), o tipo de interação com a plataforma (local e/ou a distância) o tempo de interação com a plataforma, os componentes da plataforma (estações e/ou hólons) a serem utilizados na atividade prática, e a metodologia no processo de desenvolvimento das atividades (construcionista e/ou construtivista).

Também poderiam se desenvolver trabalhos de pesquisa orientados a realizar comparações levando em consideração: competências de um curso que utilize esta plataforma multitecnológica com outro que utilize só tecnologias isoladas, a modalidade das atividades propostas (PBL ou Atividades Práticas Guiadas). A partir deste trabalho pode também ser estudado: o grau de motivação de estudantes realizando trabalho interativo com a plataforma integrada e o tipo de competências desenvolvidas através da interação com a plataforma.

c) Implementação de um simulador de atividades práticas

A partir da arquitetura implementada neste trabalho, a qual disponibiliza o sistema de supervisão e comando na forma de laboratório remoto (através da internet), poderá ser proposto um trabalho de pesquisa, de modo a implementar um modelo virtual (3D) da plataforma que possa refletir fielmente as características físicas e a funcionalidade do dispositivo real, permitindo também uma simulação do seu funcionamento como resposta a determinados comandos, antes de enviar os mesmos para a plataforma física. É possível ainda como um trabalho posterior implementar um módulo integrado dentro do ambiente virtual que permita também o

desenvolvimento e simulação de programas completos em lógica reprogramável estruturada, e posterior carregamento desses em um CLP industrial, programando-se assim o dispositivo real.

d) Propostas de controle on-line da plataforma automatizada

Considerando que a plataforma implementada permite uma experimentação a distância através de um laboratório remoto, poderão ser propostas através de um trabalho de pesquisa, formas de garantir tanto a segurança na transmissão da informação quanto à diminuição e/ou compensação do tempo de latência na comunicação de dados. Para atividades orientadas ao controle de movimentos de dispositivos robóticos, poderá desenvolver-se ainda um nível de autonomia do manipulador robótico, para que o mesmo possa funcionar com velocidades de transmissão de dados muito baixas.

e) Aproveitamento das características da arquitetura ADACOR

Este trabalho constitui-se como uma experiência na concepção de arquiteturas holônicas tipo ADACOR, a qual devido a sua característica de controle distribuído promovida através da implementação de hólons (os quais podem trabalhar tanto independentemente quanto cooperativamente) pode-se adaptar rapidamente às mudanças do ambiente. Isto constitui um ponto de partida para propor trabalhos futuros focados somente no componente adaptativo dentro do LCD de cada hólón, permitindo assim a implementação de algoritmos heurísticos e/ou de inteligência artificial para automatizar o processo de programação e aquisição de conhecimentos por parte do CSAP; considerando-se ainda a possibilidade de integração à plataforma de diversos dispositivos de aquisição de dados e imagens.

Referências

ABELSON, Hal; LONG, Phillip D. MIT's Strategy for Educational Technology Innovation, 1999–2003. **Proceedings of the IEEE**, v. 96, n. 6, p. 1012-1034, Jun. 2008.

ADAMO, Francesco et al. SCADA/HMI Systems in Advanced Educational Courses. **IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement**, Ottawa, Ont, v. 2, p. 1097-1101, 16 May. 2005.

AIHARA, Cintia Kimie. **Projeto e Implantação de Plataforma Didática Aplicada ao Ensino e Pesquisa em Automação**. Campinas, 234 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2000.

AIHARA, Cintia Kimie. **Uma Abordagem Interativa para o Problema de Capacitação e Pesquisa em Automação**. Campinas, 141 p. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica, 2005.

ALIANE, Nourdine et al. Un Laboratorio de Ingeniería de Control Basado en Internet. **Información Tecnológica**, Madrid - España, v. 18, n. 6, p. 19-26, 2007.

ALIANE, Nourdine et al. LABNET: Laboratorio remoto para control de procesos. **Información Tecnológica**, Madrid - España, v. 18, n. 6, p. 19-26, 2007.

ANDRIA, Gregorio et al. Remote Didactic Laboratory “G. Savastano,” The Italian Experience for E-Learning at the Technical Universities in the Field of Electrical and Electronic Measurements: Overview on Didactic Experiments. **IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement**, Braunschweig - Germany, v. 56, n.4, p. 1135-1147, Aug. 2007.

ARAUJO, Emerson dos Santos. **Modelagem e Descrição da Parte de Comando de um Sistema Automatizado de Produção Utilizando o GRAFCET - Aplicação a uma Plataforma Industrial em Automação**. Campinas, 91 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 1997.

ARIZA, Carlos Fernando; AMAYA, Dario. Laboratorio Remoto Aplicado a la Educacion a Distancia. **Ciencia e Ingenieria Neogranadina**, Bogotá - Colombia, v. 18, n. 2, p. 131-145, Dic. 2008.

BAFFI, Antonio Carlos. **Projeto e Implementação de uma Plataforma Didática de Manipulação Utilizando Conceitos de Automação e Integração**. Campinas, 124 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica, 2001.

BAKER, A et al. GRAFCET and SFC as Factory Automation Standards Advantages and Limitations. **American Control Conference**, p. 1725-1730, 1987.

BARBOSA, Alípio Monteiro et al. As Empresas Juniores E A Confecção De Bancadas Didáticas Como Atividades Inovadoras No Ensino De Engenharia. **Anais do XXXIV COBENGE**, Passo Fundo, p. 361-370, set. 2006.

BIEREL, Evelyne; ROUSSEL, Jean-Marc. Advances in Grafcet. **Automatique Productique Informatique Industrielle**, v. 27, n. 5, p. 1-3, 1995.

CARDOSO, Janette; VALETTE, Robert; DUBOIS, Didier. Possibilistic Petri Nets. **IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics—Part B: Cybernetics**, v. 29, n. 5, p. 573-582, Oct. 1999.

CHARBONNIER, François; ALLA, Hassane; DAVID, René. The Supervised Control of Discrete-Event Dynamic Systems. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 7, n. 2, p. 175-187, Mar. 1999.

CHELLA, Marco Túlio. Ambiente de Robótica Educacional com Logo. **XXII Congresso da Sociedade Brasileira de Computação – SBC2002**, Florianópolis - Brasil, p. 1-8, 2002.

CHELLA, Marco Túlio. **Ambiente de Robótica para Aplicações Educacionais com SuperLogo**. Campinas, 186 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e Da Computação, 2002.

CHENG, Irene; BASU, Anup; GOEBEL, Randy. Interactive Multimedia for Adaptive Online Education. **IEEE Multimedia**, v. 16, n. 1, p. 16-25, Jan. 2009.

COLOMBO, Armando et al. A Collaborative Automation Approach to Distributed Production Systems. **Proceedings of 2nd IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN'04)**, v.1, p. 1-6, Jun. 2004.

COQUARD, P. et al. Remote laboratories: AIP-Primeca RAO platform. **2nd International Conference on Digital Information Management. ICDIM '07.**, Lyon - France, p. 762-767, 28 Oct. 2007.

COSMA, Claudio et al. Laboratory Tools for Robotics and Automation Education. **Proceedins of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation**, Taipei - Taiwan, v. 3, p. 3303-3308, 14 - 19 Sep. 2003.

COSSO, Sérgio Guanaes. **Integração de Ferramentas de Automação Direcionadas a Aplicações de Telerobotica - Implementação de um Sistema de Supervisão e Controle num Sistema Teleoperado**. Campinas, 134 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2002.

COX, Daniel; SCHONNING, Alexandra. Engineering Education Via Robotics, Mechatronics And Automation Projects. **2006 World Automation Congress, WAC'06**, Budapest -Hungary, p. 1-6, 24 Jun. 2006.

D'ABREU, João Vilhete. **Integração de Dispositivos Mecatronicos para Ensino-Aprendizagem de Conceitos na Area de Automação**. Campinas, 309 p. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2002.

DAVID, René. Grafcet: a powerful tool for specification of logic controllers. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v.3, n. 3, p. 253-268, Sep. 1995.

DE SOUZA, Alisson. **Projeto do sistema de controle de uma bancada didática para posicionadores Eletro-Hidráulicos Proporcionais**. Florianopolis, 102 p. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

DOMINGUEZ, M.; REGUERA, P.; FUERTES, J.J. Laboratorio Remoto Para la Enseñanza dela Automatica en la Universidad de Leon (España). **Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial**, Valencia, v.2, n.2, p. 36-45, Abr. 2005.

EL RHALIBI, A; PRUNET, F; DURANTE, C. Analysis of function charts for control systems using Petri nets. **IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA '94.**, Tokyo, Japan, p. 365-372, 6 Nov. 1994.

EL RHALIBI, A; PRUNET, F; DURANTE, C. From modelling using function charts for control systems to analysis using Petri nets. **Proceedings of the Third International Workshop on**

Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems, Durham, NC, USA, p. 389-393, 18 Jan. 1995.

FELDER, Richard et al. A Longitudinal Study of Engineering Student Performance and Retention. **Journal of Engineering Education**, v. 84, n. 2, p. 151-163, 1995.

FERREIRA, Gustavo Andre; DOS SANTOS, Marcelo. Proposta de bancada robotica para uso didatico multidisciplinar. **Exacta**, São Paulo, v. 4, n. especial, p. 67-68, 25 Nov. 2006.

FLOCHOVA, Jana. A Petri net based supervisory control implementation. **IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics**, v. 2, p. 1039-1044, 8 Oct. 2003.

GARCIA, J; LOPEZ, D; ORDUNA, P. Towards a canonical software architecture for multi-device WebLabs. **Industrial Electronics Society. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE**, p. 1-6, 6 Nov. 2005.

HARRIS, Dale A.; KROUSGRILL, Chuck. Distance Education: New Technologies and New Directions. **Proceedings of the IEEE**, 96, v. 96, n. 6, p. 917-930, Jun. 2008.

IORDACHE, Marian V.; ANTSAKLIS, Panos J. Supervisory Control of Concurrent Systems: A Petri Net Structural Approach. **IEEE Transactions On Automatic Control**, v. 53, n. 1, p. 441-442, Feb. 2008.

IORIO, Luis Carlos. **Redes de Comunicação em Automação Industrial, Solução Tecnológica da Plataforma PIPEFA**. Campinas, 152 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2002.

KARADIGMAS, Dimitris; KOSTAS, Esftathiou. An Integrated Educational Platform Implementing Real, Remote-Lab Experiments for Electrical Engineering Courses. **IEEE Journal of Computers**, v. 2, n. 2, p. 37-44, 2007.

LEE, Jin-Shyan; ZHOU, Meng-Chu; HSU, Pau-Lo. An Application of Petri Nets to Supervisory Control for Human-Computer Interactive Systems. **IEEE Transactions On Industrial Electronics**, v. 52, n. 5, p. 1220-1226, Oct. 2005.

LEE, Jin Shyan; ZHOU, MengChu; HSU, Pau Lo. A Petri-Net Approach to Modular Supervision With Conflict Resolution for Semiconductor Manufacturing Systems. **IEEE Transactions On Automation Science And Engineering**, v. 4, n. 4, p. 584-588, Oct. 2007.

LEITÃO, Paulo; COLOMBO, Armando; RESTIVO, Francisco. **Lecture Notes on Computer Science: An Approach to the Formal Specification of Holonic Control Systems**. 27442004th ed.: Springer, 2004. 1090 p. ISBN: 9783540407515.

LEITÃO, Paulo; COLOMBO, Armando; RESTIVO, Francisco. Formal Specification of ADACOR Holonic Control System: Coordination Models. **Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference 2005** 2005.

LEITÃO, Paulo; COLOMBO, Armando; RESTIVO, Francisco. A Formal Specification Approach for Holonic Control Systems. The ADACOR Case. **International Journal of Manufacturing Technology and Management**, v. 8, n. 3, p. 37-57, 2006.

LEITÃO, Paulo; RESTIVO, Francisco. **Computers in Industry: ADACOR: A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control**. 572nd ed.: ELSEVIER, 2006. 121-130 p.

LEVA, Alberto; DONIDA, Filippo. Multifunctional Remote Laboratory for Education in Automatic Control: The CrAutoLab Experience. **IEEE Transactions On Industrial Electronics**, v. 55, n.6, p. 2376-2385, Jun. 2008.

MA, Guangshui; GUAN, Hongjun. The application research of cold-chain logistics delivery schedule based on JIT. **International Conference on Industrial Mechatronics and Automation. ICIMA 2009.**, p. 368-370, 15 May. 2009.

MAIA, Lady Daiana et al. A Robotica como Ambiente de Programação Utilizando o Kit Lego Mindstorms. **Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Informática na Educação**, Fortaleza - Brasil, p. 1-10, 12 Nov. 2008.

MARTINS, Mauricio Pires. **Estruturação da parte de Comando de um Sistema Automatizado de Produção com Ênfase na Implementação de um sistema de Supervisao**. Campinas, 128 p. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 1998.

MEDEIROS, Dante Alves et al. Desenvolvimento de um Ambiente Colaborativo de Ensino-Aprendizagem Via Web. **Virtual Educa Miami 2003**, Miami - USA, p. 1-4, 18 Jun. 2003.

MOLAS, Lluís et al. Integración internacional de plataformas de enseñanza a distância de automatización con PLCs. **IEEE-RITA Revista Iberoamericana de Tecnologías de Aprendizaje**, v. 1, n. 1, p. 1-10, Nov. 2006.

MOLINA, F et al. Using industrial standards on PLC programming learning. **Mediterranean Conference on Control & Automation**, Athens, p. 1-6, 27 Jun. 2007.

MURATA, Tadao. Petri nets: Properties, analysis and applications. **Proceedings of the IEEE**, v. 77, n. 4, p. 541-580, Apr. 1989.

ODORICO, Arnaldo. La Robotica desde una Perspectiva Pedagogica. **Revista de Informatica Educativa y Medios Audiovisuales**, v. 2, n. 5, p. 33-48, 2005.

PANETTO, Heme et al. Contribution of the Grafcet model to synchrony in discrete events systems modelling. **20th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation**, Bologna, Italy, v. 3, p. 1527-1532, 5 Sep. 1994.

PEDERSEN, Paul. **Hidden Messages in Culture-Centered Counseling: A Triad Training Model**. 1st ed. 1: Sage Publications, Inc, 2000. 224 p. ISBN: 0761918078.

PETERSON, James Lyle. **Petri Net Theory and the Modeling of Systems**. 1st ed.: Prentice Hall, 1981. 288 p. ISBN: 0136619835.

PRIETO, Josep; ARNEDO, Joan; HERRERA, Jordi. An Integrated Structure for a Virtual Networking Laboratory. **IEEE Control Systems Magazine Transactions On Industrial Electronics**, v. 55, n. 6, p. 2334-2342, Jun. 2008.

ROSARIO, João Mauricio. **Princípios de Mecatronica**. 1st ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2005. 368 p. ISBN: 8576050102.

RUSSO, Mark; SASSO, Alan. Modeling, Analysis, Simulation and Control of Laboratory Automation Systems Using Petri Nets. **Journal of the Association for Laboratory Automation**, v.13, n. 2, p. 103-115, 2005.

SAIRE, Alfredo; GÓMEZ, Henry. Plataforma De Aprendizaje A Distância En Automatización Industrial Empleando Laboratorios Remotos. **Invest Apl Innov**, v. 2, n. 2, p. 109-116, 2008.

SALIBA, Simone B. **Ambiente de Apoio Ao Processo Ensino-Aprendizagem na Internet Para Desenvolvimento de Projetos Educacionais**. Florianopolis, 104 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina., 2003.

SANTOS, Adriano A.; SILVA, António F.; GRAÇA, Vasco L. Ensino Interactivo Da Automação – Uma Experiência. **Anais do XV Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2004**, Gramado - Brasil, p. 1-6, 24 set. 2004.

SANTOS, Adriano A.; SILVA, António F.; GRAÇA, Vasco L. Ensino Interactivo Da Automação – Uma Experiência. **Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto**, p. 1-6.

SAYGIN, Can; KAHRAMAN, Firat. A Web-Based Programmable Logic Controller Laboratory For Manufacturing Engineering Education. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 1, n. 7, p. 590-598, 1 Oct. 2004.

SEITZINGER, Joyce. Be Constructive: Blogs, Podcasts and Wikis as Constructivist Learning Tools. **Learning Solutions e-Magazine: Practical Applications of Technology for Learning**, p. 1-14, Jul. 2006.

SELESKI, Fernando; OLIVEIRA-DE-ARAUJO, Lindolpho. Projeto de Sistemas de Controle Programável de Sistemas Produtivos Distribuídos. **Synergismus scyentifica UTFPR**, Pato Branco, v. 1, p. 729-735, Jan. 2006.

SICILIANO, Bruno et al. **Robotics Modelling, Planning and Control**. 2nd ed. London: Springer-Verlag, 2009. 632 p. ISBN: 3551356904.

STERLING, James. Laboratory Automation Education. **Journal of the Association for Laboratory Automation**, v. 9, n. 5, p. 1-5, Oct. 2004.

TAHA, T.A. Design and Integration of low-cost technologies and software to create interactive learning and support environments which augment traditional learning. **Fifth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies. ICALT 2005.**, p. 302-304, 5 Jul. 2005.

TREADWELL, M; HERRMANN, J. A kanban module for simulating pull production in Arena. **Proceedings of the Winter Simulation Conference**, Orlando - USA, p. 1-5, Dec. 2005.

TZAFESTAS, Costas S.; PALAIOLOGOU, Nektaria; ALIFRAGIS, Manthos. Virtual and Remote Robotic Laboratory: Comparative Experimental Evaluation. **IEEE Transactions On Education**, v. 49, n. 3, p. 360-369, Aug. 2006.

VALLETE, Robert. **Les Réseaux de Petri**. Toulouse, 2002.

VAN BRUSSEL, Hendrik et al. Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: PROSA. **Computers In Industry, special issue on intelligent manufacturing systems**., Elsevier Science Publishers B. V., v.37, n.3, p. 255-276, Dec. 1998.

YU, Xudong; WEINBERG, J.B. Robotics in education: new platforms and environments. **IEEE Robotics & Automation Magazine**, v. 10, n. 3, p. 3, Sep. 2003.

ANEXO A – Especificação GRAFCET Tecnológico dos Sub-Processos Propostos nas Estações

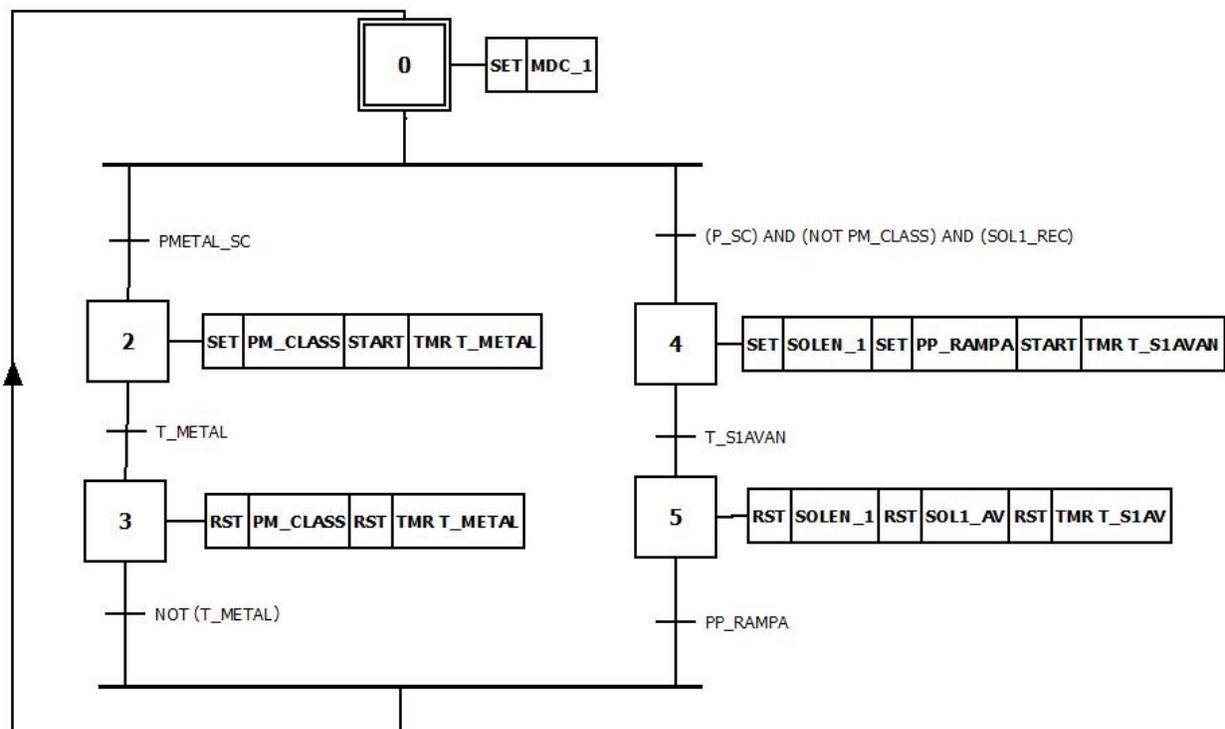


Figura 55. Especificação GRAFCET Tecnológico do Sub-Processo Classificação

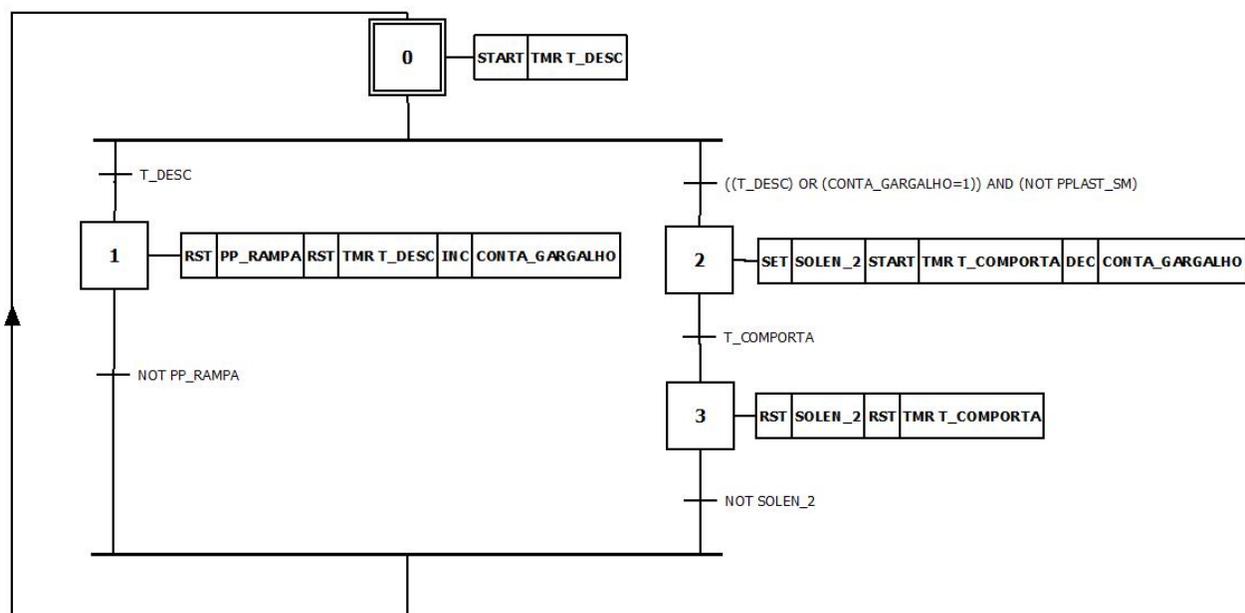


Figura 56. Especificação GRAFCET Tecnológico do Sub-Processo Montagem

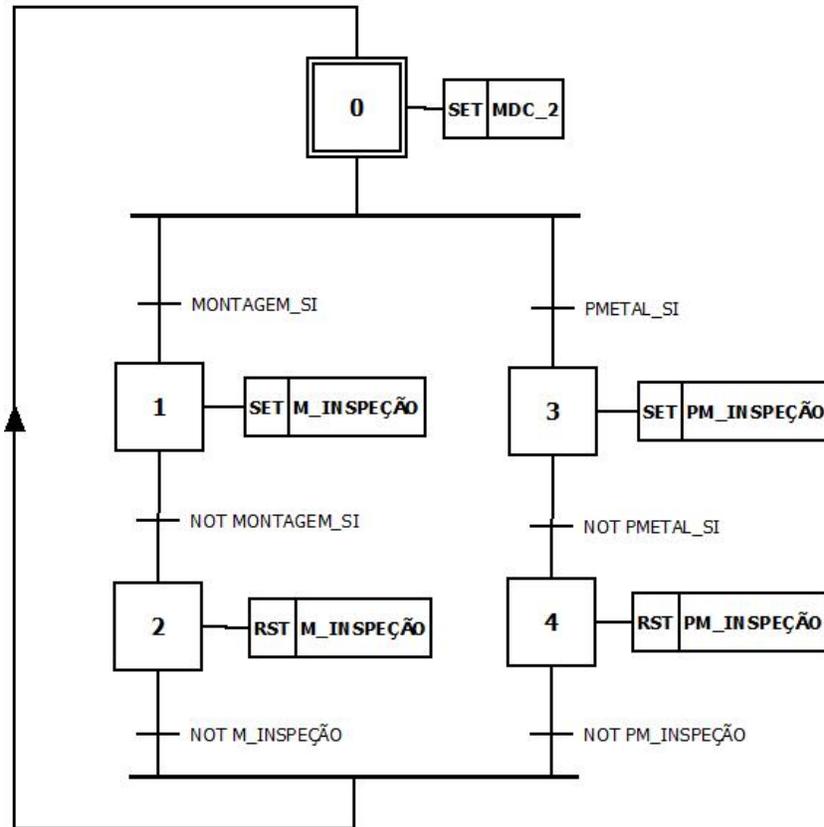


Figura 57. Especificação GRAFCET Tecnológico do Sub-Processo Inspeção

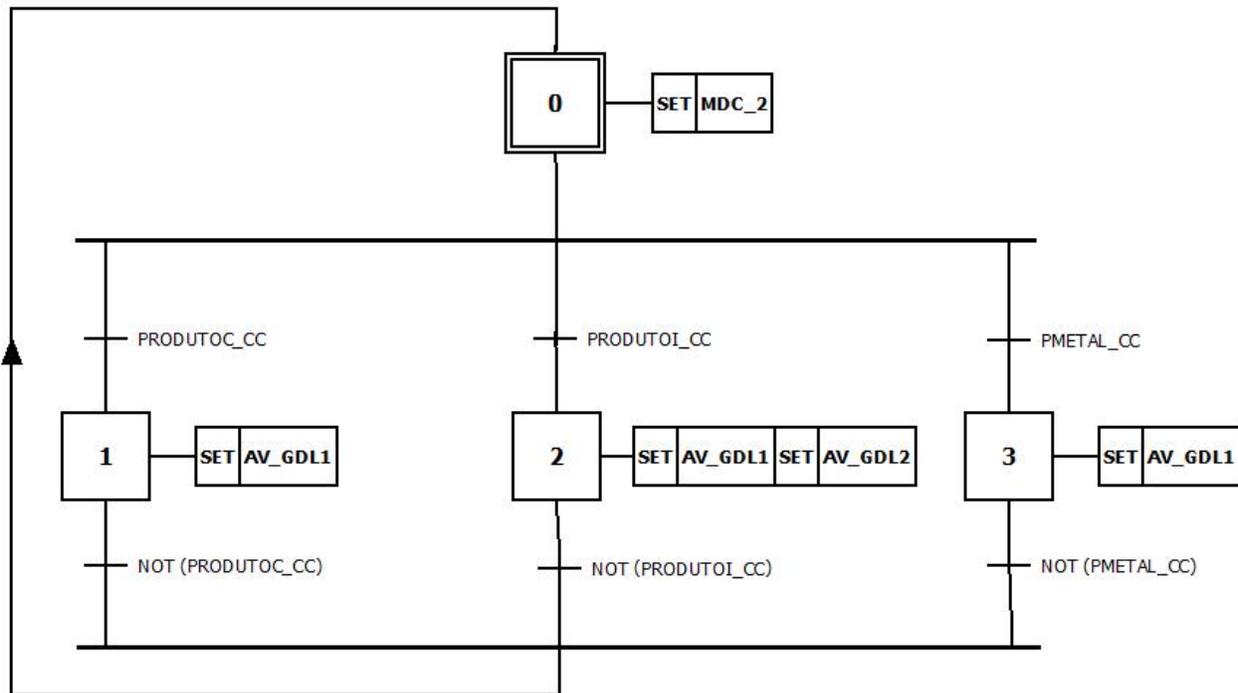


Figura 58. Especificação GRAFCET Tecnológico do Sub-Processo Controle de Qualidade

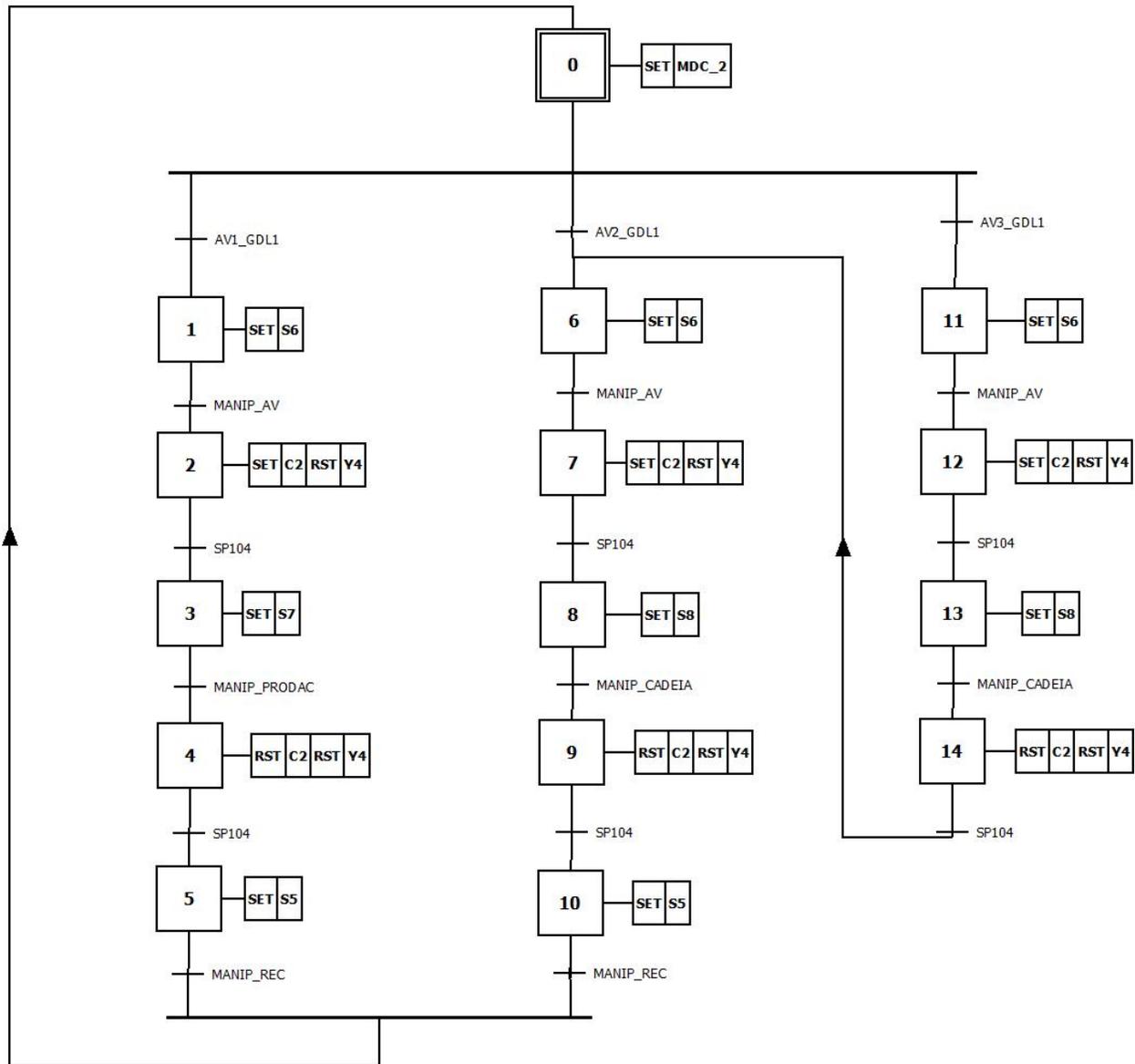
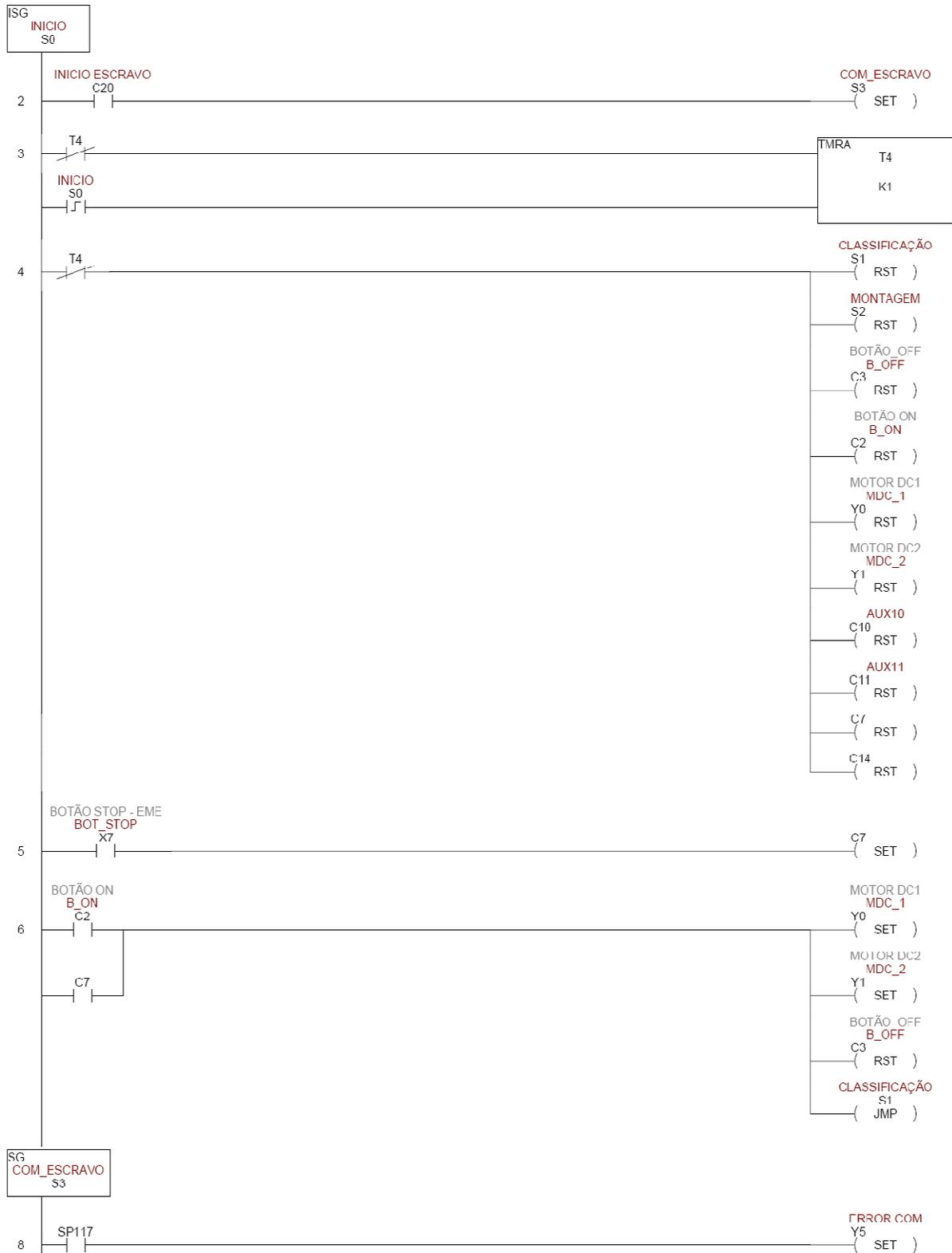
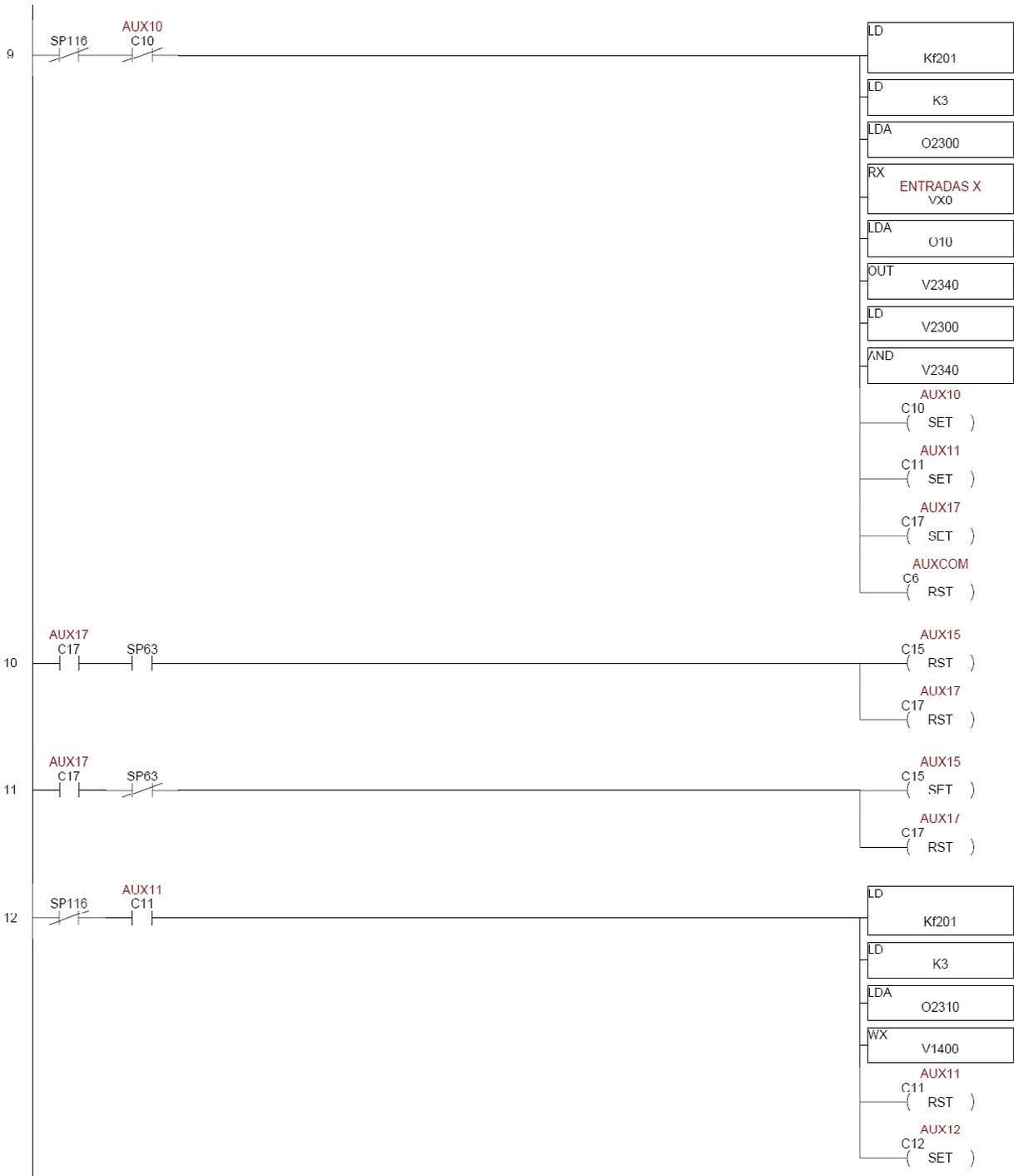
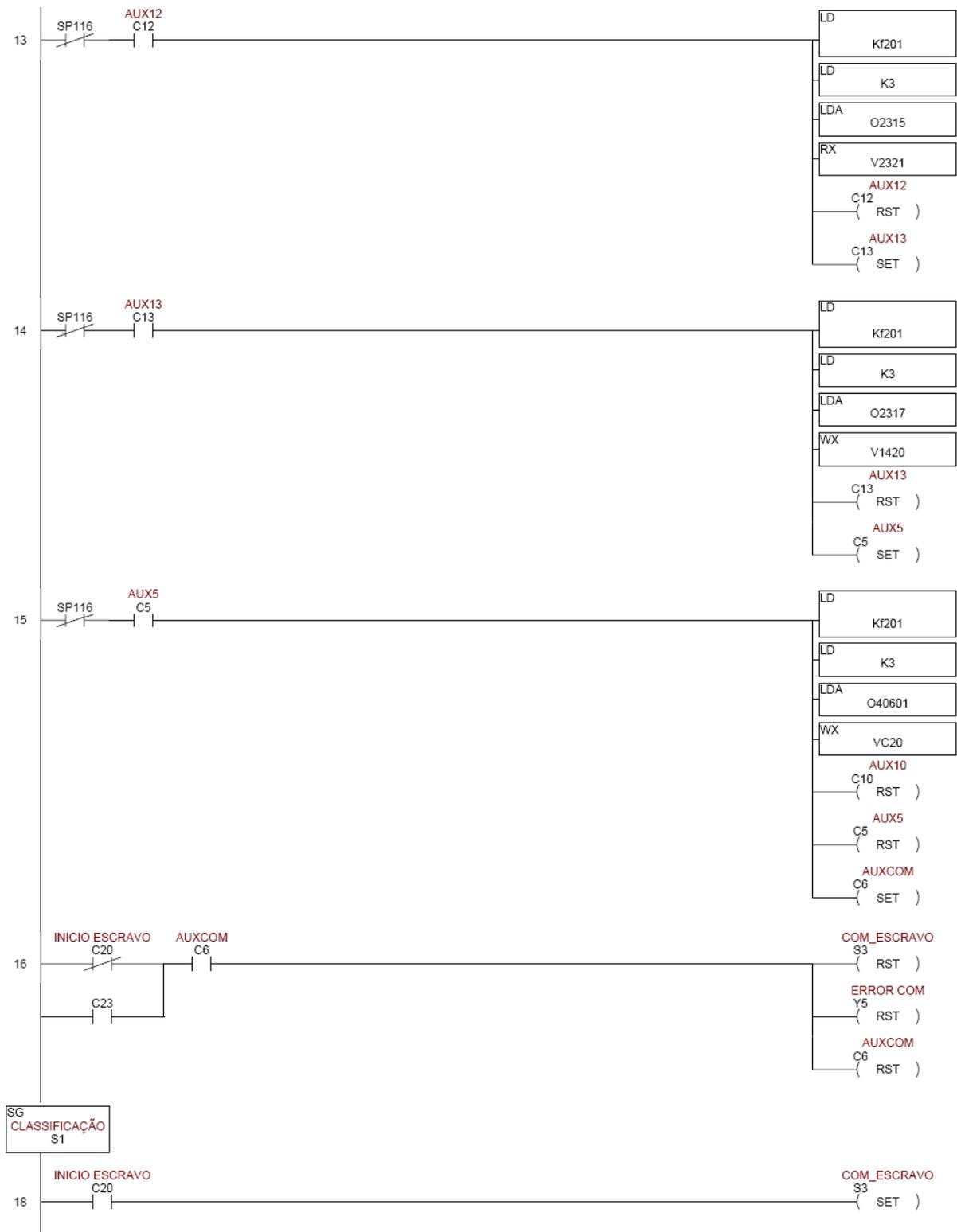


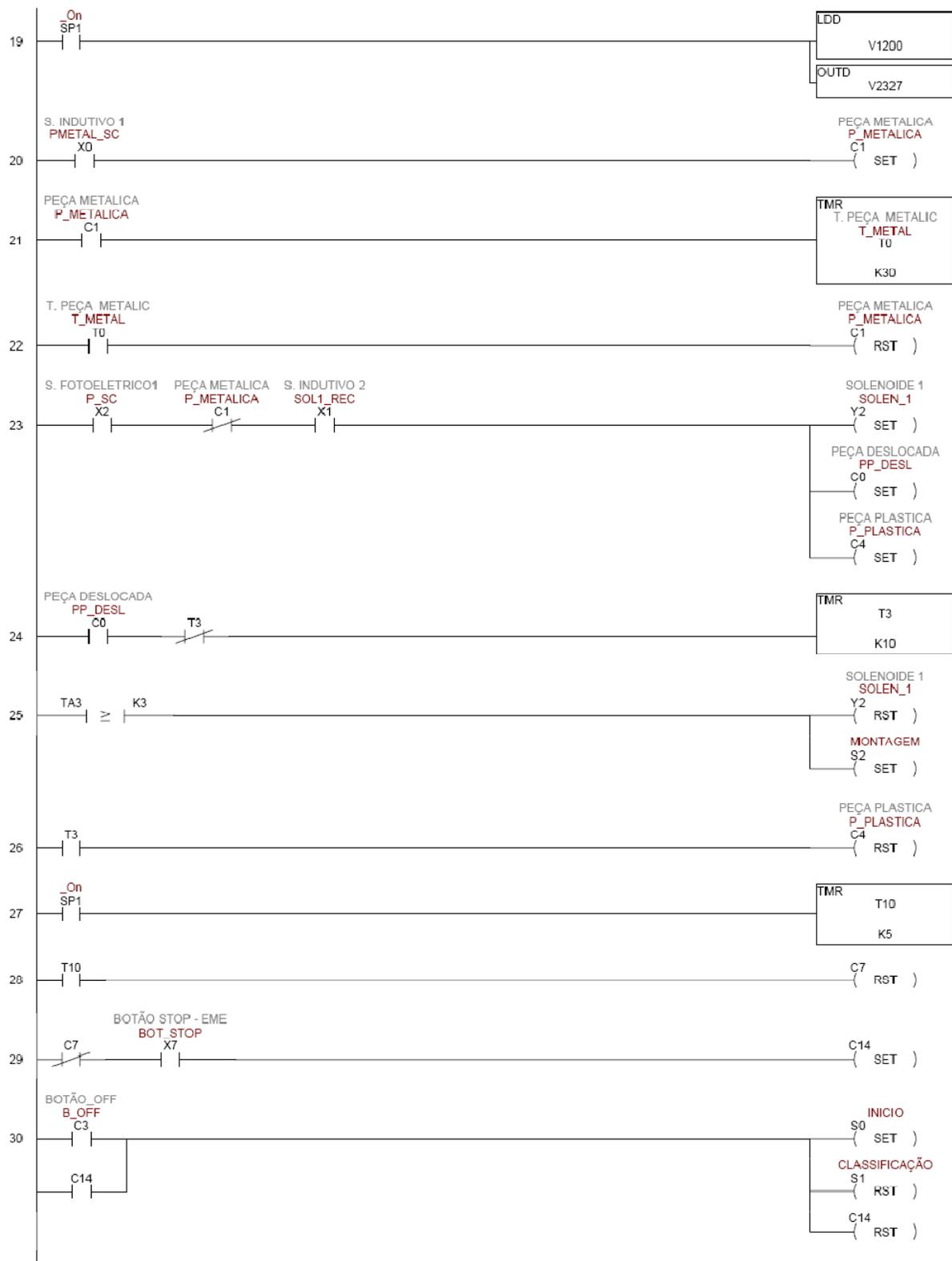
Figura 59. Especificação GRAFCET Tecnológico do Sub-Processo Movimentação

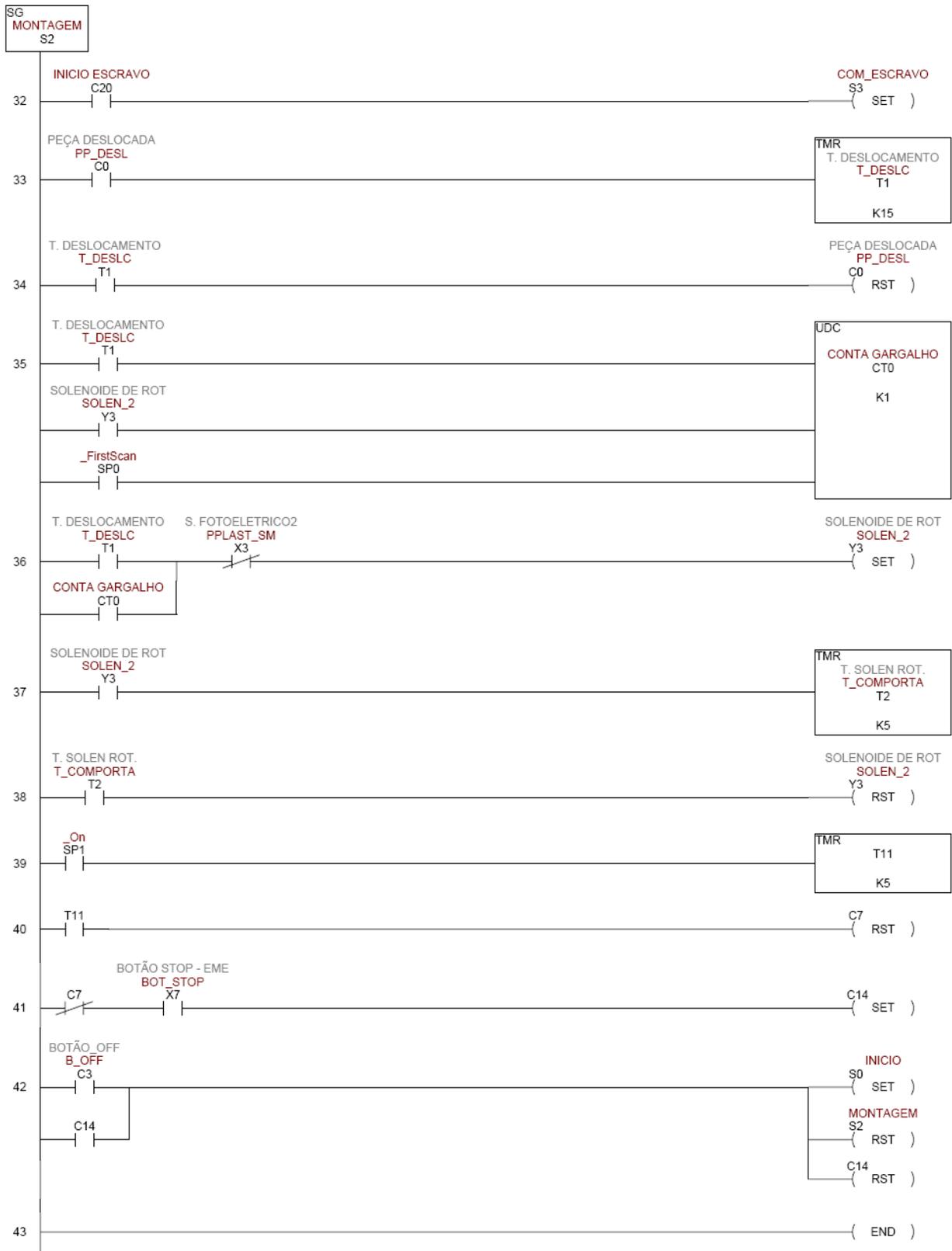
ANEXO B – Programa Implementado no CLP da Célula de Manufatura





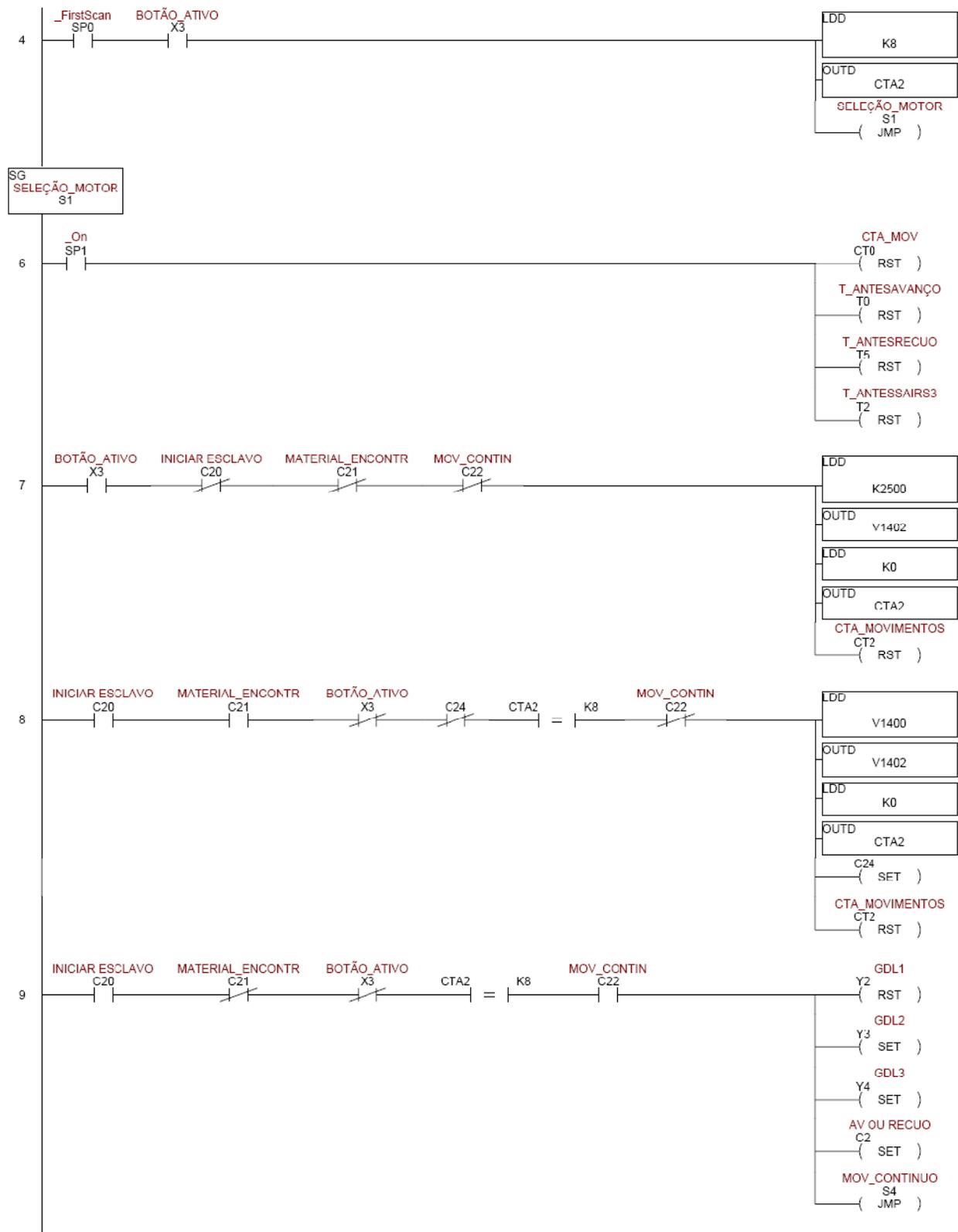


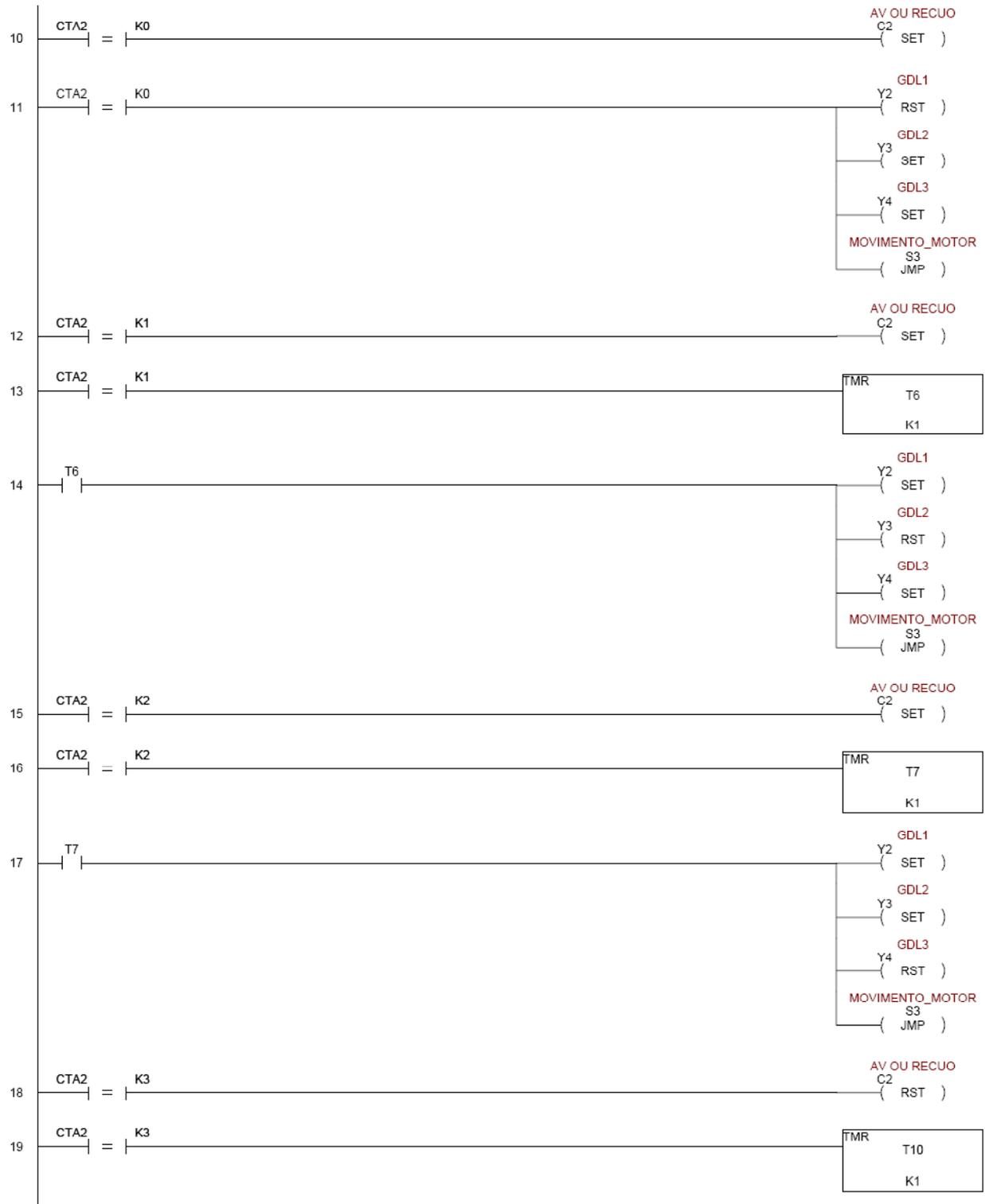


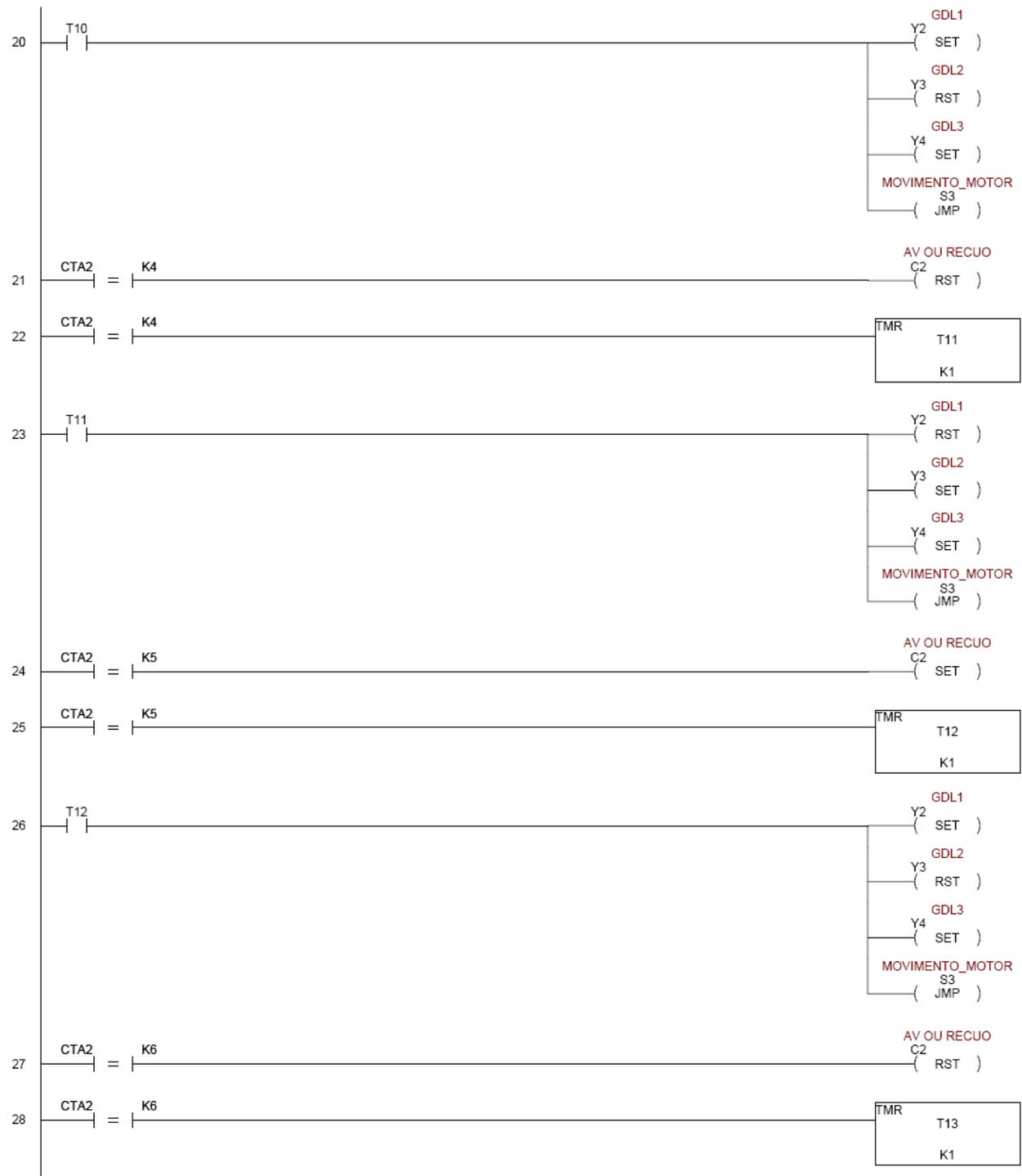


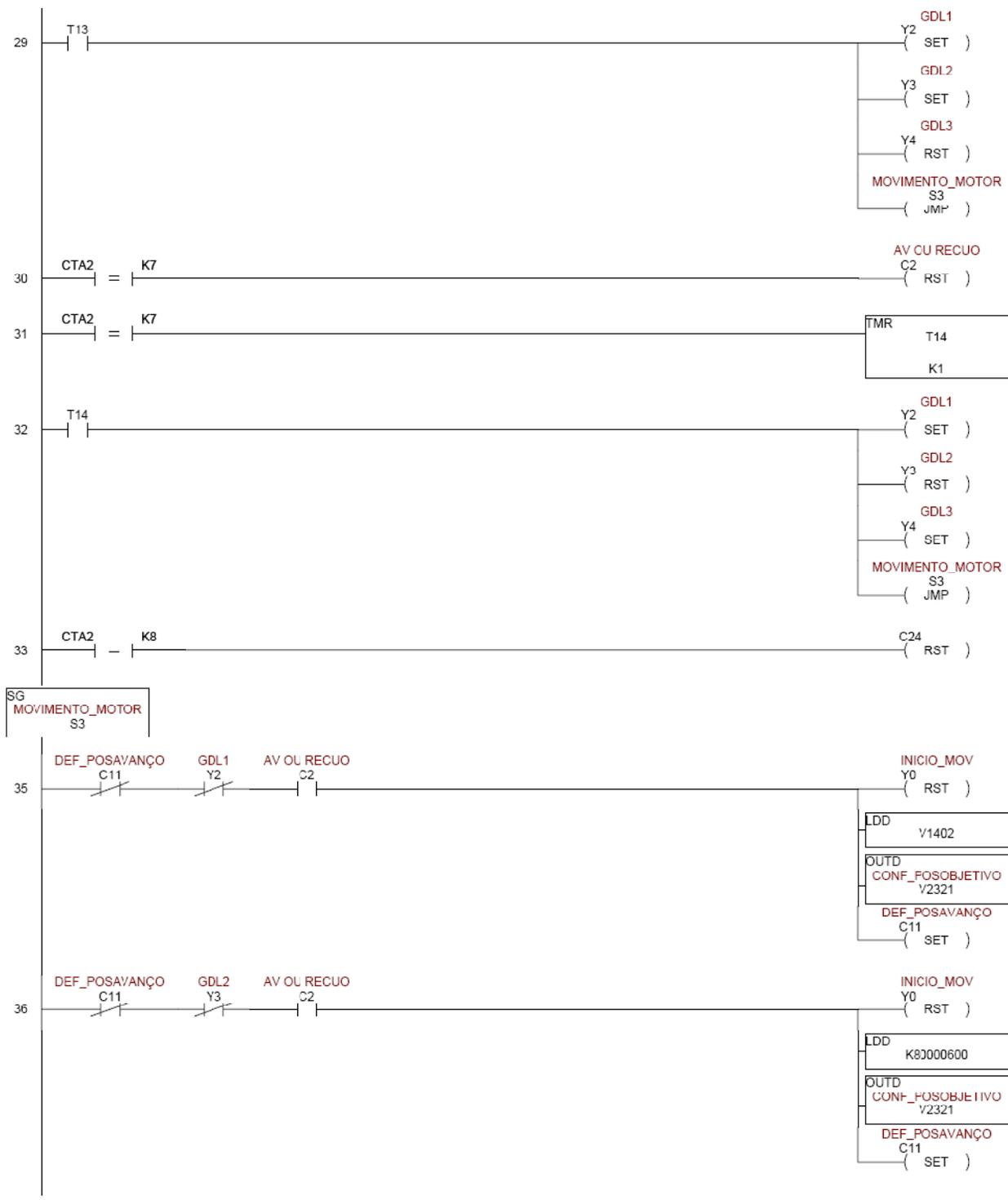
ANEXO C – Programa Implementado no CLP do Manipulador

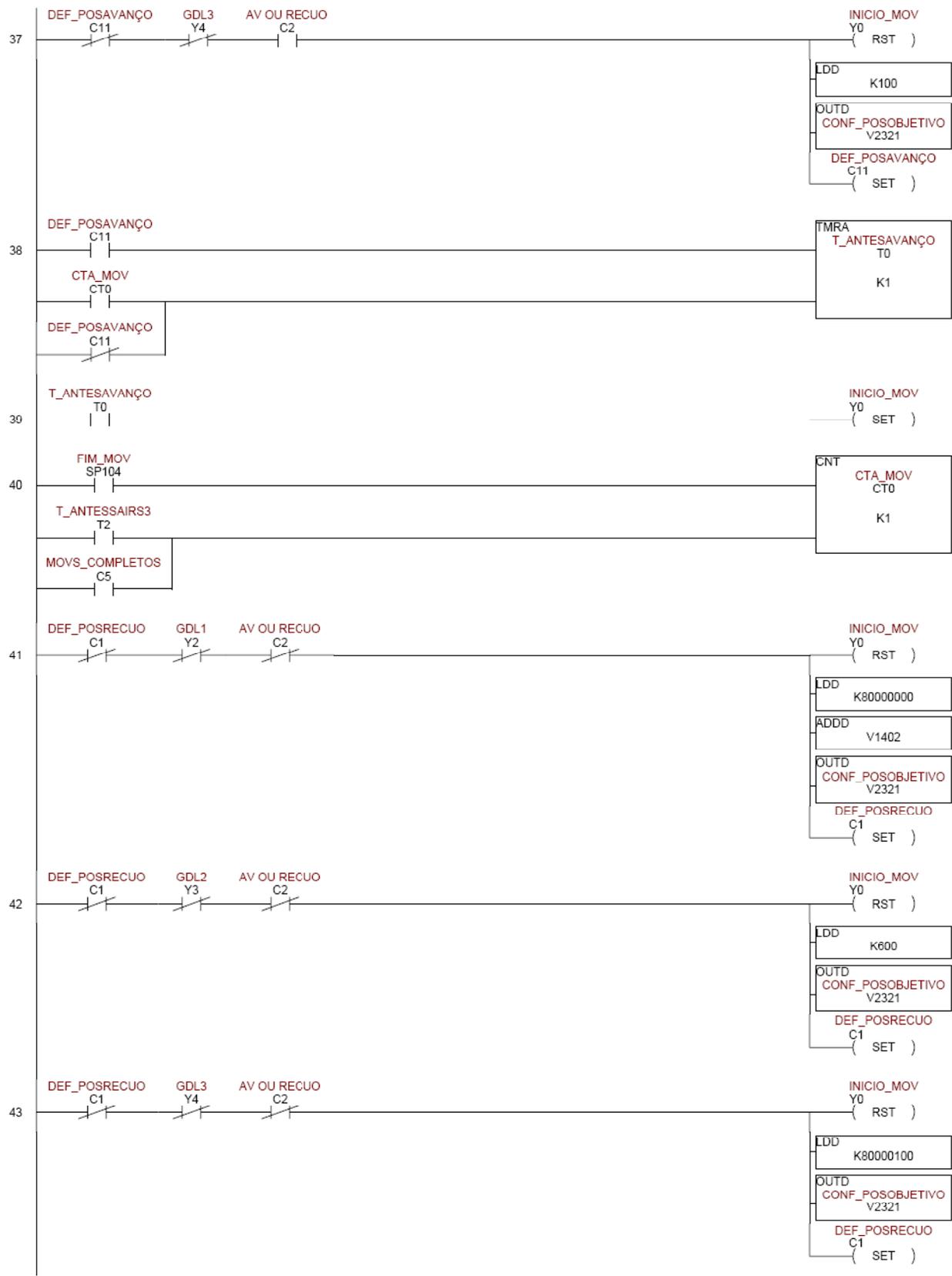


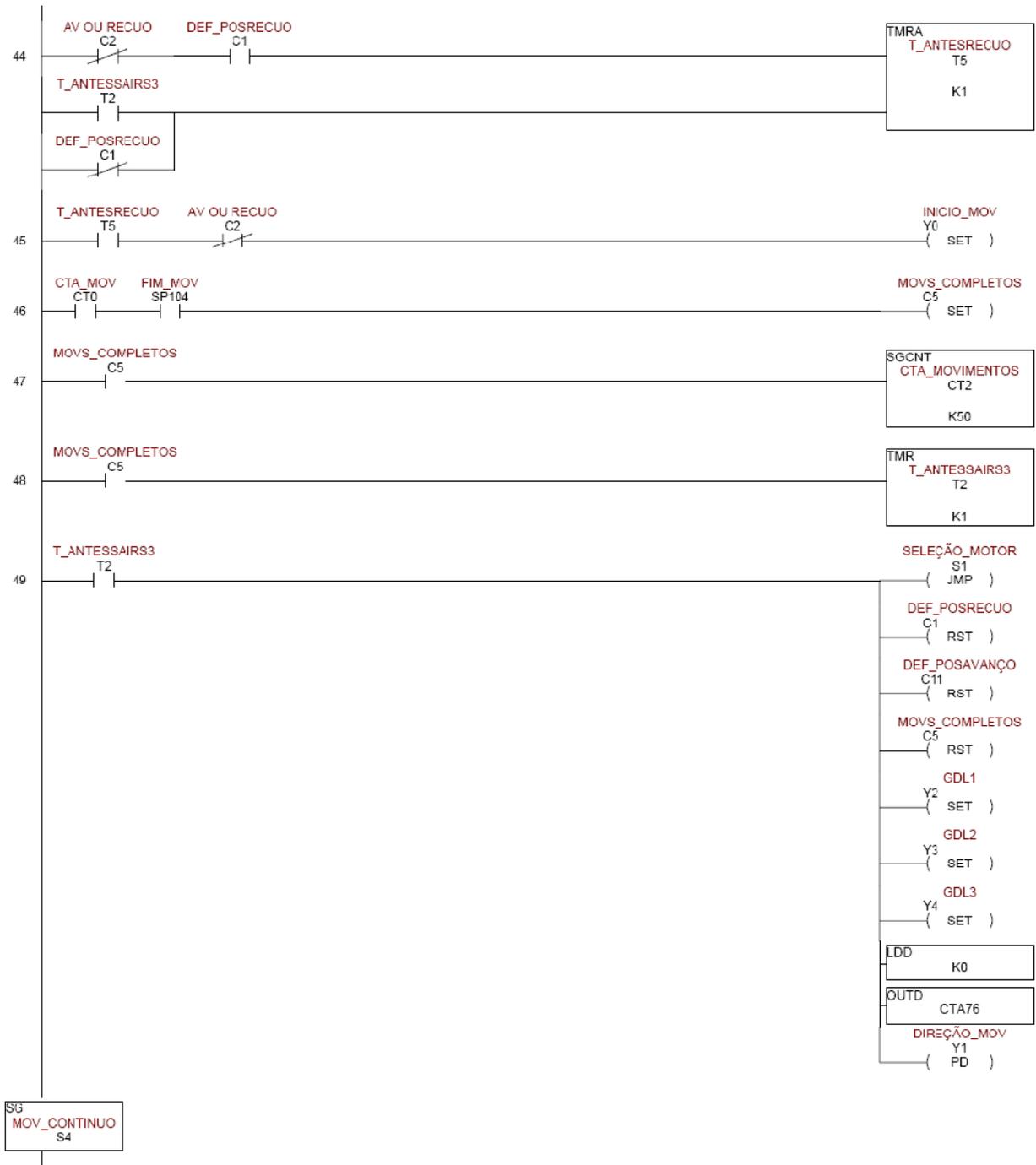


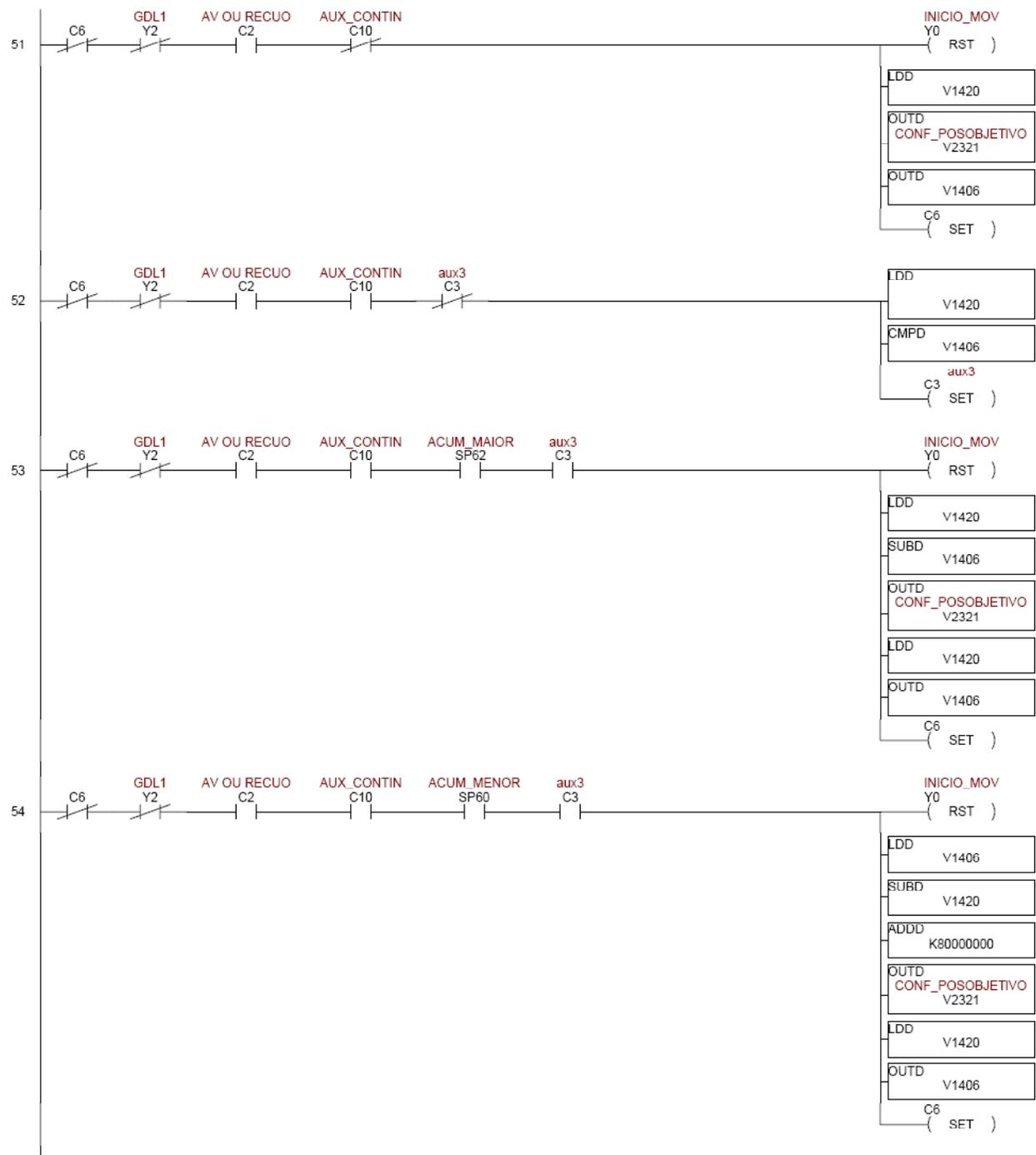














ANEXO D – Diagrama Lógico do Circuito Multiplexador

