

**ANDRÉ CÉSAR MARTINS CAVALHEIRO**

**PROJETO DE SISTEMAS DE  
CONTROLE MODULARES E  
DISTRIBUÍDOS**

Dissertação apresentada à  
Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia

São Paulo

2004

17.02.141 : 0824  
20/07/02

ANDRÉ CÉSAR MARTINS CAVALHEIRO

**PROJETO DE SISTEMAS DE  
CONTROLE MODULARES E  
DISTRIBUÍDOS**

FD-3803

Dissertação apresentada à  
Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia

Programa:  
Engenharia Mecânica

Área de concentração:  
Engenharia de Controle e  
Automação Mecânica –  
Engenharia Mecatrônica

Orientador:  
Prof. Dr. Diolino José dos  
Santos Filho

São Paulo

2004

*A Iza como declaração do meu amor e  
carinho, a toda minha Família e aos  
meus queridos Amigos.*

## AGRADECIMENTOS

Adoraria que estas palavras de agradecimento significassem algo mais que um singelo formalismo, revelando um profundo sentimento de gratidão. Desta forma, estou grato a Deus pelo consentimento de mais esta oportunidade em minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Diolino José dos Santos Filho, obrigado por tudo que tem feito e pela pessoa extraordinária que é em todos os sentidos, provando-me que a vida é um eterno aprendizado e que a humildade é uma das virtudes fundamentais para a obtenção do conhecimento.

Sou eternamente grato a minha companheira Izabella pelo seu imensurável carinho e paciência em suportar a minha ausência em vários momentos nestes anos e pelas horas de sono e de lazer que dedicou à revisão deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi, Dr. Celso Lucchesi e a Dra. Maria Cecília Ribeiro Gomes pela confiança, apoio e incentivo no período em que mais precisei de auxílio.

Agradeço ao Prof. Dr. Darci Odloak e a Dra. Bernadete Machado Odloak pelo estímulo, orientação e ajuda nos momentos que senti maior dificuldade neste trabalho.

Sou grato a todos os professores e colegas da Escola Politécnica pelo interesse, sugestões e apoio fundamentais para o sucesso deste trabalho.

Quanto aos meus amigos, agradeço a todos pela compreensão da minha ausência em determinadas ocasiões em que este trabalho teve prioridade e, ao apoio e incentivo motivadores que auxiliaram no término deste trabalho.

Agradeço ao pessoal da equipe técnica da COSIPA, Prosys Engenharia Ltda, Iberdrola Empreendimentos do Brasil S.A., ABB, Bailey e Alston e aos colegas de trabalho de todos os projetos que tive o prazer de participar, pelo apoio e incentivo ao desenvolvimento deste trabalho.

Finalizando, agradeço aos eternos amigos do grupo de estudo da Mecatrônica, em especial a minha amiga Cristina Toshie Motohashi Matsusaki e ao meu amigo Francisco Yastami Nakamoto e todos os demais que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Com a evolução dos dispositivos de controle e o aperfeiçoamento das técnicas da Engenharia de Software, os sistemas de controle têm incrementado o seu grau de flexibilidade, autonomia e confiabilidade, considerando a distribuição das funções de controle, ao invés de estruturas centralizadas. Ao se aplicar o conceito de modularização (de software) associado ao conceito de distribuição dos programas de controle, identifica-se a necessidade de se estabelecer uma correspondência entre estes de uma forma sistemática. Neste trabalho é proposto um conjunto de procedimentos para auxiliar na implementação de projetos de automação considerando a arquitetura dos dispositivos de controle e técnicas para auxiliar na modularização e distribuição do esforço computacional associado às estratégias de controle utilizando a metodologia estruturada PFS/MFG, que é uma técnica derivada das redes de Petri, para efetuar a modelagem do algoritmo de controle.

## ABSTRACT

Due to the evolution of control devices and the improvement of software engineering techniques, the control systems have been enhancing its flexibility, autonomy and reliability degree in regard to control tasks distribution instead of central control. Upon applying the software modularity concept to construct the programs jointly with the control programs distribution concept, there is the necessity to set up a correspondence among them through a systematic method. In this context, this work proposes a methodology that helps an automation project, considering the control devices architecture and techniques, which are implemented to build control modules and computer effort distribution with control strategies using PFS/MFG methodology, which comes from Petri Net, to accomplish control algorithm modeling.

# SUMÁRIO

RESUMO .....	III
ABSTRACT .....	IV
SUMÁRIO.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XIII
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 JUSTIFICATIVA.....	2
1.3 OBJETIVO .....	3
1.4 METODOLOGIA DE PESQUISA .....	3
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	5
<b>CAPÍTULO 2 AUTOMAÇÃO E CONTROLE APLICADOS A SISTEMAS PRODUTIVOS.....</b>	<b>7</b>
2.1 SISTEMA PRODUTIVO: OBJETIVO E ORGANIZAÇÃO.....	7
2.2 CONTROLE DE SISTEMAS PRODUTIVOS .....	8
2.3 SISTEMAS DE CONTROLE: OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO.....	9
2.3.1 <i>Sistemas de Controle de Variáveis Contínuas</i> .....	9
2.3.2 <i>Sistemas de Controle de Variáveis Discretas</i> .....	9
2.3.3 <i>Características dos Sistemas de Automação e Controle</i> .....	10
2.3.4 <i>Características dos sistemas de controle em relação à quantidade de dados</i> .....	11
2.3.5 <i>Arquitetura de Controle de um Sistema Produtivo</i> .....	13
2.4 MÓDULO DE CONTROLE E CONTROLE MODULAR.....	16
2.5 DISPOSITIVOS DE CONTROLE DE SISTEMAS PRODUTIVOS .....	16

2.5.1 Padronização dos conceitos aplicados pela IEC para configuração de sistemas de controle..	17
2.5.2 Padronização das linguagens de programação dos Controladores Programáveis .....	19
2.5.3 Arquitetura básica de um Controlador Lógico Programável.....	21
<b>CAPÍTULO 3 TÉCNICAS UTILIZADAS PARA MODELAGEM E ESTRUTURAÇÃO DE</b>	
<b>ALGORITMOS DE CONTROLE DE SPS.....</b>	<b>24</b>
3.1 FERRAMENTA DE MODELAGEM .....	25
3.1.1 MFG (Mark Flow Graph) e PFS (Production Flow Schema) .....	26
3.2 TÉCNICAS DE ESTRUTURAÇÃO APLICADAS A FERRAMENTA DE MODELAGEM .....	27
3.2.1 O PFS e a técnica de refinamento sucessivo .....	28
3.2.2 O PFS e a utilização de construções lógicas restritas da programação estruturada .....	31
3.2.3 Obtenção do Modelo de Controle do SP utilizando a Metodologia Estruturada MFG, PFS ....	33
3.3 NORMA IEC 61499 APLICADA A METODOLOGIA PFS/MFG ESTRUTURADA .....	34
3.3.1 Aplicação dos Blocos Funcionais na modelagem de SP .....	34
3.3.1.1 Estrutura básica de um bloco funcional.....	35
3.3.2 Aplicação do conceito de 'scantime' aplicada a norma IEC 61499.....	37
3.3.3 A interpretação do PFS segundo a norma IEC 61499 .....	38
3.3.4 A aplicação do MFG na norma IEC 61499.....	39
<b>CAPÍTULO 4 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE CONTROLE E OS CRITÉRIOS</b>	
<b>ENVOLVIDOS NA ALOCAÇÃO DE BLOCOS FUNCIONAIS .....</b>	<b>43</b>
4.1 ESPECIFICAÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DOS BLOCOS FUNCIONAIS EM SISTEMAS DE	
CONTROLE DE SP .....	44
4.1.1 Indeterminismo na Distribuição dos Blocos Funcionais em CPs.....	45
4.1.2 Otimização da Alocação de Blocos Funcionais em Controladores Programáveis.....	47
4.2 COMPLEXIDADES ENVOLVIDAS NA DELINEAÇÃO DAS ÁREAS DE CONTROLE E NA QUANTIFICAÇÃO	
DE CONTROLADORES EM UM SP .....	50
4.2.1 Mapeamento dos Pontos de Alocação dos Painéis de Controle.....	51
4.2.1.1 Aplicação de Técnicas de Planejamento de Arranjo Físico.....	52
4.2.1.2 Obtenção das coordenadas para fixação dos painéis de controle .....	54
4.2.1.3 Centro Virtual do Custo Regional (CVCR) .....	56
4.3 OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE BLOCOS FUNCIONAIS EM CONTROLADORES PROGRAMÁVEIS.....	63



4.3.1 <i>Abordagens para o Problema de Alocação de Blocos Funcionais</i> .....	64
4.3.1.1 Distribuição dos blocos funcionais e as características dos CPs .....	66
4.3.2 <i>Estratégia de Controle de um SP</i> .....	67
4.3.2.1 Modelo do bloco funcional .....	67
4.3.2.2 Modelo dos controladores .....	68
4.3.2.3 Custo computacional dos blocos funcionais .....	69
4.3.2.4 Carga de processamento dos CPs .....	70
4.3.2.5 Consumo de recursos dos CPs .....	71
4.3.3 <i>Algoritmo para Alocação dos Blocos Funcionais nos Controladores do SP</i> .....	72
4.3.3.1 Especificação das Premissas para alocação dos Blocos Funcionais.....	72
4.3.3.2 Alocação Ótima dos Blocos Funcionais nos Controladores.....	73
<b>CAPÍTULO 5 PROCEDIMENTOS PARA O PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE</b>	
<b>MODULARES E DISTRIBUÍDOS.....</b>	<b>78</b>
5.1 EXTENSÕES NECESSÁRIAS À METODOLOGIA DE IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE CONTROLE SED .....	78
5.2 IMPACTOS NA DEFINIÇÃO DAS NECESSIDADES .....	83
5.3 IMPACTOS NO PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE .....	84
5.4 IMPACTO NO PROJETO DO SOFTWARE DE CONTROLE.....	86
<b>CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES FINAIS .....</b>	<b>89</b>
6.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO .....	91
6.2 TRABALHOS FUTUROS.....	92
6.3 TRABALHOS PUBLICADOS .....	93
<b>ANEXO A - MARK FLOW GRAPH (MFG) E PRODUCTION FLOW SCHEMA (PFS).....</b>	<b>94</b>
A.1 FUNDAMENTOS DO MARK FLOW GRAPH (MFG).....	94
A.1.1 <i>Matriz de Incidência do MFG</i> .....	95
A.1.2 <i>Vetor Marcação</i> .....	97
A.1.3 <i>Regras de Habilitação de Transição</i> .....	97
A.1.4 <i>Vetor de Disparo</i> .....	98
A.1.5 <i>Equação de Estados</i> .....	98
A.2 PRODUCTION FLOW SCHEMA (PFS) E SEUS ELEMENTOS .....	99

<b>ANEXO B - PROBLEMA DE DESIGNAÇÃO .....</b>	<b>101</b>
<b>ANEXO C – EXEMPLO DE PROCEDIMENTO PARA A DEFINIÇÃO DAS ÁREAS DE CONTROLE .....</b>	<b>105</b>
C.1 MODELAGEM DA POSIÇÃO FÍSICA DOS INSTRUMENTOS NO CHÃO DE FÁBRICA .....	107
<b>ANEXO D – APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS PARA O PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE MODULARES E DISTRIBUÍDOS.....</b>	<b>111</b>
D.1 MODELO DA CALDEIRA .....	112
D.2 DIAGRAMA DE SISTEMATIZAÇÃO DAS FUNÇÕES DE CONTROLE.....	114
D.3 MODELAGEM DO FLUXO DAS FUNÇÕES DE CONTROLE .....	117
D.4 PROJETO DO SOFTWARE DE CONTROLE .....	120
D.5 OBSERVAÇÕES FINAIS.....	149
<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>151</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Os três aspectos principais na resolução de um problema. ....	4
Figura 1.2 – Ciclo de desenvolvimento da metodologia proposta .....	5
Figura 2.1 – Sistema de controle de variáveis contínuas com realimentação.....	9
Figura 2.2 – Sistema de controle de variáveis discretas com realimentação .....	10
Figura 2.3 – Diagrama conceitual básico de um sistema de controle.....	11
Figura 2.4 – Classificação dos processos de automação em relação a quantidade de E/S e a Carga de Processamento .....	12
Figura 2.5 – Formas básicas de arquiteturas de controle de SP .....	14
Figura 2.6 – Estrutura básica de um CP.....	21
Figura 2.7 – Característica de processamento de um CP.....	22
Figura 3.1 – Elementos estruturais básicos do MFG.....	26
Figura 3.2 – Elementos estruturais do PFS .....	27
Figura 3.3 – Exemplo de refinamento dos elementos estruturais do PFS .....	30
Figura 3.4 – Estruturas padrões para modelagem em PFS/MFG estruturado.....	32
Figura 3.5 – Exemplo da interconexão dos equipamentos de um sistema de controle distribuído segundo a IEC .....	35

Figura 3.6 – Esquema básico de um Bloco Funcional padronizado pela IEC 61499 ....	36
Figura 3.7 – Modularização dos Blocos Funcionais .....	36
Figura 3.8 – Bloco funcional de interface segundo a IEC 61499 .....	37
Figura 3.9 – Elementos básicos do PFS aplicados aos conceitos da norma IEC 61499	39
Figura 3.10 – Exemplo de um bloco funcional utilizando bloco estruturado sequencial do MFG .....	41
Figura 4.1 – PFS do algoritmo de alocação de blocos funcionais proposto .....	48
Figura 4.2 – Procedimento utilizado para escolha das áreas de um sistema produtivo..	62
Figura 4.3 – Matriz de custo utilizada no método de designação de blocos funcionais em CPs .....	74
Figura 5.1 – Ciclo de vida de um sistema de controle.....	79
Figura 5.2 – Ciclo de Prototipagem.....	80
Figura 5.3 – Exemplo de estrutura de programa segmentada em blocos funcionais. ....	87
Figura 5.4 – Exemplo de estrutura hierárquica de controle. ....	88
Figura A.1 – Elementos básicos do MFG.....	95
Figura A.2 – Elementos do PFS. ....	99
Figura A.3 – Elemento atividade em rede L/T.....	100
Figura A.4 – Elemento distribuidor em rede L/T.....	100

Figura C.1 – Vista frontal do sistema de queima .....	105
Figura C.2 – Vista superior do sistema de queima.....	106
Figura C.3 – Layout final do sistema de queima.....	109
Figura D.1 – Diagrama esquemático da caldeira. ....	113
Figura D.2 – Diagrama de estruturação das funções de controle do sistema de controle da caldeira.....	116
Figura D.3 – Modelo PFS do sistema.....	117
Figura D.4 – Modelo PFS/MFG da etapa de Inicialização.....	118
Figura D.5 – Modelo PFS/MFG da etapa do Teste de Estanqueidade do Cavalete de Gás .....	119
Figura D.6 – Modelo PFS/MFG da etapa de Purga de gases da Fornalha .....	119
Figura D.7 – Modelo PFS/MFG da etapa de acendimento do Queimador.....	119
Figura D.8 – Modelo PFS/MFG da etapa de Liberação do controle de Queima da Caldeira para Modulação .....	120
Figura D.9 – Bloco Funcional da etapa de Inicialização. ....	121
Figura D.10 – Bloco Funcional da etapa do Teste de Estanqueidade. ....	122
Figura D.11 – Bloco Funcional da etapa de Purga.....	123
Figura D.12 – Bloco Funcional de acendimento do Queimador.....	124
Figura D.13 – Diagrama Ladder do sistema de Partida da caldeira .....	137

Figura D.14 – Lista de Variáveis do sistema de Partida da Caldeira .....	143
Figura D.15 – Arquitetura do sistema de controle da caldeira.....	146
Figura D.16 – Matriz de designação dos blocos funcionais. ....	148

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação das Linguagens de Programação.....	20
Tabela 5.1 Atividades contidas em procedimentos de controle de um sistema de controle. .....	81
Tabela 5.2 – Posição física dos instrumentos de um SP.....	85
Tabela C.1 – Coordenadas de localização dos instrumentos dos queimadores de gás 1 e 2 .....	106
Tabela C.2 – Posição física e sinais gerados pelos instrumentos do sistema de queima. .....	107
Tabela C.3 – Características do CP utilizada para o cálculo da divisão das áreas de controle.....	108
Tabela C.4 – Lista de E/S dos CPs do sistema de queima obtida. ....	108
Tabela D.1. – Lista de instrumentos. ....	114
Tabela D.2 – Principais funções utilizadas no cálculo da carga de processamento.....	144
Tabela D.3 – Carga de processamento exigida por cada bloco funcional do sistema de controle da caldeira. ....	145
Tabela D.4 – Alocação dos sinais do sistema nos CPs.....	147
Tabela D.5 – Arquitetura do sistema de controle da caldeira. ....	148

Tabela D.6 – Verificação da arquitetura obtida ..... 149



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, o processo de automação vem sofrendo transformações que têm sido fortemente influenciadas pelo avanço da tecnologia e dos recursos computacionais (SANTOS FILHO, 2000). Com a evolução da microeletrônica, os processadores têm incrementado a capacidade e velocidade de processamento, assim como, as redes de comunicação também vêm sendo aprimoradas aumentando a performance e a velocidade de transmissão. Como consequência, os sistemas de controle têm sofrido modificações no sentido de distribuir as funções de controle em diversas unidades de processamento (MIYAGI, 1993). Assim, a estratégia de controle anteriormente concentrada em um único processador, hoje é distribuída em diversos processadores, os quais, fazem parte do sistema de controle do processo produtivo.

Com a divisão e distribuição das estratégias de controle, surgiu a necessidade de alocar-se os diversos segmentos de software<sup>1</sup> de controle de uma forma homogênea, buscando minimizar a comunicação entre os controladores e evitar que os programas fiquem concentrados em um único processador. Portanto, a tarefa de homogeneização da distribuição da carga computacional nos diversos processadores e a minimização da comunicação entre processadores, são tarefas cruciais para um bom desempenho dos sistemas de controle distribuídos (SANTOS, 2001); (VALDEHI; KRISHNAN, 1997); (PATTIPATI et al., 1990); (CURY, 2000); (QUEIROZ, 2000); (NORONHA, 2001).

### 1.1 MOTIVAÇÃO

A principal motivação para a elaboração desse trabalho foi a carência de uma metodologia que venha auxiliar a execução da modularização e da distribuição da lógica de controle em sistemas de controle distribuídos. Algumas metodologias não consideram na síntese do sistema de controle as normas técnicas que padronizam a forma de programação, as linguagens de programação e a arquitetura dos controladores

---

<sup>1</sup> Corresponde ao que se denomina de componentes de software, que são módulos correspondentes a blocos de instruções no contexto de uma abordagem estruturada de programação.

como base para a definição da arquitetura do sistema de controle (MIYAGI, 1996); (MORAES; CASTRUCCI, 2001); (GRANDI, 2000); (ALMEIDA; DAROLT, 2001). Por sua vez, a escolha da ferramenta de modelagem adequada e a definição das variáveis que influenciam no dimensionamento do sistema de controle são fatores fundamentais para a obtenção de uma arquitetura de controle adequada (SANTOS FILHO, 2000); (SANTOS FILHO, 1998). Assim, podemos concluir que há uma carência nas metodologias estudadas no sentido de agrupar a padronização sugerida pelas normas técnicas para a síntese de sistemas de controle com a eficiência de uma ferramenta de modelagem que permita definir modelos de forma clara, possibilitando assim, efetuar a composição destes sistemas de forma eficiente e padronizada. Para isso, torna-se necessária a definição de um conjunto de procedimentos que possibilitem a especificação de controladores em função de suas características, relacionando estes aos módulos de controle que podem ser gerados seguindo as normas técnicas pertinentes. Portanto, utilizando a junção destes conceitos de forma racional, pode-se obter um sistema de controle padronizado, capaz de efetuar o controle de forma eficiente.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A necessidade de uma metodologia adequada para modularização e distribuição da estratégia de controle, com o objetivo de utilizar de forma racional os recursos disponíveis em Controladores Programáveis (CPs) que se caracterizam por realizarem tarefas concorrentes do tipo “*hard real time*”, e a padronização da interface dos algoritmos de controle seguindo uma norma que regularize como devem ser criados os módulos para permitir a implementação e/ou reutilização das estratégias de controle em qualquer CP, justifica a proposta do presente trabalho. Por sua vez, algumas metodologias de implementação de projetos de automação que abordam, sucintamente, a distribuição da estratégia de controle em sistemas de controle distribuídos, não definem nenhuma sistemática para modularizar a estratégia de controle seguindo uma norma que regulamente essa tarefa, assim como também não determinam critérios para realizar a distribuição desses módulos nos CPs (MIYAGI, 1996); (MORAES; CASTRUCCI, 2001); (GRANDI, 2000); (ALMEIDA; DAROLT, 2001). Portanto, com uma sistemática que aborde a modularização e a distribuição da estratégia de controle em um número adequado de controladores, torna-se possível maximizar a performance

do sistema, utilizando de forma racional seus recursos e padronizando a programação dos módulos de controle, justificando assim, a elaboração desse trabalho.

### **1.3 OBJETIVO**

Este trabalho visa desenvolver uma metodologia que auxilie na modelagem, modularização e implementação do algoritmo de controle de forma estruturada e padronizada de acordo com normas técnicas que tratam da regulamentação desse assunto, para a implementação de sistemas automáticos que utilizam controladores programáveis. Assim, considera-se as especificações dos controladores apropriados para o controle do processo produtivo, para então, sistematizar-se a distribuição do software de controle, para maior confiabilidade e redução de custos, fatores os quais, são extremamente importantes em um projeto de automação (SANTOS, 2001). Para tanto, utilizam-se ferramentas que possibilitam alcançar resultados ótimos, tomando como base critérios considerados no projeto e as características dos recursos utilizados para efetuar o controle do sistema produtivo. Considerando-se esses fatores, têm-se como resultado, um número adequado de controladores para realizar o controle do sistema e seus respectivos sinais de entrada e saída, assim como também os módulos estruturados do software de controle e suas respectivas alocações nos controladores.

### **1.4 METODOLOGIA DE PESQUISA**

Para aprimorar a qualidade do trabalho e atingir uma melhor excelência nos resultados, a metodologia de pesquisa aplicada baseou-se no ciclo de desenvolvimento proposto por (GOMES, 1997), considerando-se como base do desenvolvimento três pontos fundamentais que fecham um ciclo na busca da solução de um problema, conforme apresentado na figura 1.1.

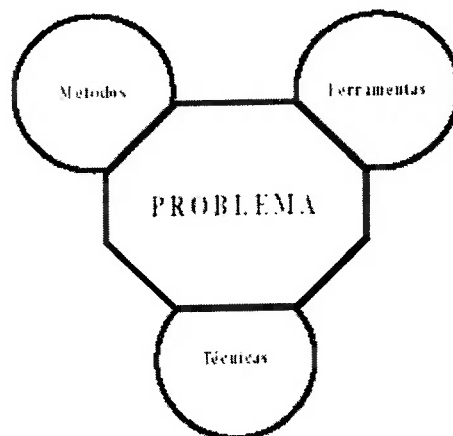


Figura 1.1 – Os três aspectos principais na resolução de um problema.

Desta forma, a execução do projeto pode ser realizada em três fases:

1ª Fase. Levantamento de requisitos realizando-se pesquisas das possíveis soluções. Em seguida realiza-se uma comparação segundo critérios de avaliação, verificando-se a viabilidade das soluções e finalmente a escolha da solução.

2ª Fase. Nesta fase realiza-se a especificação da solução escolhida.

3ª Fase. Gera-se um protótipo da solução.

Para realização deste trabalho, as técnicas são utilizadas como suporte para a implementação da solução, os métodos são utilizados para orientar a evolução do trabalho na busca da solução e as ferramentas auxiliam na implementação da solução obtida. Nessa metodologia, esses três pontos devem evoluir, simultaneamente, de forma gradativa e interativa, convergindo-se assim, para a solução do problema.

Baseado nesta proposta, a figura 1.2 apresenta os principais aspectos abordados nesse trabalho.

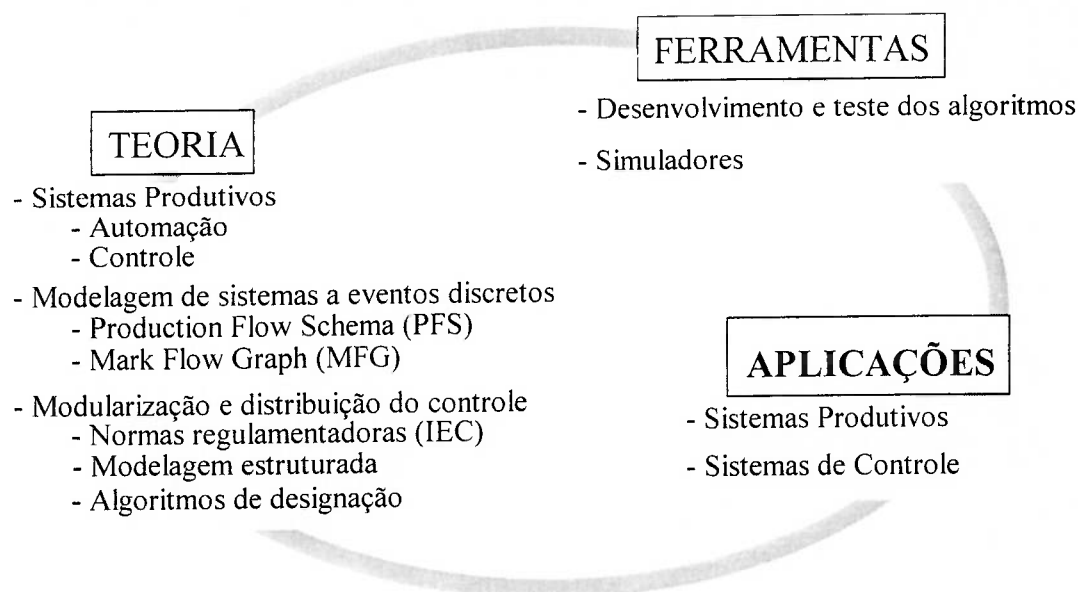


Figura 1.2 – Ciclo de desenvolvimento da metodologia proposta

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 1 apresenta-se, inicialmente, uma introdução, onde estão descritos o objetivo, as motivações, as justificativas e o método utilizado para a elaboração deste trabalho.

No Capítulo 2 faz-se uma revisão bibliográfica sobre os assuntos relacionados à automação aplicada a sistemas produtivos e dá-se um panorama das variáveis, sistemas e recursos envolvidos nesse assunto, citando as partes elementares que compõem estes elementos e as características que influenciam na modularização e distribuição da lógica de controle nos controladores do sistema.

No Capítulo 3 é feita uma introdução sobre as ferramentas de modelagem e suas características. São abordados os assuntos de estruturação do software de controle e a aplicação das normas técnicas que tratam desse assunto no modelo estruturado proposto.

No Capítulo 4 é apresentada a metodologia que aborda o problema de alocação dos componentes de software em controladores programáveis, apresentando os

elementos necessários para efetuar essa tarefa. Também são apresentados os algoritmos propostos para efetuar a tarefa de designação dos módulos de controle de forma sistemática.

No Capítulo 5 é apresentada a aplicação dos procedimentos propostos na metodologia e a associação desses procedimentos à metodologia de projeto de sistemas de controle proposta por Miyagi (1996) no sentido de adaptá-la para o projeto de sistemas de controle distribuídos considerando as normas técnicas que abordam este assunto.

No Capítulo 6 são descritas as principais conclusões e as sugestões que podem contribuir para a evolução deste trabalho. O glossário e a bibliografia encerram este trabalho.

Há também um conjunto de quatro anexos com a seguinte finalidade:

- Anexo A. Apresenta de forma detalhada as técnicas PFS e MFG.
- Anexo B. Apresenta o conceito relacionado ao problema de designação e o algoritmo aplicado para otimizar a alocação dos componentes de software nos controladores do sistema.
- Anexo C. Apresenta um exemplo para a aplicação do algoritmo de divisão das áreas de controle em que se aplicam os conceitos para a definição da arquitetura de hardware em função do layout do sistema.
- Anexo D. Apresenta um exemplo para a aplicação dos procedimentos para o projeto de sistemas de controle modulares e distribuídos.

# CAPÍTULO 2

## AUTOMAÇÃO E CONTROLE APLICADOS

### A SISTEMAS PRODUTIVOS

#### 2.1 SISTEMA PRODUTIVO: OBJETIVO E ORGANIZAÇÃO

Segundo (GROOVER, 2000), um Sistema Produtivo (SP) pode ser classificado como um conjunto de pessoas, equipamentos e procedimentos comprometidos para realizar as operações de manufatura de um Processo Produtivo.

Uma particularidade dos SPs é que esses podem ser considerados, como sistemas regidos por eventos (HO, 1989), (SANTOS FILHO; MIYAGI, 1991) de modo que a ocorrência de um evento gera uma mudança nas condições e estados do sistema, ocasionando assim, a evolução dinâmica do sistema. Portanto, segundo (MIYAGI, 1996), os SP podem ser classificados como Sistemas a Eventos Discretos (SED), o que traz inúmeras vantagens a respeito da possibilidade de utilizar ferramentas já consagradas que tratam desse tipo de sistema.

Por sua vez, o objetivo de um SP consiste na execução de tarefas, com a finalidade de agregar valor a um determinado produto. A execução de tarefas em questão pode ser interpretada de duas formas (SANTOS FILHO, 2000):

- transformação de estado do elemento que passa pelo SP;
- prestação de serviço ao elemento que passa pelo SP.

Para realizar essas tarefas de forma objetiva, o SP é organizado em função do tipo de produto/serviço e do volume de produção/serviço planejados, os quais, uma vez definidos, determinam os requisitos básicos para a especificação da tecnologia necessária para a automação do SP (MIYAGI, 1996); (SANTOS FILHO, 2000).

## 2.2 CONTROLE DE SISTEMAS PRODUTIVOS

De uma forma genérica, ações de controle tem o objetivo de manter um comportamento desejado, em relação aos sinais de entrada em um sistema (CASSANDRAS, 1993). Porém, para possibilitar que o controle possa ser feito de forma automática, ou seja, substituindo o trabalho humano com o intuito de otimizar o processo para atingir de uma forma eficiente os objetivos da produção, é necessário implementá-lo de forma racional. Para que isso seja possível, é necessário que sejam utilizadas ferramentas de modelagem que representem o objeto de controle de forma inequívoca e que tenham capacidade de representar todas as características intrínsecas ao sistema que se deseja projetar (MIYAGI, 1996); (SANTOS FILHO, 2000). Como o objeto de estudo são os SPs, que podem ser classificados como SED, então torna-se apropriado utilizar uma ferramenta que possibilite representar todas as características desse sistema com um devido embasamento teórico. Portanto, neste trabalho, o Mark Flow Graph (MFG) é adotado como ferramenta de modelagem do controle de SPs.

O fato do MFG (HASEGAWA, 1984); (MIYAGI, 1996); (SANTOS FILHO, 1998); (SANTOS FILHO, 2000) ser derivado das Redes de Petri (combinando a generalização das Redes de Petri ordinárias, suas reduções e extensões e o caráter prático do GRAFCET e do SFC), torna essa ferramenta capaz de representar o comportamento dinâmico de SEDs, permitindo a representação de paralelismos, sequenciamento e concorrência de eventos, que são características inerentes a estes sistemas, fazendo com que esta técnica se constitua em uma forma de modelagem efetiva para a representação formal e realização do controle de SPs.

Para auxiliar no desenvolvimento racional e estruturado de modelos MFG de SPs foi desenvolvido o PFS - Production Flow Schema (MIYAGI, 1996); (SANTOS FILHO, 2000) que é uma técnica que concilia as vantagens disponíveis em uma abordagem de nível mais alto do SP, possibilitando uma descrição sistemática e consistente das características específicas desses sistemas. Essa ferramenta permite tratar de forma gradativa as dificuldades existentes em sistemas que apresentam maior complexidade tanto estrutural quanto comportamental e também permite refinar-se gradativamente os modelos para obter-se um nível de fidelidade adequada.



## 2.3 SISTEMAS DE CONTROLE: OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO

Para descrever os diferentes aspectos que caracterizam os sistemas de controle e definir alguns conceitos fundamentais presentes ao longo do texto, são apresentadas algumas definições para que haja uma padronização de conceitos.

Em relação ao tipo de variável controlada, conceitualmente, os sistemas são divididos em três grandes grupos: Sistemas de Controle de Variáveis Contínuas, Sistemas de Controle de Variáveis Discretas e Sistemas de Controle Híbridos (MIYAGI, 1996); (MORAES; CASTRUCCI, 2001).

### 2.3.1 Sistemas de Controle de Variáveis Contínuas

O sistema de controle trabalha com variáveis quantitativas que podem assumir infinitos valores dentro de certos intervalos determinados e, normalmente, é usado para controle de grandezas físicas analógicas e/ou contínuas como vazão, pressão, temperatura, etc. Geralmente, esse tipo de controle trabalha com o conceito de realimentação, ou seja, controle em malha fechada como mostra a figura 2.1. Mas há casos onde os sistemas são, basicamente, de monitoração ou manipulação de valores, onde não existe a realimentação automática de valores para efetuar o controle do SP.

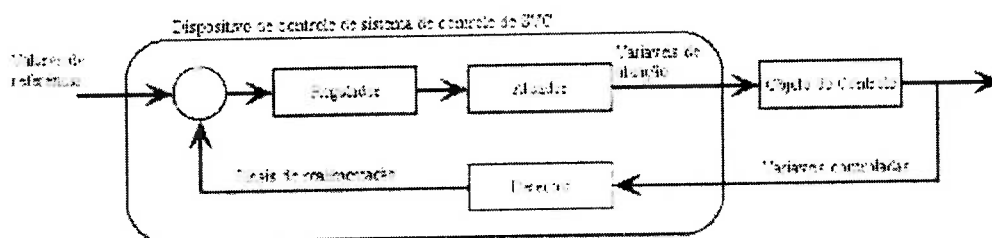


Figura 2.1 – Sistema de controle de variáveis contínuas com realimentação

### 2.3.2 Sistemas de Controle de Variáveis Discretas

O controle trabalha com estados discretos e eventos instantâneos, isto é, trabalha com variáveis qualitativas que assumem valores determinados, usualmente, 0 e 1, ligado e desligado, aberto e fechado, mas podendo também assumir outros valores, como por exemplo, um determinado valor do nível de um tanque ou uma quantidade fixa de um

produto. Mas, esses valores, independentemente da variável, não variam continuamente no tempo. Uma das formas de interpretar-se a figura 2.2 é considerar que a realimentação é usada para garantir que o comando enviado pelo sistema de controle alterou o estado do objeto de controle, como no caso de acionamento de motores ou abertura de válvulas.

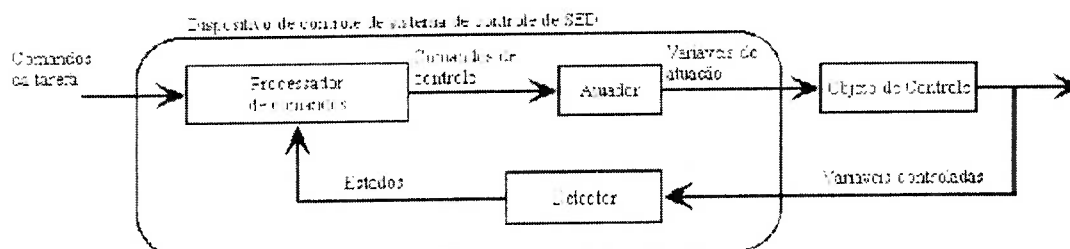


Figura 2.2 – Sistema de controle de variáveis discretas com realimentação

### 2.3.3 Características dos Sistemas de Automação e Controle

Um sistema de controle é dividido em cinco componentes básicos (MIYAGI, 1996):

**Dispositivo de comando:** é onde o operador entra com os comandos de acionamento ou com os valores de ajustes das variáveis;

**Dispositivo de atuação:** é onde o sistema envia comandos aos atuadores para que estes possam manipular o processo;

**Dispositivo de detecção:** é onde o sistema recebe as informações das variáveis do processo;

**Dispositivo de monitoração:** é composto basicamente da IHM (Interface Homem Máquina) onde o operador tem uma visão geral das variáveis do processo;

**Dispositivo de controle:** onde é realizado a lógica de controle do processo e o intertravamento propriamente dito.

A figura 2.3 ilustra os componentes básicos de um sistema de controle:

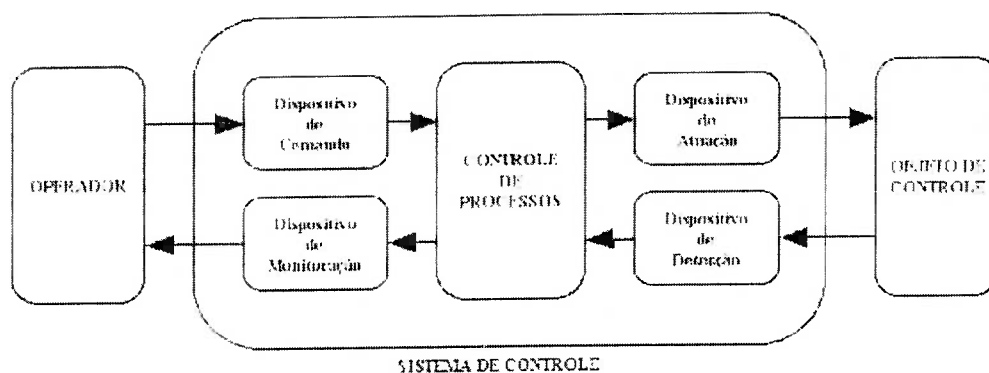


Figura 2.3 – Diagrama conceitual básico de um sistema de controle

Portanto, é fundamental estar claro no projeto do sistema quais os dispositivos que fazem parte do sistema de controle para tornar possível a modelagem e a síntese do sistema de controle. Tendo como base à estrutura sugerida por Miyagi (1996), torna-se simples a definição destes pontos como pode ser observado nos trabalhos que fazem uso desta técnica para a definição dos componentes do sistema. Assim, a metodologia pretende tomar como base esta estrutura para a definição dos elementos do sistema juntamente com as técnicas propostas por Miyagi (1996) para a síntese do sistema de controle.

#### 2.3.4 Características dos sistemas de controle em relação à quantidade de dados

Segundo Flynn (1972), a complexidade de uma arquitetura de controle está diretamente ligada ao tipo e a quantidade de informação que o sistema irá processar. Em (Flynn 1972) foi proposta uma classificação dos sistemas de controle baseada em uma visão macroscópica do problema, analisando os principais itens que compõem um sistema de controle, as inter-relações entre os processos (módulos de controle) e suas cargas computacionais. Para isso, os sistemas foram divididos em dois grandes grupos, que estão relacionados na figura 2.4.

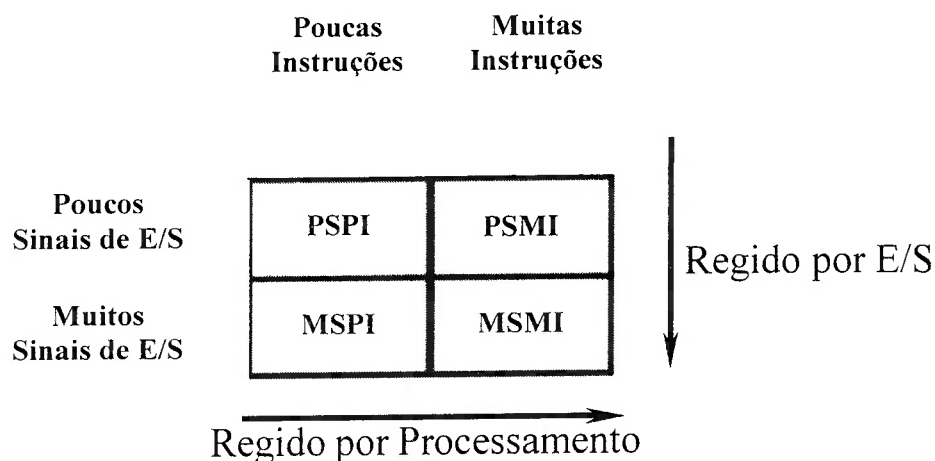


Figura 2.4 – Classificação dos processos de automação em relação a quantidade de E/S e a Carga de Processamento

Os sistemas regidos por processamento, são caracterizados por aplicações que consomem muito tempo de processamento e pouca comunicação entre os programas que compõem o sistema de controle. Já os sistemas regidos por E/S, são compostos de aplicações que realizam muitas chamadas aos dispositivos de Entrada/Saída quando comparados à demanda de processamento.

Na maioria dos casos de SPs, os processos são regidos por E/S, onde o sistema possui muitas chamadas aos dispositivos de entrada e saída de sinais para monitoração e controle, e pouca carga de processamento consumida pela lógica de controle para efetuar o controle do sistema<sup>2</sup>.

Além da classificação do sistema de controle quanto à carga de processamento gerada pelo software de controle e a quantidade de entradas e saídas, os sistemas de controle também são classificados em relação à quantidade de interação do usuário com o sistema. Para isso, (SHIVARATRI et al., 1992) classificou os sistemas de automação em dois grupos:

**Interativos:** onde a aplicação necessita de uma grande interação do usuário com o sistema de controle.

<sup>2</sup> Observa-se que as lógicas de controle configuradas em CPs, na maioria dos ramos industriais, são elaboradas de forma simplificada envolvendo na maioria dos casos somente a parte de intertravamento, sequências de partida e parada de equipamento e monitoração de variáveis. A parte de cálculos avançados, sistemas de manutenção, planejamento de produção entre outras variáveis que consomem mais processamento, na maioria dos casos, são processadas por controladores dedicados, ficando assim, somente a parte crítica do controle para ser executada pelos CPs.

**Do tipo batelada:** correspondem aos sistemas que trabalham com o conceito de lote, que permitem que o usuário com poucos comandos possa realizar uma sequência de tarefas programadas.

Para a definição do procedimento proposto neste trabalho será utilizado para distribuir o controle do SP, serão considerados os seguintes aspectos: a quantidade de informações processadas, a quantidade de interações do sistema e a quantidade de informações que o sistema de controle troca com o SP. Segundo Flynn (1972) e Shivaratri et al (1992), esses aspectos são fundamentais para definir a arquitetura e a alocação dos módulos de controle nos controladores. A metodologia trata essas características levando em consideração o tamanho do módulo (consumo de memória do módulo de controle) e o tempo que este deve ser processado (constante de tempo do módulo de controle) em função das características dos controladores adotados para efetuar o controle, garantindo assim que o sistema de controle não cause distúrbios no SP, independentemente, da arquitetura definida para realizar o controle do SP. Essas considerações devem objetivar uma boa performance no funcionamento do sistema, a redução dos custos no dimensionamento e a implementação racional do controle, buscando sempre atender aos requisitos de projeto impostos pelo cliente, as características dos CPs e dos SPs. Além de satisfazer essas considerações, a metodologia proposta permite que o usuário interaja nas variáveis que definem o peso de determinados parâmetros de ponderação com o intuito de adaptar os resultados obtidos com a metodologia aos padrões de arquitetura considerados em cada projeto. Esses assuntos serão abordados com maiores detalhes nos próximos capítulos onde será apresentada a metodologia para obtenção dos módulos de controle, os aspectos considerados para o cálculo da carga computacional e o algoritmo utilizado para a distribuição dos módulos de controle visando obter uma solução ótima segundo os parâmetros de projeto adotados.

### **2.3.5 Arquitetura de Controle de um Sistema Produtivo**

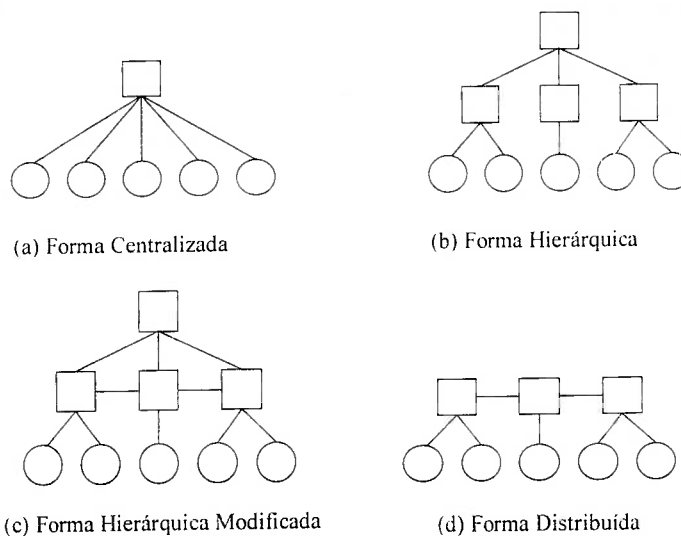
Segundo (DILTS et al., 1991), arquitetura de um sistema é definida como a estrutura e organização lógica de funcionamento de um sistema, onde estão determinadas as inter-relações entre os componentes do sistema e onde cada componente deste sistema possui uma função específica de controle. Desta forma, os

sistemas podem ser classificados em dois grupos em função da topologia adotada para efetuar o controle, são elas (SANTOS FILHO, 1998):

**Sistema de controle Centralizado:** São sistemas que possuem um único controlador onde, toda a lógica de controle do sistema é processada neste controlador. Este sistema, normalmente, é aplicado à pequenos processos com menor número de entradas e saídas. A figura 2.5(a) apresenta o esquema de uma arquitetura de controle do tipo centralizada.

**Sistema de controle Distribuído:** Neste tipo de sistema há dois ou mais controladores, envolvidos na execução do controle. Neste contexto, os controladores podem estar organizados de três formas básicas (Fig. 2.5 (b), (c) e (d)):

- Arquitetura distribuída do tipo hierárquica
- Arquitetura distribuída do tipo hierárquica modificada
- Arquitetura totalmente distribuída



**Obs.** Os elementos  $\square$  representam dispositivos de controle.  
Os elementos  $\circ$  representam sensores e atuadores

Figura 2.5 – Formas básicas de arquiteturas de controle de SP

A arquitetura de controle hierárquica (ZHONG; WONHAM, 1990) permite a síntese baseada em diferentes níveis de abstração do sistema. Outras arquiteturas exploram a modularidade no nível da planta (controle distribuído). Segundo (LIN; WONHAM, 1990); (RUDIE; WONHAM, 1992); (WILLNER; HEYMANN, 1991), a

natureza modular do controle distribuído, impõe restrições no fluxo de informações pertinentes, sendo necessário a definição de um grupo de controladores onde, cada qual, observa e controla apenas uma parte do processo global.

Na abordagem de controle modular (WONHAM; RAMADGE, 1988), ao invés de se utilizar um único controlador execute o controle do processo global, procura-se organizar este processo em sub-processos para serem alocados em uma série de controladores, de forma que, atuando em conjunto, estes satisfaçam as especificações do SP. Neste caso, deseja-se que os controladores resultantes sejam modulares, isto é, que a ação conjunta destes tenha o mesmo desempenho que a do controle centralizado (controlador monolítico). Quando essa propriedade é verificada, a abordagem de controle modular é bastante vantajosa no sentido de promover maior flexibilidade, maior eficiência computacional e segurança na sua aplicação (CURY, 2000); (QUEIROZ, 2000). No presente trabalho, propõe-se a criação de módulos de controle seguindo o conceito de sistema de controle distribuído de maneira a obtê-los para que sejam autônomos, independentes e atômicos utilizando o PFS/MFG estruturado como técnica de modelagem e seguindo a padronização sugerida pela norma IEC 61499. Desta forma, é feito um refinamento do controle modular clássico explorando a estrutura descentralizada de SP, no sentido de agregar o mínimo necessário de subsistemas em cada módulo. Como resultado, é apresentada uma abordagem que possibilita a síntese dos diagramas MFG resultantes da modelagem do algoritmo de controle do SP em múltiplos controladores modulares (ou módulos de controle) para efetuar o controle do SP de forma distribuída.

Em relação à definição da arquitetura de controle, ainda existem variações em relação às arquiteturas apresentadas que podem ser consideradas para efetuar o controle do processo produtivo, cujas propriedades, especialmente, vantagens e desvantagens relativas, já são bem conhecidas. Porém, essas arquiteturas representam a maioria dos casos aplicados aos sistemas de controle de SP, e assim elas serão utilizadas neste trabalho como base para definir a arquitetura do sistema de controle. Em (BRENNAN; NORRIE, 1999) pode ser encontrado um método de avaliação de desempenho de arquiteturas de controle baseado na modelagem tanto do sistema de controle quanto do próprio equipamento que pode ser aplicado para definição da arquitetura de controle do SP.

## **2.4 MÓDULO DE CONTROLE E CONTROLE MODULAR**

Uma forma de diminuir a complexidade da síntese de módulos de controle é efetuar a divisão das tarefas envolvidas no controle do SP em várias subtarefas, utilizando a metodologia PFS/MFG estruturada e combinando os submódulos resultantes de modo a solucionar o problema original. Segundo Cury (2000), a síntese modular permite, que problemas complexos possam ser decompostos em módulos mais simples, de forma a atribuir maior flexibilidade ao controle resultante. Além de ser mais facilmente construído, um controle modular costuma ser mais facilmente modificado, atualizado e corrigido (MIYAGI, 1996). Por exemplo, se uma sub tarefa for alterada, só é preciso reconstruir o módulo correspondente ao invés de se refazer todo o sistema de controle.

Os problemas envolvendo sistemas de grande porte costumam apresentar grande número de tarefas a serem cumpridas. Conforme provado em (CURY, 2000), quanto maior for o número de módulos envolvidos na solução do problema, mais vantajosa será a abordagem modular em relação à monolítica. Por esse motivo, esta metodologia busca trabalhar com módulos de controle, distribuindo de maneira ótima o esforço computacional destes módulos nos CPs. Mas, para isso é necessário que fiquem nítidos alguns conceitos referentes às características de processamento dos CPs que influenciam, diretamente, na distribuição dos módulos e na definição da arquitetura de controle que atenda aos requisitos de processamento impostos pelas tarefas que precisam ser controladas no SP.

## **2.5 DISPOSITIVOS DE CONTROLE DE SISTEMAS PRODUTIVOS**

Um dos meios efetivos de realizar o controle de forma satisfatória é utilizando um Controlador Programável (CP). O CP é uma máquina eletrônica programável capaz de realizar o controle da maioria dos processos de um SP e pode ser configurado por uma equipe não especializada em informática. O CP tem como função executar tarefas com a finalidade de controlar e comandar, em ambiente industrial e em tempo real (RILLO, 1983); (MIYAGI, 1996).



A seguir são apresentados alguns conceitos inerentes a esses equipamentos e as respectivas normas regulamentadoras que tratam dos requisitos de configuração dos mesmos, juntamente, com os conceitos envolvidos e os fatores que influenciam no processamento dos programas que os CPs podem processar.

### **2.5.1 Padronização dos conceitos aplicados pela IEC para configuração de sistemas de controle**

À parte 3 da norma IEC 61131 define um modelo de software que deve ser obedecido quando são desenvolvidas aplicações para um CP. Este modelo compõe-se basicamente de (LEWIS, 1998):

**Variáveis:** São elementos de um programa cujos valores podem ser modificados ao longo de sua execução. As variáveis podem ser do tipo locais ou globais, onde as variáveis locais são associadas a um nome em um programa, e as variáveis globais são associadas a um endereço de memória e utilizadas para informações entre programas.

**Funções:** São elementos de software que geram uma única saída primária a partir de um número determinado de valores de entrada, sem possuir a capacidade de armazenar quaisquer valores estaticamente dentro de si. Funções, assim como blocos funcionais (ou blocos de função) e programas, são considerados unidades de organização de programas, entidades que podem ser definidas à parte e utilizadas diversas vezes dentro de uma aplicação como blocos de construção de código.

**Blocos Funcionais** (ou blocos de função): também são considerados como uma unidade de organização de programas. São estruturas semelhantes as funções, mas não só os blocos funcionais podem ter mais de um valor de saída, como podem possuir valores internos armazenados de forma estática, que fazem com que duas invocações do mesmo bloco funcional com os mesmos valores de entrada possam ter valores de saída diferentes entre si. Devido a esta característica, blocos funcionais são declarados e recebem identificadores como se fossem variáveis, de forma que possam existir duas instâncias de um mesmo bloco funcional, com identificadores diferentes, possuindo num mesmo momento valores internos diferentes. Devido à esses fatores, muitos especialistas (LEWIS, 1998); (BONFATTI; MONARI; SAMPIERI, 1999) apontam os blocos funcionais como sendo semelhantes aos objetos de linguagens de programação

como C++. A declaração de variáveis globais nos blocos funcionais não era permitida na IEC 61131-3, mas a partir de 1993 a declaração destas passaram a ser permitida devido aos novos conceitos de distribuição de software apresentados pela norma IEC 61499 permitindo que os blocos funcionais trocassem informações com outras entidades externas ao sistema ou entidades alocadas em outros recursos (LEWIS, 1998). Mais detalhes sobre os conceitos e métodos para a elaboração de um bloco funcional é apresentado no capítulo 3 deste trabalho.

**Programas:** terceira e maior unidade de organização de programas, um programa é em vários pontos semelhante a um bloco funcional (possui entradas, saídas, variáveis internas, e deve ser instanciado devido à possibilidade de existência de mais de um programa do mesmo tipo numa aplicação); possui a possibilidade de uso de variáveis globais e diretamente representadas, o uso de variáveis declaradas deste dentro de um caminho de acesso e a impossibilidade deste conter uma instância de outro programa dentro de si. A declaração de um programa deve ser feita dentro de um recurso, e é dentro da declaração deste que blocos funcionais são associados as tarefas. No mínimo, um programa é necessário para que uma aplicação esteja completa.

**Tarefas:** controlam a execução de programas (ou parte deles) e de blocos funcionais contidos nestes. A declaração de uma tarefa (feita dentro de um programa) é simples, contendo apenas seu período de execução (ou, para execução não-periódica, uma variável booleana que servirá para ativá-la) e sua prioridade em relação a outras tarefas. A norma permite que programas e blocos funcionais sejam associados a uma tarefa. Para ser possível controlar a velocidade de execução desses blocos funcionais não associados a tarefas, os mesmos são executados na mesma tarefa que o programa que os contém. Programas não associados a tarefas são executados de forma contínua e com prioridade mínima.

**Recursos:** são as entidades que provêm suporte à execução de programas, podendo cada um ser entendido como “uma interface com uma ‘máquina virtual’” (LEWIS, 1998). Um recurso deve conter um programa no mínimo, e opcionalmente, uma ou mais tarefas. Também devem ser declarados dentro de uma configuração, onde são associado a um microprocessador.

**Configurações:** estão no mais alto nível do modelo de software, correspondendo cada uma a totalidade de software instalado em um CP e devendo conter no mínimo um recurso. Aqui se definem questões diretamente relacionadas ao hardware do CP, como a associação de cada recurso a um microprocessador, os endereços de memória dos canais de entrada e saída, e questões de capacidade do sistema como o número máximo de tarefas permitido.

**Caminhos de acesso:** especificam quais variáveis podem ser referenciadas a partir de outras configurações, com que nome elas devem ser designadas dentro destas, e se é possível modificar seus valores remotamente ou apenas lê-los. Apenas variáveis definidas em programas, recursos ou configurações podem receber este tratamento, e é dentro destes elementos que os caminhos de acesso devem ser declarados.

O conhecimento dessas definições é fundamental para elaborar um algoritmo de controle de acordo com a norma. Considerar estes conceitos na elaboração dos módulos de controle faz com que estes estejam padronizados conforme a norma e permite que estes sejam aplicados a qualquer CP que faça o uso da norma em sua arquitetura (LEWIS, 1998). Portanto, a metodologia considera estes parâmetros na obtenção do algoritmo de controle fazendo o uso de diretrizes que permitam traduzir o modelo MFG em linguagem de programação de CPs seguindo a padronização sugerida pela norma.

## **2.5.2 Padronização das linguagens de programação dos Controladores**

### **Programáveis**

A norma IEC 61131-3 oficializa cinco linguagens de programação de CPs, definindo a sintaxe e os recursos que cada uma deve apresentar em qualquer implementação (embora não seja obrigatória a implementação de todas as cinco; um CP pode possuir apenas uma linguagem de programação e ainda assim ser compatível com a norma). Estas linguagens são (MIYAGI, 1996); (LEWIS, 1998); (BONFATTI; MONARI; SAMPIERI, 1999):

- Texto estruturado (“Structured Text”, ou ST);
- Lista de instruções (“Instruction List”, ou IL);

- Diagrama de relés (“Ladder Diagram”, ou LD);
- Diagrama de blocos de função (“Function Block Diagram”, ou FBD);
- Carta sequencial de funções (“Sequential Function Chart”, ou SFC).

Além dessas linguagens padronizadas pela norma IEC, existem outras linguagens de programação que são disponibilizadas em alguns modelos de CPs, tais como, linguagens de alto nível como C++, Visual Basic, e outras menos usadas como, fluxograma, lógica de boole, tabelas de decisão, etc.. Essas linguagens são divididas em três grandes grupos conforme mostra a tabela 2.1:

Classes	Linguagens
Tabulares	Tabela de Decisão
Textuais	IL (Instruction List)
	ST (Structured Text)
	Álgebra de Boole
Gráficas	LD (Diagrama de Relés)
	FBD (Function Block Diagram)
	SFC (Sequential Flow Chart)
	Fluxograma

Tabela 2.1 – Classificação das Linguagens de Programação

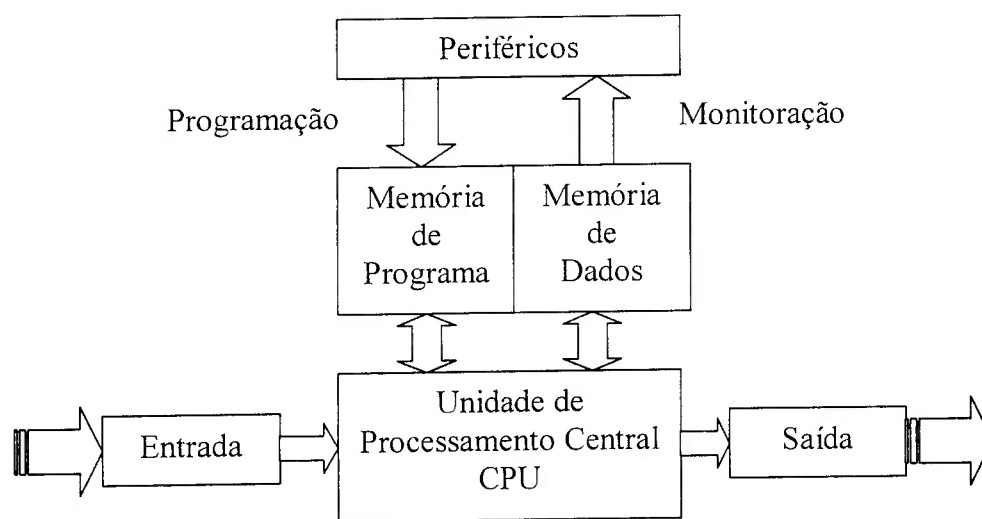
A norma IEC 61131-3 também define padrões a serem usados por todas as linguagens acima (como a forma de se referir a portas de entrada/saída do CP ou a posições de memória específicas) ou a serem usados na sintaxe das declarações de configurações, tarefas e recursos independente da linguagem a ser utilizada para a programação do CP. Ela também fornece alguns blocos funcionais padronizados de uso comum, como contadores e temporizadores, eliminando na grande maioria dos casos a necessidade de elaborar seus códigos.

Mas, independente, dos padrões que são utilizados para elaborar o programa e, independente da linguagem de programação, o algoritmo de controle deve ser modelado utilizando uma ferramenta de modelagem adequada. Dessa forma, passa a existir a

necessidade de tradução do modelo para a linguagem de programação utilizada pelo CP para tornar possível a implementação e a validação do código de controle considerando as características de capacidade e processamento do CP. Portanto, torna-se necessária a utilização de tradutores que sejam capaz de transformar o modelo do algoritmo de controle gerado em linguagem de programação utilizada pelo CP. Para isso, será utilizada na metodologia a sistematização alguns trabalhos que abordam este assunto (SANTOS FILHO; MIYAGI, 1997) fazendo uma tradução do modelo gerado em MFG para as linguagens padronizadas pela IEC 61131-3, possibilitando assim, a de armazenamento e capacidade de processamento do algoritmo de controle no CP.

### 2.5.3 Arquitetura básica de um Controlador Lógico Programável

Um CP possui como estrutura básica: unidade de processamento, interfaces de E/S e memória (SANTOS FILHO, 2000), onde a estratégia de controle e os sinais de entrada e saída (E/S) do sistema são armazenados na unidade de memória do CP e processados de forma cíclica na unidade de processamento onde são calculados os valores das saídas do CP para efetuar o controle do SP, conforme apresentado na figura



2.6.

Figura 2.6 – Estrutura básica de um CP

Por sua vez, o CP tem uma capacidade de armazenamento relacionada com o espaço de memória e uma velocidade de processamento da lógica de controle armazenada em sua memória relacionada com a capacidade do processador de calcular as tarefas contidas no programa com a finalidade de fornecer o resultado dessa lógica antes do tempo imposto pela tarefa. A rede de comunicação também possui uma capacidade de transmissão de dados que é limitada pelas características e capacidade de comunicação de cada controlador.

As limitações de tempo de processamento e capacidade de comunicação ocorrem devido às características impostas pela arquitetura de hardware do controlador e a filosofia de processamento das informações do sistema que segue o conceito de “scantime” como mostra a figura 2.7.

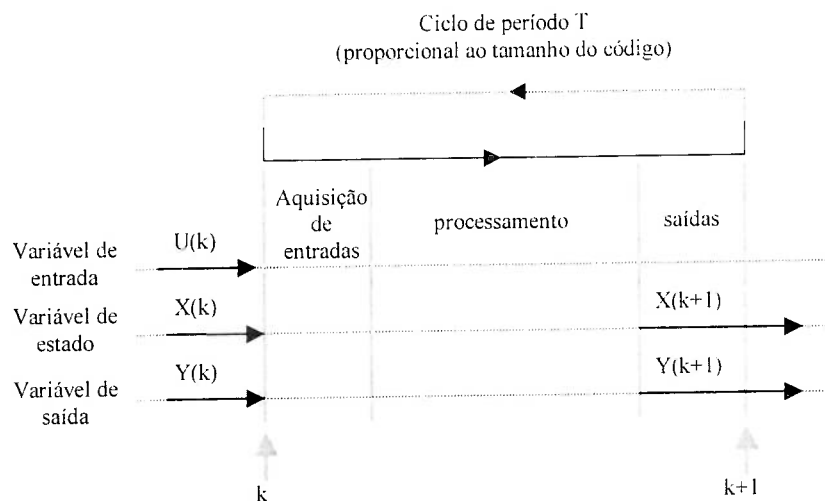


Figura 2.7 – Característica de processamento de um CP

Quando se utiliza uma plataforma de hardware do tipo CP para efetuar o controle de um SP, introduz-se o conceito de “scantime”, também conhecido como tempo de varredura do sistema. Esse conceito tem a característica de varredura cíclica e determinística, onde em cada ciclo, as entradas são, inicialmente, amostradas e em seguida são processadas e, finalmente, os resultados do processamento são enviados às saídas (SANTOS FILHO, 2000). Portanto, o “scantime” do CP deve ser ajustado de forma a manter estável o controle do SP. Por outro lado, o tempo limite para controle do SP é chamado de constante de tempo e deve ser obedecido pelo controlador para que

não ocorra distúrbio proveniente do sistema de controle no controle do SP. Com isso, conclui-se que o tempo de varredura das tarefas designadas ao CP deve ser menor que a constante de tempo dos processos do SP que o CP controla.

Uma vez configurado o tempo de varredura ("scantime") do controlador para executar uma dada tarefa, este deve garantir que a tarefa seja processada no intervalo de tempo estipulado pelo "scantime" considerando todos os sinais de E/S e sinais comunicação utilizados pelo programa (ou bloco funcional) associado a essa tarefa, uma vez que estes sinais, também devem, ser configurado com um tempo de varredura, no mínimo igual ou menor ao "scantime" ajustado para executar a tarefa. Assim, podemos concluir que quando se aplica o conceito de "scantime" para execução das tarefas, o conceito de escalonamento das tarefas passa a ser uma preocupação interna do sistema operacional dos controladores e este deixa de existir para os módulos de controle do SP, pois aplicando-se o conceito de "scantime" para processá-los, é garantido que toda a lógica alocada em um determinado controlador será executada antes do tempo da constante de tempo do processo do SP independente da sequência em que os módulos sejam executados.

Essa característica torna os CPs uma ferramenta efetiva para o controle de máquinas, equipamentos e dispositivos para a realização de controle direto, conseguindo efetua-lo de forma satisfatória na grande maioria dos casos. Porém, conforme citado anteriormente, é impossível, a não ser para configurações muito elementares, programar um CP, sem qualquer planejamento. Para tornar o trabalho de implementação da lógica de controle executável e racional, é necessário à criação de um modelo dessa lógica. Assim, nos próximos capítulos deste trabalho tratam da modelagem da lógica de controle do SP, os parâmetros inerentes aos módulos de controle em função de suas características e das características dos CPs, e a implementação destes módulos nestes equipamentos.

# CAPÍTULO 3

## TÉCNICAS UTILIZADAS PARA MODELAGEM E ESTRUTURAÇÃO DE ALGORITMOS DE CONTROLE DE SPS

Neste capítulo serão abordados assuntos referentes aos conceitos envolvidos na modelagem do algoritmo de controle de um SP. Para que essa tarefa seja realizada de forma racional, sistemática e padronizada, é extremamente importante seguir uma metodologia de implementação de projeto de sistemas de controle, que englobe desde a etapa de especificação até a etapa de síntese do algoritmo de controle. Para isso, essa metodologia deve definir de forma concreta as tarefas envolvidas em cada etapa de desenvolvimento e orientar na especificação dos parâmetros de avaliação da qualidade de cada etapa dentro de uma visão geral do sistema, além de facilitar o gerenciamento do desenvolvimento do projeto e considerar a padronização dos recursos e ferramentas utilizadas para a implementação do projeto (SANTOS FILHO, 1998).

Existem várias propostas de sistematização de um projeto de automação (MORAES; CASTRUCCI, 2001); (ALMEIDA; DAROLT, 2001); (GRANDI, 2000). Neste trabalho adota-se como padrão, a metodologia estruturada PFS/MFG proposta por (MIYAGI, 1996); (SANTOS FILHO, 2000). Essa metodologia tem como base a utilização de ferramentas de modelagem derivadas da rede de Petri (PETERSON, 1981), o que torna possível a representação do comportamento dinâmico dos SPS, permitindo a representação de paralelismos, seqüenciamentos e concorrência de eventos, o que faz com que esta técnica se constitua em uma forma de modelagem efetiva para a representação formal e realização do controle destes sistemas.

Em relação ao controle do SP, este pode ser realizado de diferentes formas e com diversos tipos de dispositivos de controle. Neste trabalho, considera-se os CPs como os principais dispositivos de controle do SP. Portanto, para executar-se a programação desses equipamentos, torna-se necessário a elaboração de uma



representação da lógica de controle de atuação no SP. Portanto, é necessário seguir normas que regulamentem como esses algoritmos devem ser projetados para que se possa aproveitar das vantagens inerentes a essa padronização.

Deste modo, introduz-se o conceito de modelagem estruturada da metodologia PFS/MFG e da norma IEC61499, que padroniza a arquitetura de um software de controle, para que este possa ser implementado em um CP.

### **3.1 FERRAMENTA DE MODELAGEM**

Uma das características importantes em uma ferramenta de modelagem, para evitar problemas no momento da elaboração do modelo e de sua validação, é a clareza dos modelos gerados. É uma boa política realizar a modelagem do objeto de controle e do sistema de controle utilizando a mesma ferramenta, assim sabe-se que os sinais que o objeto de controle e o sistema de controle trocam, estão representados de forma compatível nos modelos de ambos, facilitando a compreensão de sua interação e eliminando a necessidade de elementos de modelagem extras, como interfaces de troca de dados durante a validação dos modelos.

Outra vantagem importante para a escolha da ferramenta de modelagem, é a semelhança da linguagem utilizada no modelo, com a linguagem de programação utilizada para implementação do modelo no sistema. Nesse ponto, o MFG é semelhante ao SFC que também é uma rede derivada das redes de Petri, que se tornou um padrão adotado pela norma IEC 61131-3 para modelagem do comportamento sequencial de sistemas.

Para a obtenção do algoritmo de controle de um SP será utilizada a metodologia estruturada PFS/MFG (SANTOS FILHO, 2000) que é uma ferramenta utilizada na modelagem de SED e atende às características necessárias para síntese do controle dessa classe de sistema.

A seguir, são apresentados o MFG e o PFS para a modelagem do SP. Esta apresentação não é exaustiva, mas introduz os principais conceitos, bem como as propriedades que são fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. O anexo A contém uma descrição mais detalhada sobre este assunto.

### 3.1.1 MFG (Mark Flow Graph) e PFS (Production Flow Schema)

O MFG (MASSUDA; HASEGAWA, 1980); (HASEGAWA, 1980); (HASEGAWA et al., 1984); (MIYAGI, 1989); (SANTOS FILHO; MIYAGI, 1995); (MATSUSAKI, 1996), é uma rede interpretada derivada das redes de Petri (PETERSON, 1981); (REISIG, 1985); (REISIG, 1992), desenvolvida para a modelagem e controle de sistemas, que permite expressar a estrutura de controle de um SED.

Em um grafo MFG, os boxes representam condições, operações ou tarefas associadas aos dispositivos de um sistema e as transições representam o início e término de um processo. O comportamento dinâmico do sistema é indicado pela evolução das marcas no grafo, de acordo com uma regra pré-definida de disparo das transições e que correspondem ao fluxo de itens (materiais ou informações) no sistema real.

Para representar a troca de informações do modelo do sistema com o sistema real existem ainda dois elementos estruturais: os arcos de sinal de saída e as portas habilitadoras/inibidoras. No caso das portas, ainda há uma classificação em portas externas ou internas, dependendo de onde o sinal de origem é gerado. A figura 3.1 apresenta os elementos básicos do MFG.

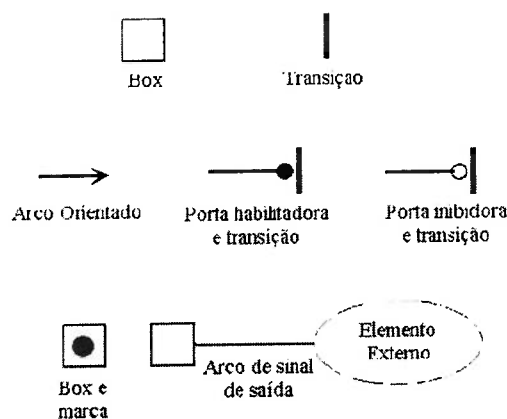


Figura 3.1 – Elementos estruturais básicos do MFG

O PFS é utilizado para descrever, graficamente, em nível macro, os processos relacionados com a produção de itens (peças, produtos, informações, etc.) sob a forma de seqüências de etapas de atividades e de distribuição. O PFS consiste de nós de

elementos-atividade, nós de elementos distribuidores e arcos de fluxo, que conectam seqüencialmente um tipo de nó ao outro.

O elemento-atividade corresponde a um macro-evento que representa (utilizando uma linguagem natural ou formal) a realização de uma ou mais operações de transformação que são aplicadas em um ou mais itens de um sistema. Já o elemento-distribuidor, é utilizado para representar atividades passivas de armazenamento e/ou distribuição de itens do sistema. Por sua vez, o arco orientado indica o sentido do fluxo, associado à execução do processo.

A figura 3.2 ilustra um exemplo de modelagem envolvendo o PFS e o MFG

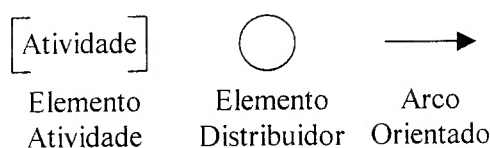


Figura 3.2 – Elementos estruturais do PFS

### 3.2 TÉCNICAS DE ESTRUTURAÇÃO APLICADAS À FERRAMENTA DE MODELAGEM

Ferramentas de modelagem chamadas de estruturadas, possuem a capacidade de gerar o modelo de forma clara e organizada, facilitando assim a implementação e validação do modelo (PRESSMAN, 2000); (SANTOS FILHO, 2000). Pois, ao invés de ser projetado um único modelo que satisfaça todas as especificações (modelo monolítico), estes podem ser gerados utilizando técnicas de refinamento sucessivo (top-down), permitindo que um modelo seja constituído de modelos menores (módulos), que podem ser construídos, testados e analisados um de cada vez, tornando mais eficiente o processo de modelagem do sistema global. Do ponto de vista computacional, a divisão das tarefas de controle em várias sub-tarefas, diminui a complexidade da síntese do controle, devido a uma diminuição do número de estados envolvidos para efetuar o controle global de um processo (WONHAM; RAMADGE, 1989). Além disso, a síntese modular permite que problemas complexos possam ser decompostos em módulos mais simples, simplificando a modificação, atualização e correção, ou seja, a manutenção deste programa.

Assim, o PFS/MFG considera as principais características de uma ferramenta de modelagem estruturada, possibilitando a aplicação dos conceitos de programação estruturada conforme provado em (SANTOS FILHO, 2000), permitindo que os módulos trabalhem em conjunto para que satisfaçam às especificações de um modelo monolítico.

Neste sentido, a metodologia proposta neste trabalho faz uso das vantagens da modelagem estruturada utilizando a metodologia PFS/MFG para criar os módulos de controle com características necessárias para a aplicação do conceito de distribuição do software de controle modular. Utilizando-se o conceito de estruturação, devem ser criados módulos de controle com entradas e saídas de sinais definidas, para assumirem uma forma atômica, ou seja, não existindo a possibilidade de divisão dos mesmos, e devem ser independentes, ou seja, devem evitar a troca de informações entre blocos funcionais. Se estas características forem satisfeitas, realmente pode-se considerar que o modelo possui as características de um sistema de controle modular e pode ser aplicado facilmente a estruturas distribuídas, utilizando-se de algoritmos de designação para obter uma estrutura otimizada.

A seguir, será apresentada a aplicação das técnicas de estruturação na modelagem de algoritmos de controle, utilizando-se a metodologia estruturada PFS/MFG.

### **3.2.1 O PFS e a técnica de refinamento sucessivo**

Instituindo-se uma analogia com a programação estruturada, pode-se afirmar que o PFS é uma rede de alto nível que possibilita uma descrição funcional do sistema a partir de um modelo conceitual inicial com alto nível de abstração.

A modelagem em PFS tem como base utilizar a técnica de refinamento sucessivo, de modo que seja inserido, gradualmente, os detalhes do processo no modelo, correspondente ao comportamento esperado para o sistema (MIYAGI, 1996); (SANTOS FILHO, 2000).

O PFS não tem como objetivo representar o comportamento dinâmico do SP, tendo em vista que, possui uma representação gráfica baseada em redes de alto nível

onde não há marcação e nem representação de evolução dinâmica do sistema. Portanto, o intuito de se utilizar o PFS, é representar o fluxo das operações a serem realizadas no sistema, e não representar a evolução dinâmica deste.

Como na modelagem estruturada, o refinamento dos níveis de abstração é feito através da utilização da abordagem “top-down” em que se considera uma concepção hierárquica do modelo envolvendo os vários níveis de abstração.

A técnica de refinamento sucessivo aplicada ao PFS consiste na substituição de uma atividade “[ ]” ou um distribuidor “O ” por uma sub-rede PFS ou MFG, onde:

1. Para o elemento atividade do modelo PFS denominado A, um elemento atividade t é refinado pela rede B, se B substituir o elemento atividade t, tal que para qualquer arco  $x \rightarrow y$  de B para A' (ou  $x \leftarrow y$  de A' para B) onde, A' é o PFS A sem o elemento atividade t, vale:
  - a. x é um elemento atividade (ou transição) de B e y é um elemento distribuidor (ou box) de A'
  - b. em A' existe um arco  $t \rightarrow y$  (ou  $t \leftarrow y$ )
  
2. Para o elemento distribuidor do modelo PFS denominado A, um elemento distribuidor p é refinado pela rede B, se B substituir o elemento distribuidor p, tal que para qualquer arco  $x \rightarrow y$  de B para A' (ou  $x \leftarrow y$  de A' para B) onde, A' é o PFS A sem o elemento distribuidor p, vale:
  - a. x é um elemento distribuidor (ou box) de B e y é um elemento atividade (ou transição) de A'
  - b. em A' existe um arco  $p \rightarrow y$  (ou  $p \leftarrow y$ ) fazer o mesmo para o lugar

Com isso pode-se concluir que um elemento atividade pode ser expandido em duas ou mais transições e em um ou mais lugares (lugar-atividade), dependendo do grau de refinamento. Similarmente, um elemento-distribuidor corresponde a um lugar onde entram e saem informações, e também pode ser expandido em dois ou mais lugares (lugar-distribuidor) com uma ou mais transições dependendo do grau de refinamento, conforme apresentado na figura 3.3.

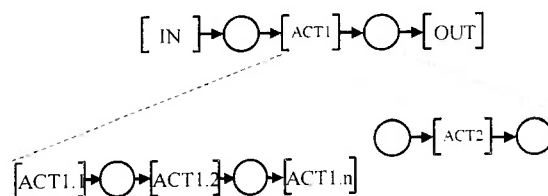


Figura 3.3 – Exemplo de refinamento dos elementos estruturais do PFS

Assim, como pode-se observar, há coerência na utilização desta técnica de modelagem com os procedimentos de programação estruturada, e este fator é uma realidade, porque o PFS tem contribuído, consideravelmente, para uma série de trabalhos de modelagem, em um sentido bastante amplo, como nota-se em várias pesquisas atuais (GUSTIN; MIYAGI; SANTOS FILHO, 2000); (MIYAGI et al., 2000); (SANTOS FILHO, 2000) e (VILLANI et al., 2000).

No entanto, o procedimento de modularização desta técnica deve ser cuidadosamente estudado, pois sabe-se que os elementos atividade no modelo PFS tem uma função específica de representar uma atividade que pode ser analisada como uma ou várias ações, sendo que essas podem causar no elemento em processamento uma transformação de estado.

Por outro lado, o elemento-distribuidor existe para representar, basicamente, três situações:

- Atividades que não agregam valor ao produto;
- Situações em que nenhuma atividade está sendo executada sobre um determinado elemento, estando este, portanto, em um estado de espera, como no caso da espera do término do processamento do processo precedente para iniciar o processamento;
- Ou no caso da representação do término de uma atividade.

Dessa forma deverá ser tratada, detalhadamente, cada etapa do refinamento na rede PFS, para evitar erros que resultem em modelos que não condizem com o sistema real.

Com essas definições, podemos observar que o PFS pode representar cada uma das atividades como módulos, onde as entradas e saídas podem ser bem definidas, caracterizando a funcionalidade de cada um destes módulos. Em (SANTOS FILHO, 2000), podem ser observadas as alterações necessárias à proposta original do PFS para comprovar a coerência entre o processo de modelagem em PFS e a programação estruturada, no que se refere à aplicação da técnica de refinamento sucessivo.

### **3.2.2 O PFS e a utilização de construções lógicas restritas da programação estruturada**

Uma das formas para obtenção de um modelo modular é utilizar a técnica de elaboração utilizando as construções lógicas restritas proposta pela técnica de programação estruturada (SANTOS FILHO, 2000). Nas linguagens de programação de computadores, uma das formas de se implementar desvios na estrutura de controle de um programa, é através do uso do comando GOTO. Este comando, basicamente, pode ser aplicado para executar desvios na sequência de execução do programa, de uma forma incondicional ou condicional. No caso do desvio incondicional, a estrutura de programação é quebrada, pois este deixa de utilizar as estruturas “legítimas”, ou seja, as três funções básicas (sequência, repetição e seleção) de construção de programas propostas pela técnica de programação estruturada (PRESSMAN, 2000); (SANTOS FILHO, 2000). No caso dos desvios condicionais, são implementadas declarações do tipo legítimas, mantendo assim, a estruturação do programa. Conforme citado em (GHEZZI; JAZAYERI, 1987), a discussão sobre a utilização de GOTO em programação computacional, já é debatida desde 1970. Porém, há uma concordância geral no sentido de que as declarações do tipo GOTO, devem ser usadas somente como uma técnica de implementação de estruturas de controle legítimas caso a linguagem não as inclua em seus recursos.

Em função da utilização das estruturas legítimas, o PFS permite adotar a abordagem de programação estruturada para a estruturação do processo de modelagem (SANTOS FILHO, 2000). No caso da modelagem da funcionalidade de SPs, só há sentido em utilizar-se desvios incondicionais, caso seja necessário representar situações anormais de falhas do sistema. Em situações normais de realização dos processos, a

tendência é representar as estruturas sempre dentro de uma das formas “padrão” de controle, herdadas da programação estruturada, de acordo com a Figura 3.4.

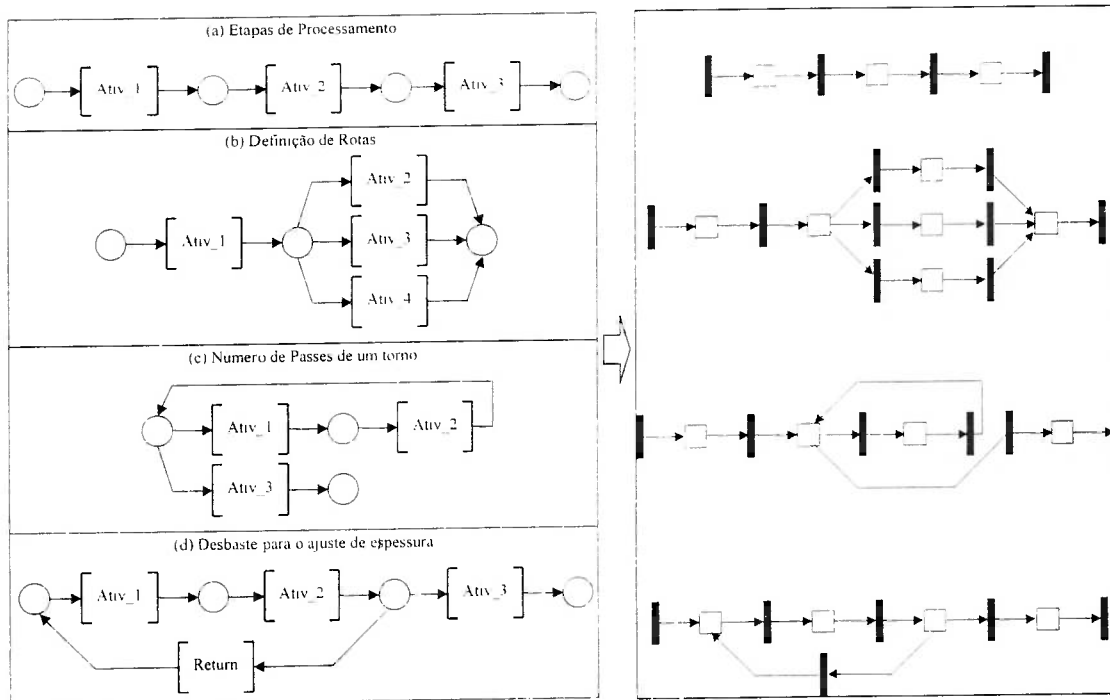


Figura 3.4 – Estruturas padrões para modelagem em PFS/MFG estruturado

Em um SP, o fluxo de processamento das tarefas é, predominantemente, sequencial envolvendo, essencialmente, estruturas de modelo baseadas no item (a) da Figura 3.4.

Na realização de alguns processos, podem aparecer situações em que diferentes rotas possam ser utilizadas para a execução do processo. Neste caso, para modelagem desse processo, é usada uma estrutura do tipo condicional (item (b) da Figura 3.4).

Em outras situações, pode ocorrer a necessidade de se repetir um mesmo processo várias vezes. Sendo necessário o uso de estruturas do tipo repetição (c) ou (d) da Figura 3.4.



Portanto, a essência do processo de modelagem estruturada em PFS está definida. Contudo, para haver consistência nas observações realizadas é necessário especificar algumas hipóteses fundamentais (SANTOS FILHO, 2000):

- Sendo o PFS um modelo funcional, deve-se associar a cada modelo um determinado processo a ser realizado em um SP. Múltiplos processos implicam em uma série de modelos PFS pertinentes a cada um destes.
- O objetivo do modelo PFS é estritamente representar a lógica do fluxo de operações que está associada à realização de um determinado processo, não devendo questionar o mérito de alocação de recursos para a realização de cada uma das operações. Isto significa que, o modelo PFS do processo, é um modelo que representa como se deseja que sejam executadas as operações que constituem o processo.

Seguindo os conceitos abordados, torna-se possível à modelagem do sistema utilizando a metodologia PFS/MFG de forma estruturada, facilitando assim a obtenção dos módulos de controle do sistema.

### **3.2.3 Obtenção do Modelo de Controle do SP utilizando a Metodologia Estruturada MFG/PFS**

Todas as observações sobre estruturação evidenciadas para a situação em que se aplica o PFS para a modelagem funcional de um sistema, aplica-se também para o MFG (MIYAGI, 1996). O modelo MFG é funcional, e por tratar-se de um grafo marcado é capaz de representar o comportamento dinâmico do mesmo a partir da evolução das marcas.

A única ressalva, é de que o início e o fim de uma atividade em PFS podem ser representados por uma transição em MFG e o estado ou condição em que se encontra a atividade pode ser representado por um box em MFG. Para facilitar a tradução do modelo PFS em MFG (ou MFG em PFS), Miyagi (1996) propôs um processo sistemático de tradução que engloba os seguintes procedimentos:

1. Representar cada processo por um modelo PFS conceitual de alto nível de abstração.
2. Detalhar as atividades dos processos através de refinamentos sucessivos até obter os modelos detalhados em MFG.
3. Mapear os sinais de controle indicando os eventos gerados pelo controlador a partir de arcos de sinal de saída e os eventos ocorridos na planta a partir de portas externas.

Seguindo estes procedimentos e as regras para obtenção de um modelo estruturado, torna-se possível obter modelos estruturados modulares. A seguir, apresenta-se uma sistemática para a padronização das interfaces destes modelos, a fim de atender aos padrões sugeridos pela norma IEC 61499, com o intuito de possibilitar que os modelos gerados utilizando a metodologia PFS/MFG, possam estar de acordo com esta norma.

### **3.3 NORMA IEC 61499 APLICADA A METODOLOGIA PFS/MFG ESTRUTURADA**

As normas IEC são fortes agentes motivadores para a aplicação de controladores programáveis em sistemas de controle. Esta contribuição inclui a consideração de expansão, mantendo uma alta flexibilidade. Os novos controladores não podem deixar de lado as normas de padronização, devido a vantagem econômica que esta representa ao usuários. Sendo assim, nada mais racional que aplicar as normas sugeridas pela IEC para geração de algoritmos de controle.

#### **3.3.1 Aplicação dos Blocos Funcionais na modelagem de SP**

Segundo a IEC 61499 o bloco funcional, é uma maneira efetiva de realizar a modelagem e criação do algoritmo de controle para sistemas de controle distribuído (LEWIS, 1998); (IEC61499, 2000). A IEC define sistemas distribuídos de controle como sendo um sistema de processamento de recursos que efetua o controle de um processo através de uma rede de comunicação, contendo, computadores, controladores

programáveis, medidores e dispositivos de controle interconectados como no exemplo da figura 3.5.

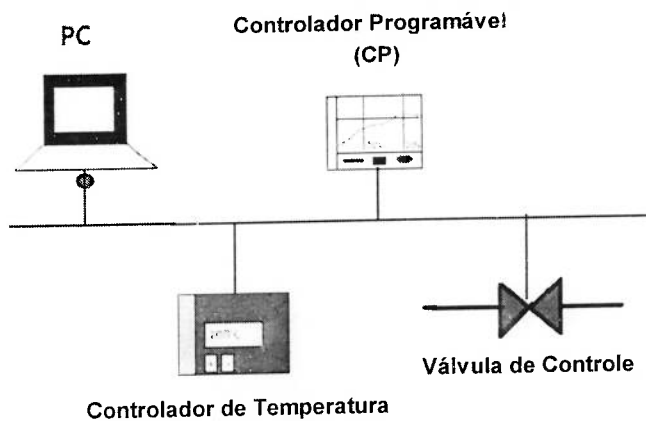


Figura 3.5 – Exemplo da interconexão dos equipamentos de um sistema de controle distribuído segundo a IEC

A norma IEC 61499 não considera a topologia da rede de comunicação entre os dispositivos de controle, mas padroniza a modularização das funcionalidades e o padrão de sinais utilizados para efetuar a comunicação entre os sistemas.

### 3.3.1.1 Estrutura básica de um bloco funcional

Segundo a norma IEC 61499 (2000), um bloco funcional básico é constituído de duas partes:

**Parte superior:** Representa o recebimento e o envio dos sinais de controle do bloco na forma de eventos, onde os sinais de entrada possuem o objetivo de ativar ou desativar o algoritmo do bloco funcional e os sinais de saída do bloco indicam o término de seu processamento.

**Parte inferior:** representa o algoritmo de controle associado ao bloco funcional, onde este algoritmo pode ser programado, utilizando-se qualquer uma das linguagens padronizadas pela IEC 61131-3, onde são recebidos e/ou enviados sinais das variáveis utilizadas no algoritmo do bloco funcional que podem ser gerados e/ou recebidos por

utilizadas no algoritmo do bloco funcional que podem ser gerados e/ou recebidos por outros blocos funcionais situados no mesmo programa ou por elementos externos ao sistema.

A figura 3.6 apresenta o esquema básico de um bloco funcional padronizado pela IEC 61499 (2000).

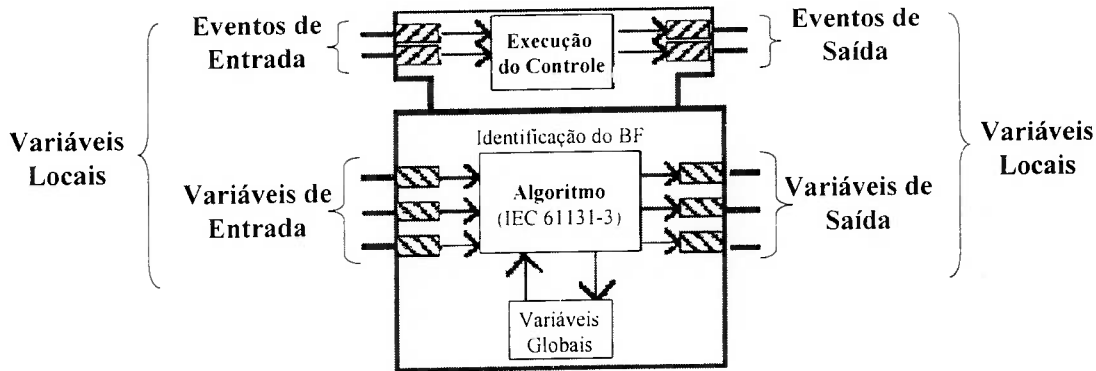


Figura 3.6 – Esquema básico de um Bloco Funcional padronizado pela IEC 61499

A norma também permite a composição de blocos funcionais. Isso significa que um bloco funcional pode ser constituído de vários blocos funcionais menores. Os blocos que são criados a partir da composição de outros blocos, são chamados de blocos componentes. Portanto, todo o bloco funcional do tipo componente, possui uma estrutura hierárquica. Essa hierarquização pode ser observada na figura 3.7.

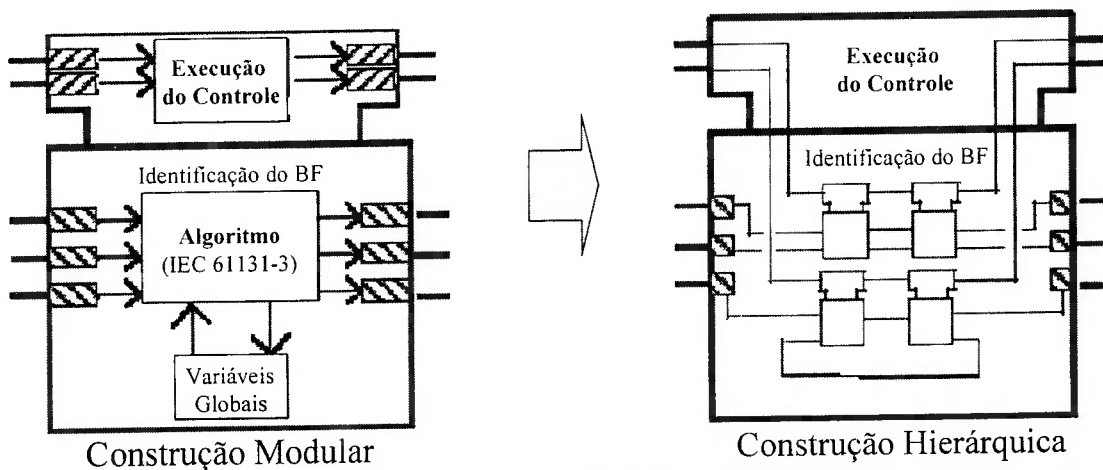


Figura 3.7 – Modularização dos Blocos Funcionais

programáveis. As variáveis conectadas a esses cartões são convertidas em variáveis globais internas ao controlador, onde são disponibilizados para o sistema os seus valores possibilitando que qualquer bloco funcional possa processar essa informação. Os blocos que necessitam trocar informações com dispositivos externos, são nomeados pela norma IEC 61499 (2000) como blocos de interface. Assim, o bloco de interface permite que o sistema interaja com os elementos externos fazendo a integração desses elementos com o sistema de controle. Esses elementos externos ao sistema podem ser desde dispositivos de atuação, tais como válvulas, motores, etc. até dispositivos de monitoração, tais como monitores, impressoras, etc. A figura abaixo apresenta um exemplo de um bloco de interface.

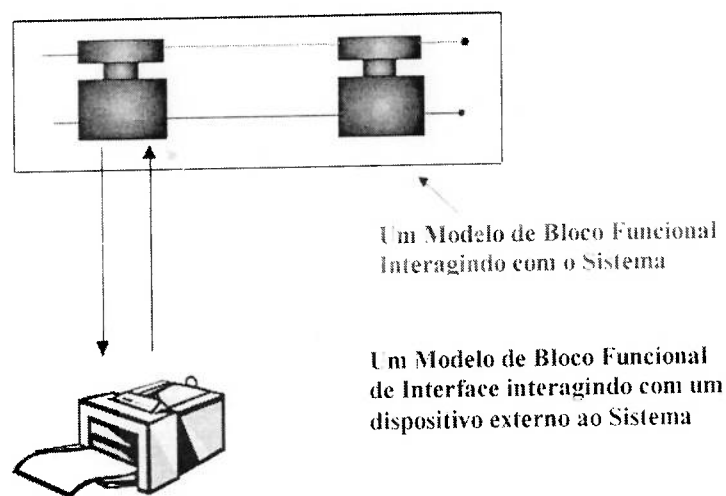


Figura 3.8 – Bloco funcional de interface segundo a IEC 61499

### 3.3.2 Aplicação do conceito de 'scantime' aplicada a norma IEC 61499

No capítulo 2 cita-se o conceito de 'scantime', que é o conceito normalmente utilizado para executar um algoritmo de controle processado por um CP. Contudo, o conceito de 'scantime' aplicados a CP pode ser revisto para que possa ser adaptado ao conceito de construção de programas utilizando blocos funcionais em sistemas de controle distribuído, segundo a norma IEC 61499 (2000). Segundo a norma IEC 61131-3 os CPs são compostos de um único processador que processa de forma cíclica um ou mais programas. Porém, quando se aplica o conceito de blocos funcionais para a composição do programa de controle, pode-se adotar como forma de execução deste, uma arquitetura cliente/servidor, onde cada bloco funcional (cliente) solicita

composição do programa de controle, pode-se adotar como forma de execução deste, uma arquitetura cliente/servidor, onde cada bloco funcional (cliente) solicita informações dos demais blocos funcionais (servidores) coligados a este. Assim, somente será processado o bloco funcional que, realmente, for utilizado para realizar a lógica de controle do sistema no instante que for solicitada sua execução no programa instalado no CP.

Uma das vantagens desse tipo de solução é a possibilidade da redução da carga de processamento, pois ao invés do processador calcular todo o algoritmo de controle a cada 'scantime', este só precisa calcular o bloco funcional referente à etapa em que o programa se encontra, não necessitando que os demais blocos que fazem parte do algoritmo de controle sejam processados. Esse tipo de característica faz com que a execução do programa seja feita em etapas, ou seja, dirigida por eventos como em um SED. Portanto, efetuar a modelagem do algoritmo utilizando ferramentas que se enquadrem nesse cenário é uma boa política. Dessa forma, com o intuito de atender a esses requisitos, será sugerida a utilização da metodologia PFS/MFG para obtenção do modelo do algoritmo de controle.

### **3.3.3 A interpretação do PFS segundo a norma IEC 61499**

Conforme apresentado, a IEC 61499 define um modelo geral e uma metodologia para o desenvolvimento de blocos funcionais em um formato que independe do tipo de aplicação e da arquitetura do sistema de controle. Essa metodologia pode ser usada por desenvolvedores de sistemas de automação para a composição de sistemas de controle distribuídos. Essa facilidade permite que um sistema possa ser definido em termos da lógica de controle, conectando os blocos funcionais que processam o algoritmo de controle do SP de maneira que esse possa ser aplicado a diferentes tipos de equipamentos (CPs).

Para que o PFS possa ser utilizado de forma efetiva na modelagem de sistemas de controle utilizando a norma IEC61499, é necessário estabelecer uma semântica alternativa para seus elementos estruturais. Esta proposta foi adotada, porque essa ferramenta de modelagem é direcionada para ser aplicada no processo de síntese de sistemas de controle de sistemas produtivos, não considerando a distribuição do algoritmo em diversos CPs, de forma a seguir a norma que regulamenta esta distribuição.

Considerando-se que o sistema de controle configurado utilizando a norma IEC 61499 pode ser definido como um SED, e que o fluxo de informações e o modo de execução dos blocos funcionais corresponde a um conjunto de etapas de processamento, através de envio de sinais, considera-se, por analogia, a seguinte interpretação para os elementos estruturais do PFS:

**Elemento atividade:** representa o processamento das informações pertinentes às atividades que constituem o algoritmo do bloco funcional, ou seja, corresponde à etapa de processamento.

**Elemento distribuidor:** corresponde a etapa de comunicação entre os blocos funcionais e representa o conjunto de dados de entrada/saída processadas nas etapas de processamento.

**Arco orientado:** representa o sentido do fluxo das informações entre os blocos funcionais e a comunicação de dados (ou seja, troca de sinais) entre estes, o que possibilita a organizar de forma estruturada os blocos funcionais elaborados para efetuar o controle do sistema.

A Figura 3.9 apresenta os elementos básicos do PFS de acordo com a interpretação proposta.

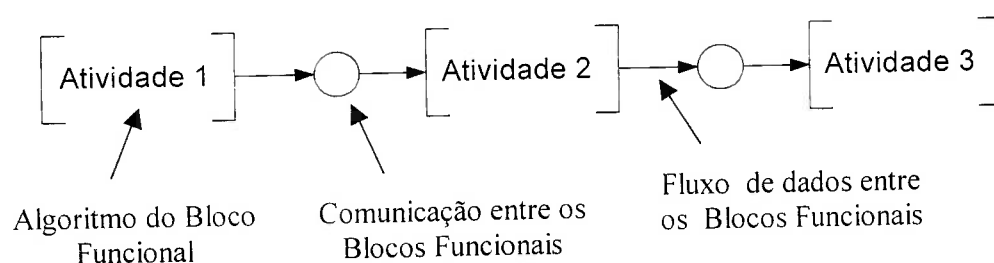


Figura 3.9 – Elementos básicos do PFS aplicados aos conceitos da norma IEC 61499

Desta forma seguindo a análise realizada, pode-se aplicar ao PFS os conceitos de estruturação considerando as características indicadas pela norma IEC 61499.

### 3.3.4 A aplicação do MFG na norma IEC 61499

A diferença básica entre o bloco funcional proposto pela IEC 61131-3 e o bloco funcional proposto pela IEC 61499 é a padronização de como os sinais devem se comportar para que haja troca de informações entre os blocos funcionais, de forma estruturada, ou seja, o protocolo de troca de dados entre os blocos funcionais e a forma como esses blocos funcionais são processados dentro de um programa.

Portanto, o que deve ser utilizado da norma 61499 para que o MFG se adapte a esta, é a forma de como os sinais gerados e recebidos pelo algoritmo de controle devem ser apresentados para que este possa ser considerado como um algoritmo padronizado conforme a norma IEC 61499.

Para efetuar a construção dos modelos MFG estruturados seguindo a norma IEC 61499, foi proposto o seguinte procedimento:

- Cada evento de entrada, ou seja, o sinal de controle do bloco funcional deve ser conectado a respectiva transição de entrada do algoritmo que se pretende controlar, através de um arco habilitador ou inibidor, onde esse arco é nomeado de arco de evento de entrada;
- Cada evento de saída, ou seja, o sinal de término de processamento do algoritmo do bloco funcional gerado pelo box de saída do algoritmo utilizado para fazer o controle de outro bloco funcional, deve ser conectado a uma saída de evento do bloco funcional, através de um arco de sinal de saída, onde esse arco é nomeado de arco de evento de saída;
- Cada variável de entrada do bloco funcional utilizada no processamento do algoritmo designado a este, deve ser conectada a respectiva transição do algoritmo que utiliza esse sinal para efetuar sua lógica de controle, através de um arco habilitador ou inibidor, onde esse arco é nomeado de arco de evento de entrada;
- Cada variável de saída gerada por um box do algoritmo de controle utilizado em outro bloco funcional, deve ser conectada a uma saída de variável do bloco funcional, através de um arco de sinal de saída, onde esse arco é nomeado de arco de variável de saída;



- Cada elemento externo ao sistema que gera um sinal que será utilizado internamente pelo algoritmo de controle do bloco funcional deve ser ligado, diretamente, a respectiva transição do algoritmo de controle através de um arco habilitador ou inibidor, onde esse arco é nomeado de arco de variável externa de entrada.
- Cada elemento externo ao sistema que recebe um sinal gerado internamente pelo algoritmo de controle do bloco funcional, deve ser ligado, diretamente, ao respectivo box do algoritmo de controle através de um arco de sinal de saída, onde esse arco é nomeado de arco de variável externa de saída.

Na figura 3.10, é apresentada uma sugestão para a padronização dos módulos MFG.

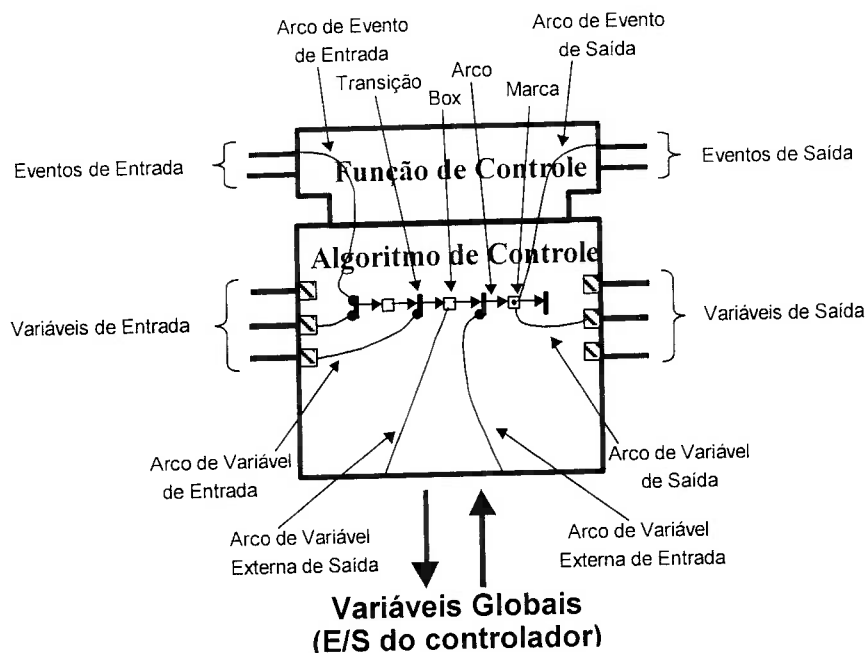


Figura 3.10 – Exemplo de um bloco funcional utilizando bloco estruturado sequencial do MFG

Segundo (LEWIS, 1998) na troca de sinais entre blocos funcionais que estão dentro de um mesmo programa, são consideradas as variáveis locais, onde estes sinais entram diretamente nos pinos de E/S do bloco funcional. Para troca de variáveis que não

façam parte do mesmo programa onde se encontra o bloco funcional. são utilizados os blocos de interface que buscam informações das variáveis do sistema e disponibilizam estas informações através das variáveis globais, possibilitando assim, que o bloco funcional utilize informações externas as variáveis geradas pelo programa. O bloco de interface, segundo a norma, não é, necessariamente, utilizado somente para trocar informações com o meio externo ao programa, este também pode possuir um algoritmo de controle e processar uma lógica do sistema de controle.

Portanto, seguindo estas regras, torna-se possível construir um algoritmo de controle padronizado, utilizando-se da metodologia de modelagem estruturada PFS/MFG. No próximo capítulo, apresenta-se uma sistemática para efetuar a distribuição dos módulos de controle com o intuito de alcançar uma solução ótima de distribuição do software de controle em uma determinada arquitetura de CPs.

## **CAPÍTULO 4**

# **CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE CONTROLE E OS CRITÉRIOS ENVOLVIDOS NA ALOCAÇÃO DE BLOCOS FUNCIONAIS**

A necessidade de automatizar diversas áreas de controle dentro de um parque industrial, com várias características que influenciam na produção, autonomia e flexibilidade dos processos industriais, tem deslocado o caráter tecnocêntrico destes sistemas em direção a uma abordagem baseada no paradigma de cultura técnica (SANTOS FILHO, 2000). Esta abordagem é focada no homem considerando seu aprimoramento intelectual e sua capacidade operacional. Neste contexto, para solucionar o problema de definição da arquitetura do sistema de controle de um SP, neste capítulo propõe-se uma abordagem baseada em sistemas antropocêntricos (KOVÁCS, 1993); (KOVÁCS, 1995); (SANTOS FILHO, 1998); (ITO, 1991); (HIGGINS, 1995) para especificação dos procedimentos para o projeto de sistemas de controle.

Para aprimorar o desenvolvimento de um projeto de automação, pretende-se aplicar os princípios de sistemas antropocêntricos, onde o homem (projetista) define as variáveis que influenciam nas funções utilizadas na definição da arquitetura mais apropriada às características do SP. Neste sentido, considera-se como objeto de estudo, o aperfeiçoamento de procedimentos e regras com as quais o projetista pode trabalhar para conseguir ajustar o sistema de maneira que este atenda às necessidades do projeto.

No Capítulo anterior, apresenta-se a técnica PFS/MFG, utilizada para efetuar a modelagem de um sistema de forma estruturada, e a adaptação desta para utilizar as normas técnicas que regulamentam a estrutura dos programas nos CPs. A metodologia PFS/MFG permite o desenvolvimento de um algoritmo de controle onde pode ser considerado, por exemplo, a sequência de partida, os intertravamentos, o acionamento de equipamentos, entre outras características relacionadas ao controle do SP (MIYAGI,

1996); (SANTOS FILHO, 1998); (SANTOS FILHO, 2000). Porém, esta técnica não considera a alocação dos módulos de controle (blocos funcionais) nos equipamentos que realizam o controle do SP. Assim, torna-se necessário utilizar outras técnicas que processem essas informações, a fim de auxiliar na solução deste problema.

Uma vez que, não é função dos blocos funcionais determinar o seu local de processamento, é elementar que sejam desenvolvidas soluções para determinar onde estes devem ser processados assegurando uma distribuição que promova um melhor aproveitamento dos recursos do sistema. Portanto, para garantir a alocação de recursos para estas aplicações (blocos funcionais) antes delas serem executadas, são fundamentais três abstrações para modelar o sistema (SANTOS, 2001); (NORONHA, 2001):

- Definição das tarefas (blocos funcionais) do sistema;
- Reserva de recursos de CPU para garantir o processamento das tarefas;
- Consideração das restrições temporais de processamento.

Tendo em vista estes parâmetros, alguns conceitos relacionados ao problema de alocação de blocos funcionais em CPs utilizados neste trabalho são apresentados para auxiliar a avaliação e a solução deste problema, com o objetivo de garantir a qualidade do projeto de automação do SP. Porém, para realizar a alocação de blocos funcionais é necessário que a arquitetura do sistema seja definida. Portanto, antes de considerar a distribuição de blocos funcionais, torna-se necessário a definição de uma arquitetura de hardware para processá-los.

Sendo assim, o objetivo deste capítulo é a apresentação de uma sistemática para a definição da arquitetura física e lógica de um sistema de controle, considerando características intrínsecas a estes sistemas.

#### **4.1 ESPECIFICAÇÃO DO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DOS BLOCOS FUNCIONAIS EM SISTEMAS DE CONTROLE DE SP**

Um sistema de controle de um SP, precisa realizar suas tarefas levando em consideração o tempo de resposta necessário para garantir a execução adequada do controle do SP, o que faz com que as ações do sistema tenham que ser executadas em tempo real, fazendo com que estes sistemas sejam classificados como 'hard real time systems' devido suas particularidades (AUDSLEY; BURNS, 1990). Neste tipo de sistema, o tempo que garante a execução adequada do controle é definido como constante de tempo do sistema (LEWIS, 1998); (BONFAT; MONARI; SAMPIERI, 1999). A constante de tempo é o período em que a lógica do sistema pode ser processada sem que sejam comprometidos os critérios temporais que garantem a execução adequada do controle do SP. A ocorrência da violação da constante pode levar o sistema à catástrofe (SPRUNT, 1989) ou a um estado crítico do sistema.

Portanto, o tempo que um CP leva para processar blocos funcionais, deve atender às necessidades de controle impostas por um SP, considerando as constantes de tempo que regem o comportamento dinâmico do sistema que está sendo controlado. Dessa forma, um CP deve ser capaz de processar blocos funcionais de maneira que sejam atendidas as exigências das constantes de tempo dos diversos processos que evoluem em um SP, independente do local e da ordem com que os blocos funcionais são processados. Desta forma o sistema de controle deve garantir que todos blocos funcionais sejam processados a fim de atender às constantes de tempo do SP. Com base nestas informações, podemos concluir que ao invés de existir a definição de um tempo de término do processamento de cada bloco funcional, o que caracterizaria um problema de escalonamento da ordem de execução destes, o que passa a existir é a atribuição destes módulos da melhor maneira possível em uma arquitetura de hardware capaz de processá-los. Deste modo, a seguir são apresentadas as principais características que influenciam na determinação dos critérios que devem ser considerados na definição da arquitetura de controle para a alocação dos blocos funcionais nos CPs.

#### **4.1.1 Indeterminismo na Distribuição dos Blocos Funcionais em CPs**

A especificação formal da distribuição dos blocos funcionais em CPs para atender às constantes de tempo e aos requisitos de maximização da utilização dos recursos computacionais, apresenta uma dificuldade que advém da própria natureza

destes sistemas: a existência de duas condições de indeterminismo importantes. São elas:

- Indeterminismo em relação ao tempo de execução das tarefas: Os blocos funcionais podem ser alocados nas mais diversas combinações possíveis (*bloco funcional x CP*) e cada CP possui uma performance de processamento. Portanto, o tempo de processamento do bloco funcional depende, diretamente, do CP que for designado para processá-lo. Neste caso, a única informação conhecida é a constante de tempo associada ao bloco funcional para garantir a execução adequada do controle do SP.
- Indeterminismo em relação a sequência de processamento dos blocos funcionais. Ainda que exista uma sequência pré-definida de eventos, o que caracteriza cada um dos processos a serem executados no SP, é que não existe, necessariamente, um sincronismo entre estes que demonstre, previamente, uma sequência de requisições dos CPs a partir das características de processamento de cada um desses. A única garantia que pode ser prevista, é que todos os blocos funcionais serão processados e atualizados em tempo hábil para efetuar o controle do SP de forma a garantir o cumprimento das constantes de tempo dos blocos funcionais. Desta forma, o único sequenciamento pré-definido pelo CP segundo a norma IEC 61499 é o de leitura, processamento e escrita dos resultados dos blocos funcionais (conceito de 'scantime') onde são varridas todas as entradas referentes ao bloco funcional ativo, calculado o seu algoritmo e a atualizada suas saídas.

Este comportamento dinâmico é a principal dificuldade para o desenvolvimento de sistemas que otimizem a alocação de blocos funcionais em CPs.

Neste contexto, apresenta-se a seguir, as principais considerações para otimização do sistema de alocação de blocos funcionais:

- O sistema de distribuição deve considerar o sequenciamento de blocos funcionais imposto pela lógica de controle do SP e possuir flexibilidade para definir a melhor designação destes em CPs disponíveis.

- O sistema de distribuição deve ser, suficientemente, hábil para alocar blocos funcionais segundo um dado critério de otimização resultando em uma distribuição homogênea em função da demanda de processamento exigida por estes.
- O sistema de distribuição deve ser capaz de alocar blocos funcionais segundo um dado critério de otimização resultando em uma distribuição homogênea em função do consumo de recursos de cada bloco funcional em função do CP elegido para processá-lo.
- O sistema de distribuição de blocos funcionais deve considerar o fluxo de informações na rede de comunicação, para evitar que ocorra saturação nesta, o que poderia comprometer a troca de informações entre os componentes do sistema de controle.

#### **4.1.2 Otimização da Alocação de Blocos Funcionais em Controladores Programáveis**

Com base nas informações apresentadas, anteriormente, é apresentada uma proposta de extensão da metodologia padrão utilizada para a implementação de projetos de automação proposta por Miyagi (1996), apresentando uma sistemática para a etapa do projeto do sistema de controle e do projeto de software de controle.

Esta sistemática é composta por uma série de regras e passos a serem executados, de maneira que, após a inserção dos parâmetros específicos dos blocos funcionais e dos CP, é possível fornecer um modelo de alocação obtendo-se o resultado almejado.

A sistemática proposta é composta por nove macro atividades, as quais, são desenvolvidas para se obter o resultado da distribuição dos blocos funcionais nos CPs. Estas atividades são apresentadas através de um modelo conceitual PFS, conforme figura 4.1.

A sequência proposta, visa organizar o montante de atividades envolvidas no processo de definição do número de CPs e alocação dos BFs nestes.

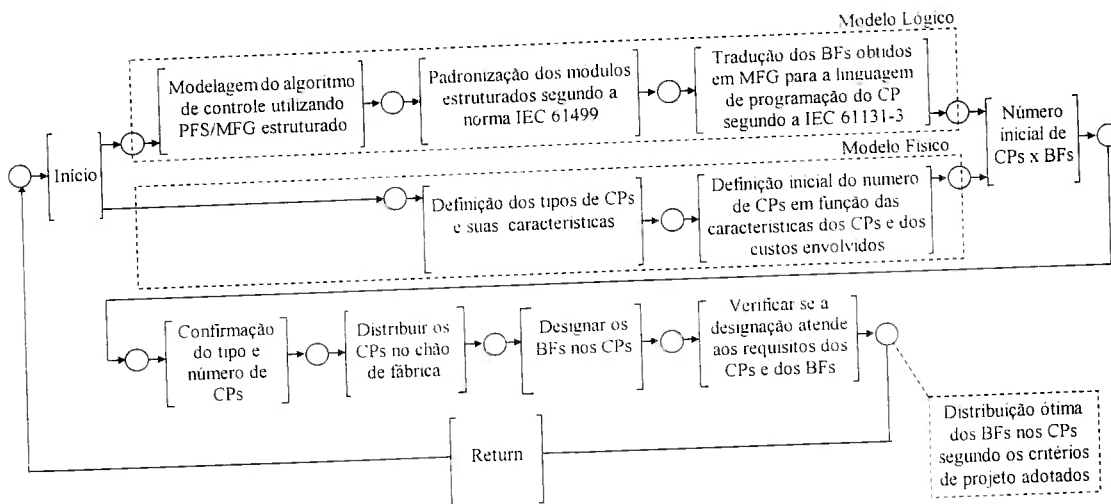


Figura 4.1 – PFS do algoritmo de alocação de blocos funcionais proposto

Assim, nos próximos itens, estas atividades (representadas por elementos atividade do modelo PFS) são apresentadas de maneira resumida.

**Modelagem do Algoritmo de Controle:** Nesta atividade é feita a modelagem do algoritmo de controle conforme demonstrado no capítulo 3 deste trabalho, utilizando a metodologia estruturada PFS/MFG, assim como efetuando a padronização dos módulos de controle de forma estruturada, conforme proposto neste trabalho.

**Padronização dos módulos estruturados:** Esta etapa formata os módulos estruturados a fim de atender a norma técnica IEC 61499, a qual estipula a padronização para elaboração de módulos de controle.

**Conversão dos Blocos Funcionais:** Nessa etapa aplica-se a metodologia de tradução do modelo obtido em MFG estruturado para uma linguagem de programação, conforme o método proposto por (SANTOS FILHO, 1997), com o objetivo de implementar a lógica de controle obtida na modelagem em CPs que possam efetuar o controle do SP.

**Definição do tipo de CP e suas características:** Nesta etapa, definido-se quais os tipos de CP que serão utilizados para efetuar o controle do SP.

**Definição inicial do número de CPs:** Nesta etapa estima-se o número inicial de CPs, considerando-se as características de hardware envolvidas no sistema de controle. São considerados os instrumentos que o SP possui em função da distância entre esses e os



CPs utilizados para processá-los. Tendo como base, o custo dos CPs e o custo de material utilizado para transmitir os sinais gerados pelos instrumentos, utiliza-se um algoritmo para efetuar a divisão de áreas de controle<sup>3</sup>. Este algoritmo é proposto para estimar o número ideal de CPs em função dos custos de hardware considerados, e alocar os CPs, fisicamente, no chão de fábrica de forma que se obtenha o menor custo em relação ao gasto de materiais para inter-conectar os instrumentos aos CPs.

**Confirmação do tipo e número de CPs:** Nesta etapa o projetista aprova ou modifica o tipo e/ou o número de CPs utilizados para efetuar o controle do SP, podendo utilizar CPs mais poderosos, fazendo com que a arquitetura de controle seja mais centralizada, ou utilizando CPs com menos recursos, tornando o sistema de controle mais distribuído.

**Distribuição dos CPs no chão de fábrica:** Após a confirmação do tipo e número de CPs, nesta etapa aplica-se, um algoritmo para alocação dos controladores no chão de fábrica, onde também são definidos quais sinais físicos de entrada e saída serão alocados em cada CP para que se possa calcular o custo de processamento de cada bloco funcional na próxima etapa.

**Alocação dos módulos:** Aqui aplica-se o método de designação proposto por (NOVAES; 1978); (BRONSON, 1985); (PUCCINI; PIZZOLATO, 1987) para obter uma alocação ótima dos blocos funcionais da lógica de controle nos CPs do SP, considerando o custo de processamento de cada BF e as características dos CPs.

**Verificação:** Realiza-se uma verificação da alocação dos blocos funcionais nos CPs proposta pelo método de designação, considerando-se as características dos CPs e dos blocos funcionais a partir da verificação dos tempos e capacidade de processamento, obtendo assim, como resposta, o quanto o sistema obteve de folga (ou excesso) em relação à alocação dos blocos funcionais nos CPs. Essas informações possibilitam ao projetista fazer o ajuste necessário entre *CPs x Blocos Funcionais*, retirando (ou alocando) CPs para obter a resposta mais próxima do limite dos processadores. Caso a resposta enviada pela etapa de verificação seja uma resposta possível de ser implementada considerando as características do sistema, o algoritmo envia como resultado ótimo à alocação, o último resultado *CPs x Blocos Funcionais* calculado pelo

---

<sup>3</sup> Área de controle são regiões do sistema produtivo que estão sendo controladas de fato por um determinado CP.

algoritmo de designação, finalizando assim o ciclo de retroalimentação proposto. Com isso, obtém-se a alocação ótima dos blocos funcionais criados e os CPs escolhidos para efetuar o controle do SP em função dos critérios estipulados no projeto do sistema de controle.

Nos próximos itens são detalhados os algoritmos elaborados para auxiliar o trabalho de distribuição dos blocos funcionais.

## **4.2 COMPLEXIDADES ENVOLVIDAS NA DELINEAÇÃO DAS ÁREAS DE CONTROLE E NA QUANTIFICAÇÃO DE CONTROLADORES EM UM SP**

Além da preocupação com o atendimento dos requisitos temporais exigidos pelo SP em relação ao processamento dos blocos funcionais responsáveis em executar o controle do SP, um outro problema intrínseco ao sistema de controle, é o de especificação da quantidade de CPs necessários para efetuar o controle do sistema de forma que todas as exigências impostas pelo SP sejam cumpridas buscando o mínimo custo do projeto. Para resolver este problema, este trabalho sugere o método SLP (Systematic Layout Planning), proposto por (MUTHER, 1978), que tem como objetivo, encontrar o menor custo em função do arranjo físico de um sistema. Para isso, considera-se o modelo físico do sistema, considerando a disposição física dos instrumentos no SP, e todos os custos envolvidos para levar os sinais gerados por estes, até o(s) controlador(es) escolhido(s) para efetuar o controle do SP, levando em consideração o custo atribuído a esses equipamentos.

Portanto, considera-se a possibilidade de adaptação de técnicas e metodologias de planejamento de disposição física (SLP), para definição de uma estratégia que gere uma especificação da distribuição ótima dos CPs no SP, uma vez que, a princípio, há uma forte correlação no aspecto físico/geométrico entre o problema de definir-se uma distribuição de pontos estratégicos para colocação desses painéis de controle, onde entram todos os cabos de controle do sistema e onde ficam alocados os CPs no chão de fábrica. Portanto, a solução desse problema está voltada para um problema de 'layout', ou seja, o modelo físico do sistema produtivo.

Neste aspecto, o objetivo é quantificar o custo que existe entre os vários sensores, atuadores (instrumentos) e o material gasto para possibilitar a troca dos sinais gerados por estes, considerando o caminho pelo qual os cabos devem percorrer para chegar aos CPs. Uma vez definido o tipo de CP e seu respectivo custo, a posição física é determinada de maneira que, os painéis de controle onde os CPs devem ser alojados, esteja distribuída, adequadamente, para garantir uma maior proximidade física (ou vizinhança) dos instrumentos no chão de fábrica.

Normalmente, a situação correspondente à alocação e distribuição dos CPs aplica-se a um ambiente em que o arranjo físico do sistema produtivo já existe. Portanto, o problema pode ser abstraído para a situação em que se pretende distribuí-los, juntamente, com seus painéis de controle para que estes atendam a uma determinada quantidade de instrumentos. Este assunto será retomado na seção 4.2.1, onde se discute com detalhes os problemas de aplicação de técnicas de planejamento de arranjo físico para determinar os pontos estratégicos de fixação dos painéis de controle, tendo como objetivo a redução dos custos.

Considerando estes aspectos, apresenta-se, primeiramente, uma especificação detalhada do problema de alocação de CPs, considerando o custo envolvido em um painel de controle e os custos envolvidos para enviar os sinais dos instrumentos do SP. Considerando também o limite de alocação de sinais de E/S imposto pela arquitetura dos CPs, propõe-se um algoritmo capaz de realizar a alocação destes sinais de forma adequada, buscando a minimização dos custos do projeto. Em relação a provável divisão de áreas que se torna necessário, propor uma técnica de mapeamento dos CPs, onde se realiza um particionamento do sistema de controle em áreas de controle, dependendo das características relacionadas ao CP e ao custo do projeto.

#### **4.2.1 Mapeamento dos Pontos de Alocação dos Painéis de Controle**

O problema de mapeamento dos locais para fixação dos painéis de controle pode ser solucionado por simulação (MUTHER, 1978); (BANERJEE et al., 1992). O procedimento consiste em realizar testes de simulação para diferentes arranjos físicos e estimar o custo do material a ser utilizado para cada uma das situações. Uma solução adequada, implica em atingir o menor consumo dos materiais utilizados para enviar e

receber os sinais dos instrumentos para os painéis de controle, tornando menor o custo do projeto. Para que se possa atingir esse objetivo, uma boa solução, é adotar o critério de mínima distância, para diminuir os custos (MUTHER, 1978). O uso de ferramentas computacionais como AutoCad e MicroStation, podem auxiliar na realização destas medidas disponibilizando os valores reais das distâncias entre os equipamentos, considerando o layout do SP e o caminho que deve ser obedecido para interligar os instrumentos aos painéis de controle. Uma vez que esses programas possuem as informações sobre os caminhos, posições e medidas para interligar os equipamentos do SP, torna-se fácil obter a distância que deve ser percorrida e o material que deve ser utilizado para efetuar a interligação dos instrumentos ao painel de controle. Com a distância exata dos equipamentos e os custos referentes aos cabos e materiais necessários para efetuar a interligação dos instrumentos aos painéis, pode ser calculado com precisão o custo real para interligar cada instrumento ao respectivo painel de controle. Estes procedimentos de análise por simulação significam uma alternativa interessante quando uma solução do tipo 'hard' (fixa) é adequada para o problema.

O nível de importância para execução do planejamento de alocação do ponto de fixação do painel aumenta quanto maior for a quantidade de instrumentos (sensores e atuadores) e quanto maior o número de painéis de controle (CPs). Este é um conceito que se deve considerar quando o objetivo é economizar custos de construção de um sistema de controle de grande porte.

#### **4.2.1.1 Aplicação de Técnicas de Planejamento de Arranjo Físico**

A suposição de que os locais estratégicos de fixação dos painéis em um SP condizem com o comprimento do cabo, entre o painel e o instrumento, considerando o caminho que esse cabo deve percorrer, é um artifício efetivo para aplicação de técnicas de planejamento de disposição física na solução do problema em pauta.

De acordo com Muther (1978) e Chwif (1994), existem duas classes de critérios primordiais que podem ser utilizados para se obter um posicionamento de um equipamento em um arranjo físico:

Critérios de avaliação da intensidade de fluxo entre as atividades: Fornece resultados quantitativos podendo abranger fatores do tipo volume, forma, peso e custos.

Critérios de medida de prioridade de proximidade - 'closeness ratings'. Permite a colocação de uma hierarquia de relacionamento entre as tarefas. Uma vez que domina o caráter superficial, é comum utilizar-se a teoria 'fuzzy' para desenvolvimento de métodos baseados nesta classe de critérios.

Com relação aos padrões de custo da distância entre os instrumentos e os painéis de controle, grande parte das formulações tem como objetivo uma função de custo total do arranjo para ser minimizada. Considerando-se  $n$  instrumentos entre os painéis de controle e os pontos de alocação dos painéis, o custo total do arranjo pode ser calculado pela expressão 4.1.

$$\Omega = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot k_{ij} \cdot \lambda_{ij} + c_{ij} \quad (4.1)$$

Onde :

$w_{ij}$  é uma medida de importância entre o instrumento  $i$  e o painel  $j$ ;

$\lambda_{ij}$  é uma medida de distância a ser percorrida entre o instrumento  $i$  e o painel  $j$ ;

$k_{ij}$  é o fator de conversão para os custos de cabeamento entre o instrumento  $i$  e o painel  $j$ ;

$c_{ij}$  é o custo fixo de alocação do instrumento  $i$  no painel  $j$ .

Entretanto, este critério aplicado separadamente, não é suficiente para satisfazer os atributos de otimização de vários casos de arranjo físico. Existem sistemas de auxílio ao planejamento de arranjos físicos (CAL - 'Computer Aided Layout') construídos para otimizar múltiplos objetivos baseados em sistemas especialistas, mas sua utilidade ainda é discreta em função das limitações em detrimento de alternativas que são capazes de manipular (BANERJEE et al., 1992). Um problema suplementar à situação específica em que se deseja ajustar estas técnicas para a determinação dos pontos estratégicos de fixação dos painéis, é a descrição dos relacionamentos entre os vários instrumentos. Quando existem em um sistema produtivo instrumentos alocados fisicamente, em pontos distantes, onde esses instrumentos fazem parte de uma mesma lógica de controle,

esse problema resulta em uma rede de correlação onde cada local estratégico estará, potencialmente, ligado a todos, ou pelo menos aqueles que contém as informações necessárias para executar essa lógica de controle. Além disso, existe indeterminismo associado aos CPs em relação ao atendimento dos tempos de processamento e a transmissão dos sinais de controle para os demais CPs que contenham blocos funcionais que necessitem trocar informações. Mas, como esse é um problema de capacidade de processamento e não de 'layout', fica a cargo do algoritmo de alocação dos blocos funcionais gerenciar essa questão.

Com isso, conclui-se que as técnicas de 'layout' não são aplicáveis, diretamente, para o problema de distinção dos pontos de fixação dos painéis, principalmente, quando se considera a necessidade de avaliar o consumo de recursos e o tempo de execução da lógica de controle para assegurar a estabilidade do controle do SP. No entanto, a análise detalhada desta possibilidade é essencial para o aperfeiçoamento das técnicas de determinação da quantidade de CPs necessários para atingir esses objetivos. Sendo assim, o algoritmo de alocação e determinação do número ótimo de painéis para realizar o projeto do sistema de controle com o menor custo possível, é uma estimativa inicial da quantidade de painéis de controle em função do custo, ficando a cargo do algoritmo de designação dos blocos funcionais, verificar se a solução proposta atende ao critério de processamento imposto pelo SP e a carga de processamento imposta pelos algoritmos de controle associados aos blocos funcionais.

#### **4.2.1.2 Obtenção das coordenadas para fixação dos painéis de controle no sistema de controle.**

Primeiramente, considera-se um SP composto por  $N$  instrumentos (sensores/atuadores), ligados a um único painel de controle, onde está alojado o CP que realiza o controle do SP, recebendo os sinais das variáveis medidas pelos sensores e manipulando o processo através dos atuadores. Nestas condições, o objetivo é definir qual o local estratégico que representa, adequadamente, o ponto de fixação do painel de controle.

A princípio, este local deve estar localizado de maneira que, o painel esteja o mais próximo possível dos instrumentos que possuem o tipo de cabo de transmissão do sinal (e os materiais envolvidos no envio desse cabo do instrumento no painel) com custo mais elevado. Utilizando-se esta estratégia, evita-se gastos desnecessários, uma vez que, quanto maior o custo do material utilizado para transmitir o sinal de um certo instrumento e quanto maior a distância do painel para o instrumento, maior será o custo para obtenção desse sinal.

A seguir apresenta-se a equação 4.2 como uma proposta para realizar-se o cálculo das coordenadas do ponto de fixação do painel que passa a ser denominado por  $E_G$ .

$$E_G = O + \sum_{i=1}^N \left( \frac{D_{mi}}{\sum_{j=1}^N D_{mj}} \right) \cdot (P_i - O) \quad (4.2)$$

Onde:

$N$  é o número de instrumentos do SP

$O$  é a origem do sistema do plano  $(O, \bar{e}_1, \bar{e}_2)$ ;

$E_G$  é a posição do painel de controle  $(O, \bar{e}_1, \bar{e}_2)$ ;

$D_{mi}$  é o custo do cabo (ou material gasto) para a transmissão do sinal do instrumento  $E_i$ ;

$D_{mj}$  é o custo do cabo (ou material gasto) para a transmissão do sinal do instrumento  $E_j$ ;

$P_i$  é a posição do instrumento  $E_i$  em  $(O, \bar{e}_1, \bar{e}_2)$  no SP.

Desta forma, a equação 4.2 caracteriza o custo das distâncias  $\overline{OP}_i$ , onde utiliza-se a abordagem que consiste em relacionar o conceito de “consumo de material” em cada local que caracteriza a localização de um instrumento. O conceito de “consumo de material” é compreendido como o total de todos os custos envolvidos na passagem do cabo do instrumento, obedecendo o caminho percorrido pelos cabos, até o painel de controle.

Conforme a equação 4.2, a cada um dos instrumentos da planta  $E_i$  está ligado à um custo de cabeamento denominado  $D_{mi}$  (custo associado ao material utilizado para a transmissão do sinal).

Analisando a hipótese de que cada um dos instrumentos  $E_i$  pode ser mapeado no chão de fábrica por um local  $P_i$  e que o “custo equivalente” destes locais é representado pelo custo do cabeamento  $D_{mi}$ ; uma vez que, para cada instrumento há um cabo de transmissão de sinal, sendo assim, há um valor associado a esse cabo; é provável que se consiga estimar um local estratégico que represente o valor mínimo equivalente do sistema global.

Sendo assim, a posição geométrica que este local de menor custo representa pode ser denominada de “centro virtual do custo global” (CVCG). Desta forma, se o ponto de fixação do painel for neste local, com certeza terá o custo mínimo em relação ao custo de transmissão dos sinais dos instrumentos, o que representa uma solução concreta para o problema de se definir um ponto estratégico ótimo (mínimo custo) para a fixação do painel de controle.

#### 4.2.1.3 Centro Virtual do Custo Regional (CVCR)

Continuando com a análise do problema de fixação do painel de controle, uma extensão natural do CVCG, tratado no item anterior, consiste em considerar a situação na qual existe um número genérico de  $M$  painéis de controle que integram o controle do SP. Desta forma, o enfoque é voltado para a determinação dos pontos estratégicos para a fixação desses painéis. Quando há somente um painel de controle no SP, a solução encontrada para a definição do CVCG mostra-se adequada. Ao se calcular o CVCG, a técnica utilizada direciona todo o cabeamento dos instrumentos do SP para um único painel com a finalidade de determinar o local de fixação ideal do painel. Entretanto, uma vez que há  $M$  painéis de controle capazes de alocar os sinais dos instrumentos do SP, ou seja, uma arquitetura distribuída de controle, é preciso que se defina uma técnica que seja capaz de definir, estrategicamente, a quantidade ótima de painéis e seus respectivos locais de fixação conforme a quantidade e localização dos instrumentos no SP.



Para solucionar este problema, introduz-se um procedimento que, particiona o SP em áreas de controle (conforme definido anteriormente) de modo que a cada área associa-se um painel de controle e seu respectivo CP. Entretanto, o problema de delimitação das áreas de um SP de forma adequada, é um trabalho complexo e que envolve uma série de inter-ocorrências. Somente estabelecer um custo para o painel da área de controle ( $D_{MR}$ ), conforme sugere a expressão (4.3), não é suficiente. Fazer uso de outros critérios para se obter uma diretriz para a partição do sistema em áreas, tal como, a taxa máxima de ocupação do CP em relação a quantidade de E/S ou a carga computacional também é uma boa alternativa para estabelecer a divisão de áreas de controle.

$$D_{MR} = \frac{\sum_{i=1}^N D_{m_i}}{T} \quad (4.3)$$

Onde:

$T$  corresponde ao número total de painéis de controle.

O critério que norteia esta divisão do sistema não deve ser simplificado a ponto de centralizar globalmente todo o problema de divisão das áreas de controle a ser tratado. Porém, abordar esse problema em maiores detalhes, pode aumentar o nível de complexidade deste e comprometer a solução do mesmo.

Tendo em vista estes fatores, o procedimento utilizado para definição das áreas de controle modifica-se conforme são alterados os critérios que definem as condições que afetam a definição destas áreas. Portanto, alterando algum desses critérios, novas especificações são geradas.

Com relação ao problema de quantificação dos custos de cabeamento e o custo relacionado ao painel de controle, pratica-se a expressão 4.4, baseada na proposta de Muther (1978), que é utilizada em casos onde o objetivo é fazer uma análise dos problemas de arranjo físico baseado em três conceitos fundamentais:

- **Inter-relação.** Grau relativo de dependência ou proximidade entre as partes.

- **Espaço.** Quantidade, tipo e forma dos itens a serem posicionados.
- **Ajuste.** Arranjo das áreas e equipamentos da melhor maneira possível.

$$ITT_i = \sum_{j=1}^{M_i} D_{mj} \cdot d_{ij} \quad (4.4)$$

Onde:

$i = 1, 2, \dots, N$  ; onde  $N$  é o número de painéis.

$ITT_i$  é o índice associado a um painel de controle para delimitar uma área de controle em função do custo de um painel  $E_i$

$M_i$  é número de instrumentos  $E_j$  associados ao painel de controle, que não pode ultrapassar o número máximo de E/S do CP independentemente se o custo  $ITT_i$  foi alcançado ou não.

$D_{mj}$  é o custo do cabo do painel  $E_i$ ; para o instrumento  $E_j$ .

$d_{ij}$  é a distância entre o painel  $E_i$  (origem) e o instrumento  $E_j$  (destino).

Quanto a abordagem adotada para a divisão do sistema em áreas de controle, a solução tem como base distribuir o custo de cabeamento em níveis de hierarquia. Esse tipo de abordagem pode ser adotada quando se trabalha com sistemas regidos por E/S (CHALMERS; REINHARD, 1998); (NORONHA, 2001) em que ocorre uma série de chamadas aos dispositivos de E/S propriamente dito, quando comparados à demanda por processamento. Este fato justifica a utilização do critério de divisão de áreas de controle considerando o aspecto dos custos envolvidos com os sinais dos instrumentos do SP e a alocação desses nos painéis de controle.

Dessa forma, para solucionar o problema de divisão de áreas de controle, será considerado uma arquitetura hierárquica, tornando possível definir áreas de controle que suprem às necessidades de custo em relação a um determinado nível de integração de instrumentos em um mesmo CP. Desta maneira, minimiza-se o problema de análise da

adequabilidade do custo de alocação dos instrumentos  $X$  e  $Y$  a partir de um certo painel de controle.

Com Base nestas premissas, o procedimento apontado para a divisão do SP em  $M$  regiões compostas por  $M$  painéis de controle baseia-se nos critérios a seguir:

- Deve haver homogeneidade quanto aos índices de alocação de instrumentos na definição das áreas de controle.
- Cada área de controle deve ter um local estratégico para abrigar seu respectivo painel.

Com relação às hipóteses levantadas para o desenvolvimento da conduta para a divisão do SP em áreas de controle têm-se:

- Não existe distinção em relação a qual instrumento pode ser alocado em um painel de controle (CP). Todos os CPs são considerados, operacionalmente, equivalentes.
- O critério deve ser único para delinear-se uma área de controle: custos locais de cabeamento/painéis de controle e capacidade de alocação de sinais de E/S nos CPs.
- A probabilidade de existir troca de informações entre CPs via rede de comunicação não deve influenciar os critérios que definem os limites de cada local.

Conseqüentemente, pode-se agora apresentar o conjunto de procedimentos que neste trabalho é sugerido para definir as áreas de controle de um sistema.

1. Primeiramente, determina-se o CVCG do sistema global, de acordo com a expressão 4.2.
2. Estima-se o valor do cabeamento por área de controle ( $ITT_{MR}$ ) para cada tipo de CP em função de seu custo e de seu painel de acordo com a expressão 4.5, derivada da expressão 4.4.

$$ITT_{MR} = \frac{\left( \sum_{i=1}^N \left( \sum_{j=1}^{N_i} D_{mj} \cdot (|x_i - x_j| + |y_i - y_j|) \right) \right)}{N} \quad (4.5)$$

Onde:

$N$  é o número de CPs  $E_i$  do sistema produtivo

$N_i$  é número de instrumentos  $E_j$  alocados no CP em função do número máximo de sinais de E/S suportado pelo CP  $E_i$ .

$D_{mj}$  é o custo do cabo para interligar o instrumento  $E_i$  ao painel  $E_j$ .

$(|x_i - x_j| + |y_i - y_j|)$  é a distância entre os instrumentos  $E_i$  (origem) e os painéis  $E_j$  (destino).

3. Transfere-se o sistema de referência  $(O, \bar{e}_1, \bar{e}_2)$  para o sistema  $(O', \bar{e}'_1, \bar{e}'_2)$ , de acordo com a expressão 4.6.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{CG} \\ y_{CG} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Onde:

$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$  são as coordenadas do ponto em  $(O, \bar{e}_1, \bar{e}_2)$ .

$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$  é a matriz de mudança da base  $(O, \bar{e}_1, \bar{e}_2)$  para base

$(O', \bar{e}'_1, \bar{e}'_2)$  com determinante não nulo.

$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}$  são as coordenadas do ponto em  $(O', \bar{e}'_1, \bar{e}'_2)$ .

$\begin{bmatrix} x_{CG} \\ y_{CG} \end{bmatrix}$  são as coordenadas do ponto do CVCG em  $(O, \bar{e}_1, \bar{e}_2)$  calculado em (A).

4. Troca-se o sistema de coordenadas cartesianas  $(O', \bar{e}'_1, \bar{e}'_2)$  para coordenadas polares de acordo com a expressão 4.7.

$$\left. \begin{aligned} x' &= \rho \cdot \cos \theta \\ y' &= \rho \cdot \text{sen} \theta \\ \text{tg} \theta &= y' / x' \end{aligned} \right\} \quad (4.7)$$

5. Variando-se  $\theta$ , inicia-se a partição do sistema em áreas de controle utilizando-se o procedimento da Figura 4.2.
6. Para cada um dos locais definidos a partir do procedimento da Figura 4.2 calcula-se o ponto estratégico para a colocação do painel de controle. Para isto, utiliza-se a expressão 4.8, que vem da expressão 4.2 em que  $N_k$  é o número de instrumentos na região  $k$  limitado pelo valor máximo de sinais de E/S suportado pelo CP.

$$E_{Gk} = O' + \sum_{i=1}^{N_k} \left( \frac{D_{mi}}{\sum_{j=1}^{N_k} D_{mj}} \right) \cdot (P_i - O') \quad (4.8)$$

Onde:

$O'$  é a origem do sistema do plano  $(O', \bar{e}'_1, \bar{e}'_2)$ .

$E_{Gk}$  é a posição do painel de controle em  $(O', \bar{e}'_1, \bar{e}'_2)$  na área de controle  $k$ .

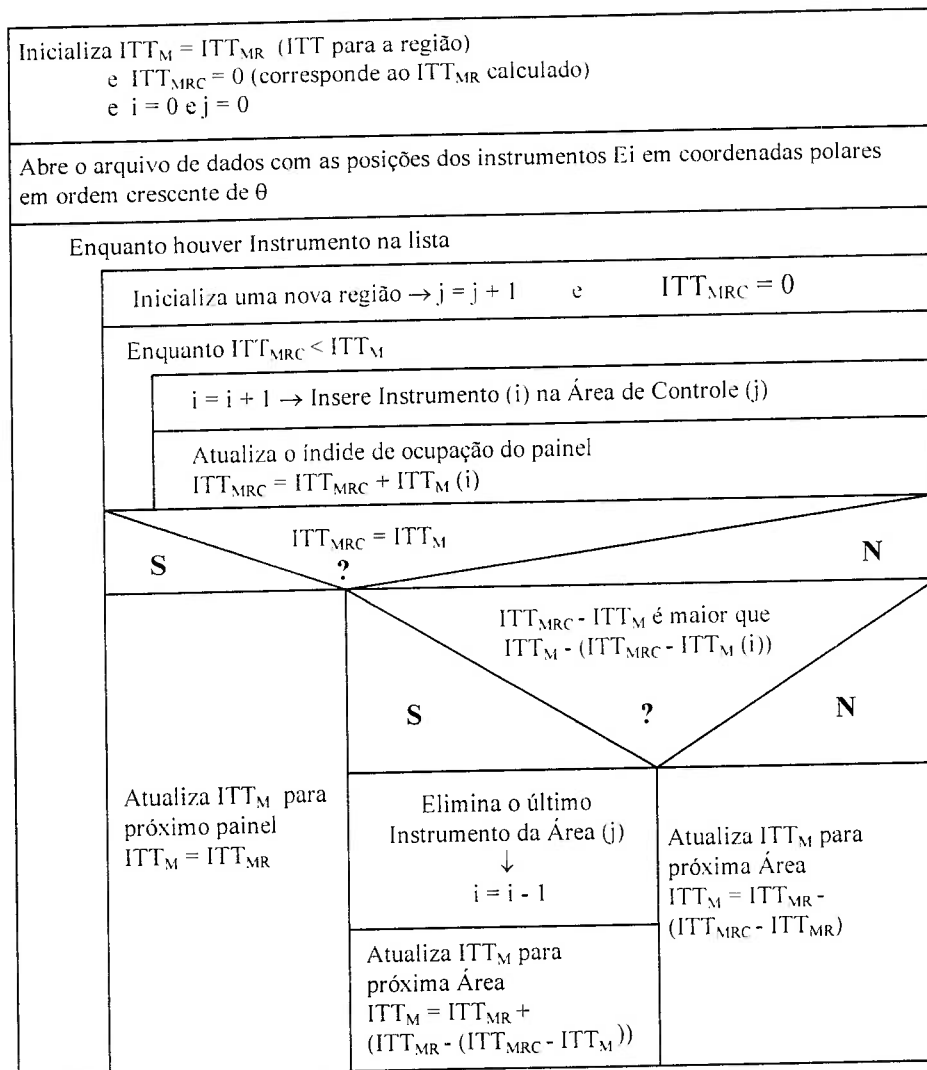
$D_{mj}$  é o custo do material gasto para transmitir o sinal gerado pelo instrumento  $E_j$ ;

$P_j$  é a posição do instrumento  $E_j$  em  $(O', \bar{e}'_1, \bar{e}'_2)$  no sistema.

$N_k$  é o número de instrumentos que podem ser alocados no CP da área de controle  $k$

Utilizando-se este conjunto de procedimentos, obtém-se um mapeamento do SP em áreas de controle. Em cada área de controle é definido um ponto estratégico para a

fixação do painel de controle que passa a ser denominado Centro Virtual de Custo Regional - CVCR - analogamente ao CVCG para o sistema global.



Onde:

- $i \in \{1, \dots, N\}$  sendo N o número de instrumentos
- $j \in \{1, \dots, M\}$  sendo M o número de Áreas de Controle ou painéis
- $ITT_{MRC}$  é o  $ITT_{MR}$  calculado para delinear uma Área de Controle
- $ITT_M(i)$  é o índice de ocupação do controlador i
- $ITT_M$  é o índice de ocupação esperado para delinear uma Área de Controle de acordo com o custo do cabeamento dos Instrumentos

Figura 4.2 – Procedimento utilizado para escolha das áreas de um sistema produtivo.

### 4.3 OTIMIZAÇÃO DA ALOCAÇÃO DE BLOCOS FUNCIONAIS EM CONTROLADORES PROGRAMÁVEIS

Para a otimizar a alocação de blocos funcionais em CPs, é proposta uma sistemática para a definição de uma arquitetura de controle apropriada às características de SP. Neste caso, considera-se como objeto de estudo, o aperfeiçoamento de procedimentos e regras onde o projetista poderá trabalhar para conseguir ajustar o sistema de maneira que este atenda às necessidades do projeto.

Em (VAIDEHI; KRISHNAN, 1997), é sugerida uma plataforma para a simulação e o planejamento de sistemas de controle, onde se considera, efetivamente, a modelagem das principais partes do sistema, identificando-se os procedimentos para a modelagem dos controladores, dos programas, e das particularidades das redes de comunicação. Entretanto, levando-se em consideração o caso dos SPs, para modelar o sistema de distribuição dos blocos funcionais de forma que este possa ser feito de uma forma automatizada, deve-se acrescentar o elemento humano e sua interação com o sistema, considerando o conhecimento do projetista em relação às características de projeto. Neste caso, o fato de haver alguma preferência de se alocar um determinado bloco funcional em um determinado CP, ou no caso do algoritmo de alocação não possuir informações suficientes para a definição de qual é o bloco funcional que deve ser alocado no CP, o próprio projetista poderá fazê-lo seguindo sua experiência ou adotando algum critério de decisão não previsto no algoritmo. Existem ainda outros fatores que devem ser considerados quando se trata da distribuição de blocos funcionais em CPs, tais como a escassez de recursos dos CPs e a garantia do tempo de processamento dos blocos funcionais, fatores estes que possuem uma forte ligação com a carga computacional dos CPs. Segundo (VAIDEHI; KRISHNAN, 1997), a distribuição de programas restringe-se a especificar os sinais<sup>4</sup> trocados entre estes e suas cargas computacionais<sup>5</sup>. Entretanto, o maior problema consiste em estabelecer-se um procedimento que designa cada um dos CPs a atender as cargas de processamento demandadas pelos blocos funcionais de forma a garantir os requisitos temporais de processamento exigidos pelo SP, considerando as características dos CP.

---

<sup>4</sup> sinais de entrada/saída

<sup>5</sup> número de instruções necessárias para executar a lógica do programa no tempo exigido por este

Portanto, a seguir abordam-se os assuntos que influenciam na designação de blocos funcionais em CPs e propõe-se a utilização de algoritmos que buscam uma solução ótima para resolução deste problema.

#### 4.3.1 Abordagens para o Problema de Alocação de Blocos Funcionais

Nesta seção, são apresentados resultados obtidos com o estudo de alternativas para a solução dos problemas de alocação de blocos funcionais em CPs para um sistema de controle de SP. Estes estudos baseiam-se em auxiliar a tarefa de propor um conjunto de procedimentos para a realização da distribuição dos blocos funcionais em CPs, considerando o caráter multidisciplinar do problema.

Em (NOVAES, 1978); (BRONSON, 1985); (PUCCINI; PIZZOLATO, 1987), são apresentadas técnicas tradicionais que podem ser utilizadas para a solução de problemas de designação ou atribuição para casos que trabalhem com o problema de *tarefas x operários* que podem ser interpretados como problemas de *blocos funcionais x CPs*. Estas abordagens envolvem um procedimento para obtenção de uma solução que consiste em:

- Determinação de uma solução inicial;
- Teste da solução quanto a condição de ótimo e;
- Melhoria da solução quando não é ótima até obter-se uma que seja.

As respostas obtidas referem-se a quantos e quais produtos devem ser processados a um custo mínimo e que trabalham no mesmo patamar da técnica que soluciona os conflitos que se referem a qual bloco funcional deve ser alocado em um determinado CP, ponderando as características associadas aos CPs e aos blocos funcionais, em função do custo de processamento associado a cada bloco funcional. A estratégia de designação adotada tem como base, selecionar o bloco funcional com menor custo, designando esse para o CP que melhor o executa.

Na resolução do problema de atribuição (ou designação), cada unidade é tratada, individualmente, de maneira que exista um número igual de tarefas e operários. A formulação clássica do problema resulta em que existam  $n_a$  CPs,  $m_l$  blocos funcionais e



uma estimativa dos custos  $C_{ij}$  com  $(i = 1, \dots, n_a; j = 1, \dots, m_i)$  correspondentes a todas as combinações de CPs e blocos funcionais. O objetivo é conseguir o custo mínimo atribuindo os blocos funcionais aos CPs de maneira que o custo total seja reduzido ao mínimo.

Entretanto, o problema de alocação de blocos funcionais não é constituído em um simples problema de designação. Assim, torna-se necessário que seja desenvolvida uma metodologia para distribuição destes blocos, na qual, primeiramente define-se uma estratégia para a distribuição destes em CPs para, em seguida, ser possível agregar um algoritmo de designação. Estes detalhes são apresentados na seção 4.3.3.

Outro fator a ser considerado com relação ao problema de alocação de blocos funcionais em CPs, é a teoria de 'scheduling' (VAIDEHI; KRISHNAN, 1997); (BAKER, 1974); (DiCESARE, 1993); (PATTIPATI et al., 1990). Nestas propostas, uma das abordagens clássicas para a solução do problema de distribuir as tarefas (blocos funcionais) em recursos (CPs) em um sistema de controle, consiste na alocação destes recursos na execução de tarefas com base em princípios, modelos, técnicas e deduções lógicas estabelecidas na teoria de 'scheduling'. Esta teoria é, predominantemente, quantitativa e tem como base modelos matemáticos que contêm uma função objetivo e um conjunto de restrições que devem ser respeitadas.

Apesar de todo seu potencial, uma das dificuldades desta abordagem está na dependência da especificação de custos, o que em várias situações é difícil de se mensurar e até mesmo definir claramente<sup>6</sup>.

Outro ponto importante que deve ser considerado, é que nos problemas de 'scheduling', podem existir limitações impostas, ou pela capacidade dos recursos disponíveis, ou pelas restrições tecnológicas. Neste contexto, a solução deste tipo de problema, envolve questionamentos a respeito de quais recursos são alocados para realizar cada uma das tarefas do sistema e quando cada tarefa é realizada. Em relação aos recursos que devem ser alocados, o problema é dinâmico, isto é, conforme as tarefas são alocadas existe uma diminuição dos recursos, alterando assim o cenário em relação

---

<sup>6</sup> Neste caso, os custos podem estar associados a vários parâmetros, tais como, prioridade de processamento, minimização do tempo de execução das tarefas, distribuição da carga de processamento, entre outros parâmetros que podem influenciar na definição das prioridades adotadas pelo escalonador (SPRUNT, 1989); (BAKER, 1974); (AUDSLEY, 1990).

ao sistema, sempre que um recurso for alocado para executá-las. Isso quer dizer que cada vez que um bloco funcional é processado, os recursos disponíveis e a carga de processamento do CP que irá executá-la se altera, modificando, completamente, as condições para a computação de um determinado bloco funcional naquele momento.

Portanto, utilizando algoritmos de escalonamento, garante-se a otimização local, ou seja, a otimização de um determinado bloco funcional naquela condição e naquele instante de processamento do programa, mas a otimização global não é garantida, pois, conforme os blocos funcionais vão sendo alocados nos CPs, o cenário do sistema se altera. O instante associado à realização do início e término do processamento do bloco funcional, conforme citado anteriormente, é outro fator de indeterminação presente do sistema. Desta forma, impor um sistema de alocação de blocos funcionais que se baseia unicamente no parâmetro de tempo é, claramente, impróprio para o sistema em discussão.

Portanto, apesar das abordagens citadas nesta seção não colocarem um fim na discussão sobre as técnicas existentes para o controle de alocação de blocos funcionais em CPs, o estudo destas idéias indica que não são suficientes para a resolução por completo dos problemas em discussão. Assim, considera-se aqui uma arquitetura para a distribuição de blocos funcionais capaz de contemplar não somente o fato dos blocos funcionais deverem observar às condições dos CPs, mas também o fato dos CPs deverem observar a carga computacional inerente aos blocos funcionais e adequar o seu custo de acordo com uma visão global do sistema. Neste contexto, faz-se necessário que os blocos funcionais sejam estruturados, atômicos e trabalhem de maneira independente para que o algoritmo de distribuição possa realizar a designação dos blocos funcionais em CPs de maneira ótima.

#### **4.3.1.1 Distribuição dos blocos funcionais e as características dos CPs**

Uma vez especificados os CPs que realizam o controle do SP e suas características, para a solução do problema de alocação dos blocos funcionais em sistemas de controle, desenvolve-se uma técnica que tem como base as seguintes etapas:

- Definição das características dos CPs que realizam o controle do SP e suas peculiaridades;
- Determinação da quantidade de blocos funcionais que compõem a lógica de controle do SP;
- Determinação das características de cada bloco funcional do sistema;
- Especificação de algoritmos para a alocação dos blocos funcionais de acordo com as características dos CPs.

#### **4.3.2 Estratégia de Controle de um SP**

Para composição do algoritmo de controle utilizando o paradigma proposto pela norma IEC61499, é necessário que seja considerada a forma como cada módulo (bloco funcional) que compõem o algoritmo de controle do SP troca informações. Para isso, os requisitos de controle impostos pelo SP devem ser obedecidos, de maneira a considerar cada bloco funcional como sendo uma parte independente da lógica que compõem o sistema de controle do SP, considerando-se que o algoritmo de controle é um conjunto de blocos funcionais onde estão inclusas as instruções, algoritmos e dados a eles associados que, quando executados, realizam a função de controle de acordo com o desempenho desejado. Para isso, apresentam-se a seguir os parâmetros adotados para realizar a composição da lógica de controle, considerando as características de processamento de cada elemento do sistema.

##### **4.3.2.1 Modelo do bloco funcional**

A programação de um módulo em um sistema de controle modular e distribuído, segundo (VAIDEHI; KRISHNAN, 1997), pode ser representada por:

- Peso  $\{s_i\}$ , onde  $s_i$  representa o número de instruções do bloco funcional  $i$ ;
- Constante de tempo  $\{d_i\}$ , onde  $d_i$  representa o “scantime” mínimo em que o bloco funcional  $i$  pode ser processado;

- Recursos consumidos  $\{res_i\}$ , onde  $res_i$  representa a quantidade de recursos consumidos pelo bloco funcional  $i$ ;
- Pesos  $\{v_{ij}\}$ , onde  $v_{ij}$  representa a carga computacional associada ao volume de informações trocadas entre os blocos funcionais  $i$  e  $j$ .

Cada bloco funcional do sistema pode ser representado em termos de requerimento de serviços (número de instruções que podem ser processadas por um determinado período de tempo). Assim, uma vez definida a taxa de serviço do processador, é possível estimar o tempo de computação gasto para executar cada tarefa. Algumas vezes, a velocidade de processamento e o número de instruções que um bloco funcional necessita para ser processado não são revelados pelos fabricantes. Porém, na maioria dos manuais do usuário desses equipamentos, é discriminado o tempo de processamento de cada função disponível no CP para elaborar o algoritmo de controle (ABB, 2001a); (ABB, 2001b); (ROCKWELL, 2003).

Portanto, o trabalho que deve ser executado, é o cálculo da carga computacional consumida, ou seja, o tempo de processamento gasto para executar o algoritmo elaborado para ser processado no equipamento. Também é comum o fabricante deferir como deve ser calculada a carga computacional de um determinado algoritmo utilizando os blocos funcionais do equipamento. Como esse é um dado específico de cada equipamento e como esse cálculo é uma entrada pontual na metodologia, ou seja, independe de como seja calculado o valor da carga computacional, o que importa é que o custo envolvido no processamento do bloco funcional seja fornecido para permitir a designação dos blocos funcionais nos CPs a fim de buscar o melhor processamento da lógica de controle.

Desta forma, define-se a seguir o modelo de CP adotado na metodologia para obtenção do cálculo de custo para designação dos blocos funcionais em CPs.

#### **4.3.2.2 Modelo dos controladores**

Uma arquitetura de controle em sistemas de controle com processamento paralelo e distribuído, segundo (VAIDEHI; KRISHNAN, 1997); (ABB, 2001a); (ABB, 2001b); (ROCKWELL, 2003), pode ser representada por:

- pesos  $\{\mu_q\}$ , onde  $\mu_q$  representa a taxa de serviço do processador  $q$ ;
- Período do ciclo de processamento  $\{win_q\}$ , onde  $win_q$  representa o período utilizado pelo processador  $q$  para executar os blocos funcionais a ele designados;
- Recursos fornecidos  $\{res_q\}$ , onde  $res_q$  representa os recursos disponíveis no CP  $q$ ;
- Links de comunicação entre os CPs são associados pesos  $\{c_{pq}\}$  que representam a capacidade de comunicação dos links entre os CPs  $p$  e  $q$ .

Com o modelo dos blocos funcionais e o modelo dos CPs definidos, é possível se fazer a formulação matemática do problema levando em consideração um determinado conjunto de parâmetros necessários e suficientes para estabelecer um relacionamento dos parâmetros do par *bloco funcional x CP*, de forma a permitir a modelagem e a construção da arquitetura de controle mais adequada para a execução da lógica de controle do SP. Esses parâmetros são apresentados na sequência.

#### 4.3.2.3 Custo computacional dos blocos funcionais

Para calcular o custo computacional gerado por um bloco funcional, este deve ser associado a um CP. Uma vez que o bloco funcional é associado a um CP, este consome, além dos recursos computacionais necessários para o seu processamento, um determinado tempo correspondente ao que denominamos carga computacional de processamento. Isto significa que, no momento em que o bloco funcional é executado, este gera um custo de processamento que nada mais é que o período de tempo alocado para executá-lo em relação a velocidade de processamento de quem o está executando. Quanto maior o número de instruções do bloco funcional, maior o número de informações de E/S que este necessita para executar seu algoritmo e quanto menor a velocidade de processamento do CP, maior será o seu custo computacional. A equação 4.9 demonstra o conceito de custo computacional.

$$C_i^q = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n s_i + \sum_{j=1}^n v_{ij}}{\mu_q} \right] \quad (4.9)$$

Onde:

$C_i^q$  é o tempo de execução (custo computacional) do bloco funcional  $i$  no CP  $q$ .

$s_i$  é o número de instruções necessárias para calcular o bloco funcional  $i$  no CP  $q$ .

$\mu_q$  é a velocidade de processamento do CP  $q$ .

$v_{ij}$  é o número de instruções associada ao volume de informações solicitada pelo bloco funcional  $i$  enviada (ou recebidas) através dos blocos de interface.

#### 4.3.2.4 Carga de processamento dos CPs

Pelo fato dos CPs trabalharem com o conceito de scantime, as alterações dessas variáveis serão detectadas toda vez que o CP varrer as variáveis do sistema. Como a execução dos blocos funcionais deve ser cíclica, esta possui uma constante de tempo limite ( $d_i$ ), que deve ser obedecida pelo CP para evitar distúrbios no controle do SP. Por outro lado, o CP tem uma velocidade de processamento ( $\mu_q$ ) e possui um tempo de ciclo (scantime), definido como  $win_q$ . Dessa forma, podemos definir carga computacional do CP  $q$  ( $Lc_q$ ) conforme a equação 4.10.

$$Lc_p = \frac{\left[ \frac{\sum_{i=1}^n s_i + \sum_{j=1}^n v_{ij}}{\mu_p} \right]}{win_p} \quad (4.10)$$

Onde:

$win_q$  do CP deverá ser menor ou no máximo igual ao menor  $d_i$  associados ao bloco funcional que será executado para atender os requisitos temporais do bloco funcional.

Quando  $L_{c_p} > 1$  significa que a carga computacional do processador  $p$  excedeu os 100% da capacidade máxima do CP. Portanto, este CP não cumprirá os requisitos temporais exigidos pelo bloco funcional, podendo assim causar distúrbios no controle do SP.

#### 4.3.2.5 Consumo de recursos dos CPs

Para um sistema de controle, efetivamente, atender aos requisitos exigidos pelas aplicações de tempo real, este precisa permitir uma reserva de recursos do sistema para o processamento das tarefas (NORONHA, 2001). Os sistemas atuais desenvolvidos ou adaptados para trabalhar com tempo real mostram grande preocupação com o atendimento do tempo de processamento das tarefas. Entretanto, o processador é apenas um recurso do sistema<sup>7</sup>.

Portanto, não é suficiente considerar somente os requisitos temporais dos blocos funcionais para assegurar o desempenho adequado dos recursos do sistema de controle de um SP e garantir a estabilidade de seu controle. Seguindo os conceitos utilizados no processamento de blocos funcionais descritos anteriormente, os recursos utilizados no processamento destes devem ser reservados para garantir a funcionalidade dos blocos funcionais e o consumo de recursos do sistema. Com a alocação dos blocos funcionais no CP, o número de recursos disponíveis do CP diminui, pois esses ficam reservados aos blocos funcionais que foram designados ao CP. Portanto, quanto maior o número de blocos funcionais alocados, menor será o número de recursos computacionais disponíveis. Essa disponibilidade de recursos no CP  $q$  ( $L_{res_q}$ ) é definida na equação 4.11:

$$L_{res_q} = \frac{\sum_{i=1}^n res_i}{res_q} \quad (4.11)$$

<sup>7</sup> Memória, periférico, rede de comunicação, entre outros recursos consumidos pelas tarefas também deveriam ser considerados, visando a atender todos requisitos da aplicação.

Se  $L_{res_q} > 1$  significa que os recursos computacionais  $q$  do CP excederam os 100% da capacidade máxima de alocação de blocos funcionais do CP. Portanto, não pode ser alocado mais nenhum bloco funcional neste CP.

#### **4.3.3 Algoritmo para Alocação dos Blocos Funcionais nos Controladores do SP**

Uma vez proposto um número de CPs para efetuar o controle do SP, definido suas características, a divisão das áreas de controle, os sinais de E/S alocados em cada CP e a posição destes no chão de fábrica, o próximo passo consiste na designação dos blocos funcionais para que estes executem o controle do SP e na verificação se essa proposta de distribuição atende às restrições impostas pelos blocos funcionais considerando as características dos CPs que efetuam o controle do SP.

##### **4.3.3.1 Especificação das Premissas para alocação dos Blocos Funcionais**

O cenário considerado para abordar o problema de alocação dos blocos funcionais em CPs, constitui-se em um conjunto de requisições de alocações contendo  $N_T$  Blocos Funcionais e um conjunto de  $N_P$  CPs disponíveis. Neste sentido, o objetivo é solucionar dois problemas básicos para a alocação dos blocos funcionais:

- O que deve ser processado e;
- Quem deve processar.

Para definir o que deve ser processado, é preciso decidir o método de atendimento às demandas de carga de processamento para que não haja problemas de gargalos em virtude da má distribuição dos blocos funcionais nos CPs. Os blocos funcionais que exigem uma maior rapidez para o cálculo e a entrega do resultado do algoritmo de controle, exigem uma demanda maior de processamento em relação a um bloco funcional com o mesmo número de elementos  $e$ , por conseguinte, possuem maior custo de processamento sobre estes.

Em relação a definição de quem deve processar cada bloco funcional, implica em avaliar-se o custo envolvido entre os CPs. Logo, a escolha tende a ser pelo CP que



tiver maior eficiência no processamento e possuir o maior número de sinais de E/S necessários para processar o algoritmo de controle de cada bloco funcional.

Logo, as premissas básicas que devem ser utilizadas como diretrizes para a realização da alocação dos blocos funcionais são:

**Premissa 1.** Considerando-se um conjunto de  $M$  CPs para o processamento dos blocos funcionais que efetuam o controle e a monitoração do processo em um sistema produtivo dividido em  $M$  áreas de controle, a uniformidade quanto as cargas de processamento de cada área deve ser uma condição necessária para realização da alocação destes blocos funcionais.

**Premissa 2.** Considerando-se a carga de processamento de um certo CP em uma determinada área de controle, a ociosidade do CP deve ser uma condição básica para realização da alocação de blocos funcionais neste CP.

#### 4.3.3.2 Alocação Ótima dos Blocos Funcionais nos Controladores

A cada ciclo de processamento do algoritmo de alocação dos blocos funcionais, o que se faz é reduzir a dimensão do problema para a seguinte situação: existem  $y$  CPs e  $y$  blocos funcionais e são conhecidos os custos  $C_{ij}$  correspondentes a todas as combinações de CPs e blocos funcionais: Assim, tem-se como objetivo atribuir os blocos funcionais a esses CPs, de maneira que o custo total seja mínimo. Esta estruturação correspondente à formulação clássica do problema de designação ou atribuição (NOVAES, 1978); (BRONSON, 1985); (PUCCINI; PIZZOLATO, 1987).

O foco do problema depende em se estabelecer a matriz de custos ( $C_{ij}$ ) onde,  $j$  identifica o CP,  $i$  o bloco funcional e  $C$  o custo computacional (ou tempo de processamento) para calcular o bloco funcional  $i$  no CP  $j$  de acordo com a expressão 4.9. A matriz de custo gerada pelo método de designação é apresentada na figura 4.3.

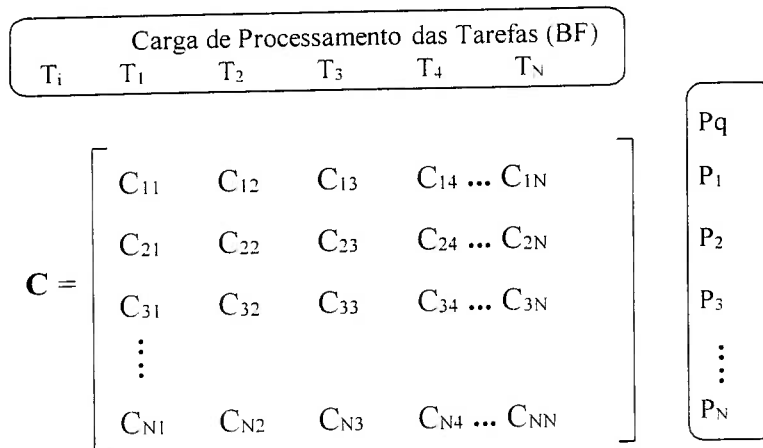


Figura 4.3 – Matriz de custo utilizada no método de designação de blocos funcionais em CPs

O Anexo B contém um detalhamento do algoritmo de designação a ser aplicado para os problemas de alocação de blocos funcionais em CPs citados neste trabalho.

Para a aplicação do método de designação, é necessário que seja levantado o custo de processamento associado a cada bloco funcional. Portanto, o custo  $C_{ij}$  pode ser deduzido, objetivamente, a partir da expressão 4.12 derivada da expressão 4.9.

$$C_{ij}^q = \frac{s_i + v_{ij}}{\mu_q} \quad (4.12)$$

Onde:

$s_i$  é a carga computacional exigida pelo bloco funcional  $i$ , e pode ser quantificada pelo número de instruções que o bloco funcional possui;

$v_{ij}$  é a carga computacional exigida pelo bloco funcional  $i$  para utilizar blocos de interface para trocar informações com o bloco funcional  $j$  para leitura e escrita dos dados de E/S, e pode ser quantificada pelo número de instruções que o(s) bloco(s) funcional(ais) de interface possui(em);

$\mu_q$  é a velocidade com que o CP  $q$  calcula o bloco funcional  $i$ , e pode ser quantificada pelo número de instruções que o CP processa em um determinado período;

$C_i^q$  é o custo computacional associado ao bloco funcional  $i$  em relação ao CP  $q$  e pode ser quantificado pelo tempo de processamento gasto pelo CP para processar um bloco funcional.

Esta formulação sugerida para estimar-se o custo de designação de um conjunto de CPs em relação a um conjunto de blocos funcionais é conveniente porque a atualização destes valores e o cálculo destes parâmetros são simples e inequívocas. Caso não seja possível obter o número de instruções dos blocos funcionais ou a taxa de serviço (velocidade de processamento) dos CPs, o custo  $C_{ij}$  da matriz de designação pode ser substituído pela somatória do tempo de processamento de cada função que compõem um bloco funcional como sugerem os manuais dos equipamentos (ABB 2001a); (ABB 2001b); (ROCKWELL, 2003), conforme apresentado na equação 4.13.

$$C_i^q = \sum_{j=1}^n N_j \times T_j \quad (4.13)$$

Onde:

$N_j$  número de funções do tipo  $j$  do bloco funcional  $i$

$T_j$  tempo de execução da função  $j$  no CP  $q$

$C_i^q$  é o custo computacional associado ao bloco funcional  $i$  em relação ao CP  $q$  e pode ser quantificado pelo tempo de processamento gasto pelo CP para processar um bloco funcional.

Desta maneira, seguindo o método sugerido para composição dos blocos e definindo corretamente os custos de processamento em função das características dos CPs, é possível obter-se uma solução ótima no sentido de minimizar o custo de alocação dos blocos funcionais nos CPs.

Por definição, o número de CPs e o número de blocos funcionais deve ser o mesmo para que esta questão possa ser tratada como um problema de designação. Entretanto, esta condição não é sempre verdadeira, uma vez que o número de CPs, normalmente, é inferior ao número de blocos funcionais. Nestas situações, a solução consiste em criar-se CPs fictícios, até que a condição de igualdade seja satisfeita. A

estes CPs fictícios associam-se custos elevados (da ordem de  $10^{10}$ , por exemplo) de maneira que não comprometam a solução do problema.

Para se obter a designação de custo mínimo a partir da matriz de custos, pode-se utilizar o Método Húngaro (BRONSON, 1985). Este método associa critérios básicos de redução de matrizes e métodos racionais baseados no algoritmo de Fork-Fulkerson para obtenção de máximo fluxo (NOVAES, 1978).

Portanto, neste ponto torna-se possível sistematizar o conjunto de procedimentos que neste trabalho é proposto para definir a alocação dos blocos funcionais nos CPs que realizam o controle do SP.

1. Alocar os blocos funcionais com CPs pré determinados.
2. Verificar quais os blocos funcionais que não possuem CPs designados.
3. Verificar quais CPs são capazes de processar os blocos funcionais utilizando a equação 4.12 ou 4.13.
4. Verificar quais CPs são capazes de armazenar os blocos funcionais utilizando a equação 4.10.
5. Montar a matriz de custo dos  $i$  blocos funcionais sem CPs versus os  $j$  CPs capazes de armazená-los e processá-los.
6. Calcular o custo para cada par  $C_{ij}$  (*bloco funcional x CP*) da matriz de custo  $C$ , utilizando a equação 4.12 ou 4.13.
7. Utilizar o método de Designação para alocar os blocos funcionais nos CPs.
8. Atualizar os recursos dos CPs.
9. Atualizar a lista de blocos funcionais sem designação de CP.
10. Mostrar o quanto houve de sobra (ou falta) de carga de processamento, consumo de recursos dos CPs do sistema e a lista de alocação dos *blocos funcionais x CPs*.

Utilizando este conjunto de procedimentos, juntamente com a técnica de estruturação para gerar o algoritmo de controle do SP, diferentes blocos funcionais do

sistema de controle são associadas a diferentes CPs (cada combinação diferente constituindo uma opção de alocação diferente), possibilitando assim, obter a distribuição ótima dos blocos funcionais do sistema de controle nos CPs.

# CAPÍTULO 5

## PROCEDIMENTOS PARA O PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE MODULARES E DISTRIBUÍDOS

Atualmente, existem literaturas específicas sobre automação de processos que servem de auxílio para a implementação de projetos (MIYAGI, 1996); (GRANDI, 2000); (MORAES, 2001); (ASCANIO, 2000); (ALMEIDA, 2000). Algumas dessas metodologias são genéricas, pois podem ser aplicadas na automação de vários tipos de processo. Outras, porém, já são mais específicas, podendo ser aplicadas somente em alguns sistemas, mas apresentam características importantes que devem ser consideradas na implementação de um projeto de automação. Tendo em vista as vantagens e desvantagens estudadas nestas metodologias, é adotada neste trabalho a metodologia proposta por Miyagi (1996), como **metodologia padrão** para implementação de projetos de sistemas de controle. Porém, torna-se necessário executar algumas adaptações na metodologia, para que esta seja aplicada de forma eficiente no contexto de sistemas de controle distribuídos. Dessa forma, pretende-se apresentar neste capítulo, as adaptações necessárias para que essa metodologia se adapte às novas tendências dos projetos de automação proporcionando agilidade e precisão quando houver necessidade de se analisar ou implementar um projeto de automação.

### 5.1 EXTENSÕES NECESSÁRIAS À METODOLOGIA DE IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE CONTROLE SED

A metodologia proposta por Miyagi (1996), atua no sentido de sistematizar a implementação de projetos de sistemas de controle de SP. Em (MIYAGI, 1996) é demonstrado como as etapas desta metodologia devem ser seguidas para proporcionar a implementação de um sistema de controle para SP. Considerando-se a natureza dos sistemas abordados, esta metodologia adota como base procedimentos clássicos que direcionam a tarefa de desenvolvimento de 'software' em engenharia da computação (PRESSMAN, 2000). Neste sentido, é introduzido o conceito de ciclo de vida do sistema de controle de acordo com a Figura 5.1.

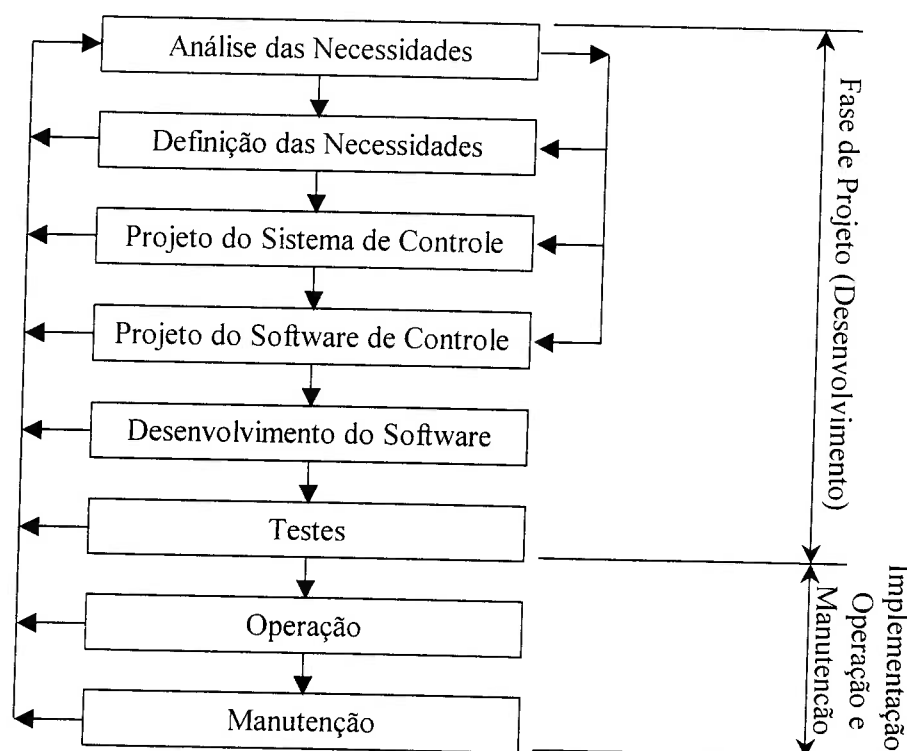


Figura 5.1 – Ciclo de vida de um sistema de controle

A realização de cada uma das etapas de desenvolvimento do sistema envolve o conceito de prototipagem, repetindo-se ciclicamente o procedimento descrito na figura 5.2. Desta forma, é possível tratar-se, gradativamente, as dificuldades existentes em sistemas que apresentam maior complexidade tanto estrutural quanto comportamental e refinar, gradativamente, os modelos para obter-se um nível de fidelidade adequado.

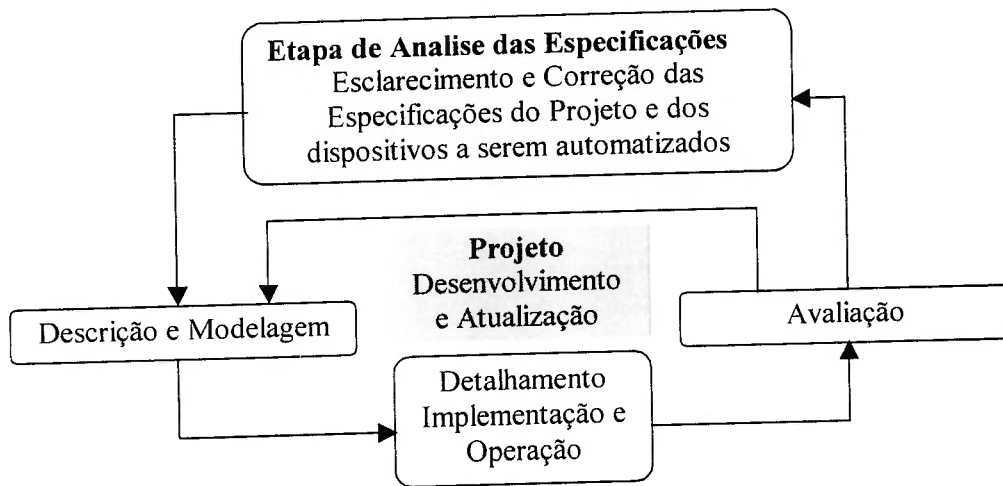


Figura 5.2 – Ciclo de Prototipagem.

Considerando-se estas características, uma metodologia dedicada ao desenvolvimento de sistemas de controle deve suportar (SANTOS FILHO, 1998); (MIYAGI, 1996):

- Técnicas de reutilização;
- Técnicas de simulação das operações durante as diversas fases de desenvolvimento do projeto;
- Técnicas de modelagem para o projeto estruturado e representação efetiva dos procedimentos de controle;
- Técnicas que incorporem interfaces gráficas e esquemáticas para a modelagem da evolução dinâmica dos sistemas.

Com o objetivo de analisar as atividades relativas a cada uma das etapas do projeto de automação, são apresentadas as extensões necessárias em cada etapa da metodologia padrão, para que esta possa ser adaptada à implementação de projetos de sistemas de controle distribuídos.



Estas extensões visam introduzir as técnicas propostas nos Capítulos anteriores para projetar efetivamente, sistemas de controle do tipo modular e distribuído. Nestas técnicas, é importante destacar as interfaces com o elemento humano e sua participação na tomada de decisões para implementação do projeto de automação do sistema durante todo o ciclo de vida do mesmo. As macro-tarefas envolvidas em cada etapa do desenvolvimento de um projeto de automação, segundo a metodologia padrão, são apresentadas na tabela 5.1.

<b>Etapas</b>	<b>Atividades</b>
<i>Análise de Necessidades</i>	1. Identificação do objetivo final do sistema.
	2. Compreensão do objeto de controle, instalações e equipamentos.
	3. Organização dos conhecimentos sobre o sistema de controle (dispositivo de controle, equipamentos periféricos, etc.).
	4. Abstração e análise das funções de controle.
<i>Definição das Necessidades</i>	5. Definição das funções de controle.
	6. Definição do fluxo das funções de controle.
<i>Projeto do Sist. de Controle</i>	7. Divisão das funções e definição das interfaces.
	8. Definição e alocação dos sinais de entrada e saída.
	9. Definição da estrutura do programa de controle.
<i>Projeto do 'Soft.' De Controle</i>	10. Projeto da reutilização.
	11. Projeto dos programas.
	12. Projeto de programas não padronizados.
<i>Des. 'Soft.' de Controle</i>	13. Desenvolvimento do programa e seu carregamento nas máquinas.
<i>Testes</i>	14. Teste por módulo.
	15. Teste do sistema global.

Tabela 5.1 Atividades contidas em procedimentos de controle de um sistema de controle.

As etapas da metodologia, não precisam, necessariamente, serem realizadas de forma sequencial. Estas podem ser realizadas paralelamente, otimizando o tempo de desenvolvimento do projeto (MIYAGI, 1996); (SANTOS FILHO, 1998).

A metodologia padrão pode ser encontrada na sua forma original em (MIYAGI, 1996), onde cada uma destas atividades de projeto que constituem a metodologia em questão são apresentadas de forma mais detalhada. Por sua vez, para o desenvolvimento de sistemas com características de controle distribuído, é adequado acrescentar-se determinados procedimentos para descrever de forma eficiente e padronizada as estratégias de controle e a otimização da arquitetura de controle desta classe de sistemas.

A premissa básica adotada para orientar o projeto do sistema de controle distribuído consiste no fato de considerar-se que existem vários dispositivos de controle capazes de efetuar o controle do SP e uma estratégia composta de vários módulos de controle que unidos, efetuam o controle do SP de maneira adequada. Ainda que, esta premissa pareça ser elementar e dispensável, sua importância é justificada por alguns aspectos a serem considerados a seguir.

O desenvolvimento do controle destes sistemas consiste basicamente, em definir-se criteriosamente, os módulos de controle para que estes sejam padronizados e interajam de forma apropriada para executá-lo de uma forma distribuída, obedecendo ao sequenciamento das etapas do programa inerentes ao processo que se está controlando, fazendo com que cada módulo de controle interaja como se fosse um único programa de controle trabalhando de maneira centralizada. Neste aspecto, para que não ocorram possíveis problemas de incompatibilidade no sistema, deve-se considerar a troca de informações entre os módulos de controle. Desta forma, é importante fazer o uso de uma interface padronizada que estabeleça o protocolo de comunicação entre os módulos de controle, adicionando procedimentos a metodologia padrão para representar estas estratégias de controle de forma padronizada.

Outro aspecto importante consiste no fato de ter sido proposta uma discriminação do sistema de controle em uma parte correspondente à modelagem lógica e outra parte correspondente à modelagem física do sistema de controle do SP. Esta abordagem justifica-se porque é possível existir um sistema de controle baseado em dispositivos de controle de elevada flexibilidade computacional, que possibilitam a definição de estratégias de controle mais elaboradas para que o controle seja realizado adequadamente de maneira distribuída.

A seguir, considerando-se a Tabela 5.1, são apresentadas as atividades básicas de cada etapa que sofreram impacto frente a proposta de trabalhar-se no contexto de sistema de controle distribuídos. Neste aspecto são descritos os procedimentos adicionais que devem ser agregados a cada uma delas para tornar a tarefa de desenvolvimento de sistemas de controle distribuído eficiente.

## 5.2 IMPACTOS NA DEFINIÇÃO DAS NECESSIDADES

De acordo com a metodologia padrão gera-se nesta etapa:

- A documentação correspondente às listas dos atuadores, detectores e dispositivos de comando e monitoração. Todos estes dispositivos podem ser modelados a partir de grafos MFG;
- A lista dos intertravamentos necessários para operação adequada do sistema e os diagramas definitivos das funções de controle e do sistema de alimentação de energia.
- O fluxo das funções de controle e propostas de tratamento de falhas.

Em relação ao fluxo das funções de controle, este deve ser representado através de grafos PFS/MFG em virtude das facilidades apresentadas para modelar-se a evolução dinâmica dos SP nestas redes, uma vez que, permitem o desenvolvimento dos modelos por refinamentos sucessivos e em blocos funcionais admitindo uma representação estruturada. Esse trabalho tem como objetivo facilitar a compreensão do funcionamento do sistema, pois representar a lógica de controle utilizando diretamente as linguagens de programação dos CPs (como diagrama ladder, linguagem estruturada, etc.) torna difícil a interpretação e compreensão do algoritmo de controle (MIYAGI, 1996).

Portanto, é nesta etapa que se modela efetivamente, a lógica de controle do SP. Neste contexto, para executar o projeto de forma estruturada a fim de organizar o processo de modelagem do sistema, utiliza-se os procedimentos descritos no Capítulo 3 de acordo com a seguinte sequência:

- Efetuar a modelagem seguindo o procedimento da metodologia PFS/MFG descritos no item 3.2.3;
- Construir o modelo MFG estruturado utilizando como referência os blocos estruturados sugeridos na figura 3.4;

Neste sentido, é importante a interação do projetista para a execução adequada destes procedimentos, uma vez que este é o responsável pela compreensão e adequação dos procedimentos da metodologia às necessidades do sistema sempre que for necessário intervir nas etapas desta.

### **5.3 IMPACTOS NO PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE**

Um ponto importante a ser considerado na definição da arquitetura do software de controle é a definição da alocação dos sinais de E/S de cada dispositivo de controle. Em função dessas informações é que podem ser calculadas as cargas de processamento do sistema. Desta forma, torna-se possível obter uma performance de funcionamento eficiente do sistema, buscando a maximização dos recursos do sistema e a minimização do tempo de processamento dos módulos de controle obtendo assim uma solução efetiva para a arquitetura de controle.

Desta forma, os sinais de controle deverão ser alocados nos controladores levando em consideração características, tais como, a velocidade de varredura, segurança do sistema, minimização de falhas, quantidade de sinais reserva por cartão e/ou controlador entre outras variáveis que possam ser importantes no momento de distribuir esses sinais vindos do processo.

Além disso, a definição do número de controladores deve ser baseada nas características dos processos para que exista uma otimização do número de controladores para a redução dos gastos do projeto. Neste sentido, torna-se necessário elaborar algumas atividades relacionadas à especificação dos dados de entrada necessários para aplicar o critério de definição do número de controladores, de acordo com o conjunto de procedimentos descritos no item 4.2.1. Desta forma, deve-se gerar uma lista com todos os instrumentos do sistema de controle especificando a posição geográfica de cada um deles e utilizando como referencial um sistema de coordenadas

ortogonais  $(O, \bar{e}_1, \bar{e}_2)$ . A Tabela 5.2 apresenta um exemplo de listagem de estações de carga/descarga de um sistema produtivo.

Instrumento		Coordenadas (metros)
Nome	Descrição	
VA	Válvula de Dosagem do Produto A	( 3; 31,5 )
VB	Válvula de Dosagem do Produto B	( 10; 31,5 )
VC	Válvula de Dosagem do Produto C	( 11; 22,5 )
W1	Sensor de Peso 1	( 6; 25 )
W2	Sensor de Peso 2	( 6; 25 )
M1	Motor de descarregamento do tanque	( 8; 16 )
M2	Motor de acionamento da esteira	( 15,5; 15 )
M3	Motor do Misturador	( 34; 24 )
d0	Sensor de presença de material sólido	( 21; 24 )
P1	Tanque em posição de descarga	( 22; 20 )
P0	Tanque em posição de mistura	( 8; 2 )
E0	Estação de operação	( 5,5; 15 )

Tabela 5.2 – Posição física dos instrumentos de um SP.

Outra informação que deve ser especificada nesta etapa, corresponde à descrição dos custos pertinentes à realização do fluxo de informações de controle no sistema. Para a passagem dos cabos de transmissão de sinal do instrumento ao CP, são utilizados materiais que influenciam na definição do local de alocação dos painéis de controle, portanto, deve ser calculado, também, o custo relacionado a distância destes equipamentos. Neste caso, os custos envolvidos na transmissão do sinal são: o custo estimado do cabo por metro, o custo estimado da canaleta por metro, o custo estimado dos suportes de fixação que são utilizados entre outros materiais que possam ser utilizados na estrutura montada para possibilitar a realização do fluxo de informações no sistema de controle.

A partir destes dados, juntamente com as características de capacidade de alocação de sinais dos controladores, pode ser definido o CVCG (Centro Virtual de Custo Global) do sistema, o CVCR (Centro Virtual de Custo Regional) e estima o  $ITT_{MR}$  (Índice de Delineação da Área de Controle por controlador) para mapear adequadamente o SP em regiões e efetuar a alocação dos sinais de E/S ao CP designado para realizar o controle em cada área de controle propriamente dita.

O projetista pode influenciar na alocação dos sinais associados a um determinado CP, levando em consideração as características de cada projeto. Desta forma, é capaz de retirar da lista de instrumentos aqueles que são responsáveis por estes sinais de tal forma que retirando-se o instrumento da lista, esta informação não será mais tratada pelo algoritmo de delimitação das áreas de controle.

#### **5.4 IMPACTO NO PROJETO DO SOFTWARE DE CONTROLE**

Para execução dessa tarefa, é importante que o software seja estruturado de uma forma macro e refinado conforme haja necessidade, até chegar ao detalhamento das funções de controle do objeto de controle (MIYAGI, 1996); (SANTOS FILHO, 2000). A configuração da lógica de controle, sempre deve ser feita visando a reutilização do programa e a padronização da lógica, construindo blocos funcionais (funções macros padronizadas), para que estes possam ser utilizados em várias partes do programa ou até mesmo em outros programas que utilizem funções similares.

Portanto, para desenvolver a lógica de forma padronizada, utiliza-se procedimentos que fazem com que os modelos gerados em MFG estejam de acordo com a norma IEC61499, norma esta, que padroniza o formato e o protocolo de troca de informações entre os módulos de controle. Para realizar a padronização dos módulos de controle segundo esta norma, é fundamental que estes módulos sejam construídos de forma estruturada. Para obter a padronização dos módulos de controle segundo a norma IEC61499, podem ser aplicados os procedimentos sugeridos no item 3.3.4.

A Figura 5.3 ilustra um exemplo de arquitetura de programação, proposta na metodologia padrão, em que se implementam blocos funcionais que se inter-relacionam constituindo um programa principal.

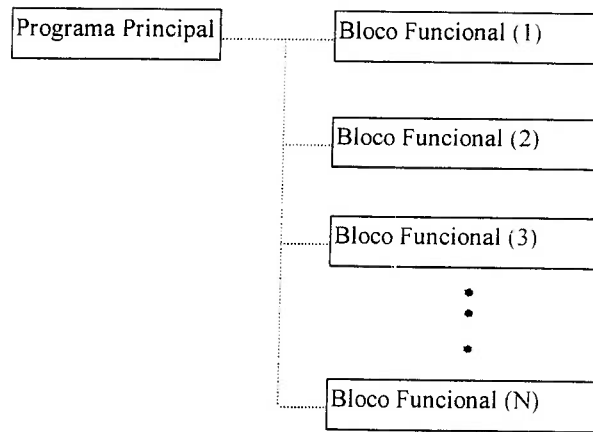


Figura 5.3 – Exemplo de estrutura de programa segmentada em blocos funcionais.

Considerando um modelo PFS/MFG da estratégia de controle de um SP, cada bloco funcional corresponde a uma parte da seqüência de execução do programa.

A Figura 5.4 é um exemplos que ilustra uma estrutura em dois níveis. Entretanto, o número de níveis pode ser extrapolado adequadamente, à medida que se define os blocos funcionais apropriados e o correspondente algoritmo de controle.

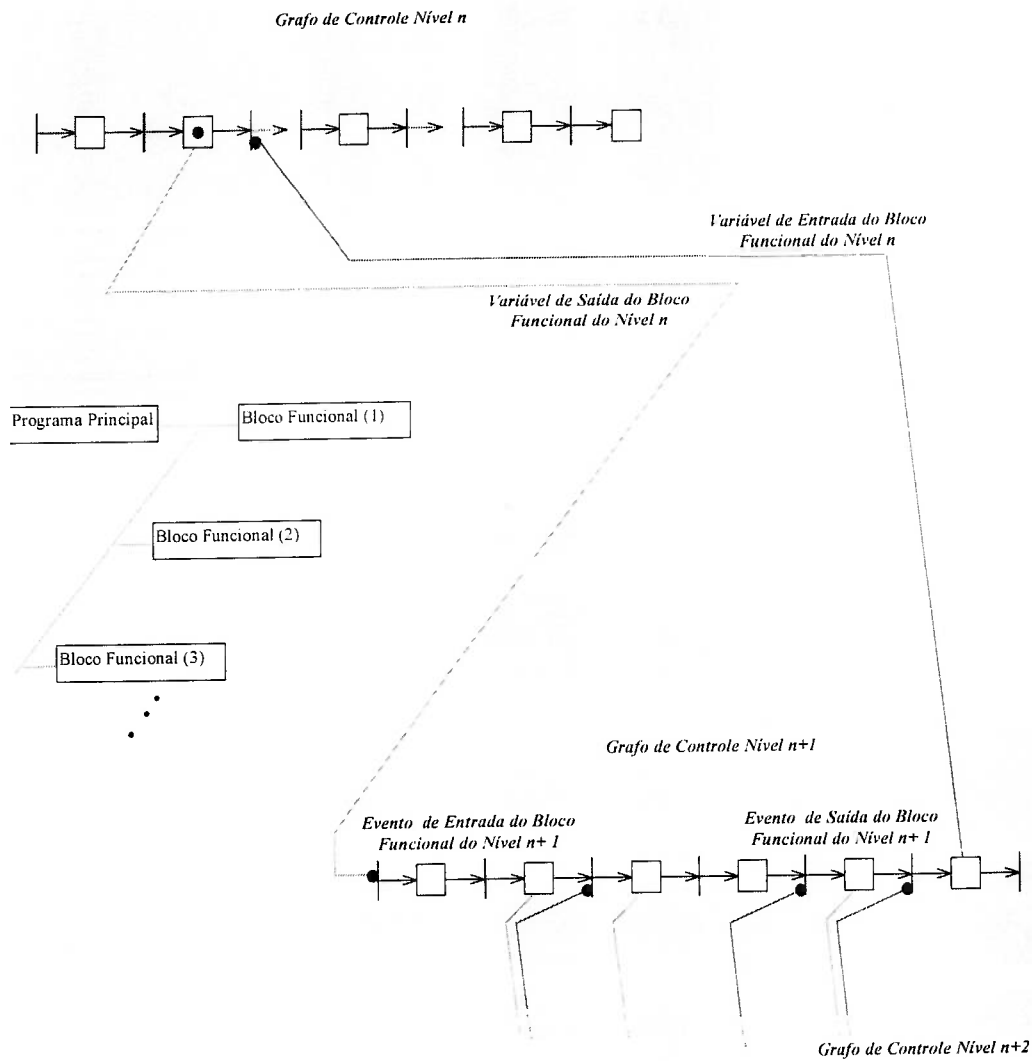


Figura 5.4 – Exemplo de estrutura hierárquica de controle.

A próxima etapa consiste em aplicar os procedimentos apresentados no item 4.3.3, com o objetivo de efetuar a distribuição dos módulos de controle nos CPs.



## CAPÍTULO 6

# CONCLUSÕES FINAIS

Neste trabalho, é proposta a aplicação de uma abordagem baseada em sistemas modulares e distribuídos para projeto de sistemas de controle para SP. Para tanto apresenta-se uma sistemática que proporciona uma solução consistente para estes sistemas adequarem-se aos novos padrões impostos pela evolução dos equipamentos que realizam o controle, atribuindo maior autonomia, flexibilidade e qualidade.

Neste contexto, inicialmente, são apresentados conceitos relacionados aos SP, estabelecendo-se uma analogia entre as principais características das abordagens inerentes a estes. Levando-se em consideração os aspectos abordados, é feita uma introdução genérica sobre SP, estabelecendo-se as principais características do comportamento apresentado por estes e definindo-se um conjunto de características importantes que devem ser consideradas no conjunto de propriedades de uma ferramenta capaz de controlar estes sistemas.

Posteriormente, é apresentado o MFG em que se considera os atributos fundamentais para modelagem de SPs. No sentido de sistematizar e racionalizar a tarefa de construção dos grafos MFG, é apresentado o PFS como uma ferramenta adequada para se aplicar uma abordagem 'top-down' para a modelagem de SPs.

Uma vez definida a funcionalidade de um SP, a próxima etapa considerada, é a definição do que se deseja realizar, isto é, especificar as estratégias de controle tendo em vista a realização de determinados processos. Neste contexto realiza-se, inicialmente, um estudo comparativo dos vários fatores que influenciam na definição de uma arquitetura de controle, apresentando as características inerentes a estes sistemas. Para projetar o sistema de controle de um SPs, adotou-se o MFG como uma ferramenta para

a modelagem da parte correspondente ao controle destes sistemas, detalhando-se, inclusive, a modelagem das funções elementares de controle de tarefas.

Para que se possa explorar a capacidade de modelagem do MFG em representar estratégias de controle, introduz-se a metodologia estruturada PFS/MFG para a modelagem dos elementos atividade, e distribuidores, abordando-se aspectos relativos à distribuição do controle em vários níveis de controle.

Posteriormente, introduz-se o conceito de estruturação e padronização do algoritmo de controle para que este possa ser aplicado a arquiteturas de controle distribuído, padronizando a elaboração de módulos de controle para que estes sigam os conceitos da norma IEC 61499. Conseqüentemente são apresentados procedimentos para adaptar os componentes da metodologia PFS/MFG para os padrões desta norma, definindo assim o procedimento para a definição de blocos funcionais na metodologia de implementação de projetos adotada.

No sentido de estender-se o conceito de distribuição dos módulos de controle e definição da arquitetura de controle, é colocado em prática os princípios de uma abordagem antropocêntrica para a solução do problema de definição da arquitetura de controle em função das características do controlador adotado para realizar o controle do SP e alocação de blocos funcionais nos controladores considerando a arquitetura de controle definida para efetuar o controle do SP. Desta forma, é considerado o elemento humano como gerador de regras, capaz de analisar e interagir nessas definições. A atuação do projetista em alguns pontos da metodologia foi sugerida devido ao fato de, na prática, existirem critérios de projetos que poderiam não ser considerados por um algoritmo, fazendo com que o sistema não convergisse para uma solução desejável.

Em um sistema que considera a distribuição de blocos funcionais, os parâmetros de entrada para a realização da designação são os índices de ocupação dos controladores de cada CP. Como saída, o sistema de controle aloca os blocos funcionais nos CPs para que estes executem os algoritmos de controles destes blocos funcionais.

Para isso, a estratégia de controle adotada baseia-se em particionar o sistema em áreas de controle de maneira que haja uma homogeneidade em termos de carga de processamento por área delimitada, associando-se um único controlador por área de controle.

Com relação às áreas de controle, estabeleceu-se um ponto estratégico adequado para a fixação do painel de controle: o CVCR - Centro Virtual de Custo Regional. Para delinear essas áreas, foram propostos algoritmos, os quais, buscam uma solução ótima, para alocá-los de acordo com os custos envolvidos na sua instalação relacionada aos instrumentos do SP e na capacidade dos CPs em alocar os sinais gerados por estes instrumentos.

Desta forma, apresenta-se uma aplicação dos princípios, para que se possa resolver o problema de definição da quantidade de controladores, em função da capacidade de alocação de sinais e do custo do controlador em relação ao layout de onde estão instalados os instrumentos no SP e por fim alocar os algoritmos de controle nestes CPs para realizar o controle do SP.

Assim, este trabalho pretende descrever um conjunto de procedimentos que direcionam o projeto de sistemas de controle de SPs, correspondendo a uma extensão à metodologia proposta por Miyagi (1996). Neste sentido, são analisadas as várias atividades relativas a cada uma das fases de projeto e sempre que necessário, adiciona-se procedimentos para que haja uma especificação adequada com relação a estrutura dos sistemas de controle. Estes procedimentos adicionais, visam introduzir as várias técnicas propostas ao longo deste trabalho para projetar, efetivamente, sistemas de controle modulares e distribuídos para SPs, destacando-se as interfaces com o elemento humano e sua participação nas tomadas de decisões durante todo o ciclo de vida do mesmo.

## **6.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO**

O resultado do desenvolvimento deste estudo traduz-se nas seguintes contribuições fundamentais:

- Proposta de uma metodologia para definição de uma arquitetura física ótima de CPs aderente a uma arquitetura lógica de sistema de controle distribuídos.
- Adequação do conceito de modelagem estruturada à realidade prescrita na norma IEC 61499.

- Interpretação dos elementos estruturais do PFS adequada à norma IEC 61499.
- Aplicação dos princípios de sistemas antropocêntricos para definição dos critérios aplicados na elaboração da arquitetura física do sistema de controle de SP.
- Proposta de um conjunto de procedimentos que foram inseridos à metodologia de projeto de sistemas de eventos discretos proposta em (Miyagi 1996), resultando em uma extensão adequada para tratar-se de sistemas de controle distribuídos.

## 6.2 TRABALHOS FUTUROS

Em relação a técnicas para definição da arquitetura de controle e distribuição de blocos funcionais em controladores.

- Realizar pesquisas no sentido de tornar mais eficiente o método de determinação dos pontos de fixação dos painéis de controle, para o caso em que o sistema de produção é de porte elevado, envolvendo itens de maior complexidade na determinação do custo inerente a delimitação das áreas de controle, otimizando assim o processo de obtenção dos pontos de fixação dos painéis de controle.

Em relação à metodologia de projeto de SPs:

- Trabalhar com o conceito de múltiplos critérios para a otimização da arquitetura física de CPs aderente a uma determinada organização lógica.
- Adequar a realidade de sistema de controle distribuído envolvendo arquiteturas hierárquicas modificadas.
- Aplicar a metodologia para vários estudos de caso com o sentido de validar e aprimorar os procedimentos propostos.

### 6.3 TRABALHOS PUBLICADOS

A seguir lista-se os trabalhos publicados que envolvem as pesquisas realizadas para o desenvolvimento deste trabalho:

- Cavaleiro, A.C.M.; Gonçalves, J.C.; Pires, C.T.A.; Mendes, J.M.; Sistemas de Controle Avançados Utilizados na melhoria da Qualidade de Laminados à Frio da Cosipa, V Seminário de Automação de Processos; Belo Horizonte, MG; Outubro 2001
- Cavaleiro, A.C.M.; Santos Filho, D.J.; “Projeto de Sistemas de Controle Modulares e Distribuídos”; Boletim Técnico da EPUSP; Junho 2004; São Paulo - SP

# **ANEXO A - MARK FLOW GRAPH (MFG) E PRODUCTION FLOW SCHEMA (PFS)**

Neste Anexo, apresenta-se um conjunto de técnicas de modelagem de sistemas baseado no MFG - Mark Flow Graph - (HASEGAWA et al., 1984); (SANTOS FILHO; MIYAGI, 1995) e PFS - Production Flow Schema - (MIYAGI, 1996).

## **A.1 FUNDAMENTOS DO MARK FLOW GRAPH (MFG)**

O MFG (HASEGAWA et al., 1984); (MIYAGI, 1996) é uma rede interpretada derivada de redes de Petri (PETERSON, 1981); (REISIG, 1985); (REISIG, 1992) desenvolvida para a modelagem e controle de sistemas. O MFG é composto basicamente pelos seguintes elementos estruturais (vide Figura A.1):

- a) As transições que indicam a ocorrência de eventos;
- b) Os boxes que representam as pré e pós-condições;
- c) Os arcos orientados que estabelecem uma relação causal entre os eventos e as condições;
- d) As portas que habilitam ou inibem a ocorrência dos eventos e;
- e) As marcas que indicam a manutenção de uma condição.

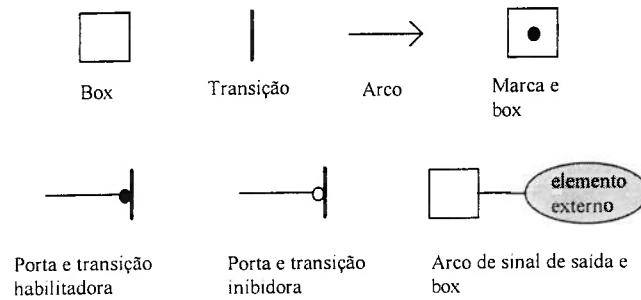


Figura A.1 – Elementos básicos do MFG.

No processo de modelagem de um SP, os boxes representam as condições, operações ou tarefas associadas aos dispositivos e as transições representam o início e término de um processo. O comportamento dinâmico do sistema é indicado pela evolução das marcas em um grafo, de acordo com uma regra pré-definida de disparo das transições e que correspondem ao fluxo de itens (materiais ou informações) no sistema real.

Para representar o interfaceamento do modelo do sistema com o sistema real existem ainda dois elementos estruturais: os arcos de sinal de saída e as portas habilitadoras/inibidoras. No caso das portas, ainda há uma classificação em portas externas ou internas, dependendo da natureza do sinal de origem.

Em relação a sua estrutura, o MFG básico torna-se uma rede de Petri C/E se os arcos de saída e os *gates* (arcos habilitadores e inibidores) forem desconsiderados.

O MFG é um grafo bipartido, descrito por uma tripla  $N=(B, E, H)$  onde:

$B$  é o conjunto de boxes  $b_j B= \{ b_1, \dots, b_j, \dots \} \quad j \geq 1; j \in \mathbf{N}$

$E$  é o conjunto de transições (eventos)  $e_i E= \{ e_1, \dots, e_i, \dots \} \quad i \geq 1; j \in \mathbf{N}$

$B$  e  $E$  são conjuntos disjuntos

$H:(B \times E) \cup (E \times B) \rightarrow \mathbf{N}$  representa os arcos que conectam boxes e transições.

### A.1.1 Matriz de Incidência do MFG

A matriz de incidência  $A$  representa a conexão entre os elementos do grafo. O elemento  $a_{ij}$  representa a existência ou não da conexão entre o box  $b_j$  e a transição  $e_i$ .

$$A = A^+ - A^-$$

$A^+$  :  $a_{ij} = 0$  se não existe conexão entre os elementos

$a_{ij} = +1$  se  $b_j$  é pós-condição de  $e_i$

( $b_j \in e_i \bullet$ , onde  $e_i \bullet$  é o conjunto das pós-condições de  $e_i$ )

$A^-$  :  $a_{ij} = 0$  se não existe conexão entre elementos

$a_{ij} = +1$  se  $b_j$  é pré-condição de  $e_i$

( $b_j \in \bullet e_i$ , onde  $\bullet e_i$  é o conjunto das pré-condições de  $e_i$ )

Não são permitidos self-loops, isto é, transições que têm pré-condições que também são pós-condições. ( $e_i \bullet \cap \bullet e_i = \emptyset$ )

No MFG, o número de arcos entre dois elementos é no máximo igual a um.

Através da matriz de incidência pode-se identificar algumas relações interessantes entre eventos (transições). Dois eventos genéricos  $e_r$  e  $e_s$  podem:

ser independentes se  $\forall j, (v_r \otimes v_s)_j = 0$ ;

estar em contato se  $\exists j / (v_r \otimes v_s)_j = -1$ ;

estar em conflito se  $\exists j / (v_r \otimes v_s)_j = +1$ ;

Onde:

$\otimes$  = produto direto entre vetores, por exemplo:  $[a_1 \ a_2] \otimes [b_1 \ b_2] = [a_1 \cdot b_1 \ a_2 \cdot b_2]$

$v_r$  = linha  $r$  de  $A$  (vetor que contém as pré-condições e pós-condições de  $e_r$ ).

$v_s$  = linha  $s$  de  $A$  (vetor que contém as pré-condições e pós-condições de  $e_s$ ).

$j$  = índice dos elementos do vetor resultante de  $(v_r \otimes v_s)$



### A.1.2 Vetor Marcação

Os elementos do vetor de marcação  $\mathbf{M}$  representam o número de marcas em cada box.

$$M_i = [m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{ij}, \dots]^T \quad ; i \in \mathbf{N}$$

A marcação representa o estado do sistema modelado. Assim  $\mathbf{M}_i$  é o  $i$ -ésimo estado do sistema e  $\mathbf{M}_{i+1}$  é o seu próximo estado.  $\mathbf{M}_0$  é a marcação inicial.

O MFG é um grafo seguro (safe) (MURATA, 1989), pois permite apenas uma marca por vez em cada box.

Um subconjunto de  $\mathbf{B}$  formado pelos boxes marcados num determinado estado global da rede é chamado de "case" ( $\mathbf{cs}$ ). Entretanto, pela analogia associada e sem prejuízo ao formalismo, este texto trata cases e marcações de modo indistinto.

### A.1.3 Regras de Habilitação de Transição

Uma transição  $e$  está habilitada em um dado case  $\mathbf{cs}$  se ambas as afirmações abaixo forem verdadeiras:

- 1) todas as pré-condições de  $e$  estão marcadas
- 2) nenhuma das pós-condições de  $e$  está marcada.

Assim,

$$(\bullet e \subseteq \mathbf{cs}) \wedge (e \bullet \cap \mathbf{cs} = \emptyset) \Leftrightarrow e \text{ está habilitada} \quad (\text{A.1})$$

Uma forma algébrica de verificar quais as transições habilitadas é a seguinte:

Para cada linha  $\mathbf{r}$  da matriz  $\mathbf{A}$ :

$$(M_i^T \otimes v_r^- = v_r^-) \wedge (M_i^T \otimes v_r^+ = \text{vetor } 0) \Leftrightarrow e_r \text{ está habilitada} \quad (\text{A.1}')$$

Onde :

“vetor 0” é um vetor com a mesma dimensão de  $\mathbf{M}$ , preenchido de zeros.

$v_r^-$  é a linha  $r$  de  $A^-$  ( $v_{rj}^- = 1$  se  $b_j$  é pré-condição de  $e_i$ , se não,  $v_{rj}^- = 0$ ).

$v_r^+$  é a linha  $r$  de  $A^+$  ( $v_{rj}^+ = 1$  se  $b_j$  é pós-condição de  $e_i$ , se não,  $v_{rj}^+ = 0$ ).

#### A.1.4 Vetor de Disparo

As transições habilitadas podem ser independentes ou estar em conflito entre si. A transição habilitada independente de todas as outras transições pertence ao vetor de disparo  $\mathbf{F}$ . O conflito entre transições habilitadas deve ser resolvido por alguma lógica ou regras preestabelecidas, definindo as transições disparáveis, que irão compor o vetor  $\mathbf{F}$ .

$F_i = 0$  se a transição  $e_i$  não é disparável

$F_i = 1$  se a transição  $e_i$  é disparável

#### A.1.5 Equação de Estados

O comportamento dinâmico do sistema é representado pela evolução da marcação do grafo, resultante do disparo das transições.

Uma vez definido o vetor de disparo  $\mathbf{F}$ , as transições que compõem este vetor disparam, seguindo as regras abaixo, para cada transição:

- 1) retira-se as marcas de todas as suas pré-condições;
- 2) coloca-se uma marca em todas as suas pós-condições.

A alteração na marcação é a evolução no estado do sistema, e o estado seguinte do sistema  $\mathbf{M}_{l+1}$  é conhecido quando o estado atual  $\mathbf{M}_l$  e a matriz de incidência  $\mathbf{A}$  são dados e o vetor de disparo  $\mathbf{F}$  é definido.

A equação de estados do MFG é então definida da seguinte forma:

$$\mathbf{M}_{l+1} = \mathbf{M}_l + \mathbf{A}^{+T} * \mathbf{F} - \mathbf{A}^{-T} * \mathbf{F} \quad (\text{A.2})$$

Substituindo  $\mathbf{A} = \mathbf{A}^{+T} - \mathbf{A}^{-T}$ , fica:

$$M_{l+1} = M_l + A^T * F \quad (A.2')$$

## A.2 PRODUCTION FLOW SCHEMA (PFS) E SEUS ELEMENTOS

O PFS (MIYAGI, 1996) é utilizado para descrever, graficamente e conceitualmente, os processos relacionados com a produção de itens (peças, produtos, informações, etc.) sob a forma de seqüências de *etapas* de atividades e de distribuição. Como indicado na Figura A.2, o PFS consiste de nós de *elementos-atividade*, nós de elementos distribuidores e arcos de fluxo, que conectam sequencialmente um tipo de nó ao outro.

Os *elementos-atividade*, como ilustrado na Figura A.3, podem ser expandidos em duas transições e um lugar (*lugar-atividade*). Quando é necessário a indicação do início e da conclusão de uma atividade, distinguimos a transição de entrada (como a transição de início) da transição de saída (como a transição final) (Figura A.3c). Além disso, na Fig.A.8,  $m$  e  $n$  são, respectivamente, os números de entradas e saídas simultâneas de um elemento; em redes de Petri tipo lugar/transição - L/T - (REISIG, 1985); (REISIG, 1992) ou em representações híbridas, eles compõem os pesos dos arcos de fluxo. Se não houver necessidade, ou  $m=n=1$ , eles podem ser omitidos.

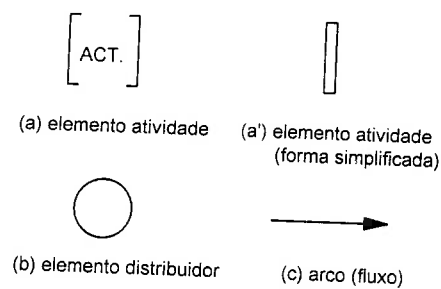


Figura A.2 – Elementos do PFS.

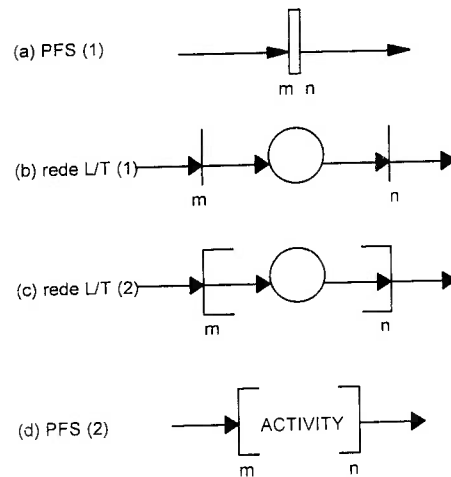


Figura A.3 – Elemento atividade em rede L/T.

Similarmente, um *elemento-distribuidor* pode ser também expandido em um lugar (*lugar-distribuidor*) com transições à entrada e à saída, como ilustrado na Figura A.4. Ainda, no caso de se expandir dois elementos conectados um ao outro em uma rede L/T, a transição de saída da primeira etapa e a de entrada da etapa seguinte formam uma única transição. Assim, a denominação *lugares-etapa* é dada tanto para os *lugares-atividade* como para os *lugares-distribuidores*.

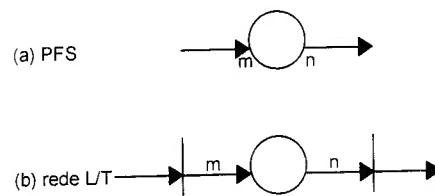


Figura A.4 – Elemento distribuidor em rede L/T.

## ANEXO B - PROBLEMA DE DESIGNAÇÃO

Os problemas de designação foram criados para resolver casos que envolvem a alocação biunívoca de operários a tarefas (envolvendo, mais comumente, a permutação de um conjunto de objetos). Por hipótese, o número de operários deve ser igual ao número de tarefas, caso contrário, devem ser criados elementos fictícios adequadamente para que esta hipótese seja obedecida. O objetivo do problema é designar cada um dos operários para cada uma das tarefas de maneira que sejam concluídas em um tempo total mínimo. (BRONSON, 1985).

Os problemas de designação, assim definidos, podem ser convertidos em problemas de distribuição de carga computacional, considerando-se os operários como os CPs e as tarefas como os blocos funcionais, de maneira que, se no modelo lance de distribuição da carga computacional forem introduzidas as seguintes restrições:

- a) Número de CPs = número de blocos funcionais ( $m = n$ );
- b) Cada bloco funcional só pode ser processado por um único CP ( $a_i = 1$  para todo  $i$ )
- c) Cada CP só pode processar um bloco funcional por vez ( $b_j = 1$  para todo  $j$ )

Observa-se que o modelo de designação tem o seguinte aspecto:

$$\text{Min. } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \quad \text{sujeito a} \quad \begin{cases} \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \\ x_{ij} \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n)(j = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

É claro que apenas um bloco funcional  $i$  é processado por um CP  $j$  a cada ciclo do programa, de modo que as restrições do modelo (B.1.) são equivalentes a:

- $x_{ij} = 1$  se o bloco funcional  $i$  for designado ser processado em um CP  $j$
- $x_{ij} = 0$  caso contrário

O problema consiste em determinar como as designações devem ser realizadas de modo a minimizar o custo total.

O problema de alocação dos blocos funcionais, pelas suas características particulares, admite um algoritmo especial para obtenção de uma solução ótima. O modelo de designação sendo um caso especial do modelo de designação de itens admite também um algoritmo particular para sua otimização.

Como as capacidades de cada origem e as demandas de cada destino são consideradas unitárias, o algoritmo de designação é baseado apenas na seguinte matriz:

$$\begin{array}{c}
 \text{Destinos} \\
 \left[ \begin{array}{cccc}
 c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\
 c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn}
 \end{array} \right] \text{ (B.2)} \\
 \text{Origens}
 \end{array}$$

O processo iterativo que conduz a solução ótima baseia-se no seguinte teorema:

**Teorema B.1.** Ao adicionar-se uma constante a cada elemento de uma linha (coluna) qualquer da matriz de um problema de designação, a solução ótima da matriz alterada será também a solução ótima da matriz original.

Inicialmente é demonstrado que pode subtrair-se (ou somar-se) uma constante  $k$  de todos elementos de uma determinada linha, sem que se altere a solução final do problema. Se  $k_i$  a constante somada a cada elemento da linha  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Tem-se então:

$$Z_k = \sum_{j=1}^n (c_{1j} + k_{1j}) \cdot x_{1j} + \sum_{j=1}^n (c_{2j} + k_{2j}) \cdot x_{2j} + \dots + \sum_{j=1}^n (c_{nj} + k_{nj}) \cdot x_{nj}$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} + k_1 \cdot \sum_{j=1}^n x_{1j} + k_2 \cdot \sum_{j=1}^n x_{2j} + \dots + k_n \cdot \sum_{j=1}^n x_{nj}$$

como  $\sum_{j=1}^n x_{1j} = \sum_{j=1}^n x_{2j} = \dots = \sum_{j=1}^n x_{nj} = 1$  vem  $Z_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{i=1}^n k_i$  e,

finalmente,  $Z_k = Z + \sum_{i=1}^n k_i$  (B.3)

O processo consiste em obter-se uma matriz de eficiência alterada que seja “equivalente” à original, não possuindo nenhum elemento negativo, e apresentando o maior número possível de elementos nulos, de maneira que a solução ótima seja aparente e de valor  $Z_k = 0$ .

Pela relação (B.3.) conclui-se que o valor absoluto de  $Z$  será igual a soma das constantes utilizadas na transformação da matriz eficiência.

#### Algoritmo de designação

De maneira a obter-se a designação de custo mínimo, as seguintes operações devem ser realizadas na matriz de eficiência (B.2.):

1. Subtrair o elemento com menor valor de todos os elementos daquela linha. Fazer o mesmo para as colunas.
2. Examinar as linhas e colunas sucessivamente. Para cada linha (coluna) com exatamente um zero restante, reserve (indicar por O) aquela posição para uma designação, e elimine (indicar por X) os outros zeros da coluna (linha) correspondente. Repetir, se necessário, para as linhas e colunas sem posições reservadas até que todos os zeros sejam reservados ou eliminados. Se as posições reservadas completam as designações, a solução é ótima. Caso contrário, seguir para o passo 3.

3. Traçar um número mínimo de retas para cobrir todos os zeros, da seguinte maneira:
  - a. Marcar todas as linhas que não tenham designações;
  - b. Marcar todas as colunas que tenham zero em linhas marcadas;
  - c. Marcar todas as linhas que tenham designações em colunas marcadas;
  - d. Repetir o passo b e c até não ser mais possível marcar linhas ou colunas;
  - e. Traçar uma reta sobre cada linha não marcada e sobre cada coluna marcada.
  
4. Examinar todos os elementos não cobertos por uma reta. Escolher o elemento de menor valor desses elementos e subtraí-lo de todos os elementos não cobertos por uma reta. Somar esse elemento mínimo a cada elemento situado na interseção de duas retas. Retornar ao passo dois.



## ANEXO C – EXEMPLO DE PROCEDIMENTO PARA A DEFINIÇÃO DAS ÁREAS DE CONTROLE

Para demonstrar a aplicação do algoritmo de definição de áreas de controle, apresenta-se um exemplo de um caso real onde consideram-se as informações necessárias para a utilização deste algoritmo. O objeto em estudo corresponde a um sistema de queima de uma caldeira aquatubular com dois queimadores a gás instalada em uma indústria no interior do estado de São Paulo. Para a coleta de dados foram utilizados os desenhos “as-build”<sup>8</sup> da instalação do sistema, onde as medidas apresentadas estão em milímetros e os ângulos em graus. O layout do sistema pode ser observado na figura C.1 e C.2.

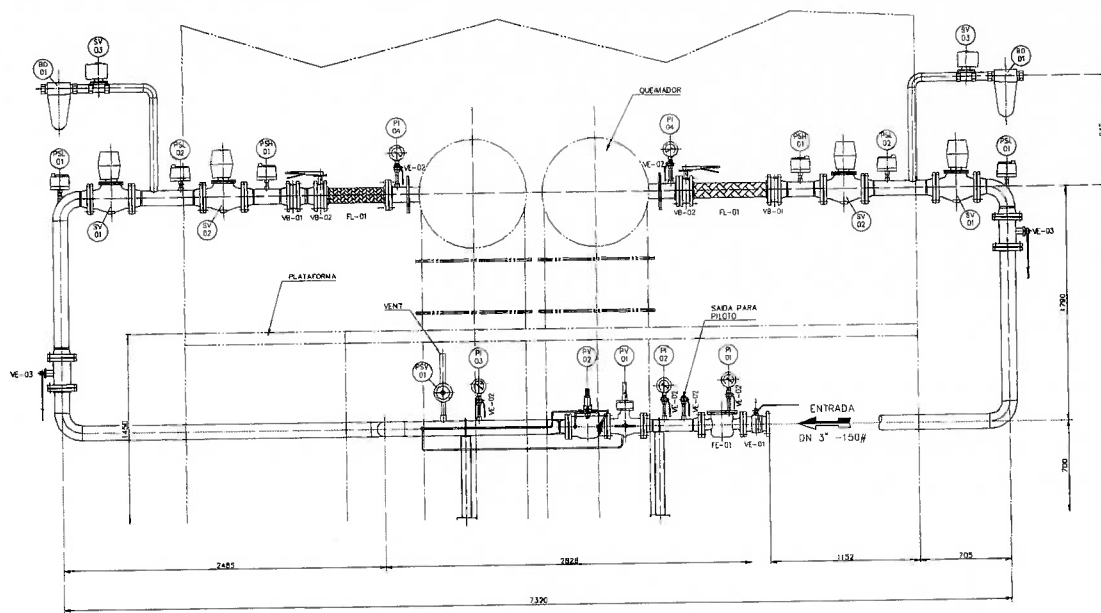


Figura C.1 – Vista frontal do sistema de queima

<sup>8</sup> São documentos onde todas as informações contidas estão atualizadas conforme o projeto implementado.

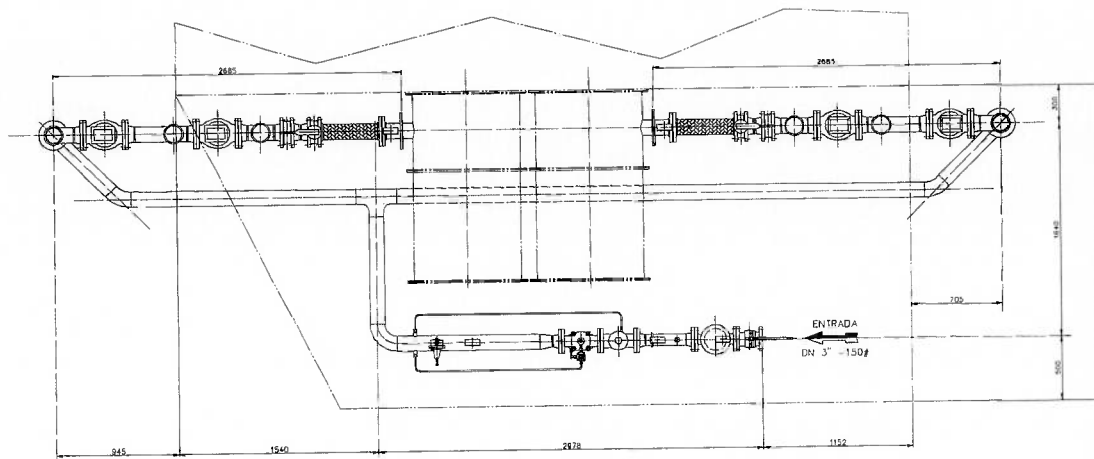


Figura C.2 – Vista superior do sistema de queima

A primeira etapa para a definição das áreas de controle consiste no levantamento da posição física dos componentes do sistema da instalação que trocam informações com o sistema de controle. Os dados levantados correspondentes à localização de cada instrumento do sistema podem ser observados na tabela C.1.

Queimador 1		Queimador 2	
Instrumento	Coordenada	Instrumento	Coordenada
PLS1	( 0 ; 2582 )	PLS1	( 7307 ; 2582 )
PLS2	( 934 ; 2747 )	PLS2	( 6373 ; 2747 )
PLH1	( 1593 ; 2747 )	PLH1	( 5714 ; 2747 )
SV1	( 385 ; 2857 )	SV1	( 6922 ; 2857 )
SV2	( 1264 ; 2857 )	SV2	( 6043 ; 2857 )
SV3	( 330 ; 3516 )	SV3	( 6977 ; 3516 )

Tabela C.1 – Coordenadas de localização dos instrumentos dos queimadores de gás 1 e

2

O custo de todos os cabos e materiais utilizados pelos instrumentos do sistema para transmitir seus respectivos sinais ao sistema de controle, também será especificado para possibilitar a aplicação do algoritmo proposto. Neste caso como todos os sinais são do tipo digital com alimentação de 120Vac, o cabo selecionado é do tipo par trançado sem blindagem com um custo de R\$10,00 por metro. Os cabos são passados por eletrodutos de aço inox com um custo de R\$20,00 por metro, onde estes eletrodutos são conectados diretamente ao painel do CP. Portanto, o custo total do material gasto para a passagem dos cabos de sinal fica em R\$30,00 por metro.

## C.1 MODELAGEM DA POSIÇÃO FÍSICA DOS INSTRUMENTOS NO CHÃO DE FÁBRICA

Com os dados do projeto coletados, é possível aplicar os critérios de definição das áreas de controle descritos no capítulo 4. Neste sentido, deve-se gerar uma lista com todos sinais gerados pelos os instrumentos do sistema especificando a posição física de cada um deles. Para aplicação do algoritmo, deve utilizar-se como referencial um sistema de coordenadas ortogonais  $(O, \vec{e}_1, \vec{e}_2)$ . Para obter as coordenadas de origem dos sinais com o formato desejado, deve-se utilizar o procedimento de conversão de coordenadas apresentado no capítulo 4. A Tabela C.2 apresenta a lista global dos sinais do sistema.

Queimador 1				Queimador 2			
Instrumento	Sinal	Posição	Tipo	Instrumento	Sinal	Posição	Tipo
PLS1	PSL1	(90;0;2582)	ED	PLS1	PSL1	(21;7307;2582)	ED
PLS2	PLS2	(71;934;2747)	ED	PLS2	PLS2	(23;6373;2747)	ED
PLH1	PLH1	(60;1593;2747)	ED	PLH1	PLH1	(26;5714;2747)	ED
SV1	SVO1	(82;385;2857)	SD	SV1	SVO1	(22;6922;2857)	SD
	ZSL1	(82;385;2857)	ED		ZSL1	(22;6922;2857)	ED
	ZSH1	(82;385;2857)	ED		ZSH1	(22;6922;2857)	ED
SV2	SVO2	(66;1264;2857)	SD	SV2	SVO2	(25;6043;2857)	SD
	ZSL2	(66;1264;2857)	ED		ZSL2	(25;6043;2857)	ED
	ZSH2	(66;1264;2857)	ED		ZSH2	(25;6043;2857)	ED
SV3	SVO3	(85;330;3516)	SD	SV3	SVO3	(27;6977;3516)	SD
	SZL3	(85;330;3516)	ED		SZL3	(27;6977;3516)	ED
	ZSH3	(85;330;3516)	ED		ZSH3	(27;6977;3516)	ED

Tabela C.2 – Posição física e sinais gerados pelos instrumentos do sistema de queima.

A partir destes dados, defini-se o CVCG (Centro Virtual de Custo Global) do sistema, o CVCR (Centro Virtual de Custo regional) e o  $ITT_{MR}$  (Índice de Custo Médio por Região) utilizando o algoritmo de definição das áreas de controle para mapear adequadamente o local de alocação dos controladores, visando minimizar o custo do projeto e atender as características dos controladores adotados para efetuar o controle do SP.

Para solucionar o problema de automação dos queimadores deste sistema adotou-se o CP Micrologix 1500. Suas características podem ser observadas na tabela C.3.

MicroLogix 1500 – 1764-24AWA		
Número Máximo de E/S	12 Entradas Digitais	120Vca
	12 Saídas Digitais	Relé/120Vca/1.5 <sup>A</sup>
Número Máximo de Controladores em rede	32	
Custo do Painel de Aço Inox com visor de acrílico	R\$5.000,00	

Tabela C.3 – Características do CP utilizada para o cálculo da divisão das áreas de controle

Desta forma, aplicando-se o algoritmo de divisão das áreas de controle com as características do sistema de queima obtida através dos cálculos realizados até este ponto, obtém-se como resultado uma arquitetura de dois CPs para a solução do problema de automação do sistema. A tabela C.4 apresenta onde os sinais de E/S do sistema de controle foram alocados seguindo os procedimentos propostos no algoritmo.

CP 1		CP 2	
ED	SD	ED	SD
PSL1	SVO1	PSL1	SVO1
PLS2	SVO2	PLS2	SVO2
PLH1	SVO3	PLH1	SVO3
ZSL1		ZSL1	
ZSH1		ZSH1	
ZSL2		ZSL2	
ZSH2		ZSH2	
SZL3		SZL3	
ZSH3		ZSH3	
Total = 9	Total = 3	Total = 9	Total = 3
Reserva = 3	Reserva = 9	Reserva = 3	Reserva = 9

Tabela C.4 – Lista de E/S dos CPs do sistema de queima obtida.

Neste exemplo, a divisão das áreas de controle entre os dois controladores foi obtida devido a limitação da capacidade de alocação das E/S do controlador Micrologix. Como pode ser observado na tabela C.4, a solução com um único controlador não seria

possível. Caso o projetista desejasse concentrar os sinais de E/S em um único CP, ou desejasse distribuir mais estes sinais em mais CPs, isto seria feito alterando-se o tipo de CP, fazendo o uso de um CP com maior ou menor capacidade de alocação de sinais para concentrar os sinais ou utilizando um CP com uma capacidade menor de alocação de sinal, tal como, outro tipo de micro-controlador, um módulo de E/S Fieldbus, etc.

Contudo, considerando a arquitetura resultante, o CP 1 foi alocado na coordenada (705;3039) e o CP 2 foi alocado na coordenada (6602;3039). Estas coordenadas foram obtidas seguindo o critério de minimização de custo de projeto adotado, obtendo-se assim, um custo total estimado, considerando todo o material necessário para a passagem dos cabos de sinal para os CPs de R\$ 548,88. O layout final do sistema é apresentado na figura C.3, onde pode ser observado o encaminhamento dos eletrodutos utilizados para a passagem dos sinais e a posição onde foram alocados os CPs no sistema de queima. Com este resultado, pode-se observar que o custo de cabeamento obtido, é inferior ao custo de aquisição de mais um CP, não sendo necessário a inclusão de mais um CP para no sistema.

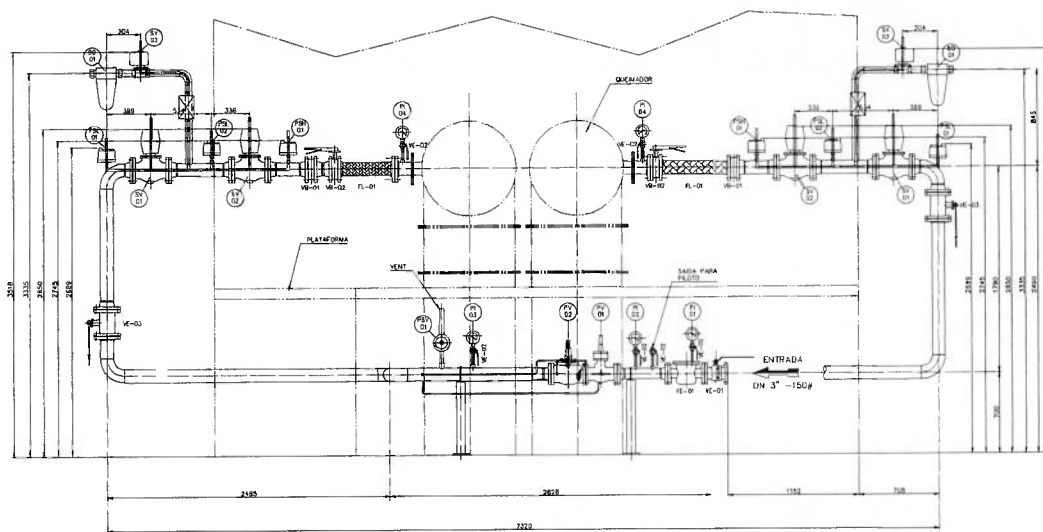


Figura C.3 – Layout final do sistema de queima.

Portanto, em relação ao custo do projeto, observa-se a otimização obtida pelo algoritmo de distribuição que forneceu como resultado o menor número de CP possíveis para o tipo de CP adotado e minimizou o custo de cabeamento consumido para alocar os

sinais de E/S nos respectivos CPs, alocando estes no ponto de mínima distância entre os instrumentos do sistema conforme sugerido pelo algoritmo de divisão das áreas de controle apresentado no capítulo 4.

## **ANEXO D – APLICAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS PARA O PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE MODULARES E DISTRIBUÍDOS**

Com intuito de apresentar os resultados obtidos com a aplicação dos procedimentos para a implementação de projetos de sistemas de controles modulares e distribuídos expostos no capítulo 5, é apresentada neste anexo a implementação dos procedimentos para a obtenção do sistema de controle de uma caldeira.

Este sistema é parte do projeto de modernização e expansão da capacidade de geração de vapor e energia elétrica do sistema de utilidades de uma fábrica processadora de milho, instalada no interior do Paraná, onde este projeto consiste na instalação de uma usina termoeletrica e na modernização das caldeiras existentes.

Portanto, seguindo os procedimentos sugeridos pela metodologia de implementação de projetos de automação apresentados neste trabalho, a primeira etapa é constituída da análise das necessidades do sistema, onde é executado um estudo do comportamento dinâmico do objeto de controle. Esta análise é resultante de uma proposta inicial de divisão do sistema de controle em três modos fundamentais:

- Modo de controle local, no qual é permitido executar o controle da caldeira a partir de um painel local de controle, onde o operador tem uma atuação direta nos equipamentos do processo;
- Modo de controle automático, no qual o controle da caldeira é executado de forma autônoma, a partir de uma série de comandos e intertravamentos, previamente especificados de maneira adequada à dinâmica que se deseja para o sistema;
- Modo de controle via supervisorio, no qual o controle da caldeira é executado através do sistema supervisorio instalado na sala de operação permitindo que o

operador atue sobre o equipamento de maneira remota e interaja no sistema de forma integrada visualizando as condições do sistema e dos outros equipamentos que fazem parte do sistema de utilidade da usina.

Com o levantamento do comportamento dinâmico do sistema realizado, a próxima etapa consiste em executar uma análise estruturada das necessidades, onde são avaliadas as diversas possibilidades para a implementação do controle da caldeira, tanto em nível lógico quanto físico, onde se constitui a definição das necessidades do sistema, realizando uma descrição das funções de controle utilizando a metodologia estruturada PFS/MFG sugerida no capítulo 3.

Desta forma podem ser obtidos os módulos de controle das funções que compõem o sistema de controle da caldeira. Segundo as informações obtidas na etapa anterior, nos modelos são considerados a operação de modo manual ou automática e os fluxos destas funções de controle, para que se permita a modelagem efetiva considerando a dinâmica das funções de controle realizadas entre o sistema de controle e o objeto de controle.

## **D.1 MODELO DA CALDEIRA**

A figura D.1 apresenta uma tela de operação do sistema que pode ser considerada como um diagrama esquemático do mesmo, onde pode ser observado um exemplo do modelo dos atuadores e detectores que fazem parte do sistema de controle da caldeira em estudo. Sendo assim, são descritos os vários dispositivos de atuação e detecção presentes nesta estrutura, que devem ser adequadamente acionados e monitorados, para que a caldeira apresente um comportamento dinâmico compatível com a tarefa de partida e geração de vapor esperada pelo cliente.



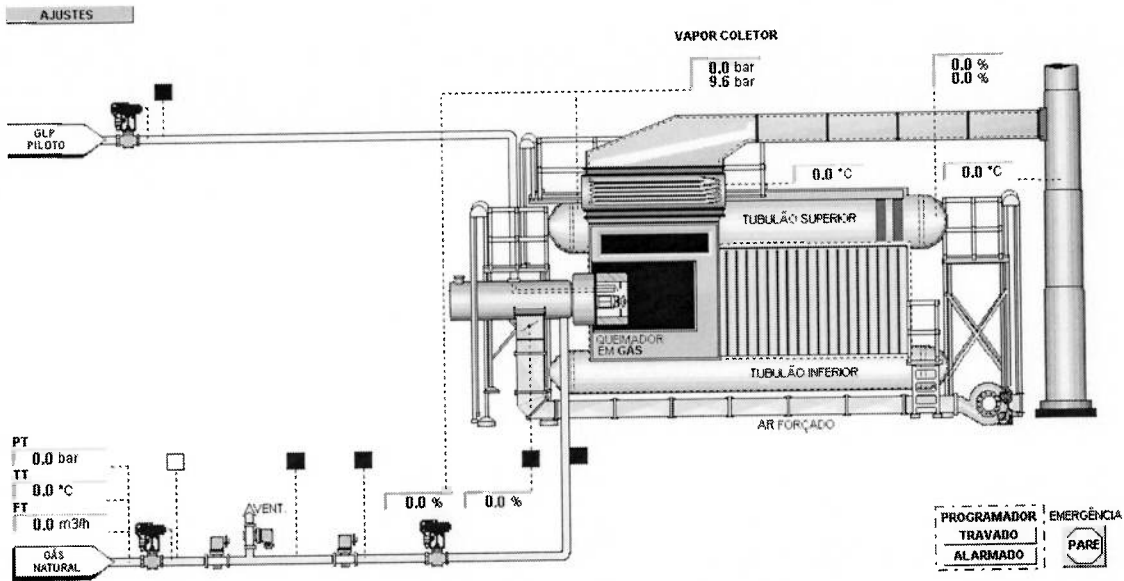


Figura D.1 – Diagrama esquemático da caldeira.

Para a definição dos sensores e atuadores que fazem parte do sistema de controle, é elaborada uma lista de instrumentos, onde podem ser observados todos os equipamentos que fazem parte do sistema de controle. Na tabela D.1 é apresentada a lista de instrumentos do sistema de controle em estudo.

Nome	Descrição
TR01	Transformador de ignição
BE01	Sensor de chama principal
SM01	Válvula de modulação do gás natural
SM02	Válvula de modulação de ar
ZSL03	Damper Fechado
ZSH03	Damper Aberto
PSL01	Pressão do Teste de Estanqueidade
PSL02	Pressão mínima de gás natural
PSL03	Pressão de ar forçado
PSL04	Pressão mínima de gás piloto
PSL05	Pressão baixa na fornalha
PSH01	Pressão máxima de gás natural
PSHH01	Pressão Muito Alta de Vapor
LSL01	Nível baixo de água no tubulão
LSLL02	Nível Muito Baixo de água no tubulão
FSH02	Fluxo de ar de purga
SV01	Válvula de bloqueio 1 de gás natural
SV02	Válvula de bloqueio 2 de gás natural
SV03	Válvula de Vent. do cavalete de gás
SV05	Válvula de bloqueio do gás piloto
M001	Ventilador de ar forçado

Tabela D.1. – Lista de instrumentos.

## D.2 DIAGRAMA DE SISTEMATIZAÇÃO DAS FUNÇÕES DE CONTROLE

Dando sequência as etapas da metodologia, propõem-se uma estruturação das funções de controle em três níveis hierárquicos condizentes com o nível de complexidade do comportamento dinâmico do processo. Inicialmente, define-se o modo de operação da caldeira e as funções de controle pertinentes a esta funcionalidade. A interpretação deste diagrama é simples e realizada utilizando-se a técnica apresentada no capítulo 5. Sendo assim têm-se:

- Uma correlação entre um determinado nível e seu nível imediatamente inferior, deve ser interpretada como uma resposta a “como deve ser realizada uma função?”;
- Uma correlação entre um determinado nível e seu nível imediatamente superior, deve ser interpretada como uma resposta a “porque realizar uma determinada função?”.

Neste contexto, defini-se os três níveis descritos pelo diagrama ilustrado na figura D.2.



Uma vez definidas as funções de controle, a próxima etapa é a descrição do fluxo destas funções.

### D.3 MODELAGEM DO FLUXO DAS FUNÇÕES DE CONTROLE

O fluxo das funções de controle é representado utilizando-se a metodologia PFS/MFG estruturada apresentada no capítulo 3, permitindo o desenvolvimento do sistema tanto na parte operativa quanto na parte de controle, possibilitando assim, a descrição do sistema a partir de modelos realistas em que a evolução do comportamento dinâmico do mesmo é administrada a partir da ocorrência de eventos pertinentes ao processo, de acordo com os acontecimentos que ocorrem no sistema físico propriamente dito.

A figura D.3 ilustra o modelo conceitual PFS do sistema de acordo com o procedimento apresentado no capítulo 3. Neste exemplo podem ser observadas as vantagens inerentes a utilização do diagrama PFS em relação ao entendimento da funcionalidade do sistema, onde a sua interpretação é facilitada devido à utilização da linguagem natural para a descrição dos passos do processo. O formalismo inerente ao PFS exige por parte do projetista uma reflexão objetiva sobre “o que” e “como” se deseja representar a funcionalidade de cada parte do sistema e as implicações de cada decisão tomada em relação ao comportamento do sistema global, facilitando assim a aplicação da técnica de refinamento e a obtenção do algoritmo de controle do sistema. Portanto, o modelo criado em PFS permite uma primeira visualização de as diversas atividades relativas ao processo de controle estão sincronizadas.

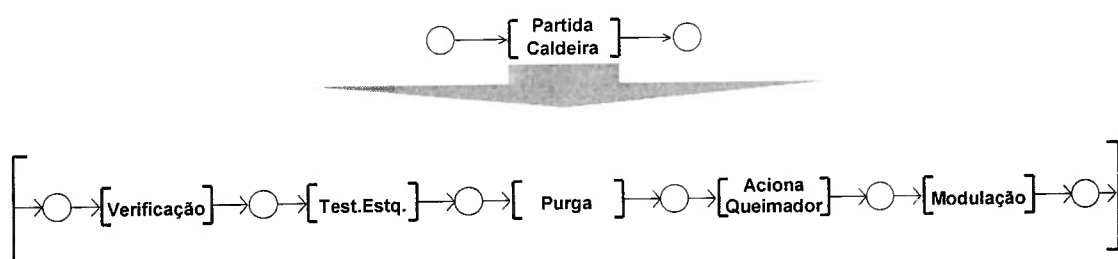


Figura D.3 – Modelo PFS do sistema

Por exemplo, a partir do momento em que a atividade “Teste de estanqueidade” encerra-se, inicia-se a atividade “Purga na Caldeira”, o que corresponde à retirada de qualquer resíduo de gás que possa estar no interior da fornalha. Esta sequência pode ser observada no modelo PFS apresentado na figura D.3.

Desta forma, a partir do término do modelo conceitual em PFS, é possível aplicar a técnica de refinamento sucessivo gerando um refinamento da funcionalidade de cada uma das atividades do modelo de representação conforme sugere a metodologia PFS/MFG.

Assim os principais resultados do refinamento são apresentados através de modelos PFS/MFG desenvolvidos para representarem o comportamento dinâmico do sistema em estudo. Estes grafos são ilustrados a partir da figura D.4 até D.8.

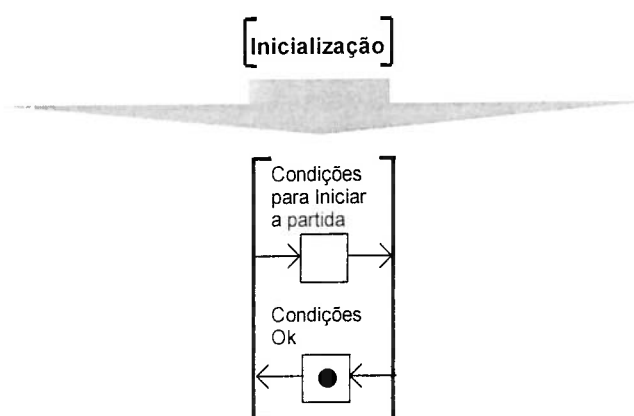


Figura D.4 – Modelo PFS/MFG da etapa de Inicialização

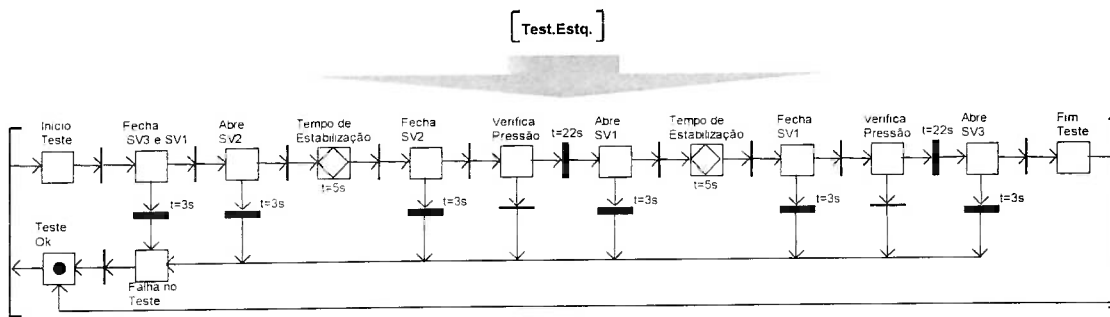


Figura D.5 – Modelo PFS/MFG da etapa do Teste de Estanqueidade do Cavalete de Gás

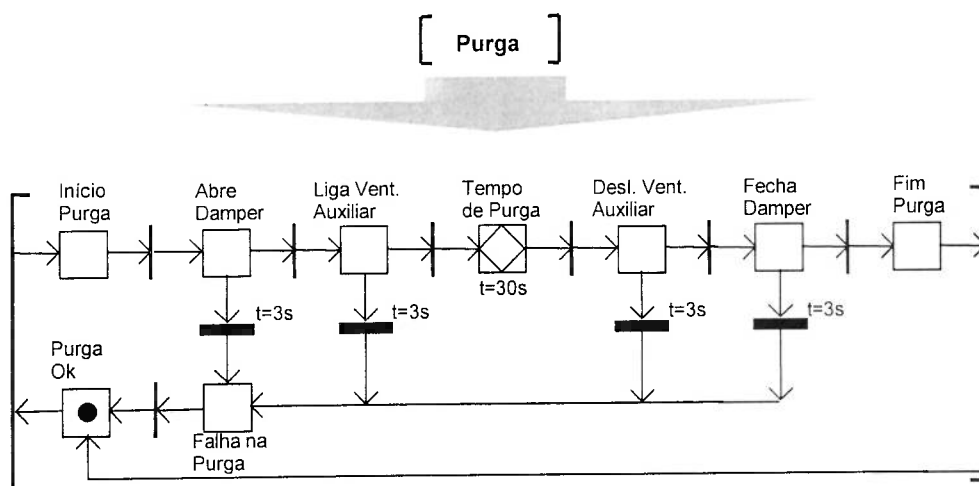


Figura D.6 – Modelo PFS/MFG da etapa de Purga de gases da Fornalha

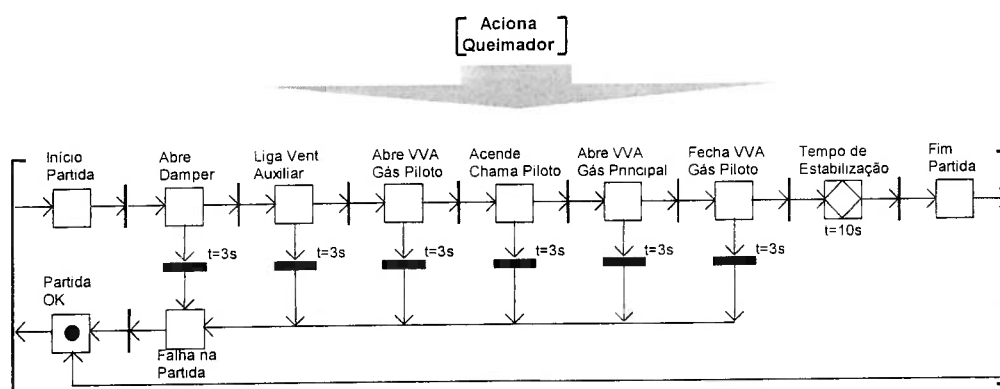


Figura D.7 – Modelo PFS/MFG da etapa de acendimento do Queimador

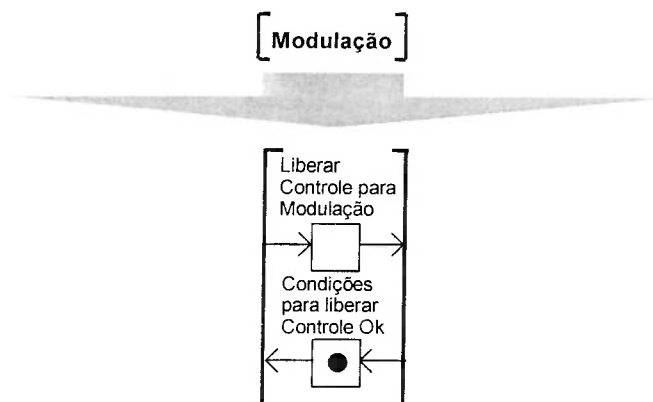


Figura D.8 – Modelo PFS/MFG da etapa de Liberação do controle de Queima da Caldeira para Modulação

Uma vez que se obtenha os modelos MFG do sistema de forma estruturada, a próxima etapa é a definição dos parâmetros para o projeto do software de controle.

#### D.4 PROJETO DO SOFTWARE DE CONTROLE

Esta etapa consiste em implementar no dispositivo de realização do controle (CP) a lógica das funções de controle obtidas na etapa anterior. Para implementar estes programas de forma estruturada, a primeira etapa consiste em padronizar os módulos gerados seguindo o procedimento apresentado no capítulo 3, onde são interligados através dos arcos de sinal de saída e arcos habilitadores os sinais dos sensores e atuadores do processo e é padronizada a interface de cada módulo de controle segundo a norma IEC 61499, para que o software de controle possa usufruir das vantagens inerentes a esta norma. Uma vez padronizados os módulos de controle segundo os procedimentos para a elaboração dos blocos funcionais sugeridos no capítulo 3, os sinais de entrada e saída utilizados para processar o algoritmo de cada bloco funcional e os sinais de início e término de processamento ficam bem definidos, atendendo aos padrões de interface definidos pela norma e considerando os conceitos de estruturação da lógica de controle sugeridos neste trabalho. Desta forma, os resultados da aplicação das regras de padronização dos módulos, são apresentados através de modelos MFG estruturados e padronizados como pode ser observado nos blocos funcionais apresentados a partir da figura D.9 até D.12.



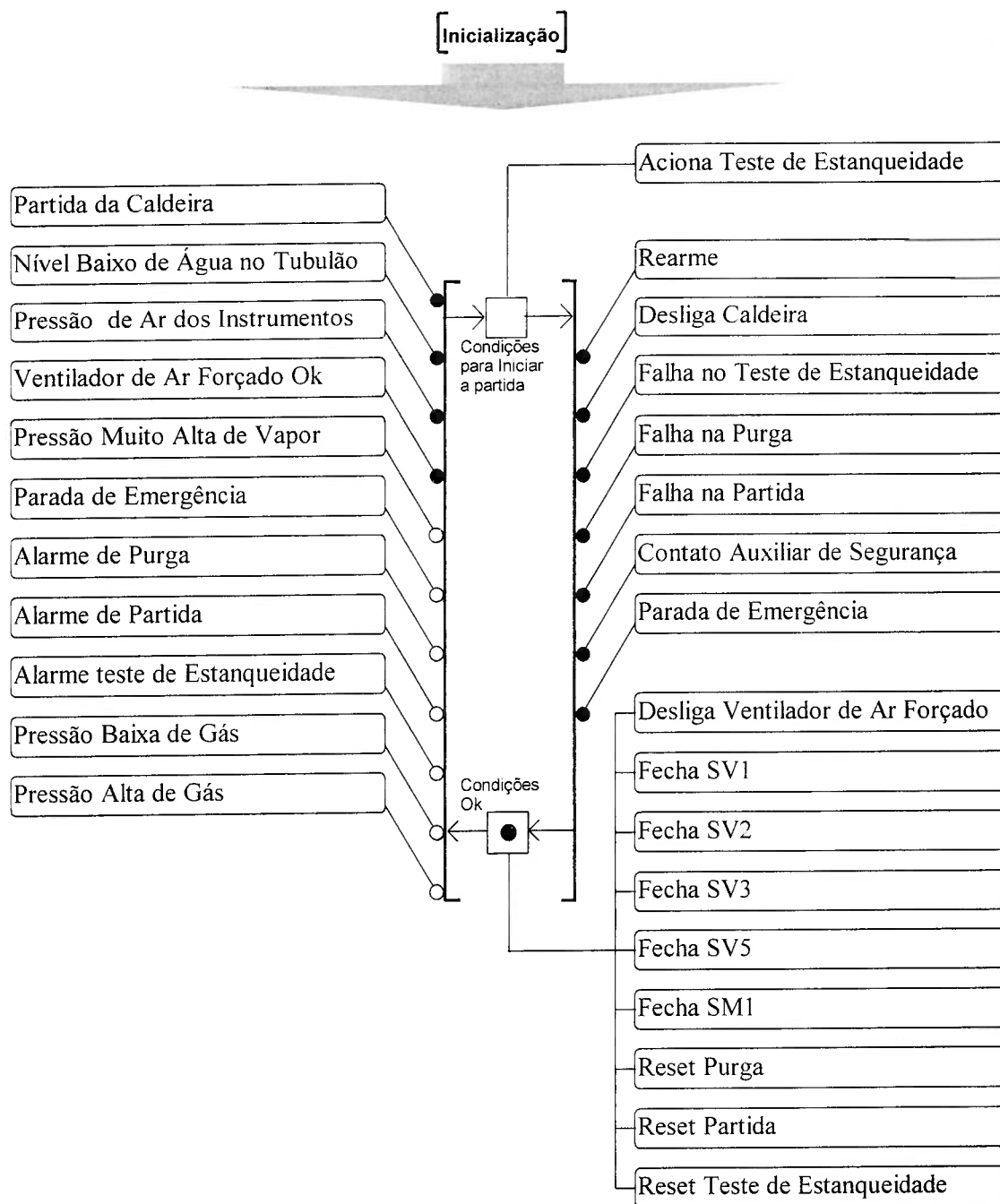


Figura D.9 – Bloco Funcional da etapa de Inicialização.

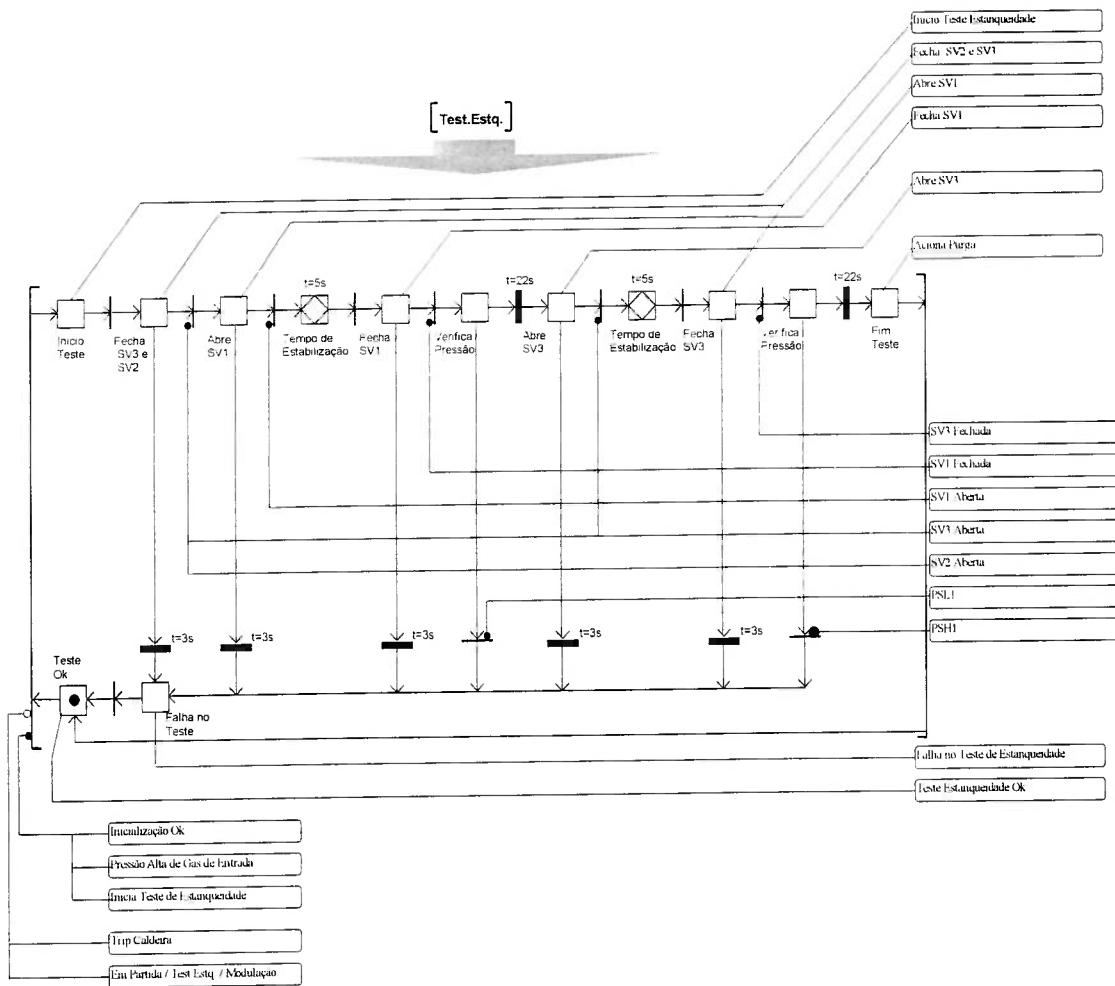


Figura D.10 – Bloco Funcional da etapa do Teste de Estanqueidade.

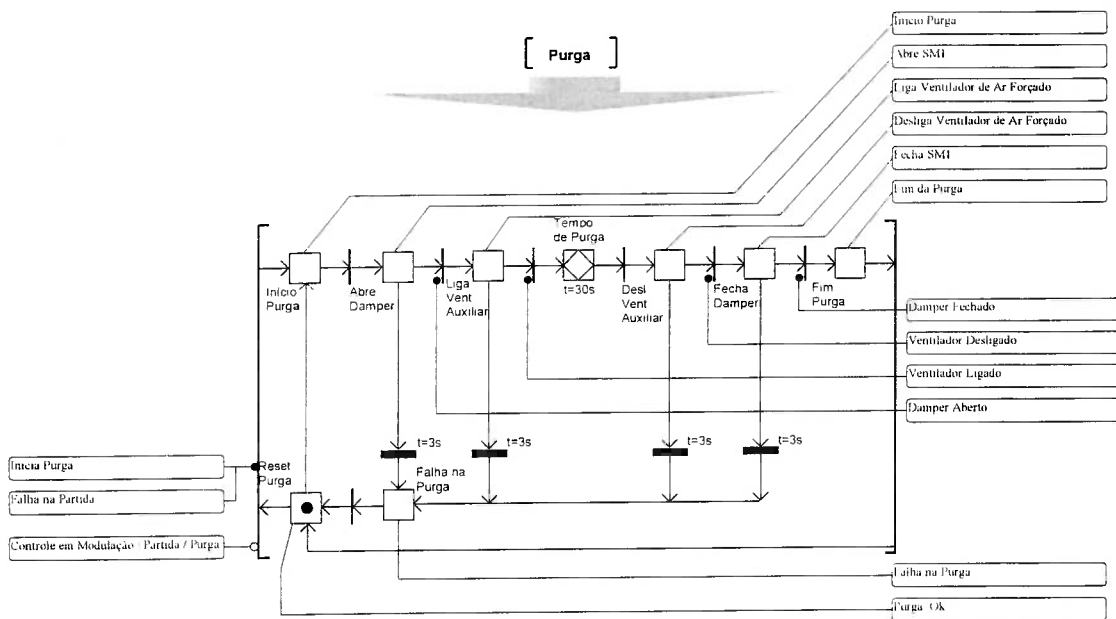


Figura D.11 – Bloco Funcional da etapa de Purga

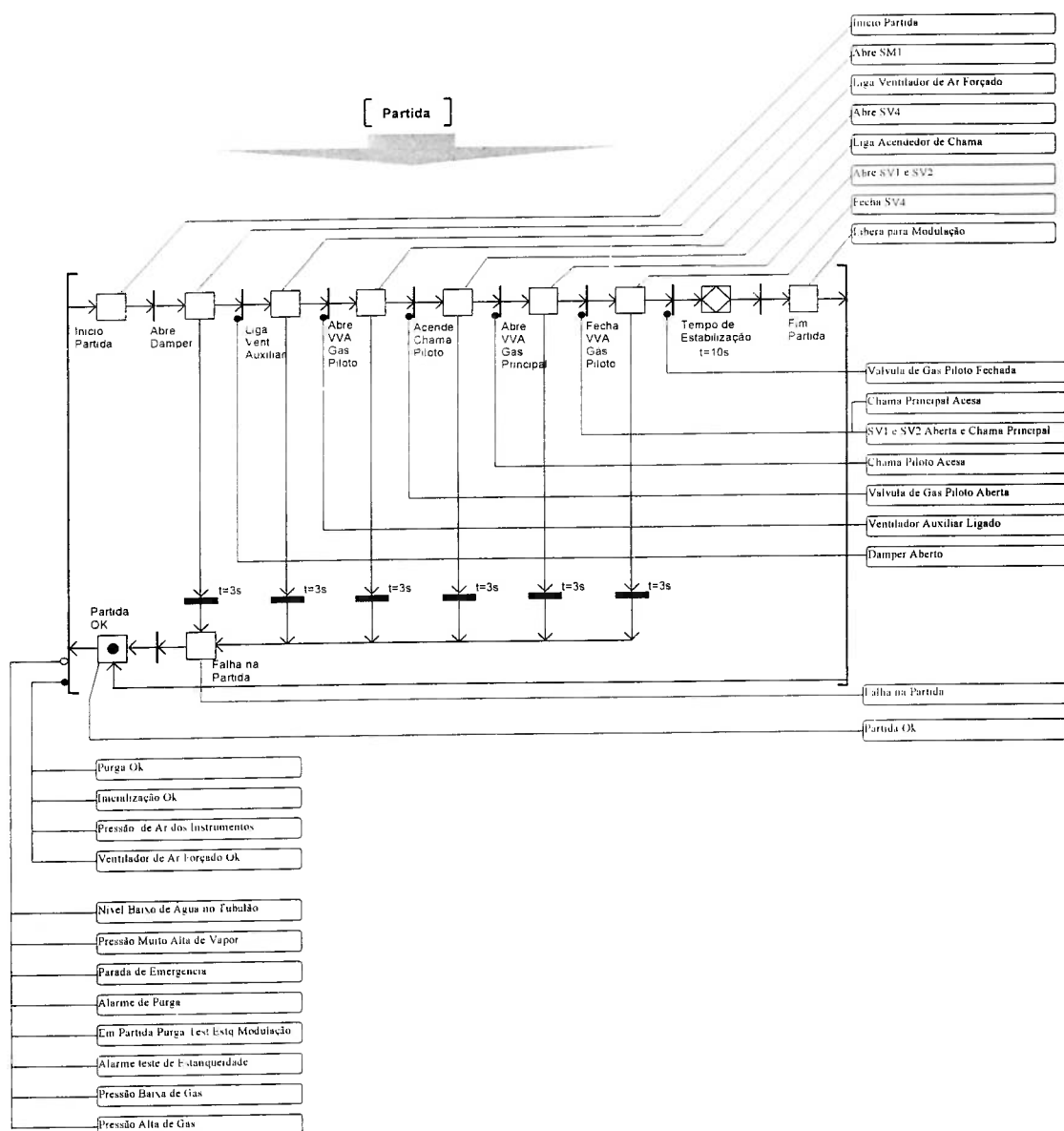
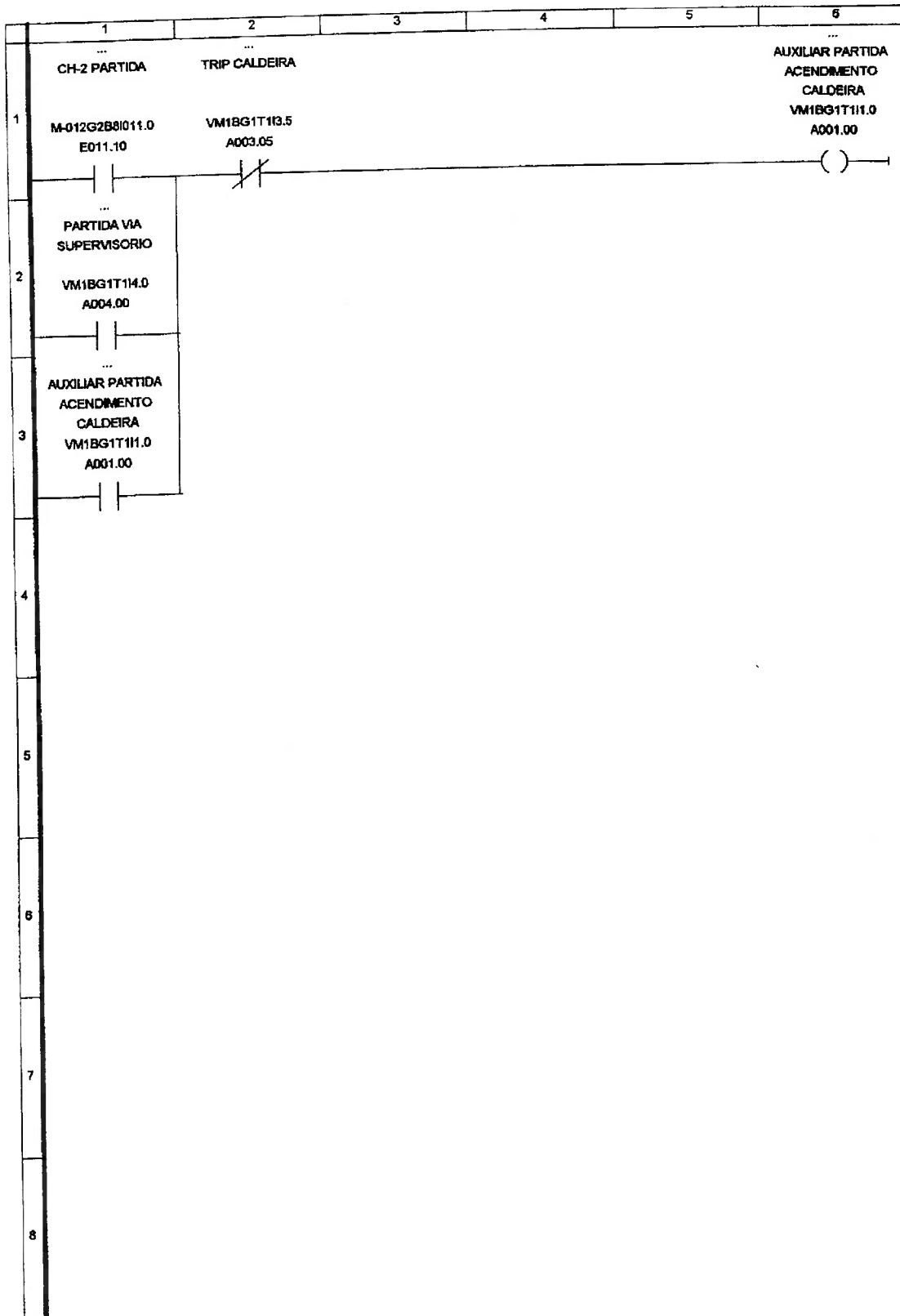
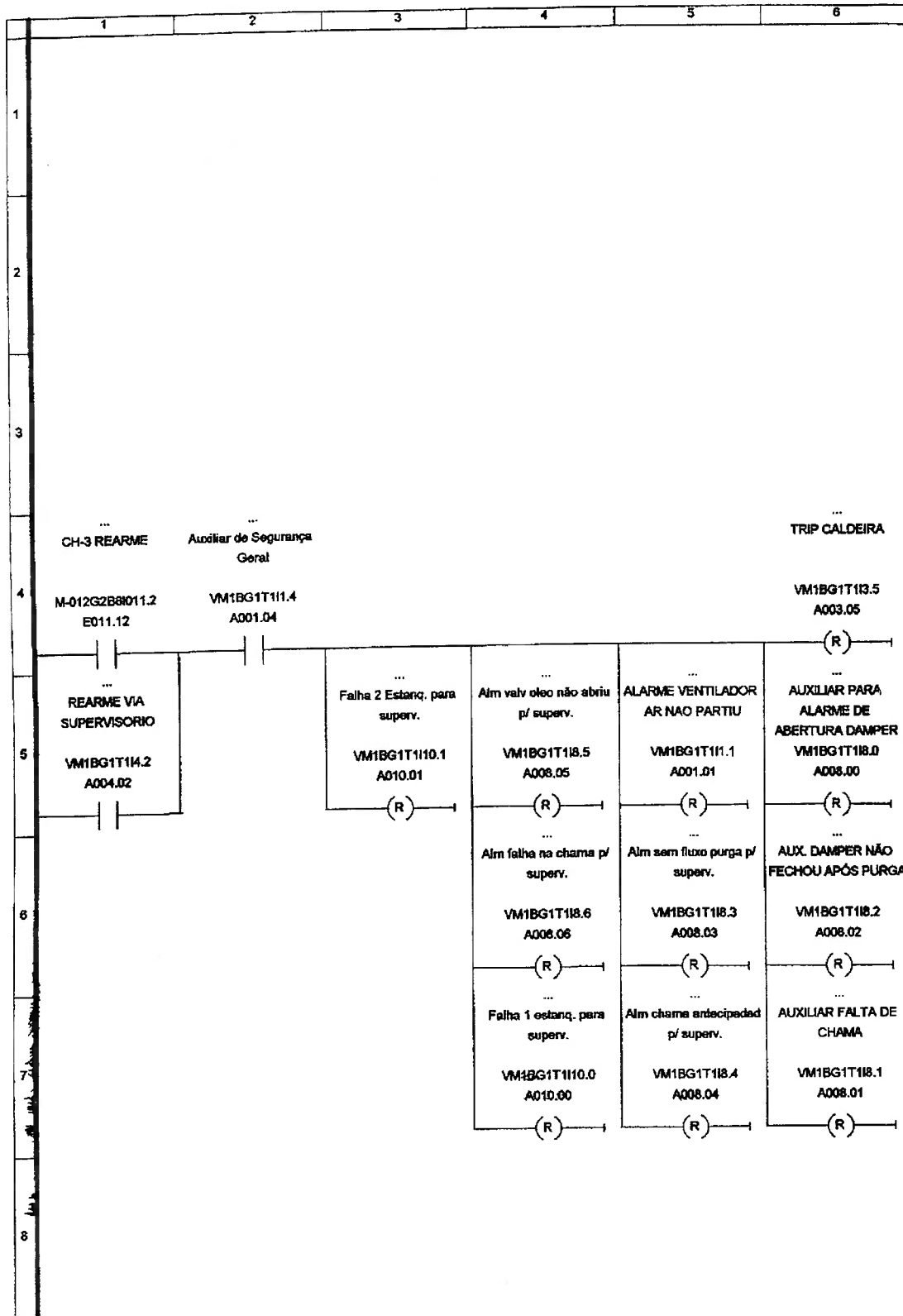
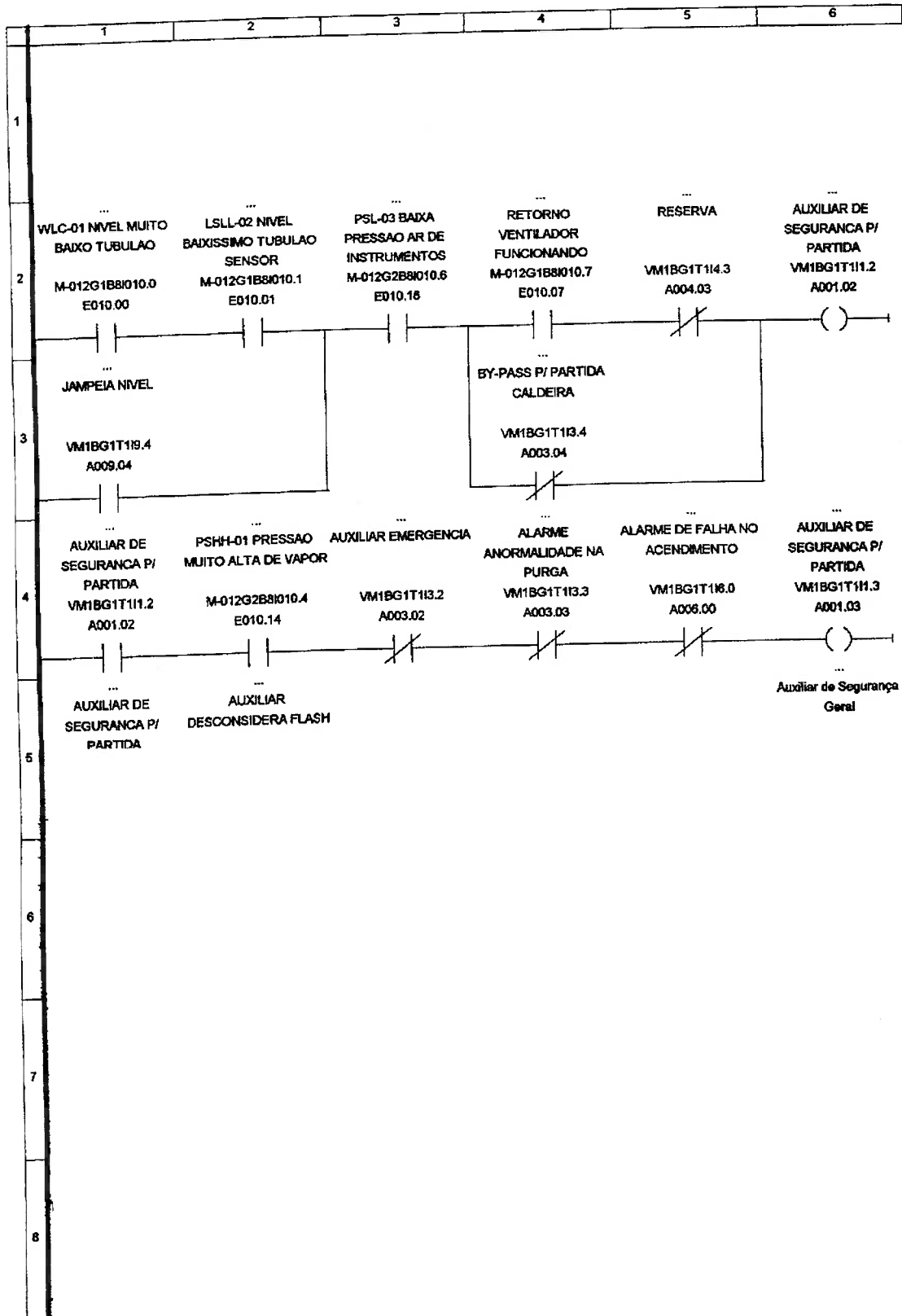


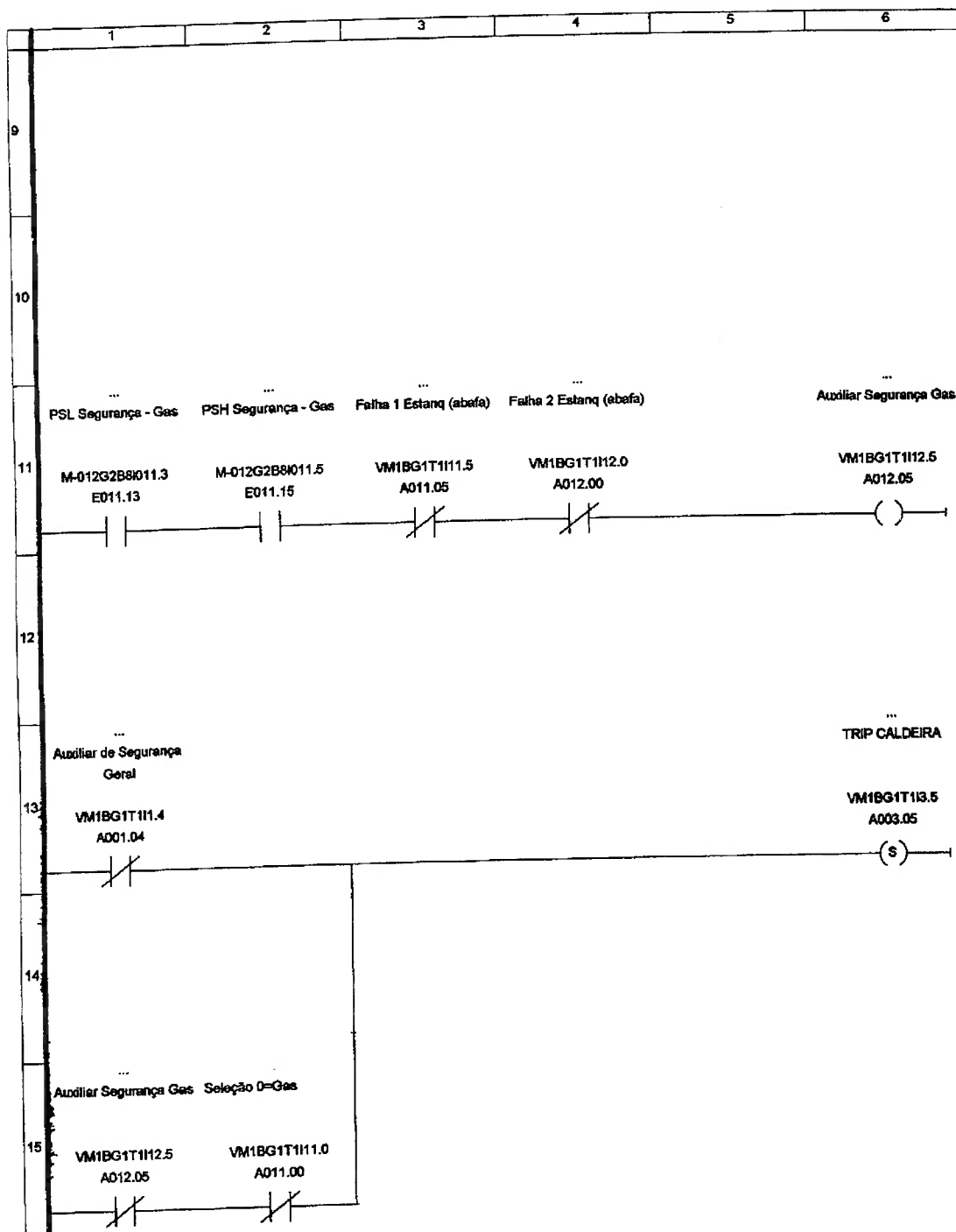
Figura D.12 – Bloco Funcional de acendimento do Queimador

Uma vez executada a padronização do software de controle, a próxima etapa consiste em executar a tradução destes módulos para permitir a implementação deste nos CP que realizam o controle do SP. Para executar esta tradução, utiliza-se a metodologia proposta por Santos Filho (1998), obtendo como resultado um diagrama Ladder que pode ser implementado em qualquer CP que possua a linguagem de programação Ladder padronizada pela IEC61131-3. O diagrama Ladder é resultante da tradução do modelo MFG e pode ser observado a seguir:

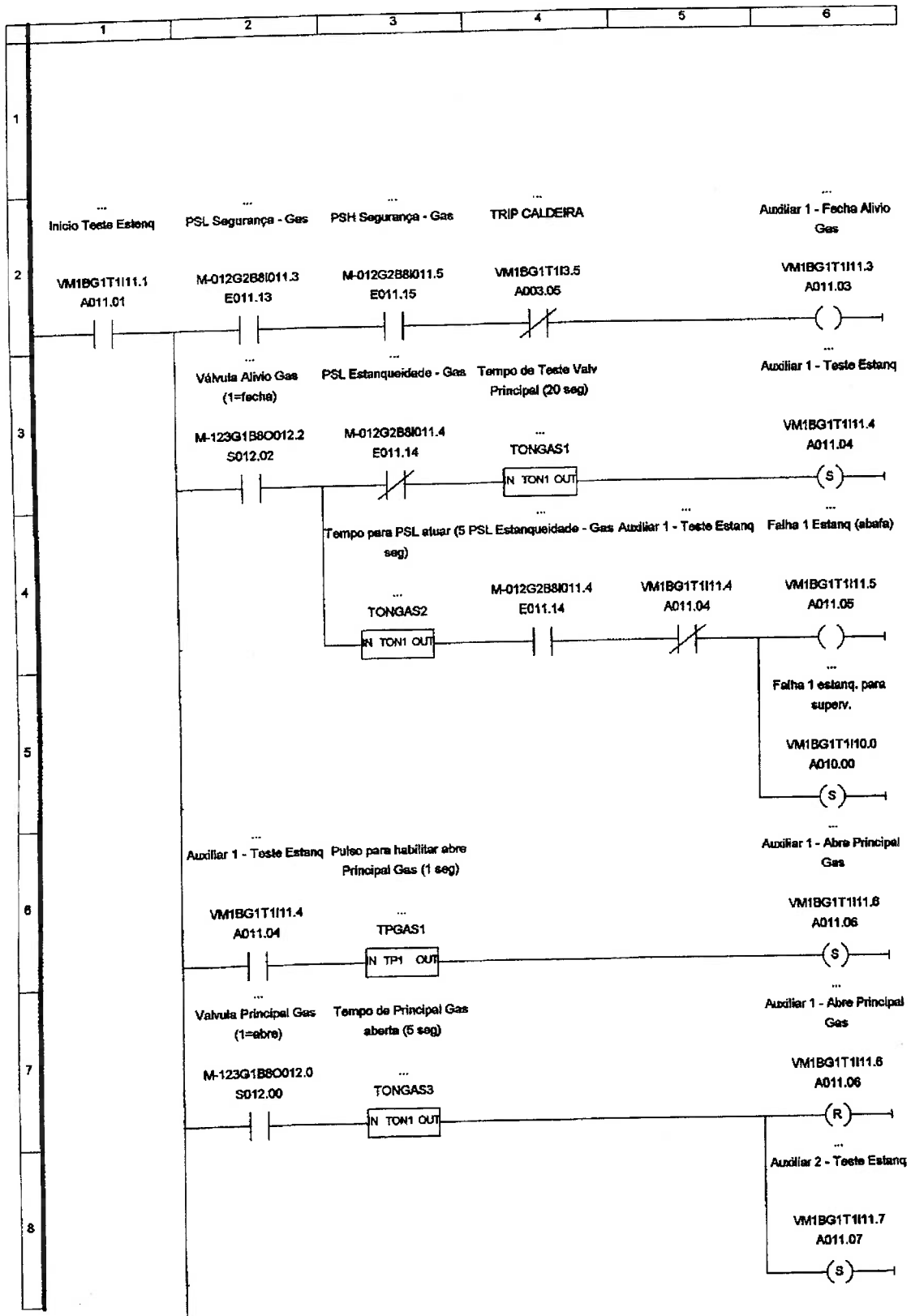


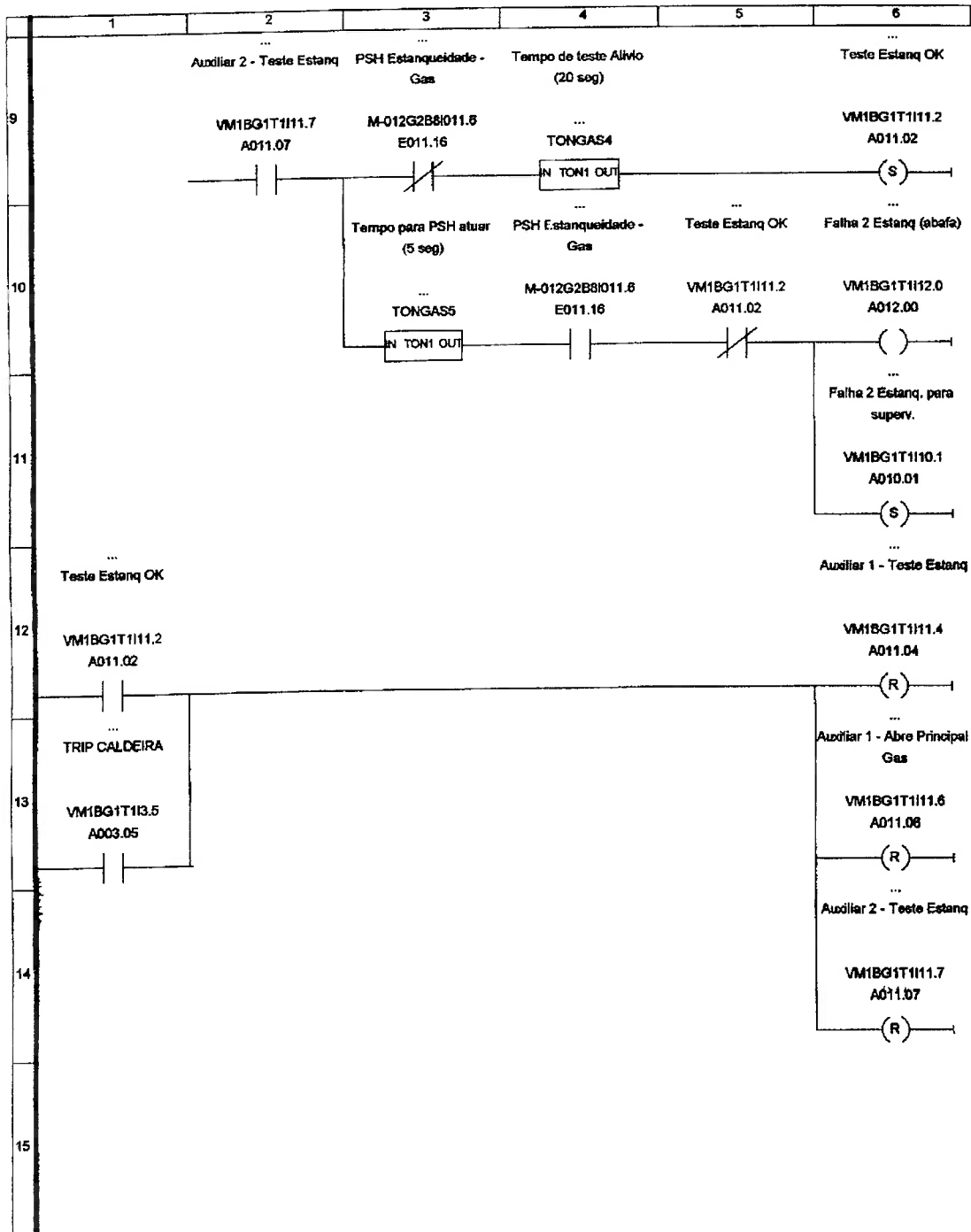


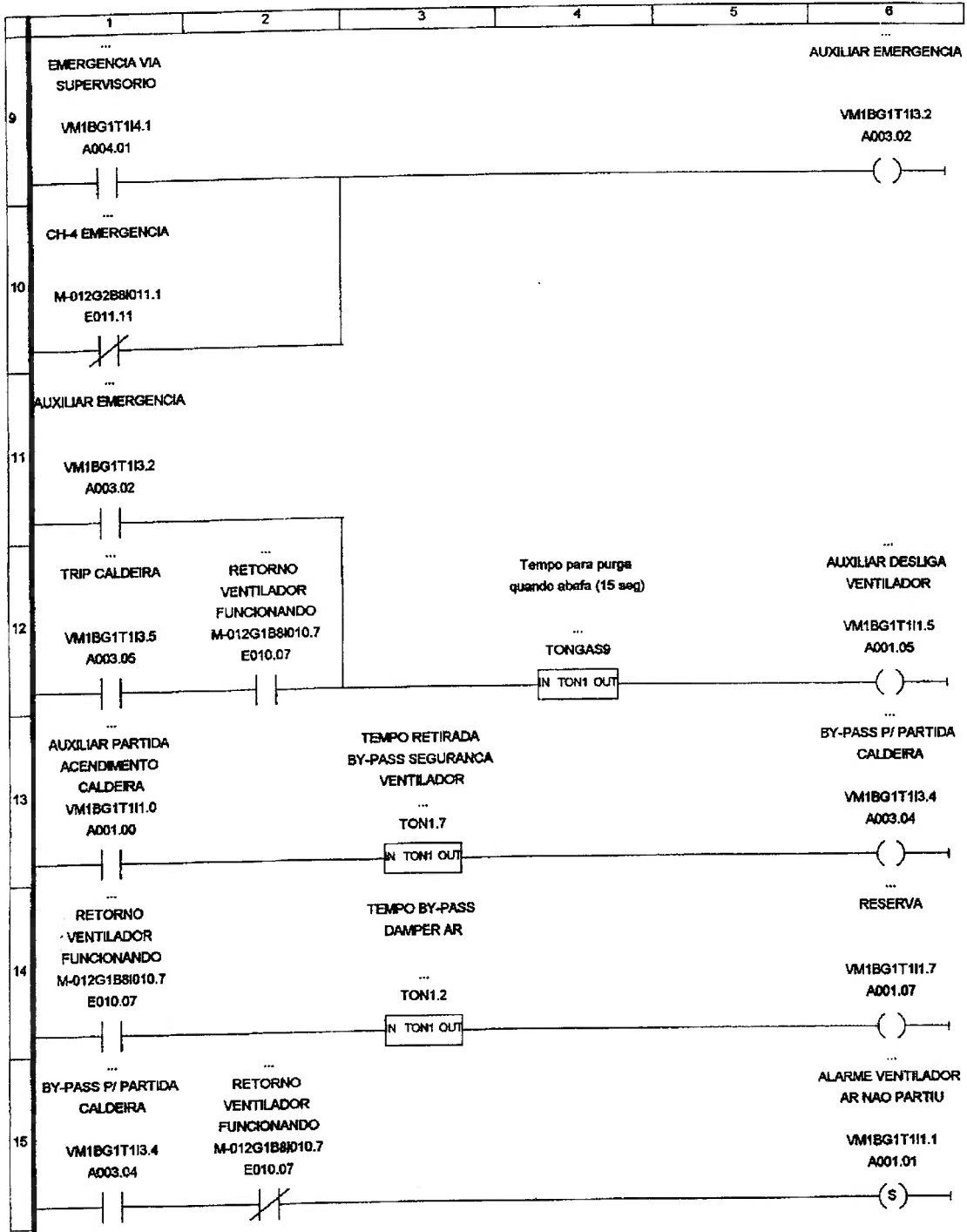


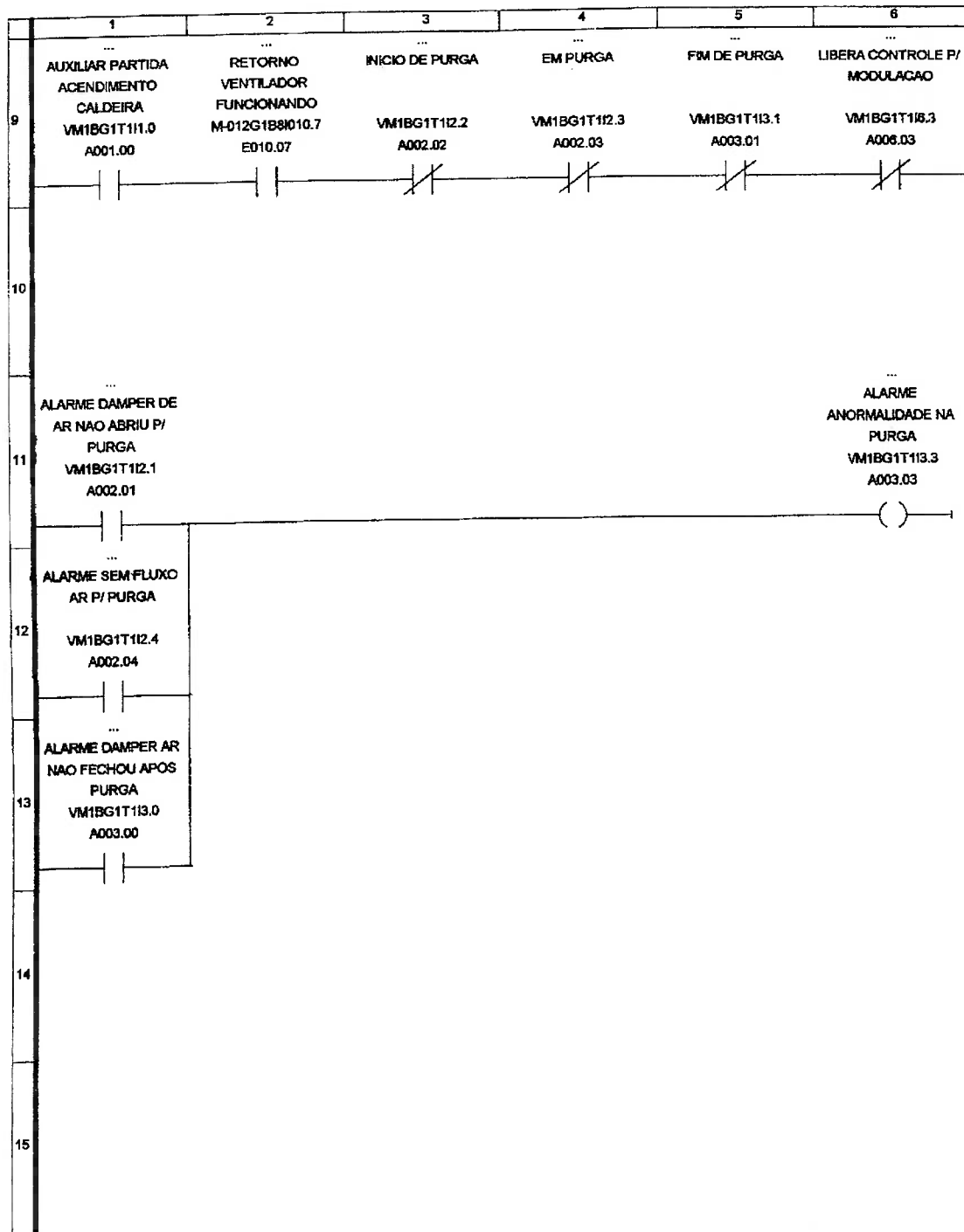


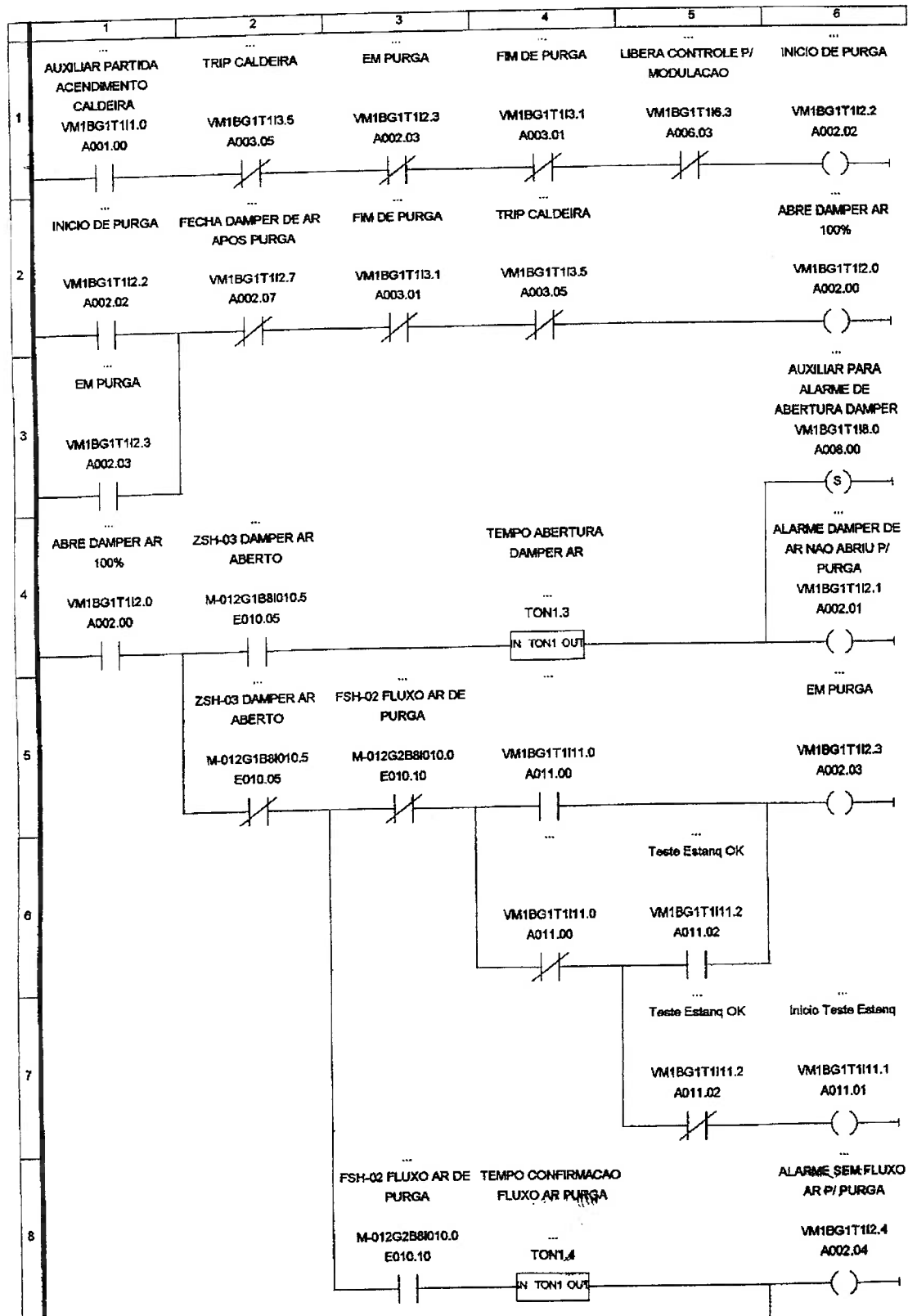


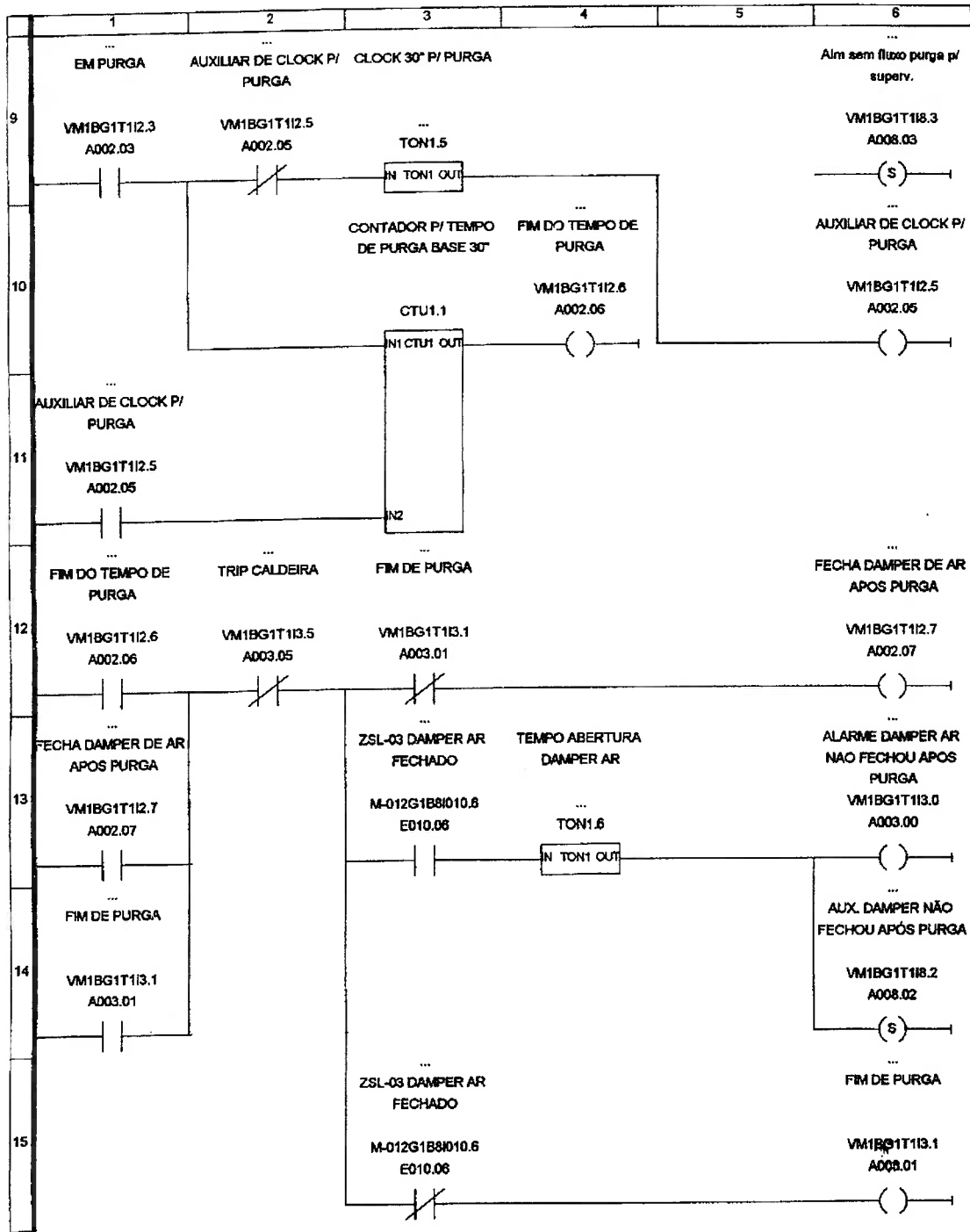


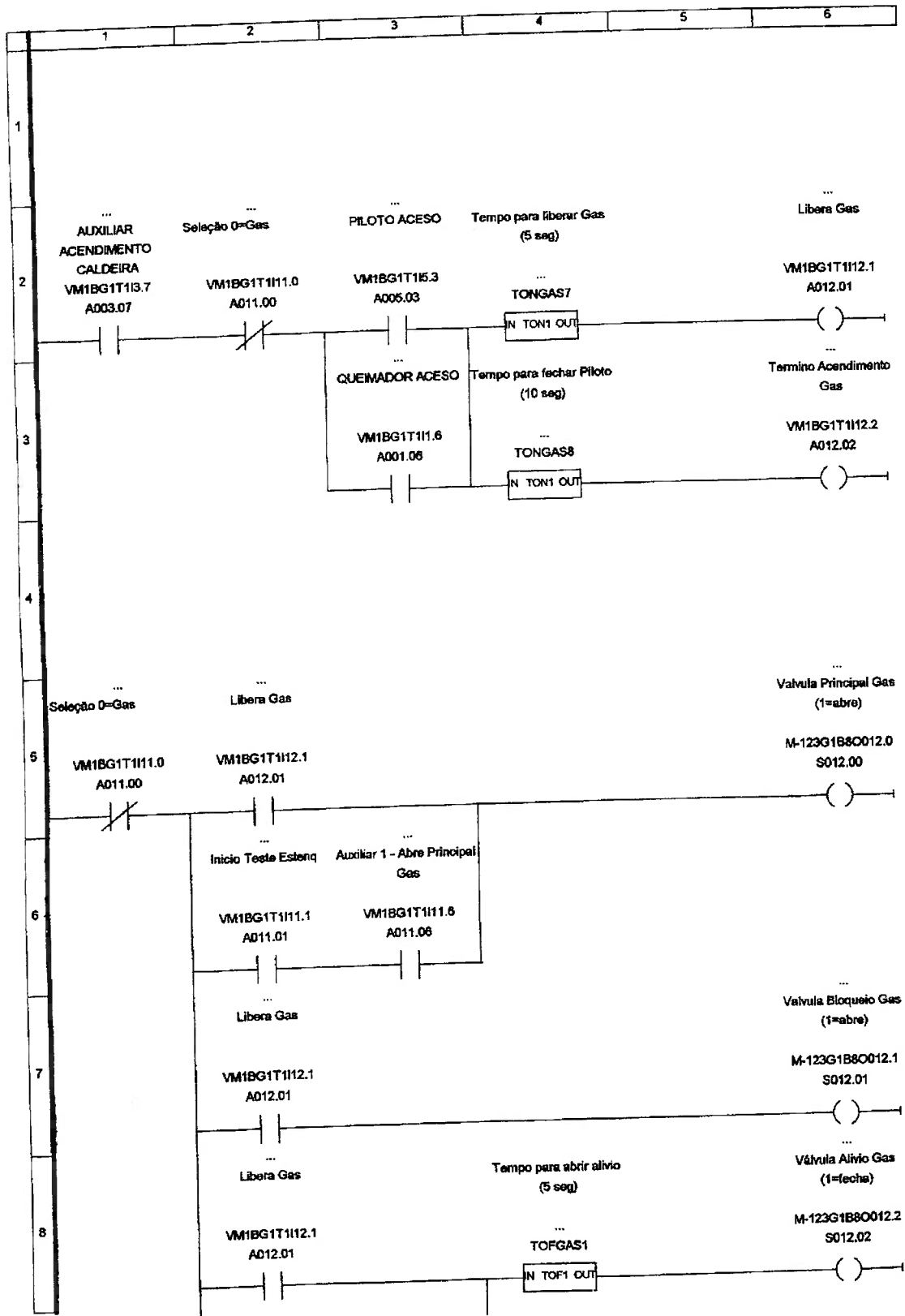


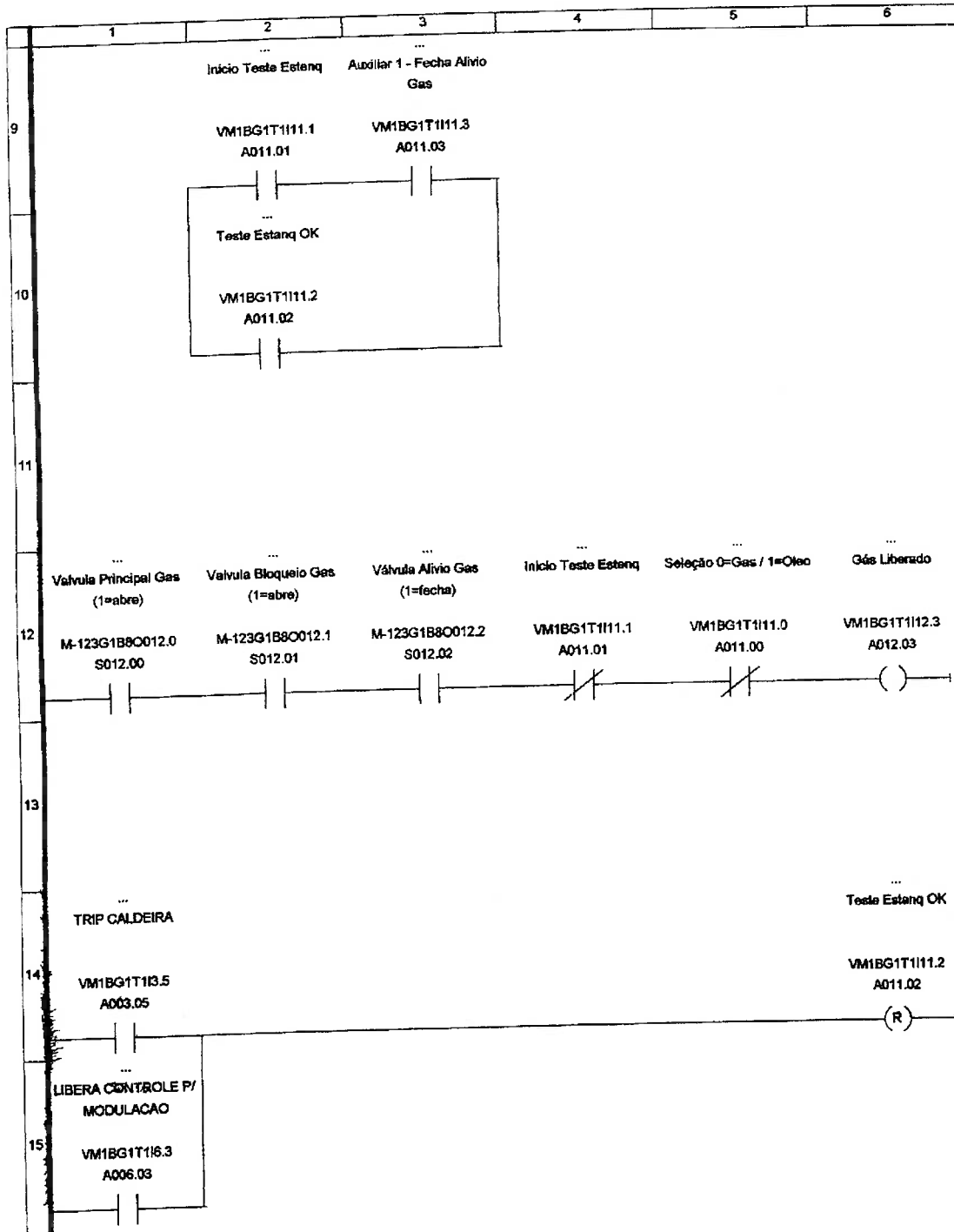














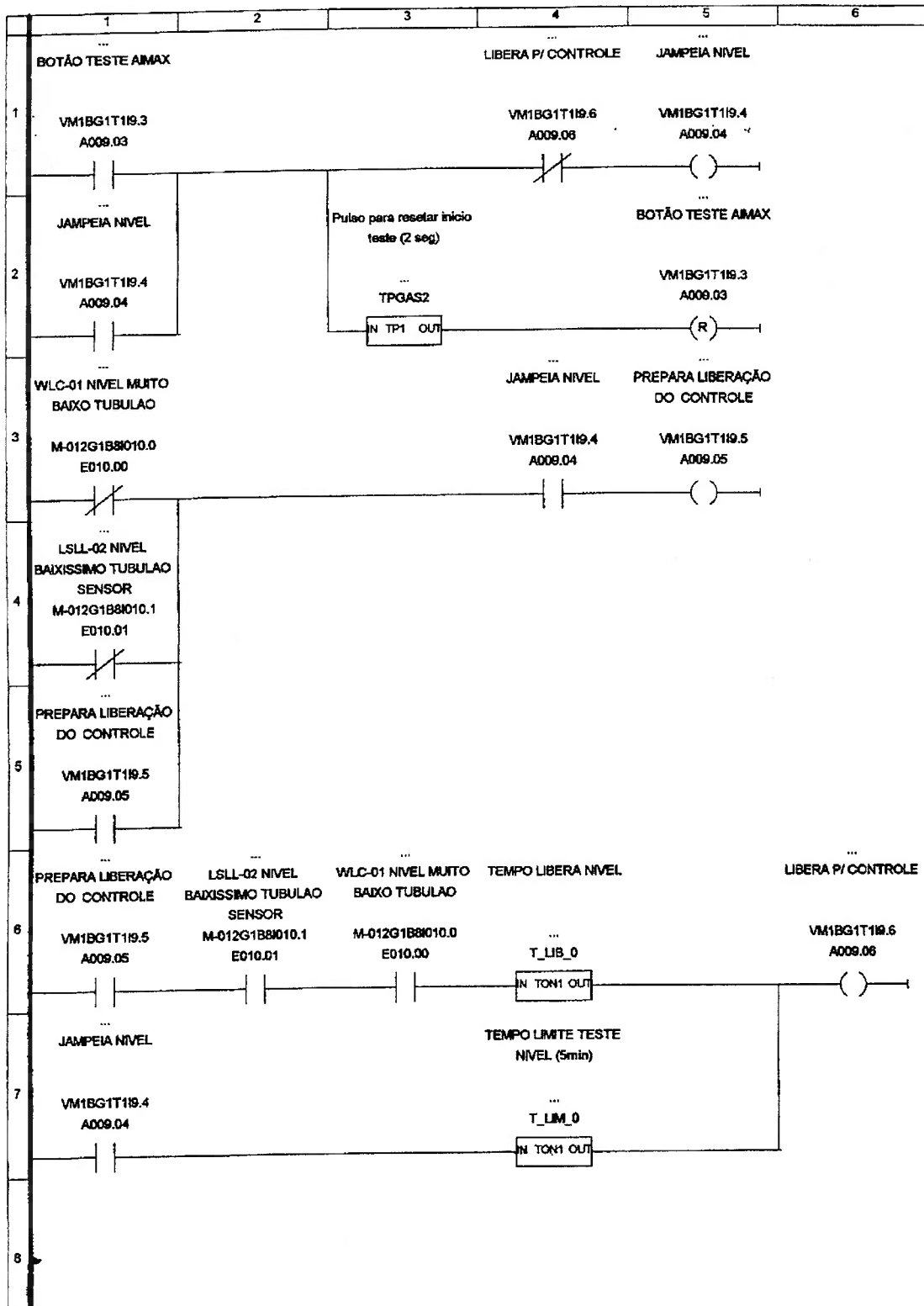


Figura D.13 – Diagrama Ladder do sistema de Partida da caldeira

## wcaid2gas. Modbus Address for Digital Input Variables

Tag	User Label	Modbus Address	Description
M-402G1B8I002.0		10001	
M-402G1B8I002.1		10002	
M-402G1B8I002.2		10003	
M-402G1B8I002.3		10004	
M-402G1B8I002.4		10005	
M-402G1B8I002.5		10006	
M-402G1B8I002.6		10007	
M-402G1B8I002.7		10008	
M-012G1B8I010.0	E010.00	10009	WLC-01 NIVEL MUITO BAIXO TUBULAO
M-012G1B8I010.1	E010.01	10010	LSLL-02 NIVEL BAIXISSIMO TUBULAO SENSOR
M-012G1B8I010.2	E010.02	10011	
M-012G1B8I010.3	E010.03	10012	
M-012G1B8I010.4	E010.04	10013	
M-012G1B8I010.5	E010.05	10014	ZSH-03 DAMPER AR ABERTO
M-012G1B8I010.6	E010.06	10015	ZSL-03 DAMPER AR FECHADO
M-012G1B8I010.7	E010.07	10016	RETORNO VENTILADOR FUNCIONANDO
M-012G2B8I010.0	E010.10	10017	FSH-02 FLUXO AR DE PURGA
M-012G2B8I010.1	E010.11	10018	
M-012G2B8I010.2	E010.12	10019	FSL-01 FLUXO MINIMO DE AR
M-012G2B8I010.3	E010.13	10020	RETORNO DE CHAMA EXISTENTE
M-012G2B8I010.4	E010.14	10021	PSHH-01 PRESSAO MUITO ALTA DE VAPOR
M-012G2B8I010.5	E010.15	10022	
M-012G2B8I010.6	E010.16	10023	PSL-03 BAIXA PRESSAO AR DE INSTRUMENTOS
M-012G2B8I010.7	E010.17	10024	
M-012G1B8I011.0	E011.00	10025	
M-012G1B8I011.1	E011.01	10026	
M-012G1B8I011.2	E011.02	10027	
M-012G1B8I011.3	E011.03	10028	
M-012G1B8I011.4	E011.04	10029	
M-012G1B8I011.5	E011.05	10030	
M-012G1B8I011.6	E011.06	10031	
M-012G1B8I011.7	E011.07	10032	
M-012G2B8I011.0	E011.10	10033	CH-2 PARTIDA
M-012G2B8I011.1	E011.11	10034	CH-4 EMERGENCIA
M-012G2B8I011.2	E011.12	10035	CH-3 REARME
M-012G2B8I011.3	E011.13	10036	PSL Seguranca - Gas
M-012G2B8I011.4	E011.14	10037	PSL Estanquidade - Gas
M-012G2B8I011.5	E011.15	10038	PSH Seguranca - Gas
M-012G2B8I011.6	E011.16	10039	PSH Estanquidade - Gas
M-012G2B8I011.7	E011.17	10040	

## world2gas: Modbus Address for Digital Output Variables

Tag	User Label	Modbus Address	Description
M-123G1B8O012.0	S012.00	00001	Válvula Principal Gas (1=abre)
M-123G1B8O012.1	S012.01	00002	Válvula Bloqueio Gas (1=abre)
M-123G1B8O012.2	S012.02	00003	Válvula Alívio Gas (1=fecha)
M-123G1B8O012.3	S012.03	00004	LIGA/DESLIGA BB23005
M-123G1B8O012.4	S012.04	00005	LIGA/DESLIGA BB23008
M-123G1B8O012.5	S012.05	00006	LIGA/DESLIGA BB23008
M-123G1B8O012.6	S012.06	00007	
M-123G1B8O012.7	S012.07	00008	
M-123G2B8O012.0	S012.10	00009	
M-123G2B8O012.1	S012.11	00010	
M-123G2B8O012.2	S012.12	00011	
M-123G2B8O012.3	S012.13	00012	
M-123G2B8O012.4	S012.14	00013	
M-123G2B8O012.5	S012.15	00014	
M-123G2B8O012.6	S012.16	00015	
M-123G2B8O012.7	S012.17	00016	
M-120G1B4O013.0	S013.00	00017	LIGA VENTILADOR
M-120G1B4O013.1	S013.01	00018	
M-120G1B4O013.2	S013.02	00019	BLOQUEIO GAS TRANS. IGNICAO
M-120G1B4O013.3	S013.03	00020	
M-120G2B4O013.4	S013.04	00021	SAIDA ALARME PAIN.CENRAL
M-120G2B4O013.5	S013.05	00022	IGNITOR
M-120G2B4O013.6	S013.06	00023	RESERVA
M-120G2B4O013.7	S013.07	00024	ALARME SONORO
CODDS1B8O020.0		00025	
CODDS1B8O020.1		00026	
CODDS1B8O020.2		00027	
CODDS1B8O020.3		00028	
CODDS1B8O020.4		00029	
CODDS1B8O020.5		00030	
CODDS1B8O020.6		00031	
CODDS1B8O020.7		00032	
CODDG1B8O020.0	CODD2-2.0	00033	
CODDG1B8O020.1	CODD2-2.1	00034	
CODDG1B8O020.2	CODD2-2.2	00035	
CODDG1B8O020.3	CODD2-2.3	00036	
CODDG1B8O020.4	CODD2-2.4	00037	
CODDG1B8O020.5	CODD2-2.5	00038	
CODDG1B8O020.6	CODD2-2.6	00039	
CODDG1B8O020.7	CODD2-2.7	00040	
CODDS1B8O021.0		00049	
CODDS1B8O021.1		00050	
CODDS1B8O021.2		00051	
CODDS1B8O021.3		00052	
CODDS1B8O021.4		00053	
CODDS1B8O021.5		00054	
CODDS1B8O021.6		00055	
CODDS1B8O021.7		00056	
CODDG1B8O021.0	CODD3-2A.0	00057	1 = Desabilita Gás
CODDG1B8O021.1	CODD3-2A.1	00058	
CODDG1B8O021.2	CODD3-2A.2	00059	
CODDG1B8O021.3	CODD3-2A.3	00060	1 = Força Damper
CODDG1B8O021.4	CODD3-2A.4	00061	1 = Desabilita Força Damper
CODDG1B8O021.5	CODD3-2A.5	00062	1 = Para PRD Gás / Ar
CODDG1B8O021.6	CODD3-2A.6	00063	
CODDG1B8O021.7	CODD3-2A.7	00064	Trava Valv Controle Gas: 0=0% / 1=20%
CODDS2B8O021.0		00065	
CODDS2B8O021.1		00066	
CODDS2B8O021.2		00067	
CODDS2B8O021.3		00068	
CODDS2B8O021.4		00069	
CODDS2B8O021.5		00070	
CODDS2B8O021.6		00071	
CODDS2B8O021.7		00072	
CODDG2B8O021.0	CODD3-2B.0	00073	
CODDG2B8O021.1	CODD3-2B.1	00074	
CODDG2B8O021.2	CODD3-2B.2	00075	
CODDG2B8O021.3	CODD3-2B.3	00076	
CODDG2B8O021.4	CODD3-2B.4	00077	
CODDG2B8O021.5	CODD3-2B.5	00078	
CODDG2B8O021.6	CODD3-2B.6	00079	
CODDG2B8O021.7	CODD3-2B.7	00080	

## wcaid2gas: Modbus Address for Digital Output Variables

Tag	User Label	Modbus Address	Description
CODDS1B8O22.3		00092	
CODDS1B8O22.4		00093	
CODDS1B8O22.5		00094	
CODDS1B8O22.6		00095	
CODDS1B8O22.7		00096	
CODDG1B8O22.0		00097	
CODDG1B8O22.1		00098	
CODDG1B8O22.2		00099	
CODDG1B8O22.3		00100	
CODDG1B8O22.4		00101	
CODDG1B8O22.5		00102	
CODDG1B8O22.6		00103	
CODDG1B8O22.7		00104	
CODDS1B8O23.0		00113	
CODDS1B8O23.1		00114	
CODDS1B8O23.2		00115	
CODDS1B8O23.3		00116	
CODDS1B8O23.4		00117	
CODDS1B8O23.5		00118	
CODDS1B8O23.6		00119	
CODDS1B8O23.7		00120	
CODDG1B8O23.0		00121	
CODDG1B8O23.1		00122	
CODDG1B8O23.2		00123	
CODDG1B8O23.3		00124	
CODDG1B8O23.4		00125	
CODDG1B8O23.5		00126	
CODDG1B8O23.6		00127	
CODDG1B8O23.7		00128	
VM1BG1T11.0	A001.00	00129	AUXILIAR PARTIDA ACENDIMENTO CALDEIRA
VM1BG1T11.1	A001.01	00130	ALARME VENTILADOR AR NAO PARTIU
VM1BG1T11.2	A001.02	00131	AUXILIAR DE SEGURANCA P/ PARTIDA
VM1BG1T11.3	A001.03	00132	AUXILIAR DE SEGURANCA P/ PARTIDA
VM1BG1T11.4	A001.04	00133	Auxiliar de Segurança Geral
VM1BG1T11.5	A001.05	00134	AUXILIAR DESLIGA VENTILADOR
VM1BG1T11.6	A001.06	00135	QUEIMADOR ACESO
VM1BG1T11.7	A001.07	00136	RESERVA
VM1BG1T12.0	A002.00	00137	ABRE DAMPER AR 100%
VM1BG1T12.1	A002.01	00138	ALARME DAMPER DE AR NAO ABRIU P/ PURGA
VM1BG1T12.2	A002.02	00139	INICIO DE PURGA
VM1BG1T12.3	A002.03	00140	EM PURGA
VM1BG1T12.4	A002.04	00141	ALARME SEM FLUXO AR P/ PURGA
VM1BG1T12.5	A002.05	00142	AUXILIAR DE CLOCK P/ PURGA
VM1BG1T12.6	A002.06	00143	FIM DO TEMPO DE PURGA
VM1BG1T12.7	A002.07	00144	FECHA DAMPER DE AR APOS PURGA
VM1BG1T13.0	A003.00	00145	ALARME DAMPER AR NAO FECHOU APOS PURGA
VM1BG1T13.1	A003.01	00146	FIM DE PURGA
VM1BG1T13.2	A003.02	00147	AUXILIAR EMERGENCIA
VM1BG1T13.3	A003.03	00148	ALARME ANORMALIDADE NA PURGA
VM1BG1T13.4	A003.04	00149	BY-PASS P/ PARTIDA CALDEIRA
VM1BG1T13.5	A003.05	00150	TRIP CALDEIRA
VM1BG1T13.6	A003.06	00151	ALARME DE CHAMA ANTECIPADA
VM1BG1T13.7	A003.07	00152	AUXILIAR ACENDIMENTO CALDEIRA
VM1BG1T14.0	A004.00	00153	PARTIDA VIA SUPERVISORIO
VM1BG1T14.1	A004.01	00154	EMERGENCIA VIA SUPERVISORIO
VM1BG1T14.2	A004.02	00155	REARME VIA SUPERVISORIO
VM1BG1T14.3	A004.03	00156	RESERVA
VM1BG1T14.4	A004.04	00157	AUTOMANUAL BB23008
VM1BG1T14.5	A004.05	00158	RECONHECE ALARMES VIA SUPERVISORIO
VM1BG1T14.6	A004.06	00159	
VM1BG1T14.7	A004.07	00160	
VM1BG1T15.0	A005.00	00161	
VM1BG1T15.1	A005.01	00162	
VM1BG1T15.2	A005.02	00163	ALARME FALTA DE CHAMA - FALHA IGNICAO
VM1BG1T15.3	A005.03	00164	PILOTO ACESO
VM1BG1T15.4	A005.04	00165	
VM1BG1T15.5	A005.05	00166	
VM1BG1T15.6	A005.06	00167	QUEIMADOR ACESO APAGA PILOTO
VM1BG1T15.7	A005.07	00168	ALARME DE FALHA NA CHAMA
VM1BG1T16.0	A006.00	00169	ALARME DE FALHA NO ACENDIMENTO
VM1BG1T16.1	A006.01	00170	AUXILIAR P/ FUNCOES NAO EXECUTADAS
VM1BG1T16.2	A006.02	00171	RESERVA
VM1BG1T16.3	A006.03	00172	LIBERA CONTROLE P/ MODULACAO
VM1BG1T16.4	A006.04	00173	PRONTO PARA PURGA
VM1BG1T16.5	A006.05	00174	LIGA BB23008 AIMAX
VM1BG1T16.6	A006.06	00175	DESLIGA BB23008 AIMAX

## wcaid2gas: Modbus Address for Digital Output Variables

Tag	User Label	Modbus Address	Description
VM1BG1T116.7	A006.07	00176	OPERANDO DE CONTROLE
VM1BG1T117.0	A007.00	00177	AUTOMANUAL BB23005
VM1BG1T117.1	A007.01	00178	LIGA BB23005 AIMAX
VM1BG1T117.2	A007.02	00179	DESLIGA BB23005 AIMAX
VM1BG1T117.3	A007.03	00180	AUTOMANUAL BB23006
VM1BG1T117.4	A007.04	00181	LIGA BB23006 AIMAX
VM1BG1T117.5	A007.05	00182	DESLIGA BB23006 AIMAX
VM1BG1T117.6	A007.06	00183	RESERVA
VM1BG1T117.7	A007.07	00184	RESERVA
VM1BG1T118.0	A008.00	00185	AUXILIAR PARA ALARME DE ABERTURA DAMPER
VM1BG1T118.1	A008.01	00186	AUXILIAR FALTA DE CHAMA
VM1BG1T118.2	A008.02	00187	AUX. DAMPER NÃO FECHOU APÓS PURGA
VM1BG1T118.3	A008.03	00188	Alm sem fluxo purga p/ superv.
VM1BG1T118.4	A008.04	00189	Alm chama antecipadad p/ superv.
VM1BG1T118.5	A008.05	00190	Alm valv oleo não abriu p/ superv.
VM1BG1T118.6	A008.06	00191	Alm falha na chama p/ superv.
VM1BG1T118.7	A008.07	00192	Indica chama para superv.
VM1BG1T119.0	A009.00	00193	AUX.BY-PASS TEMP.
VM1BG1T119.1	A009.01	00194	BOTAO BY-PASS TEMP.
VM1BG1T119.2	A009.02	00195	AUXILIAR DESCONSIDERA FLASH
VM1BG1T119.3	A009.03	00196	BOTÃO TESTE AIMAX
VM1BG1T119.4	A009.04	00197	JAMPEIA NIVEL
VM1BG1T119.5	A009.05	00198	PREPARA LIBERAÇÃO DO CONTROLE
VM1BG1T119.6	A009.06	00199	LIBERA P/ CONTROLE
VM1BG1T119.7	A009.07	00200	Operando de Controle
VM1BG1T1110.0	A010.00	00201	Falha 1 estanq. para superv.
VM1BG1T1110.1	A010.01	00202	Falha 2 Estanq. para superv.
VM1BG1T1110.2	A010.02	00203	RESERVA
VM1BG1T1110.3	A010.03	00204	RESERVA
VM1BG1T1110.4	A010.04	00205	RESERVA
VM1BG1T1110.5	A010.05	00206	RESERVA
VM1BG1T1110.6	A010.06	00207	RESERVA
VM1BG1T1110.7	A010.07	00208	RESERVA
VM1BG1T1111.0	A011.00	00209	Seleção 0=Gas
VM1BG1T1111.1	A011.01	00210	Inicio Teste Estanq
VM1BG1T1111.2	A011.02	00211	Teste Estanq OK
VM1BG1T1111.3	A011.03	00212	Auxiliar 1 - Fecha Arívio Gas
VM1BG1T1111.4	A011.04	00213	Auxiliar 1 - Teste Estanq
VM1BG1T1111.5	A011.05	00214	Falha 1 Estanq (abafa)
VM1BG1T1111.6	A011.06	00215	Auxiliar 1 - Abre Principal Gas
VM1BG1T1111.7	A011.07	00216	Auxiliar 2 - Teste Estanq
VM1BG1T1112.0	A012.00	00217	Falha 2 Estanq (abafa)
VM1BG1T1112.1	A012.01	00218	Libera Gas
VM1BG1T1112.2	A012.02	00219	Termino Acondimento Gas
VM1BG1T1112.3	A012.03	00220	Gas Liberado
VM1BG1T1112.4	A012.04	00221	Auxiliar Segurança Gas
VM1BG1T1112.5	A012.05	00222	Auxiliar 1 Força Damper
VM1BG1T1112.6	A012.06	00223	RESERVA
VM1BG1T1112.7	A012.07	00224	RESERVA

wcalc2gas: Used Built-in functions

Type	User Label	Prm	Prm Value	Prm Description	Comments
TON1	TON1.2	PST.TON1.1	500	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	TEMPO BY-PASS DAMPER AR
TON1	TON1.3	PST.TON1.2	32000	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	TEMPO ABERTURA DAMPER AR
TON1	TON1.3	PST.TON1.3	1000	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	TEMPO CONFIRMACAO FLUXO AR PURGA
TON1	TON1.4	PST.TON1.4	1000	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	CLOCK 30° P/ PURGA
TON1	TON1.5	PST.TON1.5	32000	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	TEMPO ABERTURA DAMPER AR
TON1	TON1.6	PST.TON1.6	2000	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	TEMPO RETIRADA BY-PASS SEGURANCA VENTILADOR
TON1	TON1.7	PST.TON1.7	1000	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	
TON1	TON1.8	PST.TON1.8	2000	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	TEMPO CONFIRMACAO CHAMA
TON1	TON1.9	PST.TON1.9	1000	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	
TON1	TON1.10	PST.TON1.10	2000	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	TEMPO APAGAR PILOTO (10seg)
TON1	TON1.11	PST.TON1.11	3000	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	Tempo para Liberar Modulacao (30 seg)
TON1	TON1.12	PST.TON1.12	100	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	DESCONSIDERA FLASH DE CHAMA
TON1	TON1.1	PST.TON1.13	1000	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	TEMPO LIBERA NIVEL
TON1	T_LIB_0	PST.TON1.14	30000	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	TEMPO LIMITE TESTE NIVEL (5min)
TON1	T_LIM_0	PST.TON1.15	100	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	RESERVA
TON1	TONRES1	PST.TON1.16	2000	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	Tempo de Teste Valv Principal (20 seg)
TON1	TONGAS1	PST.TON1.17	500	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	Tempo para PSL atuar (5 seg)
TON1	TONGAS2	PST.TON1.18	1000	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	Tempo de Principal Gas aberta (5 seg)
TON1	TONGAS3	PST.TON1.19	2000	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	
TON1	TONGAS4	PST.TON1.20	500	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	Tempo para PSH atuar (5 seg)
TON1	TONGAS5	PST.TON1.21	200	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	Almsco para abrir piloto (2 seg)
TON1	TONGAS6	PST.TON1.22	1000	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	Tempo para fechar Piloto (10 seg)
TON1	TONGAS7	PST.TON1.23	500	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	Tempo para liberar Gas (5 seg)
TON1	TONGAS8	PST.TON1.24	1500	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	Tempo para purga quando abafa (15 seg)
TON1	TONGAS9	PST.TON1.25	500	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	Tempo para PSL reabilitar
TON1	TONGAS10	PST.TON1.25	500	Timer Preset Value of TON1 (0.01sec)	
TOF1	TOFRES1	PST.TOF1.1	500	Timer Preset Value of TOF1 (0.01sec)	RESERVA
TOF1	TOFRES2	PST.TOF1.2	500	Timer Preset Value of TOF1 (0.01sec)	RESERVA
TOF1	TOFGAS1	PST.TOF1.3	500	Timer Preset Value of TOF1 (0.01sec)	Tempo para abrir alivio (5 seg)
TOF1	TOFGAS2	PST.TOF1.4	100	Timer Preset Value of TOF1 (0.01sec)	Tempo para purga qdo abafa (1 seg)
TP1	TP1.1	PST.TP1.1	2000	Timer Preset Value of TP1 (0.01sec)	PULSO
TP1	TP1.2	PST.TP1.2	100	Timer Preset Value of TP1 (0.01sec)	PULSO
TP1	TP1.3	PST.TP1.3	100	Timer Preset Value of TP1 (0.01sec)	PULSO
TP1	TP1.4	PST.TP1.4	100	Timer Preset Value of TP1 (0.01sec)	PULSO
TP1	TP1.5	PST.TP1.5	100	Timer Preset Value of TP1 (0.01sec)	PULSO
TP1	TP1.6	PST.TP1.6	100	Timer Preset Value of TP1 (0.01sec)	PULSO
TP1	TP1.7	PST.TP1.7	2000	Timer Preset Value of TP1 (0.01sec)	Tempo de Ignitor Ligado (10 seg)
TP1	TP1.8	PST.TP1.8	200	Timer Preset Value of TP1 (0.01sec)	Pulso para resetar Inicio teste (2 seg)
TP1	TPGAS1	PST.TP1.9	100	Timer Preset Value of TP1 (0.01sec)	Pulso para habilitar sobre Principal Gas (1 seg)
CTU1	CTU1.1	PST.CTU1.1	6	Counter Preset Value of CTU1	CONTADOR P/ TEMPO DE PURGA BASE 30°

wcaid2gae: Global Variables (Group)

Rack	Slot	Default Label	User Label	Group Description	
0	2	M-402G1B8I002	EAD2G1	Group 1/2 of 8 Burnout Indication Digital Inputs Group 2/2 of 8 Temperature Analog Inputs	
0	2	M-402G2NR8I002	EAD2G2		
1	0	M-012G1B8I010	E010G1	Group 1/2 of 8 120 VAC inputs (Isolated) Group 2/2 of 8 120 VAC inputs (Isolated) Group 1/2 of 8 120 VAC inputs (Isolated) Group 2/2 of 8 120 VAC inputs (Isolated) Group 1/2 of 8 NO Relays Outputs (Double Level of Isolation) Group 2/2 of 8 NO Relays Outputs (Double Level of Isolation) Group 1/2 of 4 NO Relay Outputs (Double Level of Isolation) Group 2/2 of 4 NO Relay Outputs (Double Level of Isolation)	
1	0	M-012G2B8I010	E010G2		
1	1	M-012G1B8I011	E011G1		
1	1	M-012G2B8I011	E011G2		
1	2	M-120G1B8O012	S012G1		
1	2	M-120G2B8O012	S012G2		
1	3	M-120G1B4O013	S013G1		
1	3	M-120G2B4O013	S013G2		
2	0	C1DD51B8I020	C1DD2-2		Group 1/2 of 8 Status Indication Digital Inputs 1 Group of 8 Digital Inputs
2	0	C1DDG1B8I020			
2	0	C1AD51B8I020	C1AD2-2		Group 2/2 of 8 Status Indication Analog Inputs 1 Group of 8 Analog Inputs
2	0	C1ADG1F8I020			
2	0	C0DD51B8O020	C0DD2-2		Group 1/2 of 8 Status Indication Digital Inputs 1 Group of 8 Digital Outputs
2	0	C0DDG1B8O020			
2	0	C0AD51F8O020	C0AD2-2	Group 2/2 of 8 Status Indication Analog Inputs 1 Group of 8 Analog Outputs	
2	0	C0ADG1F8O020			
2	1	C1DD31B8I021	C1DD3-2A	Group 1/2 of 8 Status Indication Digital Inputs 1 Group of 8 Digital Inputs	
2	1	C1DDG1B8I021			
2	1	C1DD32B8I021	C1DD3-2B	Group 1/2 of 8 Status Indication Digital Inputs 1 Group of 8 Digital Inputs	
2	1	C1DDG2B8I021			
2	1	C1AD31B8I021	C1AD3-2	Group 2/2 of 8 Status Indication Analog Inputs 1 Group of 8 Analog Inputs	
2	1	C1ADG1F8I021			
2	1	C0DD31B8O021	C0DD3-2A	Group 1/2 of 8 Status Indication Digital Inputs 1 Group of 8 Digital Outputs	
2	1	C0DDG1B8O021			
2	1	C0DD32B8O021	C0DD3-2B	Group 1/2 of 8 Status Indication Digital Inputs 1 Group of 8 Digital Outputs	
2	1	C0DDG2B8O021			
2	1	C0AD31B8O021	C0AD3-2	Group 2/2 of 8 Status Indication Analog Inputs 1 Group of 8 Analog Outputs	
2	1	C0ADG1F8O021			
2	2	C1DD10-2	C1DD10-2	Group 1/2 of 8 Status Indication Digital Inputs 1 Group of 8 Digital Inputs	
2	2	C1DDG1B8I022			
2	2	C1AD10-2	C1AD10-2	Group 2/2 of 8 Status Indication Analog Inputs 1 Group of 8 Analog Inputs	
2	2	C1ADG1F8I022			
2	2	C0DD10-2	C0DD10-2	Group 1/2 of 8 Status Indication Digital Inputs 1 Group of 8 Digital Outputs	
2	2	C0DDG1B8O022			
2	2	C0AD10-2	C0AD10-2	Group 2/2 of 8 Status Indication Analog Inputs 1 Group of 8 Analog Outputs	
2	2	C0ADG1F8O022			
2	3	C1DD23-2	C1DD23-2	Group 1/2 of 8 Status Indication Digital Inputs 1 Group of 8 Digital Inputs	
2	3	C1DDG1B8I023			
2	3	C0DD23-2	C0DD23-2	Group 1/2 of 8 Status Indication Digital Inputs 1 Group of 8 Digital Outputs	
2	3	C0DDG1B8O023			

Figura D.14 – Lista de Variáveis do sistema de Partida da Caldeira

Com a tradução do modelo MFG estruturado para a respectiva linguagem de programação do CP padronizada pela norma IEC 61131-3 aprovada pelo cliente, torna-se possível aplicar-se os conceitos apresentados no Capítulo 4 para definição da arquitetura do sistema de controle. Portanto, com as informações obtidas na etapa de definição da arquitetura de hardware do sistema de controle permite definir efetivamente a arquitetura de software do sistema. Para a definição da arquitetura inicial de controle, utiliza-se o algoritmo de divisão das áreas de controle, conforme apresentado no anexo C. Desta forma, é possível fazer o levantamento das cargas computacionais geradas por cada módulo de controle em função da arquitetura obtida e dos tipos de CPs definidos para realizar o controle do SP. Neste caso, o CP adotado para realizar o controle do SP é o Micrologix 1500 e os dados de processamento das funções utilizadas na metodologia foram obtidos no manual do usuário (ROCKWELL, 2000) e podem ser observados na tabela D.2.

Instrução	Mnemônico	Tempo de Execução (μs)	Memória Utilizada por Palavra (8Bits)
Bobina	OTE	1.49	1.63
Bobina Set	OTL	1.06	0.63
Bobina Reset	OTU	1.02	0.63
Contato Aberto	XIC	0.63	1.00
Contato Fechado	XIO	0.63	1.00
Contador Down	CTD	8.30	2.38
Contador Up	CTU	8.40	2.38
Contador Retentivo	RTO	15.73	3.38
Temporizador Desliga	TOF	12.32	3.88
Temporizador Liga	TON	15.49	3.88
Pulso	ONS (TP)	1.85	3.50
Entrada Direta	IIM	22.06	3.00
Saída Direta	IOM	19.44	3.00
Comunicação de Sinal Digital de Leitura	MSG	150	2.88
Comunicação de Sinal Digital de Escrita		200+1.3 p/palavra	
E	AND	2.00	2.75
OU	OR	2.0	2.75
NÃO	NOT	2.2	2.50
OU EXCLUSIVO	XOR	2.67	2.75

Tabela D.2 – Principais funções utilizadas no cálculo da carga de processamento



Para realizar o cálculo da carga computacional, é utilizada a equação 4.13 apresentada no Capítulo 4, utilizando as cargas computacionais apresentadas na tabela D.2 e o número e tipo de instruções utilizadas por cada bloco funcional traduzidos para linguagem Ladder, como podem ser observados nas figuras D.13 e D.14. Desta forma, a tabela D.3 apresenta um resumo das cargas computacionais geradas por cada bloco funcional quando este é aplicado a uma arquitetura de hardware do controlador do tipo Micrologix 1500 da Rockwell, utilizado para solucionar o problema da automação do sistema de controle da caldeira em estudo.

Bloco Funcional		OTE -( )	OTL -(S)	OTU -(R)	XIC - /	XIO -	CTU -[CTU]	TON -[TOF]	TON -[TON]	ONS -[TP]	Total
Inicialização	Quant.	4	1	11	11	15					42
	Vel.	5,96	1,06	11,22	6,93	9,45					34,62
	Mem.	6,52	0,63	6,93	11	15					40,08
Test.Estq.	Quant.	3	6	4	5	11		5	1		35
	Vel.	4,47	6,36	4,08	3,15	6,93		77,45	1,85		104,29
	Mem.	4,89	3,78	2,52	5	11		19,4	3,5		50,09
Purga	Quant.	16	4		26	21	1		7		75
	Vel.	23,84	4,24		16,38	13,23	8,4		108,43		174,52
	Mem.	26,08	2,52		26	21	2,38		27,16		105,14
Partida	Quant.	9		2	7	24		1	4	1	48
	Vel.	13,41		2,04	4,41	15,12		12,32	61,96	1,85	111,11
	Mem.	14,67		1,26	7	24		3,88	15,52	3,5	69,83

Tabela D.3 – Carga de processamento exigida por cada bloco funcional do sistema de controle da caldeira.

Obs.: Os sinais analógicos do sistema referentes ao bloco funcional de modulação são processados pelos equipamentos Fieldbus instalados no sistema. Os sinais digitais necessários para efetuar a lógica de partida da caldeira são enviados via rede de comunicação para os CPs onde os blocos funcionais são processados.

Após a definição da carga de processamento dos blocos funcionais, deve-se fazer a verificação do tempo de processamento dos blocos funcionais e da capacidade de armazenamento dos controladores, para garantir o atendimento dos requisitos da arquitetura de hardware já definida e os requisitos temporais requeridos pelos processos do SP. Portanto, com a definição das áreas de controle, a alocação dos sensores, dos atuadores, a alocação dos controladores no chão de fábrica, a designação dos blocos funcionais e o cumprimento dos parâmetros do sistema, obtém-se a arquitetura final do

sistema de controle. No sistema em estudo, são utilizadas duas estações para monitoração, ficando uma na sala de operação e outra no painel local de controle. Os sinais analógicos do sistema são processados pelos instrumentos Fieldbus, onde são coletadas as informações dos sensores e gerados os dados digitais necessários para realização da lógica de controle do sistema. Deste modo, os sinais são transmitidos através da rede de comunicação para os CPs. A arquitetura do sistema é apresentada na figura D.15.

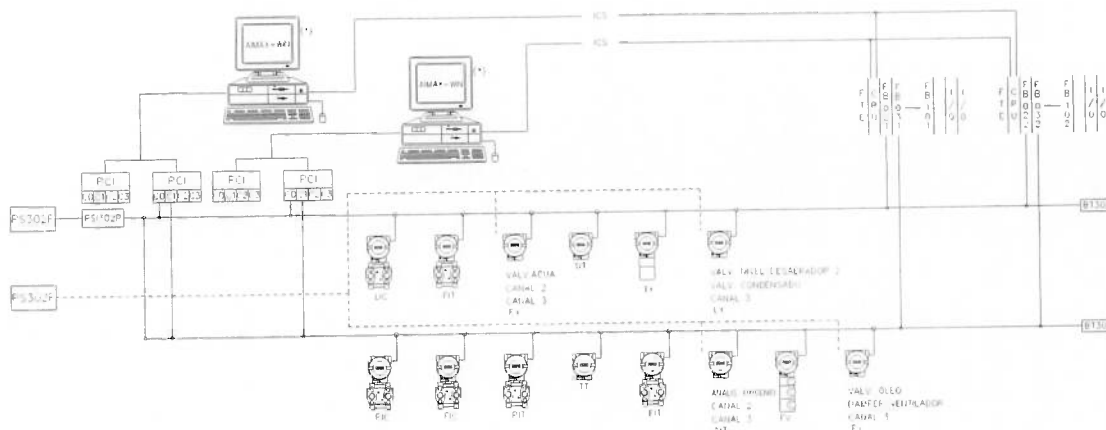


Figura D.15 – Arquitetura do sistema de controle da caldeira

Como resultado da aplicação do algoritmo de definição das áreas de controle, obteve-se a alocação dos sinais físicos do sistema conforme pode ser observado na tabela D.4.

Nome	Descrição	CP1		CP2	
		Entrada	Saída	Entrada	Saída
TR01	Transformador de ignição				x
BE01	Sensor de chama principal			x	
SM01	Válvula de modulação de gás Abre 100%				x
	Válvula de modulação de gás Aberta			x	
	Válvula de modulação de gás Fechada			x	
SM02	Damper abre 100% (vva. modulação de ar)			x	
	Damper Fechado				x
	Damper Aberto				x
PSL01	Pressão do Teste de Estanqueidade	x			
PSL02	Pressão mínima de gás natural	x			
PSL03	Pressão de ar forçado			x	
PSL04	Pressão mínima de gás piloto	x			
PSL05	Pressão baixa na fornalha			x	
PSH01	Pressão máxima de gás natural	x			
PSHH01	Pressão Muito Alta de Vapor			x	
LSL01	Nível baixo de água no tubulão			x	
LSLL02	Nível Muito Baixo de água no tubulão			x	
FSH02	Fluxo de ar de purga			x	
SV01	Válvula de bloqueio 1 de gás natural		x		
	Válvula de bloqueio 1 aberta	x			
	Válvula de bloqueio 1 fechada	x			
SV02	Válvula de bloqueio 2 de gás natural		x		
	Válvula de bloqueio 2 aberta	x			
	Válvula de bloqueio 2 fechada	x			
SV03	Válvula de Vent. do cavalete de gás		x		
	Válvula de Vent. aberta	x			
	Válvula de Vent. fechada	x			
SV05	Válvula de bloqueio do gás piloto				x
	Válvula de bloqueio piloto aberta			x	
	Válvula de bloqueio piloto fechada			x	
M001	Ventilador de ar forçado				x
	Ventilador de ar forçado ligado			x	
	Ventilador de ar forçado falha			x	
Total de E/S		10	3	14	6

Tabela D.4 – Alocação dos sinais do sistema nos CPs

Desta maneira, com a arquitetura de controle já definida segundo os parâmetros utilizados no algoritmo proposto para a definição das áreas de controle do SP e com as características de processamento dos CPs selecionados para efetuar o controle do SP, torna-se possível aplicar o algoritmo de distribuição dos módulos de controle sugerido no capítulo 4, obtendo assim, um resultado para a distribuição dos blocos funcionais nos CPs do sistema. Neste sistema considera-se a comunicação DF1 Full Duplex para troca de dados entre os controladores do sistema, gerando assim uma taxa de transmissão de sinal de 275,86  $\mu$ s por sinal transmitido. Considerando estes parâmetros de comunicação, a carga de processamento levantada por cada bloco funcional e o local de alocação dos sinais físicos de E/S do sistema, pode-se efetuar a distribuição dos blocos funcionais nos CPs do sistema. O resultado da aplicação do algoritmo de distribuição, leva a matriz de designação e o resultado da distribuição que podem se observados respectivamente na figura D.16 e na tabela D.5.

	CP1	CP2	CP3	CP4
Inicialização	$34,62+150+200$ $+15*(275,86)+6*(1,3+275,86)$	$34,62+150+200$ $+13*(275,86)+8*(1,3+275,86)$	$10^{10}$	$10^{10}$
Test.Estanq.	$104,29+150+200$ $+6*(275,86)+4*(1,3+275,86)$	$104,29+150+200$ $+14*(275,86)+9*(1,3+275,86)$	$10^{10}$	$10^{10}$
Purga	$174,52+150+200$ $+9*(275,86)+8*(1,3+275,86)$	$174,52+150+200$ $+5*(275,86)+4*(1,3+275,86)$	$10^{10}$	$10^{10}$
Part.Queimador	$111,11+150+200$ $+18*(275,86)+9*(1,3+275,86)$	$111,11+150+200$ $+14*(275,86)+6*(1,3+275,86)$	$10^{10}$	$10^{10}$

Figura D.16 – Matriz de designação dos blocos funcionais.

	CP1	CP2	
Inicialização	6185,48	6188,08	→ CP1
Test.Estanq.	3218,09	6810,77	→ CP1
Purga	5224,54	3012,46	→ CP2
Part.Queimador	7921,03	5986,11	→ CP2

Tabela D.5 – Arquitetura do sistema de controle da caldeira.

Desta forma aplica-se a verificação dos parâmetros do sistema e nota-se que a arquitetura sugerida pelo algoritmo é aplicável. Como consequência da verificação dos parâmetros obtém-se como resultado os dados apresentados na tabela D.6.

Reserva	CP1	CP2
Memória	75,9%	57,4%
Entrada	37,5%	13%
Saída	75%	50%
Velocidade de Processamento	9403 $\mu$ s $\rightarrow$ Ok	8998 $\mu$ s $\rightarrow$ Ok

Tabela D.6 – Verificação da arquitetura obtida

O processo exige uma velocidade de processamento de 100ms, que é compatível com o cartão de E/S do controlador e com o pior resultado de processamento obtido (9,4ms no CP1) . A carga de memória e a ocupação dos sinais dos cartões de E/S dos CP estão menores que 100% como pode ser observado na tabela D.6. Portanto, o algoritmo fornece como resultado final a alocação ótima dos blocos funcionais nos CP.

## D.5 OBSERVAÇÕES FINAIS

A aplicação desta técnica no desenvolvimento de projetos de sistemas de controle proporciona tanto uma análise das partes dos modelos como a análise do modelo global, fornecendo uma variedade de resultados exemplificados a seguir:

- Possibilidade de reutilização dos modelos MFG;
- Representação de cada módulo de controle do sistema em MFG;
- Facilitação da análise e do teste do modelo de controle devido a abordagem modular adotada;
- Análise do desempenho do sistema em função da aplicação de uma determinada estratégia de controle;

- Facilidade de avaliação de outras alternativas mais adequadas às necessidades do cliente.

Em relação a implementação do projeto, pode-se afirmar que os resultados em termos de operacionalidade e manutenção do sistema, comprovam a efetividade e importância dos procedimentos adotados, que podem ser observados ao longo do desenvolvimento e implementação do projeto.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABB; Advant Controller 410 Version 1.5/2, Product Guide - 3BSE 015 966R201 Rev B; www.abb.com; 2001a

ABB; Advant Controller 450 Version 2.3/1, Product Guide - 3BSE 015 953R201 Rev B; www.abb.com; 2001b

ALMEIDA, A. e DAROLT, R.; Pesquisa e desenvolvimento em UML; Dissertação de Mestrado; UNISUL - Universidade do sul de Santa Catarina; Araguá, SC; 2001

ASCÂNIO, J.; Metodologia para análise da viabilidade de implantação de projetos de automação; ; Dissertação de Mestrado; Universidade Federal de Santa Catarina; 2000.

AUDSLEY, N.C. e BURNS, A.; Real time system scheduling; Department of Computer Science, University of York; 1990

BAKER, K.P.; Introduction to Sequencing and Scheduling; John Wiley and Sons; New York;1974

BANERJEE, P. et al.; A modeling of interactive layout designer reasoning using qualitative patterns; International journal of production research; v.30, n.3, p.433-453; 1992

BONFATTI, F.; MONARI, D.M.; SAMPIERI, U.; IEC1131-3 Programming Methodology; CI International; França; 1999.

BRENNAN, R.W. e NORRIE, D. H.; The Performance of Partial Dynamic Hierarchies for Manufacturing; Proc. 2nd International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, Blegium, pp5-13; 1999

BRONSON, R.; Pesquisa Operacional; 1.ed. McGraw-Hill do Brasil; São Paulo; 1985

CASSANDRAS, C.G.; Discrete Event Systems - Modeling and Performance Analysis; Richard D. Irvin, Inc., and Aksen Associates, Incorporated Publishers; 1993.

CHALMERS, A. e REINHARD, E; Parallel and Distributed Photo-Realistic Rendering; University of Bristol; Bristol, UK; 1998.

CHWIF, L.; Uma metodologia para auxiliar o planejamento do arranjo físico de uma indústria de manufatura: Base para sistemas computadorizados; Dissertação de Mestrado; Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 1994.

CURY, J. E. R.; Queiroz, M.H.; Modular supervisory control of large scale discrete-event Systems; Discrete Event Systems: Analysis and Control; Kluwer Academic Publishers, pp. 103-110.; Ghent, Belgium, 2000.

DiCESARE et al.; Practice of Petri Net on manufacturing; Chapman & Hall; London; 1993.

DILTS, D. M.; et al.; The evolution of control Architecture automated manufacturing system; Journal of Manufacture Systems, n.10, p.79-93; 1991

FLYNN, M. J.; Some computer organizations and their effectiveness; IEEE Transactions Computers, vol. C-21, pp.948-960; 1972.

GHEZZI, C.; JAZAYERI, M.; Programming Language Concepts; John Wiley & Sons; 1987

GOMES, L.F.S.; Redes de Petri Reativas e Hierárquicas - Integração de Formalismo no Projeto de Sistemas Reativos de Tempo Real; Tese de Doutorado; Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa; Lisboa, Portugal; 1997.

GRANDI, G.; Metodologia para Especificação de Telecontrole em Subestações de Energia Elétrica; Dissertação de Mestrado; Universidade Federal de Santa Catarina; Florianópolis, SC; 2000

GROOVER, M.P.; Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing (Second Edition); Prentice-Hall; 2000

GUSTIN, G.B.; MIYAGI, P.E. e SANTOS FILHO, D.J.; Metodologia para a Modelagem de Sistemas de Elevadores em edifícios Inteligentes. In: CONEM 2000, Anais; Natal, RN; 2000



HASEGAWA, K. et al., Proposal of Mark Flow Graph for Discrete System Control; Trans. Of SICE, v.20, n.2, p.122-129; 1984

HO, Y.C.; Special Issue on Dynamics of Discrete Event Systems; Proc. of IEEE, v.77, p.3-6; 1989.

LEWIS, R.W.; Programming industrial control systems using IEC 1131-3 (Revised Edition); The Institution of Electrical Engineer; London, United Kingdom; 1998

MASUDA, R. e HASEGAWA, K.; Mark Flow Graph and its application to complex sequential control system; In: 13th. Hawaii Int. Conf. System Science. Proceedings. P.194-203; 1980.

MIYAGI, P.E. et al.; Modelagem de Serviço de Saúde Utilizando Rede de Petri;. In 4o. SBAI - SIMPÓSIO BRASILEIRO de AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, Anais,. SBA; São Paulo, SP; 2000

MIYAGI, P.E. et al.; Sistema de Manufatura: Tendências em Modelagem, análise e projeto; In: X COBEM; anais; Rio de Janeiro; 1989

MIYAGI, P.E.; Control System Design, Programming and Implementation for Discrete Event Production Systems by using Mark Flow Graph; Tese de Doutorado; Tokyo Institute of Technology; Japan; 1988

MIYAGI, P.E.; Controle Programável - Fundamentos do controle de sistemas a eventos discretos; Ed. Edgard Blücher Ltda; São Paulo; 1996.

MORAES, C.C. e CASTRUCCI, P.L; Engenharia de Automação Industrial; LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A; Rio de Janeiro, Brasil; 2001.

MUTHER, R.; Planejamento do Layout - Sistema SLP; Edgard Blucher Ltda; São Paulo; 1978

NAKAMOTO, F.Y.; MIYAGI, P.E. e SANTOS FILHO, D.J.; Uma Proposta de Algoritmo para a Determinação dos Ciclos Fechados de Espera em Sistemas Produtivos Flexíveis; XIV Congresso Brasileiro de Automática; 2002.

- NORONHA, M. C. G.; Escalonamento de reservas de domínio; Dissertação de Mestrado; Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2001
- NOVAES, A.G.; Métodos de otimização; Edgard Blucher Ltda; São Paulo; 1978
- PATTIPATI, K. R. et al.; On mapping a tracking algorithm onto parallel processors; IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems; Vol. 26, No. 5, Sept, pp774-791; 1990
- PETERSON, J.L.; Petri Net Theory and the Modeling of Systems; Prentice-Hall, Englewood Cliffs; N.J.; 1981.
- PRESSMAN, R.S.; Software engineering, ed.5; McGraw-Hill; Boston; 2000
- PUCCINI, A.L. e PIZZOLATO, N.D.; Programação Linear; Livros Téc. Cient. Ed. S.A.; São Paulo; 1987
- QUEIROZ, M.H. e CURY, J. E. R.; Modular control of composed systems; Proc. of the American Control Conference; Chicago, USA; 2000.
- REISIG, W.; A Primer in Petri Nets Design; Springer-Verlag, Berlin Heidelberg; 1992
- REISIG, W.; Petri Nets: An Introduction; Springer-Verlag; Berlin Heidelberg; 1985
- RILLO, M.; Controlador programável utilizando grafos de comando etapa - transição; Dissertação de Mestrado; Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 1983.
- ROCKWELL, Logix5000 Controllers Execution Time and Memory Use Reference Manual, 1756 ControlLogix®, 1769 CompactLogix, 1789 SoftLogix, 1794 FlexLogix, PowerFlex® 700S with DriveLogix 2000, Publication 1756-RM087B-EN-E; September 2003
- SAATY, T.L.; The analytic hierarchy process :planning, priority setting, resource allocation; McGraw-Hill International Book Co.; London; 1980
- SANTOS FILHO, D. J. e MIYAGI, P. E., Sistemas de Eventos Discretos e seu Controle. In: 1º COBISA/CINISA; Anais ISA International; São Paulo, SP, p.2.1-12; 1991

SANTOS FILHO, D.J. e MIYAGI, P.E.; Enhanced Mark Flow Graph to Control Flexible Manufacturing Systems; *Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences*, ABCM., v.17, n.2, p.232-248; Rio de Janeiro, RJ; 1995

SANTOS FILHO, D.J. e MIYAGI, P.E.; Proposta de uma Ferramenta Automática de Programação de CPs a partir de Modelos MFG; In XIV COBEM - CONGRESSO BRASILEIRO de ENGENHARIA MECÂNICA, Anais, CD-ROM. ABCM; Bauru; 1997.

SANTOS FILHO, D.J.; Proposta do Mark Flow Graph Estendido para a Modelagem e Controle de Sistemas Integrados de Manufatura; Dissertação de Mestrado; Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 1993

SANTOS FILHO, D.J.; Aspectos do Projeto de Sistemas Produtivos; Tese de Livre docência; Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 2000.

SANTOS FILHO, D.J.; Controle de Sistemas Antropocêntricos de Produção Baseado em Redes de Petri Interpretadas; Tese de Doutorado; Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 1998

SANTOS, R.R.; Escalonamento de aplicações paralelas; Dissertação de Mestrado; Universidade de São Paulo; São Carlos, SP; 2001

SHIVARATRI, N. G. et al; Load Distribution for Locally Distributed Systems; *Computer*, v. 25, pp. 33-44; 1992.

SPRUNT, B.; SHA, L. e LEHOCZHY, J.; Aperiodic task scheduling for hard real time systems; *Journal of Realtime Systems*,. 1(1)27:60, p. 27-60; 1989

TEDESCHI, S.G.G.; Seleção de meta-regras para alteração dinâmica do despacho da produção; Tese de Doutorado; Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; 1997

VALDEHI, V. e KRISHNAN, C.N.; Data Token Heuristic Scheduling of Kalman Algorithm onto a Message Passing Multiprocessor System; *Control Eng. Practice*, Vol 5, nº 12, pp 1691-1703; 1997

VILLANI, E. et al.; Metodologia para Modelagem de Sistemas de Ar condicionado em Edifícios Inteligentes, Controle & Instrumentação, ano 5 nº46, SUCESU-SP, São Paulo, SP, 2000

WONHAM, W.M. e RAMADGE, P.J.G.; The control of discrete event systems; Proceedings of the IEEE, 77, 81-98; 1989