

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTRUTURAÇÃO DA MODELAGEM DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS E SUA  
APLICAÇÃO A UM BANCO DE TESTES PARA SISTEMAS HIDRÁULICOS

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA A  
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

Victor Juliano De Negri

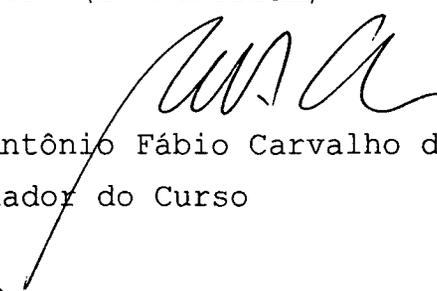
Florianópolis, março de 1996

ESTRUTURAÇÃO DA MODELAGEM DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS E SUA  
APLICAÇÃO A UM BANCO DE TESTES PARA SISTEMAS HIDRÁULICOS

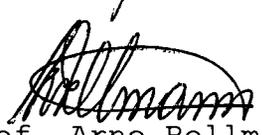
VICTOR JULIANO DE NEGRI

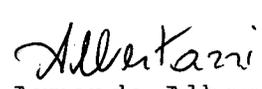
ESTA TESE FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
DOUTOR EM ENGENHARIA  
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL  
PELO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Hermann Adolf Harry Lücke, Dr.-Ing.  
Orientador (in memoriam)

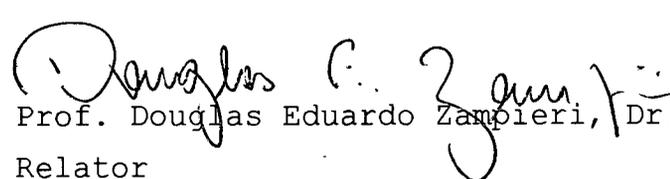
  
Prof. Antônio Fábio Carvalho da Silva, Dr. Eng.  
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

  
Prof. Arno Bollmann, Dr.-Ing.  
Presidente - Co-orientador

  
Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr, Dr. Eng.

  
Prof. Carlos Eduardo Pereira, Dr.-Ing.

  
Prof. Douglas Eduardo Zampieri, Dr.-Ing.  
Relator

  
Prof. Nelson Back, Ph. D.

À  
Rosely e  
Fernanda,  
com amor.

## HOMENAGEM PÓSTUMA

Registro aqui o profundo agradecimento ao orientador prof. Hermann Adolf Harry Lücke que faleceu no momento em que este trabalho estava em fase de conclusão e no qual teve marcante participação, através de sua busca incessante ao conhecimento e extraordinária dedicação.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus colegas e amigos, que por muitas vezes estiveram atentos as minhas idéias e expectativas, acolheram meus sentimentos e acompanharam a longa jornada para a consecução desta tese.

Aos professores Arno Bollmann, co-orientador, e Irlan von Linsingen, pela amizade, confiança e incentivo.

Com muito carinho agradeço a compreensão, estímulo e sugestões recebidos de minha mulher Rosely.

Aos colegas Eng. Agnelo Denis Vieira, Prof. André Ogliari e Bel. Comp. Mauro Nortanicola Madeira fica o registro da profícua troca de informações, fundamental na vida profissional.

**SUMÁRIO**

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - A Investigação Experimental no Contexto da Hidráulica	1
1.2 - Conceito de Bancos de testes e de Ensaios	2
1.3 - Bancos de Testes e de Ensaios como Sistemas Automáticos	4
1.4 - Objetivos da Tese	6
1.5 - Conteúdo da Tese	7
2 - FORMAS CORRENTES DE DESCRIÇÃO DE SISTEMAS AUTOMATIZADOS	8
2.1 - Exemplos de Sistemas de Automatizados	8
2.2 - Exemplos de Sistemas de Aquisição e Controle Genéricos	16
2.3 - Análise Crítica	21
3 - CONCEITUAÇÃO E MODELAGEM DE SISTEMAS	24
3.1 - Definição de Sistema	24
3.2 - Perspectiva Sistêmica e o Paradigma de Orientação por Objetos	26
3.3 - Caracterização da Modelagem	31
3.4 - Definição e Modelagem de Sistemas Técnicos	37
3.4.1 - Descrição da Rede de Petri Canal/Agência	39
3.4.2 - Caracterização da Informação	42
3.4.2 - Caracterização da Energia e da Matéria	45
4 - CONCEITUAÇÃO E MODELAGEM DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS	47
4.1 - Caracterização de Sistemas Automáticos	47
4.2 - Modelagem Genérica de Sistemas Automáticos	49
4.3 - Sistemas de Medição	53

4.3.1 - Concretização dos Sistemas de Medição	63
4.4 - Sistemas de Atuação	65
4.5 - Modelo Refinado de Sistema Automático	73
5 - PROJETO DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS	76
5.1 - Comparação entre o Projeto de Sistemas Técnicos e de Software	77
5.2 - Processo de Projeto de Sistemas Automáticos	83
5.2.1 - Modelos no Projeto	87
6 - PROJETO DE UM BANCO DE TESTES AUTOMÁTICO PARA SISTEMAS HIDRÁULICOS	93
6.1 - Análise Preliminar do Problema	93
6.1.1 - Testes Normalizados para Componentes Hidráulicos	94
6.2 - Análise e Concepção Gerais	98
6.2.1 - Análise e Concepção da Parte Energético/Material	100
6.2.2 - Análise e Concepção da Parte de Informação	112
6.2.3 - Condensação do Modelo Funcional/Estrutural Geral	121
6.3 - Etapas Concluídas na Construção do Banco de testes	124
7 - CONCLUSÕES	131
8 - BIBLIOGRAFIA	135
APÊNDICE A - REGRAS DE UTILIZAÇÃO DA REDE DE PETRI CANAL/AGÊNCIA	151
A.1 - Configuração Típica	151
A.2 - Regras de Interpretação	152
A.3 - Regras de Refinamento e Condensação	153

APÊNDICE B - DIAGRAMA DE ESTADOS	155
B.1 - Elementos do Diagrama de Estados	155
B.2 - Configurações Típicas	157

## LISTA DE FIGURAS E TABELAS

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - "Sistema hidráulico do dinamômetro" (CONRAD et alii, 1990)	10
Figura 2.2 - "Sistema de aquisição de dados e controle" (CONRAD et alii, 1990)	11
Figura 2.3 - Diagrama geral do sistema de monitoração (DIONISI et alii, 1991)	13
Figura 2.4 - "Instrumentação do sistema" (HUNT et alii, 1984)	15
Figura 2.5 - "Diagrama de fluxo de aquisição de dados e controle" (BURR-BROWN CORP., 1990)	17
Figura 2.6 - "Diagrama de blocos de um sistema de aquisição de dados e controle": a) Para barramento externo, b) Para barramento interno (BURR-BROWN CORP., 1990)	18
Figura 2.7 - "Sistema de aquisição de dados e controle" (HEWLETT PACKARD, 1990)	20
Figura 3.1 - Modelo comportamental de uma função	27
Figura 3.2 - Modelo comportamental de um objeto (WEGNER (1989)	28
Figura 3.3 - Modelo funcional de um sistema técnico	38
Figura 3.4 - Rede de Petri Canal/Agência - Elementos básicos	39
Figura 3.5 - "Triângulo da significação" (SOWA, 1984)	43
Figura 4.1 - Modelo funcional/estrutural condensado de um sistema automático	52
Figura 4.2 - "Modelo geral da medição" (FIOK et alii, 1988)	54

Figura 4.3 - "Principais componentes funcionais de um sistema de medição" (FINDELSTEIN, 1985)	55
Figura 4.4 - "Sistema generalizado de medição" (SCHNEIDER & FLESCH, 1989)	57
Figura 4.5 - Modelo funcional/estrutural de um sistema de medição: a) Forma condensada; b) Forma refinada	58
Figura 4.6 - Resultados da calibração da cadeia de instrumentos de medição - transdutor, condicionador de sinais e interface	60
Figura 4.7 - Mecanismo de criação das imagens	61
Figura 4.8 - Sistema de medição de pressão. a) Modelo estrutural/funcional; b) Modelo comportamental	65
Figura 4.9 - Modelo funcional/estrutural de um sistema de atuação genérico	66
Figura 4.10 - Sistema de atuação em vazão: a) Modelo funcional/estrutural; b) Modelo estrutural; c) Modelo comportamental	69
Figura 4.11 - Sistema de atuação em posição com controlador digital - Modelo funcional/estrutural	70
Figura 4.12 - Sistema de atuação em posição com controlador digital - Modelo comportamental	71
Figura 4.13 - Sistema de atuação em posição com controlador analógico - Modelo funcional/estrutural	72
Figura 4.14 - Sistema de atuação em posição com controlador analógico - Modelo comportamental	73
Figura 4.15 - Modelo funcional/estrutural refinado de um sistema automático	74

Figura 5.1 - Modelo funcional do processo de projeto para sistemas automáticos	85
Figura 5.2 - Sistema de acionamento com velocidade angular regulável - Modelos funcionais/estruturais e comportamentais na fase de concepção	91
Figura 6.1 - Modelo funcional/estrutural geral do banco de testes automático	99
Figura 6.2 - Circuito de testes segundo ISO 4392-2 (ISO, 1989b)	101
Figura 6.3 - Modelo funcional para concepção geral da parte energético/material do banco (Ver tabela 6.2)	105
Figura 6.4 - Modelo funcional da parte energético/material do banco para atender a ISO 4392-2 (ISO, 1989b)	109
Figura 6.5 - Modelo funcional da parte energético/material do banco para atender a ISO 4411 (ISO, 1986b)	110
Figura 6.6 - Modelo funcional da parte energético/material do banco para atender a ISO 6404 (ISO, 1985b)	111
Figura 6.7 - Modelo funcional/estrutural geral para concepção da parte de informação do banco	114
Figura 6.8 - Modelo comportamental da execução dos testes normalizados	119
Figura 6.9 - Refinamentos dos recursos de energia e matéria: a) Válido para $H_1, H_3, h_d, E_1, E_3$ ; b) Válido para $H_2, H_4, H_x, R_{1,2}, R_3, Tr_{1,2}, Tr_3, P_x$	122
Figura 6.10 - Modelo funcional/estrutural condensado do banco de testes	123
Figura 6.11 - Visão geral do banco de testes automático.	125

Figura 6.12 - Circuito hidráulico da UPCH.	127
Figura 6.13 - Painel de monitoração para operação da UPCH no modo manual.	128
Figura 6.14 - Painel de acionamento para operação da UPCH no modo manual.	129
Figura 6.15 - Interface gráfica para monitoramento e acionamento da UPCH no modo computador.	
Figura A.1 - Rede de Petri C/A - Elementos básicos	151
Figura A.2 - Exemplos de configurações da rede C/A	152
Figura A.3 - Mecanismo de refinamento e condensação de redes C/A	153
Figura B.1 - Diagrama de estados - Elementos básicos	156
Figura B.2 - Configurações típicas do diagrama de estados (rede de estados) segundo EMBLEY et alii (1992)	157

#### LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Simbologia das variáveis empregadas nas figuras 4.10 à 4.14	68
Tabela 5.1 - Subdivisão do projeto de produtos industriais	79
Tabela 5.2 - Subdivisão do desenvolvimento de software orientado por objetos	80
Tabela 5.3 - Subdivisão do projeto de sistemas automáticos	83
Tabela 6.1 - Normas analisadas para a caracterização dos testes	97
Tabela 6.2 - Simbologia empregada na figura 6.3	106

## SIMBOLOGIA

## Símbolos

a	=	Atributo
at	=	Aterramento
B	=	Bits
bm	=	Bombeamento do fluido
B0(S)	=	Sustentador de ordem zero
CR	=	característica de resposta
DM	=	Dispersão da medição
dr	=	Direcionamento do fluido
ds	=	Descarga do fluido
E	=	Energia elétrica
ES	=	Erro sistemático
ene	=	Energia
f	=	Função, Função de saída
F	=	Força
FH	=	Fluido hidráulico
fx	=	Fixação
g	=	Função de transição de estado
G	=	Campo gravitacional
H	=	Fluido hidráulico com energia
i	=	Corrente elétrica
In	=	Indicação
inf	=	Informação

mat	=	Matéria
n	=	Rotação
$K_d$	=	Ganho do transdutor-condicionador de sinais
$K_p$	=	Ganho do controlador proporcional
p	=	Pressão
P	=	Energia pneumática
qv	=	Vazão
R	=	Energia mecânica rotacional
S	=	Campo sonoro, Operador Laplace
SB	=	Sinal bruto
SC	=	Sinal condicionado
t	=	Tempo
T	=	Torque, Período de amostragem
Tm	=	Campo térmico
Tr	=	Energia mecânica translacional
U	=	Entrada
U	=	Tensão
v	=	Velocidade
x	=	Deslocamento
X	=	Estado
X'	=	Estado após a transição
Y	=	Saída
$\Delta$	=	Variação
$\theta$	=	Temperatura
$\nu$	=	Viscosidade cinemática
$\rho$	=	Massa específica

$\tau$	= Contaminação do fluido
$\varphi$	= Deslocamento angular
$\omega$	= Velocidade angular, Frequência natural
$\zeta$	= Razão de amortecimento

### Subíndices

1	= Alimentação
2, 4	= Trabalho
3	= Retorno
d	= Dreno, Desejado
a	= Atualização
ex	= Externo
i	= Inverso
in	= Interno
f	= Fluido
m	= Medido
n	= Nominal
r	= Real
x	= Pilotagem

### Superíndices

AD	= Relativo ao conversor A/D
AP	= Relativo ao amplificador de potência

C = Relativo ao controlador  
CS = Relativo ao condicionador de sinais  
DA = Relativo ao conversor D/A  
T = Relativo ao Transdutor  
V = Relativo à Válvula

## RESUMO

Este trabalho trata da modelagem de sistemas conhecidos como automatizados e mecatrônicos e da concepção de bancos de testes automáticos para atender as recomendações da ISO para componentes hidráulicos.

Nos capítulos iniciais são discutidos os conceitos das áreas de sistemas, metrologia, mecatrônica e orientação por objetos, que fornecem subsídios à estruturação da modelagem de sistemas que processam energia, matéria e informação. Esta estruturação fundamenta-se no uso integrado de modelos, principalmente diagramas, possibilitando descrever as suas características funcionais, estruturais e comportamentais de forma consistente.

A rede de Petri Canal/Agência, por ser uma notação multidisciplinar e de fácil interpretação, é empregada como um modelo central que estabelece os vínculos entre diagramas técnicos de uso difundido, promovendo a comunicação entre especialistas de diversas áreas.

No contexto de projeto, é estabelecido um paralelo entre a engenharia de produtos industriais e a engenharia de **software** orientado por objetos resultando na proposição de diretrizes para o projeto de sistemas automáticos.

Finalmente, a estruturação da modelagem e as diretrizes de projeto propostas são empregadas na descrição de circuitos e procedimentos de testes recomendados pela ISO na área de hidráulica. Desta forma, consegue-se substituir grande parte de informações em linguagem natural por diagramas formais que

minimizam erros de interpretação, integram as normas e servem como modelo de concepção para o banco de testes.

**AUTOMATIC SYSTEMS MODELLING STRUCTURATION AND IT'S APPLICATION  
TO AN HYDRAULIC SYSTEMS TEST BENCH**

**ABSTRACT**

This work refers to the modeling of automatized and mechatronics systems and conception of automatic test bench aiming to attend the hydraulic components ISO recommendations.

At first, the concepts of systems, metrology, mechatronics and oriented object are discussed. These concepts give the needed base to the modeling structuration of systems that process energy, matter and information.

The Channel/Instance Petri net, being of easy interpretation and of multidisciplinary notation, is used as core model among well know technical diagrams, promoting the communication among specialists of several areas during the systems analysis and design.

Particularly, in the design context is established a parallel between industrial product engineering and oriented object software engineering resulting in the automatic systems design process proposal.

Ar last, the modeling structuration and design process proposed are used in the ISO hydraulic tests procedures. In this sense, many information can be replaced by formal diagrams that minimize interpretations errors, integrate standards and can be used as conception models to the test bench.

## 1 - INTRODUÇÃO

### 1.1 - A Investigação Experimental no Contexto da Hidráulica

A importância do trabalho experimental para o desenvolvimento e produção de componentes e circuitos hidráulicos, é evidenciada em diversas publicações técnico-científicas e recebe grande atenção dos profissionais ligados à pesquisa e à fabricação.

No contexto sistêmico, a modelagem matemática dos componentes e circuitos hidráulicos é praticamente ineficaz quando não está acompanhada de uma validação experimental. Este fato decorre da natureza complexa dos sistemas hidráulicos, cujo comportamento depende da composição de efeitos diversos como escoamento de fluidos em câmaras e orifícios, campos magnéticos em solenóides, atritos compostos (estático, dinâmico, viscoso, colamento hidráulico etc.) entre outros, onde cada um destes é, normalmente, descrito por equações não-lineares e/ou com parâmetros distribuídos.

As simplificações do modelo matemático, somadas aos fenômenos físicos não identificados, dificultam a determinação correta dos valores dos parâmetros presentes. Estes parâmetros, além da própria estrutura do modelo, podem ser estimados ao se compararem as respostas teórica e experimental ou, ainda, através de técnicas de identificação, como a resposta ao degrau, a resposta em frequência e o controle adaptativo.

Os modelos matemáticos possuem um enfoque bastante formal e, muitas vezes, distante da linguagem empregada no

desenvolvimento, produção e aplicação dos componentes e sistemas hidráulicos. Usualmente, caracteriza-se o comportamento destes através de parâmetros como ganho, rendimento e constante de tempo e, ainda, de curvas em regime permanente e transiente, o que pode ser observado nos catálogos de produtos e nas normas de testes.

No entanto, as atividades experimentais apresentam uma série de contratempos como morosidade, possibilidade de erros não prontamente detectáveis, elevado custo de equipamentos e dificuldade de obtenção das condições experimentais desejadas. Os instrumentos e programas para aquisição e controle, atualmente disponíveis, solucionam ou amenizam diversos problemas, sem considerar que o avanço tecnológico impõe novos desafios a serem vencidos no trabalho experimental.

O projeto e a construção do sistema experimental são, possivelmente, as tarefas mais críticas. Seja pela dificuldade de escolherem-se previamente as soluções técnicas mais adequadas ao problema, seja pela tendência de omitir-se do planejamento experimental. Tais fatos afetam a eficiência, a confiabilidade e flexibilidade do trabalho experimental.

## **1.2 - Conceito de Bancos de testes e de Ensaios**

A investigação experimental, como forma de determinação das características reais de um sistema, faz-se necessária em diversas atividades científicas e tecnológicas. Dentre estas, pode-se destacar a *pesquisa experimental*, destinada a auxiliar

na solução de problemas científicos, tais como a validação de modelos teóricos, a formulação de relações empíricas generalizadas e o estudo de fenômenos para o desenvolvimento de teorias (DOEBELIN, 1983). Nestes casos, os sistemas e os procedimentos experimentais normalmente são concebidos para atender a um problema específico, mas devem ser detalhadamente descritos para que outros pesquisadores possam empregar os resultados em seus trabalhos.

Nas atividades tecnológicas, tais como projeto/desenvolvimento, produção e manutenção de produtos, estão em jogo relações comerciais e, por conseguinte, os meios de análise aplicados nestas atividades devem ser do conhecimento e consentimento de todas as partes envolvidas quais sejam, o produtor/prestador de serviço, o fornecedor e o consumidor/cliente. Neste sentido existem os procedimentos de teste normalizados que orientam as tarefas experimentais e cuja utilização é hoje reforçada pelas normas internacionais de gestão e garantia de qualidade (ISO<sup>1</sup>, 1987a).

Vale ressaltar que as tarefas experimentais aplicadas ao desenvolvimento de produtos, denominadas *ensaios de desenvolvimento* ((BECKWITH & BUCK, 1973) e (EDGE & SEEL, 1979)), são similares à *pesquisa experimental* por pertencerem também a um estudo iterativo, no qual fornecem subsídios ao projetista ou pesquisador para a validação ou aprimoramento das soluções propostas. Deste modo, dificilmente estes ensaios seguem

---

<sup>1</sup> **International Organization for Standardization.**

rigorosamente os procedimentos normalizados, mas podem utilizá-los como referências fundamentais na sua estruturação.

De outro lado, as atividades experimentais descritas na série ISO 9000 (ISO, 1987b) como *testes de recepção*, *testes durante a produção* e *testes finais*, além de *avaliações aplicadas durante a vida útil do produto*, podem seguir procedimentos normalizados sem que haja a necessidade de maiores adaptações.

Tendo em vista que os termos *teste* e *ensaio* não possuem uma conotação técnica estabelecida, nesta tese devem ser entendidos por:

- *Teste* é um experimento que envolve procedimentos claramente definidos e aplicados objetivamente.

- *Ensaio* é um experimento cujos procedimentos sofrem influência dos resultados a medida que estes vão sendo obtidos. Neste caso é fundamental a presença de um elemento de tomada de decisão, seja humano ou não<sup>1</sup>.

Ao conjunto de elementos necessários à realização de um experimento, incluindo componentes físicos, **software** e operador, atribui-se o nome de *banco de testes* ou *banco de ensaios*, de acordo com o tipo de tarefa experimental.

### 1.3 - Bancos de Testes e de Ensaios como Sistemas Automáticos

Os bancos de testes e ensaios, bem como os sistemas de monitoramento e controle industrial e ambiental e de

---

<sup>1</sup> Sob este enfoque, a pesquisa experimental é uma forma de ensaio.

monitoramento de pacientes na área médica, que englobam tarefas de coleta, processamento, apresentação de informações e, possivelmente, o controle das variáveis do meio físico, têm sido analisados e projetados no âmbito dos *sistemas de aquisição e controle*. Esta área técnica emprega os princípios da metrologia, eletrônica e informática para criar estruturas que realizem as tarefas citadas acima, pressupondo-se que o meio físico ou químico já tenha sido projetado ou construído.

Porém, sabe-se que o comportamento de um sistema é reflexo da interação de todos os seus componentes. Logo, a análise ou o projeto que integre o processamento de dados e sinais com os componentes que realizam as ações físicas ou químicas, confere maior garantia na descrição ou previsão do funcionamento global.

Ao longo deste trabalho, sistemas com este perfil são denominados de *sistemas automáticos*, destacando-se a capacidade de operar por si mesmos por meio da extração de informações do meio físico e, após o processamento destas, da alteração do fluxo de energia ou matéria. A realização destes sistemas dá-se através da combinação de diversas tecnologias que, no caso dos bancos de testes em hidráulica, envolve as áreas de mecânica, elétrica, eletrônica, pneumática, hidráulica e informática.

Desde o final da década de 70, o projeto de sistemas multitecnológicos tem sido objeto de estudo da mecatrônica porém, dada a dificuldade de compatibilização dos conceitos e formas de representação das diferentes áreas, ainda não foi estabelecido um modelo de consenso para o processo de projeto.

Além disso, percebe-se que as diretrizes estabelecidas pela engenharia de software têm sido pouco consideradas, o que é um aspecto negativo dada a importância do processamento de informações nos sistemas automáticos.

#### 1.4 - Objetivos da Tese

O objetivo inicial desta tese é o projeto de um banco de testes automático para sistemas hidráulicos que atenda a maioria dos componentes hidráulicos industriais e às recomendações da ISO.

A fim de que o processo de projeto seja claro e bem estruturado e que se obtenha contribuições científicas e tecnológicas válidas para sistemas automáticos em geral, enfatiza-se a estruturação da modelagem de sistemas automáticos visando-se encontrar um conjunto de modelos que descreva o sistema em diversas perspectivas e que auxilie no seu entendimento e desenvolvimento.

Como meio de demonstração do uso e integração destes modelos propõe-se, nesta pesquisa, o estabelecimento das diretrizes de projeto de sistemas automáticos como resultado da adequação da engenharia de produto e da engenharia de **software**.

Finalmente, busca-se a aplicação da modelagem genérica proposta para o projeto do banco de testes automático com ênfase na formalização das especificações apresentadas nas normas ISO.

### 1.5 - Conteúdo da Tese

Este trabalho tem início com a análise das formas tradicionais de representação de sistemas automatizados e que naturalmente seriam empregadas no projeto de um banco de testes. Como resultado, identifica-se a necessidade de um enfoque sistêmico, o que é objeto de discussão no capítulo 3, principalmente quanto ao emprego de perspectivas e da modelagem de sistemas técnicos.

No capítulo 4 este estudo é particularizado à categoria de sistemas automáticos, conceituando e modelando-os com base na mecatrônica, metrologia, sistemas e informática. A utilização dos modelos sugeridos é evidenciado através do processo de projeto apresentado no capítulo 5.

Finalizando este trabalho, apresenta-se no capítulo 6 detalhes da concepção de um banco de testes para componentes hidráulicos, enfatizando a formalização das especificações encontradas nas normas de teste através dos modelos discutidos nos capítulos anteriores. A avaliação geral do trabalho desenvolvido e a identificação de lacunas a serem preenchidas em trabalhos futuros são objeto do capítulo 7.

## 2 - FORMAS CORRENTES DE DESCRIÇÃO DE SISTEMAS AUTOMATIZADOS

Analisa-se, neste capítulo, os procedimentos atualmente adotados no projeto e implementação de sistemas automatizados, especialmente de bancos de teste/ensaio automatizados na área de sistemas hidráulicos.

Através da pesquisa bibliográfica realizada em diversas revistas e anais nacionais e internacionais constatou-se que, infelizmente, são poucos os artigos que descrevem o desenvolvimento de bancos. Normalmente estas informações encontram-se em relatórios técnicos de acesso restrito ou são apresentadas parcialmente através de relatos de experimentos que utilizam um sistema experimental.

Esta limitação pode ser contornada considerando-se que o estudo da automatização de sistemas, como realizado em RAZLAFF (1987) e FLESCH & LÜCKE (1990), normalmente é bastante abrangente, não se restringindo a áreas técnicas ou aplicações específicas. Assim, é possível caracterizar a forma de descrição e projeto de bancos de teste a partir da análise de sistemas similares.

Deste modo, apresenta-se na próxima seção exemplos típicos de sistemas de teste e de monitoração e na seção 2.2 discute-se o tratamento dispensado pelos fabricantes de sistemas de aquisição e controle.

## 2.1 - Exemplos de Sistemas de Automatizados

Observa-se inicialmente o trabalho de CONRAD et alii (1990) que trata de um sistema experimental para identificação de características de regime permanente de bombas e motores. Este consiste, basicamente, de um dinamômetro servocontrolado que permite a medição das quatro principais variáveis necessárias para descrição do comportamento em regime permanente de bombas e motores hidráulicos, quais sejam: torque ( $T$ ), rotação ( $n$ ), diferença de pressão entre entrada e saída ( $\Delta p$ ) e vazão ( $qv$ ). Este sistema pode atuar como freio ou elemento motriz e realizar o controle simultâneo em malha fechada de duas das variáveis principais, alcançando os pontos de operação necessários (80 pontos tipicamente) para a descrição do componente em teste.

Além de maiores detalhes quanto aos recursos e operacionalidade deste dinamômetro, o artigo apresenta o circuito hidráulico correspondente, descrevendo superficialmente os componentes utilizados (figura 2.1). O sistema de aquisição de dados e controle é apresentado através do esquema mostrado na figura 2.2 auxiliado por uma tabela de especificação dos transdutores utilizados.

Ao microcomputador IBM-AT indicado na figura 2.2 ficam restritas as operações de monitoramento, armazenamento e posterior manipulação de dados e apresentação. As tarefas de controle, aquisição de sinais e estímulo foram implementadas em um microcomputador dedicado.

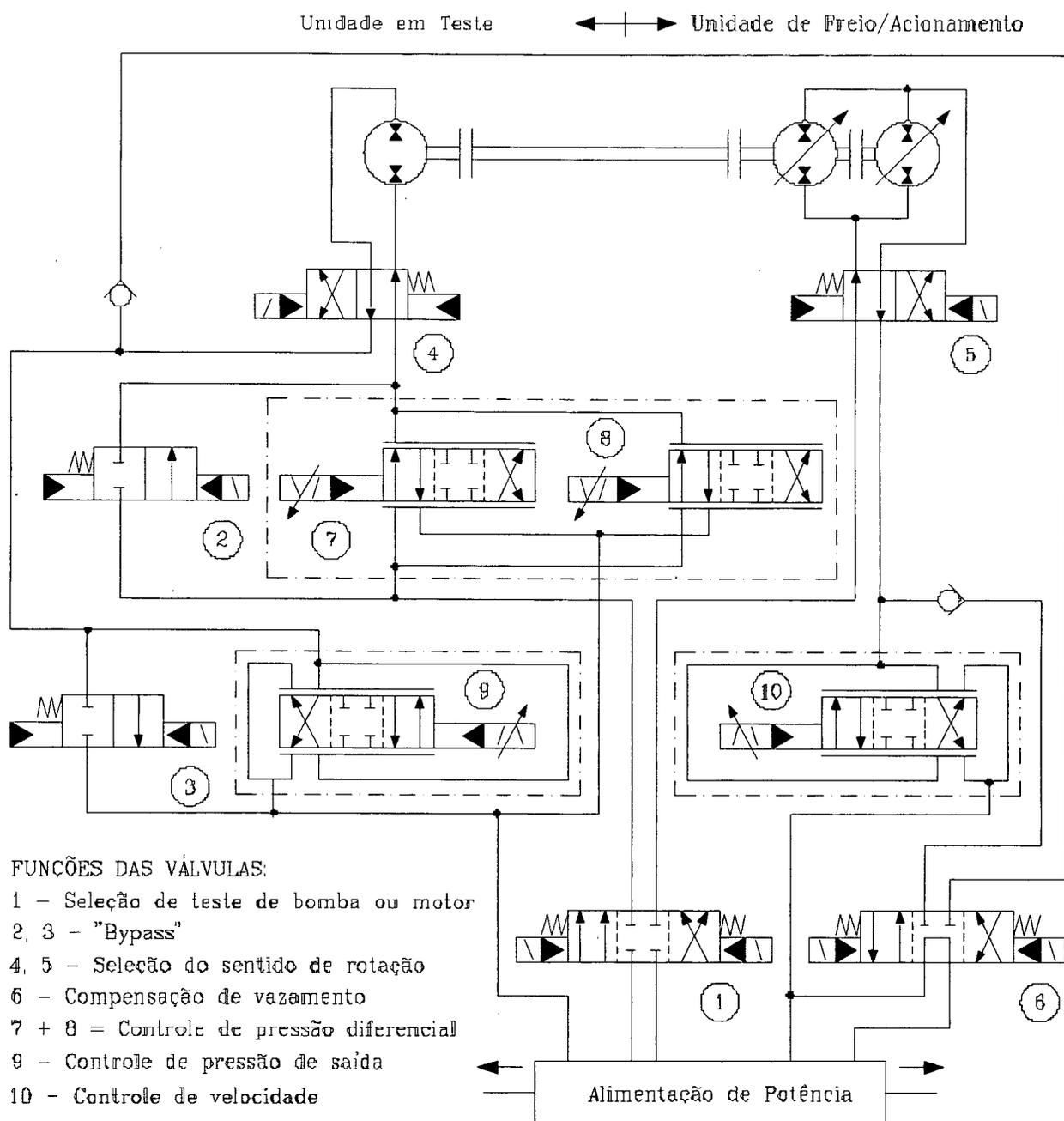


Figura 2.1 - "Sistema hidráulico do dinamômetro" (CONRAD et alii, 1990).

Outro exemplo a ser citado é a publicação de DIONISI et alii (1991) que apresenta um sistema de aquisição de dados desenvolvido na Divisão de Construção Civil do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A.). Apesar deste não ser da área de hidráulica, utiliza-se-o por explorar a

parte de **software** com mais detalhes que a maioria dos artigos.

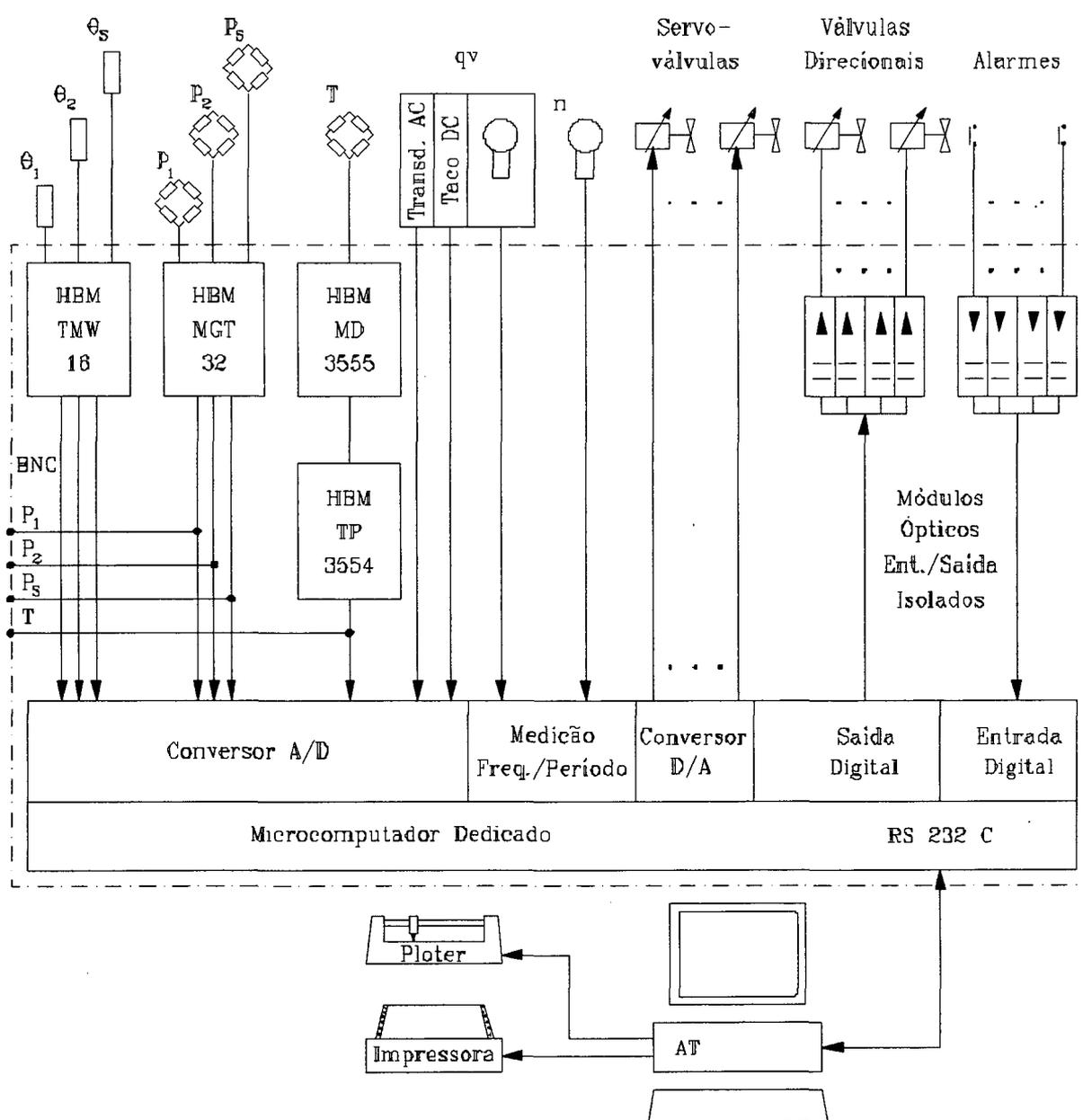


Figura 2.2 - "Sistema de aquisição de dados e controle" (CONRAD et alii, 1990).

O **hardware** desenvolvido consiste de uma placa para inserção no barramento de expansão de microcomputadores padrão PC sendo constituído de uma seção de processamento analógico (amplificadores, filtros e amostradores), um conversor

analógico-digital, uma seção de controle e uma interface digital para o barramento do microcomputador. O artigo descreve as características técnicas destes elementos, e apresenta um circuito elétrico genérico do **hardware**.

O programa de acionamento e controle do **hardware**, desenvolvido em Pascal e Assembler, é descrito em linguagem natural, dando ênfase ao funcionamento da rotina de aquisição e à forma de armazenamento de dados.

Este conjunto de aquisição de dados foi empregado no desenvolvimento de um sistema de monitoração de cravação de estacas para construção civil destinado à avaliação da capacidade de carga e integridade da estaca, ao fornecimento de indicadores para o controle do processo de cravação e à coleta de dados para análise posterior em escritório.

Especificamente, este sistema destina-se ao monitoramento e registro da força e da velocidade decorrentes do impacto do martelo sobre a estaca. O diagrama geral, apresentado conforme a figura 2.3, mostra a interrelação entre os elementos em **hardware** e **software** através do fluxo de sinais e dados.

Segundo os autores, o **software** compõe-se basicamente de três módulos:

- Rotina de aquisição de dados vinculada à placa de aquisição descrita anteriormente.
- Programa de análise que, além do processamento matemático, também é responsável pelo ajuste nos sinais digitalizados, apresentação de sinais em tela e emissão de

resultados.

- Rotina de entrada de dados por parte do usuário.

Observa-se que esta divisão não está plenamente de acordo com a figura 2.3, porém a junção das duas informações permite perceber a estrutura do **software**.

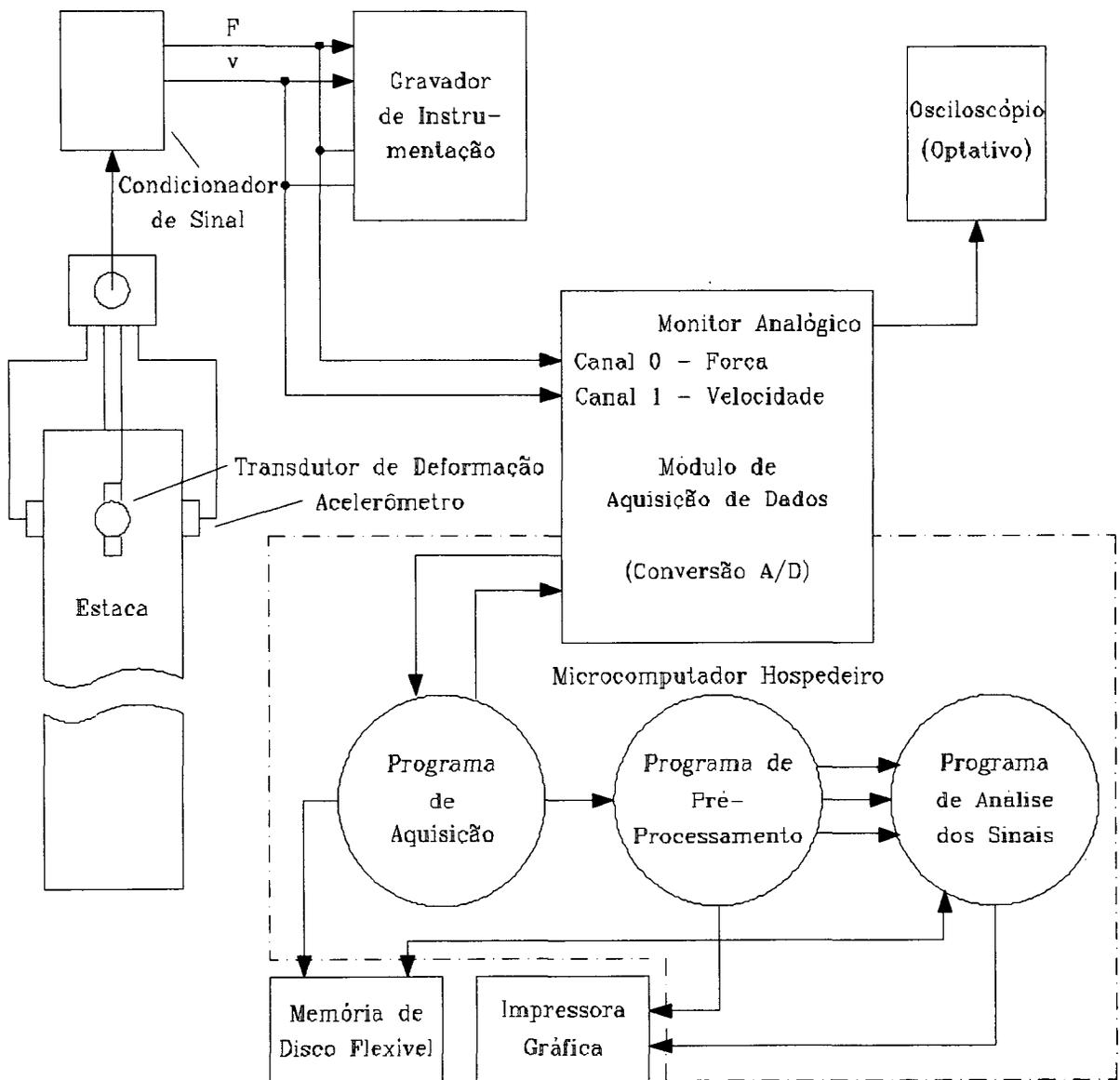


Figura 2.3 - Diagrama geral do sistema de monitoração (DIONISI et alii, 1991).

Por fim, um exemplo típico de banco de testes é apresentado em HUNT et alii (1984), destinado à realização de testes de durabilidade em bombas hidráulicas nas seguintes condições:

- Teste de bomba nova.
- Teste de bomba com um componente danificado.
- Teste de bomba através de uma série de ciclos de desgaste, sendo o desgaste gerado pela adição de impureza tipo sílica ao fluido hidráulico.

A determinação da vida útil da bomba dá-se através de três tipos de análise: em regime permanente, em regime transiente e por amostragem do fluido, as quais determinam os sistemas de medição necessários.

Assim como nos dois artigos abordados anteriormente, a estrutura global deste banco de teste é apresentada através de um circuito de aquisição e controle que, neste caso, está combinado com o circuito hidráulico que alimenta a bomba em teste (figura 2.4).

A estrutura e o funcionamento dos elementos presentes neste diagrama são apresentados em linguagem natural e através de circuitos elétricos. Os programas de aquisição de dados e de análise são descritos por meio de fluxogramas.

A principal diferença no desenvolvimento deste banco, apresentado em 1984, com relação aos dois exemplos acima que são da década de 90, é que diversas funções implementadas em **hardware**, como as medições dinâmicas de torque e pressão e o controle de velocidade indicados na figura 2.4, hoje são

realizados preferencialmente por **software** em função da ampliação dos recursos computacionais e da flexibilidade propiciada.

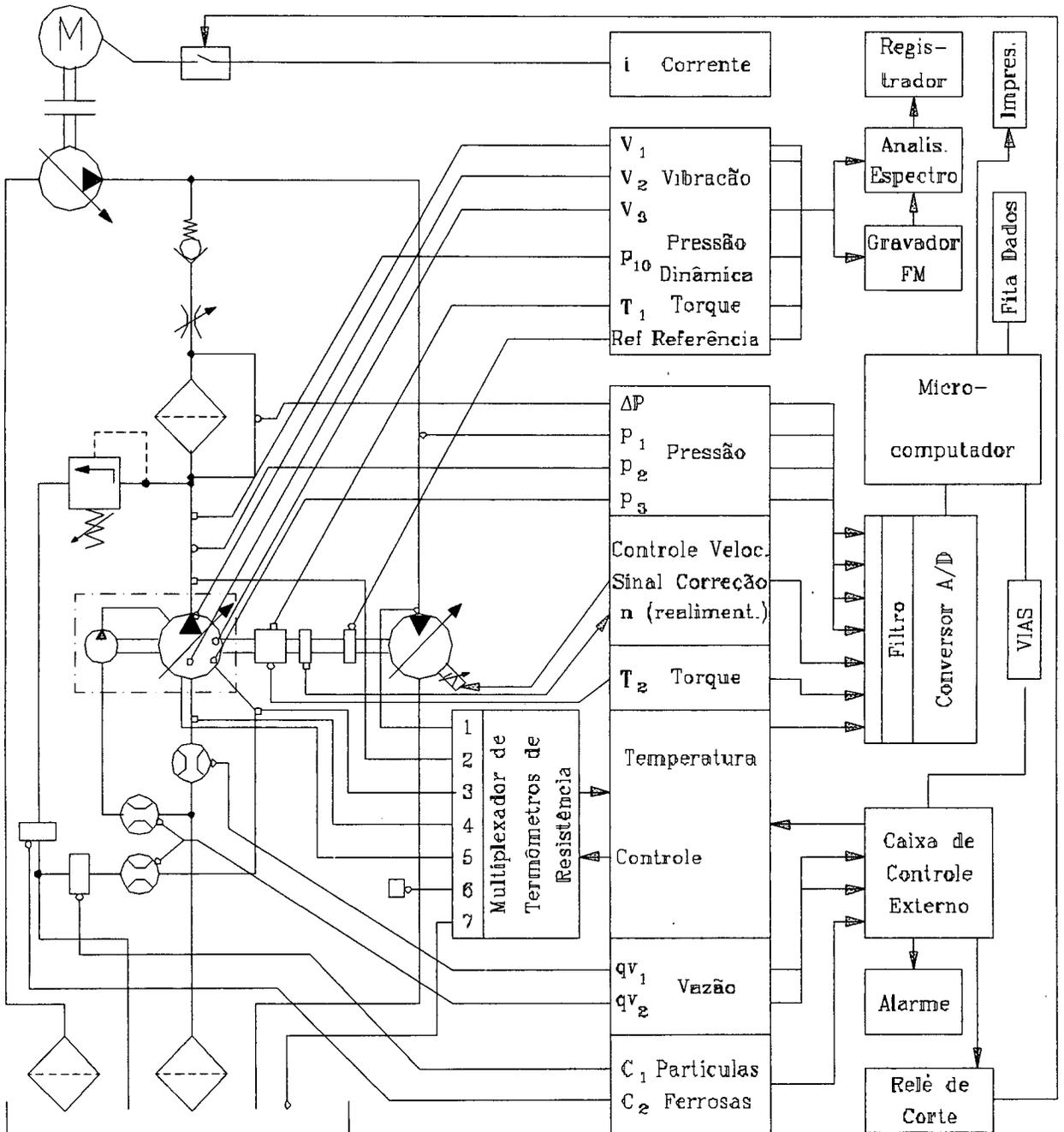


Figura 2.4 - "Instrumentação do sistema" (HUNT et alii,

1984).

## 2.2 - Exemplos de Sistemas de Aquisição e Controle Genéricos

Tradicionalmente tem-se decomposto os sistemas automatizados em duas partes: processo e sistema de aquisição e controle. A descrição deste último, na forma apresentada na seção anterior, segue o tratamento dado pelos fabricantes de **hardware** e de **software** conforme analisado a seguir.

Em relação ao tutorial publicado pela BURR BROWN CORP. (1990: cap.4), referenciado na maioria dos artigos técnicos da área, o denominado *sistema de aquisição de dados e controle (Data Acquisition and Control System - DA&C System)* compõe-se dos elementos e funções mostradas na figura 2.5. Ao computador cabe as tarefas de análise e tomada de decisões, o controle das funções de conversão de dados e condicionamento de sinais, como também promover a apresentação de resultados através de seus periféricos.

O **hardware** de aquisição de dados e controle, entendido como o sistema que faz o interfaceamento entre os sinais do mundo real (de natureza elétrica) e os sinais digitais manipulados pelo microcomputador, é categorizado como:

- *Produtos para barramento externo*: possuem um microprocessador próprio e são conectados ao PC através de um canal de comunicação padrão, tal como RS-232, RS-422 ou IEEE-488 (enquadram-se nesta classificação os instrumentos formados por *placas em um bastidor* e instrumentos **standalone** mencionados por LÜCKE (1990)).

- *Produtos para barramento interno*: são conectados

diretamente ao barramento do microcomputador tipo PC (são denominados por LÜCKE (1990) de *instrumentos placa-PC* e por POON (1989) de *cartões de aquisição de dados*).

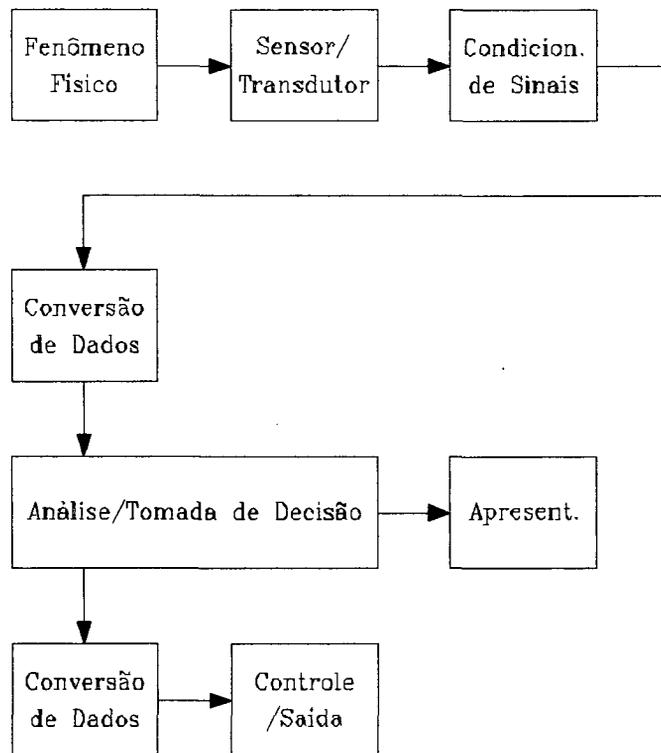
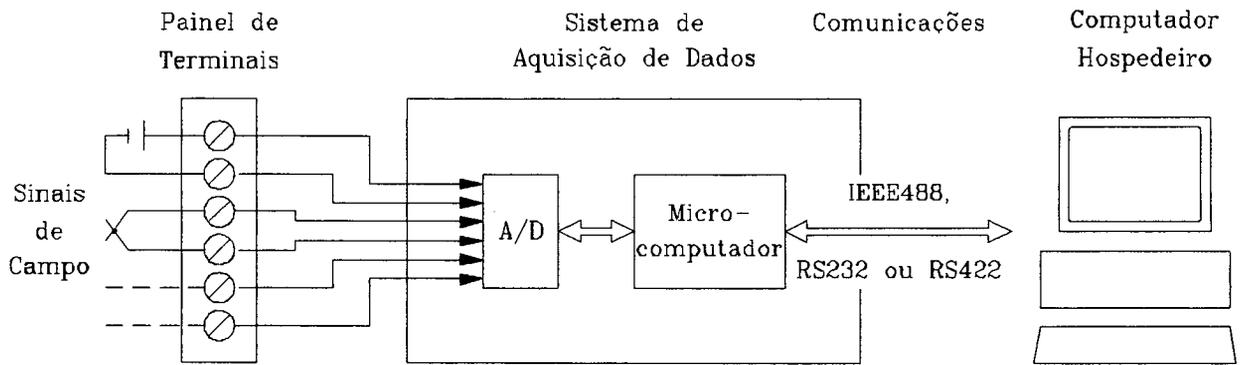
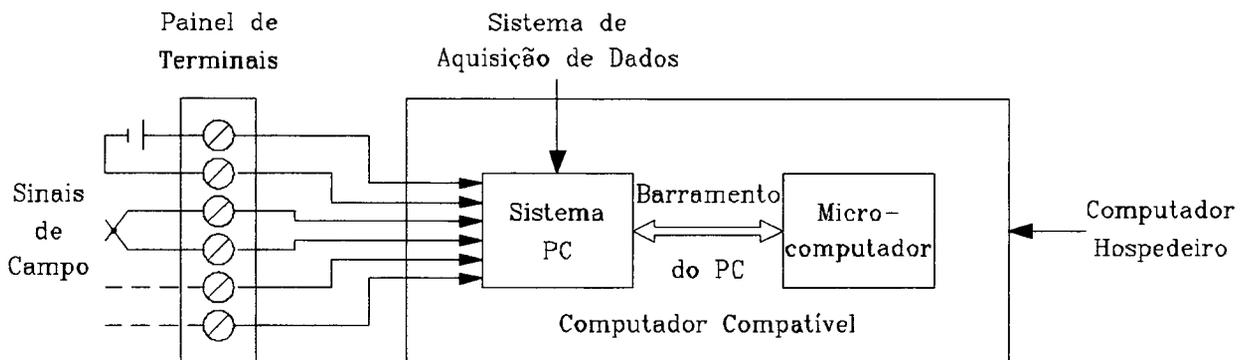


Figura 2.5 - "Diagrama de fluxo de aquisição de dados e controle" (BURR-BROWN CORP., 1990).

O microcomputador, que faz parte do **DA&C System**, é denominado computador hospedeiro e sua interrelação com os produtos distinguidos acima é apresentada pela figura 2.6. Interpreta-se que a denominação de *sistema de aquisição de dados* desta figura refere-se exclusivamente ao **hardware** e não no sentido amplo empregado na figura 2.5.



a)



b)

Figura 2.6 - "Diagrama de blocos de um sistema de aquisição de dados e controle": a) Para barramento externo, b) Para barramento interno (BURR-BROWN CORP., 1990).

Com relação ao **software** que opera com o **hardware** de aquisição e comando, BURR-BROWN CORP. (1990) emprega a seguinte classificação:

- Ferramentas para desenvolvimento de programas.
- Bibliotecas de funções.
- Pacotes de aplicação orientados a **menu**.

Os dois primeiros pacotes auxiliam o usuário na implementação de sua própria aplicação e normalmente incluem **drivers** que possibilitam o interfaceamento com o **hardware** de entrada e

saida. Segundo LÜCKE (1990) estes são enquadrados como *pacotes orientados a comando*. Os pacotes orientados a **menu** normalmente não exigem (mas podem permitir) programação por parte do usuário e podem ser empregados com **hardware** de diferentes fabricantes, porém, são limitados no campo de aplicação e nos recursos de processamento, apresentação e interfaceamento ((BURR-BROWN CORP., 1990) e (LÜCKE, 1990)).

Outra grande empresa que atua em aquisição e controle é a Hewlett Packard Co. (HEWLETT PACKARD, 1990) que, portanto, também tem grande influência sobre a concepção de bancos de testes. Segundo esta, um *sistema de aquisição de dados e controle* (identificado por **data acquisition and control - DAC**) pode ser representado pelo diagrama mostrado na figura 2.7, o qual segue a estrutura dos demais diagramas já discutidos no presente trabalho. Todavia, alguns esclarecimentos são pertinentes:

- os blocos de medição e estímulo são elementos em **hardware** controlados pelos programas de coleta e controle sendo, neste último, também implementado o algoritmo de controle (malha aberta ou fechada);

- as funções de ordenação de tarefas, armazenamento, análise e interação com periféricos (para apresentação) são implementadas em **software**.

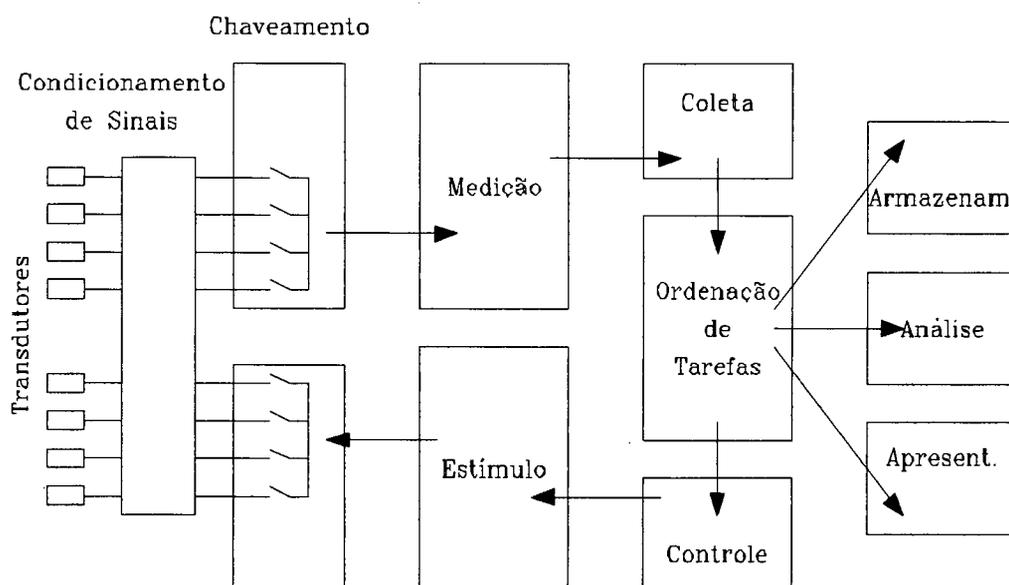


Figura 2.7 - "Sistema de aquisição de dados e controle"  
(HEWLETT PACKARD, 1990).

Esta publicação fornece uma série de noções básicas sobre instrumentos e exemplos de aplicação usando a instrumentação da HP integrada com software orientado a **menu**. Também é proposto um procedimento de projeto para sistemas de aquisição e controle que consiste em (ver figura 2.7):

1 - Esquematizar o produto ou processo em que será aplicado o **DAC**, indicando as variáveis a serem medidas e os dispositivos [de atuação]<sup>1</sup>.

2 - Anotar os requisitos de velocidade e precisão para cada ponto de medição [e atuação].

3 - Selecionar os transdutores [e atuadores].

4 - Selecionar o **hardware** de medição [e atuação].

5 - Escolher o **software** considerando a compatibilidade

<sup>1</sup> Os termos entre colchetes foram adequados ao presente trabalho já que a HEWLETT PACKARD CO. (1990) não possui uma denominação para os sistemas que agem sobre o meio físico confundindo-os, muitas vezes, com os transdutores (Ver figura 2.7).

com o **DAC-hardware** e o computador, as tarefas que deverá executar e o tempo de aprendizado e programação das tarefas.

6 - Montar o sistema como um todo, observando os seguintes aspectos:

- Comparar a precisão e rapidez desejadas com as alcançadas.

- Comparar os pacotes de **software** para ver quais estão mais próximos das necessidades e que podem minimizar o tempo e o esforço necessários.

- Estimar o tempo que será consumido para completar o projeto.

- Levar em consideração aspectos como reputação da companhia, suporte e serviço etc.

- Estabelecer prioridades e selecionar o melhor arranjo.

### 2.3 - Análise Crítica

As publicações analisadas neste capítulo demonstram que, tradicionalmente a descrição de sistemas automatizados ocorre através de diagramas gerais que representam a estrutura e as principais funções que o sistema realiza. Para a parte do processo físico, comumente são utilizadas representações clássicas como diagramas hidráulicos e elétricos, desenhos mecânicos etc. mas para a parte do **hardware** e do **software** são empregadas notações excessivamente abstratas que mesclam fluxo de sinais, de dados e interligações físicas.

Para minimizar as deficiências de representação, grande parte da descrição do sistema dá-se por meio de linguagem natural, principalmente com relação a aspectos funcionais e comportamentais.

Sabe-se que existem representações mais formais para **software**, haja visto a existência de metodologias já consolidadas como a análise e projeto estruturados (WARD & MELLOR, 1985) e, mais recentemente, o desenvolvimento orientado por objetos (BOOCH, 1991). Porém, as descrições empregadas possivelmente são um reflexo, em primeiro lugar, da especialização dos profissionais na área da aplicação (processo) e não em eletrônica ou **software** e, em segundo lugar, devido a forma de projeto destes sistemas.

Quanto ao último aspecto, a experiência adquirida em trabalhos experimentais assistidos por computador no LASHIP/EMC/UFSC<sup>1</sup> e perceptível pelo procedimento de projeto proposto pela HEWLETT PACKARD CO. (1990) (seção 2.2), demonstra que o projeto da parte de aquisição e controle normalmente é feito após a parte física já ter sido projetada ou mesmo construída. Neste sentido vale citar as colocações de VRIES et alii (1994) a cerca do projeto de sistemas eletromecânicos controlados: "A forma padrão é primeiramente projetar os módulos mecânicos (os quais podem ser vistos como os subsistemas de esqueleto e musculares), então as partes eletrônicas (os subsistemas de sensoriamento e nervos) e, finalmente, os módulos

---

<sup>1</sup> Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos - Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina.

de controle (os cérebros)".

Estes fatos resultam da dissociação existente entre os conceitos e princípios pertinentes às diferentes tecnologias empregadas no projeto e construção de sistemas automatizados. Conseqüentemente, torna-se difícil obter uma representação uniforme de todas as partes do sistema e também a definição clara da interação entre estas.

Diante deste panorama, o caminho mais natural para a análise e projeto deste tipo de sistema é por meio de conceitos e princípios multidisciplinares, como é o caso da teoria de sistemas. Para tanto, no capítulo seguinte discute-se alguns fundamentos da visão sistêmica, principalmente com relação ao uso inequívoco de modelos, buscando a integração de disciplinas fundamentais para o estudo de sistemas automatizados.

### 3 - CONCEITUAÇÃO E MODELAGEM DE SISTEMAS

Em função da ampliação do conhecimento do homem acerca dos fenômenos físicos e da conseqüente diversidade de tecnologias, cresce a importância de uma abordagem multidisciplinar para a análise e, principalmente, para o projeto de dispositivos que atendam as necessidades atuais.

A base para tal integração multidisciplinar e multitecnológica está estruturada através da *teoria geral de sistemas* que, conforme colocado por BLANCHARD & FABRYCKY (1981: p.11), "... está voltada ao desenvolvimento de uma base sistemática para a descrição de relacionamentos gerais no mundo natural e fabricado pelo homem [artificial]<sup>1</sup>".

Neste contexto, discute-se ao longo deste capítulo determinados conceitos ligados a visão sistêmica que fundamentam a elaboração dos capítulos subseqüentes.

#### 3.1 - Definição de Sistema

O termo *sistema* tem um uso difundido em praticamente todas as áreas do conhecimento humano e onde encontram-se diferentes definições. Para o âmbito desta tese, cita-se inicialmente a definição apresentada em HUBKA & EDER (1988: p.244), a qual estabelece que: "*Sistema* é um conjunto finito de elementos reunidos para formar um todo sob certas regras bem

---

<sup>1</sup> O texto entre colchetes é interpretação do presente trabalho.

definidas, por meio das quais existem determinadas *relações* precisas definidas entre os elementos e para com seu ambiente.

É possível que um sistema possa conter elementos isolados (i. e. elementos com nenhuma relação com outros ...), ou grupos isolados de elementos (i. e. o grupo não tem relações com outros elementos ou grupos dentro do conjunto).

Os termos *elemento* e *sistema* são relativos. Um elemento também pode ser considerado como um sistema, e um sistema pode ser considerado como um elemento dentro de um sistema maior. Os sistemas são hierárquicos. ..."

De forma similar, NYGAARD (1986) define *sistema* como "... uma parte do mundo que uma pessoa (ou grupo de pessoas) escolhe para considerar como um todo constituído de *componentes*, cada componente caracterizado por *propriedades* que são escolhidas como sendo relevantes e por *ações* relacionadas a estas propriedades e àquelas de outros componentes." Conforme ponderado pelo autor, esta definição evidencia que nenhuma parte do mundo é um sistema como uma propriedade inerente. Na verdade será um sistema se for escolhido um determinado ponto de vista, uma *perspectiva sistêmica*.

Complementando estas colocações, destaca-se que o emprego de uma determinada *perspectiva* é evidenciado através do conjunto de características que pode ser descrito por uma teoria particular (HOOVER et alii, 1991) que, no caso da perspectiva sistêmica, diz respeito à teoria geral de sistemas.

### 3.2 - Perspectiva Sistêmica e o Paradigma de Orientação por Objetos

A aplicação da perspectiva sistêmica aos dispositivos físicos criados ou manipulados pelo homem é bastante comum, principalmente no campo tecnológico. Porém, conforme destacado nos capítulos anteriores, uma parte considerável dos sistemas de interesse deste trabalho é realizada por meio de um programa, que é algo imaterial. Para que seja possível um tratamento uniforme do sistema global, é coerente que se aplique esta mesma visão para a estruturação do **software**<sup>1</sup> o que, essencialmente, consiste na percepção deste como um conjunto de subsistemas interrelacionados.

Conforme discutido em JACOBSON et alii (1994: p. 73-5), HENDERSON-SELLERS & EDWARDS (1990) e BOOCH (1991: p. 18-9), a estrutura de um **software** depende da metodologia de desenvolvimento aplicada. Apesar de existirem diversas metodologias, estas podem ser categorizadas em *decomposição funcional* e *orientadas por objetos*. Na primeira, as funções e os dados, que são os elementos fundamentais de um **software**, são tratados de forma mais ou menos separada, já que ao longo de seu desenvolvimento primeiramente é feita a decomposição em funções, havendo o surgimento dos dados como os elementos que serão

---

<sup>1</sup>Empregando a significação dada em LONGMAN (1985), o termo **software** consiste no "conjunto completo de programas, procedimentos e documentação pertinente associada a um sistema, especialmente um sistema computacional". Portanto, um *programa* é parte integrante do **software** correspondendo a "uma seqüência de instruções em código que pode ser inserida em um mecanismo (por. ex. um computador) numa parte de um organismo".

modificados pelas funções. Por sua vez, na orientação por objetos o sistema é decomposto em objetos que encapsulam um conjunto de dados e funções de modo a representar computacionalmente uma entidade física ou conceitual.

Mais especificamente, na primeira categoria, que é própria de linguagens de programação de alto nível como FORTRAN, COBOL e Pascal, o processo de computação é visto como uma seqüência de aplicações de funções a dados de entrada, produzindo dados de saída que, por sua vez, podem ser a entrada para outras funções. A figura 3.1 representa o comportamento de uma função (f) vista como o componente elementar do **software** e cujo modelo matemático é:

$$Y = f (U) \quad (3.1)$$

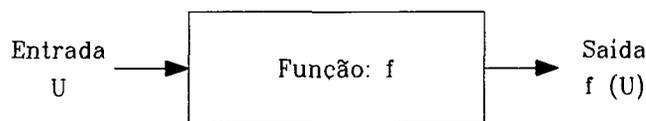


Figura 3.1 - Modelo comportamental de uma função.

Estas funções contrapõe-se aos objetos por não possuírem memória, pois nestas a saída é completamente determinada por seus argumentos (entradas), enquanto que a saída de um objeto pode depender de seu estado e de seus argumentos (entradas). Este fato pode ser observado através do modelo proposto por WEGNER (1989) em que o comportamento de um objeto é descrito pelas seguintes equações:

$$X' = g_i (X, U) \quad (3.2)$$

$$Y = f_i (X, U), \text{ com } i= 1, 2 \dots n \quad (3.3)$$

onde

$X'$  = Estado após a transição;  
 $g_i$  = Funções de transição de estado;  
 $f_i$  = Funções de saída;  
 $U$  = Entrada (argumentos das funções);  
 $X$  = Estado do objeto;  
 $Y$  = Saída.

e

$n$  = número de funções realizadas pelo objeto.

Conforme ilustrado na figura 3.2, a operação de um objeto depende do recebimento de uma mensagem de outro objeto, determinando quais funções ( $f_i$  e  $g_i$ ) deverão ser executadas e quais os argumentos destas. A cada operação resulta uma mudança de estado do objeto e a ocorrência da saída ( $Y$ ) que corresponde aos argumentos transportados por uma mensagem para outro objeto ou o retorno para o objeto que invocou a operação deste.

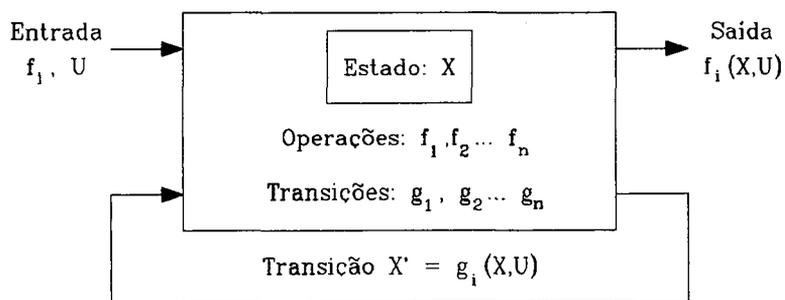


Figura 3.2 - Modelo comportamental de um objeto (WEGNER (1989)).

Esta forma de estruturação é sustentada através de linguagens de alto nível mais recentes como Smaltalk, Object Pascal, C++ e CLOS, onde o estado de cada objeto é determinado

por um arranjo de **bits** em um espaço de memória alocada especificamente para ele. Funções e procedimentos, denominados *métodos* (ou operações ou serviços), têm acesso ao estado do objeto e somente podem ser invocadas através do recebimento de mensagens que contêm uma indicação do objeto destinatário, o seletor do método e, opcionalmente, um conjunto de argumentos ((GIRARDI & PRICE, 1990) e (THOMAS, 1989)).

Estes objetos são criados a partir de uma *classe* que possui uma ou mais interfaces (parte pública), que especificam as operações que estarão acessíveis, e um corpo (parte privada), que especifica o código para implementação das operações definidas na interface. Os objetos de uma mesma classe têm métodos comuns mas diferenciam-se pelo seu estado, isto é, pelo valor de seus dados ((GIRARDI & PRICE, 1990) e (WEGNER, 1987)). A estrutura do **software** consiste, então, de diferentes classes e das relações existentes entre estas, como *herança* (novas classes herdam características já definidas em outras classes), *agregação* (designa que uma classe, denominada superclasse ou agregado, é composta de outras denominadas subclasses ou componentes) e *associação* (agrupa diversas classes como um conjunto e não como uma montagem como no caso anterior) (EMBLEY et alii, 1992: cap.2).

Deste modo, o paradigma de orientação por objetos torna possível implementar sistemas em **software** "... numa forma próxima como a mente humana percebe o mundo da aplicação [mundo real]: como uma interação entre objetos distintos, cada um

possuindo propriedades e comportamento próprio e onde cada objeto pode ter outros objetos como componentes de sua estrutura" (GIRARDI & PRICE, 1990). Complementarmente, os mesmos autores enfatizam que este paradigma facilita a reutilização de componentes já que "... este estilo de desenvolvimento promove o desenvolvimento de aplicações de forma semelhante à construção de sistemas físicos: como objetos complexos constituídos pela reunião de diversos objetos pré-fabricados de uso geral."

Concluindo esta análise, percebe-se que a caracterização do **software** segundo a orientação por objetos emprega os mesmos elementos da visão sistêmica. Este fato é formalizado por NYGAARD (1986) que observa a programação orientada por objetos sob duas perspectivas: *informática* e *sistemas*. No contexto da informática, a execução de um programa é vista como um processo de informação caracterizado por sua substância (corresponde à matéria física de que é constituído como objetos, arquivos, registros, variáveis etc.), por propriedades mensuráveis de sua substância (por ex.: valores das variáveis) e por transformações de sua substância e, conseqüentemente, de suas propriedades. Sob o ponto de vista sistêmico<sup>1</sup>, um processo de informação pode ser considerado como a manifestação (operação) de um sistema através de transformações de seu estado e a substância do processo é organizada como os componentes do sistema, chamados objetos. Uma propriedade mensurável da substância corresponde a uma propriedade de um

---

<sup>1</sup> Ver definição de sistema segundo NYGAARD (1986) apresentada na seção 3.1.

objeto. *Transformações* do estado são consideradas como *ações* pelos objetos.

### 3.3 - Caracterização da Modelagem

Os sistemas, principalmente os estudados em áreas como a mecatrônica e a engenharia de **software**, normalmente podem ser decompostos em diversos subsistemas interrelacionados que, por sua vez, possuem seus próprios subsistemas e assim sucessivamente até alcançar componentes considerados elementares. Estruturas deste tipo estabelecem interações de difícil previsão, exigindo o estudo de partes isoladas a fim de estabelecer o comportamento global com maior segurança ((BOOCH, 1991: cap.1) e (VRIES et alii, 1994)). Conforme estabelecido por SIMON In: VRIES et alii (1994), tais sistemas são caracterizados como complexos no sentido que o todo é mais que a soma das partes, ou seja, dadas as propriedades das partes e as leis de suas interações, não é trivial inferir sobre as propriedades do todo.

Como forma de manipular a complexidade e facilitar a análise ou o projeto de sistemas, BOOCH (1991, p.39) faz uso de *abstrações*, entendidas como descrições simplificadas que enfatizam certos detalhes ou propriedades enquanto outros são suprimidos. Complementarmente, uma *abstração* pode ser vista como o resultado da aplicação de uma ou mais perspectivas ao sistema ou parte dele, de modo que a teoria fornecida pelas perspectivas seja utilizada para criar *modelos* daquelas porções do sistema

incluídas na abstração (HOOVER et alii, 1991).

Deste modo, pode-se entender que os modelos sejam o meio de explicitar o entendimento acerca de uma abstração. Conforme WILSON (1990: p.11), "Um modelo é a interpretação explícita do entendimento de uma situação, ou meramente das idéias acerca daquela situação. Este pode ser expresso matematicamente, por símbolos ou por palavras, mas essencialmente é uma descrição de entidades, processos ou atributos e as relações entre eles. Este pode ser prescritivo ou ilustrativo, mas acima de tudo precisa ser útil."

Segundo os trabalhos de HENSON et alii (1994), HUBKA & EDER (1988) e KUMARA et alii (1989), no contexto do projeto de sistemas técnicos, e de HAREL (1987) e RUMBAUGH et alii (1991), relacionados com o desenvolvimento de **software**, a descrição de sistemas complexos tem sido subdividida segundo as *perspectivas estrutural, funcional e comportamental* de tal modo que a junção dos três tipos de modelos correspondentes forneça a descrição completa do sistema.

Baseado em KUMARA et alii (1989) e HENSON et alii (1994), o *comportamento* de um sistema pode ser definido como a relação da entrada ou excitação, proveniente do ambiente externo, com o estado interno e com a saída ou influência que exerce sobre o ambiente externo.

Os modelos comportamentais possuem uma semântica dinâmica, ou seja, descrevem as mudanças de estado e saída que ocorrem ao longo do tempo. Nos casos em que não há memória (para

os sistemas físicos implica em não se considerar o armazenamento de energia) o sistema é visto como instantâneo (comportamento instantâneo) já que a resposta depende somente do valor da entrada, não se identificando variáveis de estado ((FREDERICK & CARLSON, 1971: p.9) e (HAREL, 1987)).

De forma geral, o comportamento é descrito por modelos que incluam *causalidade*, ou seja, a saída do sistema no instante 't' não depende da entrada aplicada depois do instante 't' de modo que os aspectos passados afetam o futuro, mas não o contrário (CHEN, 1970: p.79).

Ainda sob a perspectiva comportamental, os modelos podem ser subdivididos em transformativos e reativos. Os modelos *transformativos* ou *a estado contínuo* descrevem o sistema através de equações elementares e de suas interconexões, sendo estas equações definidas para todo o tempo (modelos contínuos no tempo) ou definidas ou usadas em pontos discretos no tempo (modelos discretos no tempo) (BROGAN, 1982: p.4-10). Exemplos destes modelos são a função transferência e a descrição por variáveis de estado, enquadrados na teoria de controle.

Estas equações descrevem a resposta do sistema implicitamente, sendo necessário resolvê-las para obter uma expressão explícita das saídas e dos estados como função das entradas (OPPENHEIM et alii, 1983: p.101).

Por sua vez, os *modelos reativos* ou *a estado discreto* representam os possíveis estados que o sistema pode assumir, sendo a mudança de estado e as saídas produzidas pelo sistema

decorrentes da combinação lógica de entradas (eventos e condições) e do estado em que o sistema encontra-se.

Este tipo de modelo, como a rede de Petri marcada (PETERSON, 1981) e o diagrama de transição de estados (diagrama de estados) (WALDSCHMIDT, 1988), mostra explicitamente a seqüência com que ocorrem os estados e saídas sem, normalmente, estabelecer uma relação direta com o tempo. Matematicamente pode ser usada a lógica Booleana para modelar implicitamente, através de equações elementares e interconexões, as mudanças (transições) de estado.

Vale ressaltar que a denominação destes dois tipos de modelos comportamentais ainda não está estabelecida. Neste trabalho empregar-se-á os termos *transformativo* e *reativo* utilizados por HAREL (1987) que enfatizam que o primeiro é descrito através de transformações ou funções matemáticas e o outro caracteriza o sistema modelado como sendo guiado a eventos, tendo que reagir continuamente a estímulos internos e externos. A denominação de modelos a *estado contínuo* e a *estado discreto* citada acima decorre do trabalho de KROGH & NIINOMI (1994) a cerca da modelagem de sistemas híbridos, ou seja, de sistemas descritos por variáveis de estado contínuas interconectados com sistemas descritos por variáveis de estado discretas.

Por sua vez, a *perspectiva funcional* é empregada para caracterizar o objetivo do comportamento do sistema frente ao usuário humano (HENSON et alii, 1994). A *função* refere-se,

causalidade. Em síntese, os modelos comportamentais incluem *causalidade (temporal) do sistema* e também *causalidade das variáveis do sistema* enquanto que os modelos funcionais incluem somente este último tipo de causalidade.

Por fim, segundo HUBKA & EDER (1988: p. 245), o termo *estrutura* designa o "... arranjo interno, ordem, organização, decomposição, segmentação, conformação, constituição ou construção de um sistema. No mesmo sentido, pode-se falar de uma rede de elementos. ... Portanto, estrutura é o conjunto de elementos em um sistema e o conjunto de relações que conectam estes elementos com outros." Estas relações podem indicar conexões físicas ou de comunicação ou relações hierárquicas para auxiliar as possíveis associações conceituais que podem ser estabelecidas entre os componentes.

Como exemplo de modelos estruturais pode-se citar os diagramas entidade/relações (**entity/relationship diagrams**), desenhos geométricos e diagramas elétricos, hidráulicos e pneumáticos.

Esta classificação de modelos segundo diferentes perspectivas tem sido empregada para tornar a descrição mais clara e formal, principalmente quando da utilização de ferramentas computacionais no projeto de sistemas complexos. Uma divisão mais clássica dos modelos é quanto ao tipo de representação utilizada, como modelo icônico, analógico, simbólico ou matemático e diagramático ou esquemático. A caracterização destes pode ser encontrada, com algumas

então, a algo mais perene, particularmente a capacidade, desejada ou existente, de desempenhar uma ação ou um conjunto de ações. Esta capacidade pode não ser assegurada pelo comportamento efetivo do sistema pois um sistema também pode comportar-se mal ou erroneamente (HUBKA & EDER, 1988: p. 245).

KUIPERS In: HENSON et alii (1994) utiliza o exemplo de uma válvula de alívio de vapor em uma caldeira para ilustrar a diferença entre os termos acima: "A *função* de uma válvula de alívio de vapor é evitar uma explosão e o seu *comportamento* é que abra quando for alcançado um determinado limite de diferença de pressão".

Como exemplos de modelos funcionais pode-se citar a Rede de Petri Canal/Agência (HEUSER, 1990), o diagrama de fluxo de dados (DFD) (WARD & MELLOR, 1985) e a estrutura de funções (PAHL & BEITZ, 1988) que representam graficamente as funções (atividades) cumpridas pelo sistema e suas interrelações.

Tanto os modelos comportamentais como os funcionais explicitam as variáveis que são causa e efeito perante o sistema e seus componentes. A este aspecto atribui-se o nome de *causalidade das variáveis do sistema* como justificativa para classificação das redes de Petri Canal/Agência como causais (HANISCH, 1992: p.19) e do conceito de causalidade utilizado em grafos de ligação (**bond graphs**) (KARNOPP et alii, 1990: p.25-8). Na linguagem da teoria de controle e, conseqüentemente, nos modelos comportamentais transformativos, utiliza-se os conceitos de entrada e saída denotando a presença deste tipo de

divergências, nos trabalhos de BACK (1983: p.190-8), BAZZO & PEREIRA (1988: p.99-105), BLANCHARD e FABRYCKY (1981: p.42-6) e KATZAN (1975: p.13).

### 3.4 - Definição e Modelagem de Sistemas Técnicos

As definições de sistema discutidas na seção 3.1 são bastante genéricas e aplicáveis a diversas áreas como biológica, química, tecnológica, social, financeira entre outras.

A tecnologia, onde se insere este trabalho, tem o compromisso de colocar a disposição do homem dispositivos capazes de atender às suas necessidades, tais como máquinas, produtos, construções, equipamentos dentre muitas outras designações correntes. Para referir-se a estes dispositivos de forma abstrata tem sido empregado o termo *sistema técnico* que, de acordo com FREDERICK & CARLSON (1971: p.1), pode ser definido como "... uma coleção organizada de unidades interagentes - possivelmente incluindo homens e máquinas - destinado a alcançar algum objetivo ou conjunto de objetivos através da manipulação e controle de materiais, energia e informação".

Desta definição pode-se destacar três aspectos fundamentais:

- Um sistema pode ser reconhecido através da identificação das suas unidades e os meios de interação.

- Um sistema existe para cumprir uma determinada função no macrosistema de que faz parte.

- Um sistema age sobre energia, matéria e informação.

Referindo-se às colocações de BLANCHARD & FABRYCKY (1981: p.5) de que a ação a ser cumprida por um sistema comumente consiste na alteração de energia, matéria ou informação, entende-se que é através destes elementos que ocorre a interação com o homem ou com outros sistemas. Por conseguinte, a sua representação gráfica deve ressaltar igualmente o sistema em si bem como a energia, matéria e informação que fluem através deste.

Estes aspectos dão sustentação a modelagem de um sistema técnico conforme proposto na figura 3.3. A energia, matéria e informação caracterizam os recursos que serão consumidos e produzidos em decorrência da operação do sistema. Esta operação resulta da aplicação de processos de mudança ou transformações de recursos tais como transporte, ampliação, conversão, transformação, decomposição etc.

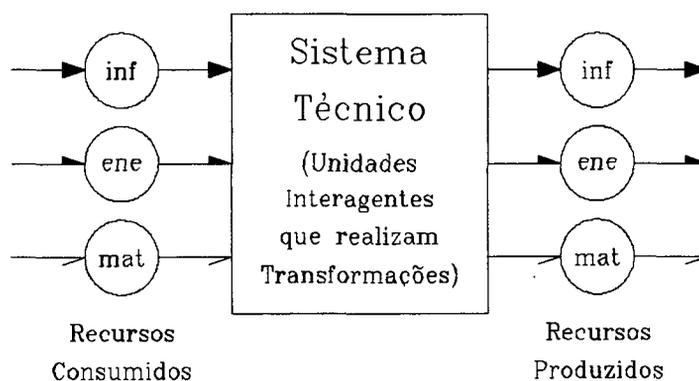


Figura 3.3 - Modelo funcional de um sistema técnico.

Neste modelo, utiliza-se a notação em rede de Petri Canal/Agência (Rede C/A) que se presta para a descrição genérica de sistemas através de uma estrutura simples e de fácil assimilação por pessoas de formações diversas. Na seção seguinte

descreve-se esta noção e nas seções 3.4.2 e 3.4.3 caracteriza-se os três recursos destacados na figura 3.3.

### 3.4.1 - Descrição da Rede de Petri Canal/Agência

A notação em rede C/A, discutida em HEUSER (1990: cap.6 e 8), trata-se de uma representação diagramática que emprega dois elementos básicos: as *unidades funcionais ativas*, representadas por retângulos e as *unidades funcionais passivas*, representadas através de círculos, sendo estes dois elementos interligados através de arcos direcionados (figura 3.4).

ELEMENTOS BÁSICOS			
Símbolo	Designação Genérica	Perspectiva Funcional	Perspectiva Comportamental
	Unidades Funcionais Ativas	Atividades	Agências
	Unidades Funcionais Passivas	Recursos	Canais
INTERLIGAÇÃO DOS ELEMENTOS			
Símbolo	Arcos Direcionados		
	Fluxo de Informação		
	Fluxo de Energia		
	Fluxo de Matéria		

Figura 3.4 - Rede de Petri Canal/Agência - Elementos básicos.

Ao modelo criado pode-se atribuir uma conotação funcional ou estrutural. Sob uma *perspectiva funcional*, que é o enfoque dado por HEUSER (1990: cap.6) e por HANISCH (1992:

cap.2), as unidades funcionais passivas correspondem aos recursos que fluem através do sistema, ou seja a energia, a matéria e a informação ou suas formas de manifestação, tais como eletricidade, peças, ferramentas, sinais, dados etc. Por sua vez, as unidades funcionais ativas são designadas de *atividades* correspondendo às operações aplicadas sobre os recursos como bombeamento, montagem, transporte, processamento etc.

Através de uma abordagem concisa realizada por REISIG (1985: p.6,7) e de determinados aspectos manifestados em HEUSER (1990: cap.6) infere-se também uma *perspectiva estrutural* para a rede C/A. Neste caso, as unidades funcionais passivas são designadas de *canais*, indicando aqueles componentes do sistema que dão suporte para que os recursos possam fluir sem causar modificação no estado destes. Como exemplos, pode-se citar tubulações, eixos, fios, correias transportadoras, depósitos, mensagens, memórias etc. Através dos retângulos representa-se as *agências* que, conforme expresso por HEUSER (1990), correspondem ao "local onde acontecem as atividades", tais como bombas, componentes de máquinas, estações de trabalho, reatores químicos, objetos em **software** entre outros.

É importante observar que o direcionamento indicado pelos arcos que acoplam estes elementos não tem significação sob o ponto de vista estrutural, pois este refere-se à interligação existente, ao modo como o sistema é constituído. Por conseguinte, os arcos apenas indicam qual o componente passivo necessário para estabelecer a conexão entre

os componentes ativos.

Por outro lado, funcionalmente as setas indicam o sentido do fluxo de recursos, ou seja, definem as causas e efeitos relacionados a cada atividade (a causalidade das variáveis do sistema, conforme destacado na seção 3.2). Na representação adotada foram definidos três tipos de setas para enfatizar o tipo de recurso envolvido (ver figura 3.4):

- *seta cheia*: fluxo de informação;
- *meia seta cheia*: fluxo de energia;
- *meia seta vazia*: fluxo de matéria.

A justificativa para esta notação provém do emprego comum da seta cheia em diagramas de fluxo de sinais e diagramas de blocos e da meia seta cheia para o fluxo de energia ou potência nos grafos de ligação (**bond graphs**). A meia seta vazia justifica-se como forma de diferenciação das outras duas e para que possa ser composta com o fluxo de energia, o que é necessário nos casos em que a energia é portada pela matéria (como em sistemas hidráulicos e pneumáticos).

Deve-se destacar que esta notação é desvinculada de qualquer área técnica, podendo ser aplicada sempre que for necessário descrever aspectos funcionais e estruturais. Por exemplo, em HEUSER (1990) a rede C/A é utilizada no âmbito de banco de dados sendo, inclusive, estabelecida a equivalência com o diagrama de fluxo de dados (DFD), mostrando que a primeira é mais abstrata e independente das soluções adotadas, enquanto que o DFD impõe decisões sobre a

forma de implementação do sistema em **software**.

De forma similar, no âmbito do projeto de produtos é possível representar as estruturas de funções empregadas na fase de concepção (PAHL & BEITZ, 1988) por redes C/A, com a vantagem de forçar o projetista à identificação de recursos intermediários que obrigatoriamente irão existir.

Por sua vez, HANISCH (1992), emprega a rede C/A na modelagem de processos produtivos. Reforçando esta aplicação, observa-se que MIYAGI (1988) utiliza um modelo denominado **production flow schema** (PFS) que pode ser considerado como uma rede C/A acrescida de pequenos detalhes, tornando-a específica para a descrição deste tipo de sistema.

Em face da utilização intensa da notação em rede de Petri C/A no restante deste trabalho, apresenta-se no apêndice A as regras básicas para sua utilização.

### 3.4.2 - Caracterização da Informação

Através da leitura de diversas publicações percebeu-se a dificuldade existente em estabelecer uma definição objetiva e precisa do termo *informação*. Um ponto de partida é através da análise de SOWA (1984: cap.1) acerca da significação das palavras que, segundo o autor, pode ser avaliada sob dois aspectos: A *intenção* da palavra corresponde a parte da significação decorrente dos princípios gerais da memória semântica, ou seja, está relacionada com um dicionário de definições universais memorizado pelo indivíduo. A extensão de

uma palavra é o conjunto de todas as coisas existentes às quais a palavra aplica-se; está associada a memória episódica que armazena os fatos acerca de coisas e eventos individuais.

Estes aspectos podem ser representados através do triângulo da significação mostrado na figura 3.5, cujo vértice esquerdo é o *símbolo* ou *palavra*, o superior é o *conceito*, *intenção*, *pensamento*, *idéia* ou *sentido* e o vértice direito é o *referente*, *objeto* ou *extensão*. A percepção correlaciona objetos a conceitos e a linguagem correlaciona conceitos a palavras, mas o relacionamento entre palavra e objeto é uma correlação indireta, decorrente das correlações diretas da percepção e da linguagem.

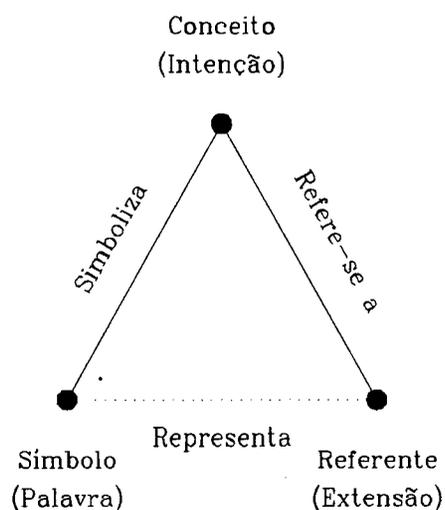


Figura 3.5 - "Triângulo da significação" (SOWA, 1984).

Embasando-se nesta visão, é possível entender a afirmação de FINKELSTEIN (1977) de que a "Informação consiste do símbolo juntamente com a relação que este porta para com o referente" ou, em outras palavras, decorre do significado

(extensivo e intencional) atribuído pelo homem para determinado símbolo. Exemplos de símbolos são desenhos, palavras escritas ou faladas em linguagem natural, caracteres alfabéticos e numéricos, palavras computacionais (**bits, bytes**) etc. (BODEN, 1987).

Nos computadores digitais, tanto os dados como as instruções do programa consistem de uma série de palavras computacionais (código binário), geradas a partir de uma linguagem de alto nível que manipula símbolos numéricos e não-numéricos que podem, inclusive, ser escolhidos a semelhança do objeto (referente) representado. Por conseguinte, frente ao programador o computador processa informações, ficando o código binário como um meio de sustentação para estes símbolos (BODEN, 1987: p.15-7).

Os instrumentos técnicos, como transdutores, condicionadores de sinais, controladores e filtros analógicos, também processam informações porém, nestes não se evidencia imediatamente a manipulação de símbolos mas sim a manipulação de sinais. Os sinais são variáveis físicas observáveis, cujo estado ou parâmetros de variação com o tempo correspondem aos símbolos que portam informação. FINKELSTEIN (1977) cita como exemplos de símbolos evidenciados nos sinais o valor instantâneo de uma variável analógica (amplitude) e a duração de pulso em um sinal PMW (**Pulse Modulated Width**).

Por exemplo, um sinal elétrico resultante da medição de pressão porta, através da amplitude da tensão (símbolo), uma informação acerca da pressão que está ocorrendo

no sistema medido e, portanto, é necessário estabelecer uma correlação entre a amplitude da tensão e a pressão. Percebe-se, então, que os sistemas físicos de processamento de informação processam sinais cujos símbolos normalmente não são similares ao referente, enquanto que no **software** manipula-se diretamente com símbolos escolhidos da forma mais conveniente para representar o objeto.

### 3.4.2 - Caracterização da Energia e da Matéria

Conforme descrito em MACFARLANE (1964: p.13), "A energia associada a um estado de um objeto [sistema] físico é uma medida de sua capacidade de produzir mudanças em seus próprios estados ou nos estados de outros objetos [sistemas] físicos." Referindo-se a primeira lei da termodinâmica (VAN WYLEN & SONNTAG, 1970), pode-se observar que a variação da energia em um sistema decorre da transferência de calor e/ou trabalho observáveis em suas portas físicas, isto é, através dos canais de interligação destes.

Concretamente, a energia e, em particular, a potência (como variação de energia no tempo) são completamente determinadas pelas variáveis genéricas *momento*, *deslocamento*, *esforço* e *fluxo*. que nos domínios energéticos específicos assumem designações comuns como *força*, *velocidade*, *pressão*, *corrente* etc. (KARNOPP et alii, 1990: cap.2).

Por sua vez, a matéria ou material é caracterizada por suas propriedades físicas, químicas,

elétricas, magnéticas, metalúrgicas etc., propriedades estas decorrentes não só das substâncias básicas que a compõe, mas também do tipo de processo aplicado para sua obtenção (CHESTNUT, 1966: p.68). Como exemplos pode-se citar forma, dimensões, rugosidade, condutividade, ductilidade etc., incluindo também as propriedades termodinâmicas como temperatura, pressão, massa e volume específicos, massa e volume totais.

Ao longo deste trabalho as variáveis que caracterizam a energia e as propriedades da matéria são designadas genericamente de *atributos* em conformidade ao emprego dado na orientação por objetos (RUMBAUGH et alii, 1991: p.23) e no projeto mecatrônico (MALMQVIST, 1994). Assim, o estado de um recurso energético ou material corresponde aos valores, qualitativos ou quantitativos, assumidos por seus atributos em determinado instante. Do mesmo modo, um recurso de informação, que pode englobar um ou mais símbolos, tem seu estado definido pelo valor assumido por estes símbolos.

## 4 - CONCEITUAÇÃO E MODELAGEM DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS

### 4.1 - Caracterização de Sistemas Automáticos

O projeto de produtos e processos multitecnológicos, integrando as áreas de mecânica, eletro-eletrônica e informática, tem sido objeto de estudo da *mecatrônica* desde o final da década de 70. Vista como uma tecnologia que reúne diversas disciplinas e tecnologias, a *mecatrônica* busca promover uma melhor comunicação entre especialistas e a adoção de soluções inovadoras para muitos problemas de projeto (RAULT, 1992).

Como decorrência natural, tem sido comum a designação de *sistemas mecatrônicos* para os processos ou produtos enquadrados dentro desta tecnologia. Porém, outras denominações também são empregadas, como em VRIES et alii (1994) que utiliza o termo *sistemas eletromecânicos controlados* reservando o termo *mecatrônica* para referir-se à tecnologia em si.

Em essência, os sistemas desta natureza possibilitam, através da eletrônica e da informática, a introdução de inteligência aos produtos tradicionalmente mecânicos, possibilitando um maior desempenho, flexibilidade e confiabilidade sem necessariamente aumentar os custos (VRIES et alii, 1994).

Conforme SALMINEN & VERHO (1991), "Uma aplicação típica em *mecatrônica* possui um alto grau de automação, um sistema de controle incorporado e alto desempenho." Como exemplos, podem

ser citados robôs, tecnologias automotivas (suspensão ativa, transmissão automática), produtos domésticos (CD-players, máquinas de lavar) e sistemas de manufatura.

Deste modo, percebe-se que os *sistemas automatizados* discutidos no capítulo 2 também podem ser observados sob o enfoque da mecatrônica. Porém, tradicionalmente o seu projeto tem sido conduzido de acordo com as orientações dadas pelos fabricantes de **hardware** e de aplicativos computacionais, pressupondo que processo físico já esteja projetado ou implementado. Tal procedimento pode ser associado a forma de ensino praticada no âmbito da metrologia pois, conforme relatado por FINKELSTEIN (1985), "Classicamente a tecnologia de medição e instrumentação tem sido apresentada na literatura e nos cursos educacionais como um catálogo de dispositivos e técnicas. Os princípios de organização do catálogo tem sido uma classificação segundo a grandeza a medir ou segundo o princípio físico de operação do dispositivo de medição." Vale destacar que os sistemas de aquisição e controle, responsáveis pelo processamento de informações nos sistemas automatizados, são constituídos em boa parte de instrumentos como transdutores, unidades de tratamento de sinais, multiplexadores, conversores A/D e D/A e outros, cuja função é a medição de variáveis e, por conseguinte, de competência da metrologia.

Especificamente, o presente trabalho está voltado a classe de sistemas que integram os componentes que realizam as ações físicas, ou seja, que processam energia e matéria, juntamente com as funções de controle e processamento de

informações. Entende-se que o nível de automatismo e, correspondentemente, o grau de independência do ambiente externo, pode envolver desde o controle de apenas uma variável até a supervisão e controle de todo um processo. Aos sistemas desta natureza emprega-se a designação de *sistemas automáticos* em função de:

- Refletir a capacidade de mover-se, regular-se ou operar por si mesmo. Em comparação ao termo automatizado<sup>1</sup>, a nomenclatura adotada reflete que o automatismo é intrínseco ao sistema e não provém da adição de novas funções ou instrumentos ao processo físico ou químico.

- Não sugerir que o sistema empregue tecnologias pré-determinadas como no caso de *mecatrônica = mecânica + eletrônica* ou em *eletromecânico controlado = eletrônica + mecânica + controle*.

- É uma forma comum para designação de produtos diversos e, portanto, de fácil assimilação por leigos e especialistas de diferentes áreas (ex.: lavadora (de roupas) automática, torno (mecânico) automático, piloto automático (aviões e veículos)).

#### 4.2 - Modelagem Genérica de Sistemas Automáticos

Conforme discutido na seção 3.3, a escolha de um determinado modelo para um sistema decorre de um processo de

---

<sup>1</sup> Segundo o dicionário Aurélio: Automático = que se move, regula ou opera por si mesmo; Automatizado = tornado automático (FERREIRA, 1986).

abstração em que determinados aspectos são destacados em detrimento de outros. Como consequência, normalmente o fluxo de um tipo de recurso (energia, matéria ou informação) sobressai-se em relação aos outros, sendo através deste que a atividade e o comportamento do sistema são evidenciados.

Porém, mesmo não sendo modelados, comumente os três tipos de recursos fluem através do sistema pois, conforme evidenciado por PAHL & BEITZ (1988: p. 22,3): "... não pode haver conversão de material ou sinal [informação] sem uma conversão de energia, mesmo que pequena. ... Cada conversão de sinais [informações] está associada com uma conversão de energia embora não necessariamente com uma conversão de material."

Para os sistemas em que predomina a manipulação de informação, FINKELSTEIN (1985) emprega a denominação de *máquinas de informação* como "artifícios cuja finalidade é adquirir, processar, armazenar, transmitir e fornecer informação. Assim definido, o conceito de máquinas de informação envolve toda a instrumentação incluindo (em particular) os sensores." Em FINKELSTEIN & WATTS (1978) é explicitado que os "... instrumentos de medição, assim como os instrumentos para computação, comunicação e controle, constituem uma classe especial de dispositivos ou máquinas [denominados no artigo de máquinas de informação], visto que todos eles estão envolvidos com a manipulação de informação."

Paralelamente, NYGAARD (1986) denomina as execuções de programas em computadores, o manuseio de informações em escritórios e o planejamento em corporações como *processos de*

*informação.*

No presente trabalho, utiliza-se o termo *sistemas de informação* para englobar as máquinas e processos de informação caracterizados nos parágrafos anteriores, nos quais as funções principais são cumpridas através dos recursos de informação, ficando os fluxos energético e material em um plano secundário.

Da mesma forma que se abstrai os sistemas de informação, pode-se também identificar os *sistemas energético e material* correspondendo ao processo físico ou químico. Um circuito hidráulico pode ser citado como um sistema energético pois sua operação baseia-se na conversão, transferência e controle de energia hidráulica. Um sistema material pode ser exemplificado através de uma linha de produção, que recebe matéria prima e, após diversas operações como separação, usinagem, transporte, empacotamento etc., fornece o produto acabado.

Observando-se os sistemas técnicos existentes, percebe-se que a operação de um sistema energético ou material depende da ação de um sistema de informação, humano ou não, capaz de extrair informações do primeiro, processá-las e, posteriormente, utilizá-las para alterar o fluxo energético ou material. Desta forma, o *sistema automático* caracterizado na seção anterior pode ser modelado estruturalmente como um *sistema de informação* acoplado a um *sistema energético e/ou material* através de canais de informação internos. Além da troca de informações entre estes dois subsistemas, há também o recebimento e fornecimento de

energia, matéria e informação em relação ao ambiente externo. Esta perspectiva é modelada segundo a figura 4.1 utilizando-se a notação em rede C/A citada no capítulo 3.

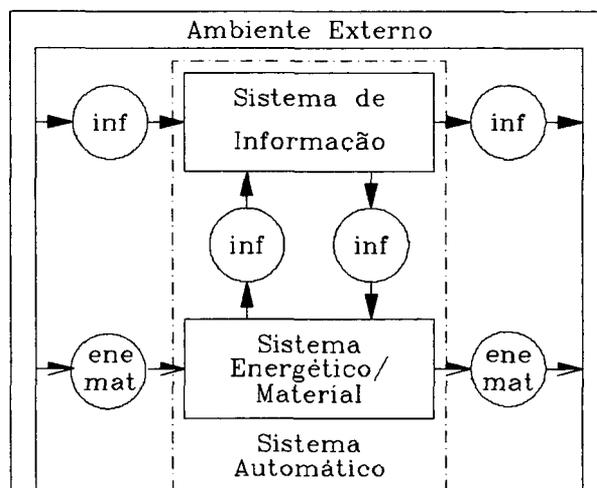


Figura 4.1 - Modelo funcional/estrutural condensado de um sistema automático.

Reiterando colocações anteriores, o sistema de informação constitui-se de instrumentos, programas, ser humano ou quaisquer outros meios que processem sinais ou diretamente símbolos. O sistema energético/material é uma abstração das máquinas, dispositivos, processos etc. capazes de realizar transformações físicas ou químicas.

Visando o refinamento deste modelo de sistema automático, discute-se nas seções seguintes os meios necessários para estabelecer a troca de informações entre os dois principais subsistemas.

### 4.3 - Sistemas de Medição

A extração de informações do meio físico, que é o papel de um dos canais internos do sistema automático, sugere a necessidade de medição de grandezas físicas. Por conseguinte, a seguir discute-se conceitos e princípios da metrologia com o objetivo de estruturar este canal de informação.

Primeiramente, observa-se que "A metrologia clássica define medição como 'o conjunto de operações que tem por objetivo determinar um valor de uma grandeza' (BIMP-IEC-ISO-OIML, 1983)<sup>1</sup>, onde uma grandeza é 'um atributo de um fenômeno, corpo ou substância, que pode ser qualitativamente distinguido e quantitativamente determinado.'" (FIOK et alii, 1988).

Por sua vez, FINKELSTEIN (1977) define a medição como "uma forma especial de representação por símbolos, na qual as propriedades de alguns objetos ou eventos são representadas por números reais através da regra de correspondência definida pela escala de medição". Relembrando a análise feita na seção 3.4.2 acerca da informação, percebe-se que a regra de correspondência citada estabelece a correlação entre o símbolo (número real) e o objeto ou evento medido.

Esta definição reflete a proposta da metrologia moderna de inserir a ciência da medição e de instrumentação como uma parte integral da ciência geral da tecnologia de informação que, segundo FINKELSTEIN (1985), inclui cinco corpos de conceitos e

---

<sup>1</sup> Definição também adotada pelo INMETRO de acordo com a 2ª edição (1993) do *vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia* (BIMP-IEC-IFCC-ISO-IUPAC-IUPAP) (INMETRO, 1995).

princípios interrelacionados: sistemas, sinais, informação, máquinas de informação e controle.

Um dos aspectos que concretiza esta interrelação é a utilização da medição para a modelagem de sistemas, mais especificamente na identificação experimental de modelos. FIOK et alii (1988) explicita isto ao definir que "a medição é um experimento de identificação paramétrica de um modelo matemático do objeto a ser medido", apresentando o modelo geral da medição segundo a figura 4.2.

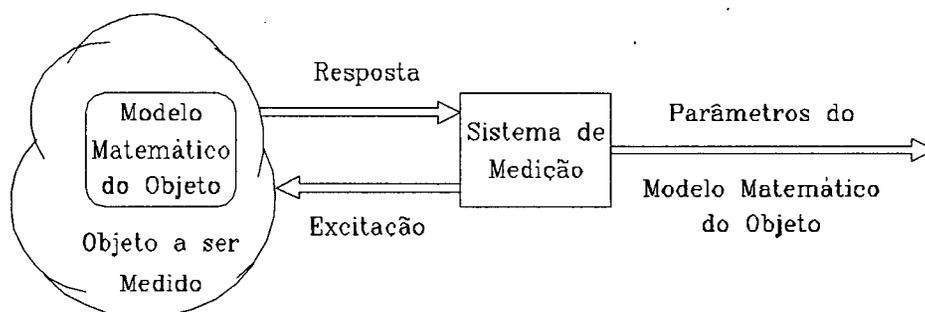


Figura 4.2 - "Modelo geral da medição" (FIOK et alii, 1988).

Por outro lado, percebe-se de FINKELSTEIN (1985) que o sistema de medição (instrumento de medição) pode ser empregado para a identificação paramétrica, porém, não será o responsável pela determinação do modelo (parâmetros e estrutura) do sistema medido. Isto é explicitado pelo modelo funcional apresentado pelo autor (figura 4.3) em que "a primeira função em um instrumento de medição [sistema de medição] é como sensor, o qual estabelece uma correspondência um-a-um entre uma grandeza medida no sistema sob medição, que atua como entrada, e algumas características de um sinal portador de informações, que

constitui a saída. Após o sensor está um subsistema que processa a informação adquirida em uma forma requerida e, como parte deste processamento, pode ser necessária a transformação, transmissão e outras operações deste tipo sobre o sinal. ... A saída do sistema de medição é chamado aqui de *efetuação* e é a apresentação de um número ou símbolo correspondendo ao mensurando<sup>1</sup> ou algum tipo de potência de saída para um atuador ou elemento de controle funcionalmente relacionado com o mensurando." Este atuador ou elemento de controle servirá para excitar o sistema sob medição para que modifique a grandeza que está sendo medida e, assim, seja possível estabelecer uma relação entrada-saída e, conseqüentemente, um modelo matemático.

O sistema de medição é colocado como parte de um supersistema, no qual o sistema medido opera e que deve ser considerado para a análise e projeto dos instrumentos de medição.

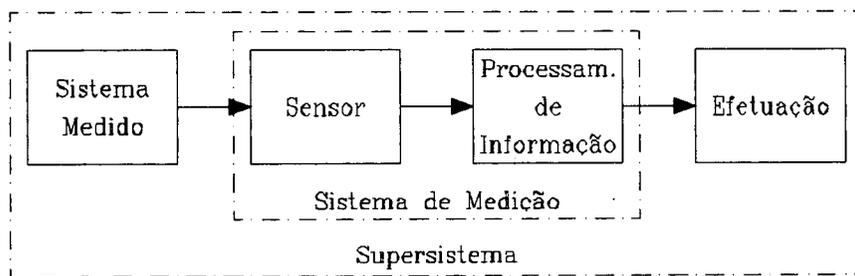


Figura 4.3 - "Principais componentes funcionais de um sistema de medição" (FINKELSTEIN, 1985).

No presente trabalho adota-se a interpretação dada por FINKELSTEIN (1977) e FINKELSTEIN (1985) em razão do sistema de

<sup>1</sup> *Mensurando* é definido como a grandeza específica submetida à medição (INMETRO, 1995).

medição ser definido como uma unidade funcional mais elementar que na visão de FIOK et alii (1988), tornando mais flexível a sua utilização nos sistemas automáticos. Além disso, a diferença em relação a definição clássica, citada no início desta seção, é mais conceitual do que prática, podendo-se interpretar o valor da quantidade medida resultante da medição como um símbolo particular (número) que porta informação acerca da quantidade.

Na figura 4.4 apresenta-se o modelo funcional clássico de um sistema de medição baseado em SCHNEIDER & FLESCH (1989) e FLESCH (1995) que enfatiza a realização física da medição. O *transdutor*<sup>1</sup> é o elemento que está em contato com o atributo físico e que fornece um sinal correspondente a este; a *unidade de tratamento de sinais* destina-se à amplificação da potência do sinal proveniente do transdutor e às tarefas de processamento como filtragem, compensação, integração etc. Por fim, ao *indicador* cabe transformar o sinal tratado "em um número inteligível ao usuário. Este módulo subentende também unidades de registro como registradores X-Y, gravadores de fita, conversores A/D etc." (SCHNEIDER & FLESCH, 1989).

Outro aspecto importante destacado em FINKELSTEIN (1977), e que de certa forma é ilustrado no modelo de SCHNEIDER & FLESCH (1989), é que "A informação é transferida de um sistema sob medição para um instrumento pelo fluxo de potência ou

---

<sup>1</sup> É comum na literatura técnica e científica a confusão entre os termos *transdutor* e *sensor*. Seguindo a orientação de SCHNEIDER & FLESCH (1989), o transdutor constitui-se de um sensor, que é o elemento que está em contato com a grandeza a medir, ligado a uma cadeia formada por elementos de conversão de sinal. Eventualmente o transdutor pode ser composto apenas do sensor.

matéria. A medição dos atributos de fluxos de potência - tais como forças, velocidades e deslocamentos - pode ser realizada pela ação direta do fluxo de potência em um instrumento, o qual transforma-o em um sinal de saída útil."

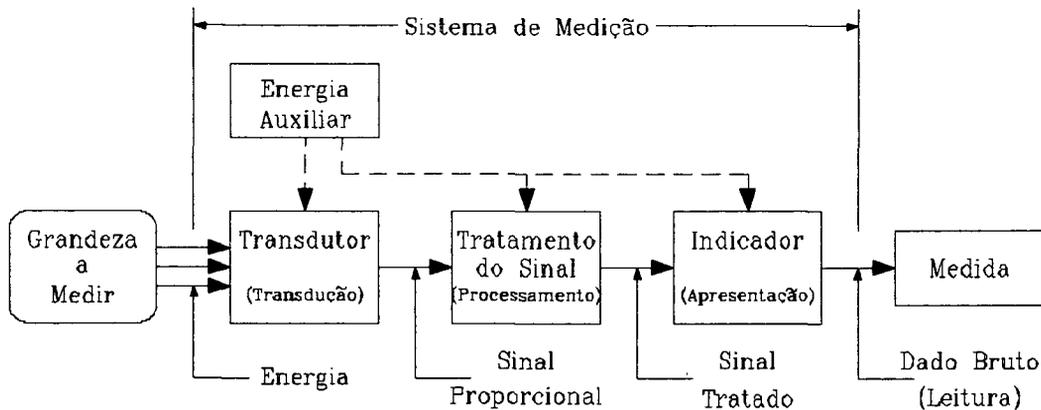


Figura 4.4 - "Sistema generalizado de medição" (SCHNEIDER & FLESCHE, 1989).

Com base nas colocações feitas até o momento, propõe-se a estruturação de um sistema de medição genérico na forma mostrada na figura 4.5.a indicando que a energia ou a matéria fluem através deste, resultando na extração de informação acerca de um dos seus atributos. Internamente o sistema de medição possui a mesma estrutura básica de um sistema automático, ou seja, possui parte energético/material e parte de informação. Portanto, um sistema de medição pode ser considerado ele mesmo como um sistema automático o que possibilita, conforme será discutido no capítulo 5, refinar sucessiva e ordenadamente um sistema automático até chegar nos componentes que deverão ser construídos ou adquiridos.

Um melhor entendimento desta estrutura pode ser alcançado através da figura 4.5.b que mostra o refinamento do

sistema de medição segundo as regras da rede C/A (ver apêndice A). A agência *SM - ene/mat* corresponde ao *transdutor*, que é o elemento essencial no processo de medição e que está em contato com o atributo real ( $a_r$ ), isto é, com a variável ou propriedade do recurso energético ou material que será medida. Por sua vez, o refinamento do *canal de informação interno* mostra a existência de sistemas complementares que processam sinais, possibilitando o fluxo da informação acerca do atributo real. Esta decomposição

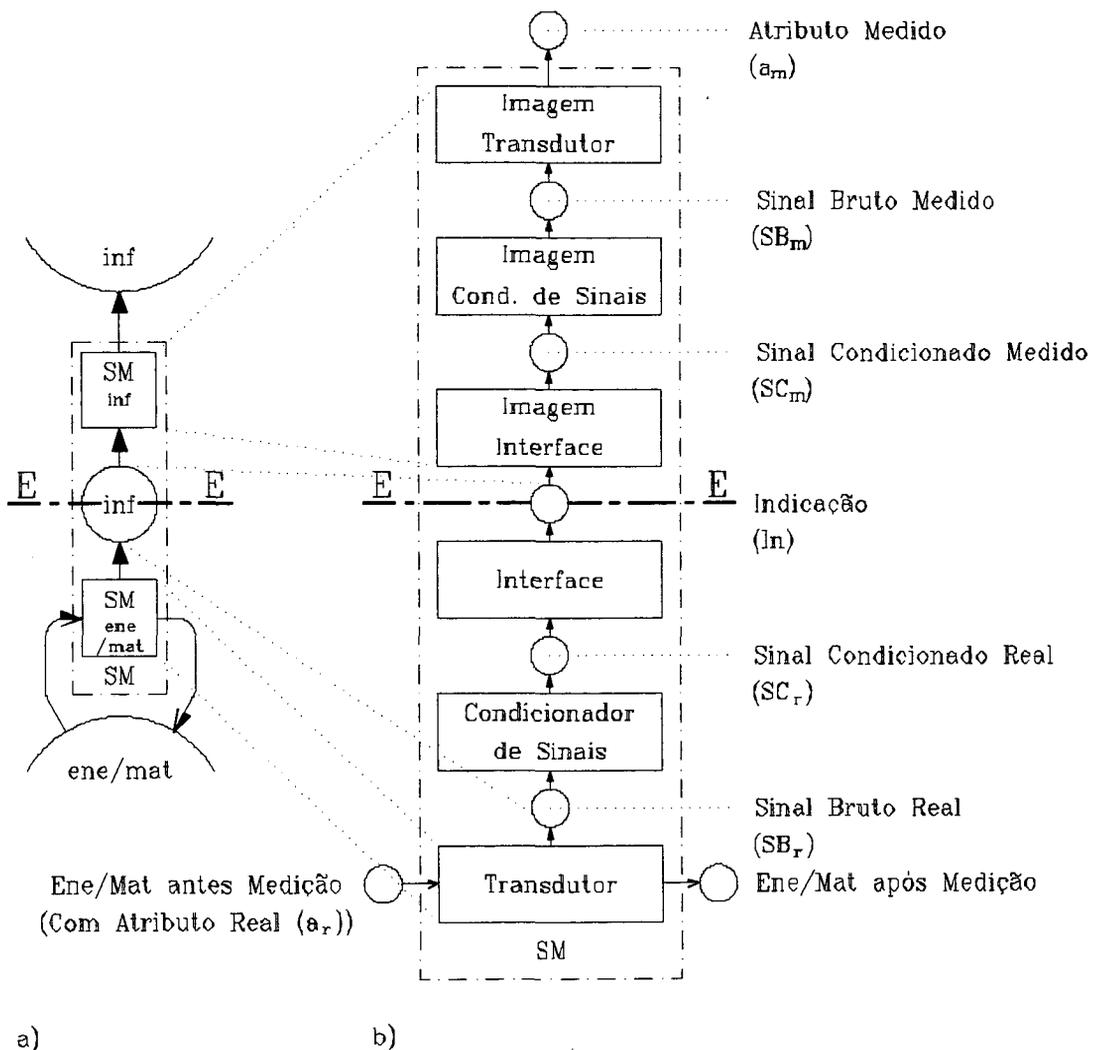


Figura 4.5 - Modelo funcional/estrutural de um sistema de medição: a) Forma condensada; b) Forma refinada.

reproduz a cadeia de medição clássica<sup>1</sup> (figura 4.4), destacando-se que o canal de saída da interface contém um símbolo interpretável por sistemas que processam informações, como o ser humano ou um programa computacional. Exemplos destes símbolos são a indicação analógica ou digital, aviso sonoro, palavra escrita ou falada, código binário etc.

A fim de justificar o refinamento realizado na agência *SM-inf* é necessário observar que as três unidades funcionais identificadas abaixo da linha EE compõem um ou mais instrumentos que necessitam ser calibrados, em conjunto ou separadamente, a fim de estabelecer-se a correlação efetiva entre as variáveis de entrada e saída. Considerando-se a cadeia de instrumentos de medição completa, visualiza-se na figura 4.6 os resultados típicos de uma calibração estática em que são determinados experimentalmente os pontos que correlacionam o atributo real (mensurando) e a indicação (leitura). A *característica de resposta real* ( $CR_r$ ) consiste de uma linha que passa pelas leituras médias referentes a cada valor aplicado do mensurando e por uma faixa de dispersão que especifica estatisticamente o desvio dos pontos em relação a esta linha média. A *característica de resposta nominal* ( $CR_n$ ) especifica univocamente o comportamento ideal esperado do instrumento podendo ser expressa por uma expressão matemática (linear ou não), uma tabela ou um gráfico.

---

<sup>1</sup> Emprega-se o termo *condicionador de sinais* (RAZTLAFF, 1987) em lugar de *unidade de tratamento de sinais*. O termo *indicador* é substituído por *interface* caracterizando a interconexão entre o domínio físico e o de processamento de símbolos.

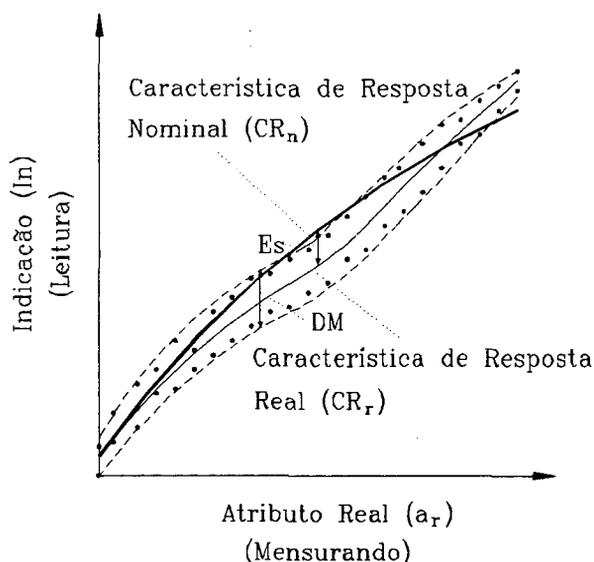


Figura 4.6 - Resultados da calibração da cadeia de instrumentos de medição - transdutor, condicionador de sinais e interface.

A calibração resulta na determinação do erro sistemático (ES) e da dispersão da medição (DM) que refletem a discrepância entre a característica de resposta real e a característica de resposta nominal adotada para descrever o comportamento do sistema. Quando da utilização da cadeia de instrumentos de medição, a forma inversa da característica de resposta nominal deverá ser empregada para determinar o valor real do atributo físico a partir da indicação fornecida pelo instrumento.

Em vista destes aspectos, a configuração do sistema de medição ocorre segundo o procedimento ilustrado na figura 4.7 em que, escolhidos os instrumentos, obtém-se os *respectivos modelos comportamentais* através da calibração ou de dados de catálogo. Subseqüentemente, estes modelos são espelhados, isto é, são criados os *modelos comportamentais inversos*, e ordenadamente

implementados no *sistema de medição - parte informação (SM-inf)*.

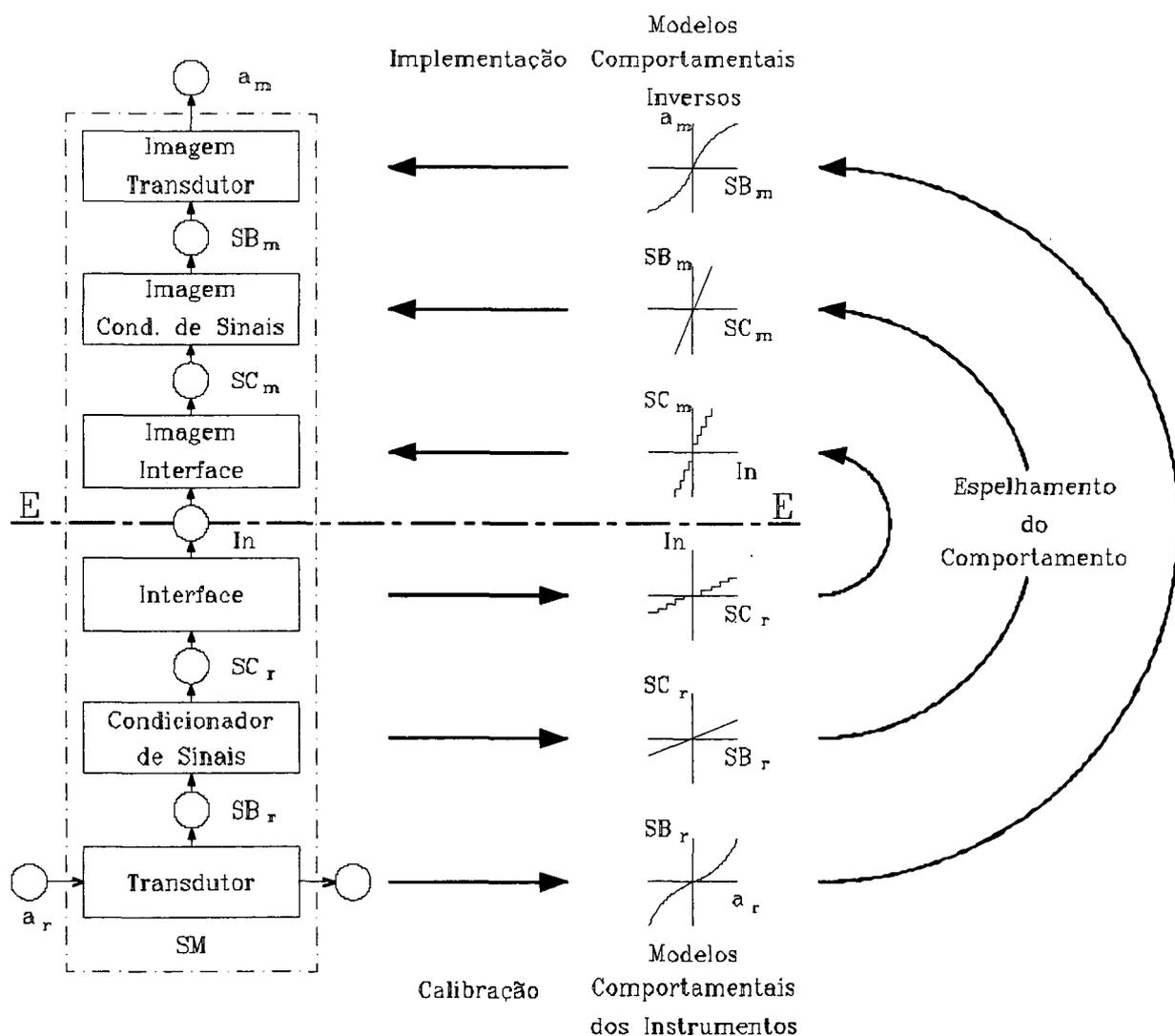


Figura 4.7 - Mecanismo de criação das imagens.

Pela forma de criação das novas atividades (funções), estas são denominadas *imagens*, cada uma associada a um instrumento ou a um conjunto de instrumentos específico. A *linha de espelhamento (EE)* representa a reflexão do comportamento dos instrumentos e está sobre o canal em que é feita a mudança entre interpretação de sinais e de símbolos puros. Esta mudança de interpretação pode ser melhor entendida lembrando-se que uma indicação, vista como um símbolo interpretável (números, bits,

palavras), é sustentada por alguma forma de energia ou, mais especificamente, por um sinal que a porta. Nos instrumentos abaixo da linha de espelhamento, estes sinais são diretamente observáveis, enquanto que no processamento subsequente a atenção está voltada diretamente aos símbolos.

No caso da implementação destas imagens por **software**, os dados processados possuem uma associação direta com a informação que flui e apenas num refinamento maior poderiam-se perceber os sinais binários em tensão que dão suporte para a execução do programa. Raciocínio equivalente pode ser aplicado se a reflexão do comportamento dos instrumentos de medição for realizada pelo homem.

É importante destacar que, se forem empregados instrumentos como CLP's, eletrônica analógica ou digital, válvulas pneumáticas etc. para o processamento das informações resultantes das medições, não haverá necessidade da parte de informação do sistema de medição pois estes instrumentos manipulam sinais.

Por fim, deve-se ressaltar que a forma de calibração abordada aqui é estática. Dinamicamente é possível determinar parâmetros dos instrumentos de medição como tempo de resposta, frequência natural, razão de amortecimento etc. porém, entende-se que estes aspectos são necessários para verificar se determinado instrumento é ou não capaz de medir as variações dinâmicas do atributo real e, portanto, se é adequado a determinada aplicação.

#### 4.3.1 - Concretização dos Sistemas de Medição

De acordo com a figura 4.7, após a definição dos instrumentos de medição, faz-se necessário implementar a parte de informação do sistema de medição. Numa concepção mais simples, esta pode ser realizada pelo homem que, mentalmente ou com o auxílio de tabelas ou gráficos, determina o valor do atributo medido correspondentemente à indicação dada pela interface. Por outro lado, de acordo com as tecnologias correntes de automação, as imagens devem, preferencialmente, ser implementadas em **software** e, segundo as razões expostas na seção 3.2, utilizando a técnica de orientação por objetos.

Dentro da metodologia de desenvolvimento de **software** orientado por objetos, criar-se-á o que tem-se denominado de *objetos-imagem* ((LÜCKE et alii, 1995) e (MADEIRA, 1995)) que implementam as características de resposta inversas. Isto é exemplificado a seguir através de um sistema de medição de pressão (figura 4.8) em que são calibrados o conjunto transdutor de pressão e condicionador de sinais e, separadamente, o conversor A/D. Correspondentemente, são criados dois objetos-imagem que possuem, cada um, um método (operação) *medir* que implementa a característica de resposta inversa.

Durante a operação deste sistema de medição, o objeto *imagem do transdutor-condicionador de sinais* recebe uma mensagem *medir* enviada de outros objetos do **software** ou do programa principal. Para que este possa determinar o valor da pressão medida e retorná-la ao emissor da mensagem é necessário

inicialmente enviar uma nova mensagem *medir* ao objeto *imagem do conversor A/D*.

Este último objeto comunica-se, através do barramento, com o conversor A/D e armazena, na forma de **bits**, o dado correspondente à tensão de entrada no conversor. Sobre este dado é então aplicada a característica de resposta nominal inversa ( $CR_{ni}$ ) que gera o valor de tensão medida ( $U_m$ ). Com o retorno deste valor ao objeto *imagem do transdutor-condicionador de sinais*, pode ser aplicada a característica de resposta nominal inversa correspondente obtendo-se o valor da pressão medida ( $p_m$ ).

A figura 4.8.a apresenta um modelo estrutural para este sistema de medição de pressão que estabelece as principais interligações entre os instrumentos e as mensagens entre objetos. Na figura 4.8.b é mostrado o diagrama de blocos que modela o comportamento em regime permanente, sendo o efeito de amostragem do conversor A/D indicado através da mudança da variável independente ( $t$  para  $kT$ , onde  $T$  é o período de amostragem e  $k \in \mathbb{N}$ ) e da quantização do sinal amostrado ilustrada pela relação comportamental  $\text{bits} \times U$ .

Detalhes quanto ao projeto e implementação dos objetos-imagem e acerca dos meios técnicos usados para interfaceamento com o computador são objeto da dissertação de mestrado do Bel. Comp. Mauro Nortanicola Madeira (MADEIRA, 1995) realizada em paralelo com esta tese.

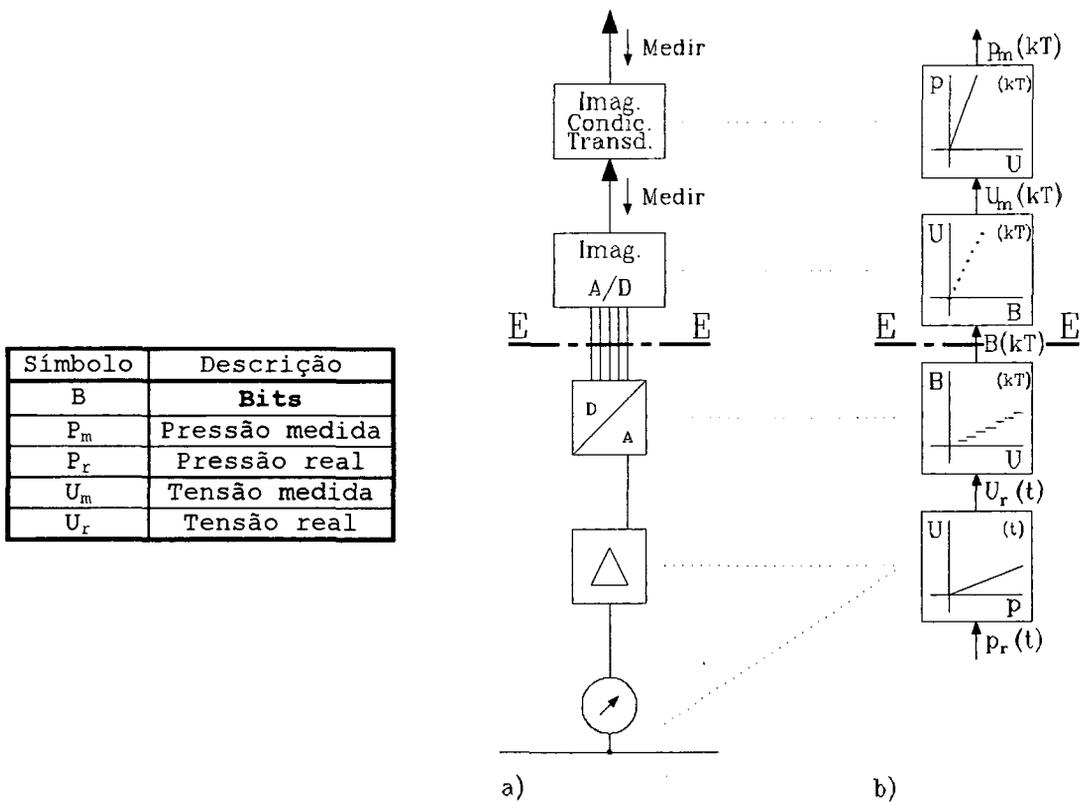


Figura 4.8 - Sistema de medição de pressão. a) Modelo funcional/estrutural; b) Modelo comportamental.

#### 4.4 - Sistemas de Atuação

Os sistemas de atuação cumprem a função contrária aos sistemas de medição, isto é, são responsáveis pela modificação de atributos energéticos ou materiais em resposta às informações provenientes da parte de informação do sistema automático.

Conforme pode ser visto em RATZLAFF (1987: p.101-5) e HEWLETT PACKARD (1990), a cadeia de atuação possui a mesma estrutura que a de medição em que, de acordo com nomenclatura tradicional de engenharia e de controle (por ex. FRANKLIN et alii (1986: p.3)), o instrumento que interage com o processo

físico ou químico é denominado de *atuador*. Deste modo, propõe-se a modelagem genérica para um sistema de atuação conforme a figura 4.9, a qual é derivada da perspectiva estrutural/funcional dos sistemas de medição (figura 4.5) e utiliza o mesmo mecanismo de criação das imagens.

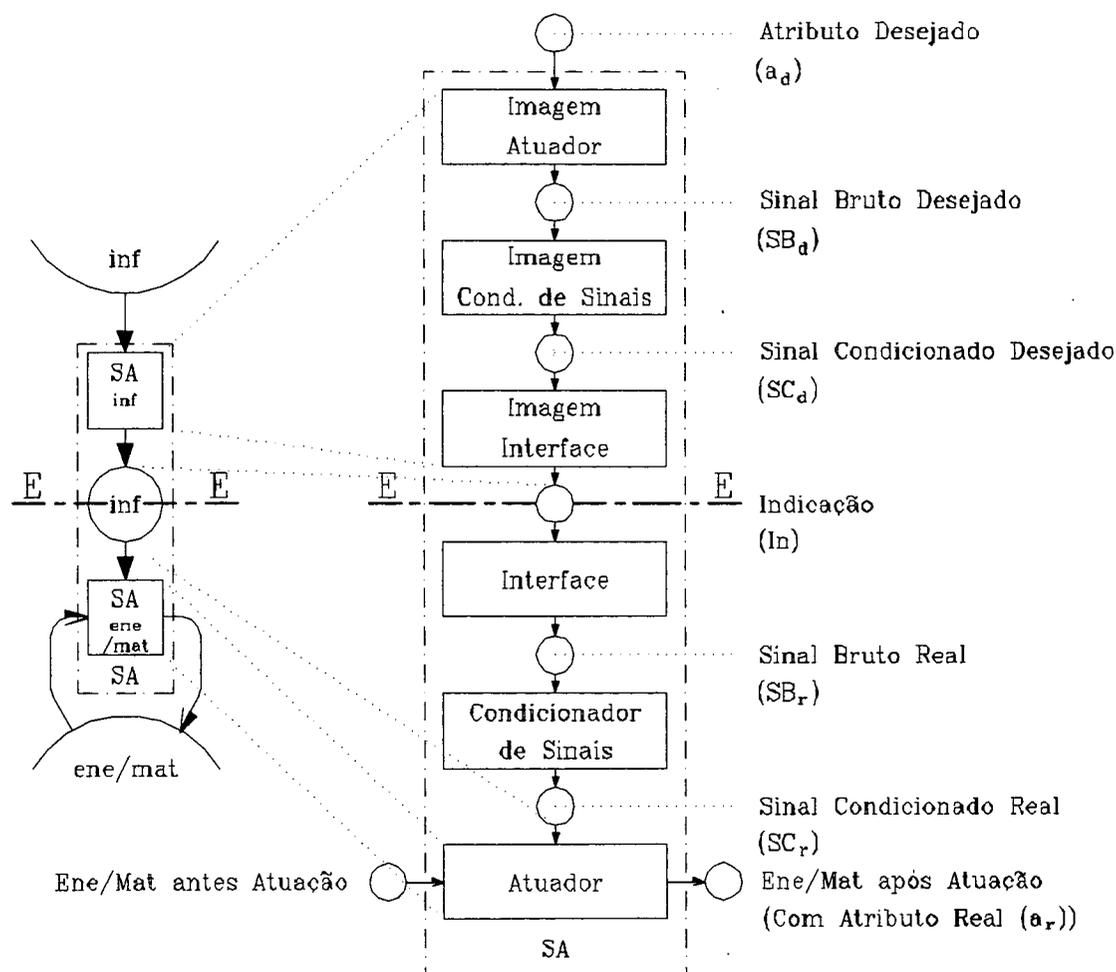


Figura 4.9 - Modelo funcional/estrutural de um sistema de atuação genérico.

Assim como nos sistemas de medição, o modelo comportamental implementado nas imagens refere-se a características em regime permanente. Porém, normalmente

atuadores como válvulas, motores elétricos, bombas, dinamômetros etc. têm respostas dinâmicas similares, se não inferiores, aos demais componentes do sistema automático - parte energético/material (processo) além de que as curvas de regime permanente são fortemente influenciadas por outras variáveis do processo, tais como temperatura, pressão, corrente etc. Por conseguinte, ao contrário dos sistemas de medição, é necessário implementar mecanismos que compensem estas deficiências de resposta para que, estabelecido o atributo desejado, seja possível alcançar o valor do atributo real com mínimo erro em regime permanente e o mais rápido possível.

Pode-se entender que a característica de resposta real não é obedecida durante o transiente. Conseqüentemente, o sinal condicionado real ( $SC_r$ ), decorrente do processamento efetuado nas imagens usando uma característica de resposta nominal inversa ( $CR_{ni}$ ) fixa, produzirá um atributo real ( $a_r$ ) distanciado do desejado. A atualização dinâmica da característica de resposta nominal inversa ( $CR_{ni}$ ) pode ser conseguida indiretamente pelo uso de controladores e de realimentações em conjunto ou em substituição a esta curva característica na imagem do atuador. Estes aspectos são evidenciados através dos exemplos a seguir, cuja simbologia está descrita na tabela 4.1.

Na figura 4.10 está representado um sistema de atuação em vazão que emprega como atuador uma válvula proporcional de vazão. Neste caso a operação ocorre em malha aberta, o que é bastante comum em aplicações industriais, e não é feita qualquer correção na característica de resposta nominal inversa.

Na figura 4.10.a é apresentado um modelo funcional/estrutural utilizando a notação própria de cada tecnologia a ser empregada na construção do sistema e no item b) estão indicados os instrumentos selecionados: uma válvula proporcional de vazão com realimentação de posição e uma cartela eletrônica que recebe o sinal de referência externo, sobrepõe um sinal de **dither** e realimenta o deslocamento interno do carretel (posição) a fim de otimizar a resposta da válvula; também estão esquematizados uma placa-PC para a conversão analógico-digital e os objetos que são implementados em **software**. O diagrama de blocos na figura 4.10.c ilustra as curvas características dos instrumentos que, através do mecanismo de espelhamento, são implementadas nos objetos.

Tabela 4.1 - Simbologia das variáveis empregadas nas figuras 4.10 à 4.14.

Simbolo	Descrição	Sub-índice	Descrição	Super-índice	Descrição
B	Bits	d	Desejado	AD	Conversor A/D
i	Corrente	m	Medido	AP	Amp. de Potência
qv	Vazão	r	Real	C	Controlador
U	Tensão			CS	Cond. de Sinais
x	Deslocamento			DA	Conversor D/A
				T	Transdutor
				V	Válvula

Ex.:  $U_d^{AP}$  = Tensão desejada relativa ao amplificador de potência.

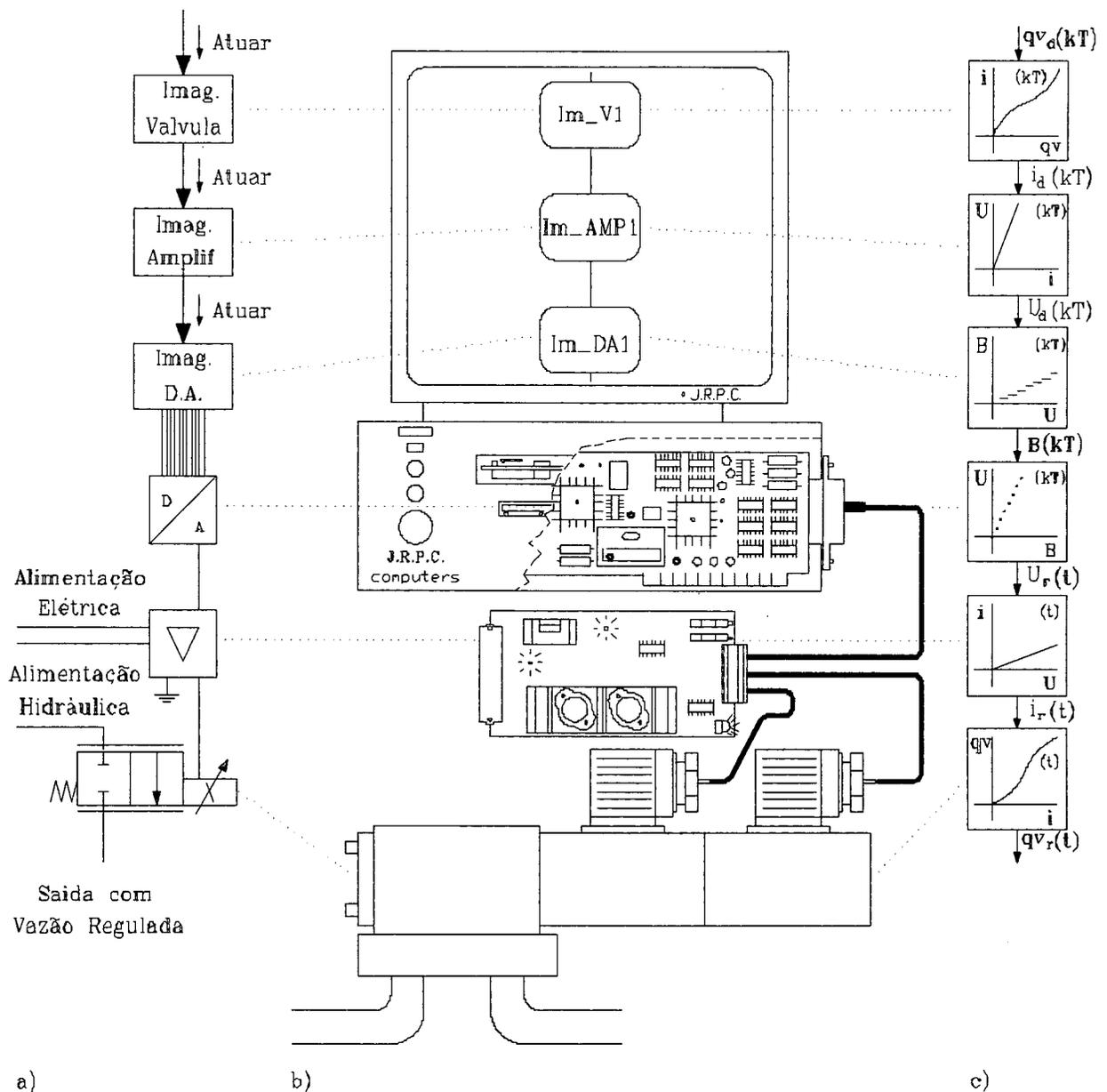


Figura 4.10 - Sistema de atuação em vazão: a) Modelo funcional/estrutural; b) Modelo estrutural; c) Modelo comportamental.

A rede C/A da figura 4.11 modela um sistema de atuação em posição que emprega um conjunto servoválvula-cilindro hidráulico como atuador, o qual recebe um sinal de um amplificador de potência e este de um conversor D/A. Como o conversor D/A é um instrumento de uso universal, cria-se uma

imagem específica a este possibilitando sua reutilização em outros sistemas de atuação. Os demais instrumentos dão origem a uma única imagem, já que estes são selecionados para formar um conjunto coeso e ao qual poderá ser atribuído um modelo comportamental único.

Como o circuito servoválvula-cilindro causa a integração do sinal de entrada, o controle de posição somente é possível em malha fechada. Assim, é empregado um sistema de medição de posição para levar a informação à *imagem do conjunto amplificador de potência-válvula-cilindro (Imag. Amp-Val-Cil)*.

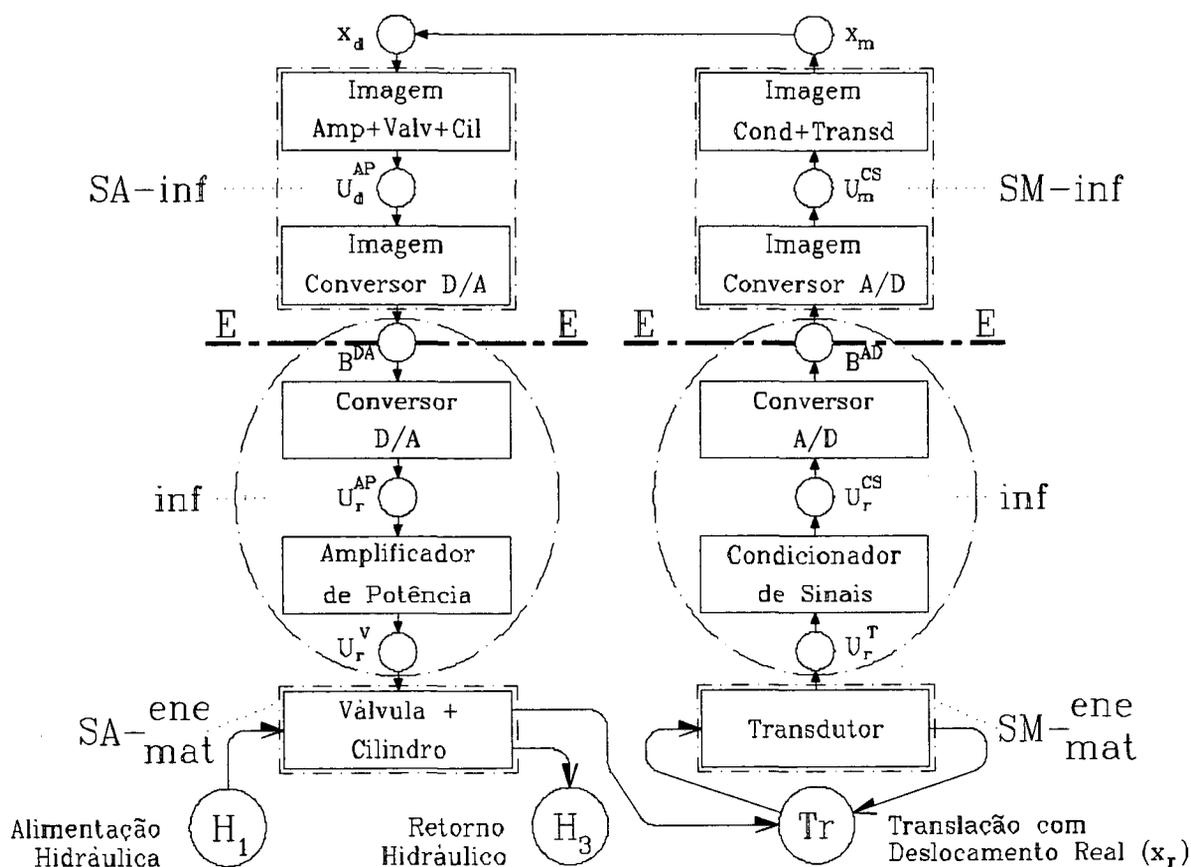


Figura 4.11 - Sistema de atuação em posição com controlador digital - Modelo funcional/estrutural.

Na figura 4.12 está representado o diagrama de blocos deste sistema em que a imagem comportamental do conjunto *Amp-Val-Cil* corresponde ao controlador proporcional, substituindo a característica de resposta estática empregada no exemplo anterior. Com este modelo, a imagem atende dinamicamente ao seu objetivo que é definir a tensão que deverá ser aplicada no amplificador de potência para que a posição desejada seja alcançada. Nesta figura, o conversor A/D é modelado pelo amostrador e pela quantização da tensão amostrada devido a sua resolução (número de **bits**); para o conversor D/A é incluída também a função transferência do sustentador (B0) (KATZ, 1981).

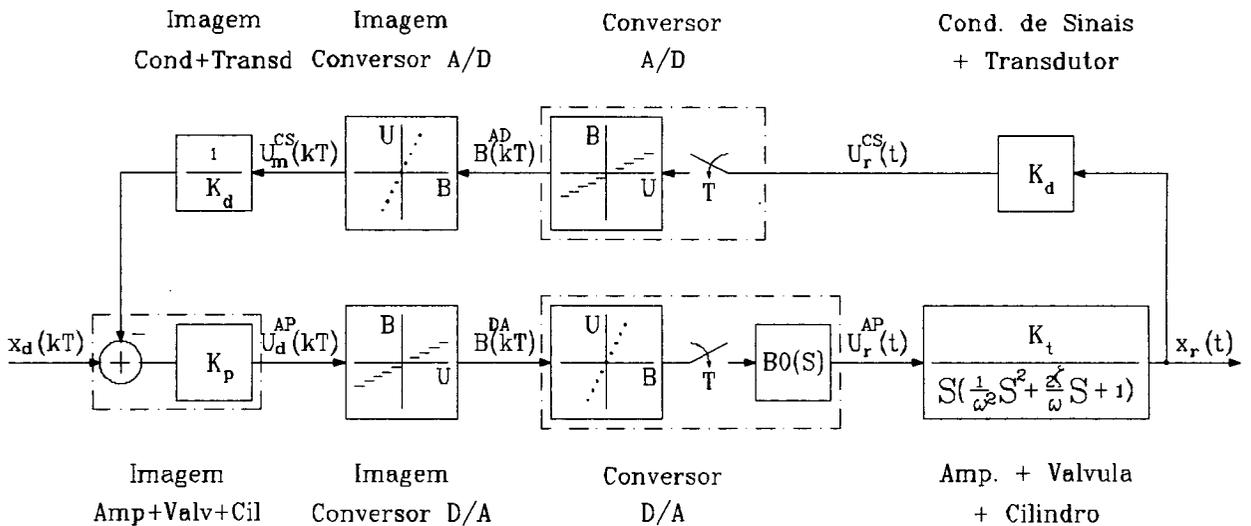


Figura 4.12 - Sistema de atuação em posição com controlador digital - Modelo comportamental.

Conforme modelado pela figura 4.13, uma construção alternativa para o caso anterior é o emprego de um controlador analógico que recebe o sinal de referência do computador. Neste caso é criada uma imagem do circuito em malha fechada que inclui

o controlador e os instrumentos de atuação e de medição. O comportamento modelado pela figura 4.14 mostra que a característica de resposta da imagem do circuito em malha fechada é o ganho do transdutor-condicionador de sinais ( $K_d$ ).

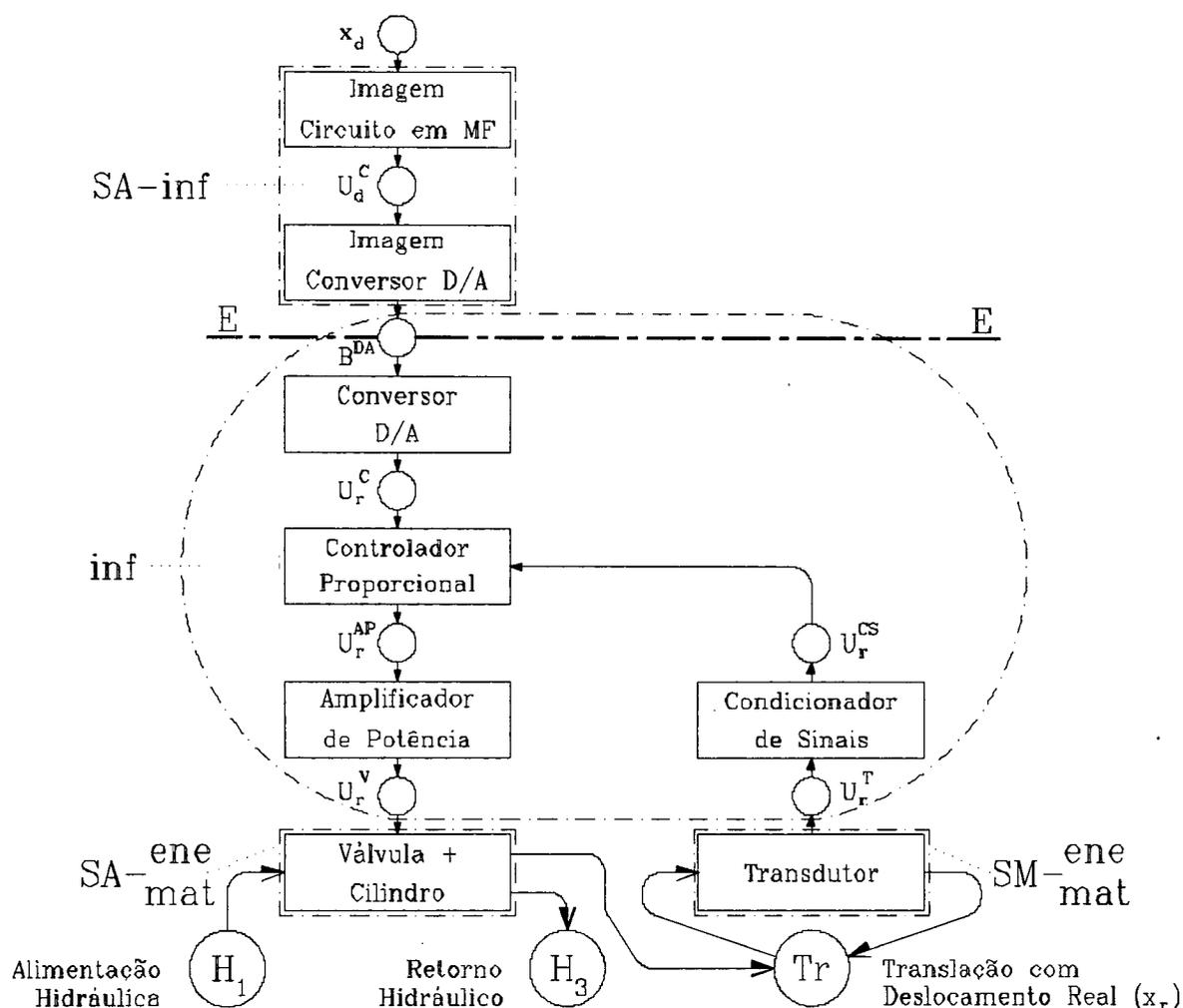


Figura 4.13 - Sistema de atuação em posição com controlador analógico - Modelo funcional/estrutural.

Complementando estes exemplos, ressalta-se que o encapsulamento, através de um sistema de atuação, de todas as ações necessárias para efetivar a modificação de um atributo real, facilita a análise e projeto do sistema automático já que é delegado ao sistema de atuação o compromisso de atender aos

requisitos comportamentais. Como a interface com o restante do sistema é a informação do atributo desejado, a troca de uma solução de atuação por outra (por exemplo do sistema da figura 4.11 pelo da figura 4.13) não implica em nenhuma modificação no restante do **software**, fato este que é uma característica do desenvolvimento orientado por objetos.

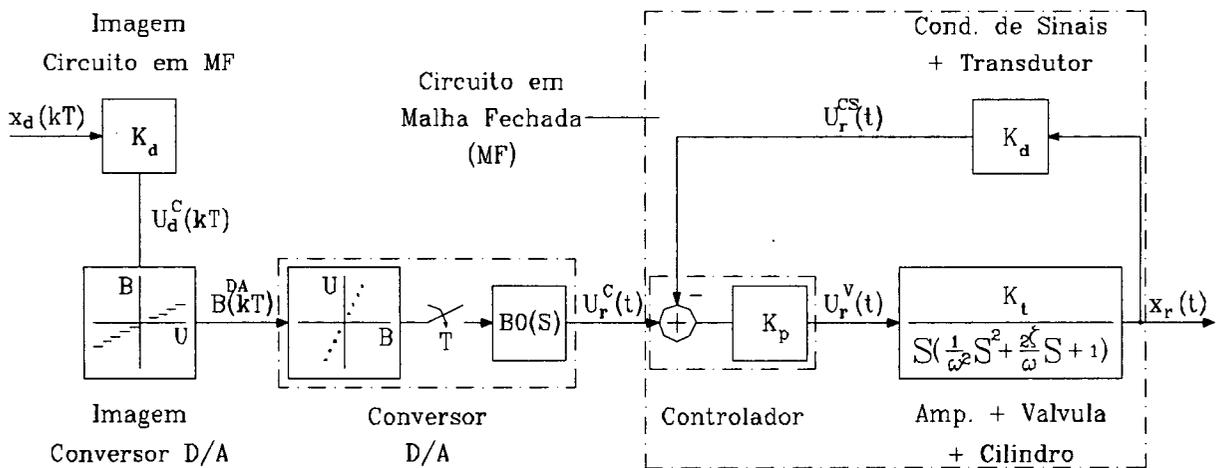


Figura 4.14 - Sistema de atuação em posição com controlador analógico - Modelo comportamental.

#### 4.5 - Modelo Refinado de Sistema Automático

Aplicando-se o mecanismo de refinamento de rede C/A (ver apêndice A) ao modelo funcional/estrutural condensado de um sistema automático (figura 4.1), chega-se ao modelo da figura 4.15 em que são evidenciados os sistemas de medição e de atuação que concretizam o fluxo de informações interno. Estes sistemas são os únicos que possuem tanto fluxo energético e/ou material como de informação em suas fronteiras.

Os componentes que manipulam somente com energia e/ou

matéria estão agrupados na atividade de processamentos de energia/matéria. Do mesmo modo, os tratamentos de informações sem interação com a energia e/ou matéria estão identificados pela atividade de processamentos de informações.

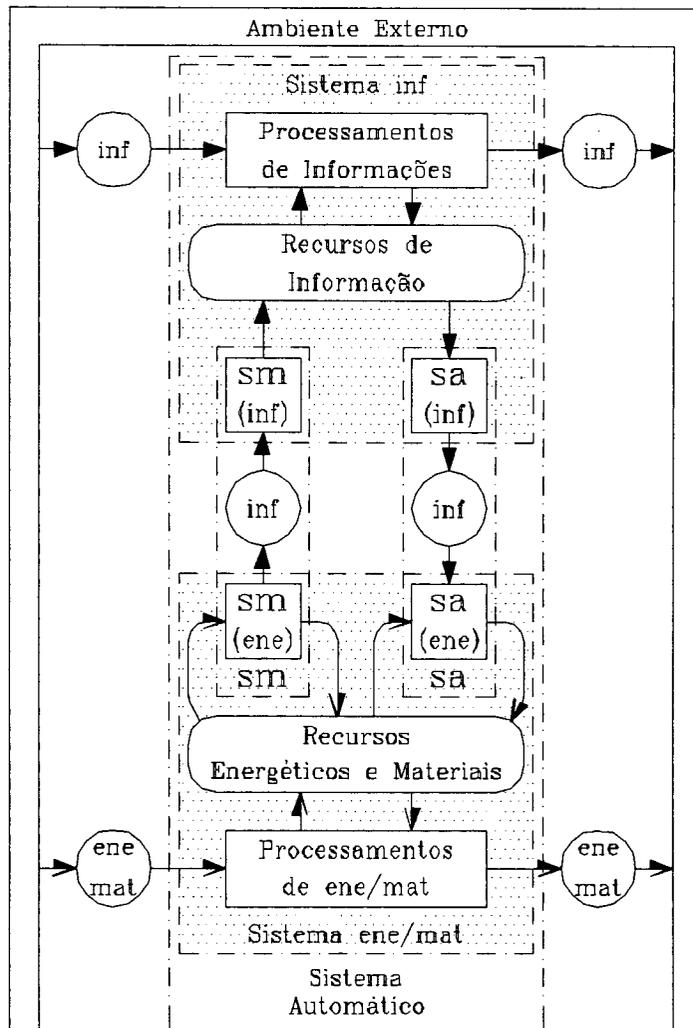


Figura 4.15 - Modelo funcional/estrutural refinado de um sistema automático.

Destaca-se que as figuras 4.1 e 4.15 denotam uma perspectiva funcional e estrutural como consequência da dualidade presente na notação em rede C/A. Nestes modelos são representadas atividades e agências evitando um rigorismo desnecessário pois, por exemplo, sob o ponto de vista estrutural

deveria-se escrever *sistemas de processamento de informações* ao invés de somente *processamentos de informações*. Como a perspectiva sistêmica está intimamente relacionada com a funcionalidade, a visão estrutural e funcional praticamente confunde-se nestes modelos mais abstratos.

## 5 - PROJETO DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS

No capítulo 3 mostrou-se que a modelagem de sistemas automáticos deve contemplar três perspectivas principais: função, comportamento e estrutura. A perspectiva funcional, através da rede C/A, foi empregada para caracterizar genericamente os sistemas automáticos (capítulo 4) e modelos comportamentais e estruturais mais concretos, como diagramas de blocos, desenhos esquemáticos e diagramas de circuitos, possibilitaram o detalhamento dos sistemas de medição e de atuação.

Os modelos citados acima, juntamente com outros aplicáveis às diversas áreas técnicas que compõe um sistema automático, são ferramentas importantes para o projeto, a análise ou para uma mera apresentação de um sistema. O uso destes modelos torna-se evidente através do processo de projeto, visto como um conjunto de atividades que busca, a partir da identificação das necessidades, alcançar as especificações detalhadas para a construção ou implementação de um sistema técnico.

Para os sistemas automáticos, as atividades de projeto ocorrem em diferentes domínios tecnológicos e, dependendo da amplitude do sistema, haverá o envolvimento de diversos especialistas, cada qual capaz de resolver aspectos técnicos em sua área do conhecimento.

Conforme citado no capítulo 4, a mecatrônica emergiu como uma tecnologia que visa o projeto de produtos e de processos que envolvam áreas técnicas diversas (VRIES et alii, 1994). Um

grande número de publicações tem proposto as orientações gerais para a sua modelagem e projeto como SALMINEN & VERHO (1991), REDFIELD & KRISHNAN (1991), RAULT (1992), BRADLEY & BUUR (1993) e SMITH & GAWTHROP (1992), além da discussão de ferramentas computacionais em desenvolvimento como em OH et alii (1994) e VRIES et alii (1994).

A partir destes trabalhos observa-se que ainda não há uma proposta concreta para o modelo do processo de projeto mecatrônico sendo, na verdade, empregada uma subdivisão segundo as fases do processo de projeto de produtos industriais que já está bastante amadurecido. Porém, um sistema automático inclui também partes em **software** que naturalmente serão projetadas segundo as metodologias da engenharia de **software**, tais como a análise/projeto estruturados e o desenvolvimento orientado por objetos.

Entende-se que a integração de todos os especialistas é possível por meio de uma metodologia própria para sistemas automáticos que contemple, dentro do possível, o processo de projeto de produtos e o projeto de **software**. Neste sentido, estabelece-se na próxima seção a comparação entre estas metodologias a fim de sugerir, na seção 5.2, as diretrizes para o projeto de sistemas automáticos.

### **5.1 - Comparação entre o Projeto de Sistemas Técnicos e de Software**

A análise detalhada das diferentes metodologias de

projeto industrial realizada em FIOD (1993) destaca a forte representatividade do *procedimento de projeto de sistemas técnicos* recomendado pela VDI 2221 (1987), a qual reflete a escola alemã e praticamente confunde-se com a *metodologia de projeto sistemático* segundo PAHL & BEITZ (1988).

Apoiado pelos trabalhos de FIOD (1993) e ROSA et alii (1995), apresenta-se na tabela 5.1 a subdivisão e as principais atividades, meios empregados e resultados obtidos de acordo com a VDI 2221 (1987) e PAHL & BEITZ (1988). Segundo as atividades descritas nesta tabela fica evidente, principalmente nas fases de projeto de configuração e projeto detalhado, que esta metodologia está voltada principalmente para o projeto de produtos mecânicos.

Por outro lado, conforme apresentado na seção 3.2, as metodologias de desenvolvimento<sup>1</sup> de **software** podem ser categorizadas em *decomposição funcional* e *orientadas por objetos* mas, apesar da possibilidade de utilizar inicialmente um destas metodologias e, posteriormente, detalhar o projeto ou realizar a implementação segundo a outra, JACOBSON et alii (1994: p.76) e HENDERSON-SELLERS & EDWARDS (1990) alertam que esta não é uma prática recomendada pois seria necessário o mapeamento entre conceitos não-homogêneos, prejudicando a manutenibilidade, reusabilidade e desempenho do **software** produzido.

---

<sup>1</sup>No contexto industrial, o termo *desenvolvimento* abrange o projeto, a construção de protótipos e, possivelmente, a reavaliação de produtos que já estão sendo comercializados. Em engenharia de **software** este termo inclui, segundo RUMBAUGH et alii (1992), as fases de análise, projeto e implementação e segundo HENDERSON-SELLERS & EDWARDS (1990) apenas a análise e projeto.

Tabela 5.1 - Subdivisão do projeto de produtos industriais.

Fases	Passos	Meios	Atividades	Resultados
Estudo do Problema (Definição da Tarefa)	Estudo da Tarefa	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Discussão interativa</li> <li>† Coleta de dados</li> <li>† Questões padronizadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Esclarecer os objetivos a serem alcançados</li> <li>† Esclarecer a tarefa ampla e exaustivamente</li> <li>† Coletar dados técnicos, econômicos, mercadológicos</li> <li>† Avaliar economicamente</li> </ul>	
	Especificação de Requisitos de Projeto	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Lista de itens característicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Elaborar lista de requisitos: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ em linguagem comum aos envolvidos</li> <li>▪ formal e completa</li> </ul> </li> </ul>	<i>Lista de Requisitos Obrigatórios e Desejáveis</i>
Concepção (Projeto Conceitual)	Estudo da Função a ser Desempenhada		<ul style="list-style-type: none"> <li>† Formular a tarefa através de função (descrição funcional)</li> </ul>	<i>Função Global</i>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>† Critérios lógicos</li> <li>† Critérios físicos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Decompor a função global em funções parciais e interligações</li> </ul>	1 ou + <i>Estruturas de Funções Parciais</i>
	Pesquisa de Princípios de Solução	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Métodos: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Convencionais,</li> <li>▪ Intuitivos,</li> <li>▪ Discursivos</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Encontrar princípios de solução para cada função parcial</li> </ul>	1 ou + <i>Princípios de Solução para cada Função Parcial</i>
	Estruturação de Módulos Realizáveis	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Matriz morfológica</li> <li>† Métodos matemáticos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Agrupar os princípios de solução em módulos realizáveis</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>† Critérios funcionais, técnicos e econômicos</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>† Selecionar a(s) solução(ões) proposta(s) (síntese do sistema total)</li> </ul>	1 ou + <i>Estruturas Modulares com Princípios de Solução</i>	
Projeto de Configuração (Projeto Preliminar)	Configuração dos Módulos Principais	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Normas</li> <li>† Cálculos</li> <li>† Critérios espaciais, econômicos, segurança, ergonomia,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Estabelecer forma, medidas básicas, materiais e processos de fabricação, para princípios de solução</li> <li>† Avaliar técnica e economicamente</li> <li>† Obter soluções para funções auxiliares</li> </ul>	1 ou + <i>Princípios Construtivos para cada Princípio de Solução</i>
	Configuração do Produto Total	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Desenhos formais</li> <li>† Listas provisórias de peças</li> <li>† Recomendações genéricas de fabricação e montagem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Descrever detalhes finais de princípios construtivos</li> <li>† Analisar acoplamentos de princípios construtivos</li> <li>† Avaliar técnica e economicamente o produto global (identificação de erros de projeto)</li> </ul>	<i>Princípio Construtivo Global</i>
Projeto Detalhado	Fixar Instruções de Execução e Uso	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Normas de fabricação, montagem, transporte e utilização</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Especificar os princípios construtivos</li> <li>† Definir o arranjo final</li> <li>† Reavaliar técnica e economicamente</li> <li>† Elaborar instruções para fabricação e utilização</li> </ul>	<i>Solução Técnica</i>

De todo modo, observa-se que as fases e passos recomendados são praticamente os mesmos para as diferentes metodologias, havendo diferenciação principalmente quanto aos meios, atividades e resultados obtidos. A tabela 5.2 reflete a divisão em fases e passos descritos por HENDERSON-SELLERS & EDWARDS (1990), estando as demais informações voltadas especificamente a orientação por objetos ((BOOCH, 1991), (EMBLEY et alii, 1992) e (JACOBSON et alii, 1994)).

Tabela 5.2 - Subdivisão do desenvolvimento de software orientado por objetos.

Fases	Passos	Meios	Atividades	Resultados
Análise	Análise de Requisitos do Usuário	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Entrevistas</li> <li>† Discussão interativa</li> <li>† Questões padronizadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Definir o problema</li> <li>† Analisar as necessidades, problemas e as tendências de desenvolvimento</li> <li>† Estudar a viabilidade</li> </ul>	
	Especificação de Requisitos do Usuário		<ul style="list-style-type: none"> <li>† Listar preliminarmente as especificações do sistema</li> <li>† Identificar requisitos alcançáveis em linguagem do usuário</li> </ul>	Especificações em linguagem natural e diagramas simples
	Especificação de Requisitos do Software	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Técnicas de especificação comportamental</li> <li>† Métodos formais de especificação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Descrever formal e completamente os requisitos do sistema: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ na linguagem do programador,</li> <li>▪ uso de classes/objetos do domínio do problema,</li> <li>▪ modelos da estrutura, função e comportamento</li> </ul> </li> </ul>	Diagramas de Classes/Objetos, Estados e Funções para o domínio do problema
Projeto	Projeto do sistema (projeto preliminar)		<ul style="list-style-type: none"> <li>† Tomar decisões acerca da arquitetura global: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Adicionar classes/objetos e relações do domínio da solução aos modelos,</li> <li>▪ Enfoque na visão externa das classes/ objetos</li> </ul> </li> </ul>	Diagramas de Classes/Objetos, Estados e Funções para o domínio da solução
	Projeto Detalhado		<ul style="list-style-type: none"> <li>† Definir e documentar cada componente que será realizado como código: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Enfoque na visão interna de classes, ▪ Criação da estrutura de dados e algoritmos</li> </ul> </li> <li>† Adicionar detalhes ao modelo</li> </ul>	Diagramas de Classes/Objetos, Estados e Funções para o domínio da implementação

É importante salientar que, ao contrário do projeto e construção de sistemas técnicos, o desenvolvimento orientado por objetos não está plenamente amadurecido, surgindo a cada ano novas metodologias que propõem alternativas para o procedimento de projeto e também para os modelos utilizados na representação do sistema em projeto ((JACOBSON et alii, 1994: p.1) e (HONIDEN et alii, 1993)). As informações constantes da tabela 5.2 refletem a tendência geral dessas metodologias.

A análise comparativa destas metodologias de projeto evidencia uma forte correlação entre suas fases. Primeiramente, os passos de *estudo da tarefa* e de *especificação de requisitos de projeto* da metodologia de produtos correspondem diretamente aos dois primeiros passos da metodologia de **software**, cuja meta final é a definição clara dos requisitos que deverão ser cumpridos pelo sistema a ser construído.

O passo de *especificação de requisitos do software* estrutura o problema em termos de classes e objetos, que são os elementos chaves do paradigma orientado por objetos e que estão presentes na implementação do **software**. Também são criados modelos que representam o comportamento e o funcionamento das classes e do sistema total requeridos pelo problema. Desta forma, caminha-se em direção a decomposição do problema e também ao esclarecimento de conceitos que provavelmente serão usados no projeto do sistema (passo subsequente); conforme HENDERSON-SELLERES & EDWARDS (1990), a fase de análise busca responder o *que?* deve ser feito mas também começa a responder *como?* será

feito, correspondendo a colocação de JACOBSON et alii (1994: p.155) de que o modelo de análise dá uma configuração *conceitual* ao sistema.

Sendo assim, é possível correlacionar este passo à fase de *concepção* do projeto de produtos, que também resulta na proposta de estruturas capazes de atender aos requisitos. Porém, são avaliados principalmente requisitos funcionais não contemplando aspectos temporais (comportamentais) como seqüências de operações (BUUR, 1990: p.59), enquanto que para o **software** a ênfase é muito maior em relação ao comportamento global do que à função de cada classe. A estrutura obtida nesta fase compõe-se de meios técnicos abstratos capazes de solucionar as funções parciais; correspondentemente, as classes para implementação em **software** são identificadas através de um nome, atributos e operações genéricas.

Na fase de *projeto preliminar* de um produto, os princípios físicos são transformados em sistemas concretos (princípios construtivos), podendo-se ainda identificar novas funções parciais e seus princípios de solução. No desenvolvimento do **software**, esta fase refere-se ao detalhamento da interface das classes, adição de novas classes para solução do problema e a fixação da arquitetura. Neste momento já é possível a construção de protótipos do produto industrial e do **software**.

Finalmente, no *projeto detalhado* realiza-se as especificações definitivas dos componentes e elabora-se as

instruções para a fabricação e utilização do produto. Para o **software**, nesta fase são tomadas decisões quanto a estrutura de dados e algoritmos necessários à implementação de cada classe, havendo também o refinamento da estrutura do sistema. Em ambos os casos, o resultado final é o conjunto de informações necessárias para efetivação da fabricação ou implementação.

## 5.2 - Processo de Projeto de Sistemas Automáticos

A análise realizada na seção anterior demonstra a existência de uma forte correlação entre as atividades de cada metodologia, tornando possível agrupá-las sob uma nomenclatura comum, conforme indicado na tabela 5.3. Identifica-se assim, quatro fases para o processo de projeto de sistemas que integrem componentes físicos e **software**, isto é, de sistemas automáticos.

Tabela 5.3 - Subdivisão do projeto de sistemas automáticos.

Sistemas Automáticos	Sistemas Técnicos		Software	
	Fases	Passos	Fases	Passos
Análise do Problema	Estudo do Problema	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Estudo da Tarefa</li> <li>† Especificação de Requisitos de Projeto</li> </ul>	Análise	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Análise de Requisitos do Usuário</li> <li>† Especificação de Requisitos do Usuário</li> </ul>
Projeto Conceitual (Concepção)	Concepção	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Estudo da Função</li> <li>† Pesquisa de Princípios de Solução</li> <li>† Estruturação em Módulos Realizáveis</li> </ul>	Análise	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Especificação de Requisitos do Software</li> </ul>
Projeto de Configuração	Projeto de Configuração	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Configuração dos Módulos Principais</li> <li>† Configuração do Produto Total</li> </ul>	Projeto	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Projeto do Sistema</li> </ul>
Projeto Detalhado	Projeto Detalhado	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Fixar Instruções de Execução e Uso</li> </ul>	Projeto	<ul style="list-style-type: none"> <li>† Projeto Detalhado</li> </ul>

A decomposição do processo de projeto em fases distintas, conforme as tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, estabelece a seqüência de resultados que deve ser obtida para, a partir dos requisitos, chegar progressivamente a uma especificação própria para construção<sup>1</sup>. Baseando-se nas colocações de RUMBAUGH et alii (1991, p.17) e de HOOVER et alii (1991), estes diferentes resultados podem ser entendidos como uma composição de modelos que representam o estado corrente do sistema que está sendo projetado.

Neste sentido, utiliza-se a rede C/A mostrada na figura 5.1 para modelar as transformações que ocorrem no sistema em projeto em decorrência da realização das fases do projeto. Este modelo é similar ao proposto por FRENCH IN: HENSON et alii (1994), o qual utiliza a notação da análise estruturada; além disso, a disposição das fases lembra o modelo clássico **waterfall** para o ciclo de vida do **software** (BOOCH, 1991: p.198).

Conforme esta figura, o sistema em projeto apresenta-se sob diferentes formas: primeiramente como *requisitos* e, em seguida, como *modelo conceitual (de concepção)* que formaliza os requisitos, principalmente funcionais, e estabelece uma ou mais estruturas genéricas capazes de solucionar o problema. Até este ponto o sistema em projeto ainda não é realizável. O *modelo de configuração* incorpora especificações mais refinadas e alterações nos componentes e estrutura de forma a tornar o sistema em projeto realizável sendo, então, possível a

---

<sup>1</sup> O termo *construção* é entendido como fabricação, montagem ou implementação.

construção de protótipos e simulações comportamentais. Como resultado da última fase do projeto, tem-se o sistema em projeto descrito pelo *modelo construtivo*, o qual fixa instruções para a construção.

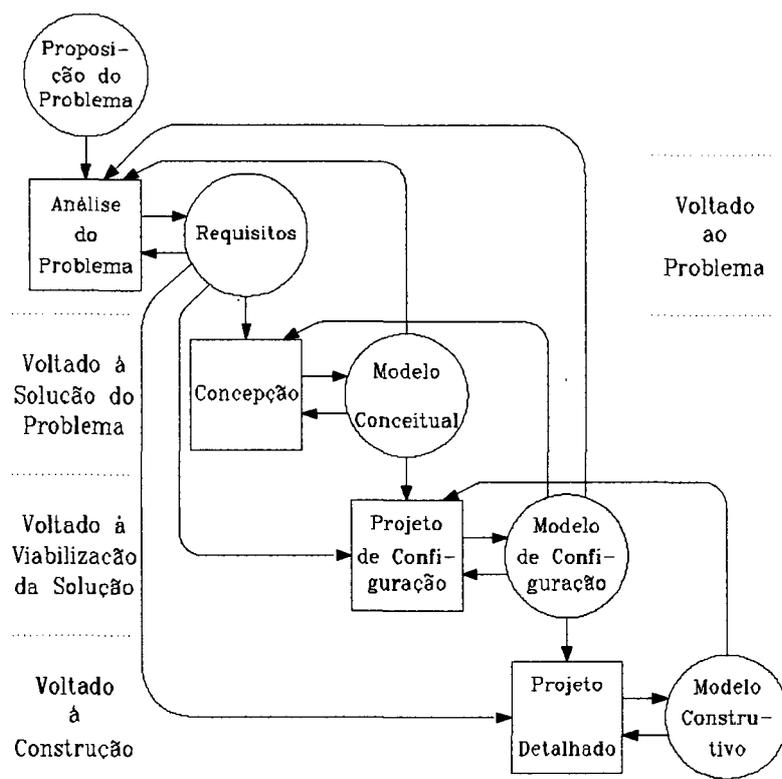


Figura 5.1 - Modelo funcional do processo de projeto para sistemas automáticos.

É importante frisar que o modelo da figura 5.1 é funcional, ou seja, mostra as transformações ou atividades que devem ser realizadas ao longo do projeto e os recursos, na forma de modelos, que alimentam e serão gerados pelas transformações. Portanto, formalmente nada é dito quanto a seqüência de realização das fases, o que poderia ser representado através de uma perspectiva comportamental como, por exemplo, por diagrama de estados ou rede de Petri marcada. Todavia, a disposição

descendente dos modelos (canais) indica, informalmente, a seqüência preferencial de realização das fases, refletindo que cada atividade utiliza os modelos gerados anteriormente.

Neste contexto é importante destacar o trabalho de HOOVER et alii (1991), onde é afirmado que os projetistas "... observam as tarefas de concepção, projeto de configuração e projeto detalhado através do processo de projeto, mas estas tarefas são realizadas em partes localizadas do objeto [sistema] em projeto e nem sempre são seqüenciais. Depois de realizar o projeto conceitual e o projeto de configuração para uma porção do objeto [sistema] em projeto, o projetista pode mudar para o projeto conceitual de outra parte usando os resultados anteriores para orientar esta última tarefa." Em outro parágrafo, os autores mencionam que "O processo de projeto nem sempre ocorre através do refinamento de um conceito abstrato em outro mais concreto; ao invés disso, são feitas repetidamente abstrações com aumento e redução de detalhes... Embora possa haver uma decomposição hierárquica do problema de projeto, o processo de solução do problema de projeto não é hierárquico."

No artigo citado, estas colocações são empregadas para negar a divisão do projeto em fases, sugerindo que o projeto seja realizado através de refinações no projeto orientadas por modelos e abstrações. Porém, entende-se que divisão em fases seja necessária para indicar ao projetista o nível de refinamento que deve ser alcançado, evitando a tomada de decisões prematuras que comprometam a flexibilidade e eficiência no projeto.

Para reforçar estas colocações, todos os autores que analisam o desenvolvimento de software orientado por objetos frisam que este deva ser *iterativo* e ocorrer através da criação e modificação de modelos que capturem as decisões de projeto para posterior implementação; também todas as metodologias orientadas por objetos empregam a divisão em fases de análise, projeto e implementação ((BOOCH, 1991), (RUMBAUGH et alii, 1991) e (JACOBSON et alii, 1994)).

A consideração de que o projeto evolui de forma diferenciada em partes isoladas do sistema, conforme estabelecido acima, permite interpretar a figura 5.1 como a representação das transformações que ocorrem no sistema em projeto como um todo, assim como a descrição do projeto de partes do sistema. Entende-se que a medida que o projeto evolui, possivelmente irão surgir projetos paralelos de partes do sistema e/ou a utilização de resultados de projetos já efetuados.

### 5.2.1 - Modelos no Projeto

Para a realização do projeto de sistemas automáticos não basta empregar as atividades, meios e modelos da engenharia de software para as partes em software e da engenharia de produto para a parte física. Também faz-se necessário integrar as diferentes áreas, principalmente na fase de concepção do sistema em que se decide quais as tecnologias que serão empregadas.

Conforme já mencionado, o resultado de cada fase do projeto expressa o estado atual do sistema em projeto. Para sua representação, normalmente faz-se necessária a utilização de um conjunto de modelos, cada qual representando uma perspectiva funcional, estrutural ou comportamental. Naturalmente, é desejável a utilização de modelos conhecidos pelos especialistas de cada área técnica, tais como diagramas de circuitos elétricos, desenhos técnicos, diagramas de fluxo de dados (DFD) etc.

Para possibilitar a comunicação entre os diversos especialistas e também a interrelação das informações contidas nos diferentes modelos, estrutura-se a modelagem do sistema em projeto em torno de um modelo central (**core model**), conforme sugerido em DIJK et alii (1992) e SMITH & GAWTHROP (1992). Segundo os primeiros autores, o modelo central tem o objetivo de armazenar todas as informações utilizadas pelos diferentes modelos e também coordenar o uso e atualização destes. Nesta abordagem, o modelo central é um meio para a estruturação de ferramentas computacionais na modelagem mecatrônica e não uma descrição voltada ao usuário.

Já segundo SMITH & GAWTHROP (1992), o modelo central é a primeira descrição feita do sistema físico e deve mapear, com bastante proximidade, a estrutura do sistema. Além disso, deve conter todas as informações necessárias para gerar os demais modelos requeridos. Esta modelagem é empregada para a análise comportamental utilizando grafos de ligação (**bond graphs**) como modelo central e do qual são derivadas descrições

como funções transferência e equações de estado.

Decorrente destas abordagens, adota-se como modelo central a rede C/A, que é criada na fase de concepção para captar os requisitos funcionais e, a medida que o projeto evolui, é refinada progressivamente assumindo uma perspectiva estrutural. Diretamente relacionados a rede C/A, podem ser criados modelos funcionais/estruturais próprios a cada solução técnica escolhida, como os diagramas de circuitos e desenhos técnicos. Os aspectos comportamentais são modelados por meios apropriados como funções transferência e diagramas de estado, mas devem estar vinculados a uma agência/atividade da rede C/A.

Alguns destes aspectos são observáveis na apresentação do sistema de atuação em vazão realizada no capítulo 4, onde as redes C/A mostradas na figura 4.9 refletem a fase de concepção do sistema e a figura 4.10.a o resultado do projeto de configuração em que são estabelecidos princípios construtivos e objetos computacionais. Na figura 4.10.b e 4.10.c são ilustradas a especificação definitiva dos instrumentos e dos objetos e os seus modelos comportamentais.

A integração de modelos também pode ser observada na figura 5.2 que representa a concepção de um sistema destinado ao acionamento mecânico rotacional com velocidade angular variável. Através da rede C/A, identifica-se os sistemas de medição e de atuação e demais atividades puramente energético/materiais e de informação que viabilizam uma solução para este problema.

A operação do sistema é gerida pela *coordenação*

de atuações e medições, que deve cumprir o comportamento modelado pelo diagrama de estados<sup>1</sup>. Conforme indicado na figura, no estado *inativo* o sistema estará totalmente desligado, no estado *pronto* apenas o bombeamento deverá estar ligado e no estado *ativo* estará sendo mantida a velocidade angular no valor desejado.

Como coordenação de atuações e medições toma apenas decisões lógicas, é delegado à atividade de *determinação do valor da velocidade angular* a atualização da velocidade angular desejada, que pode ocorrer na forma de degrau ou rampa. Nesta figura exemplifica-se também a concepção e configuração do sistema de atuação em velocidade angular utilizando-se os modelos já analisados anteriormente.

O emprego da rede C/A como modelo central, conforme ilustrado nestes exemplos, decorre dos seguintes aspectos:

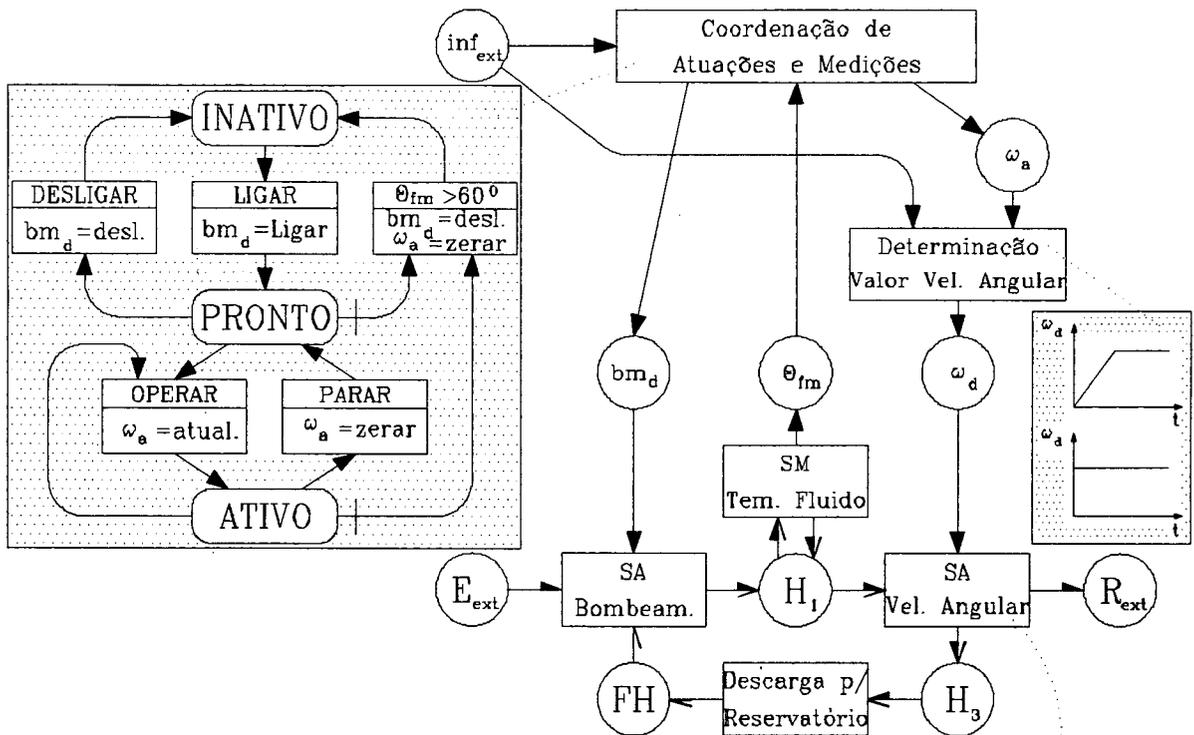
- emprega elementos fundamentais (recursos e atividades ou canais e agências), possibilitando a descrição dual de perspectiva funcional e estrutural.

- destaca os recursos energéticos, materiais e de informação (através dos canais), cujos atributos são a real necessidade de criar-se sistemas técnicos,

- é totalmente dissociado de soluções de implementação ou fabricação,

---

<sup>1</sup> Notação segundo EMBLEY et alii (ver apêndice 2).



Símbolo	Descrição
$bm_d$	Bombeamento desejado
$\theta_{fm}$	Temperatura do fluido medida
$\omega_a$	Atualização v. ang.
$\omega_d$	Velocidade angular desejada
$\omega_r$	Velocidade angular real
$E_{ext}$	Ene. elétrica externa
FH	Fluido hidráulico
$H_1$	Ene. hidráulica de alimentação
$H_3$	Ene. hidráulica de retorno
$inf_{ext}$	Informação externa
$R_{ext}$	Ene. rotacional externa (com $\omega_r$ )

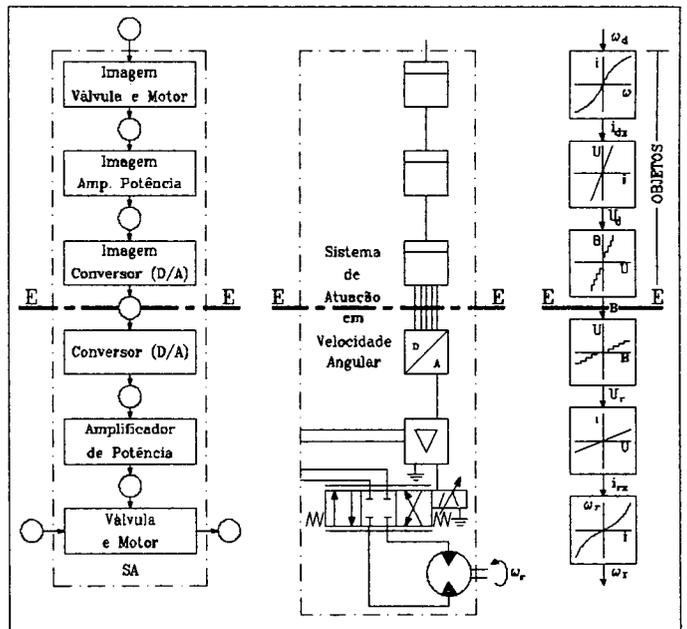


Figura 5.2 - Sistema de acionamento com velocidade angular regulável - Modelos funcionais/estruturais e comportamentais na fase de concepção.

- é equivalente a estrutura de funções empregada no projeto de produtos (o refinamento da rede equivale à decomposição funcional) e também é uma versão mais básica do diagrama de fluxo de dados (DFD) utilizado na engenharia de software,

- apesar de estar num nível bastante abstrato pode, através de refinamentos utilizando a mesma notação, dar origem a representações mais concretas, equivalendo-se à estrutura que será construída.

- Os canais e agências (elementos ativos e passivos) possibilitam a documentação de todos os componentes como válvulas, motores, objetos em software assim como suas interligações (tubulações, eixos, fios, mensagens etc.).

Finalizando este capítulo, destaca-se que a análise do processo de projeto para sistemas automáticos apresentada demonstra que se pode realizar o projeto usando as orientações próprias de **software** e de produtos sem criar conflitos entre os especialistas. Além disso, a utilização do modelo geral de um sistema automático apresentado na figura 4.15 como ponto de partida para a concepção, possibilita criar, através de refinamentos, redes C/A que integram domínios tecnológicos diversos, assegurando uma visão ampla e formal do sistema.

## 6 - PROJETO DE UM BANCO DE TESTES AUTOMÁTICO PARA SISTEMAS HIDRÁULICOS

Neste capítulo discute-se o projeto de um *banco de testes automático para sistemas hidráulicos* em implementação no Laboratório de Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (LASHIP/EMC/UFSC). Contando com uma equipe formada pelo Bel. Comp. Mauro Nortanicola Madeira, cuja dissertação de mestrado esteve associada a esta tese, pelo eng. Agnelo Denis Viera e por vários bolsistas de iniciação científica, tornou-se possível testar e aprimorar os conceitos e modelos propostos nesta tese.

No decorrer das duas próximas seções, discute-se as recomendações estabelecidas nas normas ISO de teste e propõe-se um conjunto de modelos para a concepção geral de bancos de testes que atendam as recomendações da ISO, sem imporem-se restrições ao tipo ou características do componente a ser testado. Na seção 6.3, relata-se o estágio em que se encontra o projeto e a construção deste banco.

### 6.1 - Análise Preliminar do Problema

De acordo com as necessidades do LASHIP/EMC/UFSC, pretende-se a construção de um banco de testes que possibilite a determinação de características operacionais de uma ampla variedade de componentes hidráulicos industriais e que também

possa ser empregado no desenvolvimento tecnológico e na pesquisa experimental de componentes e sistemas.

A construção deste banco está voltada à melhoria da infra-estrutura laboratorial para dar suporte à pós-graduação e à extensão universitária e, portanto, os componentes a serem testados ou ensaiados são bastante diversos, o que dificulta a limitação do problema.

Por outro lado, conforme comentado no capítulo 1, as normas de teste são aplicáveis de forma integral, ou pelo menos como diretrizes, para a realização dos diversos tipos de testes e ensaios aplicáveis à área de hidráulica, principalmente por tratar-se de uma fonte organizada e documentada de informações referendada por especialistas acadêmicos e da indústria.

Em face destes aspectos, faz-se a seguir uma avaliação genérica das normas técnicas para testes de componentes hidráulicos, buscando empregá-las como especificação de requisitos para o projeto deste banco de testes.

#### **6.1.1 - Testes Normalizados para Componentes Hidráulicos**

Existe um grande número de normas técnicas acerca de componentes e sistemas hidráulicos publicados por diferentes institutos nacionais de normalização tais como: ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), AFNOR (**Association Française de Normalisation**), ANSI (**American National Standards Institute**), BFPA (**British Fluid Power Association**), DIN

(Deutshes Institut für Normung), JIS (Japanese Industrial Standard), NFPA (National Fluid Power Association) e SAE (Society of Automotive Engineers).

O principal elo de ligação entre estes institutos é a ISO (International Organization for Standartization) que, junto com a IEC (International Electrotechnical Commission), formam um sistema para normalização internacional. As normas ISO são fruto do trabalho conjunto de membros em cerca de noventa países e buscam levar à unificação internacional das normas nacionais (ISO, 1983a).

Na área de sistemas hidráulicos e pneumáticos, estão publicadas diversas normas internacionais que tratam de aspectos como terminologia, especificação técnica, amostragem, teste e análise.

Especificamente quanto aos testes, a ISO abrange a maioria dos componentes hidráulicos existentes no mercado, podendo-se citar:

- Diversos tipos de válvulas: reguladoras de vazão e pressão, direcionais, servoválvulas, retenções, entre outras;
- Bombas, motores e transmissões integrais hidrostáticas;
- Mangueiras e engates;
- Filtros e elementos filtrantes.

Ainda, para cada componente ou grupo de componentes, são especificados diferentes testes que possibilitam determinar parâmetros e características comportamentais nos domínios elétrico, hidráulico, acústico e mecânico. Testes que ainda não estão cobertos pela ISO podem ser encontrados em publicações de institutos nacionais (como os citados anteriormente), cujas estruturas e procedimentos gerais são bastante similares.

Em face dos aspectos aqui mencionados, é plausível empregar as recomendações estabelecidas pela ISO como a principal fonte de informações para a especificação de requisitos para o banco de testes. Especificamente neste trabalho, são analisadas as normas listadas na tabela 6.1 que contemplam os principais componentes hidráulicos industriais e um grande número de testes. Neste estudo exclui-se os testes que exijam a injeção de contaminante no fluido, tais como os previstos pela ISO 4572 (ISO, 1981c) e pela ISO 9632 (ISO, 1992), pois nestes casos são necessários circuitos e componentes especiais que admitam a presença de contaminantes, ao contrário dos circuitos hidráulicos convencionais em que é imperativa a adição de filtros para limitar o nível de contaminação.

Os resultados da leitura e interpretação destas normas serão discutidos na fase de análise que supre a concepção apresentada na seção 6.2. A seguir destaca-se algumas constatações de cunho geral.

Primeiramente, observa-se que a terminologia geral para sistemas hidráulicos e pneumáticos, estabelecida

através da ISO 5598 (ISO, 1985a), é bastante abrangente, porém, os termos de uso mais restrito são definidos exclusivamente junto à norma de teste que os utiliza ou em normas específicas como na ISO 4391 (ISO, 1983b), voltada a bombas, motores e transmissões hidrostáticas.

Tabela 6.1 - Normas analisadas para a caracterização dos testes.

Número	Título
ISO 3968 (ISO, 1981b)	Sistemas Hidráulicos - Filtros - Avaliação de características de perda de carga versus vazão
ISO 4392-1 (ISO, 1989a)	Sistemas Hidráulicos - Determinação de características de motores - Parte 1: A velocidade baixa constante e a pressão constante
ISO 4392-2 (ISO, 1989b)	Sistemas Hidráulicos - Determinação de características motores - Parte 2: Capacidade de partida
ISO 4411 (ISO, 1986b)	Sistemas Hidráulicos - Válvulas - Determinação de características de pressão diferencial/vazão
ISO 4412-1 (ISO, 1979)	Sistemas Hidráulicos - Código de testes para a determinação de níveis de ruído aéreo - Parte 1: Bombas
ISO 4412-2 (ISO, 1991a)	Sistemas Hidráulicos - Código de teste para a determinação de níveis de ruído aéreo - Parte 2: Motores
ISO 4412-3 (ISO, 1991b)	Sistemas Hidráulicos - Código de testes para a determinação de níveis de ruído aéreo - Parte 3: Bombas - Método usando um arranjo de microfones em paralelepípedo
ISO 6403 (ISO, 1988)	Sistemas Hidráulicos - Válvulas de controle de vazão e de pressão - Métodos de teste
ISO 6404 (ISO, 1985b)	Sistemas Hidráulicos - Servoválvulas - Métodos de teste
ISO 8426 (ISO, 1988)	Sistemas Hidráulicos - Bombas de deslocamento positivo e motores - Determinação do deslocamento volumétrico
ISO 10100 (ISO, 1990)	Sistemas Hidráulicos - Cilindros - Teste de aceitação

Com relação as grandezas (parâmetros e variáveis), observa-se que as normas de teste não seguem rigorosamente a ISO série 31 (ISO, 1981a), que estabelece recomendações sobre quantidades, unidades e símbolos para vários campos do conhecimento. Conseqüentemente, não existe uniformização com relação a simbologia, o que é acentuado pelo

fato da ISO série 31 não prever o uso de subíndices. Um trabalho mais elaborado está associado aos testes de bombas, motores e transmissões que têm sua simbologia definida na ISO 4391 (ISO, 1983b), incluindo subíndices e superíndices. A notação empregada ao longo deste trabalho satisfaz, dentro do possível, a ISO 4391 (ISO, 1983b) e a ISO série 31 (ISO, 1981a).

Por fim, destaca-se que as recomendações para montagem dos circuitos e de condições e procedimentos de teste são bastante confusas, exigindo do usuário a junção de informações distribuídas em diversas seções das normas.

Apesar destes aspectos negativos, é inegável a fundamentação propiciada pela leitura atenta destas normas para a construção de um banco de testes. Além de informações gerais, as normas de testes incluem aspectos específicos, como a escolha do fluido de teste, os valores permissíveis para erros sistemáticos dos sistemas de medição e para erros de regime permanente, bem como detalhes para o posicionamento de pontos de medição.

## **6.2 - Análise e Concepção Gerais**

A finalidade básica do banco de testes automático é fornecer os resultados dos testes efetuados para o ambiente externo, ou seja, para quem os requereu. Para tal, é necessário que o banco receba as instruções e os dados para sua configuração e operação, além da energia e matéria que deverão fluir através do sistema em teste. A rede C/A geral para o banco

automático está mostrada na figura 6.1, onde o sistema em teste é considerado externo ao banco e com o qual interage através de canais de energia/matéria e de informação.

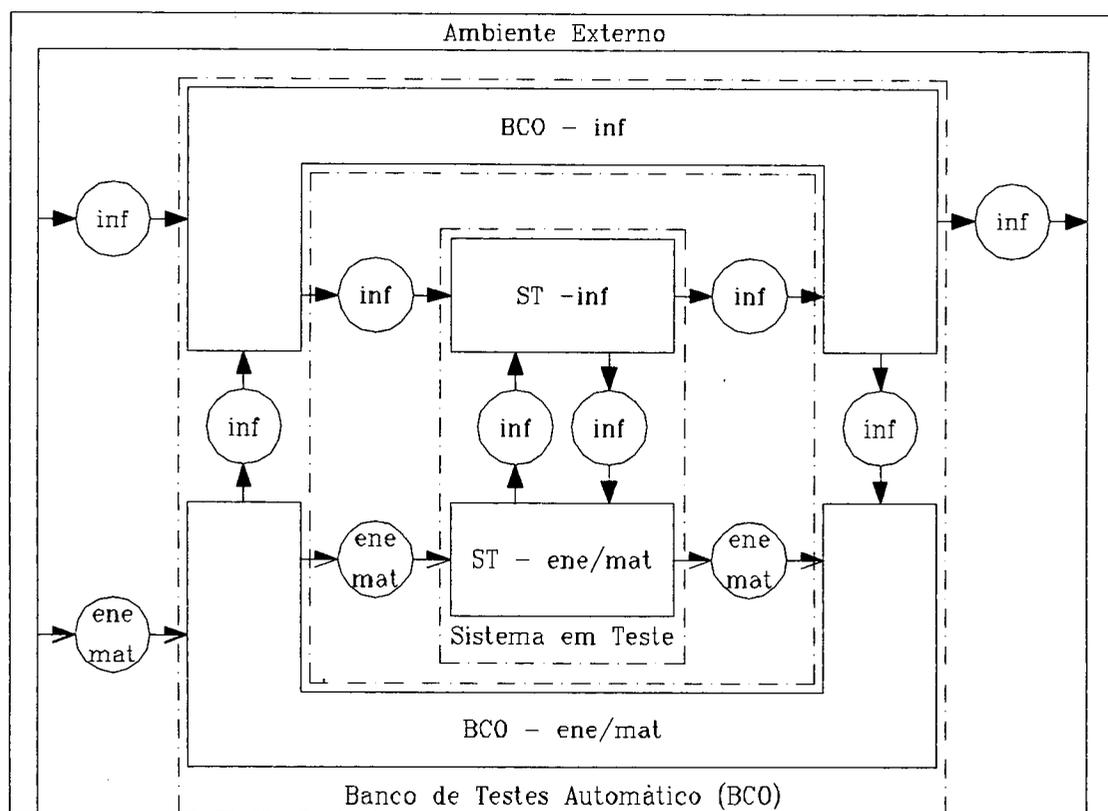


Figura 6.1 - Modelo funcional/estrutural geral do banco de testes automático.

Com o propósito de refinar esta rede C/A geral, além-se na próxima seção à parte energético/material e na seção 6.2.2 discute-se a parte de informação. Na seção 6.2.3 estes modelos são novamente reunidos a fim de delinear as atividades subseqüentes do projeto.

### **6.2.1 - Análise e Concepção da Parte Energético/ Material**

Em princípio, o subsistema energético/material deverá contemplar os circuitos hidráulicos básicos recomendados pelas normas ISO. Como um exemplo típico, apresenta-se na figura 6.2 o circuito proposto pela ISO 4392-2 (ISO, 1989b), destinado à determinação da capacidade de partida de motores hidráulicos segundo o método de torque constante ou de pressão constante. Referindo-se apenas ao primeiro método, a recomendação desta norma, expressa na seção "6.3 Procedimento de teste", compreende:

6.3.1 Ajuste a contrapressão na saída do motor em um valor constante (ver 6.2.2).

6.3.2 Aumente gradualmente a pressão de entrada até que o motor comece a girar (ver 6.2.3). Simultaneamente registre o deslocamento angular do eixo do motor em relação à pressão de entrada.

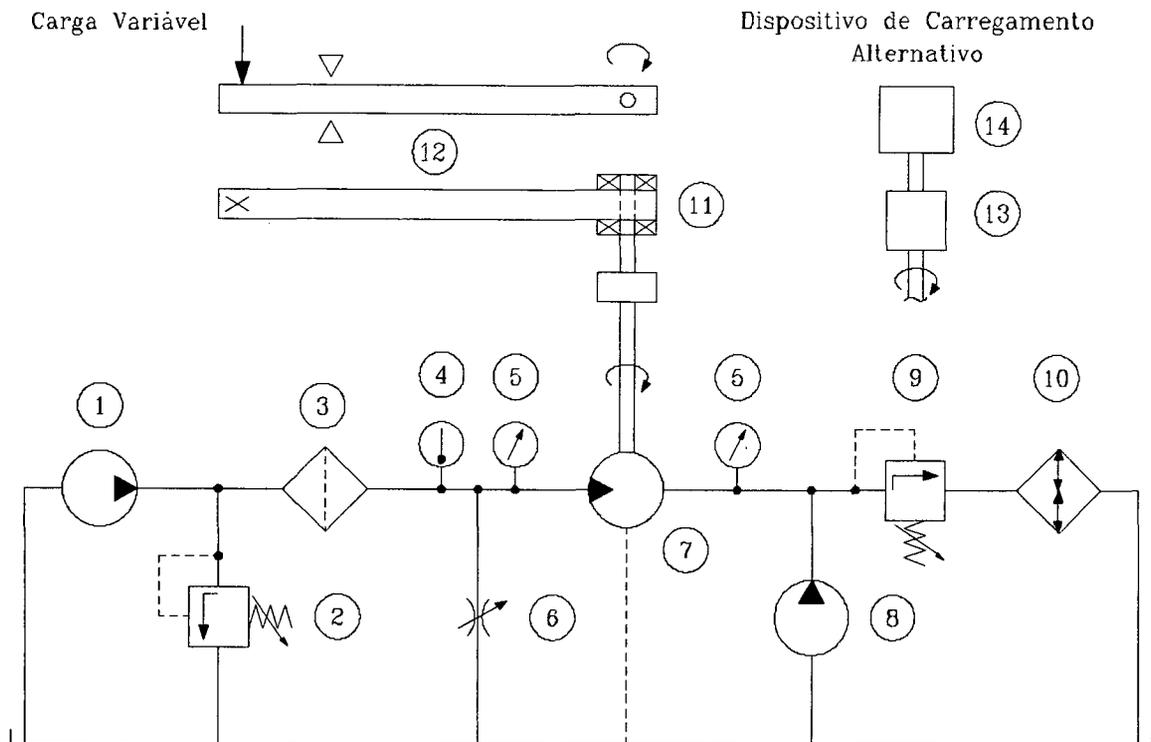
6.3.3 Produza um gráfico dos registros obtidos em 6.3.2 e anote a pressão na qual o motor começa girar, isto é, o ponto no qual existe uma mudança abrupta na inclinação da [curva] característica (ver 3.2).

6.3.4 Repita os passos descritos em 6.3.2 e 6.3.3 para diferentes posições do eixo (ver 6.2.5).

6.3.5 Repita os passos descritos em 6.3.2 a 6.3.4 para diferentes níveis de torque (ver 6.2.6) de modo que as características possam ser obtidas sobre uma faixa

representativa de condições de partida.

6.3.6 Para motores bidirecionais, repita os passos descritos em 6.3.2 à 6.3.5 na direção contrária.”



LEGENDA:

- |   |  |
|---|--|
| 1 - Bomba de alimentação                    | 8 - Bomba de contrapressão                     |
| 2 - Válvula de controle de pressão (manual) | 9 - Válvula de controle de contrapressão       |
| 3 - Filtro                                  | 10 - Trocador de calor                         |
| 4 - Indicador de temperatura                | 11 - Acoplamento de eixo                       |
| 5 - Indicador de pressão                    | 12 - Haste montada em rolamentos hidrostáticos |
| 6 - Restrição variável                      | 13 - Transdutor de torque                      |
| 7 - Motor sob teste                         | 14 - Carregamento de torque elétrico           |

Figura 6.2 - Circuito de testes segundo ISO 4392-2 (ISO, 1989b).

As seções citadas neste procedimento são apresentadas da seguinte forma:

“3 Definições

...

3.2 Partida a torque constante: O ponto no qual existe uma mudança abrupta na inclinação da [curva] característica do deslocamento angular versus pressão, quando o deslocamento angular do eixo do motor é medido entre o motor e a carga.

...

## 6.2 Condições de teste

...

6.2.2 A pressão de saída constante deverá ser mantida no nível recomendado pelo fabricante do motor.

6.2.3 A taxa de aumento da pressão de entrada por segundo deverá ser menor ou igual à 20% da pressão de teste e não deverá influenciar significativamente a pressão de partida.

...

6.2.5 O número de medições em diferentes posições do eixo deverá ser maior que o número mínimo necessário para que a máxima pressão de partida seja encontrada sobre uma revolução com um nível de garantia de 95%.

6.2.6 Os níveis de torque deverão ser mantidos constantes em  $\pm 1\%$ ."

Em conformidade com este procedimento, a bomba (8) e a válvula de alívio (9) têm a função de ajustar o valor da contrapressão e a válvula redutora de vazão (6) é responsável pelo ajuste da pressão de entrada, considerando que a válvula de alívio (2) esteja ajustada para o valor máximo de pressão recomendado pelo fabricante do motor.

Para o ajuste do torque, são sugeridos o uso de um acoplamento (11) com uma alavanca montada em mancais hidrostáticos (12) ou o emprego de um transdutor de torque com um dispositivo elétrico para o carregamento (14).

Os indicadores de pressão (5) e de temperatura (4) completam os dispositivos necessários para a monitoração das variáveis do teste (o teste deve ocorrer a temperatura constante). Conforme citado na norma, O filtro (3) e o trocador de calor (10) podem estar instalados em um circuito independente de condicionamento do fluido e não necessariamente na disposição mostrada na figura 6.2.

Como pode-se observar, são empregados símbolos funcionais bastante particularizados (o que é típico da simbologia hidráulica) para representar atividades mais genéricas. Com isto, há necessidade de sugerir diferentes soluções técnicas para uma dada atividade, como é o caso da atuação e medição do torque e do condicionamento do fluido citados acima. Além destes casos, também poderia ser adotada uma válvula proporcional de pressão no lugar da válvula redutora de vazão (6) ou um acumulador com regulador de pressão para substituir o conjunto bomba (8) e válvula de alívio (9).

Estes aspectos reforçam a utilização de uma notação genérica para a especificação do circuito de testes, o que pode ser alcançado através do encapsulamento de válvulas, indicadores e demais instrumentos em sistemas de medição e sistemas de atuação, conforme sugerido ao longo deste trabalho. Tal procedimento conduz a construção de um modelo funcional que

ênfatiza as atividades de medição e de atuação necessárias para a realização dos testes, sem especificação **a priori** dos instrumentos de medição e de atuação.

Por conseguinte, através de uma análise minuciosa de todos os circuitos e recomendações estabelecidas pelas normas estudadas (ver tabela 6.1), identificou-se inicialmente os recursos energéticos/materiais consumidos e/ou produzidos pelo sistema em teste e a estes interligou-se os sistemas de medição e de atuação necessários para a monitoração e alteração dos atributos destes recursos. O resultado deste trabalho está representado na figura 6.3, onde a utilização das setas paralelas com sentido inverso indicam que o recurso flui através da atividade de medição ou de atuação sem, no entanto, alterar o atributo que o identifica.

É importante ressaltar que, nesta rede C/A, os recursos energéticos e/ou materiais são distinguidos pelo tipo de energia ou matéria e por sua disposição espacial em relação ao sistema em teste, que é um de seus atributos. Assim, o sub-índice empregado na identificação do recurso estabelece o tipo de porta física do sistema em teste, tais como alimentação(1), retorno(3), dreno(d) etc., ao qual está interligado. (A simbologia da figura 6.3 está descrita na tabela 6.2).



Tabela 6.2 - Simbologia empregada na figura

6.3.

Símbolo	Descrição	Símbolo	Descrição
E	Energia elétrica	at	Aterramento
G	Campo gravitacional	bm	Bombeamento do fluido
H	Fluido hidráulico com energia	dr	Direcionamento do fluido
P	Energia pneumática	ds	Descarga do fluido
R	Energia mecânica rotacional	F	Força
FH	Fluido hidráulico	fx	Fixação mecânica
Tm	Campo térmico	i	Corrente
Tr	Energia mec. translacional	p	Pressão
S	Campo sonoro	qv	Vazão
		T	Torque
		U	Tensão
Sub-índice	Descrição	v	Velocidade
1	Alimentação	x	Deslocamento
2 e 4	Trabalho	$\theta$	Temperatura
3	Retorno	$\nu$	Viscosidade cinemática
d	Dreno	$\rho$	Massa específica
in	Interno	$\tau$	Contaminação do fluido
x	Pilotagem	$\phi$	Deslocamento angular
		$\omega$	Velocidade angular

Também destaca-se neste modelo os recursos internos ( $H_{1,in}$ ,  $H_{3,in}$  e FH) e as atividades de medição e de atuação vinculadas a estes e que dizem respeito ao fornecimento de energia hidráulica e à medição e regulação de propriedades do fluido hidráulico especificadas nas normas de teses. A energia pneumática e a energia elétrica são considerados recursos externos fornecidos ao banco, por normalmente estarem disponíveis nas instalações industriais e de pesquisa.

A medição de atributos dos recursos rotacionais, translacionais e elétricos de retorno não são citados nas normas mas, além da necessidade de fixação mecânica e ligação elétrica ao terra ou neutro pode-se, por exemplo, posicionar alternativamente as medições de torque e força entre a carcaça de um motor ou cilindro e a estrutura física de

referência ou realizar a medição da corrente que circula em um solenóide de uma válvula em teste colocando um resistor entre este e o terra.

Completando este modelo, são representados os sistemas de medição e de atuação internos ao sistema em teste, isto é, aqueles que possibilitam a medição ou atuação sobre recursos não disponíveis nas portas físicas (incluindo os campos externos). Como exemplos pode-se citar a medição do deslocamento do elemento de controle da válvula em teste recomendada na ISO 6403 (ISO, 1989c: seção 7.4.1) e a medição de pressão e de temperatura em tomadas específicas providenciadas pelo fabricante da bomba em teste, conforme alertado na ISO 4412-1 (ISO, 1979: seção 11.2.b). A atuação do sistema em teste sem o emprego da parte energético/material do banco ocorre, por exemplo, ao testar produtos como as servoválvulas com microprocessador incorporado (STEFANIDES, 1987).

Entende-se a rede C/A apresentada na figura 6.3 como uma representação alternativa aos circuitos de testes sugeridos pelas normas e que permite a especificação dos requisitos funcionais (principalmente as medições e atuações) sem a vinculação a soluções técnicas particulares. Além disso, considera-se que os conjuntos compostos pelos canais e sistemas de medição e de atuação ligados ao sistema em teste podem ser repetidos quantas vezes for necessário, de modo a permitir a conexão com o sistema em teste.

A fim de exemplificar a validade deste modelo, apresenta-se na figura 6.4 a rede C/A equivalente ao teste de determinação da capacidade de partida de motores recomendado pela ISO 4392-2 (ISO, 1989b), conforme descrição anterior (figura 6.2).

Da mesma forma, a figura 6.5 atende ao circuito de testes recomendado pela ISO 4411 (ISO, 1986b) destinado a determinação de características de pressão diferencial/vazão e aplicado, neste exemplo, a uma válvula de retenção. O objetivo do teste é a determinação da perda de carga ( $p_1 - p_3$ ) para diferentes níveis de vazão ( $qv_3$ ). Antes de iniciar este teste, devem ser colhidas amostras de fluido para a medição da viscosidade cinemática ( $\nu$ ) e da massa específica ( $\rho$ ) e, durante o teste, a temperatura do fluido ( $\theta_f$ ) deve ser mantida constante.

Como terceiro exemplo, apresenta-se na figura 6.6 a rede correspondente aos testes dinâmicos aplicados a servoválvulas eletro-hidráulicas segundo recomendação da ISO 6404 (ISO, 1985b). O propósito é a aplicação de sinais em corrente (degrau e senoidal) e a medição da vazão resultante entre as portas de trabalho  $H_2$  e  $H_4$ . Durante os testes, a pressão de alimentação ( $p_1$ ) e as temperaturas do fluido na alimentação da válvula ( $\theta_{f1}$ ) e do ambiente ( $\theta_{am}$ ) devem ser mantidas constantes.

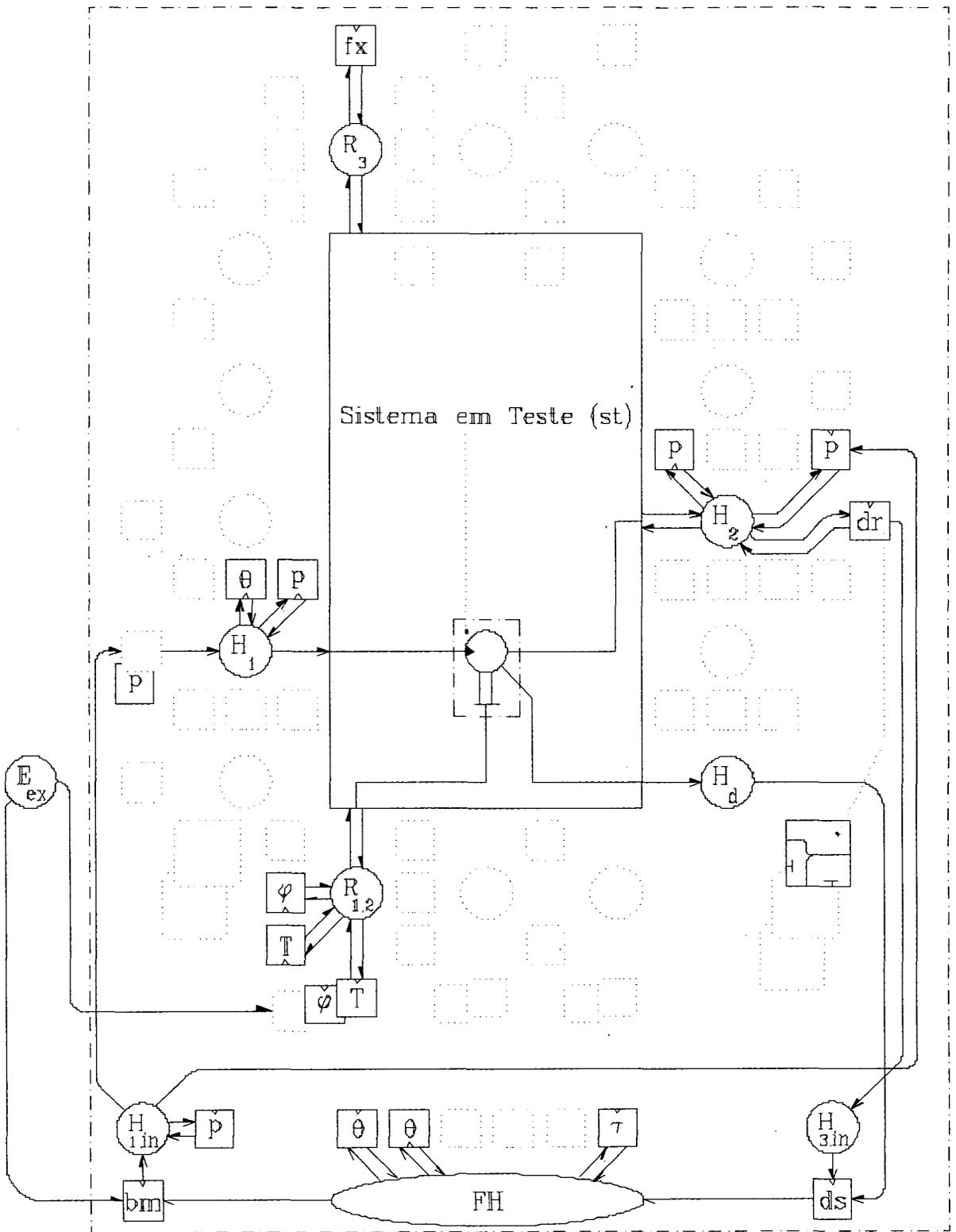


Figura 6.4 - Modelo funcional da parte energético/material do banco para atender a ISO 4392-2 (ISO, 1989b).

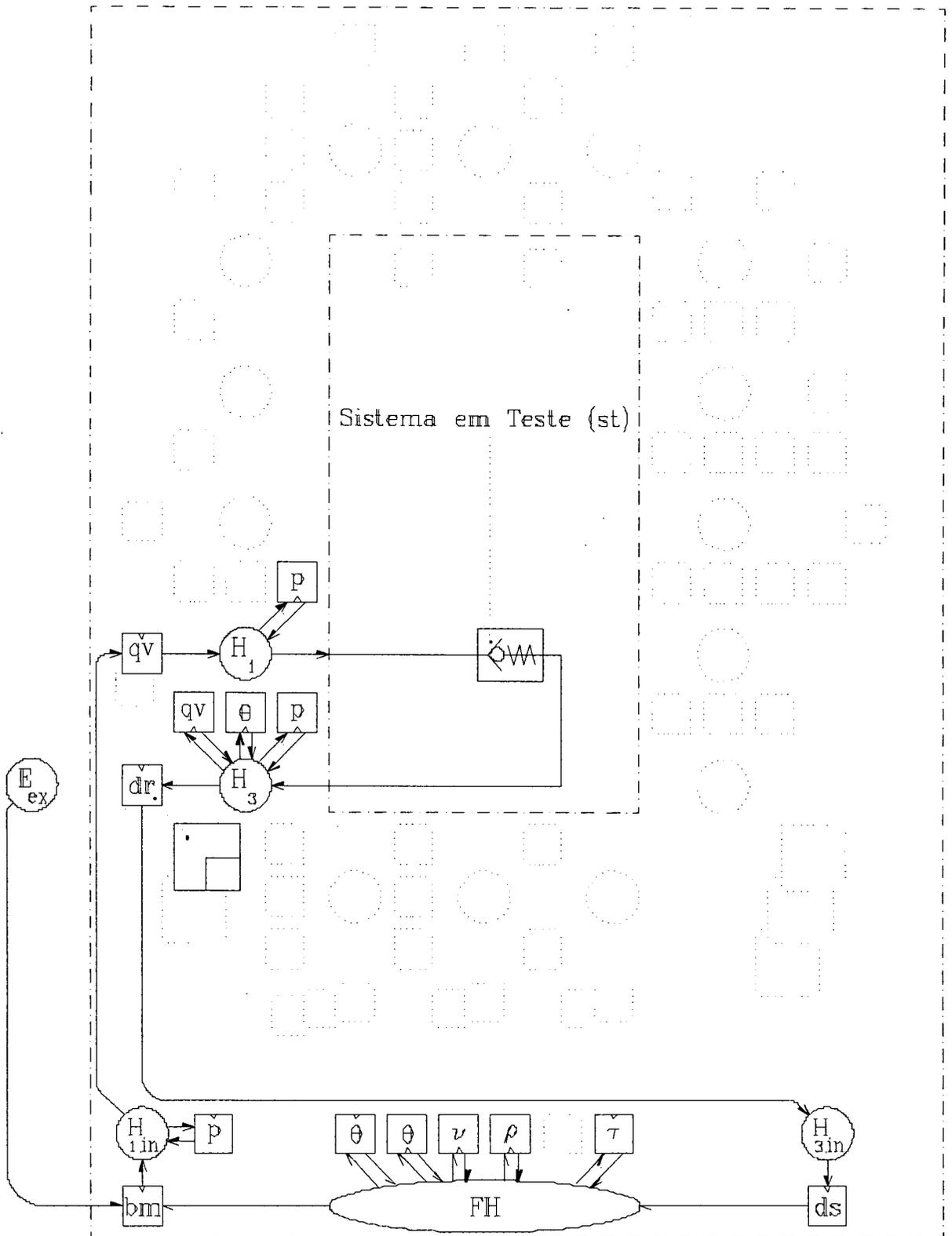


Figura 6.5 - Modelo funcional da parte energético/material do banco para atender a ISO 4411 (ISO, 1986b).

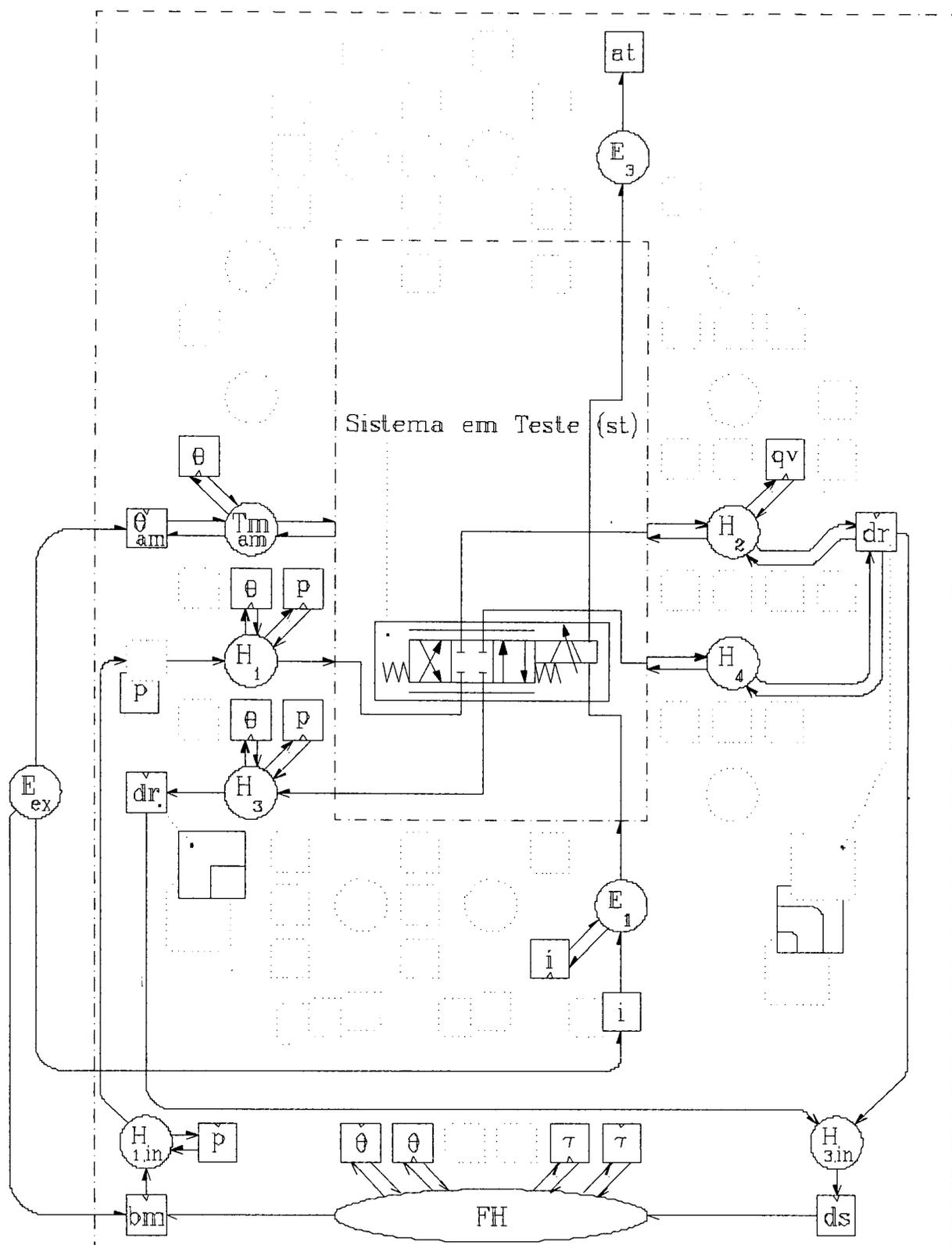


Figura 6.6 - Modelo funcional da parte energético/material do banco para atender a ISO 6404 (ISO, 1985b).

### 6.2.2 - Análise e Concepção da Parte de Informação

Estabelecido o modelo funcional para a parte energético/material, parte-se para a análise dos processamentos de informações requeridos na realização dos testes. Dentre estes, tem-se os *procedimentos de teste*, tipicamente apresentados na forma citada no início da seção anterior para a ISO 4392-2 (ISO, 1989b) e complementados com outras informações dispersas ao longo das normas. Nesta norma específica, encontra-se também as seguintes recomendações:

“5.1 Circuito hidráulico de teste

...

5.1.2 Deverá ser instalado um circuito de condicionamento de fluido que promova a filtragem necessária para proteger o motor em teste e os outros componentes do circuito e que irá *manter a temperatura do fluido na entrada do motor em 50°C ou 80°C e dentro de  $\pm 2^\circ\text{C}$*  [o grifo não consta no original].

...

5.1.4 A máxima pressão de teste não deverá exceder aquela recomendada pelo fabricante do motor.”

Esta dispersão de informações é comum em todas as normas de teste em hidráulica, não só no que diz respeito aos procedimentos de teste, mas de forma generalizada incluindo, por exemplo, as recomendações de construção dos circuitos e de aquisição e análise dos dados.

Entende-se que as normas devam ser um documento

de especificação de requisitos para o projeto do banco de testes pois, por mais simples que seja o teste e os meios escolhidos para sua realização, será aplicado um processo de projeto, informal ou não. Para tal, procurou-se categorizar todas as recomendações presentes em uma norma por meio de atividades macroscópicas que, sob o ponto de vista estrutural, serão agências (sistemas) que futuramente serão implementadas.

O resultado desta investigação deu origem a rede C/A mostrada na figura 6.7<sup>1</sup>, em que são destacadas três atividades principais: *coleta de dados*, *apresentação de resultados* e *realização do teste*. As duas primeiras são atividades comuns a qualquer sistema de processamento de informações pois estabelecem a comunicação com o usuário ou com outros sistemas de informação. Todas as normas analisadas (tabela 6.1) destinam uma seção para a especificação das informações que devem ser incluídas na apresentação dos resultados do teste, tais como os dados do sistema em teste, a descrição do circuito hidráulico empregado e as características obtidas na forma de tabelas ou gráficos, entre outras.

A atividade de *realização do teste* é refinada em *preparação do teste*, *execução do teste* e *avaliação do teste*. Esta última subentende o cálculo de grandezas que determinam as condições a que o sistema em teste deverá ser submetido como, por exemplo, a determinação do torque, do número de pulsos por

---

<sup>1</sup> As figuras 6.3 e 6.7 constituem um só modelo funcional/estrutural e são interligados através dos sistemas de medição e de atuação, repetidos em ambas as figuras.

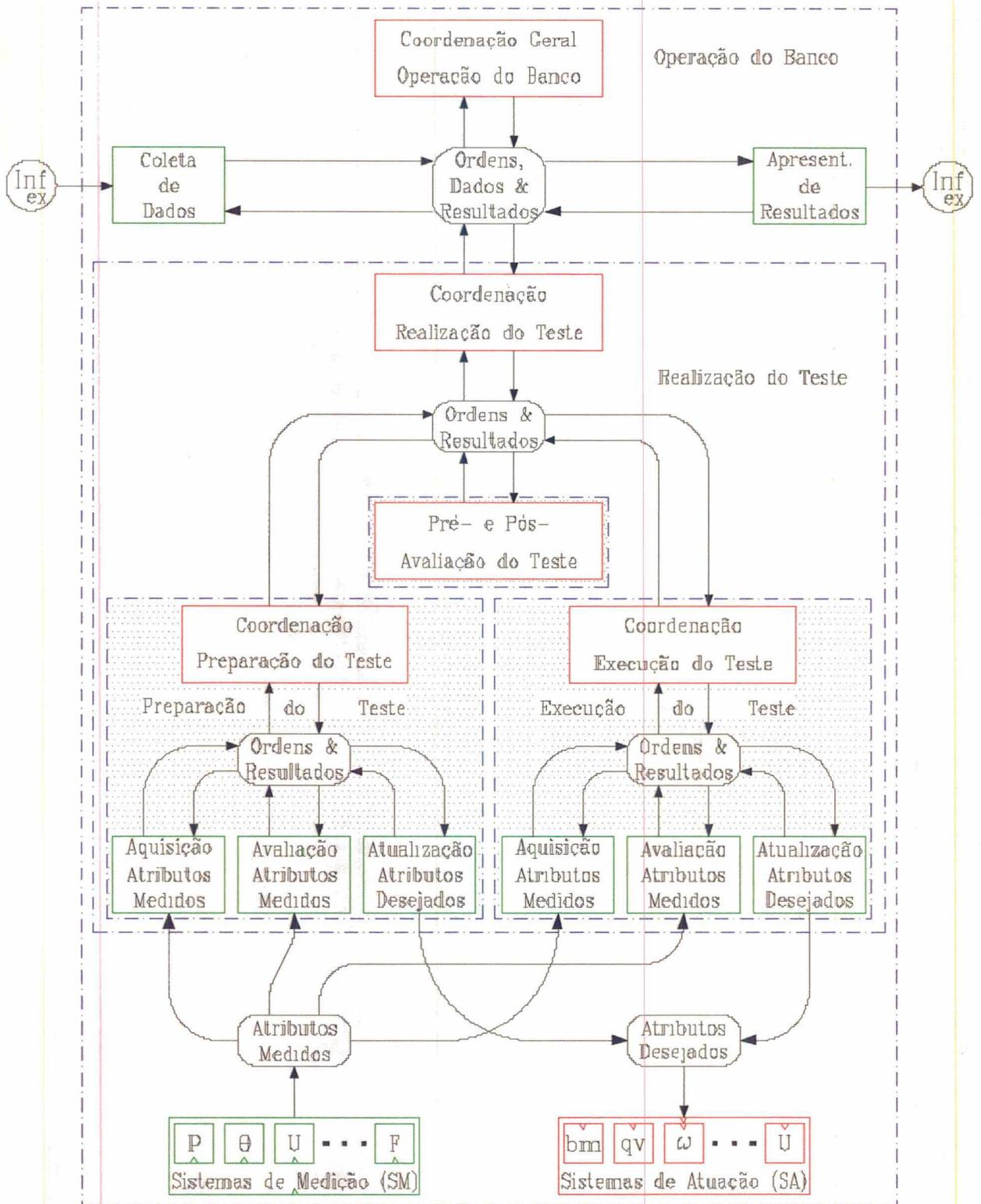


Figura 6.7 - Modelo funcional/estrutural geral para concepção da parte de informação do banco.

revolução e da vazão teóricos do motor previstos na ISO 4392-1 (ISO, 1989: Cap.6). Além desta *pré-avaliação*, é normalmente necessário o processamento dos dados colhidos no teste (*pós-avaliação*) a fim de determinar grandezas derivadas das medições realizadas durante o teste, como rendimento, deslocamento volumétrico, perda de carga, entre outras.

Como parte essencial da concepção do banco de testes estão a *preparação e a execução do teste*, que são as atividades ligadas diretamente com os sistemas de atuação e de medição, isto é, são responsáveis pela geração do valor dos atributos desejados e pela utilização dos atributos medidos. Por conseguinte, todas as recomendações sobre as condições operacionais a serem aplicadas e observadas em relação ao sistema em teste deverão ser atribuídas a estas atividades.

Com respeito a *execução do teste*, a análise dos procedimentos de teste normalizados resultou na abstração de três categorias de teste: *estático* (em regime permanente), *quase-estático* e *dinâmico* (em regime transiente). Como teste estático, pode ser enquadrado o procedimento estabelecido pela ISO 4411 (ISO, 1986b):

“6 Procedimento de teste

6.1 Fluido de teste

...

6.2 Temperaturas

...

6.3 Condições de regime permanente

6.3.1 Todas as leituras somente deverão ser gravadas depois que as condições de regime permanente tenham sido alcançadas.

6.3.2 Quando as condições de teste em regime permanente forem alcançadas para uma condição específica de teste, somente um conjunto de leituras de cada quantidade individual deverá ser tomada sobre períodos de tempo comuns e concorrentes. Cada leitura deverá ser gravada como o valor médio da quantidade que está sendo medida.

#### 6.4 Desempenho

O número de conjuntos de leituras a ser tomado e sua distribuição ao longo da faixa deverá ser selecionado para dar uma indicação representativa do desempenho da válvula sobre a faixa completa de vazão selecionada para o teste."

Particularizando este procedimento para o teste de uma válvula de retenção descrito anteriormente (figura 6.5) pode-se, pensando em termos de atuações e de medições, descrever a sua execução através de três atividades seqüenciais:

- *Atualização dos atributos desejados* - temperatura do fluido e vazão (segundo seção 6.4<sup>1</sup>),
- *Avaliação do regime permanente dos atributos medidos* - temperatura do fluido, vazão e pressões de alimentação e de retorno (segundo seção 6.3.1<sup>2</sup>),
- *Aquisição dos atributos medidos* (segundo

---

<sup>1</sup> Referente à seção da ISO 4411 (ISO, 1986b).

<sup>2</sup> Referente à seção da ISO 4411 (ISO, 1986b).

seção 6.3.2<sup>1</sup>).

Estas atividades, incluídas na figura 6.7, devem ser repetidas até que o sistema em teste esteja completamente caracterizado.

Este modelo de execução de teste também aplica-se ao procedimento da ISO 4392-2 (ISO, 1989b) discutido anteriormente porém, simultaneamente à aquisição dos atributos medidos, deve ocorrer a alteração de um dos atributos desejados (a pressão de alimentação ( $p_1$ )). Como o objetivo da norma é submeter o sistema em teste a condições de regime permanente, é imposta uma limitação para a taxa de variação da pressão no tempo (segundo seção 6.2.3<sup>2</sup>).

De acordo com os conceitos da termodinâmica, tal procedimento pode ser visto como um *processo quase-estático* (de quase-equilíbrio), definido em VAN WYLEN & SONNTAG (1970) como aquele em que "... o desvio do equilíbrio termodinâmico<sup>3</sup> é infinitesimal e todos os estados pelos quais o sistema passa, durante um processo de quase-equilíbrio, podem ser considerados como estados de equilíbrio."

Nos testes dinâmicos, verifica-se novamente a necessidade de atuação com valores constantes de determinados atributos e a verificação da permanência em regime permanente destes. Além disso, um dos atributos desejados deve ser alterado para provocar a resposta dinâmica do sistema em teste. O teste

---

<sup>1</sup> Referente à seção da ISO 4411 (ISO, 1986b).

<sup>2</sup> Referente à seção da ISO 4392-2 (ISO, 1989b).

<sup>3</sup> O equilíbrio termodinâmico se verifica quando não há tendência de mudança do estado do sistema com o tempo, sendo o estado definido pelo valor de suas propriedades (VAN WYLEN & SONNTAG, 1970: p. 19-20).

segundo a ISO 6404 (ISO, 1985b) descrito na figura 6.6 é um exemplo.

Depreende-se que estes três tipos de teste podem ser descritos por um modelo comportamental único, apresentado pelo diagrama de estados<sup>1</sup> da figura 6.8. Um número determinado de atributos desejados ( $a_{di}$ ,  $i=1..n-1$ ) deverá ser alterado passo-a-passo durante a execução do teste e, continuamente, deverá ser avaliado o desvio dos atributos medidos em relação aos erros de regime permanente fixados nas normas. As características comportamentais do sistema em teste serão obtidas através da alteração contínua de um atributo ( $a_{dn}$ ) e da aquisição simultânea dos atributos medidos ( $a_{mj}$ ,  $j=1...k$ ).

Segundo este modelo, os testes estáticos serão realizados através de um procedimento quase-estático, o que não contradiz as normas desde que a taxa de variação do atributo desejado ( $a_{dn}$ ) seja suficientemente baixa para não provocar alterações transientes na resposta do sistema em teste.

Em relação à rede C/A da figura 6.7, o diagrama de estado da figura 6.8 representa o comportamento do coordenador de execução do teste, definindo a seqüência das atividades de *atualização*, *avaliação* e de *aquisição*. Detalhes ilustrados informalmente ao lado dos estados são de responsabilidade das atividades correspondentes.

---

<sup>1</sup> Notação segundo EMBLEY et alii (1992) (Ver apêndice B).

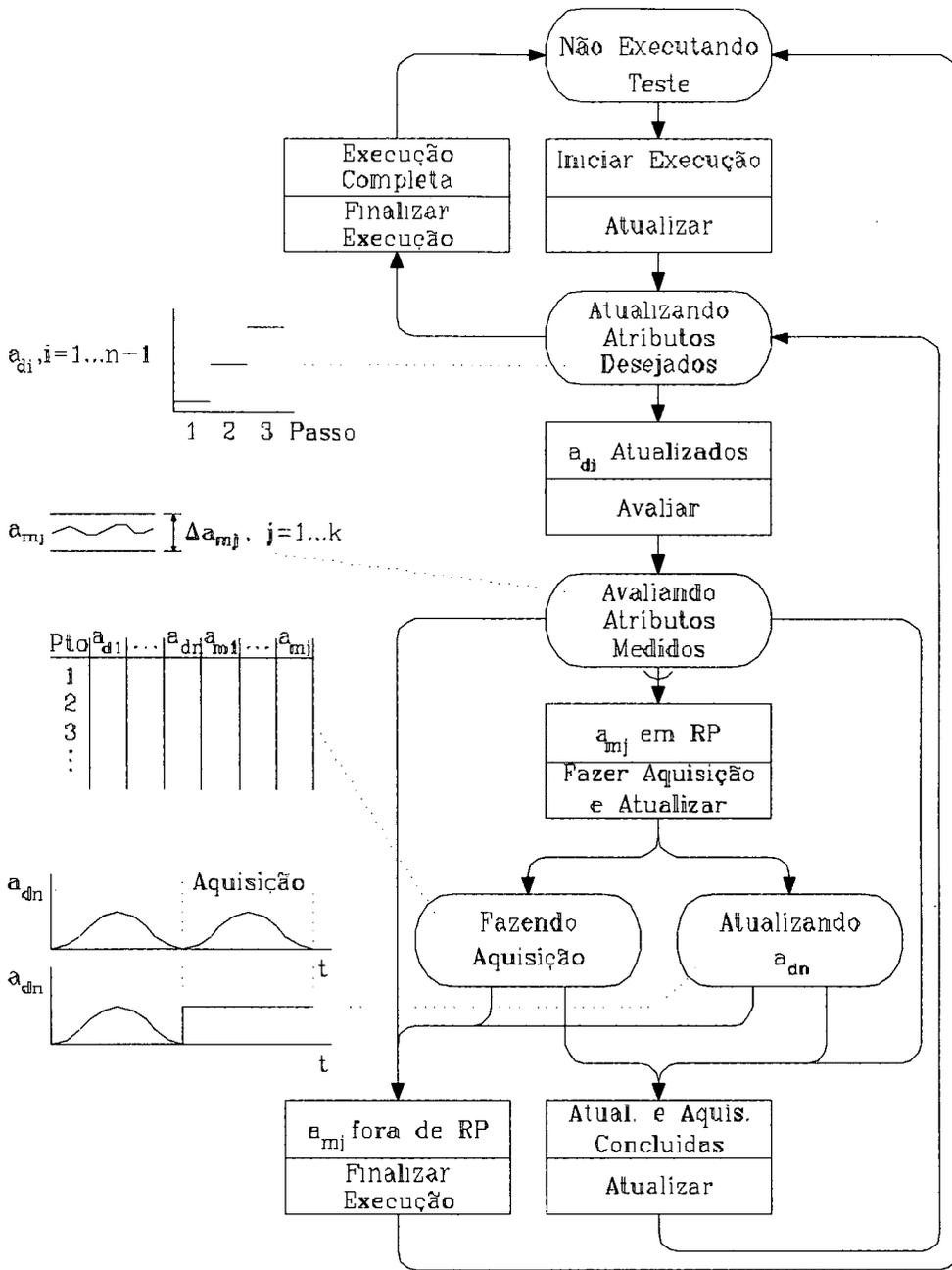


Figura 6.8 - Modelo comportamental da execução dos testes normalizados.

Por fim, destaca-se a *preparação do teste* que inclui as tarefas, em sua maioria recomendadas explicitamente nas normas, que podem ser dissociadas temporalmente da execução do teste, tais como:

- Instalação de filtragem segundo recomendações

do fabricante;

- Seleção do fluido de teste segundo recomendações do fabricante ou da norma;

- Medição das propriedades do fluido (viscosidade, massa específica, nível de contaminação) na temperatura de teste;

- Ajuste da pressão máxima tolerável pelo sistema em teste;

- Seleção e atuação sobre a temperatura do fluido no reservatório e sobre a temperatura ambiente;

- Acionamento de bombas para alimentação do circuito hidráulico de teste.

A estrutura mostrada pela rede C/A (figura 6.7) é a mesma que a de execução do teste, mas o comportamento será mais simples. Neste caso os atributos desejados serão fixados em um determinado valor e a avaliação consistirá em determinar se a temperatura do fluido e do ambiente já foram alcançadas liberando para a aquisição, possivelmente por amostragem, das propriedades do fluido.

As redes C/A , identificadas nas figuras 6.3 e 6.7, constituem um modelo para concepção geral do banco de testes que limita-se em formalizar a especificação de requisitos provenientes das normas de teste. A fim de progredir na concretização deste sistema, apresenta-se a seguir uma forma de agregação das atividades identificadas, principalmente da parte energético/material, possibilitando a subdivisão em processos de projeto concorrentes.

### 6.2.3 - Condensação do Modelo Funcional/Estrutural Geral

Conforme mencionado na seção 3.4, a rede C/A tem a propriedade de estabelecer, através de refinamentos, uma correspondência direta entre canais e agências e os meios físicos, computacionais ou humanos que compõe o sistema projetado. Com este propósito, promove-se o refinamento<sup>1</sup> dos canais de energia e matéria presentes na figura 6.3 para identificar a forma real de ligação dos sistemas de atuação e de medição com o sistema em teste.

Na figura 6.9 está representado o refinamento dos canais que estabelecem as conexões físicas com o sistema em teste. Lembrando-se da estrutura interna dos sistemas de atuação e de medição apresentada no capítulo 4 (figuras 4.5 e 4.9), este refinamento determina que os transdutores e atuadores deverão ser conectados em série, sendo que a ordenação apresentada atende as recomendações normalizadas. Nesta figura, também identifica-se duas novas agências, a *bancada de testes (BDA)* que agrupa os sistemas de medição, de atuação e os canais intermediários que dão suporte direto ao sistema em teste e a *unidade de potência e condicionamento hidráulico (UPCH)*, responsável pelo suprimento do fluido nas condições estabelecidas nas normas de teste.

---

<sup>1</sup> Refinamentos segundo as regras apresentadas no apêndice A.

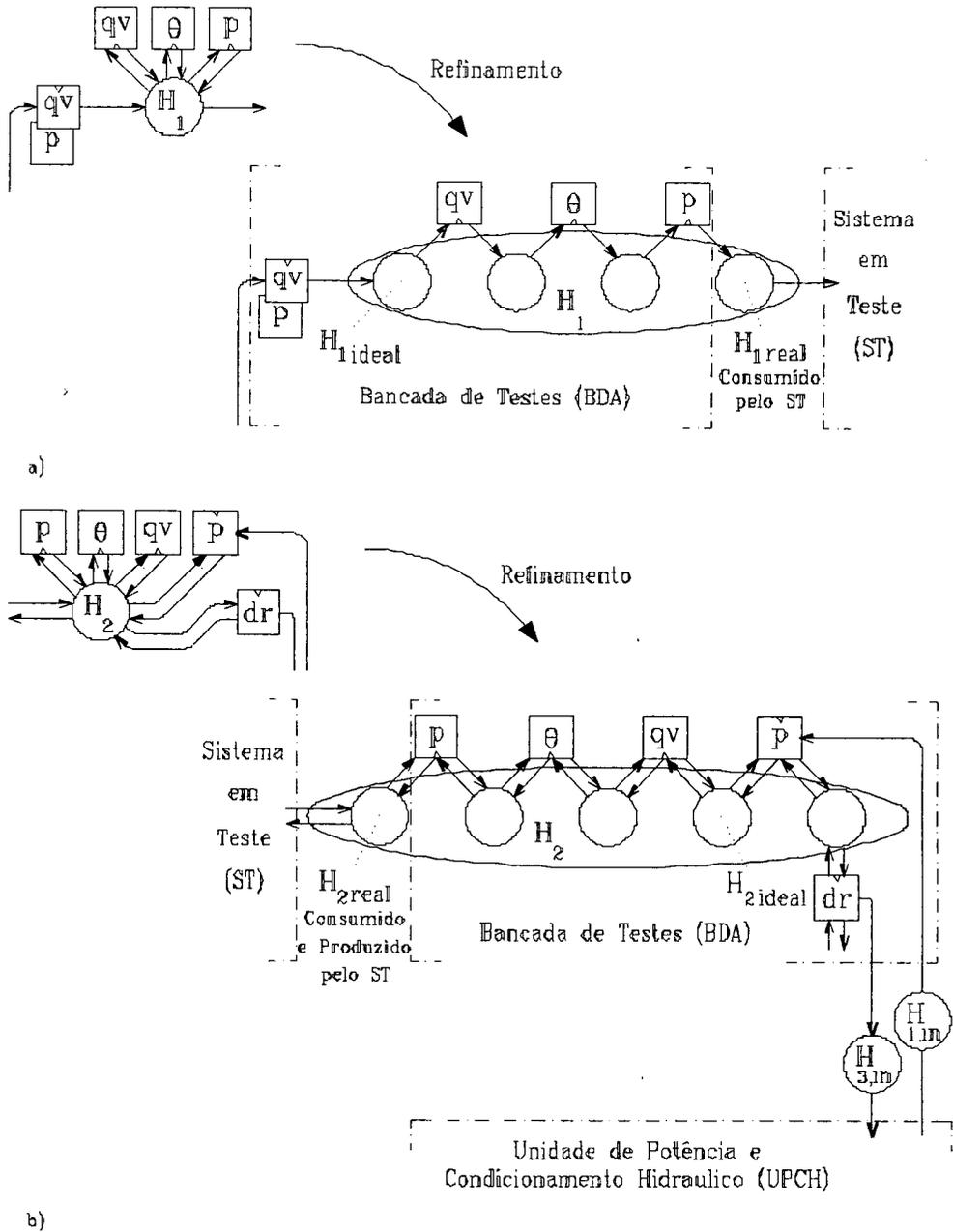


Figura 6.9 - Refinamentos dos recursos de energia e matéria: a) Válido para  $H_1$ ,  $H_3$ ,  $h_d$ ,  $E_1$ ,  $E_3$ ; b) Válido para  $H_2$ ,  $H_4$ ,  $H_x$ ,  $R_{1,2}$ ,  $R_3$ ,  $Tr_{1,2}$ ,  $Tr_3$ ,  $P_x$ .

Uma terceira agência, o ambiente de testes (AMB), resulta do agrupamento dos sistemas de atuação e de medição associados aos campos gravitacional, térmico e sonoro modelados na figura 6.3. A junção destas três agências, com o

modelo da parte de informação discutido anteriormente (figura 6.7), permite em uma nova visão do banco de testes automático, conforme modelado pela figura 6.10.

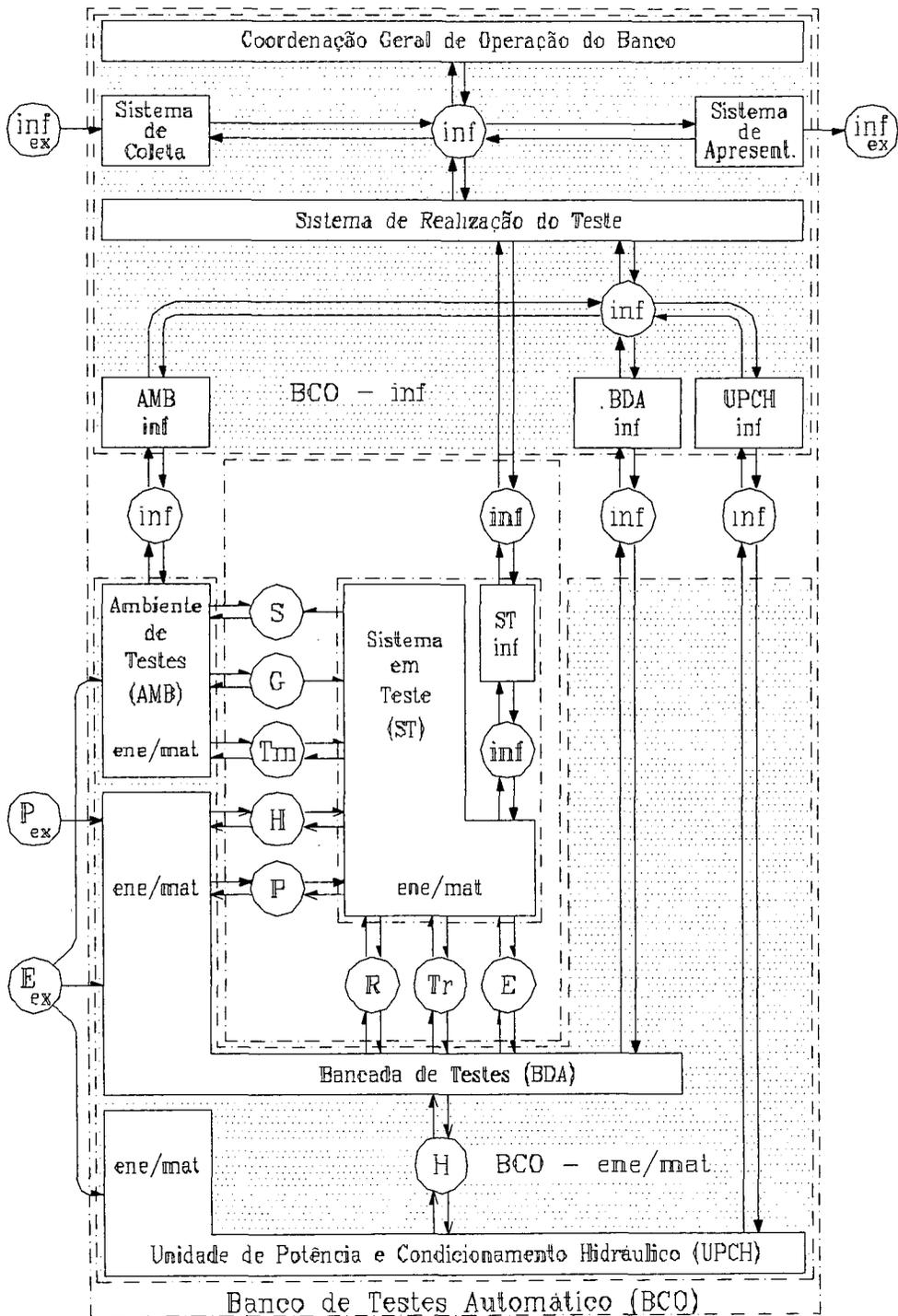


Figura 6.10 - Modelo funcional/estrutural condensado do banco de testes.

Segundo esta figura, o ambiente de testes, a bancada de testes e a unidade de potência e de condicionamento hidráulico têm parte energético/material e parte de informação, refletindo a estrutura interna dos sistemas de medição e de atuação que os compõe. A identificação de medições e de atuações internas ao sistema em teste, conforme visto anteriormente, também justifica sua subdivisão.

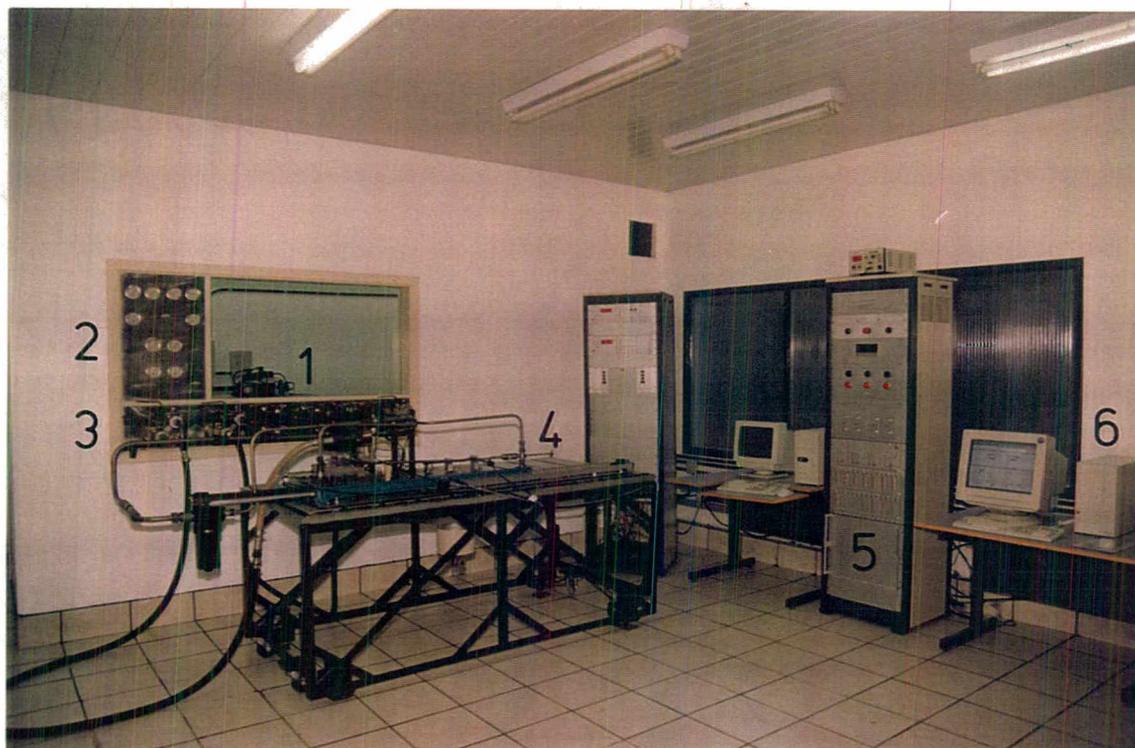
Este modelo tem o propósito de estruturar o banco de testes automático em macrosistemas que, então, podem ser projetados separadamente, respeitadas as suas interrelações.

### **6.3 - Etapas Concluídas na Construção do Banco de Testes**

A visão geral estabelecida pela figura 6.10 tem norteado as ações de projeto e construção do banco de testes automático para componentes hidráulicos no LASHIP/EMC/UFSC. Empregando-se as diretrizes propostas neste trabalho, já foram concluídas a *unidade de potência e condicionamento hidráulico (UPCH)*, incluindo a parte energético/material e de informação, e parte da *bancada de testes (BDA)*. A figura 6.11 ilustra a estrutura atual deste banco de testes.

Com relação a bancada de testes, já foi construída a estrutura mecânica para fixação do sistema em teste e dos instrumentos de medição e de atuação, incorporando também um sistema de coleta e filtragem do fluido proveniente de drenos e vazamentos. Para concluir-se a bancada de testes falta a criação de imagens para os instrumentos disponíveis no LASHIP/EMC/UFSC,

possibilitando a sistematização da montagem de circuitos de teste.



LEGENDA:

- |                                  |   |
|----------------------------------|---|
| 1 - UPCH - Circuito hidráulico   | 5 - UPCH - Painel de acionamento                  |
| 2 - UPCH - Painel de monitoração | 6 - UPCH - Interface <b>software-</b><br>operador |
| 3 - UPCH - Painel de válvulas    |   |
| 4 - BDA - Mesa de montagens      |   |

Figura 6.11 - Visão geral do banco de testes automático.

Por sua vez, a unidade de potência e condicionamento hidráulico é, isoladamente, um sistema automático complexo composto de 9 sistemas de atuação, 5 sistemas de medição e de 15 sistemas híbridos de atuação e medição, cuja operação é determinada por atividades de coordenação, possibilitando o cumprimento dos requisitos impostos pelas normas, conforme

modelado na figura 6.3, e também o atendimento de requisitos técnicos adicionais como:

- Rapidez, facilidade e flexibilidade de interligação da UPCH com a BDA.

- Detecção de falhas operacionais.

- Operação coordenada pelo operador ou por computador.

Com relação ao primeiro requisito, foi construído um painel composto de 12 válvulas manuais monitoradas por fins de curso para o bloqueio/abertura das portas de alimentação e retorno para com a bancada de teses. As linhas de alimentação possibilitam a operação com pressão e vazão ajustáveis em até 25 MPa (250 bar) e  $1,67 \text{ dm}^3/\text{s}$  (100 l/min), respectivamente, possibilitando testar uma ampla faixa de componentes hidráulicos.

A garantia de condições operacionais adequadas para os componentes do circuito hidráulico ocorre através do processamento das informações colhidas pelos sistemas de medição de nível do reservatório, de ensujamento de filtros, de níveis de pressão e de posição das válvulas manuais.

A operação da UPCH pode ser totalmente manual, com o auxílio de painéis de acionamento e de monitoração, ou por computador, através de uma interface **software**-operador que apresenta o circuito hidráulico e torna disponíveis os recursos de ajuste e monitoração das variáveis.

Como parte da UPCH - inf, estão implementados objetos de coordenação que determinam se a configuração de operação (atributos desejados) escolhida pelo operador está correta e

qual a seqüência com que os instrumentos devem ser postos em operação (por ex., é necessário aquecer o fluido antes de acionar as bombas).

As figuras 6.12 à 6.15 ilustram os principais componentes desta unidade de potência e condicionamento hidráulico, cujo projeto possibilitou o teste e aprimoramento da estruturação para modelagem de sistemas automáticos proposta.

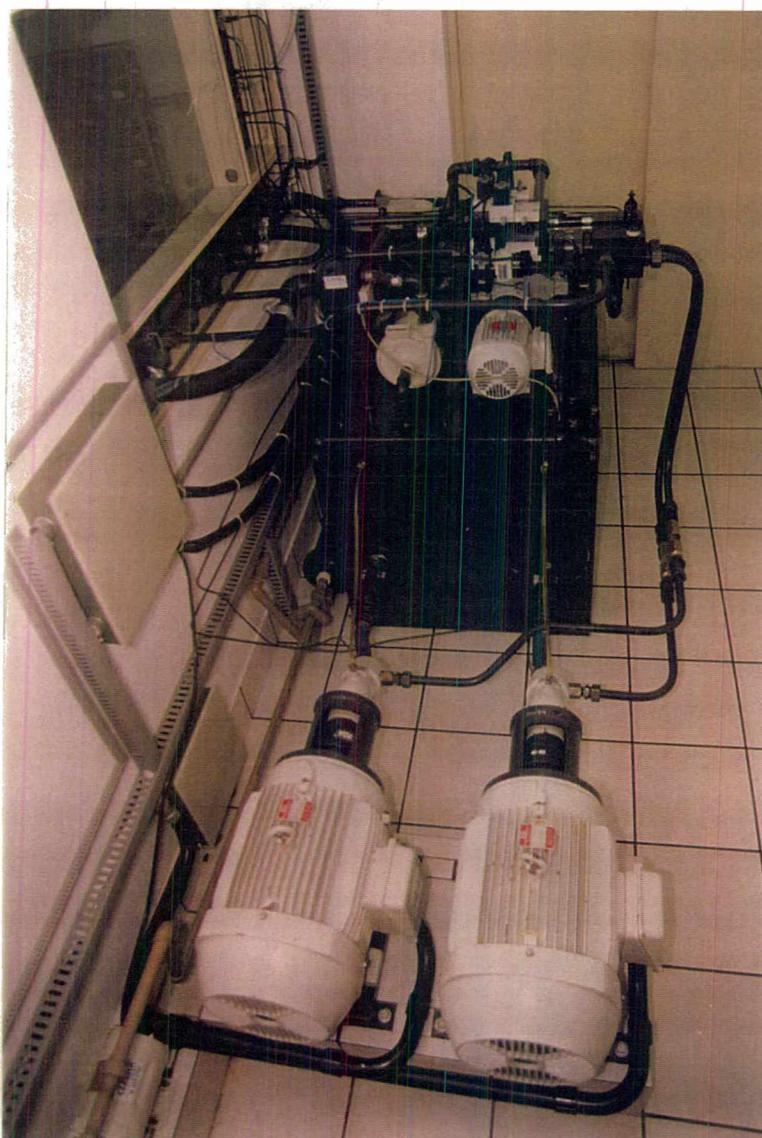


Figura 6.12 - Circuito hidráulico da UPCH.

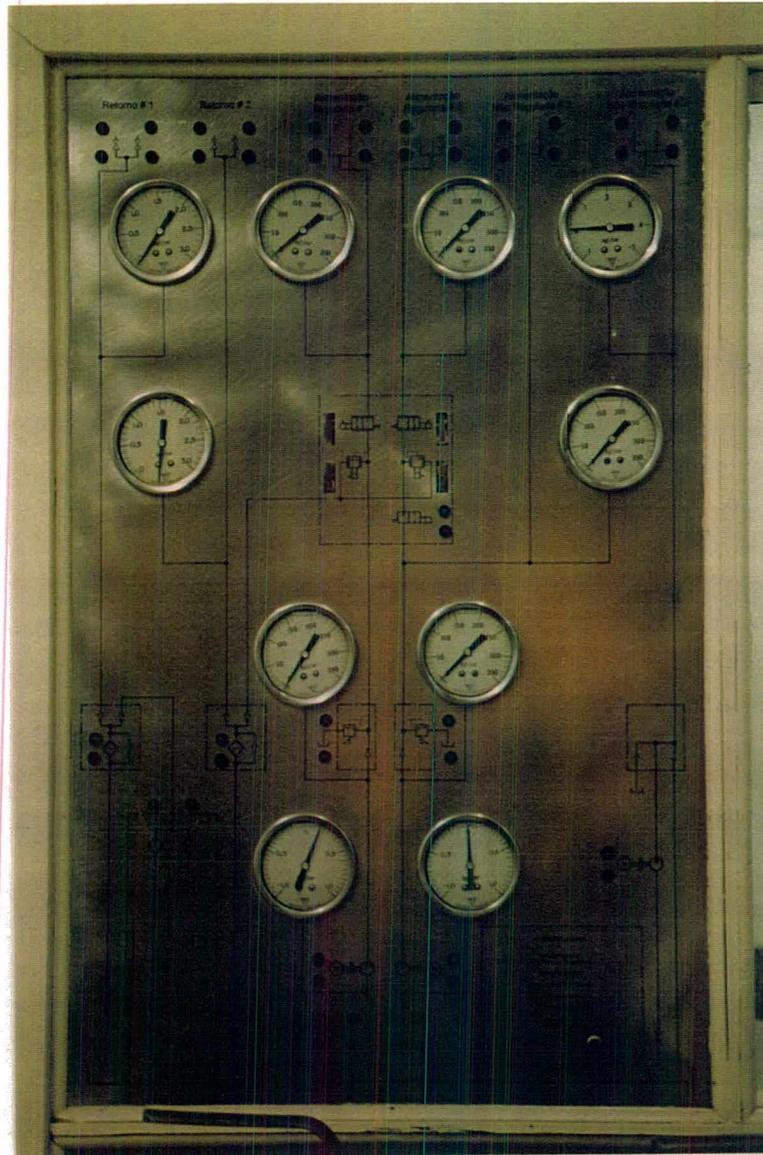


Figura 6.13 - Painel de monitoração para operação da UPCH no modo manual.

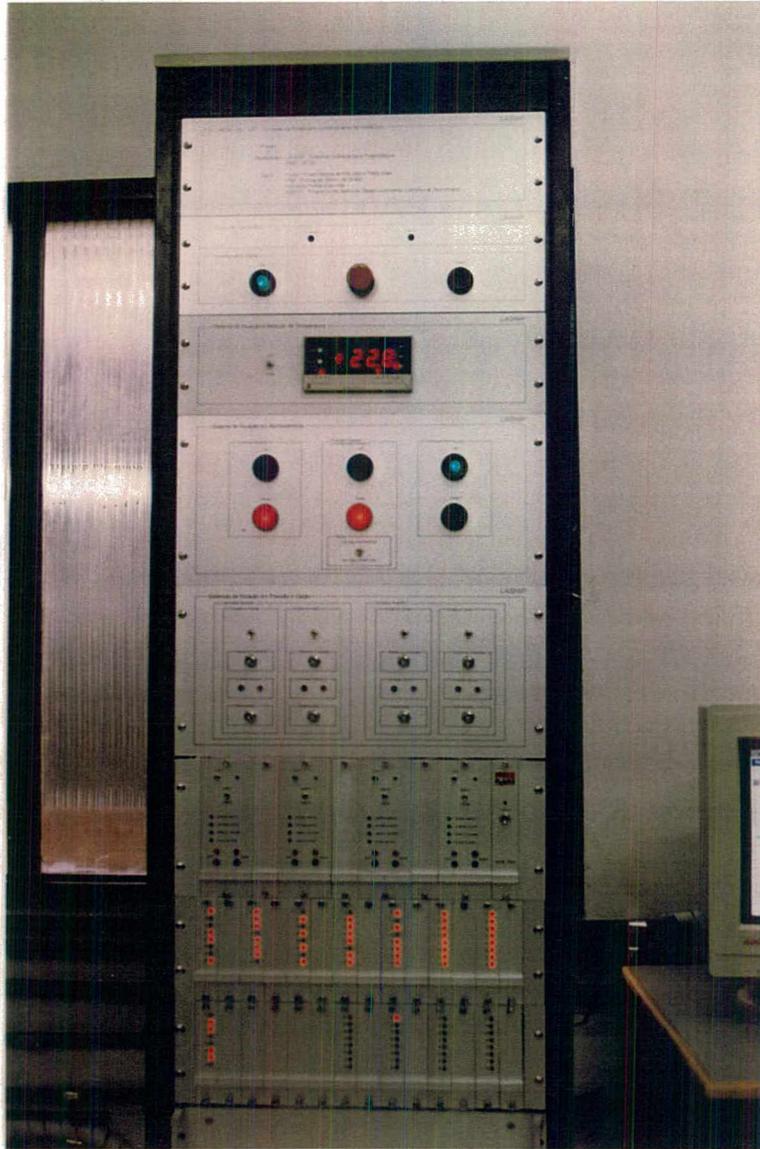


Figura 6.14 - Painel de acionamento para operação da UPCH no modo manual.

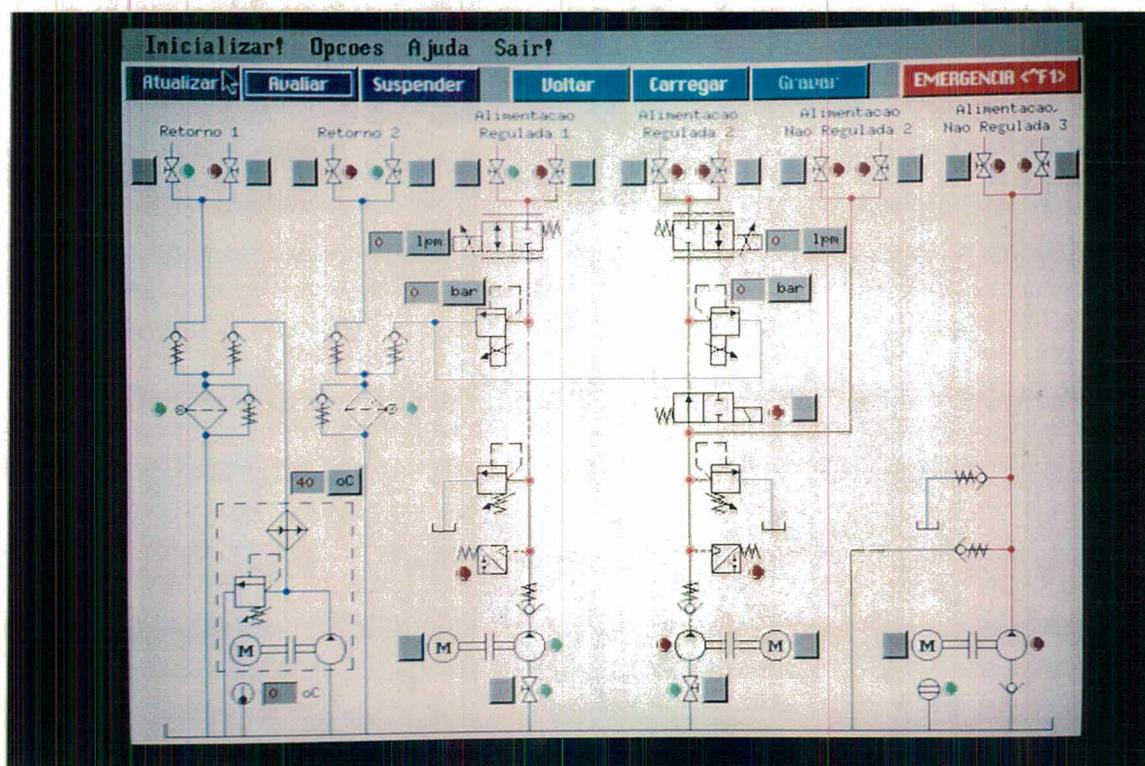


Figura 6.15 - Interface gráfica para monitoramento e acionamento da UPCH no modo computador.

## 7 - CONCLUSÕES

A motivação inicial para a construção de um banco de testes automático que atendesse as recomendações da ISO levou à identificação de um problema mais geral no que diz respeito à forma corrente de descrição de sistemas automatizados. Conforme demonstrado no capítulo 2, os modelos gráficos empregados são mais ilustrativos que prescritivos possibilitando apenas descrições superficiais do sistema.

A aplicação destes modelos torna-se mais crítica quando se realiza o projeto de tais sistemas em face da dificuldade de integrar as nomenclaturas e notações próprias das tecnologias envolvidas, provocando a subdivisão do projeto desde suas fases iniciais.

A fim de encontrar um modo formal e prático para descrição e projeto de sistemas automatizados, reuniram-se os conceitos clássicos da área de sistemas com as propostas atuais da mecatrônica e da orientação por objetos. A partir disto, substituiu-se o termo *sistema automatizado* por *sistema automático*, perpassando a idéia de que o processo e a estrutura de controle e de processamento de informações devem ser projetados integradamente.

Depreendeu-se, também, sobre o uso de modelos gráficos capazes de portar um grande número de informações de forma concisa e plenamente adequados para o projeto por computador. Ao serem empregados, o usuário deve estar ciente da perspectiva que está descrita em cada modelo, possibilitando a extração correta

das informações.

Em decorrência da pesquisa realizada sugere-se o emprego da técnica de orientação por objetos, possibilitando um tratamento sistêmico igual para o software e para a parte física e, por conseguinte, atendendo ao objetivo de integração dos modelos para tornar a descrição ou projeto do sistema consistente.

A integração de modelos e de tecnologias é especialmente alcançada com a rede de Petri Canal/Agência (rede C/A), uma notação multidisciplinar baseada em regras simples de construção e interpretação que permite descrever requisitos funcionais e especificações estruturais. A rede C/A é complementada vinculando-se diagramas de estados ou diagramas de blocos às agências de modo a descrever seu comportamento reativo ou transformativo.

Através do mecanismo de refinamentos e condensações, a rede C/A, criada no início da concepção do sistema, sofre transformações correspondendo à evolução do projeto, possibilitando a associação de modelos referentes às soluções técnicas escolhidas.

Além destes resultados de aplicação geral aos sistemas automáticos, a estruturação da modelagem proposta possibilitou a apresentação de grande parte das recomendações normalizadas através de redes C/A e de diagramas de estados. Deste modo, a norma constitui-se de um modelo para o início da concepção de um banco de testes além de substituir parte das informações em linguagem natural.

Além da aplicação às normas, o projeto e construção da

unidade de potência e condicionamento hidráulico realizado no LASHIP/EMC/UFSC, possibilitou um amadurecimento gradual e seguro da estruturação da modelagem proposta. Resultados positivos também foram alcançados através da construção de um sistema de posicionamento pneumático acionado por computador. Este foi exposto na FENASOFT'95, em São Paulo, e na BRASILMAQ'95, em Blumenau e publicado na revista IPESI - Metal Mecânica (IPESI, 1995).

Ao longo da preparação desta tese, tais propostas também foram colocadas em discussão através da publicação de diversos artigos. No 9º Seminário de Instrumentação promovido pelo Instituto Brasileiro de Petróleo (DE NEGRI & LÜCKE, 1991) e no XII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (LÜCKE & DE NEGRI, 1993) foram relatados os primeiros resultados, os quais evoluíram e foram apresentados no 2º Congreso Interamericano de Computación Aplicada la Industria de Procesos (LÜCKE & DE NEGRI, 1994) e no XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (DE NEGRI, 1995) e publicados na revista Máquinas e Metais (LÜCKE et alii, 1995).

Finalizando, entende-se que outros trabalhos poderão decorrer desta tese, principalmente no sentido de avaliar e aprimorar os princípios de modelagem e projeto propostos em campos distintos à hidráulica e pneumática. Referindo-se aos testes normalizados, deixa-se em aberto a perspectiva de estudos na área de construção de ferramentas computacionais para a configuração e realização automática de teses com mínima interferência do operador. Vislumbra-se, também, a utilização da rede C/A e os

modelos associados como ferramenta de ensino de sistemas modulares, como é o caso da hidráulica, da pneumática e dos sistemas elétricos.

## 8 - BIBLIOGRAFIA

- BECKWITH, T. G., BUCK, N. L. *Mechanical measurements*. USA: Addison-Wesley, 1973. 642 p.
- BLANCHARD, B. S., FABRYCKY, W. J. *Systems engineering and analysis*. New Jersey: Prentice-Hall, 1981. 703 p. ISBN 0-13-881631-X.
- BACK, N. *Metodologia de projeto de produtos industriais*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983. 389 p. ISBN 85-7030-013-1.
- BAZZO, W. A., PEREIRA, L. T. do V. *Introdução à engenharia*. Florianópolis: UFSC, 1988. 177 p.
- BRADLEY, D. A., BUUR, J. The representation of mechatronic systems. In: ICED'93, Switzerland. *Proceedings...* Switzerland: Heurista, 1993. V. 1.
- BODEN, M.A. *Artificial intelligence and natural man*. 2. ed. USA: Basic Books, 1987. 576 p. ISBN 0-465-00456-3.
- BOOCH, G. *Object oriented design: with applications*. Redwood City, USA: The Benjamin/Cummings, 1991. 578 p. ISBN 0-8053-0091-0.
- BROGAN, W. L. *Modern control theory*. 2 ed. New Jersey: Prentice

Hall, 1985. 509 p. ISBN 0-134-590316-5.

BURR-BROWN CORP. *The handbook of personal computer instrumentation.* Tucson USA, 1990. "paginação irregular".

BUUR, J. *A theoretical approach to mechatronics design.* Denmark: Institute for Engineering Design, 1990. 126 p.

CHESTNUT, H. *Systems engineering tools.* New York: John Wiley & Sons, 1966.

CHEN, C.-T. *Introduction to linear system theory.* USA: Holt, Rinehart and Winnston, 1970. 481 p. ISBN 03-077155-2.

CONRAD, F., SRENSEN, P. M., TROTSMANN, E. On the modelling of flow and torque-loss in hydrostatic machines. In: 9TH INTERNATIONAL FLUID POWER SYMPOSIUM, 1990, Oxford UK. *Proceedings...* Oxford UK: BHRA, 1990. 350 p. p. 3-17.

DE NEGRI, V. J. Engenharia de produto versus engenharia de software: integração para o projeto de sistemas automáticos. In: COBEM/CIDIM'95, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte: ABCM, 1995 (CD-ROOM).

DE NEGRI, V. J., LÜCKE, H. A. H. Estruturação de um banco automatizado de testes/ensaios para componentes hidráulicos.

In: 9° SEMINÁRIO DE INSTRUMENTAÇÃO, 1991, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: IBP, 1991. 482 p. p 99-110.

DIJK, J. VAN, VRIES, T. J. A., BREUNESE, A. P. J., BREEDVELD, P. C. Automated mechatronic systems modelling using MAX. In: BOND GRAPHS FOR ENGINEERS, North-Holand: Breedveld, 1992. 332 p. p.279-290.

DIONISI, A., TANAKA, E. T., MACHADO, J. R. A. Um sistema versátil de aquisição de dados. In: XXIV CONGRESSO NACIONAL DE INFORMÁTICA, 1991, São Paulo. *Anais...* São Paulo: SUCE SU - SP, 1991. p. 522-528.

DOEBELIN, E. O. *Measurement systems: application and design*. 3. ed. USA: Mc Graw-Hill, 1983. 876 p.

EDGE, K. A., SEEL, M. W. R. Data acquisition using mini-and-micro-computers for steady state and dynamic applications. In: INSTRUMENTS AND COMPUTERS FOR COST EFFECTIVE FLUID POWER TESTING, 1979, London. *Proceedings...* London: The Institution of Mechanical Engineers, 1979. 90 p. p. 9-19.

EMBLEY, D. W., KURTZ, B. D., WOODFIELD, S. N. *Object-oriented systems analysis*. New Jersey: Prentice-Hall, 1992. 302 p. ISBN 0-13-629973-3.

FERREIRA, A. B. de H. *Novo dicionário da língua portuguesa*. 2. ed. 19<sup>a</sup> impr. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1986. 1838 p.

FINKELSTEIN, L. Introductory article. *Journal of Physics E - Scientific Instruments*, Great Britain, v. 10, p. 566-572, nov. 1977.

\_\_\_\_\_. WATTS, R. D. Mathematical models of instruments - fundamental principles. *Journal of Physics E - Scientific Instruments*, Great Britain, v. 11, p. 841-855, sept. 1978.

FINKELSTEIN, L. State and advances of general principles of measurement and instrumentation science. *Measurement*, England, v. 3, n. 1, p. 2-6, jan./mar. 1985.

FIOD, M. *Desenvolvimento de sistema computacional para auxiliar a concepção de produtos industriais*. Florianópolis: CPGEM, 1993. (Tese de doutorado).

FIOK, A. J., JAWORSKI, J. M., MORAWSKI, R. Z. et alii. Theory of measurement in teaching metrology in engineering faculties. *Measurement*, England, v. 6, n. 2, p. 63-68, apr./june 1988.

FLESCH, C. A. Metrologia e instrumentação para automação. In: CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA, 1995, Universidade Federal do Ceará. Florianópolis: UFSC, 1995. v. 2.

(Apostila).

FLESCH, C. A., LÜCKE, H. A. H. *Automação da medição*. Florianópolis, 1990. "não paginado". (Apostila).

FRANKLIN, G. F., POWELL, J. D., EMAMI-NAEINI, A. *Feedback control of dynamic systems*. USA: Addison-Wesley, 1986. 622 p. ISBN 0-201-11540-9.

FREDERICK, D. K., CARLSON, A. B. *Linear systems in communication and control*. New York, USA: John Wiley & Sons, 1971. 575 p. ISBN 0-471-27721-5.

GIRARDI, M. del R., PRICE, R. T. O paradigma de desenvolvimento por objetos. *Revista de Informática*, v. 1, n. 2, p. 69-96, maio 1990.

HANISCH, H. -M. *Petri-Netze in der Verfahrenstechnik*. München: Oldenburg, 1992. 81 p. ISBN 3-486-22190-6.

HAREL, D. Statecharts: A visual formalism for complex systems. *Science of Computer Programming*, North-Holland, v. 8, p. 231-274, 1987.

HENDERSON-SELLERS, B., EDWARDS, J. The object-oriented systems life cycle. *Communications of the ACM*, New York, v. 33, n. 9,

p. 142-159, sept. 1990.

HENSON, B. W., JUSTER, N. P., PENNINGTON, A. Towards an integrated representation of function, behaviour and form. In: CACD'94, Lancaster. Proceedings... UK: Looseleaf, 1994, p. 95-111.

HEUSER, C. A. Modelagem conceitual de sistemas. In: V EBAI, 1990. 150 p.

HEWLETT-PACKARD CO. *The fundamentals of data acquisition.*, USA, 1990. 86 p.

HONIDEN, S., KOTAKA, N., KISHIMOTO, Y. Formalizing specification modelling in OOA. *IEEE Software*, p. 54-66, January 1993.

HOOVER, S. P., RINDERLE, J. R., FINGER, S. Models and abstractions in design In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, 1991, Zurich. *Proceedings...* Zurich: Heurista, 1991. V.1. 760 p. p.46-57.

HUBKA, V., EDER, W. E. *Theory of thecnical systems*. Germany: Springer-Verlag, 1988. 275 p. ISBN 3-540-17451-6.

HUNT, T. M., BARKER, D. J., PREST, P. H. The utilization of a micro-computer in the condition monitoring of a hydraulic pump.

In: MICROPROCESSORS IN FLUID POWER ENGINEERING, 1984, Bath. *Proceedings...* London: The Institution of Mechanical Engineers, 1984. 137 p. p. 111-119.

HYVÄRINEN, L. P. *Information theory for systems engineers*. Germany: Springer-Verlag, 1970. 197 p.

INMETRO. *Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia*. Duque de Caxias RJ: CIDIT, 1995. 52p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION. *ISO 1219 - Fluid power systems and components - Graphic symbols*. Switzerland, 1976. 23 p.

\_\_\_\_\_. *ISO 4412-1 - Hydraulic fluid power - Test code for the determination of airborne noise levels - Part 1: Pumps*. Switzerland, 1979. 6 p.

\_\_\_\_\_. *ISO 31-0 - General introduction - General principles concerning quantities, units and symbols*. 2. ed. Switzerland, 1981a. 20 p.

\_\_\_\_\_. *ISO 3968 - Hydraulic fluid power - Filters - Evaluation of pressure drop versus flow characteristics*. Switzerland, 1981b. 7 p.

- \_\_\_\_\_. *ISO 4572 - Hydraulic fluid power - Filters - Multi-pass method for evaluating filtration performance.* Switzerland, 1981c. 28 p.
- \_\_\_\_\_. *Standartization and documentation.* Switzerland, 1983a. 93 p. ISBN 92-67-10071-8.
- \_\_\_\_\_. *ISO 4391 - Hydraulic fluid power - Pumps, motors and integral transmissions - Parameter definitions and letter symbols.* 2. ed. Switzerland, 1983b. 10 p.
- \_\_\_\_\_. *ISO 5598 - Fluid power systems and components - Vocabulary.* Switzerland, 1985a. 90 p.
- \_\_\_\_\_. *ISO 6404 - Hydraulic fluid power - Servovalves - Test methods.* Switzerland, 1985b. 23 p.
- \_\_\_\_\_. *ISO 4409 - Hydraulic fluid power - Positive displacement pumps, motors and integral transmissions - Determination of steady-state performance.* Switzerland, 1986a. 15 p.
- \_\_\_\_\_. *ISO 4411 - Hydraulic fluid power - Valves - Determination of pressure differential/flow characteristics.* Switzerland, 1986b. 11 p.
- \_\_\_\_\_. *ISO 9000 - Quality management and quality assurance*

*standards - Guidelines for selection and use.* Switzerland, 1987a. 6 p.

\_\_\_\_\_. *ISO 9001 - Quality systems - Model for quality assurance in design/development, production, installation and servicing.* Switzerland, 1987b. 7 p.

\_\_\_\_\_. *ISO 8426 - Hydraulic fluid power - Positive displacement pumps and motors - Determination of derived capacity.* Switzerland, 1988. 9 p.

\_\_\_\_\_. *ISO 4392-1 - Hydraulic fluid power - Determination of characteristics of motors - Part 1: At constant low speed and at constant pressure.* 2. ed. Switzerland, 1989a. 7 p.

\_\_\_\_\_. *ISO 4392-2 - Hydraulic fluid power - Determination of characteristics of motors - Part 2: Startability.* 2. ed. Switzerland, 1989b. 10 p.

\_\_\_\_\_. *ISO 6403 - Hydraulic fluid power - Valves controlling flow and pressure - Test methods.* 1. ed. rev., Switzerland, 1989c. 29 p.

\_\_\_\_\_. *ISO 10100 - Hydraulic fluid power - Cylinders - Acceptance test.* Switzerland, 1990. 2 p.

\_\_\_\_\_. *ISO 4412-2 - Hydraulic fluid power - Test code for determination of airborne noise levels - Part 2: Motors*. 2. ed. Switzerland, 1991a. 20 p.

\_\_\_\_\_. *ISO 4412-3 - Hydraulic fluid power - Test code for determination of airborne noise levels - Part 3: Pumps - Method using a parallelepiped microphone array*. Switzerland, 1991b. 9 p.

\_\_\_\_\_. *ISO 9632 - Hydraulic fluid power - Fixed displacement pumps - Flow degradation due to classified AC fine test dust contaminant - Test method*. Switzerland, 1992. 8 p.

IPESI METAL-MECÂNICA. São Paulo: Páginas Amarelas, n. 287, out./nov. 1995

JACOBSON, I., MAGNUS, C., JONSSON, P., ÖVERGAARD, G. *Object-oriented software engineering*. USA: Addison-Wesley, 1994. 528 p.

KARNOPP, D. C., MARGOLIS, D. L., ROSEMBERG, R. C. *System dynamics: a unified approach*. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1990, 514 p.

KATZ, P. *Digital control using microprocessors*. USA: Prentice-Hall, 1981. 293 p. ISBN 0-13-212191-3.

KATZAN Jr., H. *Introduction to computer science*. New York: Petrocelli/Charter, 1975.

KROGH, B. H., NIINOMI, T. Modelling and analysis of switched-mode hybrid systems driven by threshold events. In: 32th Allerton Conference on Communication, Control and Computing, 1994, Illinois USA. *Proceedings...* Illinois USA: University of Illinois, 1994.

KUMARA, S., HAM, I., AL-HAMANDO, M., GOODNOW, K. Causal reasoning and data abstraction in component design. In: CIRP'89. *Proceedings...*, 1989. v.38. p. 145-8.

LONGMAN GROUP LTD. *Longman concise english dictionary*. Great Britain: Merriam-Webster, 1985. 1651 p. ISBN 0-582-89244-9.

LÜCKE, H. A. H.. Computadores pessoais para automatização de laboratórios. In: 4º CONGRESSO NACIONAL DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL - CONAI, 1990, São Paulo. *Anais...* São Paulo: SUCE SU - SP, 1990. 240 p. p. 106-116.

LÜCKE, H. A. H., DE NEGRI, V. J. Desenvolvimento de um banco de testes automático para a qualificação de componentes hidráulicos. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 1993, Brasília. *Anais...* Brasília: ABCM, 1993, 1786 p. v. 2. p. 961-4.

LÜCKE, H. A. H., DE NEGRI, V. J. Uma metodologia integrada para o desenvolvimento de sistemas automáticos. In: 2 CONGRESO INTERAMERICANO DE COMPUTACIÓN APLICADA A LA INDUSTRIA DE PROCESOS, 1994, Santiago - Chile. *Anais...* Santiago: CIT, 1994. 290 p. p. 6-13.

LÜCKE, H. A. H., DE NEGRI, V. J., MADEIRA, M. N. Programação orientada a objetos na automação industrial. *Revista Máquinas e Metais*, São Paulo: Aranda, n. 353. p. 108-115, 1995.

MACFARLANE, A. G. J. *Engineering systems analysis*. London: Addison-Wesley, 1964.

MADEIRA, M. N. *Orientação por objetos aplicada à automação industrial: objeto-imagem*. Florianópolis: CPGCC, 1995. 138 p. (Dissertação de mestrado).

MALMQVIST, J. Computer-aided conceptual design of energy-transforming technical systems based on technical systems theory and bond graphs. In: CACD'94, 1994, Lancaster UK. *Proceedings...* Lancaster UK: Lancaster University Engineering Design Centre, 1994. p. 59-77.

MIYAGI, P. E., FURUKAWA, C. M. Mark flow graph e production flow schema: unificação e estruturação de sistemas de controle. In:

3. CONAI, 1988, São Paulo. *Proceedings...* São Paulo, 1988. p. 257-264.
- NYGAARD, K. Basic concepts in object oriented programming. *ACM SIGPLAN Notices*, New York, v. 21, n. 10, p. 128-132, oct. 1986.
- OH, V., LANGDON, P., SHARPE, J. Schemebuilder: an integrated computer environment for product design. In: CACD'94, 1994, Lancaster UK. *Proceedings...* Lancaster UK: Lancaster University Engineering Design Centre, 1994. p. 339-61.
- OPPENHEIM, A. V., WILLSKY, A. S., YOUNG, I. T. *Signals and systems*. USA: Prentice-Hall, 1983. 796 p. ISBN 0-13-811175-8.
- PAHL, G., BEITZ, W. *Engineering design - a systematic approach*. UK: Springer-Verlag, 1988. 397 p. ISBN 3-540-50442-7.
- PETERSON, J. L. *Net theory and modelling of systems*. New Jersey: Prentice Hall, 1981. 290 p. ISBN 0-13-661983-5.
- POON, H. L. Applications of data acquisition systems. *Computers in Industry*, The Netherlands, v. 13, p. 49-59, 1989.
- RAULT, A. Mechatronics and bond graphs. In: BOND GRAPHS FOR ENGINEERS, 1992, North-Holand: Breedveld, 332 p. p.101-110.

- RATZLAFF, K. L. *Introduction to computer-assisted experimentation*. New York: John Wiley & Sons, 1987. 438 p.
- REDFIELD, R. C., KRISHNAN, S. Automated conceptual design of physical dynamic systems. In: ICED'91, Zurich. *Proceedings...* Zurich, 1991. p.121-32.
- REISIG, W. *Petri netz: an introduction*. Berlin: Springer-Verlag, 1985. 161 p.
- ROSA, E., FORCELLINI, F., OGLIARI, A., BACK, N. Novos enfoques para a concepção de produtos com o uso de sistemas CAE/CAD/CAM. *Revista Máquinas e Metais*, São Paulo: Aranda, n. 353. p. 138-148. jun. 1995.
- RUMBAUGH, J., BLAHA, M., PREMERLANI, W. et alii. *Object-oriented modelling and design*. New Jersey: Prentice-Hall, 1991. 500 p. ISBN 0-13-630054-5.
- SALMINEN, V., VERHO. A. Experiences of using metamodeling in systematic design of mechatronics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, 1991, Zurich. *Proceedings...* Zurich: Heurista, 1991. V.1. 760 p. p.178-185.
- SCHNEIDER, C. A., FLESCHE, C. A. *Sistemas de medição*. Florianópolis, [1989]. "não paginado". (Apostila).

SMITH, L. S. P. S., GAWTHROP, P. J. An environment for industrial design using bond graph modelling. In: BOND GRAPHS FOR ENGINEERS, North-Holand: Breedveld, 1992. 332 p. p. 291-300.

SOWA, J. F. *Conceptual structures: information processing in mind and machine*. New York: Addison-Wesley, 1984. 481 p. ISBN 0-201-14472-7.

STEFANIDES, E. J. Digital signals control hydraulic servo valves. *Design News*, v. 23, n. 2, p. 76-78, 1987.

THOMAS, D. What's in an object? *BYTE*, p. 231-40, March 1989.

VAN WYLEN, G. J., SONNTAG, R. E. *Fundamentos da termodinâmica clássica*. São Paulo: Edgard Blücher, 1970. 616 p.

VDI-Verlag. VDI Guideline 2221: Systematic approach to the design of technical systems and products. Düsseldorf, 1987.

VRIES, T. J. A., BREUNESE A. P. J., BREEDVELD, P. C. MAX: A mechatronic model building environment. In: CACD'94, UK. *Proceedings...* UK: LooseLeaf, 1994. p.299-317.

WALDSCHMIDT, K. *Schaltungen der Datenverarbeitung*. Stuttgart: B.

G. Teubner, 1980.

WARD, P., MELLOR, S. *Structured development for real-time systems*. USA: Prentice-Hall, 1985. v.1. 155 p.

WEGNER, P. Dimensions of object-based language design. In: OOPSLA, 1987, Orlando, Florida. *Proceedings...* New York: ACM SIGPLAN Notices, 1987. 493 p. p. 68-182.

\_\_\_\_\_. Learning the language. *Byte*, New Jersey: McGraw-Hill, p. 245-253, mar. 1989.

WILSON, B. *Systems: concepts, methodologies and applications*. 2 ed. Great Britain: John Wiley & Sons, 1990. 481 p. ISBN 0-471-92716-3.

## APÊNDICE A - REGRAS DE UTILIZAÇÃO DA REDE DE PETRI CANAL/AGÊNCIA

Apresenta-se neste apêndice as regras básicas para criação e interpretação da rede de Petri Canal/Agência (rede C/A) descrita na seção 3.4. Tais regras, provêm de HEUSER (1990: cap.6 e 8) e, em pequena escala, de HANISH (1992).

### A.1 - Configuração Típica

Conforme ilustrado na figura A.1, a rede C/A é formada por retângulos e círculos interligados por arcos direcionados que, nesta tese, são divididos em três tipos. A regra fundamental para o emprego desta notação é que somente é permitida a interligação entre canais e agências, isto é, em uma rede não poderão haver dois canais ou duas agências ligadas diretamente através de um arco direcionado. A representação das setas em diferentes ângulos segue o padrão de cotagem do desenho industrial.

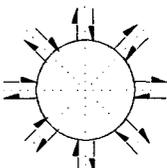
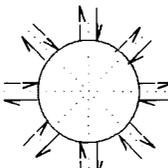
ELEMENTOS BÁSICOS			
Símbolo	Designação Genérica	Perspectiva Funcional	Perspectiva Comportamental
	Unidades Funcionais Ativas	Atividades	Agências
	Unidades Funcionais Passivas	Recursos	Canais
INTERLIGAÇÃO DOS ELEMENTOS			
Símbolo	Arcos Direcionados	Posição Setas Energia	Posição Setas Matéria
	Fluxo de Informação		
	Fluxo de Energia		
	Fluxo de Matéria		

Figura A.1 - Rede de Petri C/A - Elementos básicos.



### A.3 - Regras de Refinamento e Condensação

O refinamento de um canal ou de uma agência consiste no detalhamento destes, identificando-se novos canais e agências internos, conforme ilustrado na figura A.3. Do mesmo modo, canais e agências podem ser agrupados formando elementos condensados.

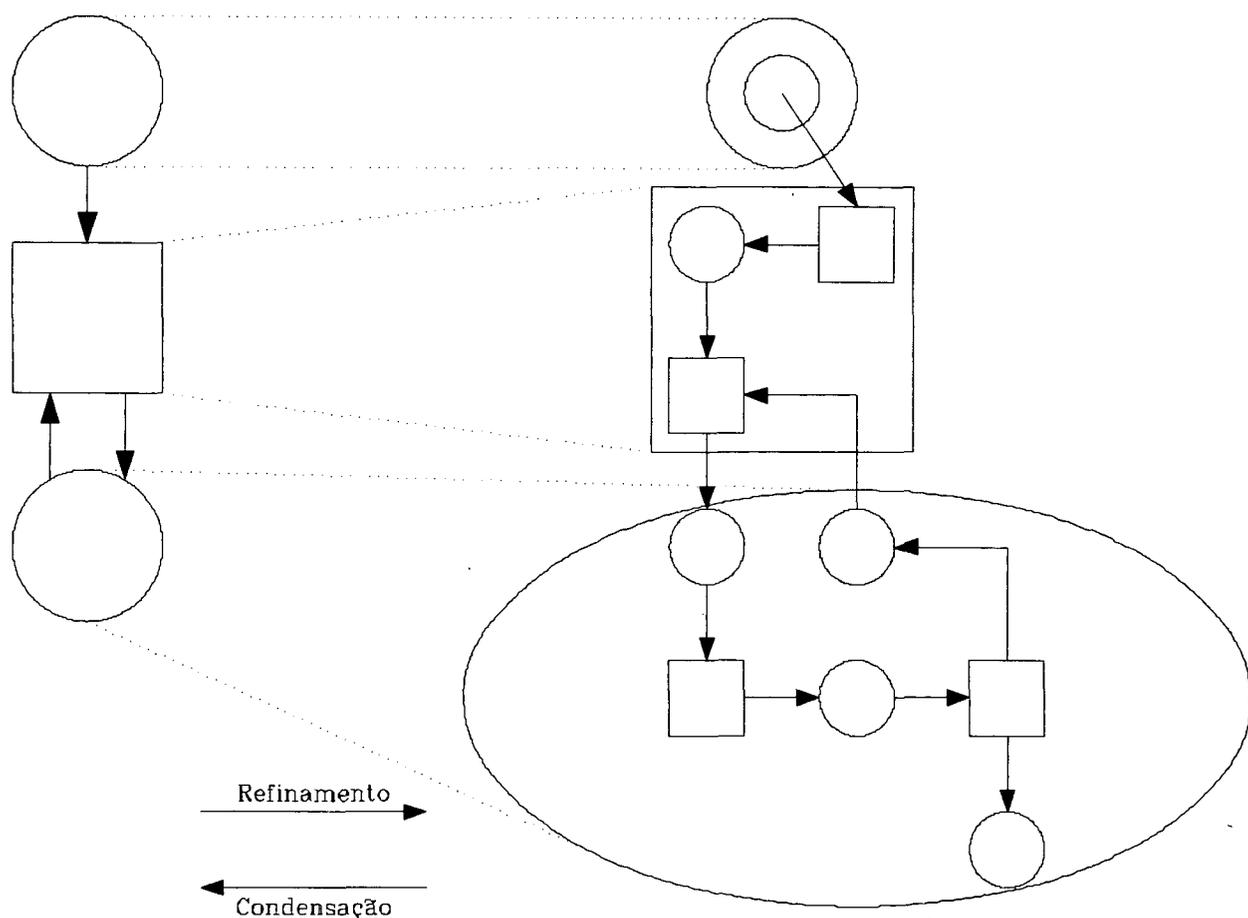


Figura A.3 - Mecanismo de refinamento e condensação de redes C/A.

Tanto a rede refinada como a condensada são redes C/A, logo, a regra básica de só haver interligação entre canais e agências deve ser sempre obedecida. Ao refinar um canal, os

elementos da rede refinada que possuam arcos externos ao canal também deverão ser canais. Do mesmo modo, os elementos de fronteira identificados no refinamento de uma agência deverão ser agências. Por fim, conforme ilustrado na figura A.3, os arcos presentes na rede condensada devem representar todas as direções dos arcos da rede refinada.

## APÊNDICE B - DIAGRAMA DE ESTADOS

O diagrama de estados é uma notação própria para a descrição do comportamento reativo de sistemas. Inicialmente criado para representar as máquinas de estado finitas empregadas nas áreas de eletrônica e de informática, vem sendo modificado para ampliar sua capacidade de modelagem. Diferentes variações de diagramas de estados são encontrados em (BOOCH, 1990), (HAREL, 1987), (RUMBAUGH, 1991) (WALDSHIMIDT, 1980), entre outros.

Neste trabalho, adota-se a proposta de EMBLEY et alii (1992), por possuir uma notação clara e bastante completa de modo que o modelo resultante decorre da abstração realizada e não das limitações impostas pela estrutura da notação. Além disso, a rede de estados, como é denominada pelos autores, está claramente descrita no capítulo 3 deste livro e que pode ser lido isoladamente.

Nas próximas seções apresenta-se informações básicas sobre este tipo de diagrama de estados que possibilitam a interpretação dos modelos apresentados no corpo da tese.

### B.1 - Elementos do Diagrama de Estados

O diagrama de estados, ou rede de estados, tem como elementos básicos os *estados*, representados por retângulos com cantos arredondados, e as *transições*, representadas por retângulos divididos em duas seções. Conforme ilustrado na figura B.1, o estado pode ser empregado para representar o **status**, uma fase ou uma atividade do sistema modelado. A

transição corresponde ao processo de mudança de um estado para outro e poderá ocorrer se estiver habilitada, ou seja, se o estado precedente estiver ativo e o estado subsequente inativo.

Para que uma transição habilitada ocorra é necessário que seja satisfeita uma combinação lógica de eventos e condições provenientes do próprio sistema ou de outros sistemas. Estas entradas são representadas na parte superior do retângulo. Na parte inferior são descritas as ações que o sistema modelado realiza sobre outros sistemas (saídas). A mudança do estado precedente para o subsequente só ocorrerá quando estas ações tiverem sido completadas.

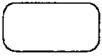
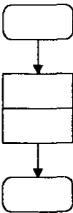
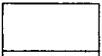
ELEMENTOS BÁSICOS			
Símbolo	Designação Genérica	Aspectos Modelados	Configuração Básica
	Estado	Status Atividades de longa duração Atividades interruptíveis	 Estado Precedente
	Entrada	Eventos e condições	Transição
	Saída	Atividades não-interruptíveis	Estado Subsequente

Figura B.1 - Diagrama de estados - Elementos básicos.

Atividades de longa duração ou interruptíveis são modeladas como estados e, nesta tese, são designadas por um verbo no gerúndio (por ex. *atualizando*, *fazendo aquisição*). Atividades não-interruptíveis (por ex. *atualizar*, *avaliar*) caracterizam ações produzidas pelo sistema e aqui são descritas por um verbo no infinitivo. Quando o estado representa o status do sistema, como na figura 5.2, tem-se empregado um verbo no participípio.

## B.2 - Configurações Típicas

A figura B.2 mostra as configurações básicas do diagrama de estados indicando, através da marca, o(s) estado(s) ativo(s) antes e após a ocorrência da transição.

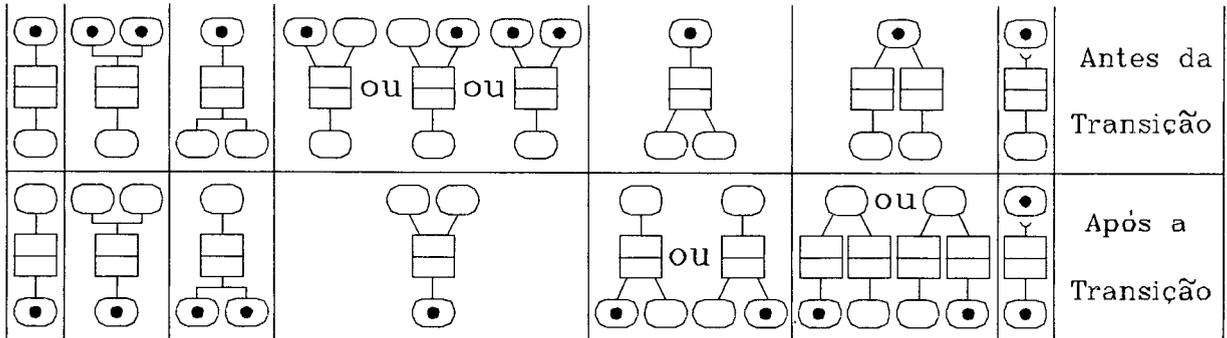


Figura B.2 - Configurações típicas do diagrama de estados (rede de estados) segundo EMBLEY et alii (1992).