

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL  
TESE DEFENDIDA POR José Jaéti Rosário  
E APROVADA PE

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
COMISSÃO JULGADORA EM 23/11/02

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
Helder Aníbal Hermini  
ORIENTADOR

COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Proposta de Implementação de um Sistema  
Automatizado para Inspeção de Motores de  
Foguete utilizando Tomografia  
Computadorizada**

200306804

Autor: José Jaéti Rosário  
Orientador: Helder Aníbal Hermini

10/02

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

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

**Proposta de Implementação de um Sistema  
Automatizado para Inspeção de Motores de  
Foguete utilizando Tomografia  
Computadorizada**

**Autor: José Jaétis Rosário**

**Orientador: Helder Aníbal Hermini**

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Dissertação de Mestrado apresentada à comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2002  
S.P. – Brasil

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

R712p

Rosário, José Jaétis

Proposta de implementação de um sistema automatizado para inspeção de motores de foguete utilizando tomografia computadorizada / José Jaétis Rosário.--Campinas, SP: [s.n.], 2002.

Orientador: Helder Aníbal Hermi.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Tomografia computadorizada. 2. Processos de fabricação - Automação. 3. Motores de foguetes. 4. Máquinas de ensaio de fadiga. I. Hermi, Helder Aníbal. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

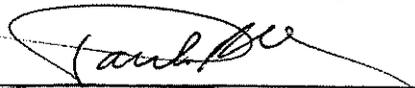
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

# Proposta de Implementação de um Sistema Automatizado para Inspeção de Motores de Foguete utilizando Tomografia Computadorizada

Autor: José Jaétis Rosário  
Orientador: Helder Aníbal Hermini

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Helder Aníbal Hermini, Presidente  
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP-FEM

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Paulo Roberto Gardel Kurka  
Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. João Carlos Mendes Carvalho  
Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Campinas, 23 de outubro de 2002.

## **Dedicatória:**

Em memória de José Arouca Rosário, meu pai e grande amigo, e para minha mãe Victória, que sempre foram exemplos de dedicação e amor.

A Marislei, minha querida esposa e em especial para Pedro Henrique e Victor Alexandre, minhas fontes de inspiração e a quem gostaria de transmitir a mensagem de que nunca desistam de um sonho.

## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar agradeço ao **SENHOR**, por colocar em meu caminho, pessoas amigas e que estavam dispostas a ajudar, seja com palavras de incentivo, seja com conhecimento técnico.

A todos aqueles que direta ou indiretamente, contribuíram na elaboração deste trabalho, aos mestres e aos técnicos dos laboratórios.

Ao meu orientador **Dr. Helder Anibal Hermini**, que sempre se manteve à disposição para atendimento das necessidades deste trabalho.

Meus agradecimentos em especial a duas pessoas com quem muito aprendi e que são fonte de inspiração pelo seu altruísmo, dedicação extrema a tudo o que fazem e sobretudo pela amizade com que me apoiaram desde o início dessa jornada: ao amigo **Dr. Silvio Fazolli**, pela sua paciência, grande domínio técnico e pelas horas dedicadas a este trabalho e a meu irmão e principal incentivador, **Dr. João Maurício Rosário**, um homem que apesar de todo o seu conhecimento, tem como principais ingredientes de sua personalidade a simplicidade e humildade dos grandes Homens.

Este trabalho, sem a participação deste time, certamente não teria o mesmo brilho e por isso..... **MUITO OBRIGADO.**

## **EPÍGRAFE**

“ Se queremos progredir, não devemos repetir a história, mas fazer uma história nova.”

*Mahatama Ghandi*

## **PENSAMENTO**

“ O importante não é o numero de derrotas que uma pessoa sofre, mas se, no meio da queda, ela desistiu ou não.” *César Romão*

## Resumo

ROSARIO, JOSÉ JAÉTIS, *Proposta de Implementação de um sistema automatizado para inspeção de motores de foguetes utilizando tomografia computadorizada*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002, 124 p. Proposta para Dissertação (Mestrado).

Este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um projeto funcional e a implantação através de uma plataforma em escala reduzida de um Sistema Automatizado para Inspeção de Motores de Foguetes utilizando Tomografia Computadorizada. A plataforma foi implementada com uma arquitetura de supervisão e controle num sistema didático e além de ter as mesmas características funcionais do sistema real, contém todos os elementos que possibilitem uma visão completa do sistema em estudo. Para que tal objetivo seja atingido, neste trabalho são apresentados de forma didática e estruturada, as ferramentas e elementos de automação utilizados, sendo ainda apresentado um exemplo de aplicação, utilizando-se a integração desses elementos. Esta metodologia está validada no Laboratório Integrado de Automação e Robótica, da UNICAMP, através da implementação de uma plataforma didática com diferentes elementos automatizados: Maquete em escala do Sistema de Inspeção, PLC's, atuadores e sensores. Nesta plataforma diferentes modelos de aprendizado e validação são efetuados, e a mesma representa com boa margem de precisão os movimentos simulados de deslocamento do tomógrafo que deverão ser feitos na situação real para inspeção do corpo do foguete.

### *Palavras Chave*

Inspeção tomográfica, Análise Tomográfica, tomografia computadorizada, automação industrial, motor foguete, ensaios não destrutivos

## Abstract

ROSARIO, JOSÉ JAÉTIS, *Proposal of Implementation of a automated system using computerized tomography for inspection of rocket engine*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002, 124 p. Dissertação (Mestrado)

This work has as main objective the development of a functional project and the implantation through a platform in reduced scale of an Automated System for Inspection of Rocket Engine using Computerized Tomography. The implemented platform has the same functional characteristics of the real system, it was implemented with a supervision architecture and control in a didactic system and it contains all the elements that make easy a complete vision of the system in analyses. In order to be reached such objective, in this work is presented in didactic and structured way, the tools and used automation elements, and an application example is presented using the integration of those elements. This methodology is validated in the Integrated Laboratory of Automation and Robotics, of UNICAMP, through the implementation of a didactic platform with different automated elements: Model in a reduced scale of the Inspection System, PLC's, actuators and sensors. Different learning models and validation are made in this platform, and it represents with good precision the movements that should be done in the real situation for inspection of the rocket engine.

### *Key Words*

Tomographic Inspection, Tomographic Analyses, computerized tomography, industrial automation, rocket engine, non-destructive rehearsals

# Índice

Dedicatória.....	iv
Agradecimentos .....	v
Epígrafe .....	vi
Pensamento .....	vi
Resumo .....	vii
Abstract.....	viii
1- Introdução.....	1
2- Revisão de literatura.....	6
2.1. Introdução.....	6
2.2. Pesquisa Aeroespacial .....	6
2.2.1 Motor Foguete.....	7
2.2.2 Processo de fabricação do Propelente Sólido .....	9
2.2.3 Diagnostico do estado da arte da barra propelente .....	11
2.2.4 Combustão do Propelente Sólido.....	13
2.2.5. Importância do processo de queima do combustível para o sucesso da missão .....	15
2.3. Tomografia Computadorizada e suas principais aplicações.....	15
2.4. Automação industrial e sua história .....	16
2.5. Programação de sistemas automatizados integrados.....	18
2.6. Comentários sôbre o capítulo 2.....	20
3- Métodos de Inspeção e Diagnóstico por Emissão de Radiação.....	21
3.1 Introdução.....	21
3.2- Sistema de Tomografia Computadorizado integrado e automatizado .....	25
3.3- A Tomografia Computadorizada no Brasil .....	27
3.4- Comentários sobre o capítulo 3 .....	29
4- Modelagem de Sistemas Automatizados.....	30
4.1- Introdução.....	30
4.2 A Automação no Brasil .....	33
4.3 Proposta de um Sistema Automatizado de Medição de falhas de foguetes a partir de imagens tomográficas.....	34

4.4 Elementos de um Sistema Automatizado .....	35
4.5 - Linguagens utilizadas para Modelagem de Sistemas Automatizados .....	38
4.6 – Norma Internacional IEC 61131-3 .....	39
4.7 - Programação Estruturada em CLP's utilizando o GRAFCET .....	44
4.8 - Grafo de Comando Etapa e Transição - GRAFCET.....	46
4.8.1 - O GRAFCET na concepção de Sistemas Automatizados.....	47
4.8.2 - Elementos do GRAFCET .....	48
4.8.2.1 - Etapas.....	49
4.8.2.2 – Tipos de ações associadas às Etapas .....	51
4.8.2.3 – Transições e Receptividades.....	51
4.8.2.4 – Principais Funções associadas às Receptividades.....	53
4.8.2.5 - Ligações Orientadas.....	53
4.8.2.6 – Salto de Etapas .....	56
4.8.2.7 – Retomada de Etapas .....	57
4.8.3 - Regras de Evolução.....	58
4.9 - Controlador Lógico Programável – CLP .....	61
4.10 – Utilização de Sistemas Supervisórios em Automação .....	66
4.10.1 – Utilização de Sistemas SCADA em Automação .....	68
4.10.2 – Principais Características de um Sistema Supervisório.....	69
4.10.3 – Arquitetura de Comunicação .....	70
4.11 – Redes de Comunicação.....	73
4.12 Comentários sobre o capítulo 4.....	74
5- Realização Experimental .....	75
5.1 Sistema de Inspeção Tomográfica proposto.....	75
5.2 Descrição Operativa do Sistema Automatizado de Inspeção Proposto.....	78
5.3 Maquete Operativa Correspondente a um Sistema Automatizado de Inspeção .....	79
5.3.1 Descrição da Estrutura Funcional .....	79
5.3.2 Descrição do processo de funcionamento da inspeção tomográfica: Modo automático	81
5.3.3 Descrição do processo de funcionamento da inspeção tomográfica: Modo manual ....	82
5.4 Implementação de um Sistema Automatizado de Inspeção de Falhas.....	84
5.4.1 Descrição Funcional .....	84

5.4.2 Descrição Operativa .....	85
5.5 Protótipo Experimental de um Sistema Automatizado de Inspeção .....	89
5.5.1 Implementação do Protótipo Experimental .....	89
5.5.2 Implementação de Programa Computacional para Validação e Testes .....	90
5.6 Validação e testes do Protótipo Experimental .....	91
5.6.1 Descrição de Entradas/saídas.....	91
5.6.2 Descrição Funcional .....	92
5.7 Comentários sobre análise de Confiabilidade dos Sensores.....	95
5.8 Comentários sobre o capítulo 5.....	96
6- Conclusões e Perspectivas Futuras .....	97
Referências Bibliográficas.....	100
Anexo I : Programação da Simulação de um Sistema Automatizado de Inspeção .....	104
I. Modo Automático:.....	104
II. Modo Manual: .....	109
Anexo II: Descrição Funcional dos Programas de Acionamento e Controle Implementados ....	111
Anexo III: Listagem dos Programas 3 e 4 de Acionamento e Controle Implementados .....	117
III.1- Programa 3 – Modo Automático de Inspeção do Motor Foguete .....	117
III.2- Programa 4– Modo Automático de Inspeção do Motor Foguete .....	121

## Índice de Figuras

Figura 2.1: Esquema de um motor foguete.....	8
Figura 2.2: Modelo de sistema de inspeção por tomografia, disponível comercialmente .....	14
Figura 3.1: A tomografia captando imagens da seção transversal do corpo .....	23
Figura 3.2: Representação de uma Radiografia .....	23
Figura 3.4: Exame tomográfico da cabeça .....	26
Figura 3.5: Imagem óssea reconstruída tridimensionalmente .....	26
Figura 3.7: Tomógrafo da Lockheed, de 1984.....	28
Figura 4.1: Elementos básicos de um sistema automatizado.....	33
Figura 4.2 – Sistema Automatizado (SA) – Parte Operativa e Comando.....	36
Figura 4.3 – Classificação de Sistemas Automatizados.....	38
Figura 4.4 – Programação utilizando Lista de Instruções (IL).....	40
Figura 4.5 – Telas típicas de Diagramas Ladder (LD).....	42
Figura 4.6 – Diagramas de Blocos de Funções (FDB).....	42
Figura 4.7 – Exemplos de telas de programação utilizando SFC.....	43
Figura 4.8: Implementação de uma transição utilizando Ladder.....	45
Figura 4.9: Esquema ilustrativo de um GRAFCET.....	49
Figura 4.10: Etapas e Ações de um GRAFCET.....	50
Figura 4.11: Ação Condicional num GRAFCET.....	50
Figura 4.12: Transição e Receptividade de um GRAFCET.....	52
Figura 4.13: Exemplo de Temporização num GRAFCET.....	52
Figura 4.14: Ligações Orientadas Seqüenciais.....	54
Figura 4.15: Ligação Orientada AND Divergente.....	54
Figura 4.16: Ligação orientada AND Convergente.....	55
Figura 4.17: Ligação Orientada OR Divergente.....	55
Figura 4.18: Ligação Orientada OR Convergente.....	56
Figura 4.19: Representação de um Salto de Etapas.....	57
Figura 4.20: Retomada de Etapas.....	58
Figura 4.21: Regras de Evolução.....	60
Figura 4.22: Regras de Evolução de um GRAFCET.....	60

Figura 4.23 - Aplicação Genérica do Controlador Lógico Programável (Georgini, 2000).....	61
Figura 4.24 – Funcionamento de um CLP.....	62
Figura 4.25 – Exemplo de um CLP industrial Koyo™.....	63
Figura 4.26 – Programa em Ladder (DirectSoft).....	66
Figura 4.27: Transferência de Informações através de Rede de Comunicações .....	73
Figura 5.1 – Proposta de Laboratório de Inspeção e Sistema de Análise.....	76
Figura 5.2 – Esquema de um Sistema de Inspeção Tomográfica.....	78
Figura 5.3 - Diagrama do Ensaio de Inspeção Tomográfica.....	80
Figura 5.4 - Esquema representativo do sistema funcional da bancada experimental proposta....	85
Figura 5.5 – Sistema de Inspeção: Elementos da Parte Operativa.....	86
Figura 5.6 – Corpo do Foguete - Rotação em torno do eixo X.....	87
Figura 5.7 – Elementos da Parte Operativa.....	87
Figura 5.8 - Estrutura de acionamento e controle da bancada experimental.....	88
Figura 5.9 – Parte Comando - Interface de Acionamento e Controle (uma junta).....	89
Figura 5.10 – Parte Operativa – Protótipo Implementado.....	90
Figura 5.11 – Programa Computacional implementado.....	91
Figura 5.12 – Tela típica de programação do sistema de acionamento.....	94
Figura A I-1 – Tela de Apresentação – Modo Automático de Inspeção.....	105
Figura A I- 2 – Tela apresentando a Movimentação Angular.....	106
Figura A I-3 – Tela apresentando o Incremento Longitudinal.....	107
Figura A I-4 – Procedimento Final de Inspeção Automatizada.....	108
Figura A I- 5 – Tela de Visualização – Modo Manual.....	109
Figura A I-6 – Tela de Visualização – Sequências de Operações - Modo Manual.....	110
Figura A II 1(a) – Programa 1 implementado - Inspeção na direção X.....	112
Figura A II 1(b) – Programa 1 implementado - Inspeção na direção X.....	113
Figura A II 2 (a) – Programa 2 implementado - Inspeção completa.....	114
Figura A II 2 (b) – Programa 2 implementado - Inspeção completa.....	115
Figura A II 2 (c) – Programa 2 implementado - Inspeção completa.....	116
Figura A III 1: GRAFCET do programa modo 3 .....	120
Figura A III 2: GRAFCET do programa modo 4 .....	124

## **Índice de Tabelas**

Tabela 4.1 – Norma IEC 61131.....	40
Tabela 5.1 – Descrição das Entradas e Saídas.....	92

## **Nomenclatura**

### **LETRAS GREGAS**

$\lambda$  - comprimento de onda

## **Abreviaturas**

**CAD** – *Computer Aided Design* Projeto assistido por computador

**CAM** – *Computer And Manufacturing* Manufatura assistida por computador

**CCD**- *Charge Coupled Device*

**CLP** – Controlador Lógico Programável

**CNC**- Comando Numérico Computadorizado

**CPU** – *Central Processing Unit*

**FMS** – *Flexible Manufacturing System*

**GRAFCET** – Grafo de Comando Etapa – Transição

**I / O** – *Input / Output*

**NDT** – *Non Destructive Testing*

**PC** – Parte Comando

**PO** – Parte Operativa

**R-X** – Raios X

**SA** – Sistema Automatizado

**SAITC** – Sistema Automatizado de Inspeção de Motor Foguete por Tomografia Computadorizada

**SCADA** – *Supervisory Control and Data Aquisition*

**SED** – Sistemas a Eventos Discretos

**SFC** – *Sequential Function Charts*

**TC** – Tomografia Computadorizada

## **Siglas**

**ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas**

**ADEPA- Agencie Nationale pour la Development de la Production Automatise**

**AF CET – Association Française pour la Cybernétique, Economique, Technique**

**CLA – Campo de Lançamento de Alcântara**

**CLBI – Campo de Lançamento de Barreira de Inferno**

**END – Laboratório de Ensaios não Destrutivos (IAE)**

**FEM – Faculdade de Engenharia Mecânica**

**IAE – Instituto de Atividades Espaciais**

**IEC – International Electrotechnical Committe**

**INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**

**LAR – Laboratório de Automação Integrada e Robótica (FEM / UNICAMP)**

**SAP – Sistema Automatizado de Produção**

**UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas**

**WAN – Wide Área Networking**

# Capítulo 1

## 1- Introdução

A tecnologia tem sido cada vez mais o fator determinante para a competitividade industrial, e a integração com sistemas automatizados é um fator agregador de benefícios àqueles que dispõem de vantagens técnicas.

Dentro deste contexto, temos também a pesquisa no setor aeroespacial, cujos principais objetivos são o de trazer benefícios não só aos fins militares mas às mais diversas áreas do conhecimento humano (algumas aplicações têm impacto direto nas rotinas diárias, como exemplo podemos citar as pesquisas cósmicas, comunicações e meteorologia, enquanto outras, residem, no presente, na crença do ser humano de uma vida melhor no futuro). O desenvolvimento de tecnologia dinâmica de foguetes está em pleno crescimento no mundo moderno e este alto investimento feito por países de primeiro mundo, vai muito além da crença de um mundo melhor, mas também pelo fato de que há uma divisão natural entre o lado daqueles que detêm o domínio da tecnologia, usufruem e ganham dinheiro com ela; e o lado dos que para usufruir a tecnologia devem pagar pela mesma.

No Brasil, a pesquisa espacial foi iniciada há mais de 30 anos e basicamente através de dois institutos: o IAE, Instituto de Atividades Espaciais, órgão do Ministério da Aeronáutica, e INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, órgão do Ministério da Ciência e Tecnologia. O INPE desenvolve satélites, enquanto o IAE desenvolve e produz foguetes de sondagem e veículos lançadores de satélites.

Atualmente já foram lançados mais de 100 foguetes de sondagem e dois veículos lançadores de satélite. Estes lançamentos são feitos em conjunto com universidades e instituições

de pesquisa nacionais e internacionais, tanto no país através de seus campos de lançamento: Campo de Lançamento de Alcântara - CLA e Campo de Lançamento da Barreira do Inferno - CLBI, como no exterior.

Quando o lançamento é feito com instituições nacionais, permite, além da economia de divisas, a continuidade da pesquisa de forma independente; e quando é feito com instituições internacionais, permite, além do eventual recolhimento de divisas, o intercâmbio com países como Alemanha, Holanda, Noruega e os Estados Unidos.

Neste ambiente de competição internacional, onde os “clientes” do IAE podem fazer seus experimentos com foguetes fabricados em outros países, não basta ter preço atraente, é preciso ter confiabilidade. Um experimento sem êxito, devido a problemas com o foguete, implica em prejuízo considerável; uma vez que a carga útil, que é o experimento do cliente, leva tempo para estar pronta e costuma ser exemplar único (observa-se que muitas dessas cargas úteis são provenientes de institutos de pesquisas que necessitam de continuidade de estudos em ambientes específicos, como por exemplo ensaios em micro-gravidade).

A confiabilidade de um foguete de sondagem ou lançador de satélite se dá com o número crescente de lançamentos bem sucedidos e com certos dispositivos que garantam como ele foi desenvolvido e fabricado. O número de lançamentos com sucesso permitem afirmar que o desenvolvimento dos foguetes realizado pelo IAE foi bem sucedido. Porém a implantação de técnicas que garantam a confiabilidade do engenho fabricado necessita pesquisa e apoio considerável para suportar a evolução da pesquisa espacial.

Em países na dianteira tecnológica no setor aeroespacial, a inspeção realizada para verificar a condição interna do motor e do propelente de foguetes maiores, é feita através de tomografia computadorizada já há mais de 15 anos. O IAE não dispõe de tal técnica, utilizando-se da técnica de radiografia industrial, a qual se mostrou ineficiente e inadequada para veículos lançadores de satélites com diâmetros maiores.

A existência de vazios, trincas ou descolamentos no propelente de um motor de foguete podem levá-lo à ruptura e conseqüente destruição completa. Os vazios, dependendo de seu

tamanho, são detectados através da técnica de radiografia industrial; os descolamentos, em alguns casos poderiam ser detectados através da técnica de ultra-som. Países adiantados na área aeroespacial utilizam a técnica da tomografia computadorizada para inspecionar motores de foguete, e assim garantir a inexistência de tais defeitos.

Visando essa realidade de mercado, num programa de parceria científica-tecnológica envolvendo o CTA e UNICAMP, nessa Dissertação de Mestrado foi realizado um estudo referente ao estado da arte na Análise de Inspeção de Falhas Estruturais em Motores de Foguete utilizando Tomográfica Computadorizada com ênfase na Automatização do processo, resultando na implementação no Laboratório de Automação Integrada e Robótica da UNICAMP de uma Maquete Funcional correspondente a um sistema automatizado para inspeção de motores de foguete utilizando tomografia computadorizada.

O sistema implementado é constituído de uma Parte Operativa com movimentos semelhantes aos correspondentes do sistema real de inspeção para análise de falhas em motores de foguete. Na maquete a movimentação é constituída de motores de passo e sensores de posicionamento. A integração dos diferentes elementos contempla todo o sistema automatizado de inspeção. Neste projeto de pesquisa são fornecidas ferramentas para descrição e implementação desses diferentes elementos, permitindo assim, a sua implementação futura num sistema em escala real.

Neste contexto, surge de maneira espontânea a necessidade de se estabelecer um projeto de pesquisa que contemplasse:

**a) O desenvolvimento da parte de automação.**

Definição do hardware a ser utilizado, CLP, sensores, atuadores e micro computador, e concepção do sistema supervisor que contém os alarmes, banco de dados e visualização da dinâmica do sistema de inspeção.

**b) A implementação de um protótipo em laboratório**

Implica no funcionamento físico tanto da parte operativa, quanto da parte de controle, com componentes que serão utilizados no projeto final.

**c) A Integração do Sistema Automatizado de Medição com informações provenientes do Tomógrafo, processadas através de software dedicado de aquisição de imagens.**

Integração das informações provenientes do tomógrafo, no software de supervisão e controle.

**d) A Especificação da Parte Operativa num Sistema Real de Medição de Falhas.**

A validação do protótipo permitirá especificar um sistema real que deverá ser implementado em escala real, utilizando a mesma interface de comando desenvolvida para este protótipo.

Para atender os objetivos descritos anteriormente este trabalho de pesquisa foi subdividido em seis capítulos, conforme descrição a seguir:

No capítulo introdutório, procuramos mostrar a importância da pesquisa aeroespacial para países como o nosso que já têm um bom nível tecnológico.

No segundo capítulo, é feita uma revisão bibliográfica aprofundada abordando conceitos utilizados nos capítulos seguintes: pesquisa aeroespacial, tomografia computadorizada e automação industrial.

No terceiro capítulo são abordados a pesquisa aeroespacial e a necessidade de métodos mais adequados para inspeção (no caso é evidenciada a inspeção tomográfica computadorizada e suas vantagens sobre o tradicional método de inspeção por raios-X).

No quarto capítulo, o enfoque está na automação industrial, e procuramos mostrar um breve

histórico de sua evolução no Brasil, algumas definições e conceitos incluindo aspectos relacionados à modelagem de sistemas automatizados e implementação de sistemas de supervisão, que certamente é um dos principais destaques deste trabalho.

No quinto capítulo são apresentados procedimentos experimentais para viabilização do estudo desenvolvido nesta dissertação de tese, referente a um Sistema de Inspeção Automatizado de Falhas utilizando Tomografia Computadorizada. Uma maquete em escala reduzida foi implementada apresentando a mesma movimentação correspondente à do objeto real – motor foguete a ser ensaiado. A validação funcional e especificação de sua Interface de Acionamento e Controle apresentadas permitem o projeto e implementação de um Sistema Completo de Inspeção Automatizado de Falhas de Foguete utilizando Tomográfica Computadorizada.

No capítulo seis, temos a conclusão e perspectivas futuras, e neste ponto é enfatizada a possível extensão para outros tipos de inspeção além do motor foguete e que são possíveis devido à arquitetura aberta.

## **Capítulo 2**

### **2- Revisão de literatura**

#### **2.1. Introdução**

Esta revisão bibliográfica é dividida didaticamente em quatro partes. A primeira parte descreve sucintamente aspectos relevantes da pesquisa aeroespacial e situação tecnológica dos foguetes, a segunda parte faz uma descrição do estado da arte da tomografia computadorizada e suas respectivas aplicações, a terceira parte apresenta aspectos relevantes de automação industrial e finalmente na última parte são delineados as metodologias implementadas nos processos de programação de sistemas automatizados.

#### **2.2. Pesquisa Aeroespacial**

A pesquisa aeroespacial como já mencionado no capítulo anterior, vêm trazendo inúmeros benefícios à Humanidade e esses resultados não só no campo de Defesa ou Militar, mas principalmente na área Civil.

O sucesso do lançamento de um foguete é medido pela missão completada, ou seja, envolve desde o lançamento até o objetivo final alcançado, que vai desde a colocação de um satélite em órbita, até o transporte e retorno em segurança de tripulantes a outros planetas, por exemplo.

No Brasil, a Indústria Aeroespacial que tem como um de seus principais representantes o IAE – Instituto de Atividades Espaciais, responsável pela pesquisa, desenvolvimento e

lançamento de veículos espaciais, com uma inspeção mais adequada, poderia melhorar ainda mais a sua relação de número de foguetes lançados com sucesso e ao mesmo tempo aumentaria consideravelmente a confiabilidade do produto. Um fato que hoje ocorre, é que como o Instituto tem relações internacionais de parcerias, a forte concorrência acaba determinando uma constante busca por fornecedores com produtos com maior grau de confiabilidade.

Um grande problema que temos reside no fato de que a inspeção de nossos foguetes é feita da mesma forma que se fazia há uma ou duas décadas atrás. Esta técnica hoje não é a mais confiável para verificação das condições internas do motor de foguete carregado, pois o diâmetro dos mesmos aumentou consideravelmente (antes em torno de 30 cm e hoje, um metro). Esta região é crítica e precisa de uma análise bem mais detalhada, pois opera em condições extremamente rigorosas de temperatura e pressão.

O IAE utiliza o processo de radiografia industrial para inspecionar seus foguetes, enquanto os líderes mundiais do setor, fazem uso da tomografia computadorizada. A radiografia, conforme vai ser analisado no próximo capítulo e que já está devidamente comprovado por meio de estudos realizados por TOMKIEWICZ, 2001 [31], tem sérias desvantagens e oferece menos recursos que a tomografia computadorizada para uma boa análise e diagnóstico de falhas.

### 2.2.1 Motor Foguete

Um motor foguete que utiliza propelente sólido para geração de energia, é composto basicamente, pelo envelope do motor, das proteções térmicas do envelope motor, do propelente, do *ignitor*, da *tubeira* e do sistema de controle do veículo (figura 2.1).

O *ignitor* é o componente do motor, responsável pelo acendimento do motor provocando assim o início da combustão propelente.

O *propelente* é uma substância formada pelo combustível e oxidante, responsável pela

geração de energia térmica através da sua combustão, produzindo gás a alta temperatura e pressão para impulsão do foguete. O escoamento e a expansão do gás gerado na câmara de combustão para a atmosfera é feito pela *tubeira*, ou seja, é o componente responsável pela conversão da energia térmica da combustão em energia cinética.

O interior do bloco propelente é submetido a altas pressões (até 150 atmosferas), e para suportar isto, é necessário envolver o bloco num componente denominado *envelope do motor*. Este é fabricado geralmente em aço de elevada resistência mecânica, ou material composto utilizando fibras de vidro ou carbono com resina, ou ainda, ligas de titânio ou alumínio que apresentam excelentes propriedades mecânicas associadas a uma baixa densidade.

O bloco de propelente é envolvido pela *proteção térmica do envelope motor*, o que serve como separação em relação ao envelope motor. A função principal deste componente é a proteção térmica do motor das temperaturas da ordem de  $3200^{\circ}\text{C}$  dos gases de combustão dos propelentes sólidos. Esta proteção térmica em contato com chama, também será consumida, mas com velocidade muito menor que a do propelente, e para este fim é fabricada com uma borracha de composição própria.

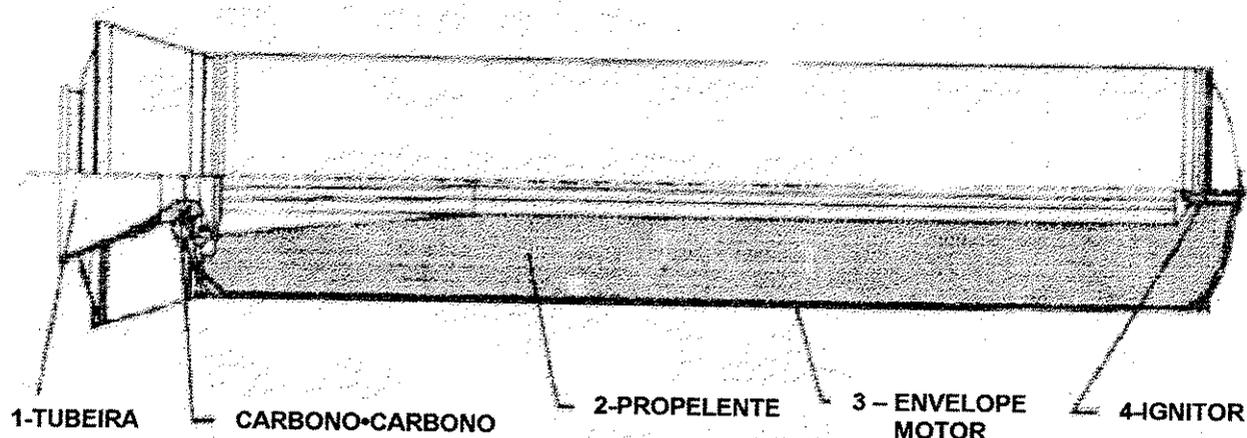


Figura 2.1: Esquema de um motor foguete

Motores foguetes que utilizam combustível sólido, propelente de fácil manutenção, apresentam características propulsivas bem definidas, onde a pressão na câmara de combustão e o empuxo, podem ser calculados para um determinado bloco propelente e uma tubeira com dimensões definidas, mas para que isto aconteça são necessários uma composição química do propelente estável e *mistura homogênea* das suas diversas substâncias.

A existência de vazios, trincas ou descolamentos em um motor de foguete podem levá-lo à ruptura e destruição total, razão pela qual é de fundamental importância uma boa e precisa análise do mesmo antes do lançamento.

### **2.2.2 Processo de fabricação do Propelente Sólido**

O propelente sólido é um composto químico que contém em sua formulação, tanto o combustível como o oxidante necessário para a reação de combustão e podem ser divididos em dois grupos: os homogêneos ou coloidais e os compósitos.

O propelente coloidal ou homogêneo mais conhecido é aquele formado de nitroglicerina e nitro-celulose, que é chamado de base-dupla. Quando os dois compostos se solidificam, formam um sólido com propriedades semelhantes à da borracha, e o propelente ganha uma estrutura homogênea, contendo ambas as substâncias: o oxidante e o combustível em uma única molécula. Além da nitroglicerina e da nitro-celulose, é necessária a adição de outros estabilizadores para evitar a auto-ignição e substâncias para aumento da resistência mecânica, que permitam resistir à pressão na ordem de  $150 \text{ kgf/cm}^2$ . Ao reduzir possíveis fraturas do propelente, também se reduz a probabilidade de explosão do motor, pois evita-se a elevação brusca da área de queima e conseqüentemente da pressão no interior do motor foguete.

Os propelentes compósitos são formados de oxidante, geralmente um sal como o perclorato de amônio ou perclorato de potássio e de combustível, formado de compostos de polibutadieno, poliuretano e polivinil que são plásticos ou borrachas. O oxidante deve ter como características

desejáveis: elevada massa específica, alto calor resultante da reação química, grande quantidade de oxigênio em sua formulação e ser pouco higroscópico.

O processo de produção de um propelente sólido (que tem muita similaridade com a tecnologia plástica), passa por diversas fases até a obtenção de um bloco com as características desejadas. São adicionadas inicialmente as substâncias químicas necessárias, passando a seguir por um processo de homogeneização da mistura. Um molde confeccionado geralmente em alumínio é introduzido no interior do envelope motor, e isto dará o formato interno ao bloco. Em seguida o vazio formado entre o molde e o motor é preenchido pelo propelente, que nesta fase está na forma pastosa. O motor com o propelente é levado a uma estufa para acelerar a cura, e após esta etapa o molde é retirado. Alguns defeitos, como a delaminação da massa propelente paralela ao eixo de carga e inclusões de materiais estranhos (principalmente metálicos) cujas ocorrências não são raras, acontecem na barra de pressão “pressed rods”. Para este tipo de defeito é necessário detectar:

- A delaminação de massa de propelente de uma superfície total superior a  $250 \text{ mm}^2$ ;
- A delaminação de um comprimento superior a 30 mm;
- A delaminação de uma largura superior a 3mm;
- As inclusões com superfície acima de  $60 \text{ mm}^2$ ;
- As rachaduras na massa de propelente.

O produto final fundido é complexo, o fator combustível é em geral um líquido que é misturado com a substância oxidante (massa cristalina de propelente sólido), e despejados em moldes onde a polimerização ocorre. Sólidos adicionados ao fluido são não-uniformes em relação às dimensões do cristal e gravidade específica, conseqüentemente os seguintes indesejáveis fenômenos ocorrem durante o processo de polimerização:

- Separação de espessos cristais no fundo a partir dos finos cristais ao topo do molde;
- Separação de substâncias de maior densidade a partir da de baixa densidade;

- Maior concentração no fundo do molde e menor no topo.

Além dos defeitos oriundos da fabricação, poderemos ter também outros tipos de problemas devido ao seu armazenamento, que são divididos em duas categorias: mecânicos e químicos.

Os defeitos mecânicos mais comuns devido ao envelhecimento são:

- Rachadura da massa do propelente;
- Delaminação da massa propelente;
- Separação da camada inibidora.

Os defeitos químicos nesta fase de armazenamento normalmente são decorrentes de reações na massa propelente, aceleradas pela má estocagem. As mais comuns são do tipo:

- Aumento de água e conteúdo de matéria volátil (acima de 0,7 %);
- Decréscimo da durabilidade química;
- Decréscimo da Constância;
- Decréscimo do valor calórico (calor de combustão);
- Decréscimo da velocidade de combustão.

### **2.2.3 Diagnostico do estado da arte da barra propelente**

Os ensaios da barra de propelente podem ser divididos em ensaios destrutivos e não destrutivos.

Os métodos de ensaios destrutivos são aplicados periodicamente a materiais escolhidos aleatoriamente em lotes, cujo tempo de garantia esteja terminando. Os ensaios não destrutivos são geralmente usados para controle pós-produção, que decide sobre a utilização de um determinado lote.

Os ensaios destrutivos requerem equipamentos de teste especiais e por isso são muito caros. Usualmente incluem:

- Pesquisa visual;
- Determinação de conteúdo de água e materiais voláteis;
- Determinação da densidade;
- Determinação do valor calórico;
- Determinação da durabilidade química;
- Determinação da estabilidade usando o método de decréscimo de massa;
- Determinação de velocidade linear de combustão.

Os ensaios não destrutivos também são caros, pois usam raios-X ( $\lambda = 10^{-4}$  até  $10 \mu\text{m}$ ) ou radiação gama ( $\lambda < 10^{-4} \mu\text{m}$ ). Eles permitem detectar a maioria dos defeitos mecânicos, os quais representam a maioria dos defeitos do estágio de pós-produção.

*Métodos radiográficos e radiométricos* podem ser distinguidos. Para determinar o defeito usando o método radiográfico na barra testada, é necessário executar uma série de ensaios, e isto consome muito tempo (preparação da barra a ser exposta, executar a exposição, processar fotoquimicamente o filme irradiado e interpretação do radiograma). Este teste requer muito cuidado na colocação da barra contra o filme.

*Métodos radiométricos* de um produto industrial consistem na medição da densidade de transmissão de fluxo de radiação gama através do produto testado. Este método tem sido empregado a longo tempo para análise de propelente sólido de foguetes porém, com ele é possível detectar falhas de 0,3 – 0,4 mm de largura e 15- 20 mm de profundidade.

A *tomografia* abre novas perspectivas nos testes de barras de propelente, pois por este método que consiste na obtenção de imagens em diferentes planos ou instantes nas bases de medições de planos perpendiculares. Estas medições são não-invasivas e frequentemente feitas sem qualquer contato com o produto.

#### **2.2.4 Combustão do Propelente Sólido**

O propelente sólido queima na direção normal à superfície do bloco, dada pela geometria do molde de injeção que é utilizado para dar ao bloco um determinado perfil. Porém, isto só é válido se o propelente sólido não estiver sujeito a *nenhuma anomalia*, como tensões mecânicas sobre uma determinada região do bloco, ou fenômenos de erosão do propelente, que consiste numa elevação da taxa de queima devido às altas velocidades de passagem dos gases por uma determinada seção do motor. As condições de trabalho do motor foguete (figura 2.1), a partir das quais força propulsiva e pressão estável são requeridas, dependem não somente da construção, mas do propelente usado. Especificamente, dependem de forma geométrica e da qualidade da massa interna estrutural do propelente, que são os pontos críticos de ocorrência de tipos e intensidade de defeitos no propelente.

O propelente sólido ao se queimar no interior do foguete exerce sobre o mesmo uma pressão. Esta pressão é proporcional à área de queima. Quando ocorre uma falha (por exemplo uma bolha), isto determina um aumento nesta área, com isto trazendo um conseqüente aumento de pressão, o que pode ocasionar a ruptura do foguete.



tomografo e sim entender e atualizar tecnologias, algumas já existentes. A partir daí poderemos fazer uso do melhor potencial de recursos, evitando até mesmo adquirir equipamentos sub ou superdimensionados para a nossa necessidade e desta forma nos posicionarmos no bloco dos países que usufruem os benefícios tecnológicos e que também recebem por parte daqueles países em desvantagem técnica, mas que preferem pagar por eles.

### **2.2.5. Importância do processo de queima do combustível para o sucesso da missão**

Começamos por entender e investigar os componentes de um motor foguete [29], verificando quais seriam os aspectos críticos para o sucesso ou fracasso das missões de lançamento. O fato do fracasso da missão, implicar na destruição total do produto, no caso o foguete, não deveria ser negligenciado pelo alto custo que isto acarreta, tanto a nível financeiro como ao nível de tempo perdido. O processo de queima do combustível sólido nos pareceu de extrema relevância para o êxito da missão, e o propelente sólido que normalmente é utilizado, tem na sua homogeneidade um dos principais ingredientes para o êxito do lançamento de um foguete. Assim sendo, a inspeção de homogeneidade do produto, de falhas e trincas internas são relevantes. Por esta razão existem estudos [31] sobre procedimentos ou técnicas que apontam a tomografia computadorizada, como sendo a mais adequada e com mais recursos para uma inspeção deste porte. Institutos ou Organizações Internacionais mais avançadas no Campo Aeroespacial já utilizam esta técnica há mais de 15 anos.

### **2.3. Tomografia Computadorizada e suas principais aplicações**

Continuamos nossa pesquisa, tentando entender o que é a tomografia computadorizada e suas principais aplicações, conforme referencias [8], [9], [18], [19], [20], [22], [24], [27], [30] e [31]. Podemos verificar pelas obras citadas em nossa referência bibliográfica, que a maior parte delas se refere a uso no setor médico e odontológico.

O corpo humano, além de ser a “máquina mais perfeita” e que portanto merece o que de melhor tivermos em termos de tecnologia e conforto, apresenta grande numero de imagens de

situações de normalidade, que servem de referência numa análise comparativa e de diagnóstico. Isto também se justifica pois este campo do conhecimento tem necessidade de uma análise de maior precisão, tridimensional e principalmente que não precise destruir o corpo investigado (ensaio não destrutivo).

A tomografia, desde o seu advento na década de 70, vem auxiliando o diagnóstico médico e com uma precisão sem igual. No guia pratico de interpretação de CT [30], que muito embora seja específico para diagnostico de patologias intracranianas, é mostrado o porque do principio da tomografia ganha um diferencial em relação a outros métodos tradicionais como o roentgenografico (devido aos diferentes níveis de absorção dos raios-X pelos corpos). Além do uso para diagnóstico médico, temos também visto muitas obras relacionadas ao uso desta “valiosa ferramenta” no estudo do solo [8].

O uso específico da tomografia computadorizada para análise de falhas de propelente sólido de foguete, é mostrado em artigo citado na referencia [31]. Neste trabalho o autor comparou o sistema tomográfico com métodos radiológicos e radiométricos e mostrou a grande utilidade do mesmo para este tipo de ensaio não destrutivo. De qualquer forma, há um grande espectro de possíveis utilizações da tomografia computadorizada, e no caso da inspeção e análise de foguetes, já vem sendo aplicado no mundo moderno com grande eficácia, trazendo ganhos na confiabilidade da missão, segurança às pessoas e precisão no diagnostico técnico do corpo ensaiado.

#### **2.4. Automação industrial e sua história**

Por se tratar de um ensaio com emissão de radiação e que demanda um certo tempo para uma análise completa de um objeto em teste, optamos por um sistema automatizado de inspeção com o uso da tomografia computadorizada. Passamos agora ao estudo da automação Industrial, sua história ,conceitos e aplicações [26], [32], [33], [34].

A automação industrial tem uma grande participação no que se relaciona à produção [3] e pode ser dividida em 3 classes:

- *rigida* ou *fixa* que é usada para elevados volumes de produção de um determinado tipo de produto;
- a *flexível* que é decorrente da junção da mecânica, com o tratamento da informação pela informática e a eletrônica, e é voltada para um volume de produção médio, onde a automação aliada a flexibilidade possibilitam a automatização de indústrias, que fabricam diversos produtos ao mesmo tempo, utilizando o mesmo sistema de produção;
- a *programável* que se diferencia da flexível entre alguns motivos, pelo fato da produção ser efetuada em pequenos lotes, necessitando que o equipamento seja reprogramado para a fabricação de um novo lote.

A estrutura funcional de um sistema robótico, segundo a obra de Stadler [28] é composta de:

- *atuadores* que servem de músculos para o sistema, produzem movimentos e podem se utilizar sistemas elétricos, pneumáticos ou hidráulicos como fonte de energia;
- *comunicação* são unidades que transmitem informações ou recebem instruções de um operador remoto;
- *computador para controle* que é o computador central que integra as atividades dos vários sistemas ou microprocessadores;
- *órgão terminal* que é o dispositivo de manipulação de objetos fixado ao final do último elo do manipulador;
- *manipulador* que é o mecanismo que consiste de uma série de segmentos de braços fixados entre si através de juntas que proporcionam o movimento;
- *fonte de energia* que é o sistema que fornece energia para o funcionamento dos diversos componentes;
- *sensores* que são os transdutores que têm como entrada fenômenos físicos e como saída através de impulsos elétricos.

## 2.5. Programação de sistemas automatizados integrados

Próximo passo seria a integração dos sistemas, ou seja, um Sistema Automatizado para Inspeção utilizando Tomografia Computadorizada. O uso do software GRAFCET [3], [5], [10] e [25] como ferramenta na automação industrial de produção, e que foi uma evolução dos FMS “Flexible Manufacturing System”, introduzidos no final da década de 60, que podem ser definidos como um computador controlador agrupando estações de trabalho semi-independentes ligadas pelo sistema de manuseio automático de materiais e também dos Controladores Lógicos Programáveis – CLP . O CLP é um computador industrial dedicado, utilizado na maioria das aplicações de sistemas a eventos discretos. Para realização do controle é necessário somente que o CLP receba as informações acerca do estado do sistema, informações do operador e de outros sistemas, e altere estes estados conforme um modelo estabelecido. No caso de um evento discreto a sua dinâmica é um sistema com um espaço discreto e uma evolução de estados, os quais são determinados por eventos.

No início dos anos 70, a necessidade de descrever complexos controles lógicos aumentaram e a implementação dos CLP's foi simplificada pelo desenvolvimento dos microprocessadores. Desta forma novos modelos foram desenvolvidos, proporcionando uma maior faixa de aplicação para os CLP's.

As principais necessidades detectadas foram as seguintes:

- Descrever a seqüência de estados de um sistema a evento discreto o qual pode conter um número grande de estados;
- Levar em conta a simultaneidade desde que alguns subsistemas podem ser parcialmente independentes;
- Dado o estado de um sistema, onde somente poucas entradas saídas podem mudar, poder então descrever somente o procedimento correspondente destas mudanças de entradas;
- Ter um claro entendimento das mudanças de entradas e saídas.

O GRAFCET [25] surgiu destas necessidades. Este modelo foi inspirado das redes de Petri as quais desde o início dos anos 60 estão sendo estudadas. As Redes de Petri são ferramentas gráficas, as quais permitem modelagem e simulação de procedimentos de concordância seqüencial.

O modelo GRAFCET foi primeiramente reconhecido como padrão francês e em 1987 se tornou padrão internacional. Basicamente o GRAFCET se comporta como uma rede de Petri com algumas poucas diferenças. Este é um modelo seqüencial o qual somente descreve a função a ser desempenhada, em uma máquina seqüencial no sentido matemático, independente do hardware e software.

Um GRAFCET pode ser implementado através de várias linguagens literais ou gráficas, alguns CLP's baseados em GRAFCET já possuem editores gráficos. O usuário desenha os símbolos do GRAFCET diretamente na tela e adiciona ações e receptividades, porém ele deve escolher uma linguagem literal ou *ladder*, para representação da lógica do GRAFCET.

Alguns sistemas de tamanho razoável podem ser descritos por GRAFCET, e é por este motivo que este modelo é muito usado, principalmente na indústria francesa onde este modelo foi desenvolvido.

O modelo GRAFCET tem sido usado com sucesso na implementação de supervisores projetados sobre controladores automáticos baseados nestes conceitos. Contudo, algumas empresas, principalmente nos Estados Unidos, já possuem muitos programas desenvolvidos em especificação *ladder*. Desde que estes programas devem ser mantidos, a mudança para especificação GRAFCET se torna difícil, por isso alguns pesquisadores estão desenvolvendo estudos para translação automática da linguagem *ladder* para o GRAFCET.

Outro fator que tem estimulado a utilização de Redes de Petri e GRAFCET é que a simulação de eventos discreta vem se tornando uma adequada ferramenta no projeto de sistemas de produção nestes últimos anos, e em muitos casos uma das principais ferramentas para solução

dos problemas de lógica, que envolve o sistema durante a fase de produção, possam ser minimizados ainda na fase de modelagem.

## **2.6. Comentários sobre o capítulo 2.**

Neste capítulo que pode ser considerado o alicerce desta tese, foi feita uma retrospectiva de todos os passos e pesquisas bibliográficas requeridas, para o desenvolvimento deste trabalho. Começamos por entender que havia uma necessidade específica na indústria aeroespacial, e que foi agravada pela não atualização tecnológica adequada em termos de recursos de suporte ao desenvolvimento aeroespacial. Foram verificadas, o que se usavam em termos deste tipo de ensaio, em países mais adiantados no campo aeroespacial. Finalizou-se com o estudo de automação industrial e seus recursos, pois o sistema proposto neste trabalho envolve um sistema automatizado para inspeção de motor foguete.

Uma vez direcionado, o nosso próximo objetivo passou a ser um aprofundamento, nos temas mencionados neste capítulo, como o que se segue no próximo, que visa entender a tomografia, seu processo e suas vantagens para o caso específico em questão.

## Capítulo 3

### 3- Métodos de Inspeção e Diagnóstico por Emissão de Radiação

#### 3.1 Introdução

Exames radiológicos são uma das ferramentas mais importantes no auxílio à investigação de disfunções na área médica, e também na de inspeção de produtos como um motor foguete. Contamos com uma série de exames radiológicos para emprego em diagnóstico médico tais como Raio-x, fluoroscopia, tomografia, gama câmera e outros, que podem ser agrupados conforme a fonte de energia empregada. Porém no nosso estudo vamos nos deter aos de utilização no diagnóstico de falhas de propelente sólido de foguetes e que são:

##### **Raios-X :**

Caracterizados por uma radiação eletromagnética extremamente curta, com cerca de  $2 \mu\text{m}$  de comprimento e que foram descobertos em 1895 por Roentgen. Sua aplicação na área médica vai desde um simples exame da estrutura óssea até a determinação de tumores. Radiografia é o nome dado à imagem registrada numa película de filme, do resultado desta exposição aos Raios-X. O exame pelos raios-x é de uso simples e apresenta boa qualidade na imagem resultante, com alta resolução geométrica dependendo do filme utilizado, por essas razões é muito difundido. Os Raios-X são uma forma de radiação de alta intensidade de energia e oferecem certo risco àqueles que estão em contato freqüente com os mesmos, sendo que a própria história registra alguns casos de mortes por leucemia de radiologistas, e isto leva os laboratórios a adotarem severas medidas de segurança.

##### **Tomografia:**

É um sistema que, empregando Raios-x, é capaz de apresentar imagens de uma seção transversal do corpo, pela reconstrução através de computador das várias projeções obtidas pelo

corte do feixe, em uma certa área de interesse. É uma fonte mais sofisticada, diferenciando-se da radiografia por obtenção de detalhes do corpo ou objeto, o que possibilita diagnósticos mais confiáveis e conclusivos. O sistema coleta todas as projeções feitas para que posteriormente o computador faça a reconstrução da imagem. Um grande diferencial deste exame, está na grande precisão das imagens que podem ser colhidas, e sempre é utilizado quando os exames radiográficos tradicionais não apresentarem informações suficientes sobre o problema investigado, sem necessidade de destruir o objeto em análise (NDT – *Non Destructive Testing*). O uso de recursos computacionais permite que estes cortes transversais, sejam empilhados de tal forma a se obter imagens tridimensionais do objeto em exame.

Uma grande diferença entre a Radiografia e a Tomografia é que a primeira mostra como imagem somente a projeção do corpo, faltando assim a noção de profundidade, o que se agrava em eventuais defeitos ou anomalias superpostos. Outra diferença é que na radiografia, algumas exames têm de ser repetidos várias vezes até que se consiga uma boa imagem, o que na Medicina implicaria na exposição do paciente um maior tempo aos raios-X.

A tomografia computadorizada que teve o seu advento na década de 70, e que revolucionou o diagnóstico médico. A combinação da capacidade de obtenção de imagens dos raios-X com o poder de processamento dos computadores permitem obter imagens da anatomia interna do organismo sem necessidade de cirurgia.

Tanto a radiografia industrial como a tomografia computadorizada, fornecem uma imagem baseada na variação da atenuação dos raios-X que passaram pelo objeto em teste. Porém, um sistema tomográfico permite que o objeto seja analisado através de finas secções transversais, enquanto na radiografia industrial o objeto será exposto de uma vez ou uma grande área.

Através do movimento da fonte e dos detectores ao longo do eixo do objeto, é gerada uma quantidade de vistas internas do objeto sem haver superposição de imagens, como ocorre na radiografia industrial, que tende a distorcer, obscurecer defeitos ou surgimento das chamadas “sombras”. (figura 3.3).

A tomografia computadorizada fornece uma imagem bi-dimensional de alta resolução em

um monitor, a qual pode ser manipulada e analisada com detalhes.

Portanto temos a necessidade de uma inspeção tomográfica no foguete, de forma a garantir uma confiabilidade e que trará como benefícios uma diminuição de perdas financeiras aumentando a competitividade de nosso setor espacial.

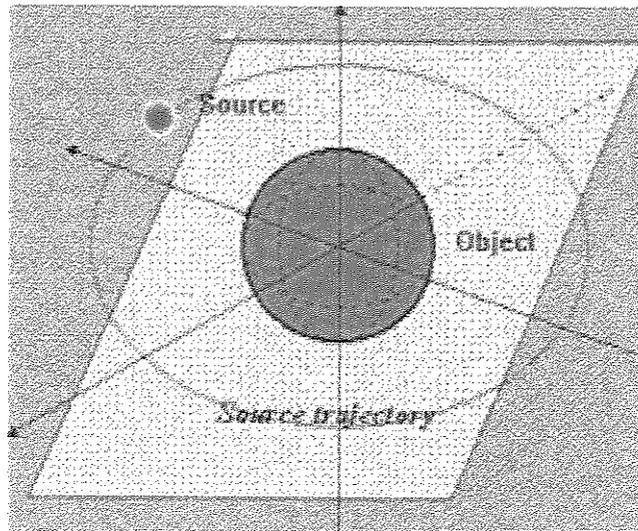


Figura 3.1: A tomografia captando imagens da seção transversal do corpo

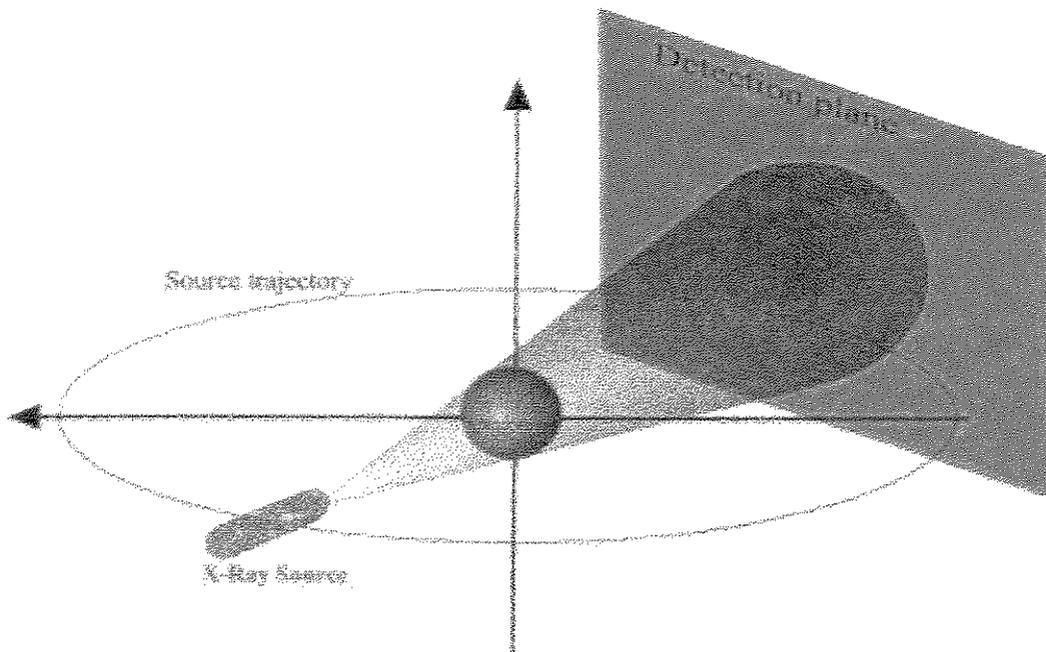


Figura 3.2: Representação de uma Radiografia

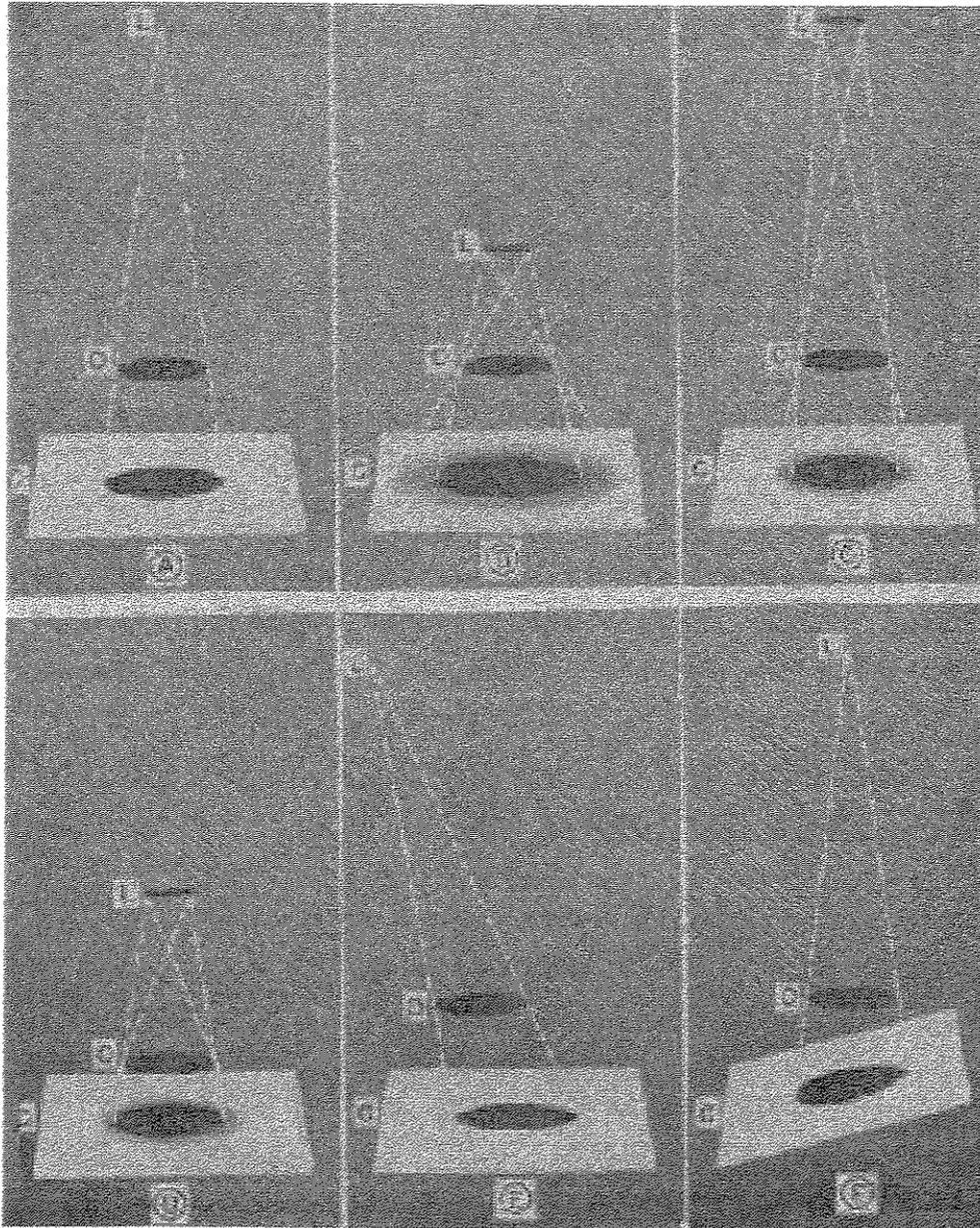


Figura 3.3: Princípios Gerais de Formação de Sombras

fonte: McMaster, R.C. – *Nondestructive Testing Handbook*, The Ronald Press Company,

1959

### 3.2- Sistema de Tomografia Computadorizado integrado e automatizado

A tomografia computadorizada é muito utilizada na área médica e odontológica, por possibilitar uma análise tridimensional (figura 3.5) de anomalias do corpo humano, como tumores por exemplo (figura 3.4).

O método de teste de falha do propelente sólido de foguetes por inspeção tomográfica tem como principais vantagens a possibilidade de se fazer a análise em todo o corpo, e sem a necessidade de destruí-lo para a análise (NDT – “non destructive testing”). A tomografia abre novas perspectivas em testes como o dos propelentes de foguetes, ajudando na obtenção de imagens em diferentes planos e instantes na base de medições em planos perpendiculares. Uma vantagem é que estas medições não têm contato com o produto.

Alguns laboratórios de grandes centros, tais como o Departamento de Manutenção e Diagnóstico Tecnológico na Universidade de Tecnologia Militar, no Instituto de Química Orgânica em Warsaw e também na Universidade de Manchester, vêm conduzindo uma série de experimentos para confirmar a utilidade do processo de tomografia no diagnóstico de falhas em propelentes sólidos de foguetes. As grandes vantagens da tomografia em ensaios não destrutivos, sobre os métodos radiológicos e radiométricos vêm sendo motivo de estudo, com comprovações experimentais e publicações no “Chemical Engineering Journal” [31].

Pode-se concluir que o sistema de Tomografia Computadorizado integrado e automatizado traz alguns diferenciais sobre os métodos de inspeção convencional citados e que são os seguintes:

- A pesquisa de custos mais baixos para o produto, considerando que é o único método capaz de detectar alguns tipos de falhas;
- A substituição do homem em trabalhos repetitivos e perigosos, tendo como consequência a melhoria das condições de trabalho;
- A pesquisa de melhor qualidade do produto, limitada ao fator humano;



### 3.3- A Tomografia Computadorizada no Brasil

Algumas instituições no país, principalmente da área médica, têm nos proporcionado a utilização da tomografia computadorizada. Os benefícios do diagnóstico feito com auxílio desta técnica são inquestionáveis e conseqüentemente sugerem uma utilização mais generalizada, o que vem ocorrendo. A engenharia tem se utilizado com freqüência e abrangências crescentes.

Ao mesmo tempo, países mais adiantados oferecem sistemas tomográficos dedicados e, se por um lado, representam uma solução em curto prazo, por outro implicam na eterna falta de domínio da tecnologia, para seu emprego generalizado por completo.

Como exemplo, mostra-se na Figura 3.6 uma tomografia realizada em um bloco de propelente, no qual foram introduzidos propositadamente três furos, sendo um com diâmetro de 1,0 mm, outro com diâmetro de 2,0 mm e finalmente outro com diâmetro de 3,0 mm. Observamos que estes três furos, que estão alinhados não seriam detectados pela radiografia, dependendo do posicionamento da fonte emissora de Raios-X. No ensaio de corpos com grande diâmetro (no caso o foguete VLS tem 1 m de diâmetro máximo), a radiografia industrial perde a eficácia, não detectando com precisão certos tipos de falhas.

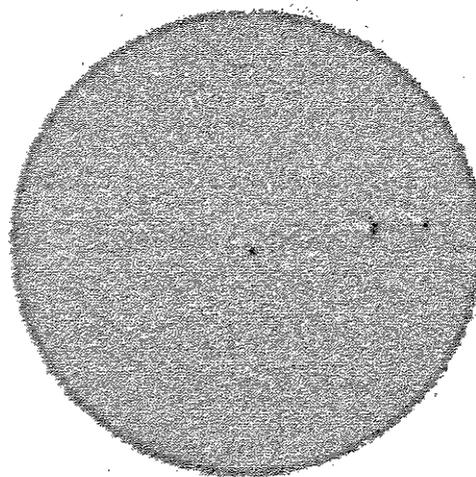


Figura 3.6: Tomografia computadorizada realizada em um bloco de propelente com três furos adicionados, 1, 2 e 3mm, pelo Laboratório de Instrumentação Nuclear da COPPE/UFRJ.

Na figura 3.7, temos um tomógrafo da empresa americana Lockheed Missiles and Space Co., desenvolvido pela American Science and Engineering Inc., com objetivos de detectar falhas na ordem de 0,003 in. e usado desde o início dos anos 80.

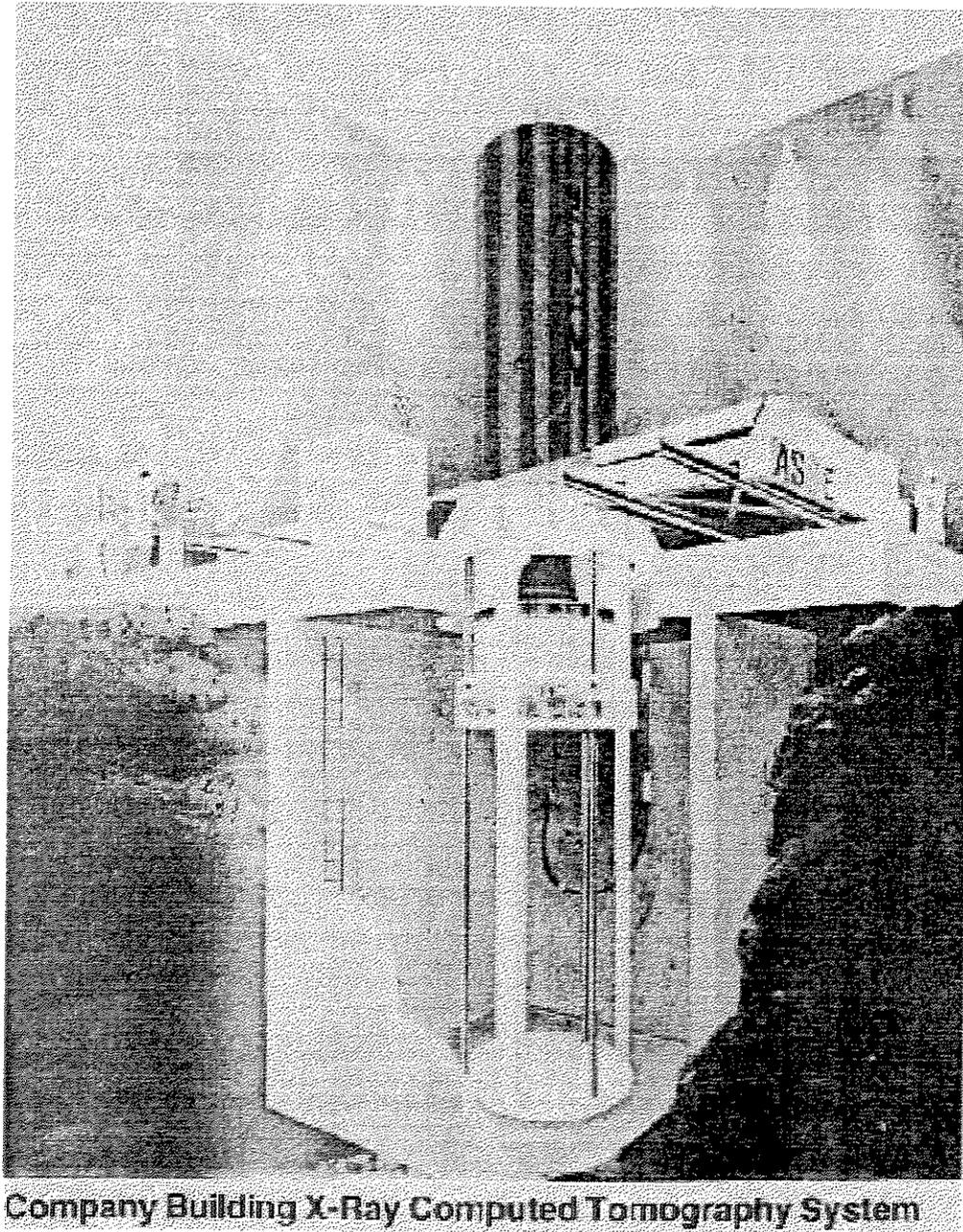


Figura 3.7: Tomógrafo da Lockheed, de 1984  
(desenvolvido pela American Science and Engineering Inc. )

### **3.4- Comentários sobre o capítulo 3.**

Neste capítulo foi abordado e analisado, o método de inspeção por tomografia computadorizada e os diferenciais que o mesmo oferece sobre métodos convencionais de radiografia. O foco deste trabalho não foi o desenvolvimento de um tomógrafo, pois o mesmo já é uma tecnologia de domínio público e que pode ser adquirido no mercado.

Nossa maior preocupação foi a compreensão de seu processo de funcionamento, e confrontá-lo com o método de radiografia industrial, que ainda está sendo usado no Instituto de Atividades Espaciais, em termos da precisão, confiabilidade e nível de automação requeridos. Alguns estudos citados na referencia bibliográfica, permitiram que se considerasse este método como o mais adequado para resolução do problema específico de análise e diagnóstico do ensaio não destrutivo dos motores foguetes de maior diâmetro.

Como o principal objetivo desse trabalho de pesquisa, concerne à automação de procedimentos de inspeção de motores de foguete, o próximo capítulo se concentra no estudo de conceitos relacionados à automação industrial e suas utilizações, tais como as empregadas no sistema gerencial integrador do modelo desenvolvido e implementado neste projeto de pesquisa.

## Capítulo 4

### 4- Modelagem de Sistemas Automatizados

As aplicações direcionadas à área de Automação Industrial, conduzem ao projeto de Sistemas Automatizados com estrutura de controle e arquitetura de comando. Assim, durante a fase inicial de projeto, o projetista deverá escolher uma especificação de arquitetura de comando que atenda os pré-requisitos funcionais, tais como os tempos de resposta do sistema. Dentro desse contexto, diferentes metodologias podem ser utilizadas para validar um modelo de arquitetura de comando distribuído através da construção de modelos de Análise Estruturada e de sua posterior implementação num CLP – Controlador Lógico Programável.

Neste capítulo são apresentados conceitos teóricos e definições básicas referentes à Modelagem de Sistemas Discretos e Contínuos, com ênfase no uso dessas ferramentas para modelagem e Integração de Sistemas Automatizados utilizando o GRAFCET – Grafo de Comando Etapa e Transição e também de CLP's industriais.

#### 4.1- Introdução

Grandes avanços foram realizados nas últimas décadas com relação ao sistema de produção. Podemos dividir a automação industrial em três classes: A rígida, a flexível e a programável, que serão descritas a seguir:

- A automação fixa é usada quando o volume de produção é muito elevado, desta forma ela possui uma linha de produção fixa, voltada apenas para concepção de um determinado tipo de produto.

- A automação flexível é decorrência da junção da mecânica, com o tratamento da informação pela informática e a eletrônica. É voltada para um volume de produção médio, onde a automação aliada a flexibilidade possibilitam a automatização de indústrias, que fabricam diversos produtos ao mesmo tempo, utilizando o mesmo sistema de produção.

- A automação programável diferencia-se da flexível entre alguns motivos, pelo fato da produção ser efetuada em pequenos lotes, necessitando que o equipamento seja reprogramado para a fabricação de um novo lote.

No nosso caso, teremos duas situações possíveis: a) a **automação programada**, onde colocamos um dispositivo de “alarme”, que ao deparar com uma situação destoante da prevista é acionado, e teremos também a situação b) de **acesso manual**, onde o operador poderá efetuar seu ensaio em condições não programadas, por exemplo quando necessitar inspecionar mais detalhadamente uma determinada área, e não o corpo de prova na sua totalidade.

Neste trabalho são abordados inicialmente alguns conceitos básicos concernentes aos Sistemas Automatizados, enfatizando os principais elementos que descrevem a Parte Operativa e a Parte Comando de um Sistema Automatizado Industrial. Esta metodologia será validada e implementada no Laboratório de Automação Integrada e Robótica, da UNICAMP, através de uma plataforma didática constituída de diferentes elementos automatizados (dispositivo mecânico, CLP's, atuadores e sensores ) e tudo deverá simular um caso real .

No setor de produção industrial podemos estabelecer a seguinte cronologia: nos anos 70 a automação era direcionada para automação de tarefas, robôs e NC; nos anos 80 foi a automação dos processos, tarefas individuais foram conectadas, resultando um processo CAD, CAM, máquinas CNC, FMS. Neste período houve grandes avanços na modernização das indústrias. Nos anos 90 a automação das fábricas envolviam a automação de vários processos, que executam um simples processo em cadeia, de acordo com um modelo preestabelecido. A descentralização tem melhorado a interdependência de controle dos setores fluxo de produção e gerência da fábrica.

A automação é introduzida em termos de transformação dos processos em cadeia, o quais começam com a identificação da necessidade dos consumidores, depois estas informações são encaminhadas ao chão de fábrica e voltam para os consumidores como o produto final desejado (isto já vem sendo feito timidamente por alguns fabricantes automobilísticos, que permitem a escolha do modelo e acessórios do automóvel desejado, com pedido feito via Internet).

Para se integrar todo o um sistema de produção deve-se primeiro relatar a seqüência a qual a automação deveria ser implementada, e em seguida analisar quais tecnologias que deveriam ser utilizadas nesta integração.

Em princípio o Processo deve seguir seu curso natural anulando tarefas de inspeção, controle e planejamento, que não contribuem para adicionar valor à matéria-prima que será manufaturada.

Neste fluxo ainda são anulados o controle desnecessário, verificações e interferências a níveis gerenciais. Isto é realizado pela combinação inteligente de equipamentos computadorizados e tecnologia de informação, não somente no chão de fábrica mas também no departamento de gerência, desta forma para o sucesso desta implementação os recursos humanos capacitados são indispensáveis.

Basicamente, a automação industrial é o que se poderia chamar de uma tecnologia integradora de três áreas: a eletrônica, onde temos uma plataforma eletrônica com o uso de um hardware; a mecânica, na forma de dispositivos mecânicos (atuadores) e a informática, onde são feitas as programações das operações envolvidas (software).

As principais vantagens da automação são: aumento da eficiência de processos, diminuição de custos, aumento de competitividade, nível de exigência e melhoria de qualidade, maior controle e segurança de operação. Os elementos básicos de um sistema automatizado são mostrados na fig. 4.1.

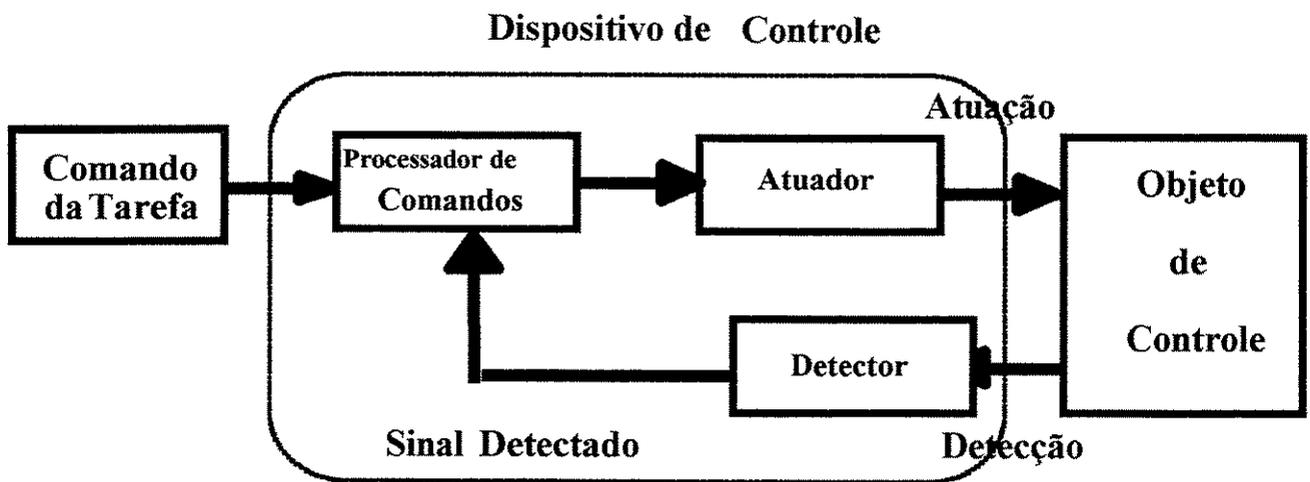


Figura 4.1: Elementos básicos de um sistema automatizado

## 4.2 A Automação no Brasil

No Brasil a modernização da indústria é bem recente comparada a outros países. A industrialização brasileira teve início no começo do século e contou com um grande impulso durante os anos 40 e 50, quando várias ações governamentais estimularam a industrialização do país naquele período.

Todos estes fatores levaram o Brasil a ser a oitava economia do mundo no final dos anos 70. Porém, no início dos anos 80, o país sofreu uma forte recessão acompanhada de alta inflação. Neste mesmo período o mundo viu o advento da era eletrônica. No entanto, as leis de proteção brasileira impediram a entrada destas tecnologias no país e também não investiram no desenvolvimento da tecnologia nacional. No Início dos anos 90 o Brasil começa a abrir sua economia e a estabilização econômica começa a ser uma realidade.

Hoje a indústria brasileira está diante de problemas de competição internacional, obsolescência e recursos humanos inadequados, sendo que este é o principal obstáculo para a modernização do parque industrial brasileiro. Muitas indústrias buscam a modernidade de seus métodos e equipamentos, como uma questão de sobrevivência. Dentro deste contexto, já existe um certo consenso de que a indústria brasileira precisa reestruturar-se e capacitar-se para competir no mercado internacional e nacional, devido a facilidade de ingresso de produtos estrangeiros, com a globalização da economia.

O consumidor passou a exigir maior qualidade dos produtos, com isso a produtividade e a qualidade passam a figurar como alvos dos sistemas produtivos, e são entendidos como a única forma de obter competitividade e sobreviver em um mercado livre, onde o consumidor é a figura principal deste contexto. Diante desta situação a manufatura ocupa lugar de destaque neste ambiente e a automação é um meio de se obter qualidade e produtividade.

#### **4.3 Proposta de um Sistema Automatizado de Medição de falhas de foguetes a partir de imagens tomográficas**

No desenvolvimento deste trabalho realizamos a construção de um mecanismo capaz de imprimir movimentos precisos de rotação ao objeto testado e ao mesmo tempo deslocar a fonte de radiação e o detector ao longo do eixo do objeto. A concepção deste mecanismo foi realizada com o mesmo enfoque utilizado em engenharia de integração, aplicado em uma plataforma experimental para validação e implementação de conhecimentos. Ela foi desenvolvida e construída no Laboratório de Automação Integrada e Robótica da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

Nesta Plataforma foi adotado o conceito de parte operativa e parte de controle, que se aproximam muito das necessidades exigidas por este mecanismo, além da utilização de métodos precisos para descrição do comportamento de um sistema automatizado, como o Grafcet, estabelecido pela IEC 311 - Descrição de Sistemas Seqüenciais, fato que permite um aproveitamento completo do trabalho realizado para futuras modificações e ampliações no

sistema, inclusive por equipes totalmente diferentes.

Uma possível expansão deste trabalho está no desenvolvimento de um algoritmo para composição das imagens que serão utilizadas. Este sistema de controle e síntese, sempre que detectar uma variação na atenuação dos raios-X incidentes no detector, comunicará a existência do defeito através da emissão de um sinal de advertência e as posições longitudinal e angular deverão ser gravadas.

#### **4.4 Elementos de um Sistema Automatizado**

Um problema que surge à medida que se tem um crescente número de complexos sistemas automatizados industriais, e cuja complexidade aumenta à medida que o sistema tenha um maior número de informações de entradas e saídas é a grande dificuldade por parte do usuário, na definição de uma maneira clara e sem ambigüidades das especificações funcionais associadas a esses sistemas. Busca-se sempre uma linguagem simples [24] de fácil interpretação e execução, tanto do ponto de vista do homem quanto do dispositivo de controle.

Desta forma é necessário descrevermos o sistema através de uma ferramenta de descrição adequada e que solucione o problema de comunicação. Atualmente é necessário que estas linguagens sejam:

- Do ponto de vista do homem, uma forma que expresse de modo natural à especificação do sistema;
- Do ponto de vista do dispositivo de controle, uma descrição simples que seja fácil de ser interpretada e executada.

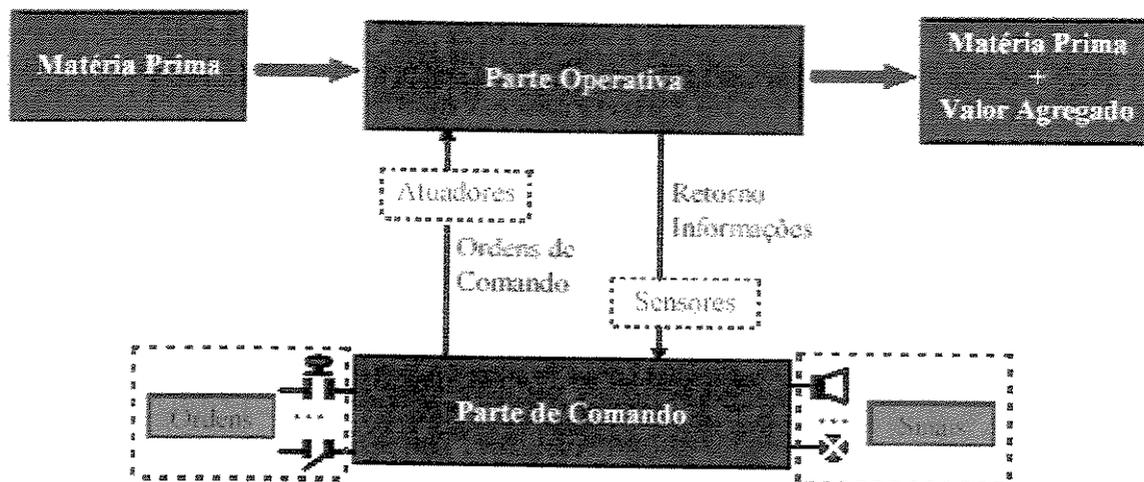


Figura 4.2 – Sistema Automatizado (SA) – Parte Operativa e Comando.

Com o objetivo de padronização de uma linguagem na descrição dos sistemas automatizados, a norma internacional [IEC 1131-3] estabelecida pelo “International Electrotechnical Committee” estabelece uma nomenclatura internacional para sistemas automáticos, dividindo um Sistema Automatizado (SA) em duas partes distintas (figura 4.2), que são:

- **Parte Operativa (PO)** – corresponde ao processo físico a automatizar, que opera sobre a matéria prima e o produto. É constituída pelos atuadores que realizam as operações, agindo sobre componentes e dispositivos de automação, tais como válvulas, atuadores, motores, lâmpadas, etc;
- **Parte Comando (PC)** – caracterizado por receber as informações vindas do operador e/ou do processo a ser controlado e emitir informações ao sistema controlado, coordenando assim, as ações da Parte Operativa (PO).

Para cada processo a ser controlado é necessário escolher, dentre as diferentes tecnologias de comando disponíveis, as mais adequadas e as que melhor se adaptam ao processo. Dentre as diferentes tecnologias existentes, podemos citar, comandos pneumáticos, hidráulicos, relés, e Controladores Lógicos Programáveis (CLP).

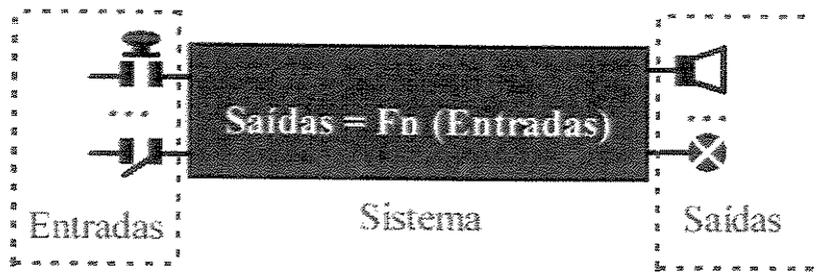
Através das informações fornecidas pela Parte Operativa (PO), a Parte Comando (PC) é mantido informado sobre o estado das operações. A Parte Comando (PC) pode trocar informações com o exterior do sistema, de onde pode receber indicações, ordens (botões de comando, chaves, etc.) e fornecer sinalizações sonoras e/ou luminosas (buzinas, lâmpadas, etc.).

A primeira etapa do desenvolvimento de um SA consiste em descrevê-lo de modo a não ficar nenhuma dúvida, sobre os objetivos a serem atingidos no projeto proposto, onde deve prevalecer o conjunto, sem a preocupação com detalhes tecnológicos, quando então se deve descrever os elementos específicos do sistema de automação. É nesta etapa que surgem as maiores dificuldades, porque as informações devem chegar ao projetista, com todos os detalhes necessários.

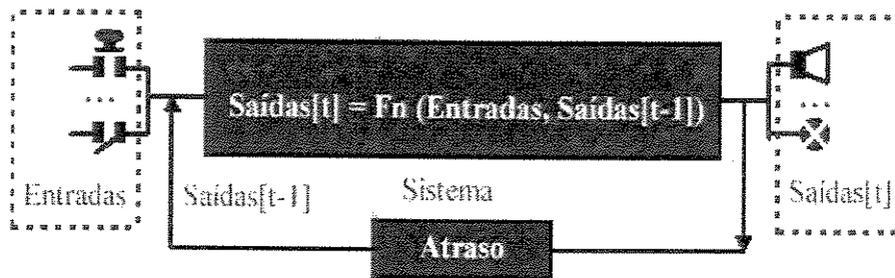
A comunicação verbal não é a forma mais indicada, isso porque pode levar a mais de uma interpretação, e até mesmo a informações ambíguas. Para sistemas complexos, com ações simultâneas e decisões com múltiplas possibilidades, deve-se evitar a utilização de textos. Sempre que possível e necessário às descrições de sistemas automatizados, deverão ser representadas de forma gráfica, que são mais fáceis de serem interpretadas e executadas. Porém encontrar uma forma que seja aceita e entendidas por todos, torna-se muito difícil.

Os Sistemas Automatizados podem ser classificados como:

- i) **Automatismos Combinatórios:** O estado das saídas depende do estado das entradas, ou seja, as saídas são determinadas unicamente em função do estado corrente das entradas. Conseqüentemente, o funcionamento do sistema não depende do tempo, conforme mostra a figura 4.3a.
  
- ii) **Automatismos Seqüenciais:** O estado das saídas depende do estado atual das entradas do sistema. O funcionamento depende do seu passado. Conseqüentemente, o estado das saídas no instante  $t$  é função do estado das entradas neste tempo  $t$  e dos estados das saídas no tempo  $(t-1)$ , conforme mostra a figura 4.3b.



a) Automatismos Combinatórios.



b) Automatismos Seqüenciais.

Figura 4.3 – Classificação de Sistemas Automatizados.

#### 4.5 - Linguagens utilizadas para Modelagem de Sistemas Automatizados

Uma linguagem para modelagem de sistemas é o meio pelo qual se expressam modelos, tendo como principal objetivo, a descrição de sistemas. Suas principais características são:

- a) Possuir uma base formal, visando obter uma interpretação exata e precisa;
- b) Clareza, visando facilitar a comunicação entre todos os envolvidos na modelagem;
- c) Possibilitar a construção de modelos que obedecem aos requisitos de conceitualização (contendo apenas propriedades desejadas do sistema modelado) e de totalidade (todas as propriedades desejadas do sistema modelado).

É comum nos sistemas encontrar componentes que apresentem atividades concorrentes ou paralelas. Neste sentido, as Redes de Petri são uma linguagem de modelagem que foi

desenvolvida especificamente para modelar sistemas discretos que possuem componentes que interagem concorrentemente (Peterson 1981; Agerval 1979).

Sistemas a Eventos Discretos (SED) são aqueles cujas variáveis de estado mudam só num conjunto discreto de pontos no tempo. Por exemplo: Um banco é um exemplo de sistema discreto desde que a variável de estado, o número de clientes no banco, muda só quando um cliente chega ou quando o serviço prestado a um cliente é completado.

#### **4.6 – Norma Internacional IEC 61131-3**

A Parte de Comando de um Sistema Automatizado deverá ser bem especificada e documentada, de modo a evitar ambigüidades e dúvidas durante a sua implementação e/ou manutenção. Para unificar e padronizar os símbolos gráficos e a seqüência do sistema, e também o que concerne os diferentes componentes de automação e CLP's distribuídos por diferentes fabricantes, foi criado um comitê internacional da IEC responsável pela especificação das etapas de projeto dos CLP's, incluindo desde o projeto de hardware, teste, documentação, programação, comunicação e até instalação, resultando a norma internacional [IEC 61131-3] (tabela 4.1).

Assim, no desenvolvimento da norma internacional [IEC 61131] procurou-se definir os pontos de intertravamento de sistemas seqüenciais, baseada nos seguintes objetivos: Visibilidade, Equipamentos, Linguagens de programação, Manuais ou guias do usuário e Sistemas de Comunicação.

Ao mesmo tempo foram definidas as cinco linguagens descritas a seguir, onde duas são textuais e outras três linguagens gráficas, utilizadas atualmente na maioria dos controladores lógicos programáveis disponíveis no mercado, customizados de acordo com cada fabricante. Apesar dessa diversidade de implementações, e por estarem baseadas nesta padronização, sempre permitem meios para especificar todos os procedimentos e intertravamentos de controle inerente ao sistema a ser automatizado.

Parte	Título	Descrição
1	Informações Gerais	Definições de terminologias e conceitos básicos
2	Requisitos de Equipamentos e Testes	Construção eletrônica e mecânica e testes
3	Linguagens de Programação	Estrutura do software do CLP, linguagens de programação e execução do programa
4	Guia do Usuário	Guia sobre seleção, instalação e manutenção de CLP's
5	Especificação do Serviço de Mensagens	Facilidades de software para comunicar com outros dispositivos utilizando comunicação baseada na MAP MMS (Manufacturing Message Specifications)
6	Comunicação via Fieldbus	Facilidades de software de comunicação de CLP utilizando IEC Fieldbus
7	Programação para Controle Fuzzy	Facilidades de software para manipulação de lógica fuzzy dentro de CLP's
8	Guia para Implementação de Linguagens para CLP's	Guia para aplicação e implementação das linguagens do IEC 61131-3

Tabela 4.1 – Norma IEC 61131.

**IL: “Instruction List” - Lista de Instruções (figura 4.4):** Linguagem textual, de baixo nível, semelhante à linguagem Assembler, baseada em comandos “load”, “store”, “move”, “add”, que apresentam alta eficiência em pequenas aplicações (como sensores/atuadores inteligentes) ou na otimização de partes de uma aplicação.

```

(* Reinicializacao *)
LD    %S1
S     %S21

(* Habilita Programa de Controle *)
LD    TRUE
SR0
SR1

(* Ativa motor de resfriamento *)
LD    %S13
AND   %S1
S     %S14

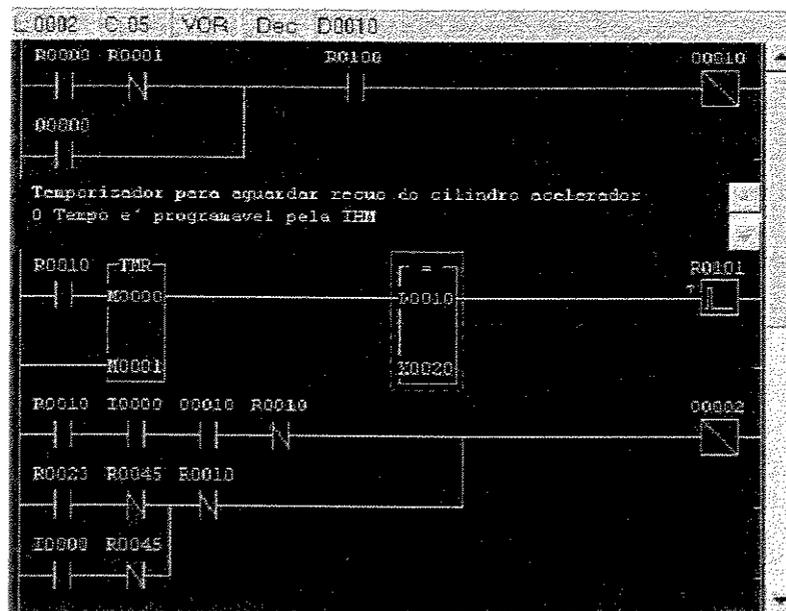
```

Figura 4.4 – Programação utilizando Lista de Instruções (IL).

**ST: “Structured Text”: Texto Estruturado:** Linguagem textual de alto nível similar ao Pascal, porém incorporando uma série de conceitos intuitivos ao engenheiro de automação. Seu uso é

bastante interessante na implementação de procedimentos complexos, que são difíceis de expressar com linguagens gráficas tais como linguagem de algoritmos de otimização de processo e inteligência artificial.

**LD: “Ladder Diagram” - Diagrama Ladder (figura 4.5):** Trata-se de uma linguagem gráfica baseada em símbolos e esquemas elétricos, tais como relês, contatos e bobinas, proporcionando um entendimento intuitivo das funções de intertravamento, sendo muito bem aceita pelos profissionais da área de automação e controle de processos.



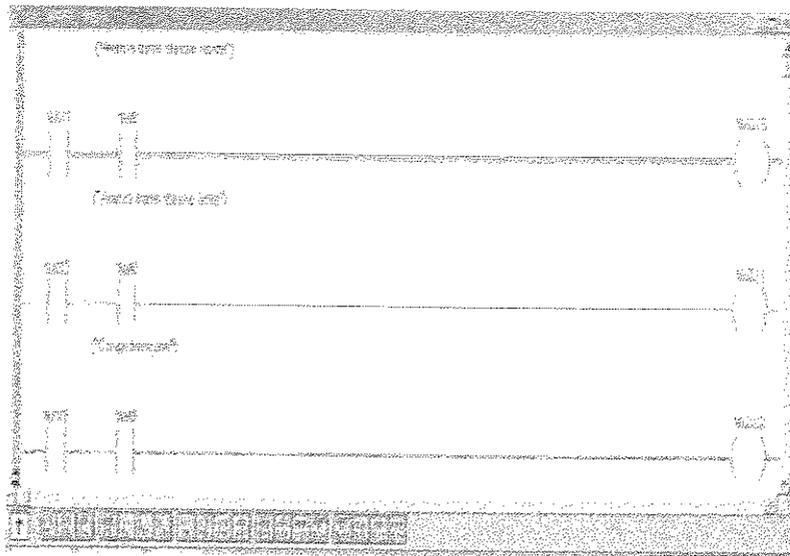


Figura 4.5 – Telas típicas de Diagramas Ladder (LD).

**FDB: “Function Block Diagram” - Diagrama de Blocos de Função (figura 4.6):** Linguagem gráfica que permite ao usuário construir procedimentos combinacionais complexos utilizando-se de blocos padrões como, AND, OR, NOT, etc. Muito utilizado no desenvolvimento de dispositivos automatizados de baixo custo.

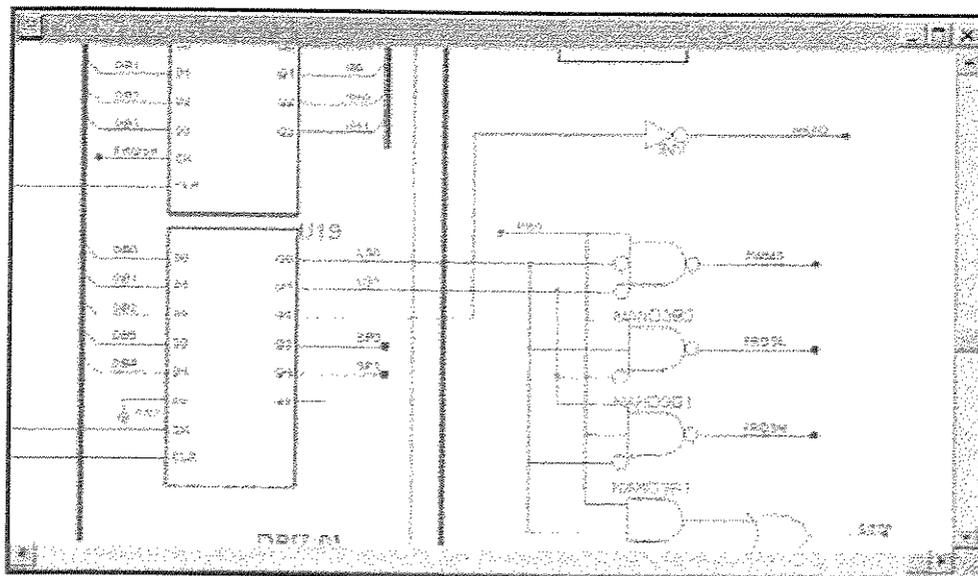


Figura 4.6 – Diagramas de Blocos de Funções (FDB).

**SFC: “Sequential Function Chart” - Diagrama Funcional Seqüencial (figura 4.7):** Também conhecida pelo nome de GRAFCET, divide o processo em um número definido de passos separados por transições. É o núcleo do IEC 61131-3, pois as outras linguagens são utilizadas apenas para descrever as ações realizadas a cada passo, bem como as lógicas combinatórias envolvidas.

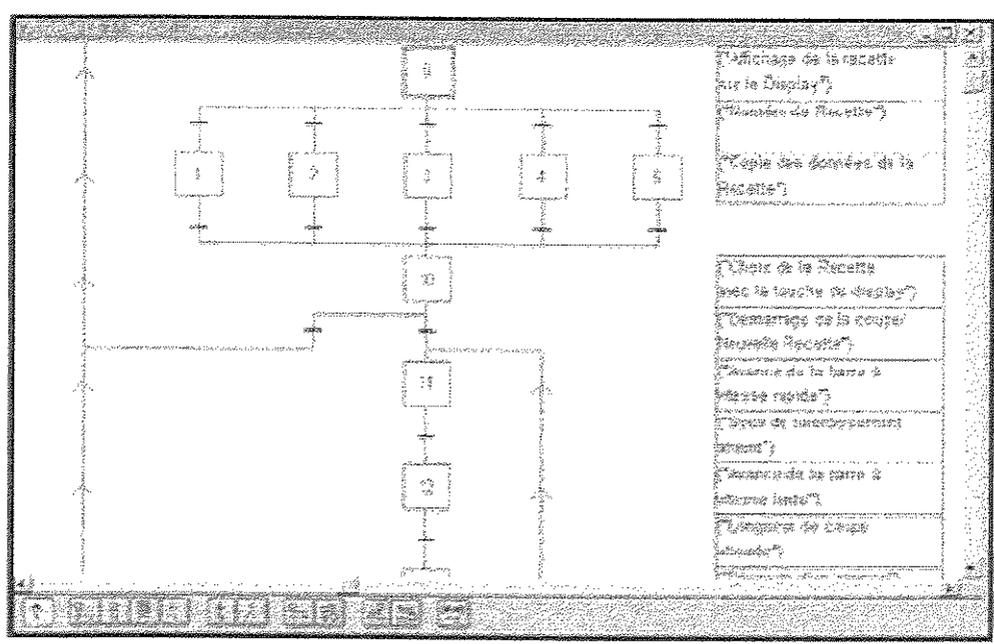
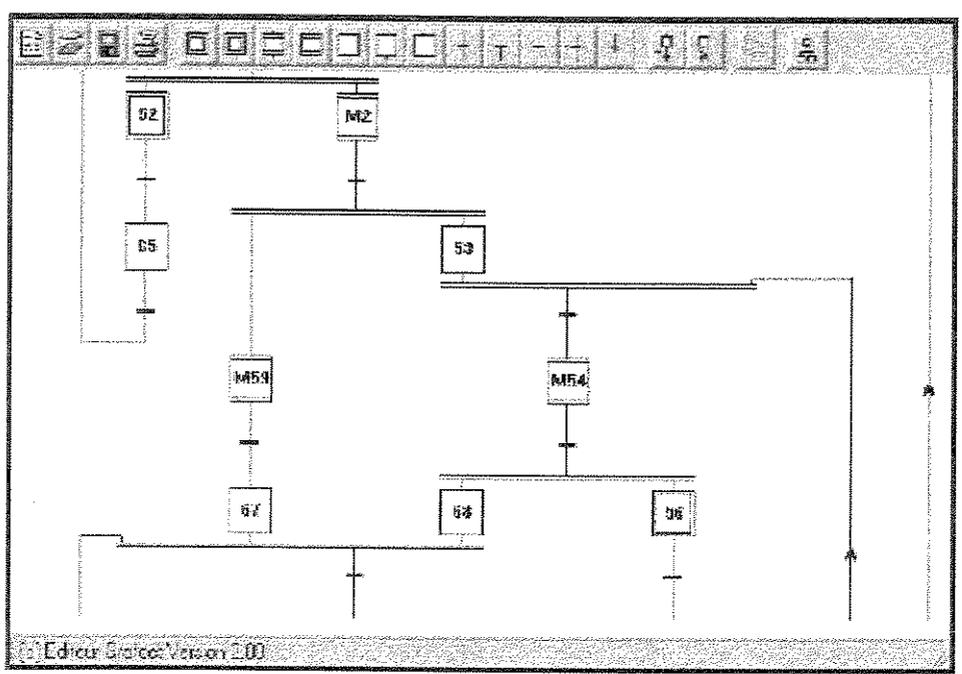


Figura 4.7 – Exemplos de telas de programação utilizando SFC.

#### 4.7 - Programação Estruturada em CLP's utilizando o GRAFCET

A programação de CLP's para Sistemas Automatizados (SA) a partir da utilização do GRAFCET na estruturação do problema assegura ao software uma arquitetura hierárquica. A hierarquia entre os níveis de detalhamento garante que um sub-estado somente dependa dos seus sub-estados, não estando sujeita à forma com que os outros situados no mesmo nível foram implementados, tal procedimento aumenta a confiabilidade como um todo e facilita sua manutenção.

Para a especificação das tarefas de cada posto de trabalho da Plataforma de validação de nosso trabalho e posterior programação do Sistema de Controle, adotamos o GRAFCET (norma IEC 1131-3), que se baseia numa descrição gráfica de sistemas seqüenciais, dividindo o processo em um número definido de etapas separadas por transições.

A razão desta escolha é que esta especificação oferece muitas vantagens aos usuários e programadores, principalmente na modelagem de problemas complexos de automação, pois podemos dividir o problema em várias partes, tornando mais simples a programação, ficando fácil visualizarmos as seqüências de operações, alteração de especificação e a detecção de falhas conceituais no programa, e também a facilidade de que tal sistema de desenvolvimento está disponível comercialmente e atende as exigências de padronização da IEC-1131.

Concluída a parte de modelagem de SA's através do GRAFCET, podemos implementar num CLP que não possua essa especificação a mesma lógica de funcionamento do GRAFCET. Para exemplificarmos o problema, na figura 4.8 é apresentada a implementação num CLP de um AND convergente e um OR divergente.

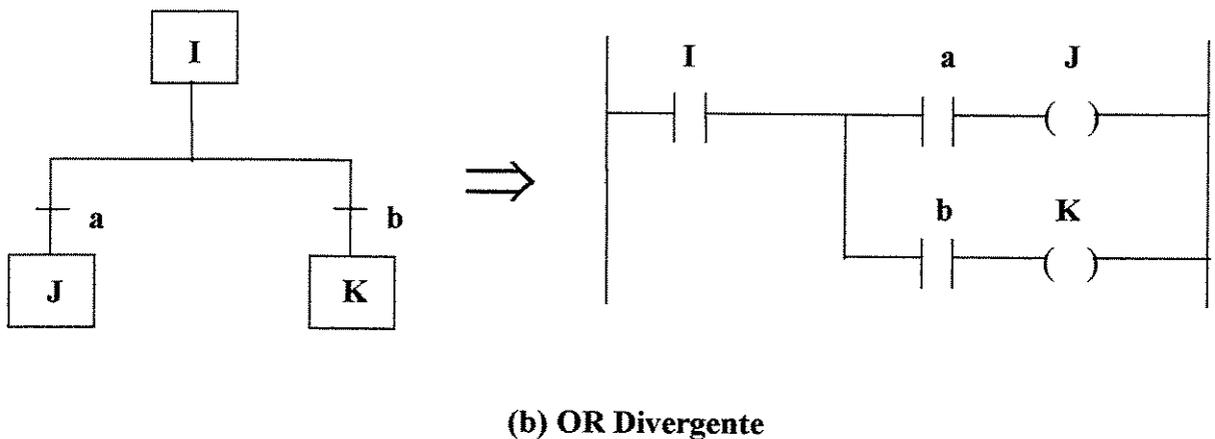
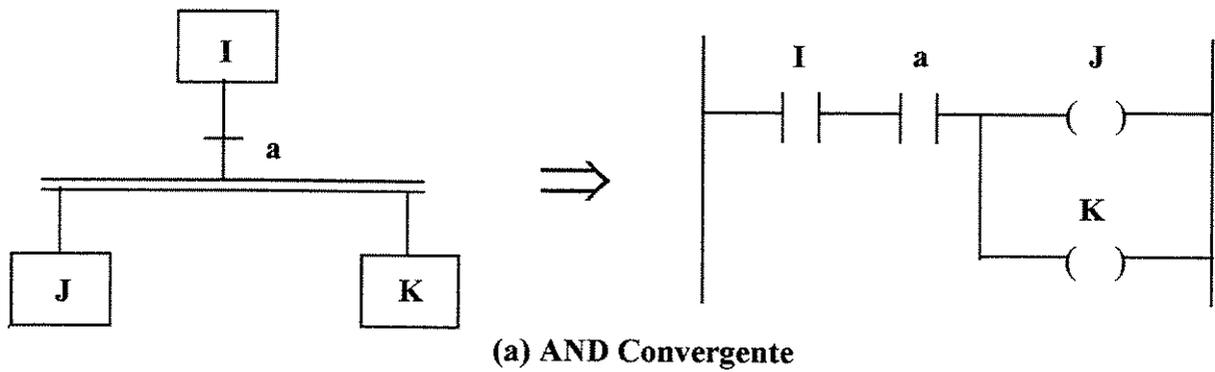


Figura 4.8: Implementação de uma transição utilizando Ladder.

Para validação do problema, o diagrama funcional GRAFCET deverá atender as seguintes exigências:

- Aplicabilidade a todo sistema lógico de controle para descrição de um automatismo industrial, não importando sua complexidade ou tecnologia utilizada (elétrica, eletrônica através de software ou hardware dedicado, mecânica, pneumática, etc.);
- Possibilidade de uma descrição completa do sistema, onde as evoluções poderão ser expressas seqüencialmente, ou seja, a possibilidade de uma decomposição das etapas;
- Possibilidade de ser utilizada na descrição de processos combinatórios, fornecendo assim ao automatismo uma descrição seqüencial mais fácil de ser analisada e compreendida.

#### **4.8 - Grafo de Comando Etapa e Transição - GRAFCET**

A complexidade crescente dos sistemas automatizados industriais implica numa grande dificuldade por parte do usuário, na definição de uma maneira clara, concisa e não ambígua das especificações funcionais associadas a esses sistemas. Esta complexidade tende a aumentar ainda mais, com a utilização de um número elevado de informações de entradas e saídas.

Outro aspecto a ser considerado é a variedade de CLP's existentes no mercado, exigindo o desenvolvimento de programas utilizando um ambiente de programação e ferramentas de descrição adequadas, que permitam o desenvolvimento de tarefas, independente da PC utilizada, e que adicionalmente ofereça a opção de se programar em uma linguagem mais natural para os vários níveis de usuários.

Esta especificação oferece muitas vantagens aos usuários e programadores, principalmente na modelagem de problemas complexos de automação, pois podemos dividir o problema em várias partes, tornando mais simples a programação. Isto torna mais fácil a visualização das seqüências de operações, alteração de especificação e a detecção de falhas conceituais no programa.

O SFC - "Sequential Function Chart" ou Diagrama Funcional Seqüencial, também conhecida pelo nome de GRAFCET, oferece as vantagens mencionadas aos usuários e programadores, principalmente na modelagem de problemas complexos de automação, pois podemos dividir o problema em várias partes, tornando mais simples a programação, ficando fácil visualizarmos as seqüências de operações, alteração de especificação e a detecção de falhas conceituais no programa.

O diagrama funcional GRAFCET deverá atender as seguintes exigências:

- Aplicabilidade a todo sistema lógico de controle para descrição de um automatismo industrial, não importando sua complexidade ou tecnologia utilizada (elétrica, mecânica, pneumática, eletrônica através de software ou hardware dedicado, etc.);

- Possibilidade de uma descrição completa do sistema, onde as evoluções poderão ser expressas seqüencialmente, ou seja, a possibilidade de uma decomposição das etapas;
- Possibilidade de ser utilizada na descrição de processos combinatórios, fornecendo assim ao automatismo uma descrição seqüencial mais fácil de ser analisada e compreendida.

#### **4.8.1 - O GRAFCET na concepção de Sistemas Automatizados**

O GRAFCET permite que um caderno de tarefas seja traduzido em sub-programas, desde que seja mantida a condição de não haver simultaneidade de chamadas a um mesmo sub-programa.

Algumas técnicas utilizadas atualmente para descrever comportamento seqüencial em sistemas automatizados, incluem fluxogramas, diagramas de variáveis de estado, rede de PETRI, diagrama trajeto-passo e o GRAFCET.

O GRAFCET (Grafo de Comando Etapa - Transição) foi criado na França em 1975, através de um grupo de pesquisadores e gerentes industriais, envolvidos com sistemas discretos de grande complexidade, sendo coordenados pela AFCET – “Association Française pour la Cybernétique, Economique, Technique” e posteriormente padronizado pela ADEPA – “Agence Nationale pour le Developpement de la Production Automatisée”, é considerado uma particularização das redes de Petri, pois as redes possuem uma possibilidade de aplicações bem superior às que estão restritos os comportamentos cíclicos das máquinas e sistemas automáticos.

Após ser testado em sistemas educacionais e em empresas privadas francesas, mostrou ser muito interessante e eficaz para representação de sistemas seqüenciais. Em 1988 ele foi incorporado à norma IEC 60848 (Preparação e Diagramas Funcionais para Sistemas de Controle), sob a sigla SFC, conforme publicação 848, e regularizado pela norma Francesa NF C03 190.

Posteriormente, os fabricantes de CLP e produtores de software escolheram o GRAFCET como linguagem de entrada para controle seqüencial booleano e propuseram implementações em computadores e controladores. Seu uso industrial vem se ampliando, assim como o interesse em pesquisá-lo quanto ao valor teórico desse modelo. O nome GRAFCET derivou-se de GRAF,

devido à representação gráfica e, AFCET, que deu suporte ao trabalho de definição, em 1982, onde o GRAFCET foi incorporado como norma pela AFNOR - Association Française de Normalization.

#### **4.8.2 - Elementos do GRAFCET**

O GRAFCET é um modelo de representação gráfica do comportamento de comando de um sistema automatizado. Ele é constituído por simbologias em arcos orientados que interligam as etapas e transições, interpretadas por variáveis de entrada e saída da Parte Comando, identificadas como receptividade de ações e por seqüências de evolução que caracterizam o comportamento dinâmico dos elementos comandados.

O GRAFCET se baseia em um conjunto de definições sobre as quais são estabelecidas suas regras fundamentais, baseadas em álgebra booleana (verdadeiro ou falso). Podemos dizer que ele é um método de descrição do caderno de tarefas de sistemas seqüenciais, formado basicamente por um conjunto de etapas, transições e ligações orientadas. A figura 4.9 representa os principais elementos do GRAFCET.

Esta linguagem de descrição é baseada na descrição do caderno de tarefas do sistema a ser automatizado, este transmite as necessidades do usuário para o fornecedor. Porém, antes de fazermos a representação dos postos da plataforma através do GRAFCET, foi preciso fazer uma descrição funcional de cada um dos posto (caderno de tarefas). Nesta descrição, todas as operações dos elementos que formam a plataforma foram especificadas detalhadamente. Utilizando esta metodologia, a passagem para qualquer tipo de representação de sistemas seqüenciais, se torna bem simplificada.

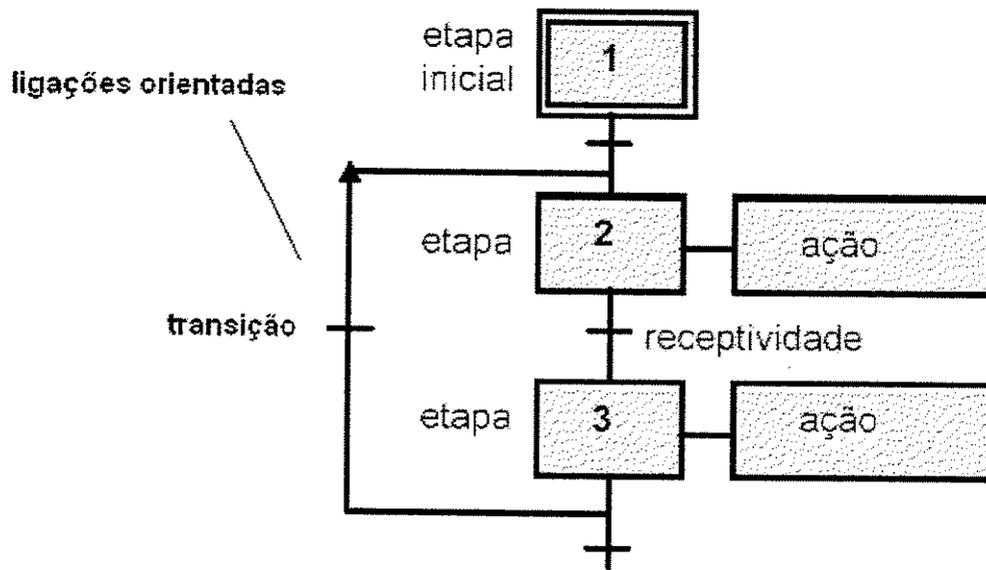


Figura 4.9: Esquema ilustrativo de um GRAFCET.

#### 4.8.2.1 - Etapas

Uma etapa corresponde a uma situação durante a qual o comportamento da totalidade ou parte do sistema em relação às suas entradas e saídas é invariável, ou seja, a Parte Comando permanece numa mesma etapa, enquanto o comportamento do sistema se mantém constante. A inicialização fixa as etapas ativas no início. Estas etapas são ativadas incondicional e referenciadas no GRAFCET duplicando os lados do símbolo correspondente à etapa.

A etapa é representada por um quadrado referenciado numericamente, aos quais estão associados uma ou mais ações (figura 4.10). As ações a serem realizadas quando uma etapa está ativa são descritas de modo literal ou simbólico no interior de um retângulo associado à etapa. Portanto, torna-se necessário representar uma etapa ativa num instante determinado. Isto é feito colocando-se uma marca na parte inferior do símbolo que representa a etapa.

Uma etapa pode ser ativa ou inativa em um determinado instante. Portanto, o sistema será representado pelo conjunto de etapas ativas. As ações associadas a uma etapa, só serão efetuadas quando esta estiver ativada.

A utilização de macro-etapas é possível, sendo representada num diagrama em separado. As macro-etapas são representadas num GRAFCET por um quadrado com traço vertical duplo.

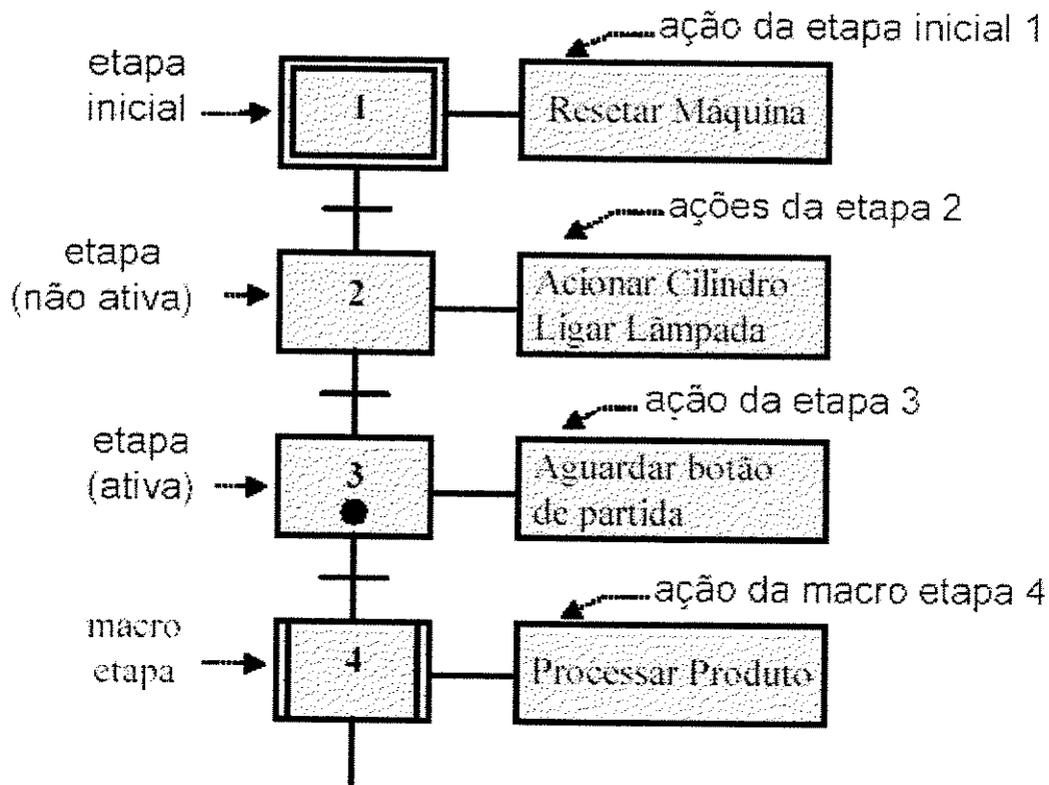


Figura 4.10: Etapas e Ações de um GRAFCET.

A execução de uma determinada ação pode estar associada a uma condição lógica entre uma variável de entrada ou de outra etapa qualquer. Assim, uma etapa mesmo estando ativa, pode existir “ações condicionais” que não sejam executáveis, pois sua condição é momentaneamente falsa.

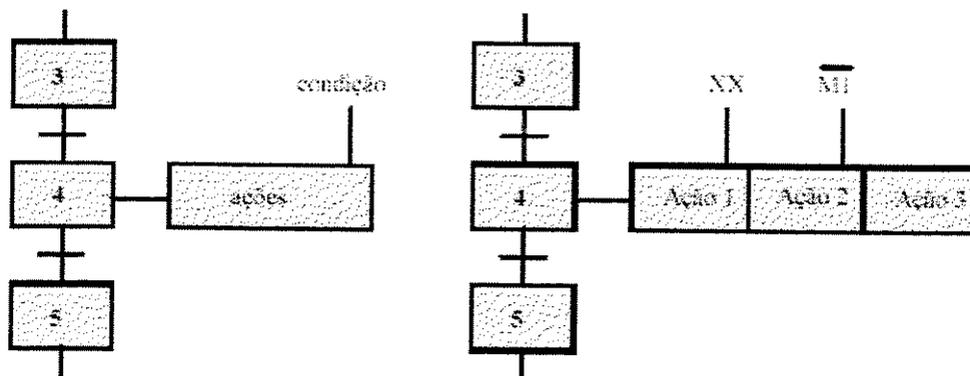


Figura 4.11: Ação Condicional num GRAFCET.

A figura 4.11 apresenta uma situação, onde quando a etapa quatro estiver ativa, a ação um será executada se a variável XX for verdadeira, a ação dois será executada se a condição M1 for falsa, e a ação três será executada incondicionalmente, assim que a etapa quatro tornar ativa.

#### 4.8.2.2 – Tipos de ações associadas às Etapas

Normalmente ações devem ser associadas às etapas. As ações podem ser classificadas como:

- a) **Condicionais:** A execução de uma ação pode ser submissa a uma condição lógica entre variável de entrada ou de outra etapa, isto é, mesmo o estado de uma etapa sendo ativo pode haver ações condicionais que não sejam executadas, pois sua condição é momentaneamente falsa.
- b) **Impulsionais.** A ativação da ação ocorrerá durante um tempo determinado, quando a etapa torna-se ativa;
- c) **Contínuas:** A ação permanece sendo executada enquanto a etapa estiver ativa.

#### 4.8.2.3 – Transições e Receptividades

Transições são funções lógicas que coordenam a evolução entre as etapas. Em um determinado instante uma transição pode ser válida ou não. A cada transição é associada uma receptividade, que é a condição lógica que permite distinguir entre todas as informações disponíveis num dado instante, apenas aquelas que permitem a evolução da Parte Comando. Ela é representada por um traço perpendicular aos arcos orientados e indica uma provável evolução do GRAFCET de uma situação para a posterior.

As receptividades associadas às transições são escritas numa forma lógica (figura 4.12), sendo uma função de conjunto de informações exteriores, de variáveis auxiliares do estado ativo ou inativo de outras etapas.

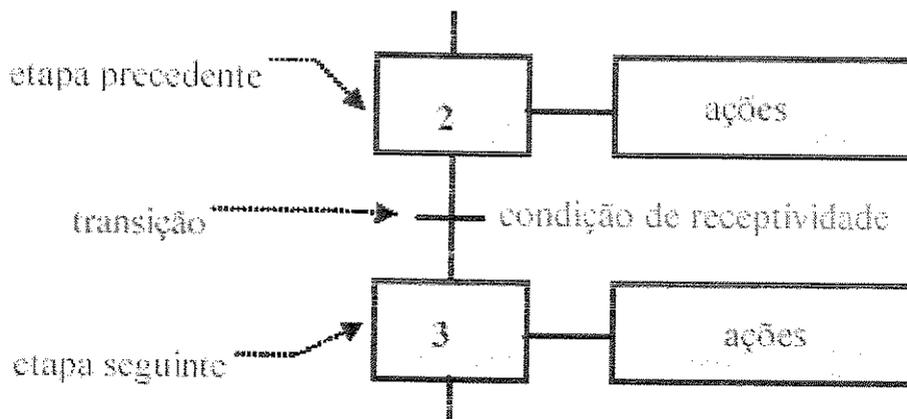


Figura 4.12: Transição e Receptividade de um GRAFCET.

Quando a transição é válida, possibilita a ativação das etapas destino e a desativação das etapas que a precedem. A receptividade pode ser influenciada pelo tempo, isto é, um temporizador será iniciado pela ativação da etapa especificada, desde que a receptividade associada à etapa anterior esteja válida (figura 4.13).

Para que o tempo possa intervir numa receptividade, basta indicar após a referência  $t$ , a sua origem e duração, a origem será o instante do começo da última ativação de uma etapa anterior. A simbologia é descrita da seguinte forma:  $t$ / origem/ duração.

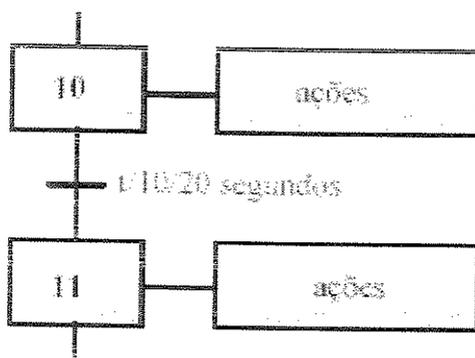


Figura 4.13: Exemplo de Temporização num GRAFCET.

#### 4.8.2.4 – Principais Funções associadas às Receptividades

- a) **Funções Lógicas:** As receptividades podem ser compostas por mais de uma variável, ligada através de uma das funções lógicas AND, OR ou NOT. As variáveis podem ser representadas por etapa, transição, entrada ou saída.
- b) **Temporizador:** Uma receptividade pode se tornar verdadeira, após um determinado tempo de ativação de uma determinada etapa.
- c) **Mudança de Estado:** Uma receptividade pode avaliar ou mudar o estado de uma variável. As variáveis podem ser uma determinada etapa, transição, entrada ou saída.

#### 4.8.2.5 - Ligações Orientadas

As ligações orientadas indicam o caminho de evolução de estado do GRAFCET. São representadas por linhas que possuem sentido de orientação de cima para baixo (figura 4.14). Quando o sentido de evolução inverso será necessário a inclusão de uma seta.

As ligações entre as etapas são orientadas e irreversíveis. As ligações entre as etapas podem ser sequenciais, com Divergências em OU, com Divergências em E, com Convergências em OU e com Convergências em E.

- a) **Ligação Sequencial:** Numa ligação sequencial, a transição diz-se validada quando a etapa precedente está ativa. A figura 4.14 mostra que para a transição seja transposta é necessário que esta esteja validada e que simultaneamente a receptividade R1 que lhe está associada seja verdadeira. Neste caso, a etapa precedente é desativada e a etapa seguinte é ativada.

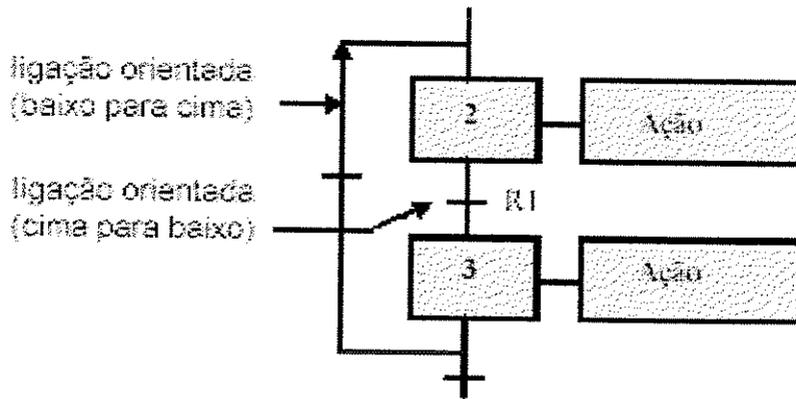


Figura 4.14: Ligações Orientadas Sequenciais.

- b) **AND Divergente:** Uma distribuição possui seu arco de ligação de saída conectado a duas ou mais etapas que se tornam ativas ao mesmo instante, conforme mostra a figura 4.15.

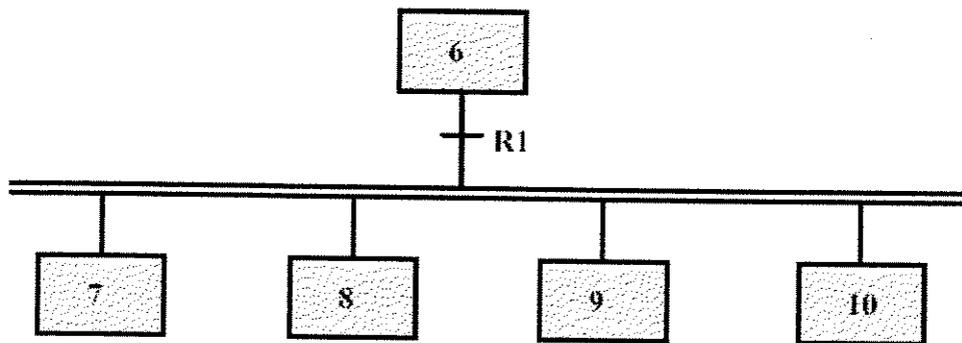


Figura 4.15: Ligação Orientada AND Divergente.

- c) **AND Convergente:** Uma transição possui seu arco de ligação de entrada conectado a duas ou mais etapas que deverão estar ativas em um mesmo instante, para que a receptividade seja avaliada, conforme mostra a figura 4.16.

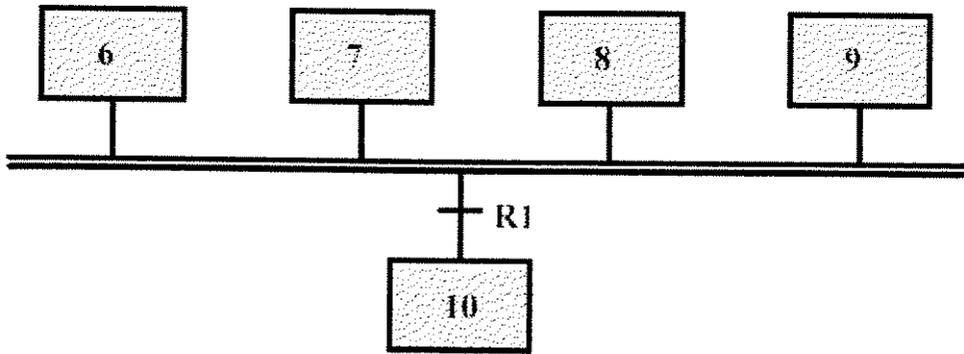


Figura 4.16: Ligação orientada AND Convergente.

- d) **OR Divergente:** Uma etapa pode estar conectada a duas ou mais transições que serão testadas em um mesmo instante podendo ou não ser ativadas, de acordo com a avaliação de suas receptividades, conforme mostra a figura 4.17.

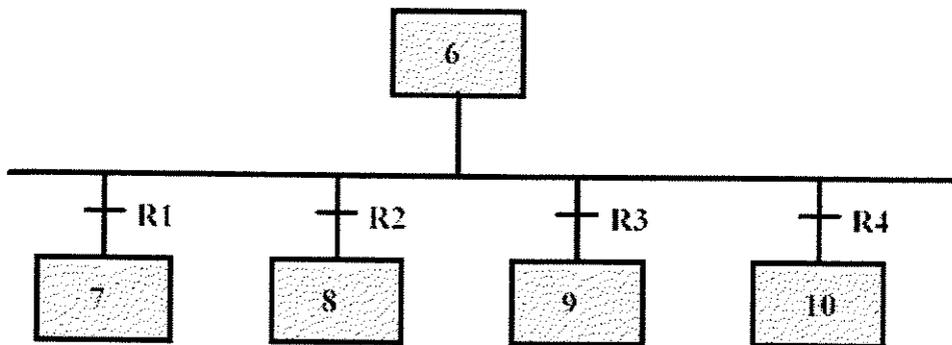


Figura 4.17: Ligação Orientada OR Divergente.

- e) **OR Convergente** Uma ou mais transições estão com seus arcos de ligação de saída conectados à mesma etapa, a qual se tornará ativa assim que primeira transição se tornar verdadeira, conforme mostra a figura 4.18.

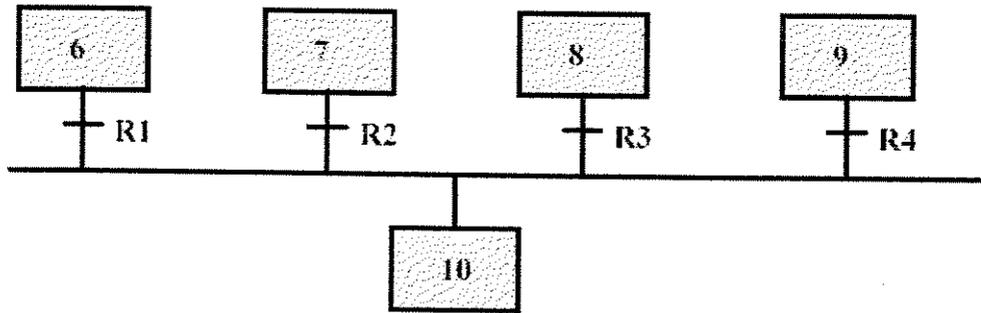


Figura 4.18: Ligação Orientada OR Convergente.

#### 4.8.2.6 – Salto de Etapas

As ligações seqüenciais podem representar salto de etapas com a retomada das etapas anteriores. O salto condicional permite saltar uma ou mais etapas. A figura 4.19 mostra que a receptividade R1 for verdadeira salta-se as etapas cinco, seis e 7, passando diretamente da etapa quatro para a etapa oito, deixando de executar as ações 11, 12 e 13.

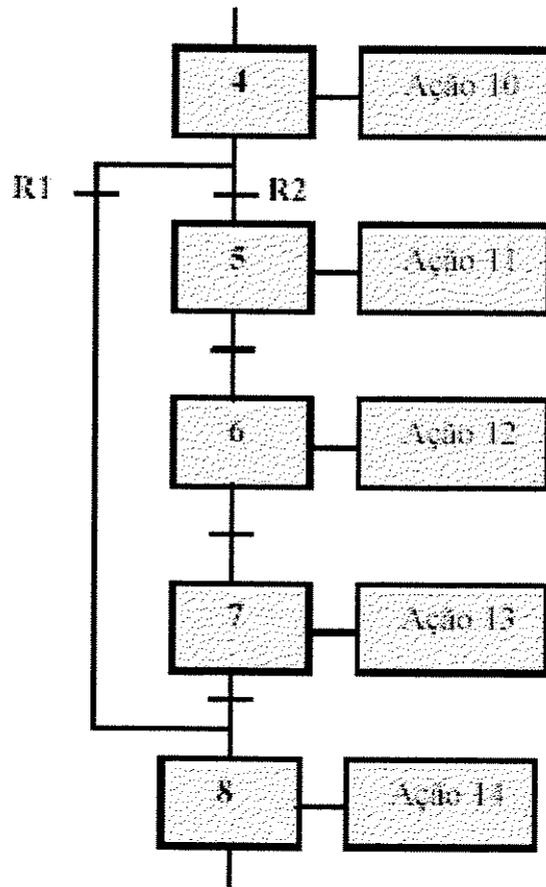


Figura 4.19: Representação de um Salto de Etapas.

#### 4.8.2.7 – Retomada de Etapas

O GRAFCET, representado na figura 4.20, apresenta um exemplo de retomada de etapas, permitindo retornar uma ou mais etapas tantas vezes enquanto uma determinada receptividade for verdadeira. Por exemplo, enquanto a receptividade R3 for verdadeira retorna-se as etapas 41, 42 e 43 e conseqüentemente as ações 41, 42 e 43 associadas, até que a receptividade R3 seja falsa e a receptividade R4 seja verdadeira.

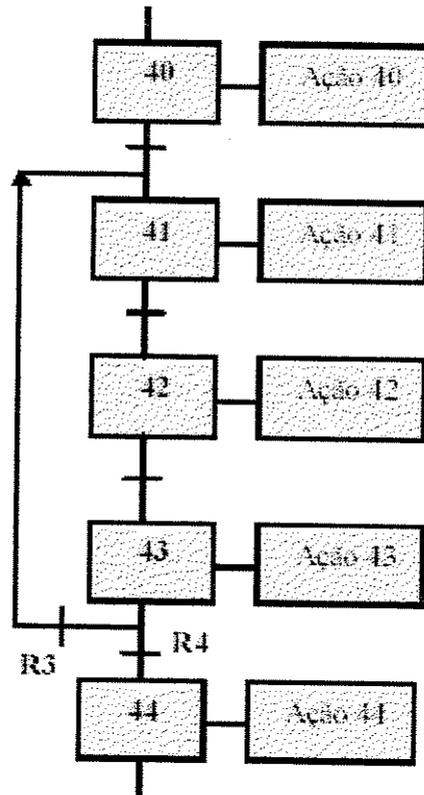


Figura 4.20: Retomada de Etapas.

### 4.8.3 - Regras de Evolução

Com relação às regras do GRAFCET, pode se dizer que elas são representadas pela alternância entre etapas e transição e vice-versa. Cabe ser ressaltado que nenhuma ação é realizada ou nenhuma receptividade é avaliada em um espaço de tempo nulo, isto é estas operações não são instantâneas.

O comportamento do GRAFCET é baseado em cinco regras de evolução (fig.4.21), as quais são:

1. A inicialização fixa as etapas ativas no início do funcionamento;
2. Uma transição pode ser validada ou não validada;
3. A transposição de uma etapa provoca a ativação de todas as etapas imediatamente a seguir e a desativação de todas as etapas imediatamente precedentes;
4. Várias transições simultaneamente transponíveis são simultaneamente transpostas;

5. Se no decurso do funcionamento, uma mesma etapa deve ser desativada e ativada simultaneamente, ela permanece ativa.

• **Regra 1 : Situação Inicial**

No início de funcionamento somente as etapas iniciais estão ativas. Existe pelo menos uma etapa inicial, sendo todas incondicionalmente ativadas no início do funcionamento. As etapas iniciais podem estar no "início" efetivo e/ou no "interior" do sequenciamento do GrafCel.

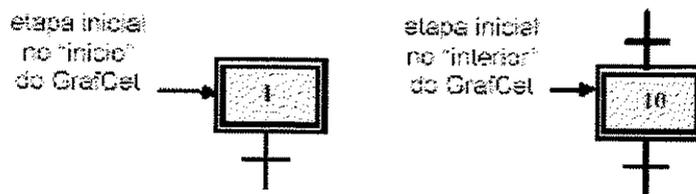


Figura - Representação de Etapas Iniciais

• **Regra 2 : Validação de uma Transição**

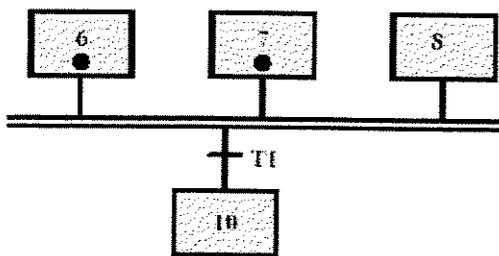


Figura - Transição Não Válida

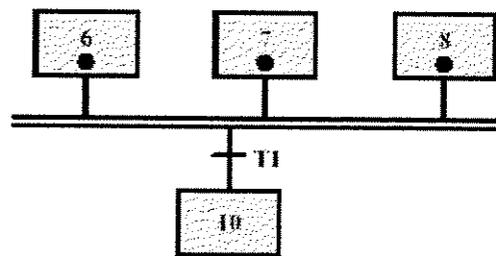


Figura - Transição Válida

• **Regra 3 : Evolução de Etapas Ativas**

Assim que uma transição é validada, ocorre a transposição de uma transição. Neste momento todas as etapas que precedem a transição são imediatamente desativadas, e todas as etapas que se seguem são imediatamente ativadas.

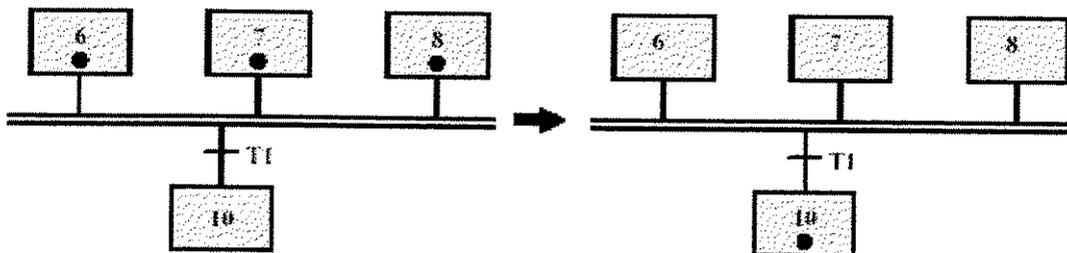


Figura - Antes da Evolução

Figura - Depois da Evolução

Figura 4.21: Regras de Evolução

• **Regra 4** : Transposição Simultânea de Transições

Todas as transições simultaneamente transponíveis são simultaneamente transpostas.

• **Regra 5** : Ativação e desativação simultânea de um passo

Uma etapa mantém-se ativa se esta for simultaneamente ativada e desativada. Ou seja, se durante o funcionamento do sistema, uma mesma etapa deve ser desativada e ativada simultaneamente, ela permanece ativa.

Cabe ressaltar que nenhuma ação é realizada ou nenhuma receptividade é validada em um espaço de tempo nulo. Isto é, estas operações não são instantâneas.

A figura 4.22 exemplifica os elementos do GRAFCET (ações, receptividades e ligações orientadas), que tornam melhor visualização e descrição de um sistema automatizado.

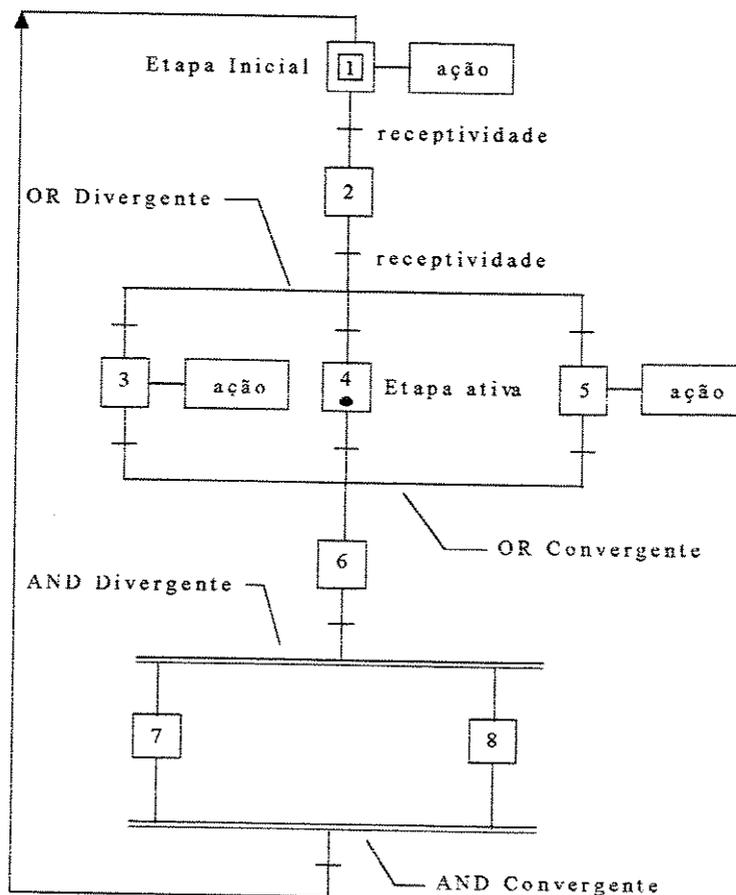


Figura 4.22: Regras de Evolução de um GRAFCET.

#### 4.9 - Controlador Lógico Programável – CLP

O PLC (Programmable Logic Controller) é também conhecido no Brasil como CLP (Controlador Lógico Programável) ou CP (Controladores Programáveis), é um dispositivo físico, eletrônico que possui uma memória interna programável, capaz de armazenar seqüências de instruções lógicas binárias além de outros comandos.

Historicamente podemos dizer que os primeiros CLP's surgiram em 1968 quando a Divisão Hydromatic da GM determinou os critérios para projeto do CLP, sendo que o primeiro dispositivo a atender às especificações foi desenvolvido pela Gould Modicon em 1969. Em 1971, ocorreram as primeiras utilizações fora da indústria automobilística. Em 1975, foi introduzido o controlador PID. Até 1977 eram construídos com componentes eletrônicos discretos; a partir desta época estes passaram a ser substituídos por microprocessadores, sendo daí em diante largamente aceitos industrialmente.

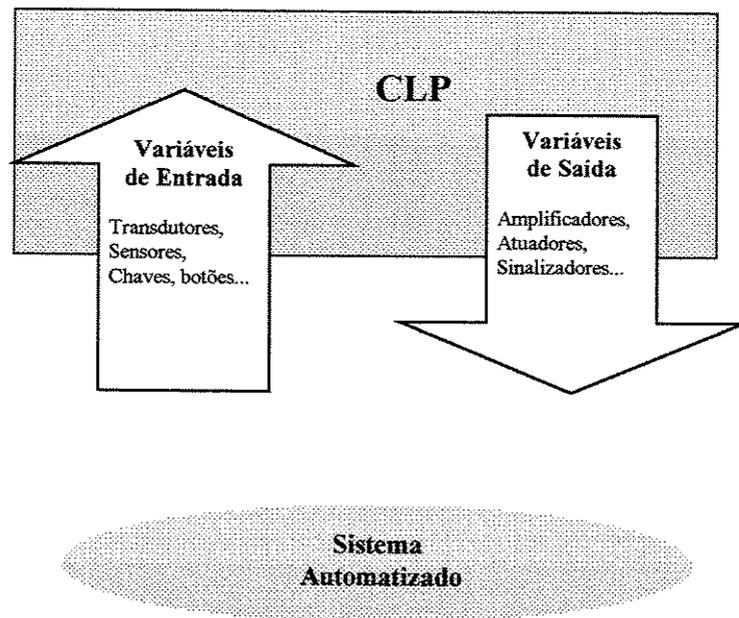


Figura 4.23 - Aplicação Genérica do Controlador Lógico Programável (Georgini, 2000).

Um CLP possui dispositivo para conectar-se com outros equipamentos externos o que permite o recebimento e/ou envio de variáveis de entrada ou variáveis de saída (figura 4.23), tais que:

- **Variáveis de entrada:** são sinais externos recebidos pelo CLP, os quais podem ser oriundos de fontes pertencentes ao processo controlado ou de comandos gerados pelo operador. Tais sinais são gerados por dispositivos como sensores, chaves ou botoeiras, transdutores, etc.
- **Variáveis de saída:** são os dispositivos controlados por cada ponto de saída do CLP. Tais pontos poderão servir para intervenção direta no processo controlado por acionamento próprio, ou também poderão servir para sinalização de estado em painel sinótico. Podem ser utilizados como exemplos de variáveis de saída, para o acionamento de válvulas, solenóides, displays, chaves e até mesmos sinais para outros CLP's, dentre outros.

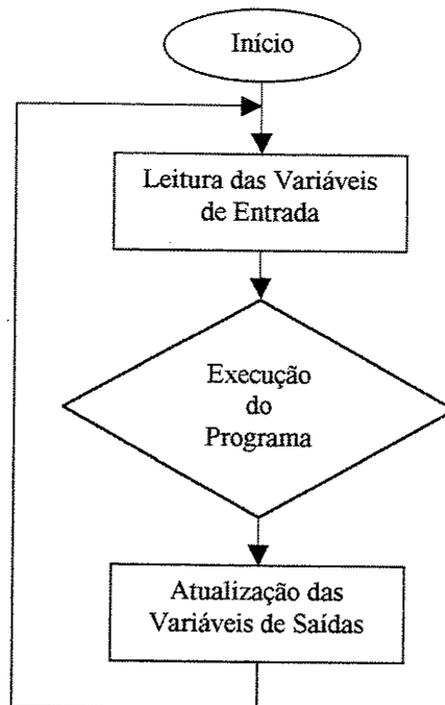


Figura 4.24 – Funcionamento de um CLP.

O princípio de funcionamento fundamental do CLP é a execução dentro de uma CPU de um programa (Firmware), desenvolvido pelo fabricante, que realiza sistematicamente ações de leitura das variáveis de entrada através do módulo de entrada do CLP. Em conjunto executa um programa armazenado e desenvolvido pelo usuário, onde o mesmo é destinado para controle e monitoração de tarefas específicas, no qual, através de uma lógica, faz ou não intervenções nas variáveis de saída através do módulo de saída do CLP, conforme mostra a figura 4.24.

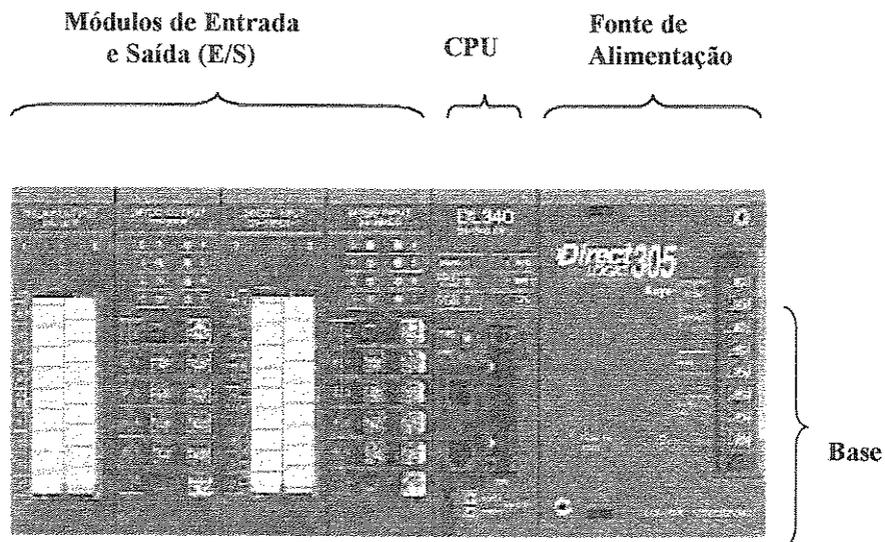


Figura 4.25 – Exemplo de um CLP industrial Koyo™.

Os Controladores Lógicos Programáveis industriais possuem a seguinte arquitetura básica:

1. Unidade Central de Processamento (CPU - *Central Processing Unit*): integra esta unidade o processador (microprocessador, processador dedicado ou micro-controlador), o sistema de memória (ROM e RAM) e os circuitos internos;
2. Fonte de Alimentação: parte responsável pelo fornecimento de tensão de alimentação fornecida à CPU e aos circuitos / módulos de E/S (entrada e saída);
3. Circuitos de E/S (*Input/Output – I/O*): circuitos para o recebimento ou envio de sinais. Podem ser discretos (sinais digitais, contatos normalmente abertos ou fechados) ou

sinais analógicos.

4. Base: é responsável em proporcionar conexão mecânica e elétrica entre a CPU, os módulos de entrada e/ou saída e a fonte de alimentação. Possui o barramento de comunicação entre eles, no qual os sinais de dados, endereço, controle e tensão de alimentação estão presentes.

Para a existência da comunicação do CLP com o PC é necessário que dois aspectos sejam observados tanto ao nível de hardware, como de software.

Quando se fala em hardware de comunicação, normalmente as CPU's possuem pelo menos uma porta de comunicação serial que pode ser conectada a dispositivos externos. A quantidade pode variar de acordo com o modelo e fabricante de CLP's.

Através das portas de comunicação pode-se estabelecer uma conexão entre o usuário e o controlador ou mesmo interligar a outras CLP's. Nesta porta pode-se interligar um computador (PC) ou um dispositivo portátil de programação, os quais, quando utilizados, permitem que se façam autodiagnóstico, programação ou reprogramação de instruções, alterações de configurações do dispositivo, monitoração, gravação e apagamento da memória.

A comunicação entre o computador e um CLP é realizada através de uma porta serial padrão RS-232, utilizadas para transmissão de dados até 15m. Todavia, alguns CLP's utilizam o padrão RS-422 na qual a transmissão de dados é feita a distâncias maiores (até 1200m). Suas vantagens são: maior velocidade, maior imunidade a ruídos e comunicação do tipo "full-duplex", que podem enviar e receber dados simultaneamente, necessitando apenas de conversor RS-232/RS-422. Existe ainda CLP's que utilizam padrão próprio e necessitam de interfaces dedicadas instaladas no PC.

O outro aspecto mencionado acima é o software, neste caso estamos falando em protocolo de comunicação, o qual determina a forma de transmissão dos dados, ou seja, ele é responsável pelo sinal de comunicação entre a CLP e o PC. Os protocolos são fornecidos pelos fabricantes os quais geralmente adotam Protocolos de Comunicação próprios, os quais normalmente são conhecidos como "Protocolo Proprietário". Alguns são "abertos" (o usuário pode ter acesso ao

formato da transmissão de dados utilizada, podendo desenvolver seus próprios programas de comunicação) e outros o fabricante não fornece nenhum dado sobre o seu Protocolo Proprietário.

Entretanto, existe a possibilidade de certos CLP's suportarem protocolos padrões como, por exemplo, o Modbus, que permite a comunicação com dispositivos e softwares adotador por outros fabricantes, além de permitir a conexão em rede.

As linguagens mais utilizadas na programação para CLP's podem ser representadas em três formas:

- Redes de contato (Ladder): similar aos esquemas elétricos de reles e contatores;
- Blocos funcionais similares aos esquemas elétricos de circuitos digitais (AND, OR, NOT, XOR, etc.);
- Lista de instruções: é a programação diretamente apoiada nas funções lógicas binárias e se assemelha bastante aos programas escritos em Assembler.

A mais utilizada é a linguagem Ladder (figura 4.26), que está presente praticamente em todos os CLP's disponíveis no mercado. Esta linguagem baseia-se nas redes de contatos dos esquemas elétricos, sendo por isso, uma linguagem gráfica de fácil manipulação e, mesmo existindo diferenças entre os fabricantes quanto às representações das instruções, são facilmente assimiladas pelo usuário.

Na linguagem Ladder, cada contacto ao assumir dois estados (fechado ou aberto), representa uma variável booleana, ou seja, uma variável que assume dois estados: verdadeiro ou falso. Como mostrado na figura 4.26, temos os símbolos:

- [ ]- que significa contato normalmente aberto ao qual a variável associada é um;
- [/]- contato normalmente fechado o estado da variável associado é zero.

Cada linha "Ladder" permite programar desde funções binárias até funções digitais complexas.

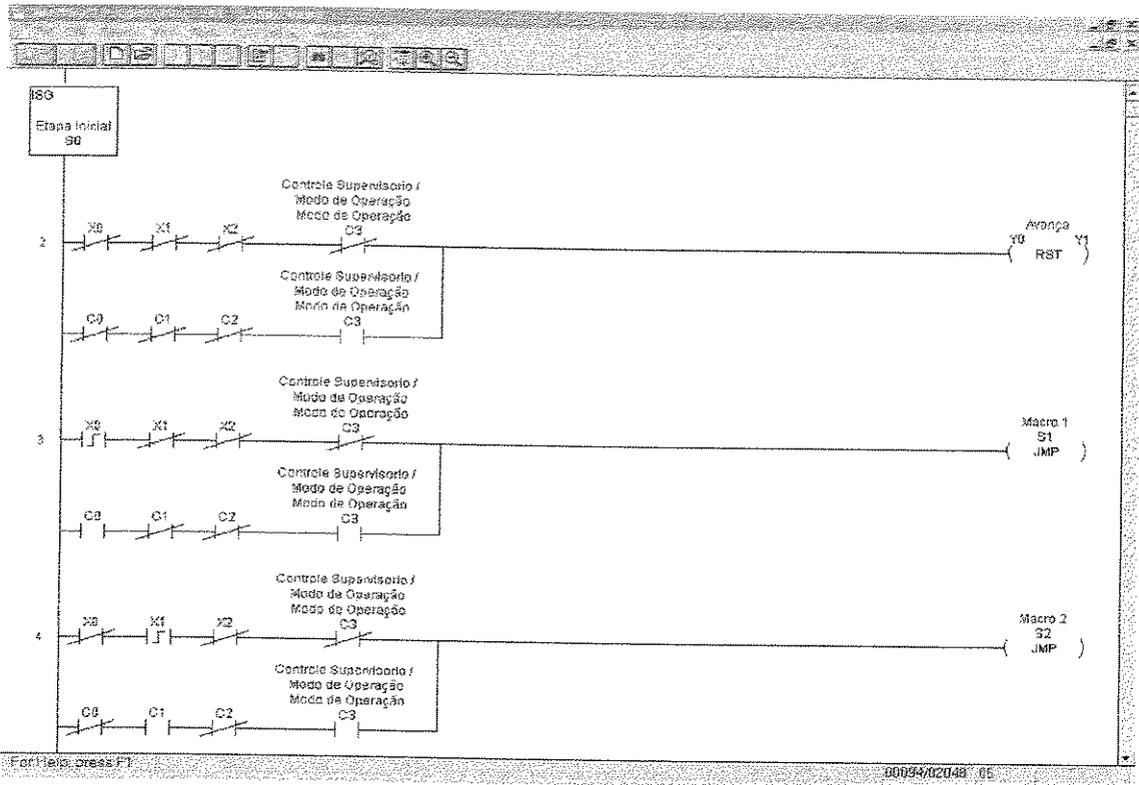


Figura 4.26 – Programa em Ladder (DirectSoft).

#### 4.10 – Utilização de Sistemas Supervisórios em Automação

A aplicação do modelo GRAFCET na estruturação do problema assegura ao software uma arquitetura hierárquica. A hierarquia entre os níveis de detalhamento garante que um sub-estado somente dependa dos seus sub-estados, não estando sujeita à forma com que os outros situados no mesmo nível foram implementados, tal procedimento aumenta a confiabilidade como um todo e facilita sua manutenção e implementação de um Sistema Supervisório, que deverá possuir as seguintes características:

- Poder ser desenvolvido com software “popular” (baixo custo e amplamente difundido), de grande interação com aplicativos Windows e com muitas bibliotecas disponíveis no mercado;
- Multi-tarefa (multi-tasking, multi-threading);
- Monitoramento através de WAN (Wide Area Networking);
- Utilização de Banco de Dados Access para acompanhamento do processo de montagem;

Num processo industrial, seja qual for o produto final, é necessário a ação do homem para fabricação de produtos comercializados e consumidos por todos com exigência cada vez maior da qualidade e rapidez de entrega. Os controles ficam então, nas mãos de operadores que variam com seu comportamento tanto emocional como físico, não garantindo a mesma qualidade do produto em um mesmo lote de produção.

A utilização de Sistemas Supervisórios para o controle e monitoramento de variáveis é uma ferramenta necessária para um bom desempenho de controle, desde pequenas plantas de processo produtivo até as mais complexas, fazendo com que se ganhe produtividade e qualidade de produto, aumentando a competitividade das empresas no mercado.

Assim a interface homem-máquina é uma necessidade constante. A primeira dificuldade que surge numa automatização está no claro entendimento do processo, de modo que numa fase posterior possamos escrevê-lo na forma de um caderno de especificação.

O rápido desenvolvimento do controle automático industrial requer um pessoal de operação, manutenção e projeto, que tenha uma firme compreensão da constante físico-matemática da teoria de controle. O uso de controladores micro-processados e computadores aplicados ao controle automático possibilitaram o crescimento na produção industrial e um aumento de qualidade dos produtos.

Um sistema supervisório permite que o operador de uma planta industrial tenha em um único local, uma sala de controle, por exemplo, todos os controles necessários, para fabricação de um determinado produto, controle de nível, posição, estado, pressão, temperatura, vazão, etc.

Os elementos de medição destas variáveis permanecem no campo, enviando sinais, padronizados de corrente para os controladores e sendo monitorados pelo operador através do Sistema Supervisório, variando a quantidade de instrumentos ou malhas de controle a necessidade da planta ou número de controles necessários para a fabricação de um determinado produto.

#### 4.10.1 – Utilização de Sistemas SCADA em Automação

Um Sistema Supervisório é normalmente designado do tipo SCADA - *Supervisory Control and Data Aquisition*. Os primeiros sistemas SCADA, basicamente telemétricos, permitiam informar periodicamente o estado corrente do processo industrial, monitorando sinais representativos de medidas e estados de dispositivos, através de um painel de lâmpadas e indicadores sem que houvesse qualquer interface de aplicação com o operador.

Com a evolução tecnológica, os computadores assumiram um papel de gestão na recolha e tratamento de dados, permitindo a sua visualização num “écran” e a geração de funções de controle complexas.

Atualmente os sistemas SCADA utilizam tecnologias de computação e comunicação para automatizar o monitoramento e controle dos processos industriais, efetuando o recolhimento dos dados em ambientes complexos, eventualmente dispersos geograficamente, apresentando, de modo amigável para o utilizador, com recursos as interfaces Homem-Máquina.

Os sistemas SCADA têm aplicações em campos cada vez mais vastos, podendo ser encontrados em diversas áreas tais como: indústria de celulose, petrolíferas, hidroelétricas, têxtil, metalúrgica, automotiva, eletrônica entre outras.

Estes sistemas revelam-se de crucial importância na estrutura de gestão das empresas. Diante disto, eles deixaram de serem vistos como mera ferramenta operacional, ou de engenharia, e passaram a ser vistos como uma importante fonte de informação.

Num ambiente industrial cada vez mais complexo e competitivo, os fatores relacionados com a disponibilidade e segurança da informação assumem elevada relevância tornando-se necessário garantir que a informação esteja disponível e segura quando necessária, independentemente da localização geográfica. Tornam-se, portanto necessário implementar mecanismos de acessibilidade, mecanismos de segurança e mecanismos de tolerância à falhas.

Os sistemas SCADA melhoram a eficiência do processo de monitoração e controle disponibilizando em tempo útil o estado atual do sistema através de um conjunto de previsões, gráficas e relatórios de modo a permitir a tomada de decisões operacionais apropriadas, quer automaticamente, quer por iniciativa do próprio operador.

#### 4.10.2 – Principais Características de um Sistema Supervisório

A utilização de Sistemas Supervisórios é cada vez mais imprescindível no contexto da Automação. Dentro os diferentes Sistemas Supervisórios existentes no mercado podem relacionar a seguir alguns muito utilizados em aplicações industriais:

*Wizcon (Emation)* - <http://www.emation.com/> ou <http://www.softbrasil.com.br/>

*Ifix (Intellution)* - <http://www.intellution.com/>

*Intouch* - <http://www.wonderware.com/>

*Elipse* - <http://www.elipse.com.br/>

*Cimplicity (GE Fanuc)* - <http://www.gefanuc.com/>

*ActionView* - <http://www.spinengenharia.com.br/>

*Entre outros: Unisoft, Factory link*

As principais características de um Sistema Supervisório são:

- Robustez: Multi- Tarefa Preemptivo, Multi- Threading, Crash-Protection.
- Multi-Plataforma: OS/2, NT e Windows 95.
- Conectividade I: Redes, DDE, Drivers de Comunicação.
- Segurança: Hot Back-up
- Identificação Automática de Redes: TCP/IP, IPX/SPX, NET-BIOS
- Conectividade II: Banco de dados compartilhável e configurado.
- Expandibilidade: Modelos Escolares
- Inovador: Interface Gráfica
- Facilidade de Uso: Configuração On-Line
- Performance: Sistema de 32 bits
- Adaptabilidade: ToolKits em C e REXX

Diante disso, um Supervisor industrial contempla os seguintes aplicativos:

- Editor de Imagens ON-LINE
- Editor de Alarmes ON-LINE
- Editor de Macros – programas de gerenciamento
- Definição de Gates (monitoramento e controle de variáveis)
- Gráficos de Tendências
- Editor de receitas
- Geração de Relatórios de formato livre
- Linguagem para automatização / controle de processos
- Suporte á redes de comunicação
- Diferentes drivers para comunicação com outros equipamentos de automação
- Acesso SQL ao banco de dados
- Banco de dados de formato configurável
- Estruturação em camadas (layers) específica para diferentes níveis de informação
- Zoom elaborado
- Operação por autorização

#### **4.10.3 – Arquitetura de Comunicação**

O Supervisório oferece ferramentas para troca de dados com outros aplicativos. A conectividade com banco de dados, a geração de aplicativo personalizado e os padrões de interface de dados estão entre estas ferramentas do tipo SQL & ODBC (Conectividade Aberta para Banco de Dados).

O módulo de conexão do Supervisório oferece meios para a conexão de aplicativos de banco de dados populares através da interface ODBC da Microsoft, permitindo a configuração de troca de dados com outros aplicativos e bancos de dados, inclusive o Servidor SQL da Microsoft, Sybase e Oracle.

O Supervisório possibilita a criação de consultas SQL ou ODBC baseadas em eventos para leitura de dados de tabelas de banco de dados, como também escrever dados do Supervisório em tempo real e histórico para tabelas SQL.

O Supervisório permite ao usuário definir comandos SQL com valores de *tag* como parâmetros embutidos. Cada comando é atribuído a um trigger que controla quando um comando será executado.

Além de atualizar as tabelas definidas pelo usuário, o Supervisório pode recuperar as informações de bancos de dados comuns e salvá-las nas receitas do Supervisório. Este tipo de transferência de dados envia ordens de produção de sistemas de negócios diretamente para o chão de fábrica.

Para efeitos de exemplificação, o sistema Supervisório WIZCON™, disponível no LAR-UNICAMP, possui os seguintes aplicativos básicos:

### **APIs - Conjunto de Funções para Desenvolvimento de Programa Customizado**

O Kit de Desenvolvimento de Software (Software Development Kit - SDK) do Supervisório oferece um grupo de APIs, permitindo o desenvolvimento de programas complementares em Visual Basic ou C++ customizados e baseados em eventos.

### **Suporte através do OPC**

O Supervisório oferece suporte ao cliente OPC e às interfaces do servidor, conectando os aplicativos a uma grande variedade de servidores OPC disponíveis, além de fornecerem dados aos clientes OPC. Como cliente, o Wizcon pode conectar-se a qualquer servidor OPC;

Como servidor OPC, o Supervisório pode fornecer dados para aplicativos agindo como clientes. Isso poderia ser um simples aplicativo de Visual Basic escrito pelo usuário ou um pacote de cálculo comercialmente disponível.

As definições do OPC, como servidor de browser e suporte de estampas de tempo estão incluídos. O suporte Supervisório ao cliente OPC e a interface de servidor garante a conexão a qualquer aplicativo de OPC habilitado.

### **Troca de Dados Dinâmica (Dynamic Data Exchange - DDE)**

O DDE é um protocolo para troca de dados entre aplicativos independentes. Estes aplicativos enviam atualizações um para o outro apenas quando novos dados estiverem disponíveis. O DDE permite o processamento de dados de um aplicativo utilizando as ferramentas de outro. Através do suporte DDE do Supervisório, pode-se manipular dados em tempo real em aplicativos, como planilhas, sistemas de banco de dados e pacotes estatísticos. O Supervisório oferece suporte a operações DDE e a operações Block DDE como cliente e/ou servidores e também a integração dos Sistemas Supervisórios com outros Sistemas de Informação de Missão Crítica.

Na Internet, a adesão aos padrões industriais como HTML, para publicação de documentos da Web, e Java, para a execução de aplicativos portáteis, faz a integração de dados de fábrica do Supervisório com grandes sistemas de informação corporativos. Agora é possível combinar sistemas supervisórios com dados de inventário, horários de produção e ordenar status, oferecendo um tempo real instantâneo de todo o empreendimento a partir de uma interface comum e conhecida.

### **Geração de Report e Scheduler**

#### ***Report***

- Criação de relatórios complexos em minutos
- Poderoso registrador de dados incorporado
- Gerencia o agendamento para emissão de relatórios
- Cálculos personalizados desenvolvidos em Visual Basic
- Configuração e edição rápidas

#### ***Scheduler***

- Maximiza energia e reduz custos

- Interface intuitiva do tipo calendário
- Agendamento de tarefas personalizadas e flexíveis
- Configuração e edição rápidas
- Informações da Chave – Hardkey

#### 4.11 – Redes de Comunicação

Na figura 4.27, temos uma representação didática de como se pode ver os diferentes níveis de abordar o problema de nosso trabalho, desacoplando em módulos e colocando uma hierarquia de comunicação. As informações dos comandos, no nosso caso da inspeção tomográfica, chegam até ao CLP mestre. Ao sistema supervisorio passam as informações relevantes para que o mesmo tome decisões. Cabe então, a este encaminhar as informações necessárias para que se os analistas (no caso seriam os consumidores deste produto) façam seu trabalho, e isto poderá ser feito em rede.

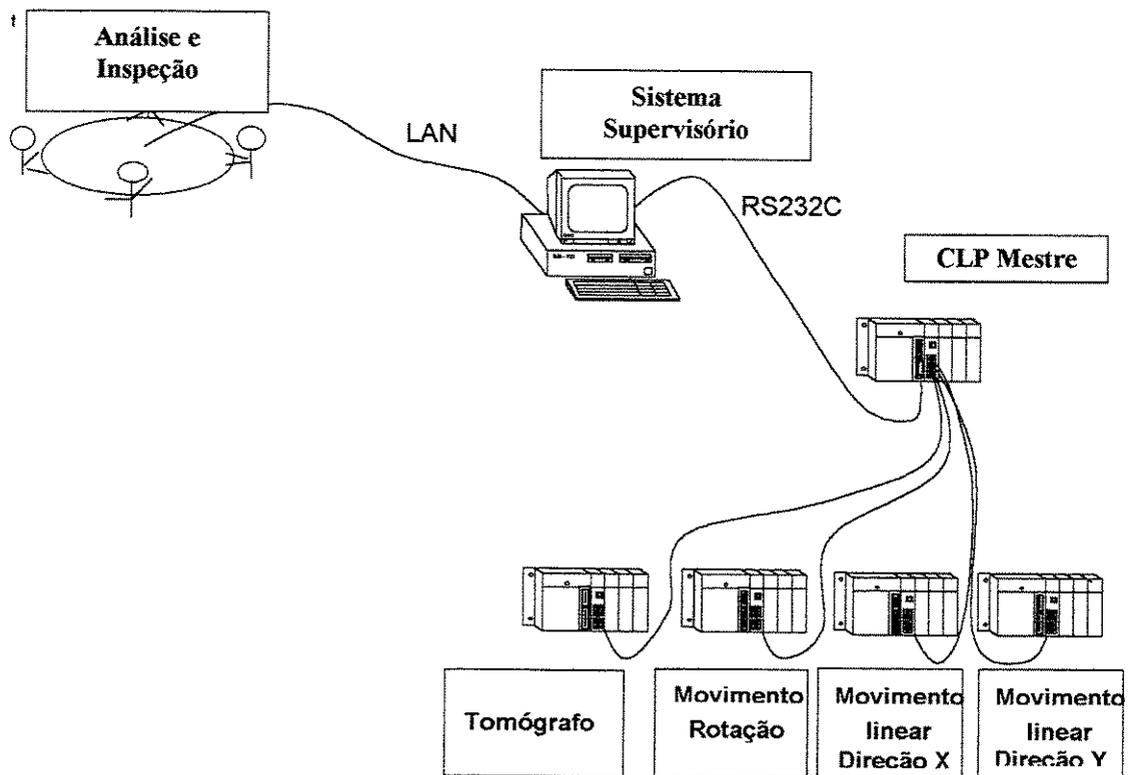


Figura 4.27: Transferência de Informações através de Rede de Comunicações

#### **4.12 Comentários sobre o capítulo 4.**

Neste capítulo procuramos mostrar um breve histórico da evolução da automação industrial no Brasil, sendo apresentados ferramentas de modelagem de sistemas automatizados discreto, sendo enfatizado o GRAFCET, uma revisão de conceitos de Controladores Lógicos Programáveis (CLP's) e algumas definições e conceitos incluindo o de sistema supervisorio, que certamente é um dos principais destaques deste trabalho.

Para um bom projeto em automação é necessário a integração de diversas ferramentas. Dentre elas, o GRAFCET é reconhecido e aceito pela industria por sua capacidade de representação e descrição das funções de controle local.

No próximo capítulo, serão apresentados aspectos relativos a implementação de um protótipo experimental com um sistema de acionamento e controle de baixo custo, mas que possibilitem representar todos os aspectos funcionais do sistema real. A partir da validação funcional dessa plataforma operativa será possível a especificação de protótipo real de um sistema de inspeção automatizado do motor de foguete.

## Capítulo 5

### 5- Realização Experimental

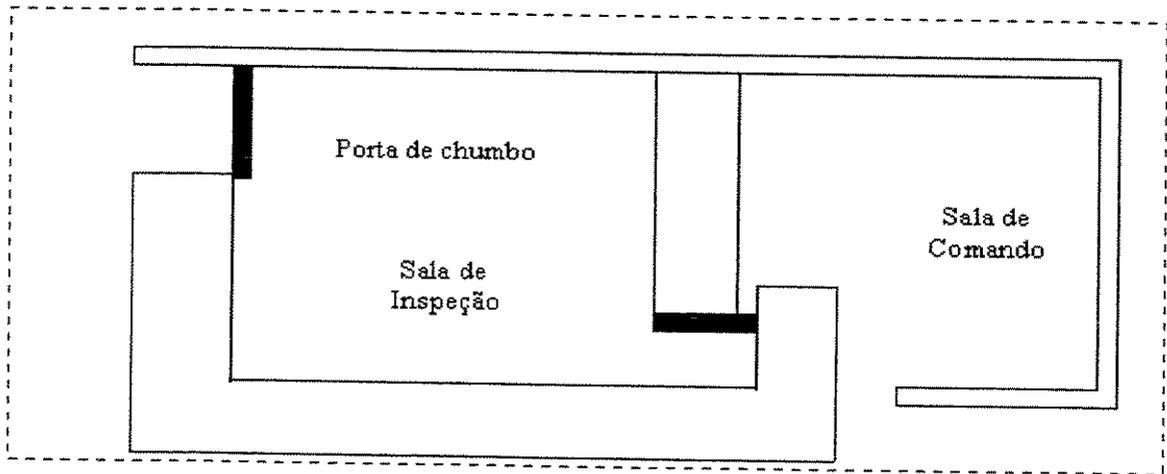
Neste capítulo serão apresentados procedimentos experimentais para viabilização do estudo desenvolvido nos capítulos anteriores deste trabalho, referente a um Sistema de Inspeção Automatizado de Falhas utilizando Tomografia Computadorizada.

Assim, a validação funcional e especificação de sua Interface de Acionamento e Controle são apresentadas através da implementação de um protótipo experimental com uma estrutura de comando similar ao Sistema Proposto para Inspeção Automatizado de Falhas de Foguete utilizando Tomografia Computadorizada, e com Parte Operativa utilizando componentes mecânicos e eletrônicos didáticos.

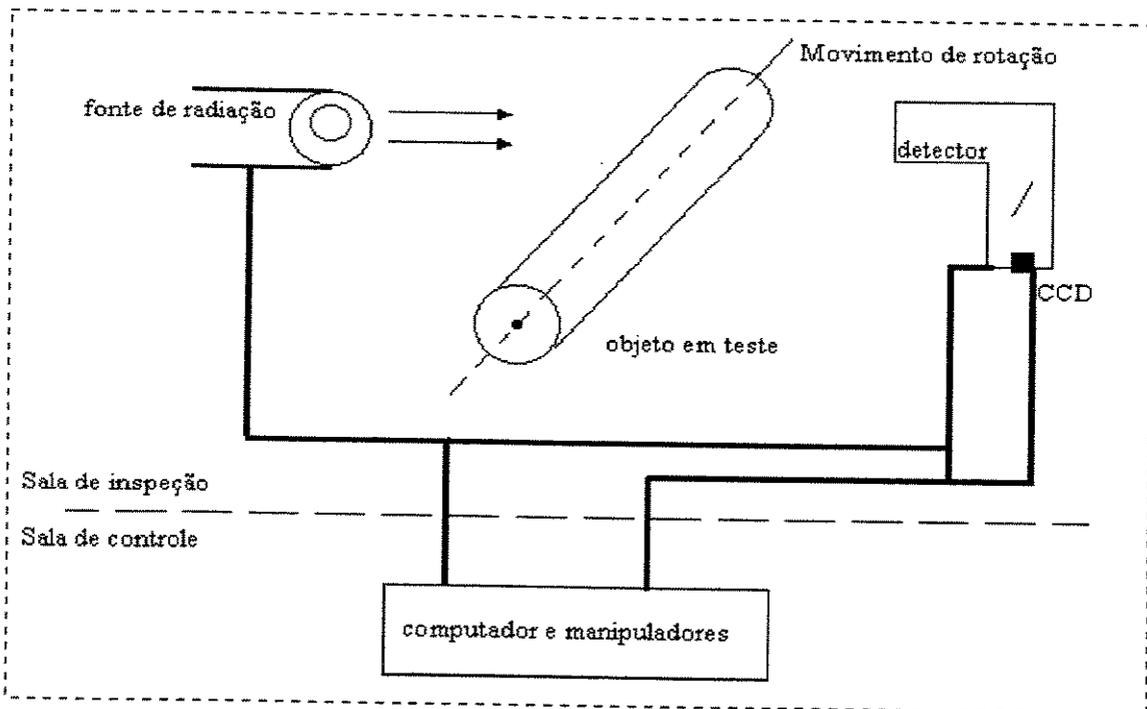
#### 5.1 Sistema de Inspeção Tomográfica proposto

Durante o desenvolvimento desse trabalho foi apresentado nos capítulos anteriores um estudo que permitiu a especificação do sistema real de Inspeção Tomográfica Automatizada, a ser implementado no Instituto de Atividades Espaciais, utilizando a mesma interface de comando desenvolvida para o protótipo. Isto representaria o atendimento do objetivo específico que é a construção de uma unidade para tomografia computadorizada em motores de foguete, no Laboratório de Ensaios Não Destrutivos (END), do IAE.

A figura 5.1 ilustra a planta do Laboratório de Ensaios Não Destrutivos do IAE e o esquema proposto para inspeção realizado através de tomografia computadorizada. Devido à emissão de radiação durante a inspeção, todo o sistema deve ser selado em compartimento que não permita o vazamento de radiação para o exterior da sala, como também, todos os comandos de movimentação e posicionamento serem operados remotamente.



(a) Planta baixa do Laboratório de END do IAE.



b) Esquema de um sistema automatizado de inspeção por tomografia computadorizada.

Figura 5.1 – Proposta de Laboratório de Inspeção e Sistema de Análise.

A implementação do sistema real no IAE deverá contemplar os seguintes passos:

- a) Simultaneamente ao desenvolvimento do protótipo do mecanismo de manuseio e posicionamento, será especificado um sistema de aquisição de imagens. A partir da

figura 3.6 apresentada no capítulo 3, podemos observar que já existem sistemas de aquisição de imagens, que poderiam ser utilizados por atenderem as necessidades deste tipo de ensaio, tais como obtenção de imagens tomográficas realizadas em corpos de aço com espessura maior que 2,2 mm e com diâmetro superior a 300 mm (como é o veículo espacial SONDA III).

- b) Especificação dos detectores, câmaras, lentes, fonte de radiação e hardware necessário,
- c) Desenvolvimento e implementação do algoritmo para reconstrução de imagens,
- d) Especificação do software para tratamento de imagens
- e) Definição dos sinais de interface para o mecanismo de manuseio e posicionamento.

O uso de detectores fluorescentes permite transformar uma imagem formada pela radiação incidente em uma outra forma de imagem representada por sinais elétricos. Através de um conversor analógico digital, a imagem passa a ter formato trabalhável em computador com sensível melhoria da qualidade.

Sendo assim, o processo de visualização da inspeção em tempo real, ou mesmo já realizada e gravada, consiste em:

- Definição do detector a ser utilizado, em função da energia da radiação, tamanho do ponto focal da fonte e intensificação da imagem,
- Desenvolvimento de um algoritmo para reconstrução da imagem, e definição de um software para análise e tratamento da imagem.

O uso de detectores fluorescentes permite transformar uma imagem formada pela radiação incidente

Neste trabalho, nosso foco foi a automatização dos movimentos do tomógrafo e rotacional do foguete. Não nos aprofundamos na parte relativa à especificação de softwares para tratamento de imagens, ou especificações de detectores, câmaras, lentes e hardwares ou desenvolvimento de algoritmos para reconstrução de imagens; a pesquisa e definição desses itens certamente seriam uma possível projeto de extensão deste trabalho.

## 5.2 Descrição Operativa do Sistema Automatizado de Inspeção Proposto

A descrição operativa do Sistema Automatizado de Inspeção proposto anteriormente é constituída de duas fases:

- A **primeira fase** corresponde à realização de funções pré-estabelecidas, para o mecanismo de manuseio e posicionamento, operando de forma independente:
  - a) Realização de movimentos precisos de rotação do objeto que esta sendo testado e ao longo de um eixo, para a fonte de radiação e detectores,
  - b) Operação no modo automático e manual contemplando aspectos relacionados a segurança, e
  - c) Implementação de um Sistema de Supervisão que permita identificar, posicionar (angular e longitudinalmente) o sistema, e fornecer informações de funcionamento, falhas e alarmes ao operador.

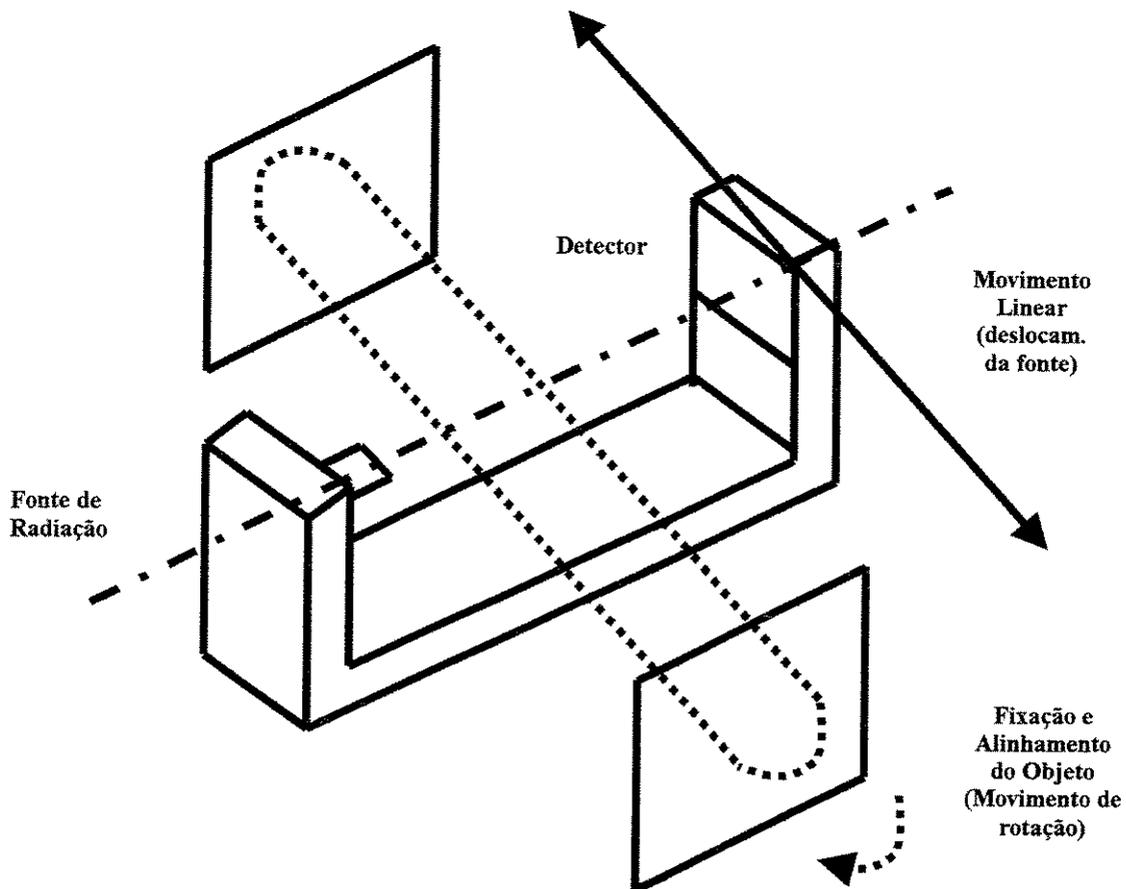


Figura 5.2 – Esquema de um Sistema de Inspeção Tomográfica.

- A **segunda fase** corresponde ao tratamento das imagens obtidas a partir da aquisição de imagens pelo tomógrafo computadorizado, obtidas automaticamente a partir do funcionamento Sistema Automatizado de Inspeção.

Nesse trabalho foi realizado um estudo da Parte Comando de um sistema automatizado de inspeção, descrito na primeira fase através da implementação da Parte Operativa numa maquete didática. A partir desse estudo será possível em trabalho futuro a especificação de um sistema completo de inspeção tomográfica, com Parte Operativa real e com ênfase no desenvolvimento de algoritmos computacionais para tratamento e análise de imagens tomográficas.

### **5.3 Maquete Operativa Correspondente a um Sistema Automatizado de Inspeção**

#### **5.3.1 Descrição da Estrutura Funcional**

O sistema mecânico que compõe a bancada utiliza elementos operativos didáticos, porém em termos funcionais e operacionais corresponde exatamente a um Sistema de Inspeção Tomográfica real. Este sistema tem a função de imprimir movimentos precisos de rotação ao objeto testado e também de deslocamento longitudinal à fonte de radiação e aos detectores. Estes movimentos são realizados a partir de motores de passo.

A entrada de dados pelo usuário, comprimento e diâmetro, e os dois modos de operação, implicam na necessidade de implementação de um sistema de monitoramento e controle que aqui será chamado de sistema de gerenciamento. Através do sistema de gerenciamento, o usuário poderá marcar qualquer ponto durante a inspeção para futura análise mais detalhada.

O princípio de funcionamento do sistema operacional a ser implementado pode ser mais bem compreendido através da análise do fluxograma apresentado na figura 5.3.

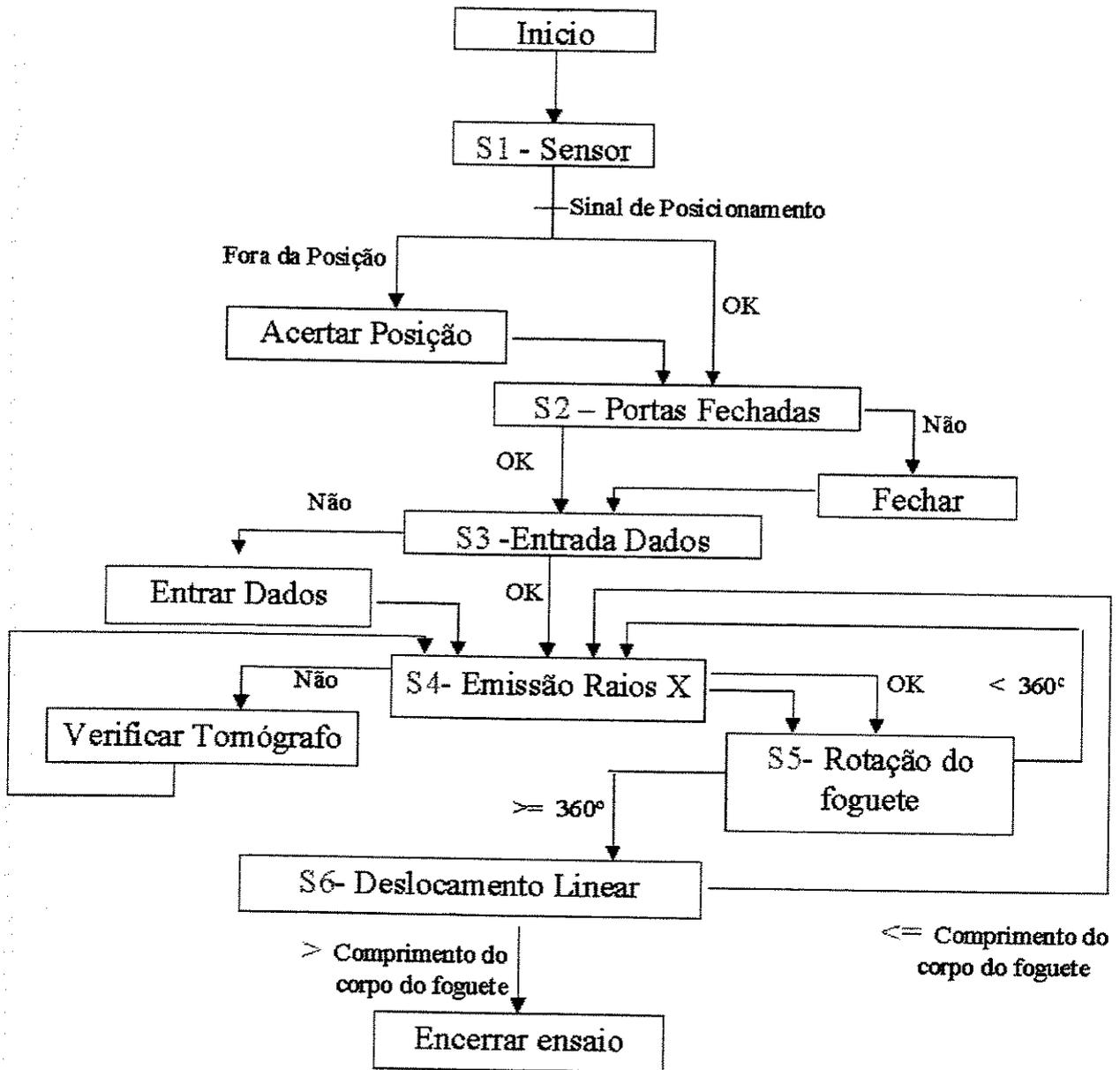


Figura 5.3 - Diagrama do Ensaio de Inspeção Tomográfica.

Para não tornar o tempo de inspeção proibitivo, o mecanismo gerado apresenta dois modos de operação, sendo que em ambos o usuário tem a necessidade de informar as referências (diâmetro e comprimento do objeto). Os dois modos de operação são:

- 1- **Automático** Efetua uma varredura completa no objeto teste, sendo que, após o usuário informar o diâmetro e comprimento do objeto, ele executará uma varredura completa no objeto em teste;
- 2- **Manual:** O mecanismo deverá permitir que o usuário reposicione a fonte de radiação e os detectores em qualquer ponto em relação ao objeto. Deste modo o usuário poderá analisar com mais profundidade alguma área de interesse.

### 5.3.2 Descrição do processo de funcionamento da inspeção tomográfica: Modo automático

A descrição funcional de cada bloco apresentado no algoritmo de controle, ilustrado na figura 5.3, é descrito a seguir:

#### **Sensor S1:** Verifica o posicionamento do foguete

- 1- Inicialmente posicionamos o objeto testado, ou seja, temos que colocá-lo de forma que possamos começar a inspeção. Se o sensor S1, acusar OK, passamos para o passo dois. Se for sinalizado que não está OK, serão feitos ajustes no objeto até que o mesmo fique na posição correta.

#### **Sensor S2:** Verifica se as portas da área de ensaio estão fechadas

- 2- Testar se as condições do ensaio estão corretas (portas fechadas). Se estiver OK, passaremos ao passo três, senão o ensaio se interrompe até que as portas sejam fechadas.

#### **Sensor S3:** Entrada de dados

- 3- Os dados para o ensaio serão alimentados (comprimento e diâmetro objeto a ser testado). Caso os dados não tenham “entrado”, o sensor S3 acusará e o ensaio será

interrompido até que os mesmos estejam colocados. Se estiver tudo certo, ou seja, dados OK passa para o passo quatro.

#### **Sensor S4: Emissão de Raios-X**

4- Um sensor S4 verifica se os raios-X foram emitidos, se isto estiver OK, passa ao passo cinco, caso contrario se verifica o tomógrafo.

#### **Sensor S5: Rotação do foguete**

5- Após a emissão de Raios-X, no passo quatro, o foguete sofre uma rotação. Um sensor S5 verifica se após esta rotação (somada com as anteriores) o foguete atingiu um ângulo inferior a 360°. Caso seja verdadeiro (o ângulo ainda é inferior a 360°), os raios-X são emitidos voltando ao passo quatro. No caso do ângulo total ser igual ou superior a 360°, passa para o passo 6.

**Sensor S6:** Verifica se o deslocamento linear não atingiu o dado inicial de comprimento do objeto testado

6- O tomógrafo e defletor sofrem um deslocamento linear, e isto é testado pelo sensor S6. Se a soma de todos os deslocamentos lineares, ainda for inferior ou igual à medida dada do comprimento do foguete, repete-se todo o procedimento desde o passo quatro. No entanto, caso o comprimento seja maior do que a informação dada, o ensaio terá chegado ao fim e é encerrado.

### **5.3.3 Descrição do processo de funcionamento da inspeção tomográfica: Modo manual**

**Sensor S1:** Verifica o posicionamento do foguete

1- Inicialmente o objeto a ser testado, é posicionado de forma que a inspeção possa ser iniciada. Se o sensor S1, acusar OK, passa para o passo dois. Se for sinalizado

que não está OK, devem ser feitos ajustes no objeto até que o mesmo fique na posição correta.

**Sensor S2:** Verifica se as portas da área de ensaio estão fechadas

2- Testar se as condições do ensaio estão corretas (portas fechadas). Se estiver OK, passa ao passo três, senão o ensaio se interrompe até que as portas sejam fechadas.

**Sensor S3:** Entrada de dados

3- Os dados para o ensaio são introduzidos (comprimento e diâmetro objeto testado) incluindo as coordenadas de cada ponto (início e final) que se deseja deslocar o tomógrafo e deflector para inspeção. Caso os dados não tenham “entrado” o sensor S3 acusará, e o ensaio será interrompido até que os mesmos sejam introduzidos. Se estiver tudo certo, ou seja, dados OK passa para o passo quatro.

**Sensor S4:** Emissão de Raios-X

4- Um sensor S4 verifica se os raios-X foram emitidos, se isto estiver OK, passa ao passo cinco, caso contrario se verifica o tomógrafo.

**Sensor S5:** Rotação do foguete

5- Após a emissão de Raios-X, no passo quatro, o foguete tem uma rotação, sendo que o sensor S5, verifica se após esta rotação (somada com as anteriores) o foguete atingiu um ângulo inferior a 360°. Caso seja verdadeiro (o ângulo ainda é inferior a 360°), os raios-X são emitidos, voltando ao passo quatro. No caso do ângulo total ser igual ou superior a 360°, passa para o passo 6.

**Sensor S6:** Verifica se o deslocamento linear não atingiu o dado inicial de ponto final do ensaio.

6- O tomógrafo e deflector sofrem um deslocamento linear, e isto é testado pelo sensor S6. Se a soma de todos os deslocamentos lineares, ainda for inferior ou igual à medida dada do ponto final do ensaio, repete-se todo o procedimento desde o passo quatro. No entanto, caso o comprimento seja maior do que a informação dada, o ensaio terá chegado ao fim e é encerrado.

O importante no modo manual é saber que o operador tem o controle do sistema, pois com o comando das ações, ele pode dominar a máquina.

## **5.4 Implementação de um Sistema Automatizado de Inspeção de Falhas**

Para validação dos conceitos apresentados neste item é proposta a implementação de um Sistema Automatizado de Inspeção tendo como parte operativa uma maquete enfatizando os aspectos funcionais encontrados no sistema real.

### **5.4.1 Descrição Funcional**

Para validação funcional e integração dos conceitos do Sistema Automatizado de Inspeção proposto nesse trabalho, foi implementado no Laboratório de Automação Integrada e Robótica da UNICAMP, um protótipo experimental, cuja parte operativa estava relacionada com o desenvolvimento de um mecanismo capaz de imprimir movimentos precisos de rotação ao objeto testado e também de deslocamento longitudinal à fonte de radiação e aos detectores.

Este protótipo, apresentado esquematicamente na figura 5.4, apresenta as mesmas funções mecânicas a serem executadas pelo mecanismo de manuseio e posicionamento de um sistema físico real para tomografia computadorizada em motores de foguete, a ser implementado no Laboratório de END do IAE. Conseqüentemente, a partir da validação experimental proposta nesse capítulo, será possível o desenvolvimento, projeto, especificação e construção do sistema de posicionamento real do tomógrafo.

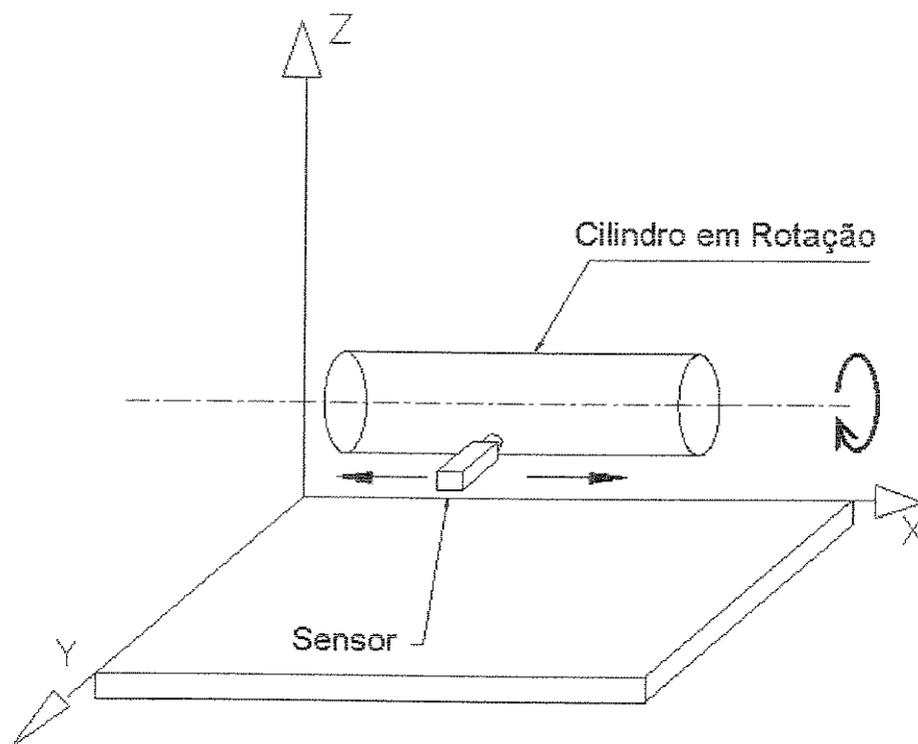
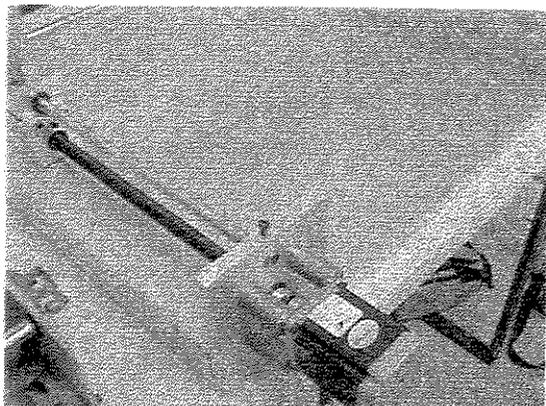


Figura 5.4 - Esquema representativo do sistema funcional da bancada experimental proposta.

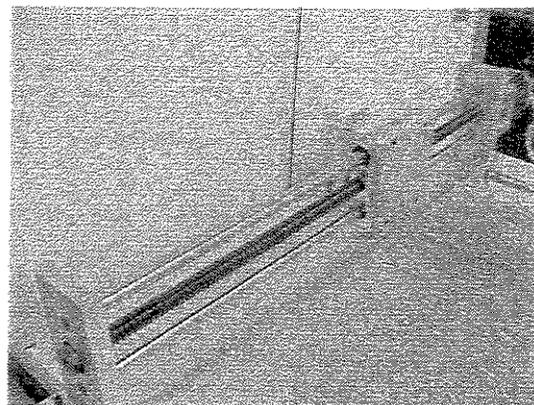
Este protótipo pôde ser idealizado experimentalmente, através da implementação de um sistema de movimentação longitudinal nas direções X e Y, e um sistema de rotação em torno do eixo X.

#### 5.4.2 Descrição Operativa

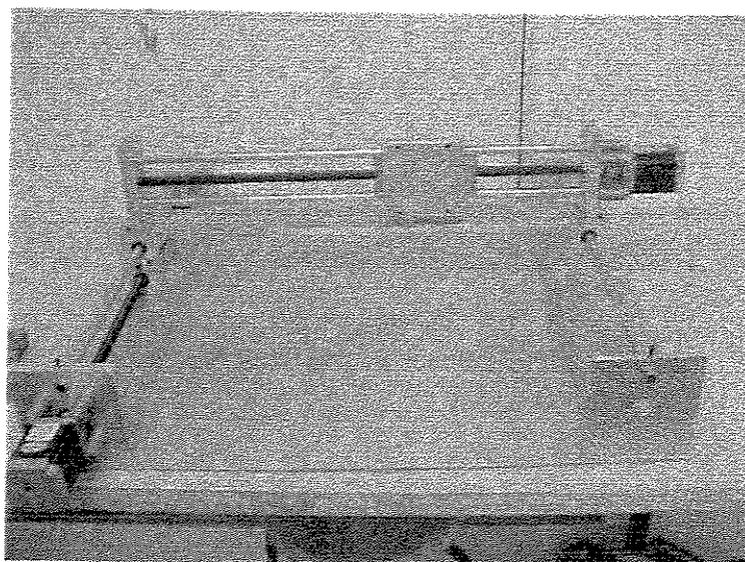
A Parte Operativa do sistema de inspeção de falhas no corpo do foguete, conforme é apresentado na figura 5.5, é constituído de um sistema de posicionamento cartesiano X-Y e um sistema rotativo em torno do eixo X, suportado por dois mancais. Tendo em vista, que o objetivo principal de nosso estudo, concerne a implementação e validação da Interface de Acionamento e Controle, utilizaremos como sistema de acionamento constituído de três motores de passo, cuja principal vantagem, é a grande precisão de posicionamento, baixo custo de implementação, sem necessidade de implementarmos sensores de posicionamento e não necessidade de malha de controle de realimentação. O protótipo experimental correspondente ao corpo do foguete é apresentado na figura 5.6.



**Movimentação na direção X**



**movimentação na direção Y**



**Sistema de Movimentação na direção X-Y**

Figura 5.5 – Sistema de Inspeção: Elementos da Parte Operativa.

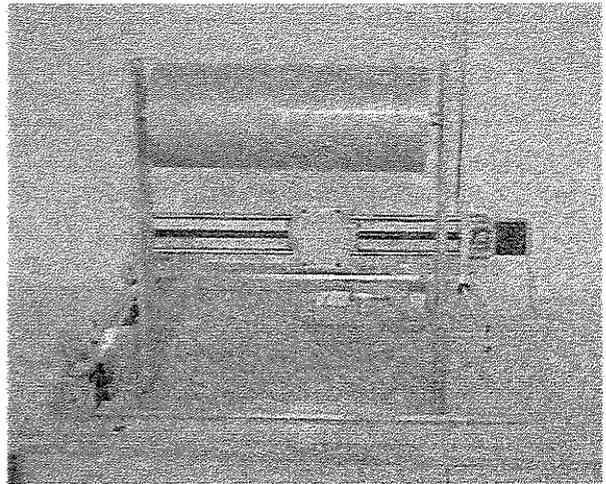
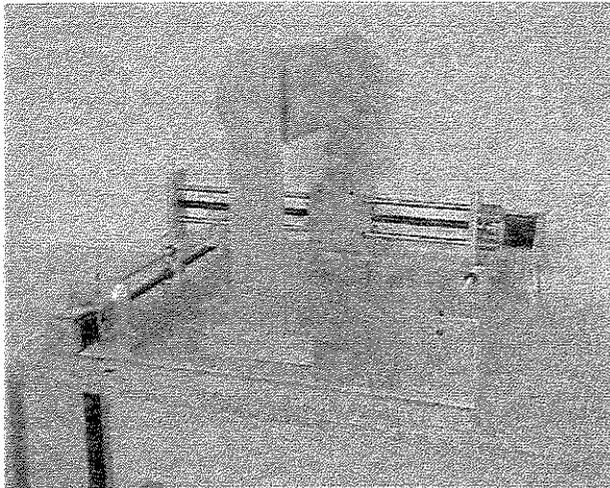


Figura 5.6 – Corpo do Foguete - Rotação em torno do eixo X.

Os principais elementos constituintes da Parte Operativa são apresentados na figura 5.7, sendo utilizado na Parte Comando Sistema Automatizado de Inspeção, uma interface individual de acionamento e controle dedicada para acionamento dos motores constituintes do sistema cartesiano, e do movimento de rotação do corpo do foguete.

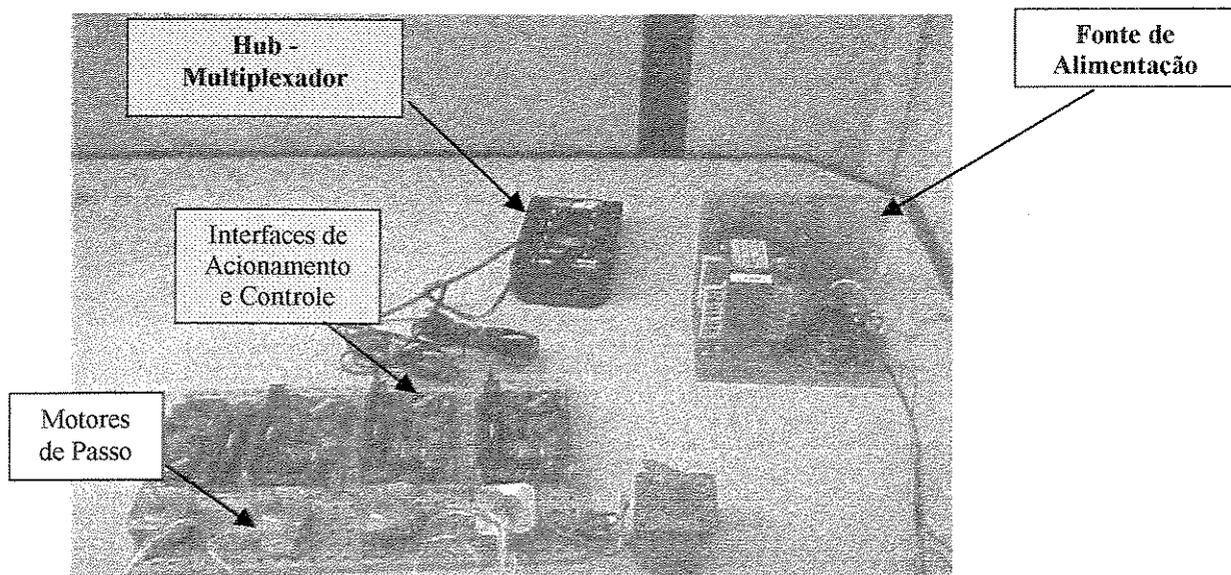


Figura 5.7 – Elementos da Parte Operativa.

Estes sistemas estão sincronizados através de um HUB-multiplexador de comunicação que permitirá a sincronização dos três graus de liberdade do protótipo de inspeção. Um Controlador

Programável Industrial – CLP, permitirá o gerenciamento e supervisão das informações digitais I/O.

A partir da utilização de um Sistema de Supervisão comercial ou do desenvolvimento de um software utilizando comunicação DDE, é possível a implementação de telas de monitoramento para visualização dinâmica do sistema de inspeção, gerenciamento, análise de confiabilidade, banco de dados, alarmes, comunicação em rede internet, etc.

A figura 5.8 apresenta esquematicamente a estrutura de acionamento e controle implementada para validação e testes do protótipo experimental implementado. Neste procedimento são utilizadas três interfaces de acionamento, correspondente aos movimentos nas direções X e Y e rotação do corpo do foguete em torno do eixo X. Um sistema de HUB, a partir da multiplexação dos três motores, permitirá a sincronização de movimentos.

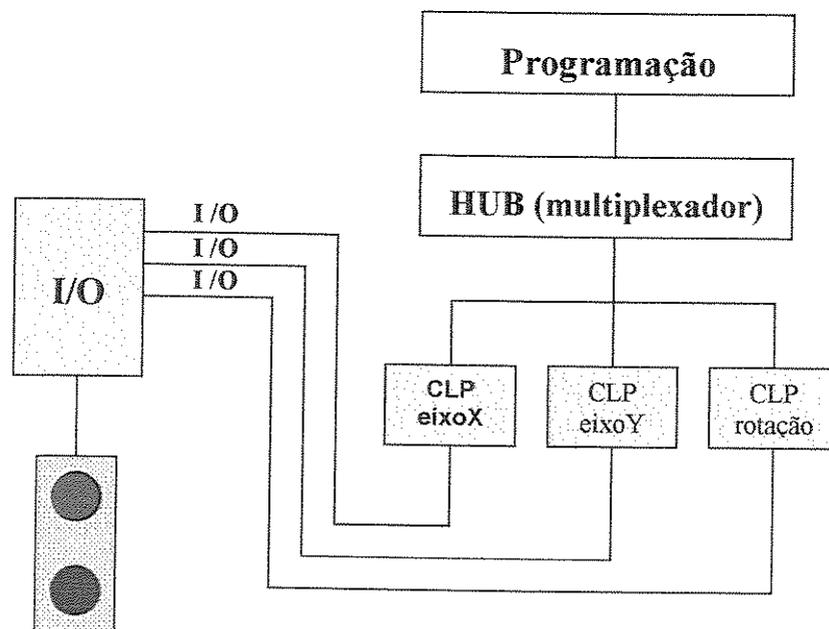


Figura 5.8 - Estrutura de acionamento e controle da bancada experimental.

## 5.5 Protótipo Experimental de um Sistema Automatizado de Inspeção

### 5.5.1 Implementação do Protótipo Experimental

O protótipo final implementado é constituído de uma Parte Operativa, onde foram utilizados componentes industriais para acionamento e controle de motores de passo (figura 5.9), correspondentes aos três graus de liberdade da maquete operacional implementada (figura 5.10). O sistema é constituído de uma Parte Comando, correspondendo a uma interface de acionamento e controle para cada grau de liberdade e de um HUB multiplexador que permite a sua comunicação com um CLP industrial e interface com um Sistema Supervisório comercial, ou via DDE através de software desenvolvido em ambiente Windows™.

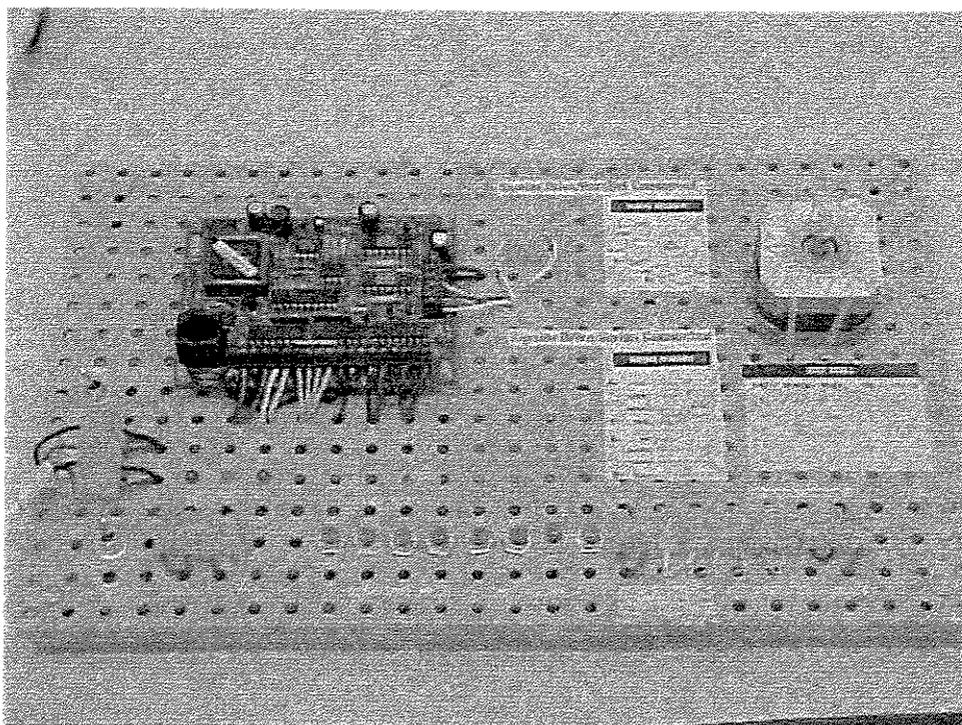


Figura 5.9 – Parte Comando - Interface de Acionamento e Controle (uma junta).

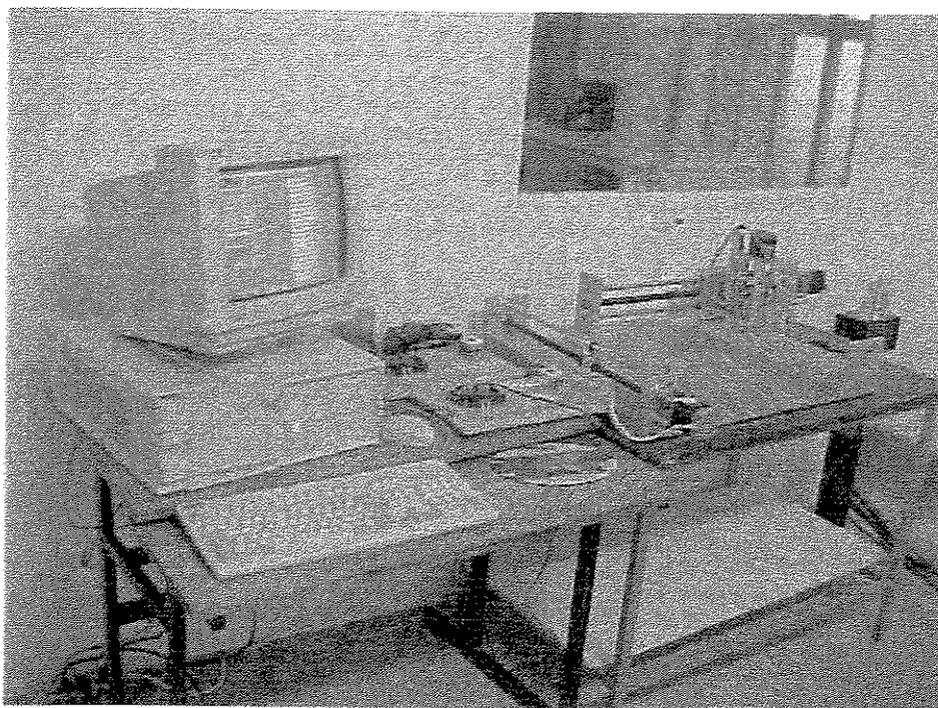


Figura 5.10 – Parte Operativa – Protótipo Implementado.

### **5.5.2 Implementação de Programa Computacional para Validação e Testes**

Para validação e testes dos procedimentos descritos anteriormente, foi implementado um programa computacional em linguagem Visual Basic<sup>TM</sup>, permitindo a visualização dos procedimentos descritos neste item (figura 5.11). Numa implementação futura, esse aplicativo deverá ser utilizado como tela de monitoramento de operações e interface com o usuário. Um descritivo do programa implementado e suas principais telas de operação são apresentados no anexo I deste trabalho.

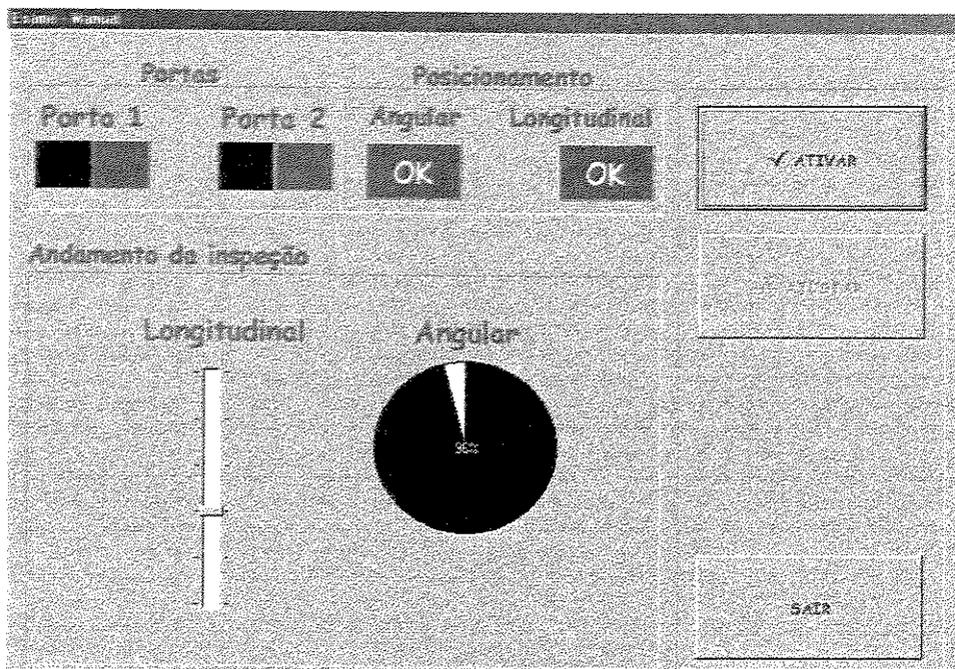


Figura 5.11 – Programa Computacional implementado.

## 5.6 Validação e testes do Protótipo Experimental

### 5.6.1 Descrição de Entradas/saídas

A implementação experimental do problema de análise de falhas na estrutura de um foguete será realizada em duas etapas, onde na primeira é executado o movimento utilizando apenas a movimentação de um motor no eixo X, permitindo assim a análise de falhas numa única direção.

A partir da validação desse procedimento, serão incorporados mais dois graus de liberdade no sistema desenvolvido: o movimento de varredura do eixo Y e o movimento de rotação no eixo X, permitindo assim, a análise completa do problema em estudo.

A tabela 5.1 apresenta a descrição das entradas e saídas de cada interface de controle *Applied Motion Control* utilizada para acionamento dos motores de cada um dos eixos do protótipo funcional implementado no Laboratório de Automação Integrada e Robótica da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, para validação e testes do sistema de inspeção de falhas de corpo de foguetes.

<b>Descrição das Entradas – Protótipo Funcional – eixo 1</b>		
<b>Entrada</b>	<b>Mnemônico</b>	<b>Descrição</b>
<b>1</b>	<b>IN1</b>	<b>Início/Fim</b>
<b>2</b>	<b>IN2</b>	<b>Sensor de Falha</b>
<b>3</b>	<b>IN3</b>	<b>Interrupção</b>
<b>4</b>	<b>IN4</b>	<b>Não utilizada</b>
<b>5</b>	<b>IN5</b>	<b>Não utilizada</b>
<b>6</b>	<b>IN6</b>	<b>Sensores de Final de Curso (FDCP)</b>
<b>7</b>	<b>IN7</b>	<b>Sensores de Final de Curso (FDCN)</b>

<b>Descrição das Saídas – Protótipo Funcional – eixo 1</b>		
<b>Entrada</b>	<b>Mnemônico</b>	<b>Descrição</b>
<b>1</b>	<b>OUT1</b>	<b>Sistema em Funcionamento</b>
<b>2</b>	<b>OUT2</b>	<b>Ocorrência de Falha</b>
<b>3</b>	<b>OUT3</b>	<b>Chegada de fim de curso</b>

Tabela 5.1 – Descrição das Entradas e Saídas.

### 5.6.2 Descrição Funcional

A validação e testes do protótipo implementado foram realizados através do desenvolvimento de quatro programas (anexos II e III). O primeiro considerando a movimentação do sistema de inspeção na direção do eixo de rotação do foguete (direção longitudinal, designada por X) registrando num arquivo e através de uma saída lógica a ocorrência de falhas no processo de inspeção. Um segundo programa, melhor estruturado, foi acrescido nas funcionalidades do primeiro programa implementado, que no momento da ocorrência de falhas, o sistema interromperia a sua movimentação na direção X, rastreando a falha na direção transversal (direção Y), permitindo assim o diagnóstico exato da falha no corpo do foguete. O terceiro e quarto programas (anexo III) apresentam uma movimentação no sentido longitudinal (quatro pontos) e transversal (oito pontos). A diferença entre ambos é que o

programa três faz a varredura automática de todos os pontos, enquanto que no programa quatro, o “tomógrafo caminha” no sentido longitudinal e só faz a leitura de pontos numa das seções, no momento que é identificada uma falha. A simulação da falha é feita através da programação de uma das entradas. A figura 5.12 apresenta uma tela típica de programação utilizando a linguagem dedicada do sistema de acionamento. No anexo II são apresentados as especificações e implementação dos programas um e dois, e no anexo III temos listagens e os Graficets dos programas três e quatro .

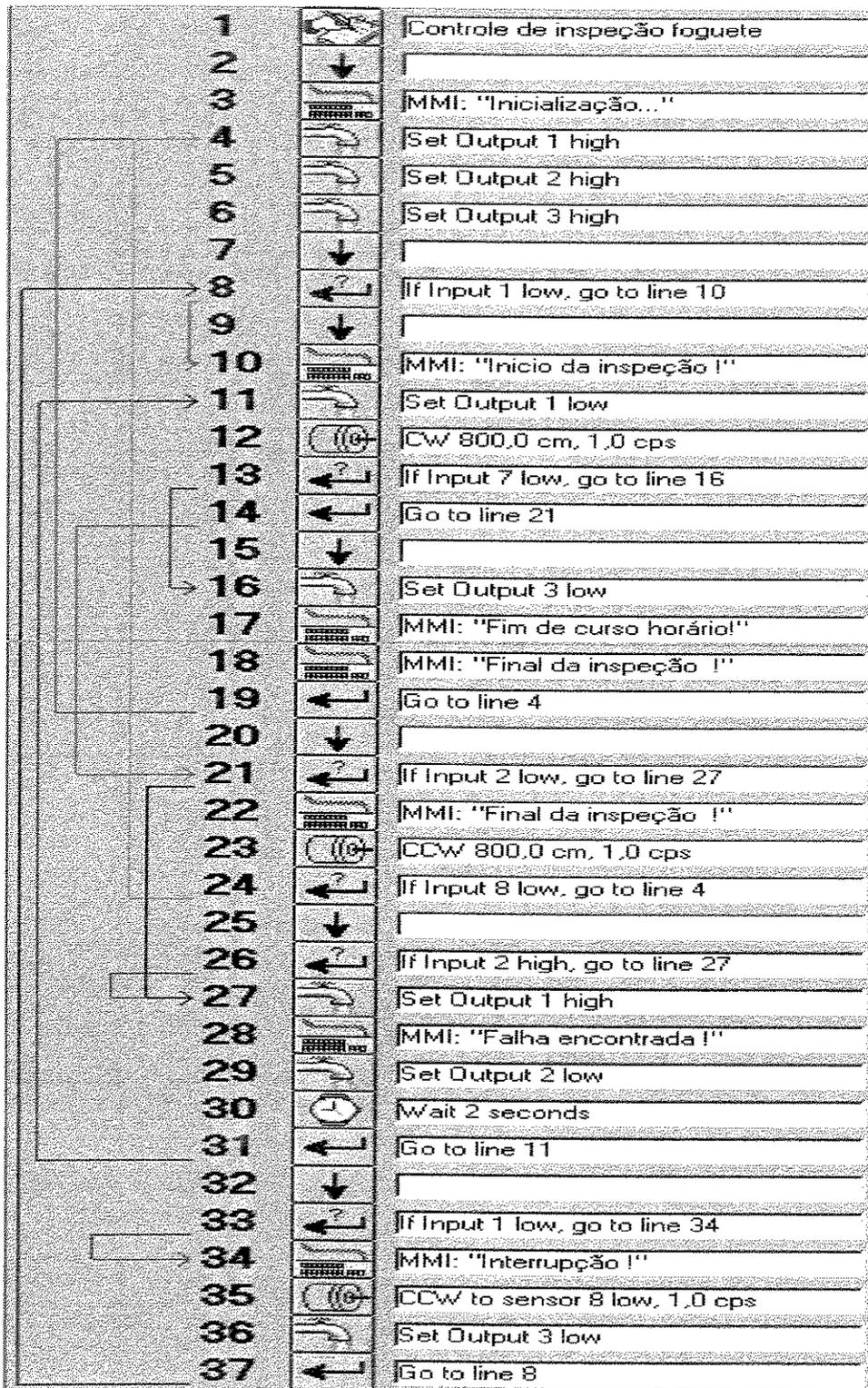


Figura 5.12 – Tela típica de programação do sistema de acionamento.

## 5.7 Comentários sobre análise de Confiabilidade dos Sensores

No caso deste trabalho, não foi feita uma análise de Confiabilidade dos sensores pelo fato, já mencionado, de que os mesmos somente serão definidos na fase de implementação do sistema real, porém em aplicações direcionadas a Sistemas Automatizados é imprescindível este tipo de estudo.

O uso de quaisquer dispositivos tende a diminuir a Confiabilidade de um sistema. Como uma forma de aumento de Confiabilidade, sem um aumento nos custos, temos a alternativa de colocação de sensores em paralelo.

A Confiabilidade é definida pela ABNT, como “a capacidade de um item em desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo”. Temos também que a função confiabilidade é uma curva monotonicamente decrescente com o tempo [11]. Em qualquer sistema, existem algumas preocupações tais como não perder a confiabilidade (sempre que se colocam dispositivos isto implica numa redução da mesma), não encarecer os custos e também que uma eventual falha num dispositivo de monitoramento (são os sensores de nosso sistema) não implique na falha do sistema.

Como uma proposta de solução dessas necessidades e que poderia aumentar consideravelmente a confiabilidade do sistema, com uma pequena variação de custos, poderíamos considerar a colocação de sensores em paralelo. Em primeiro lugar, isto não iria encarecer o sistema, devido aos baixos custos dos sensores, e em termos do aspecto de Confiabilidade, teríamos um ganho considerável. Como exemplo, admitindo-se que seja de 0,90 a Confiabilidade de um sensor, se o mesmo estiver ligado a outro sensor semelhante em série, este valor cairá para 0,81, ao passo que se houver uma ligação em paralelo, a Confiabilidade irá para 0,989.

## **5.8 Comentários sôbre o capítulo 5**

Neste capítulo foram apresentados procedimentos experimentais para viabilização do estudo desenvolvido nesta dissertação de tese, referente a um Sistema de Inspeção Automatizado de Falhas utilizando Tomográfica Computadorizada.

A validação funcional e especificação de sua Interface de Acionamento e Controle apresentada permitirão o projeto de um Sistema Completo de Inspeção Automatizado de Falhas de Foguete utilizando Tomografia Computadorizada.

## Capítulo 6

### 6- Conclusões e Perspectivas Futuras

Este trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de um projeto funcional e a implantação através de uma Plataforma em Escala Reduzida de um Sistema Automatizado para Inspeção de Motores de Foguetes utilizando Tomografia Computadorizada, sendo dividido em seis capítulos, conforme descrição a seguir:

No primeiro capítulo, procuramos mostrar a importância da pesquisa aeroespacial para países como o nosso que já têm um bom nível tecnológico.

No segundo capítulo, é feita uma revisão bibliográfica abordando conceitos utilizados nos capítulos seguintes: pesquisa aeroespacial, tomografia computadorizada e automação industrial.

No terceiro capítulo, são abordadas a pesquisa aeroespacial e a necessidade de métodos mais adequados para inspeção. No caso é evidenciadas a inspeção tomográfica computadorizada e suas vantagens sobre o tradicional método de raios-X.

No quarto capítulo, uns dos mais importantes desse trabalho de pesquisa, foram enfatizados a utilização de ferramentas e dispositivos utilizados dentro do contexto da Automação Industrial, onde procuramos mostrar um breve histórico da evolução da mesma no Brasil, algumas definições e conceitos básicos, dispositivos utilizados e metodologias de implementação.

No quinto capítulo foram apresentados procedimentos experimentais para viabilização do estudo desenvolvido nesta dissertação de tese, referente a um Sistema de Inspeção Automatizado de Falhas utilizando Tomografia Computadorizada. A validação funcional e especificação de sua Interface de Acionamento e Controle apresentaram o projeto de uma Maquete Funcional de um Sistema Completo de Inspeção Automatizado de Falhas de Foguete utilizando

## Tomografia Computadorizada.

Cabe mencionar que a plataforma desenvolvida possui as mesmas características funcionais do sistema real, de modo a ser possível a implementação de toda a arquitetura de supervisão e controle num sistema didático, que contenha todos os elementos que possibilitem uma visão completa do sistema em estudo.

Para que tal objetivo fosse atingido, o problema em estudo foi modelado e implementado utilizando o GRAFCET, uma programação estruturada apresentando arquitetura aberta e de baixo custo. Também foram utilizadas de forma integrada, ferramentas e elementos de automação.

Esta metodologia foi validada no Laboratório Integrado de Automação e Robótica, da UNICAMP, através da implementação de uma plataforma didática com diferentes elementos automatizados (Maquete em escala do Sistema de Inspeção, PLC's, atuadores e sensores). Nesta plataforma diferentes modelos de aprendizado e validação podem ser efetuados, e a mesma representa com boa margem de precisão o que deverá ser feito na situação real para inspeção do corpo do foguete.

Espera-se que este sistema desenvolvido encoraje o setor aeroespacial brasileiro, a fazer uso do mesmo, melhorando a confiabilidade dos produtos ensaiados (foguetes e lançadores de satélite) e dê um diferencial frente à concorrência internacional.

O trabalho permite a extensão para outras aplicações, além do uso de inspeção exclusiva de motores de foguetes. Esperamos, que isto represente uma semente plantada e que em conjunto com outras, permita a que nosso país, passe a figurar no bloco das nações que usufruem os benefícios da alta tecnologia e que ganham dinheiro com isto.

Para se tornar e permanecer competitivo num mundo que exigem mudanças rápidas, as Universidades, Institutos de Pesquisas, as Empresas e também as pessoas deve ter flexibilidade e fazer uso de equipamentos e tecnologias atualizadas.

O grande desafio está no melhor uso das informações, e na transformação das mesmas em conhecimento. Isto só acontece quando agregamos a Inteligência Humana e deixamos de lado a condição de simples usuários da tecnologia , ou seja “não reinventando a roda, mas fazendo melhorias na mesma”.

## Referências Bibliográficas

- [1] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro NBR-9321; Cálculo de Estimativas por Ponto e Limites de Confiança Resultante de Ensaios de Determinação de Confiabilidade de Equipamentos. Rio de Janeiro, 1986, 34 p.
- [2] ACAR, M. - *Mechatronics Engineering Education in the UK*. In: *Joint Hungarian British International Mechatronics Conference*, 1994, Budapeste. *Proceedings...* Budapest: Computational Mechatronics Publ., 1994, p 763- 769.
- [3] ARAUJO, EMERSON S. - *Modelagem e Descrição da Parte Comando de um Sistema Automatizado de Produção utilizando o GRAFCET - Aplicado à uma Plataforma Industrial em Automação*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1997, 91 p.
- [4] ASFAHL, RAY C., *Robots and Manufacturing Automation 2<sup>th</sup>* John Wiley & Sons, Inc., 1992
- [5] BITTAR, R. C. S. M. *A Utilização do GRAFCET como Ferramenta na Automação Industrial*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1993. Tese (Mestrado )
- [6] BOLTON, W. *Mechatronics - Electronic Control Systems in Mechanical Engineering*. England: Longman Scientific & Technical, 1995.
- [7] CASTRUCCI, PLÍNIO B. L. *Controle Automático Teoria e Projeto* Editora da Universidade de São Paulo.

- [8] CESAREO, R., APPOLONI, C. R., BRUNETTI, A. , CASTELLANO, A. , CRUVINEL, P. E., MASCARENHAS, S., DE ASSIS, J.T., GIGANTE, G.E. – *Industrial Applications of tomography and microtomography*, International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications, Junho 8 –10, 1994, Berlin
- [9] CLAUSSEN, C., LOCHNER, B. - *Dynamic Computed Tomography: basic principles and clinical applications*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, Tokyo, 1985
- [10] DALBÓ, R. F. *Simgraf: Um Ambiente Computacional para Simulação e Validação de Sistemas Automatizados de Produção Utilizando o GRAFCET*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1994. Tese (Mestrado)
- [11] FAZOLLI, S., *Metodologia para Cálculo da Confiabilidade de Sistemas Complexos na Fase de Desenvolvimento*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 204 p. Tese ( Doutorado ).
- [12] FERREIRA, E. P., *Robótica Básica Modelagem de Robôs*, R. Vieira Gráfica e Editora Ltda. Versão Preliminar Publicada para a V Escola Brasileiro-Argentina de Informática, Rio de Janeiro, 1991.
- [13] GEORGINI, J. M. , *Elementos para Estruturação e Implementação de Sistemas Automatizados de Produção*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1999. 209 p. Tese ( Mestrado ).
- [14] GROOVER, M. P. - *Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing USA*: Prentice-Hall International, Inc.
- [15] HUNTER, R. P. *Automated Process Control Systems - Concepts and Hardware*. 2<sup>nd</sup> edition, USA: Prattice-Hall, Inc. , 1987, 501 p

- [16] IEC - International Eletrotechnical Commission, Genebra. IEC-60848; *Preparation of Function Charts for Control Systems*. Genebra, 1988, 99p.
- [17] KUO, B. C., *Automatic Control Systems* 4<sup>th</sup> ed. USA: Prattice & Hall, Inc., New Jersey, 1982
- [18] LIMA, J.C.M. – *Sistema de Aquisição e Processamento de Imagens para uma Gama Câmera*, Dissertação (Mestrado), S.J.Campos, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 1993
- [19] MASCHIO, C.; ARRUDA, A.C.F.; LOTUFO, R.A. – *Tomografia computadorizada de raios-x em ensaios não destrutivos de materiais aeroespaciais*. In: *XV Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos, 1996, São Paulo. Anais do XV... p. 68-78*
- [20] MAISL, M.; REITER, H.; HOELLER, P. – Micro-radiography and tomography for high resolution NDT of advanced materials and microstructural components. *Journal of Engineering Materials and Tecnology. Transactions of the ASME*, v. 112, n 2, p. 223 – 226, Apr. 1990.
- [21] MIYAGI, P. E., BARRETTO, M. R. P., SILVA, J. R. *Domótica – Controle e Automação Volume 2* EDUSP
- [22] PERSSON, STURE. How computed tomography can be used to study crosslink density in non-filled peroxide cured polyisoprene rubber. *Polymer*, v. 29, n. 5, p. 802 – 807, May 1988.
- [23] PRATT, W. K. – *Digital Imaging Processing. 2<sup>a</sup> ed., John Wiley & Sons, Inc., 1991, 750 p.*
- [24] ROMANS, LOIS E. Introduction to computed tomography. *Williams & Wilkins, 1995, 107p.*
- [25] ROSÁRIO, J. M., O GRAFCET na Concepção de Sistemas Automatizados. SCHNEIDER NEWS. São Paulo, ano 1, n.2, p. 11, Maio 1997
- [26] SANTOS, José J. Horta, *Automação Industrial* Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979, p. 10 - 23.

- [27] SILVA, ARLINDO DA COSTA E. – Análise da reprodutibilidade de digitações viscosas em meios porosos naturais consolidados. *Dissertação (mestrado), Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Janeiro, 1995.*
- [28] STADLER, W.. – *Analytical Robotics and Mechatronics*. McGraw-Hill; United States of América, 1995.
- [29] SHIMOTE, W. K. – Modelagem Geométrica Computacional da Evolução da Superfície de Queima dos Blocos de Propelente. *Dissertação (mestrado), S. José dos Campos, Instituto Tecnológico de Aeronautica, 1997.*
- [30] TAKAHASHI, S. (Ed.) – *Illustrated Computer Tomography: a practical Guide to CT Interpretations*. Berlim: Springer-Verlag, 1983.
- [31] TOMKIEWICZ, K., PLASKOWSKI, A., BECK, M.S., BYARS, M. – Testing of the failure of a solid rocket propellant with tomography methods, *Chemical Engineering Journal* 77 (2000) 73-78
- [32] VENDRAMETO, O. *Bases de Conhecimento para a Automação da Manufatura*. São Paulo: Escola Politécnica - Engenharia de Produção, Universidade de São Paulo, 1994. 155 p. Tese ( Doutorado ).
- [33] WILLIAMS, D. J. *Manufacturing Systems an introduction to the technologies* 2<sup>nd</sup> edition, Chapman & Hall, London, UK,
- [34] WOLOVICH, W. A. *Automatic Control Systems - Basic Analysis and Design*. USA: International Edition, 1994, 450 p

## **Anexo I : Programação da Simulação de um Sistema Automatizado de Inspeção**

A seguir faremos uma simulação dos modos possíveis de inspeção que este trabalho contempla:

### **I. Modo Automático:**

Primeiramente algumas informações serão necessárias para o ensaio, como o comprimento e diâmetro do corpo ensaiado. A seguir deverão ser checadas se estão atendidas as condições iniciais do ensaio (figura AI-1):

1.1- Posicionamento do foguete ou corpo a ser ensaiado em relação ao sistema de inspeção tomográfica, está OK ? Sim, passar para o próximo passo ou caso contrario, é necessário acertar o posicionamento.

1.2- Portas fechadas da área a ser ensaiada, OK ? Sim, pode-se começar o ensaio ou Não, então fechá-las.

O comando de ativação é dado, e se inicia o ensaio (figura AI- 2):

1.1- Na primeira posição ao longo da longitude do corpo ensaiado, começa a “varredura” da seção transversal. Para isto o corpo ensaiado “gira” em torno de seu eixo longitudinal. Cada parte é inspecionada, até completar o ciclo de 360°.

1.2- Completada a volta, é verificado se o comprimento inicial fornecido foi todo percorrido. Caso afirmativo, encerra-se o ensaio e caso contrário, é dado um incremento longitudinal para que o próximo setor seja inspecionado (figura AI-3).

1.3- Os procedimentos se repetem até que se chegue na última medição do comprimento dado inicialmente (figura AI-4).

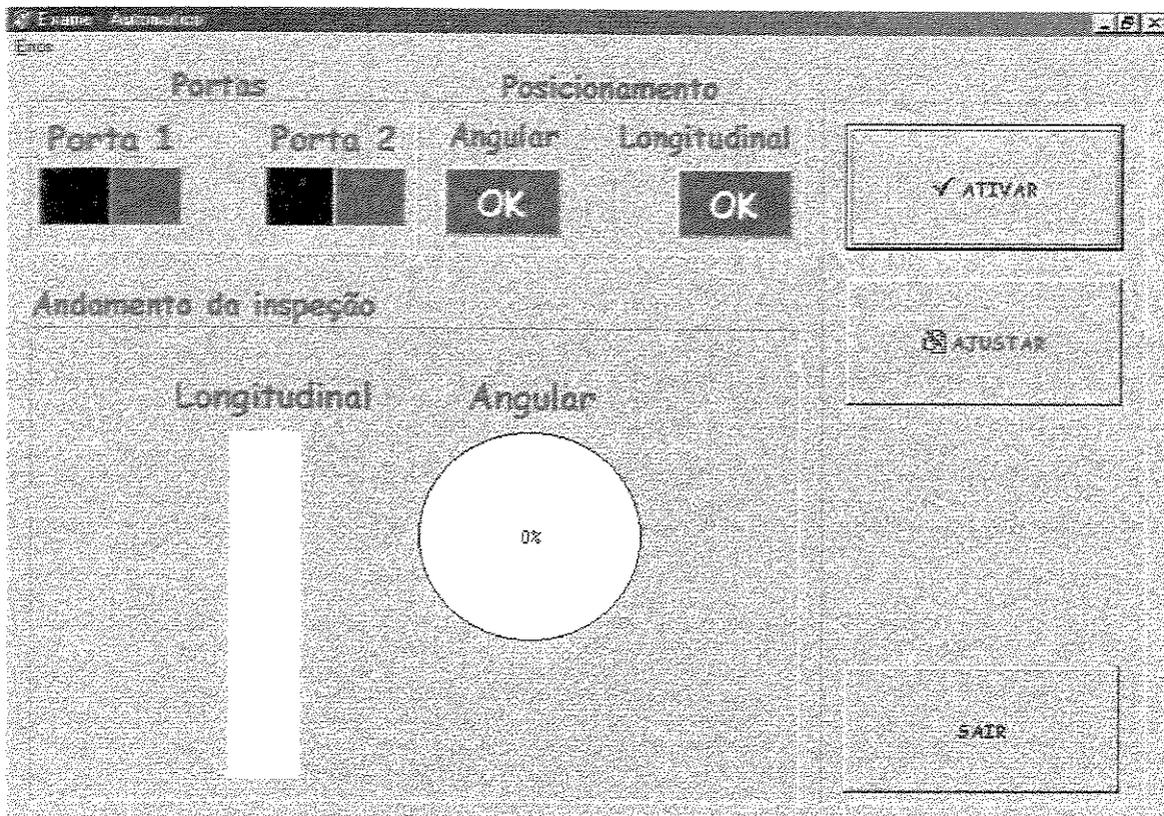


Figura A I-1 – Tela de Apresentação – Modo Automático de Inspeção.

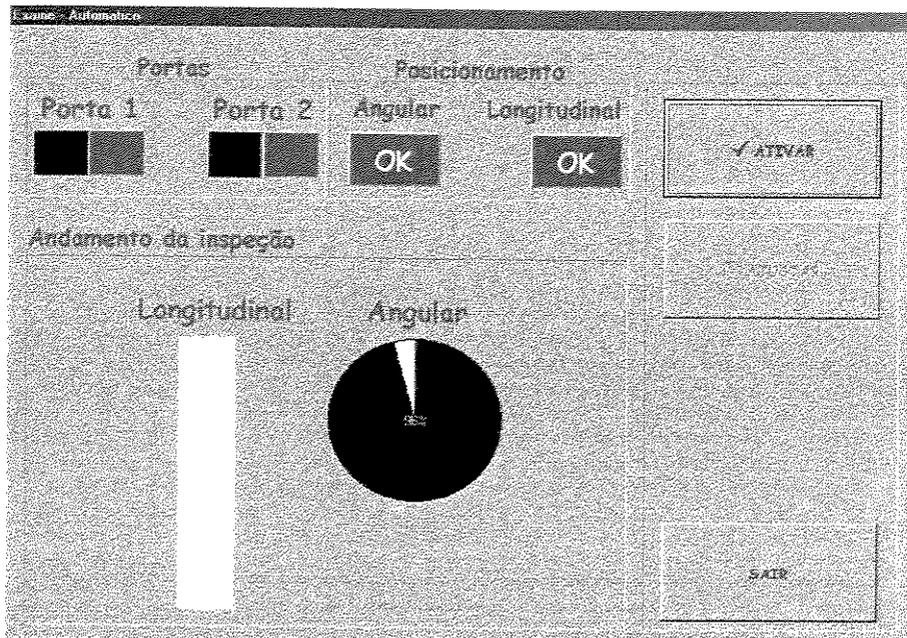
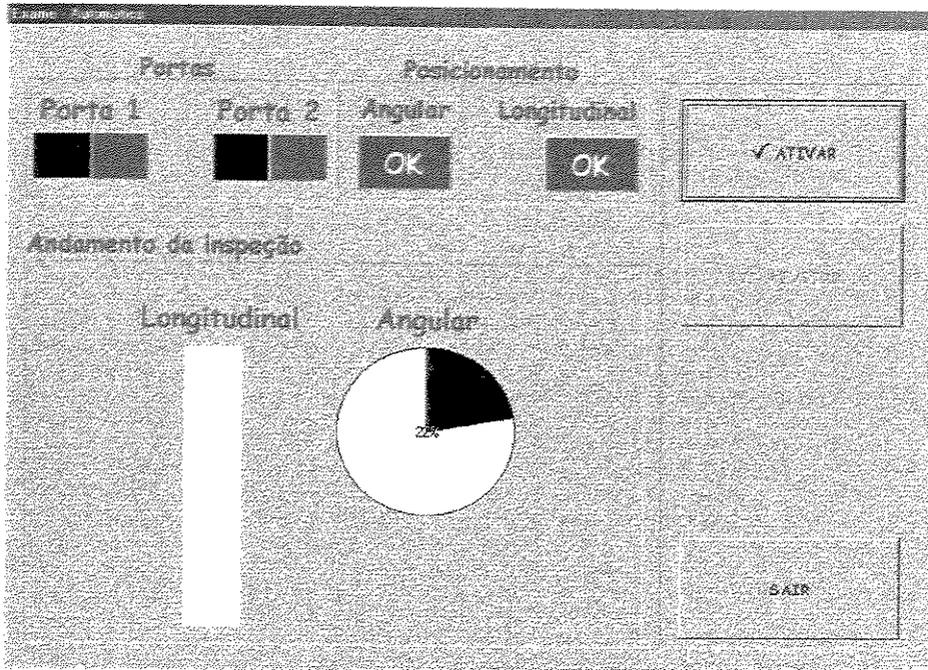


Figura A I- 2 – Tela apresentando a Movimentação Angular.

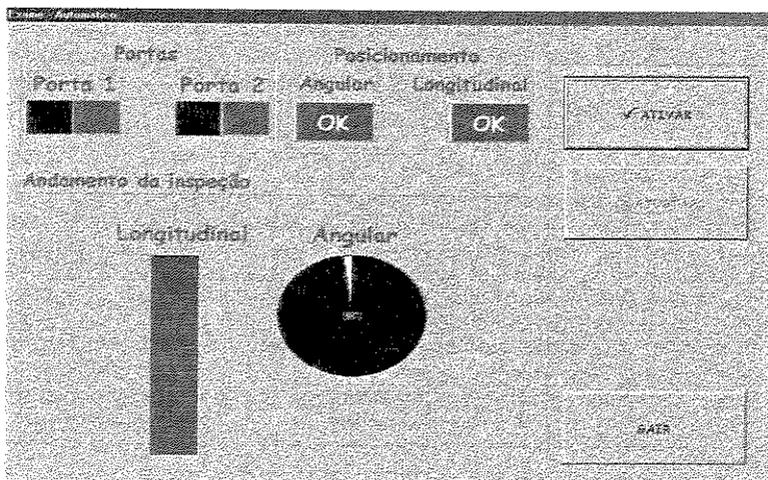
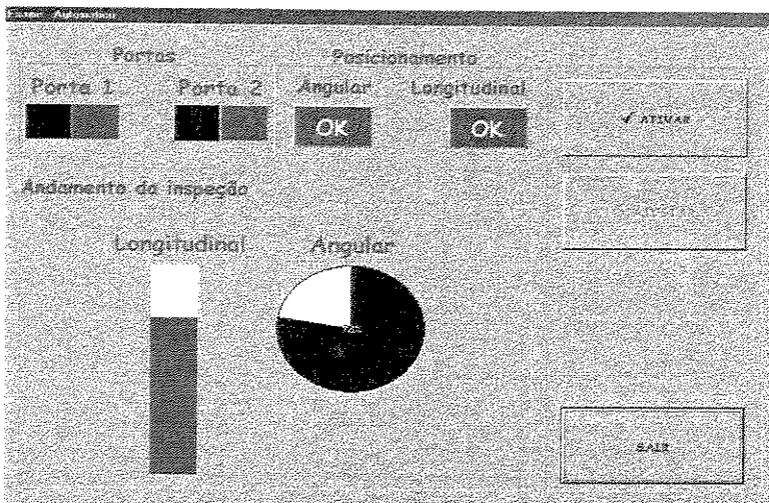
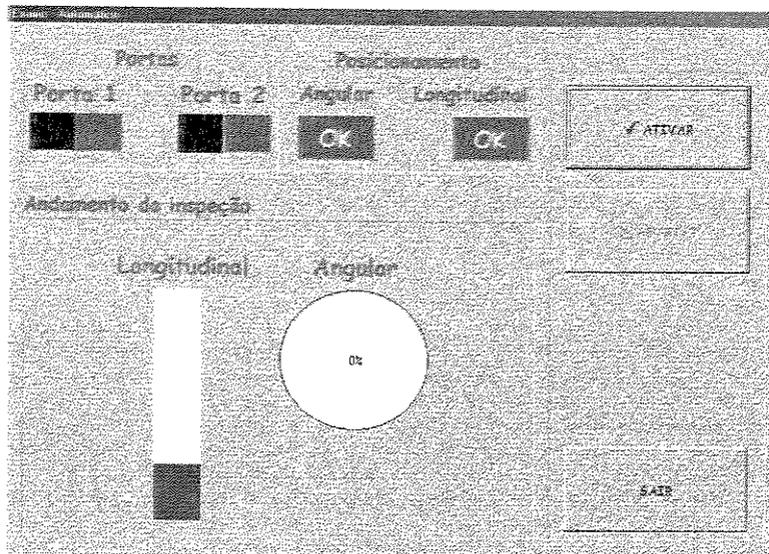


Figura A I-3 – Tela apresentando o Incremento Longitudinal.

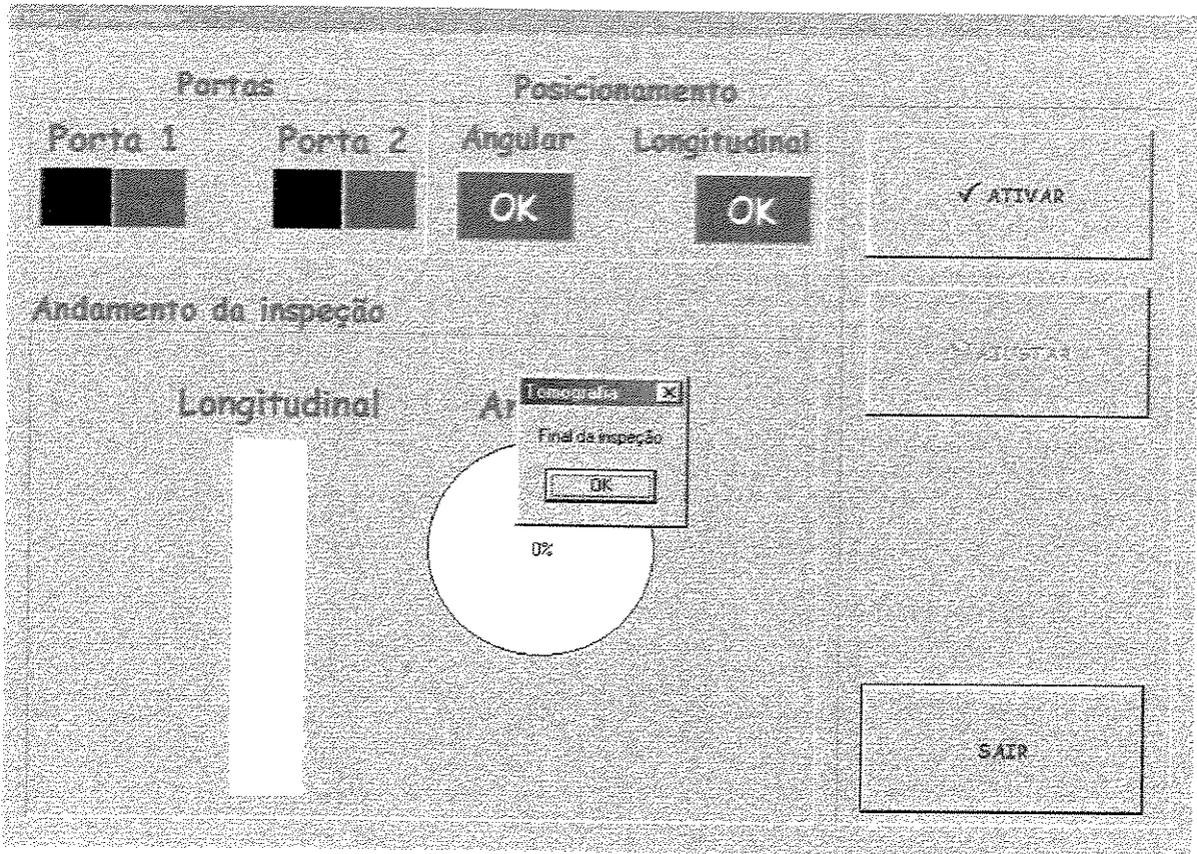


Figura A I-4 – Procedimento Final de Inspeção Automatizada.

## II. Modo Manual:

No modo manual (figura AI-5), o usuário poderá selecionar uma determinada seção, e após repetir todos os procedimentos do modo automático (checagem de portas, posicionamento) é dado início ao ensaio. O corpo gira em torno de sua longitude, e cada parte selecionada é analisada. O ensaio se encerra quando a volta é completada. A figura AI-6 apresenta a seqüência de operações de ensaios realizadas em Modo Manual.

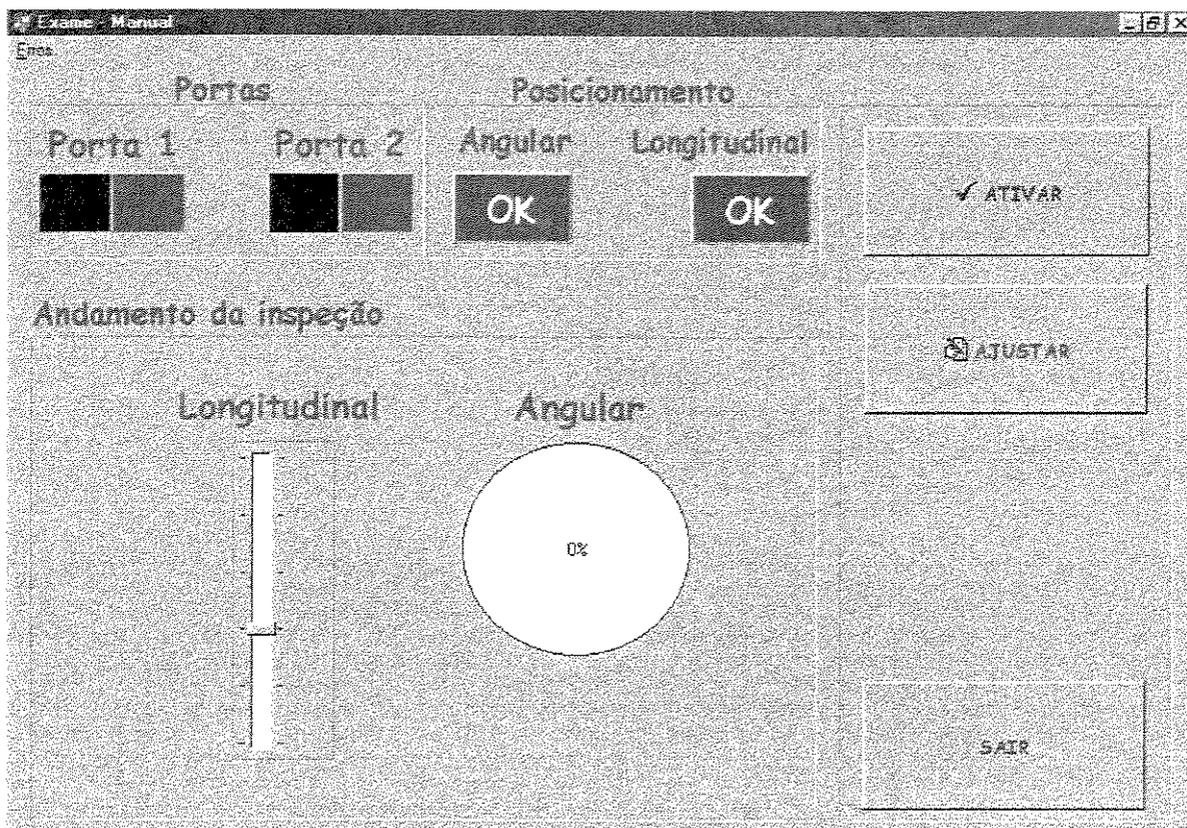


Figura A I- 5 – Tela de Visualização – Modo Manual.

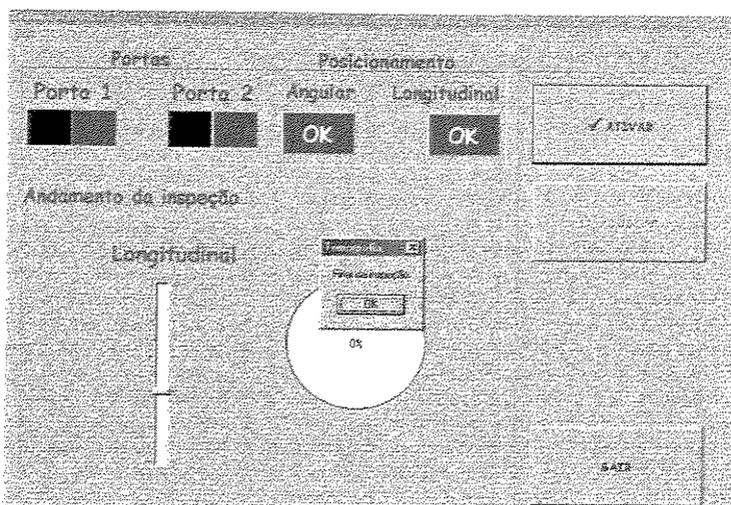
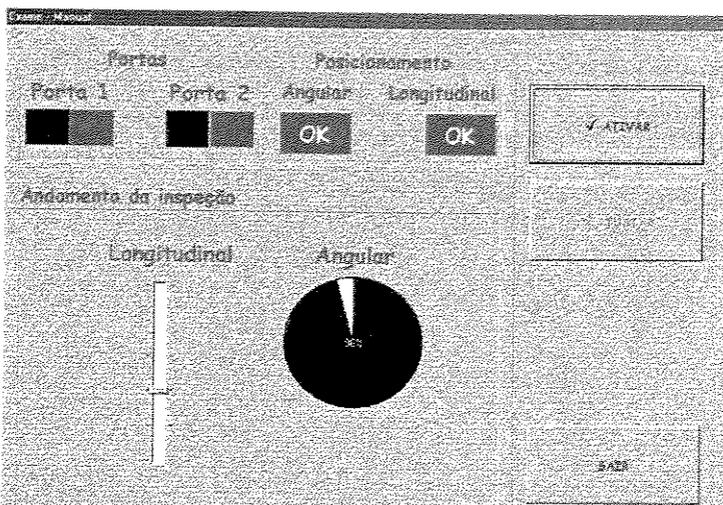
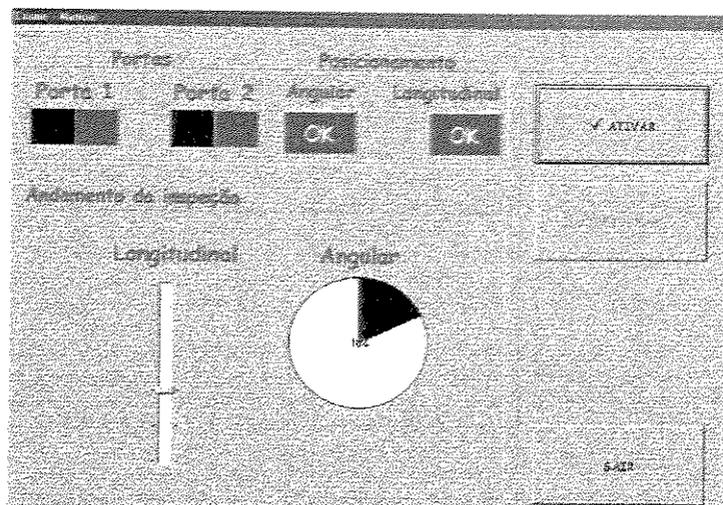


Figura A I-6 – Tela de Visualização – Sequências de Operações - Modo Manual.

## **Anexo II: Descrição Funcional dos Programas de Acionamento e Controle Implementados**

**Programa 1:** No momento que IN1 é acionado - movimenta motor 1 em incrementos. Deverá aparecer uma mensagem de movimentação. Se IN2 - Desliga motor, mensagem de falha, aciona saída OUT2, temporização, parada de 2 segundos, depois continua. Se IN3 - mensagem de interrupção, parada. Volta a posição inicial (IN6). No final do curso (IN7) será enviada uma mensagem de Parada, e no final da análise, o sistema retornará para a posição inicial (IN6). A figura 1 apresenta o programa implementado.

**Programa 2:** Este programa desenvolverá os mesmos procedimentos do programa 1, com o acréscimo de mais 2 motores para análise da falha.

Por outro lado, as entradas IN6 e IN7 referentes aos motores adicionais são acrescentadas às anteriores. Caso haja falha (IN2) - Sub-rotina ( movimenta o segundo motor sobre a falha). No caso IN1, o sistema volta a posição inicial IN6, e no caso de IN7(fdc), o sistema parará, afixando uma mensagem. A seguir o sistema volta a posição inicial IN6, voltando a posição inicial do motor 2, girando 180° o motor 3 e repetindo a rotina.



Applied Motion Products 1240i Drive ?

Current: 0,22 A/Phase  
Idle Current: 0% 25% 50% 100%

20000 steps/rev

Jog Parameters  
Speed: 2,100 rev/sec  
Accel: 25 rev/s/s  
Use Jog CW as Input 5  
Use Jog CCW as Input 6

COM port: 1 2 3 4

Download Upload Execute Save Open Print Quit

User Units: name inch steps/inch 20000  
At Limits Switches will be: not used

Line	Description
26	If Input 7 low, go to line 36
27	Go to line 23
28	
29	MMI: "Falha"
30	Set Output 1 high
31	Set Output 2 low
32	Wait 2 seconds
33	Set Output 2 high
34	Go to line 22
35	
36	MMI: "Final da Inspeção"
37	Set Output 1 high
38	Set Output 3 low
39	Wait 2 seconds
40	Set Output 3 high
41	Set Output 1 low
42	CCW to sensor 8 low, 1 rps
43	Set Output 1 high
44	Go to line 1
45	
46	MMI: "Interrupção Acionada"
47	Set Output 1 high
48	Wait 2 seconds
49	Set Output 1 high
50	CCW to sensor 1 low, 1 rps
51	Set Output 1 high
52	Set Output 3 low
53	Go to line 21

Figura A II 1(b) – Programa 1 implementado - Inspeção na direção X

SiNet Hub Programmer V1.11 - A: prog2.SVT

Applied Motion Products

SiNet Hub-8  
Version: ?

**Drives**

1	Axis 1: 1240i, 1.00 A
2	Axis 2: 1240i, 1.00 A
3	Axis 3: 1240i, 1.00 A
4	none
5	none
6	none
7	none
8	none

Change...

**Download**  
**Upload**  
**Execute**

**Save**  
**Open**  
**Print**  
**Quit**

**Port**

- Comm 1
- Comm 2
- Comm 3
- Comm 4

If limit is reached during a move, terminate move and  
halt program

Line	Description	Clear
1	Axis 1:Wait for Input 1 low	
2	Axis 1:Set Output 3 low	
3	MML: "Inicialização"	
4	Axis 1:Set Output 3 high	
5	Axis 1:Set Output 1 low	
6	Axis 1:CW to sensor 7 low, 1.0 rps	
7	Axis 1:Set Output 1 high	
8	Axis 1:Set Output 3 low	
9	MML: "Fim de curso direito"	
10	Wait 2 seconds	
11	MML: "Inicialização"	
12	Axis 1:Set Output 3 high	
13	Axis 1:Set Output 1 low	
14	Axis 1:CCW to sensor 8 low, 1.0 rps	
15	Axis 1:Set Output 3 low	
16	Axis 1:Set Output 1 high	
17	MML: "Fim de curso esquerdo"	
18	MML: "Fim da inicialização"	
19		
20	Axis 1:Wait for Input 1 low	
21	Axis 1:Set Output 1 low	
22	Axis 1:CW 50.0 rev, 10.0 rps	
23	Axis 1:If Input 1 low, go to line 47	
24	Axis 1:If Input 2 low, go to line 25	
25	Call subroutine on line 53	
26	Axis 1:If Input 7 low, go to line 29	
27	Go to line 22	
28		

Figura A II 2 (a) – Programa 2 implementado - Inspeção completa

SiNet Hub Programmer 11.11 - A: prog2-SNH

Applied Motion Products

SiNet Hub-8  
Version: ?

**Drives**

1	Axis 1: 1240i, 1.00 A
2	Axis 2: 1240i, 1.00 A
3	Axis 3: 1240i, 1.00 A
4	none
5	none
6	none
7	none
8	none

Change...

**Download**  
**Upload**  
**Execute**  
**Save**  
**Open**  
**Print**  
**Quit**

**Port**

- Comm 1
- Comm 2
- Comm 3
- Comm 4

If limit is reached during a move, terminate move and

halt program

Line	Description	Clear
28		
29	MMI: "Fim 1ª parte"	
30	Axis 1: Set Output 1 high	
31	Axis 1: Set Output 3 low	
32	Wait 2 seconds	
33	Axis 1: Set Output 3 high	
34	Axis 1: Set Output 1 low	
35	Axis 1: CCW to sensor 8 low, 10.0 rps	
36	Axis 1: Set Output 1 high	
37	Axis 1: Set Output 3 low	
38	Axis 2: Abs move to ,0 rev, 1.0 rps	
39	Input 3: Fim de curso 180°	
40	Axis 3: If Input 3 low, go to line 1	
41	Axis 3: Set Output 1 high	
42	Axis 3: CW 2.0 rev, 1.0 rps	
43	Axis 3: Set Output 3 low	
44	Axis 3: Set Output 1 high	
45	Go to line 21	
46		
47	MMI: "Interrupção acionada"	
48	Axis 1: Set Output 1 high	
49	Wait 2 seconds	
50	Axis 1: Set Output 1 low	
51	Axis 1: CCW to sensor 8 low, 1.0 rps	
52	Axis 1: Set Output 1 high	
53	Axis 1: Set Output 3 low	
54	Go to line 20	
55		

Figura A II 2 (b) – Programa 2 implementado - Inspeção completa

SiNet Hub Programmer V1.11 - A: prop2.SMT

**Applied Motion Products**

SiNet Hub-8  
Version: ?

**Drives**

1	Axis 1: 1240i, 1,00 A
2	Axis 2: 1240i, 1,00 A
3	Axis 3: 1240i, 1,00 A
4	none
5	none
6	none
7	none
8	none

Change...

**Download**  
Upload  
Execute

Save  
Open  
Print  
Quit

**Port**  
 Comm 1  
 Comm 2  
 Comm 3  
 Comm 4

If limit is reached during a move, terminate move and  
halt program

Line	Description	Clear
48	Axis 1: Set Output 1 high	
49	Wait 2 seconds	
50	Axis 1: Set Output 1 low	
51	Axis 1: CCW to sensor 8 low, 1,0 rps	
52	Axis 1: Set Output 1 high	
53	Axis 1: Set Output 3 low	
54	Go to line 20	
55		
56	MMI: "Falha"	
57	Axis 1: Set Output 1 high	
58	Axis 2: Set Output 1 low	
59	Axis 2: CW 20,0 rev, 3,0 rps, return	
60	Axis 2: CCW 20,0 rev, 3,0 rps, return	
61	Axis 2: Set Output 1 high	
62	Return from subroutine	
63		
64		
65		
66		
67		
68		
69		
70		
71		
72		
73		
74		
75		

Figura A II 2 (c) – Programa 2 implementado - Inspeção completa

## **Anexo III: Listagem dos Programas 3 e 4 de Acionamento e Controle Implementados**

Simulamos nos programas 3 e 4 o automatismo relativo à validação da movimentação do tomógrafo. A IHM (Interface Homem Máquina) é feita através do posicionamento do sistema de medição através das “setas” no teclado do computador e a inicialização do programa através da tecla “Enter”.

O refinamento da posição inicial é feito através das teclas “I / O”, citadas abaixo:

### **Para ambos os Modos 3 e 4:**

IN1 : Término de refinamento e inicialização

IN2 : Movimentação do motor no sentido horário

IN3: Movimentação do motor no sentido anti-horário

IN5: Reinicialização

### **Para o modo 4 sómente:**

IN4: Representa a ocorrência de falha. No caso do programa no modo 2, passa a inspecionar transversalmente.

### **III.1- Programa 3 – Modo Automático de Inspeção do Motor Foguete**

**Características do programa 3:** são quatro seções (tomos) em que serão lidos oito pontos em cada um deles. O movimento é longitudinal (para na primeira seção transversal), lê os oito pontos da mesma, volta o curso e caminha até o próximo tomo, repete a leitura dos oito pontos, e repete o procedimento até o 4º tomo, onde depois da leitura dos oito pontos, retorna à posição original.

SiNet Hub Program Listing

Applied Motion Products, Inc. (800) 525-1609

Fax (831) 761-6544

Programming Software Version: 1.13

Filename: C:\SiProg\foguetete\tomo1.SNH

Hardware:

Axis 1 (Axis 1): 1240i, 20000 steps/rev, 1 A. Units: rev (20000 steps/rev). Limits: closed.

Axis 3 (Axis 3): 1240i, 20000 steps/rev, 1 A. Units: rev (20000 steps/rev). Limits: closed.

1 MMI: (wait for enter)

"Programa Teste Falhas em Foquetes

J.J.ROSARIO - 2003"

2 Wait Time 1 seconds

3 Call subroutine on line 31

4 Wait Time 1 seconds

5 MMI: (display text only)

"inicio de programa"

6 Repeat 4 times

7 MMI: (display text only)

"Movimentação em linha horizontal ao corpo do foguete"

8 Axis 3: Set Output 1 low

9 Axis 3: Feed to Length(cw) 16,0 rev, 3,0 rps, A=100,0 rev/s/s, D=100,0 rev/s/s

10 Axis 3: Set Output 1 high

11 Wait Time 2 seconds

12 Repeat 8 times

13 MMI: (display text only)

"Movimentação lateral"

14 Axis 1: Set Output 1 low

15 Axis 1: Feed to Length(cw) 5,0 rev, 3,0 rps, A=100,0 rev/s/s, D=100,0 rev/s/s

16 Axis 1: Set Output 1 high

17 End Repeat

18 Wait Time 1 seconds

19 MMI: (display text only)

"Retomo lateral"

20 Axis 1: Set Output 2 low

21 Axis 1: Feed to Length(ccw) 40,0 rev, 3,0 rps, A=100,0 rev/s/s, D=100,0 rev/s/s

22 Axis 1: Set Output 2 high

23 End Repeat

24 Wait Time 1 seconds

25 MMI: (display text only)  
"Retorno a posição inicial"  
26 Axis 3: Set Output 2 low  
27 Axis 3: Feed to Length(ccw) 64,0 rev, 3,0 rps, A=100,0 rev/s/s, D=100,0 rev/s/s  
28 Axis 3: Set Output 2 high  
29 MMI: (wait for enter)  
"fim...."  
30 Go To Line 5  
31 Axis 1: If Input 1 low go to line 50  
32 Axis 1: If Input 2 low go to line 38  
33 Axis 1: If Input 3 low go to line 41  
34 Axis 3: If Input 1 low go to line 50  
35 Axis 3: If Input 2 low go to line 44  
36 Axis 3: If Input 3 low go to line 47  
37 Go To Line 31  
38 MMI: (display text only)  
"movimentação horizontal (+)"  
39 Axis 1: Feed to Length(cw) 1,0 rev, 3,0 rps, A=100,0 rev/s/s, D=100,0 rev/s/s  
40 Go To Line 31  
41 MMI: (display text only)  
"Movimentação horizontal (-)"  
42 Axis 1: Feed to Length(ccw) 1,0 rev, 3,0 rps, A=100,0 rev/s/s, D=100,0 rev/s/s  
43 Go To Line 31  
44 MMI: (display text only)  
"Movimentação Lateral(+)"  
45 Axis 3: Feed to Length(cw) 1,0 rev, 3,0 rps, A=100,0 rev/s/s, D=100,0 rev/s/s  
46 Go To Line 31  
47 MMI: (display text only)  
"Movimento Lateral (-)"  
48 Axis 3: Feed to Length(ccw) 1,0 rev, 3,0 rps, A=100,0 rev/s/s, D=100,0 rev/s/s  
49 Go To Line 31  
50 Return from subroutine

**Modo 3:** Inspeção automatizada com monitoramento de falhas em todos os pontos. Neste modo há uma movimentação no sentido longitudinal em quatro posições e no sentido transversal em oito posições

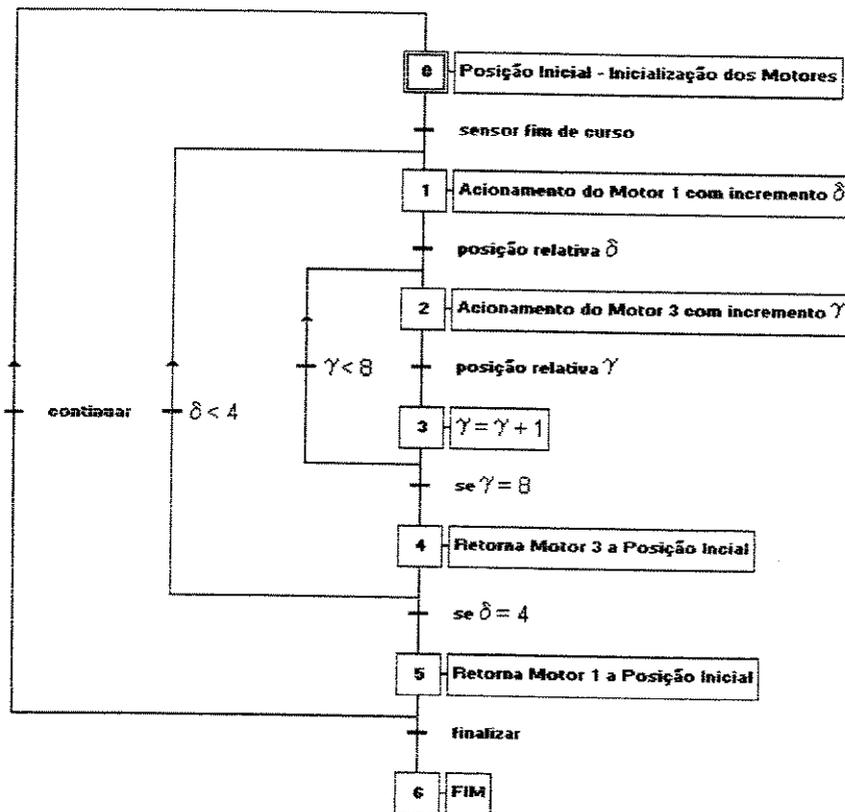


Figura A III 1: GRAFCET do programa modo 3

### III.2- Programa 4– Modo Automático de Inspeção do Motor Foguete

**Características do programa 4:** neste programa esta representado uma possível falha e para que isto aconteça, o “tomógrafo” caminha até o tomo quatro, e so vai continuar neste tomo se for dado um sinal representado pela entrada manual “in4” representando a falha. No caso de falha, o tomógrafo lê os oito pontos transversais, caso contrario retorna.

SiNet Hub Program Listing

Applied Motion Products, Inc. (800) 525-1609

Fax (831) 761-6544

Programming Software Version: 1.13

Filename: C:\SiProg\foguete\tomo2.SNH

Hardware:

Axis 1 (Axis 1): 1240i, 20000 steps/rev, 1 A. Units: rev (20000 steps/rev). Limits: closed.

Axis 3 (Axis 3): 1240i, 20000 steps/rev, 1 A. Units: rev (20000 steps/rev). Limits: closed.

1 MMI: (wait for enter)

"Programa Final - Teste de Falhas em Foguetes - Jaetis - "

2 Wait Time 1 seconds

3 Call subroutine on line 38

4 Wait Time 1 seconds

5 MMI: (display text only)

"inicio de programa"

6 Repeat 4 times

7 MMI: (display text only)

"Movimentação em linha horizontal ao corpo do foguete"

8 Axis 3: Set Output 1 low

9 Axis 3: Feed to Length(cw) 16,0 rev, 3,0 rps, A=100,0 rev/s/s, D=100,0 rev/s/s

10 Axis 3: Set Output 1 high

11 Repeat 10 times

12 Wait Time 0,01 seconds

13 Axis 1: If Input 4 low go to line 17

14 Axis 3: If Input 4 low go to line 17

15 End Repeat

16 Go To Line 29

17 Repeat 8 times

18 MMI: (display text only)

"Movimentação lateral"

19 Axis 1: Set Output 1 low

20 Axis 1: Feed to Length(cw) 5,0 rev, 3,0 rps, A=100,0 rev/s/s, D=100,0 rev/s/s

21 Axis 1: Set Output 1 high

22 End Repeat

23 Wait Time 1 seconds

24 MMI: (display text only)

"Retorno lateral"

Allow jogging on MMI arrow keys.

25 Axis 1: Set Output 2 low

26 Axis 1: Feed to Length(ccw) 40,0 rev, 3,0 rps, A=100,0 rev/s/s, D=100,0 rev/s/s

27 Axis 1: Set Output 2 high

28 Go To Line 30

29 Wait Time 0,1 seconds

30 End Repeat

31 Wait Time 1 seconds

32 MMI: (display text only)

"Retorno a posição inicial"

Allow jogging on MMI arrow keys.

33 Axis 3: Set Output 2 low

34 Axis 3: Feed to Length(ccw) 64,0 rev, 3,0 rps, A=100,0 rev/s/s, D=100,0 rev/s/s

35 Axis 3: Set Output 2 high

36 MMI: (wait for enter)

"fim ..."

37 Go To Line 5

38 Axis 1: If Input 1 low go to line 57

39 Axis 1: If Input 2 low go to line 45

40 Axis 1: If Input 3 low go to line 48

41 Axis 3: If Input 1 low go to line 57

42 Axis 3: If Input 2 low go to line 51

43 Axis 3: If Input 3 low go to line 54

44 Go To Line 38

45 MMI: (display text only)

"movimentação horizontal (+)"

46 Axis 1: Feed to Length(cw) 1,0 rev, 3,0 rps, A=100,0 rev/s/s, D=100,0 rev/s/s

47 Go To Line 38

48 MMI: (display text only)

"Movimentação horizontal (-)"

Allow jogging on MMI arrow keys.

49 Axis 1: Feed to Length(ccw) 1,0 rev, 3,0 rps, A=100,0 rev/s/s, D=100,0 rev/s/s

50 Go To Line 38

51 MMI: (display text only)

"Movimentação Lateral(+)"

52 Axis 3: Feed to Length(cw) 1,0 rev, 3,0 rps, A=100,0 rev/s/s, D=100,0 rev/s/s

53 Go To Line 38

54 MMI: (display text only)

"Movimento Lateral (-)"

Allow jogging on MMI arrow keys.

55 Axis 3: Feed to Length(ccw) 1,0 rev, 3,0 rps, A=100,0 rev/s/s, D=100,0 rev/s/s

56 Go To Line 38

57 Return from subroutine

**Modo 4:** Inspeção automatizada com movimentação no sentido longitudinal em 4 posições e somente em caso de ocorrência de falhas haverá uma inspeção no sentido transversal em 8 posições. No caso a ocorrência de falha, será simulada por acionamento do botão numero 4 (conforme programado).

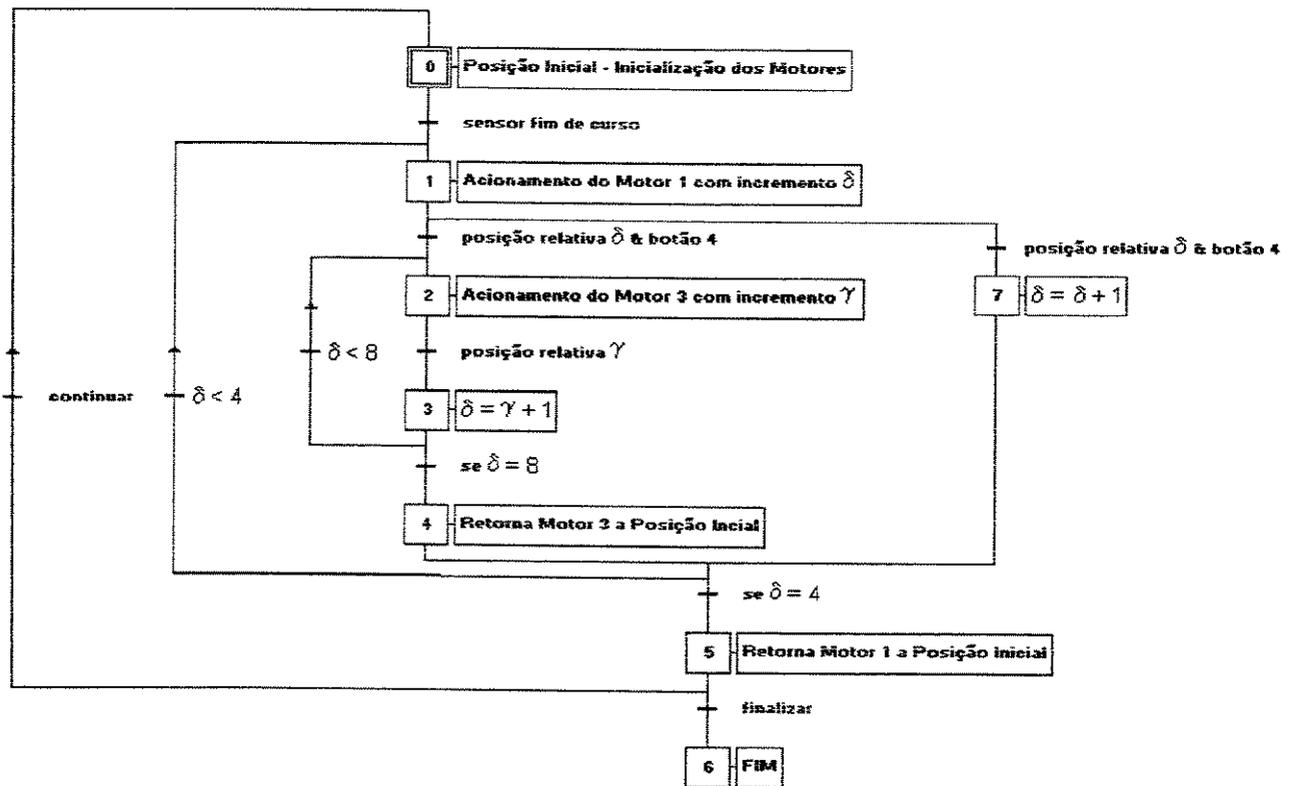


Figura A III 2: GRAFCET do programa modo 4