

SISTEMAS AUTOMÁTICOS: CONCEITOS, MODELOS E PROJETO

Prof. Victor Juliano De Negri

Florianópolis, março de 1997

1 - 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]¹".

1.1 - Definição de Sistema

O termo *sistema* tem um uso difundido em praticamente todas as áreas do conhecimento humano e onde encontram-se diferentes definições. Neste contexto emprega-se 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 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

¹ O texto entre colchetes é interpretação do presente trabalho.

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 que, no caso da perspectiva sistêmica, diz respeito à teoria geral de sistemas.

1.2 - 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, uma parte considerável dos sistemas de interesse 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**¹ 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 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 1.1 representa o comportamento de uma função (f) vista como o componente elementar do **software** e cujo modelo matemático é:

$$\mathbf{Y} = f(\mathbf{U}) \quad (1.1)$$

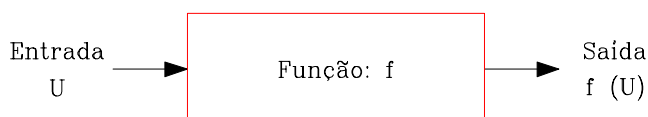


Figura 1.1 - Modelo comportamental de uma função.

Estas funções contrapõe-se aos objetos por não possuírem memória, pois nestas a

¹Empregando 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”.

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:

$$\mathbf{X}' = g_i(\mathbf{X}, \mathbf{U}) \quad (1.2)$$

$$\mathbf{Y} = f_i(\mathbf{X}, \mathbf{U}), \text{ com } i = 1, 2 \dots n \quad (1.3)$$

onde

$\mathbf{X}'$ = Estado após a transição;

g_i = Funções de transição de estado;

f_i = Funções de saída;

$\mathbf{U}$ = Entrada (argumentos das funções);

$\mathbf{X}$ = Estado do objeto;

$\mathbf{Y}$ = Saída.

e

n = número de funções realizadas pelo objeto.

Conforme ilustrado na figura 1.2, 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.

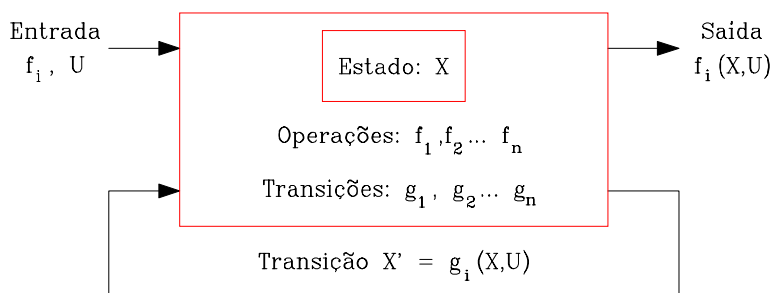


Figura 1.2 - Modelo comportamental de um objeto (WEGNER (1989)).

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.

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. 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 sistêmico¹, 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 objeto. *Transformações* do estado são consideradas como *ações* pelos objetos.

1.3 - 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. 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 sequência

¹ Ver definição de sistema segundo NYGAARD (1986) apresentada na seção 1.1.

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 empregam-se 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, 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 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.

Em síntese pode-se estabelecer a seguinte associação entre o tipo de modelo e seu objetivo na modelagem:

- Função: Responde a pergunta: “O que?” o sistema faz.
- Comportamento: Responde a pergunta: “Como?” e “Quando?” as funções são executadas.

- Estrutura: Responde a pergunta: “Onde?” as funções são implementadas.

Observando-se o significado das palavras segundo o dicionário AURÉLIO:

- Funcionar = Exercer as funções
- Funcionamento: Ato ou efeito de funcionar

pode-se entender que, como um modelo comportamental representa *como e quando* a função é executada (exercida), implica que este representa como e quando o sistema funciona. Assim, um diagrama que mostra o funcionamento de um sistema está mostrando a execução das funções, ou seja, como e/ou quando as funções estão sendo exercidas (executadas). Portanto este tipo de diagrama modela uma perspectiva comportamental.

1.3.1 - Classificação de Modelos segundo a Representação

Esta classificação de modelos de acordo com a perspectiva que descrevem tem sido enfatizada nos últimos anos principalmente nas áreas de projeto mecatrônico e de engenharia de software. Uma divisão mais clássica dos modelos é quanto ao tipo de representação utilizada porém sem haver um consenso entre os diversos autores. Baseando-se principalmente nos trabalhos de BACK (1983, p.190-198), BAZZO & PEREIRA (1988), BLANCHARD e FABRYCKY (1981, p.42-) e KATZAN (19??, p.13), apresenta-se a seguir uma *classificação quanto a representação* que busca ser coerente e estar o máximo possível em concordância com os autores.

Modelo icônico: É uma representação, corpórea ou não, com alto grau de semelhança com o sistema real. Possui uma equivalência geométrica de forma a preservar as proporções e formas do sistema que se deseja representar. Como exemplos tem-se: mapas, fotografias, plantas, maquetes, desenhos etc.)

Modelo analógico: Consiste em um sistema de manipulação relativamente fácil que possui uma correspondência, normalmente comportamental, com o sistema em estudo ou com variáveis deste. Normalmente há pouca semelhança visual entre modelo e sistema real. Exemplos típicos são a utilização de circuitos elétricos para representar sistemas mecânicos e modelos físicos para testes em túnel de vento.

Modelo simbólico ou matemático: Emprega lógica e matemática para representar, de forma abstrata, as leis físicas que se acredita governarem o comportamento do sistema sob investigação. Utiliza elementos idealizados que possuem as características essenciais dos componentes do sistema e têm seu relacionamento descrito através de uma expressão matemática. Exemplos deste tipo de modelo são as expressões matemáticas de um modo geral, descrições por variáveis de estado e por função transferência, equações Booleanas etc.

Modelo diagramático ou esquemático: Composto de um conjunto de linhas e símbolos gráficos

que representam características estruturais, comportamentais ou funcionais do sistema real. Normalmente há pouca correspondência visual tendo a capacidade de descrever aspectos essenciais do sistema concentrando-se em uma única faceta. Exemplos deste tipo de modelo são os diagramas de circuitos hidráulicos, pneumáticos e elétricos, diagramas E/R (entidade/relações), organogramas, gráficos de barras, gráficos X-Y e X-t, diagrama de transição de estados, tabelas de decisão

Modelo em linguagem natural: Descrição utilizando linguagem natural para descrever características do sistema. Por exemplo: lista de requisitos.

A tabela a seguir apresenta diversos modelos empregados na descrição de sistemas no âmbito das engenharias mecânica, elétrica e de software.

Modelo	Perspectiva	Representação	Área Técnica
Estrutura de funções	Funcional	Diagramática	Projeto de produtos (multitecnológica, mas com ênfase à área mecânica)
Diagrama de blocos	Comportamental	Diagramático +Matemático	Multitecnológica: Elétrica, mecânica, hidráulica, pneumática,
Diagrama de Estados	Comportamental	Diagramático	Software, Microeletrônica
Pede de Petri marcada	Comportamental	Diagramático	Sistemas de manufatura
Diagrama de funcionamento	Comportamental	Diagramático	Pneumática
Grafos de ligação (bond graphs)	Estrutural - Funcional	diagramático	Multitecnológico: Elétrica, mecânica, hidráulica, pneumática,
Rede de Petri C/A	Estrutural - Funcional	Diagramático	Elétrica, mecânica, hidráulica, pneumática, software
DFD	Funcional	Diagramático	software
Diagramas de circuitos elétricos	Estrutural-Funcional	Diagramático	Elétrica
Diagramas E/R	Estrutural	Diagramático	Software
Diagramas de Interação entre objetos	Funcional	Diagramático	Software
Desenho Geométrico	Estrutural	Ícônico	Mecânica
Funções Transferência	Comportamental	Matemático	Multitecnológico
Equações Dinâmicas (Variáveis de Estado)	Comportamental	Matemático	Multitecnológico
Diagramas de circuitos hidráulicos e pneumáticos	Estrutural - Funcional	Diagramático	Hidráulica e pneumática
Maquetes	Estrutural	Ícônico	Multitecnológico

1.4 - Definição e Modelagem de Sistemas Técnicos

As definições de sistema discutidas na seção 1.1 são bastante genéricas e aplicáveis a diversas áreas como biológica, química, tecnológica, social, financeira entre outras.

A tecnologia, onde se insere a presente abordagem, 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 1.3. 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.

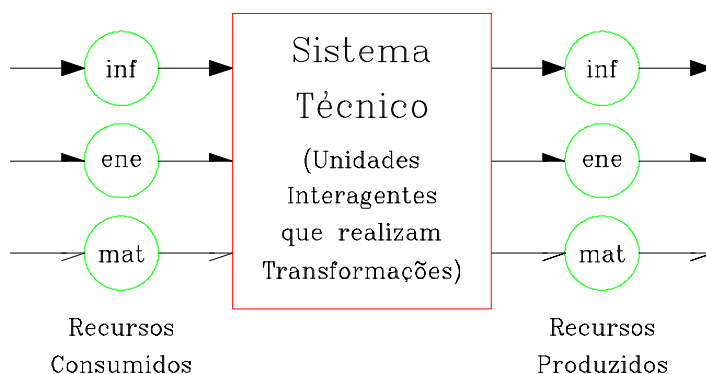


Figura 1.3 - Modelo funcional de um sistema técnico.

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 1.4.2 e 1.4.3 caracteriza-se os três recursos destacados na figura 1.3.

1.4.1 - 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 1.4).

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 1.4 - 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 1.2). Na representação adotada foram definidos três tipos de setas para enfatizar o tipo de recurso envolvido (ver figura 1.4):

- *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.

1.4.2 - Caracterização da Informação

Primeiramente faz-se necessário o estabelecimento de uma definição objetiva e precisa do termo *informação*. Analisando-se sob o ponto de vista da *significação das palavras* tem-se que 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 e 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 1.5, 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.

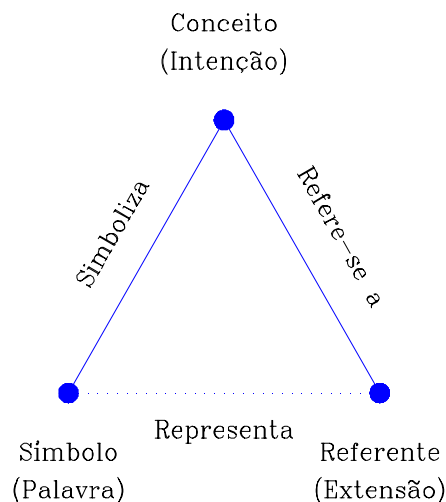


Figura 1.5 - “Triângulo da significação” (SOWA, 1984).

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.

1.4.2 - 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.

2 - CONCEITUAÇÃO E MODELAGEM DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS

2.1 - 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*, normalmente tratados no âmbito da metrologia, 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, a presente abordagem está voltada à 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 automatizado¹, 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)).

2.2 - Modelagem Genérica de Sistemas Automáticos

Conforme discutido na seção 1.3, a escolha de um determinado modelo para um sistema decorre de um processo de 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

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

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 2.1 utilizando-se a notação em rede C/A citada no capítulo 1.

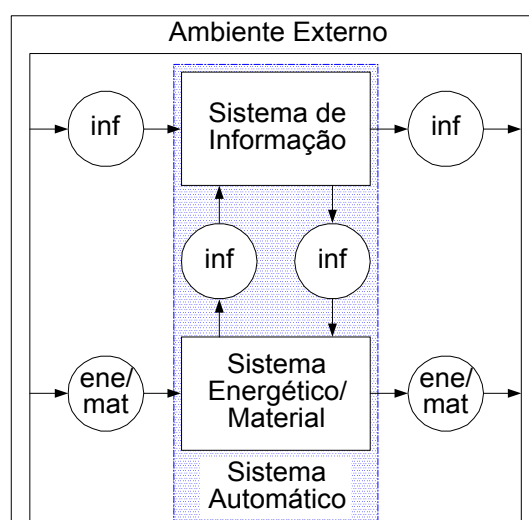


Figura 2.1 - Modelo funcional/estrutural condensado de um sistema automático.

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.

2.3 - 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)¹, 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 1.4.2 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 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 2.2.

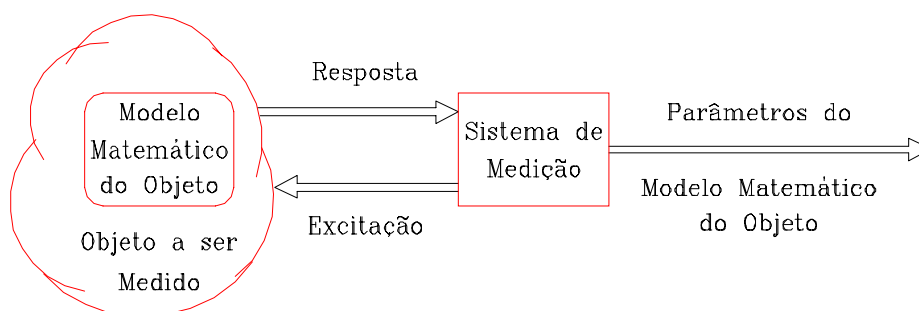


Figura 2.2 - "Modelo geral da medição" (FIOK et alii, 1988).

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 2.3) 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 mensurando² ou algum tipo de potência de saída para um atuador ou elemento de

¹ 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).

² *Mensurando* é definido como a grandeza específica submetida à medição (INMETRO, 1995).

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.

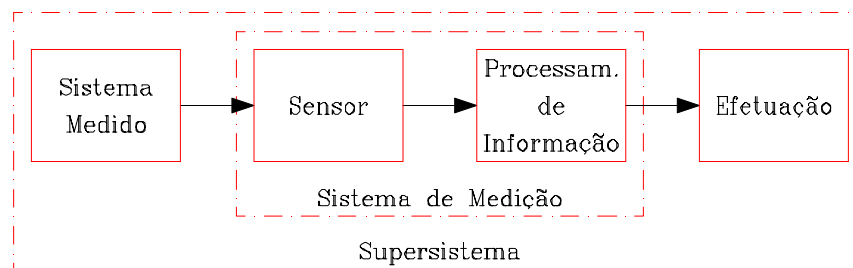


Figura 2.3 - “Principais componentes funcionais de um sistema de medição” (FINKELSTEIN, 1985).

No presente trabalho adota-se a interpretação dada por FINKELSTEIN (1977) e FINKELSTEIN (1985) em razão do sistema de 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 2.4 apresenta-se o modelo funcional clássico de um sistema de medição baseado em SCHNEIDER & FLESCHE (1989) e FLESCHE (1995) que enfatiza a realização física da medição. O *transdutor*¹ 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 & FLESCHE, 1989).

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

¹ É comum na literatura técnica e científica a confusão entre os termos *transdutor* e *sensor*. Seguindo a orientação de SCHNEIDER & FLESCHE (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.

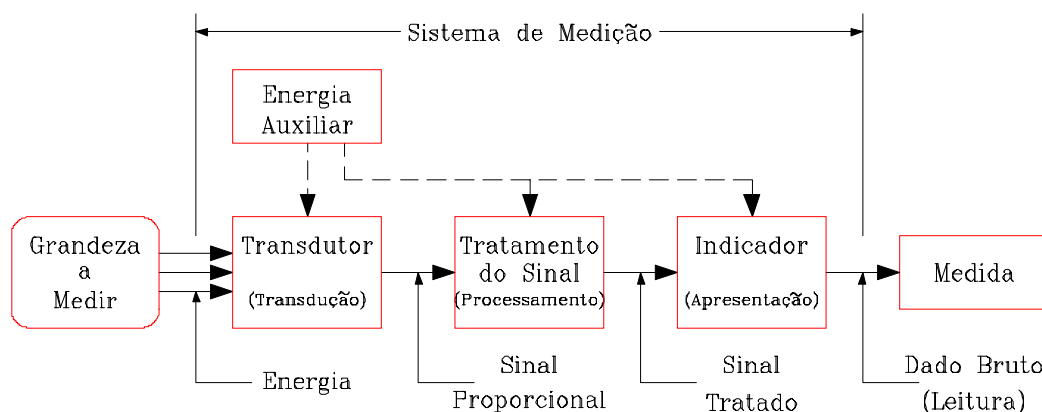


Figura 2.4 - “Sistema generalizado de medição” (SCHNEIDER & FLESCHE, 1989).

Com base nas colocações feitas até o momento, propõe-se a estruturação de um *sistema de medição genérico* na forma mostrada na figura 2.5.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 3, 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 2.5.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.), 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 reproduz a cadeia de medição clássica¹ (figura 2.4), 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 comporão 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 2.6 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

¹ 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.

univocamente o comportamento ideal esperado do instrumento podendo ser expressa por uma expressão matemática (linear ou não), uma tabela ou um gráfico.

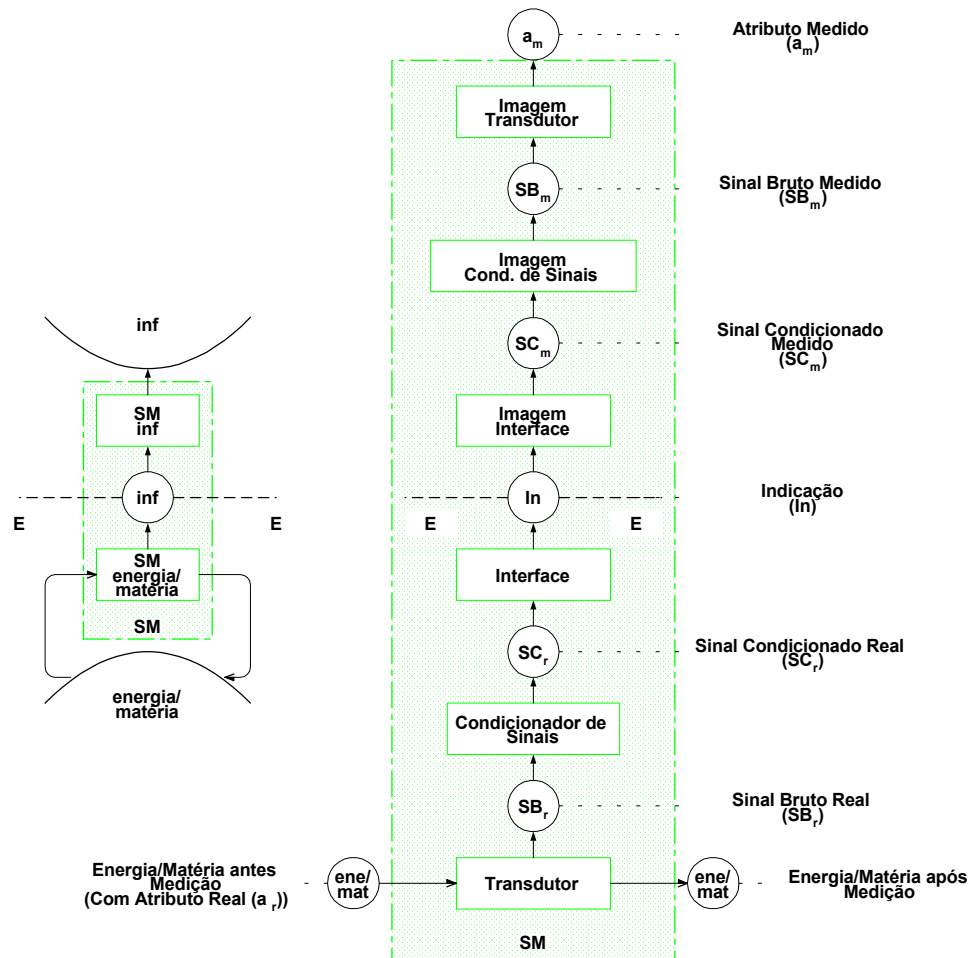


Figura 2.5 - Modelo funcional/estrutural de um sistema de medição: a) Forma condensada; b) Forma refinada.

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 2.7 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).

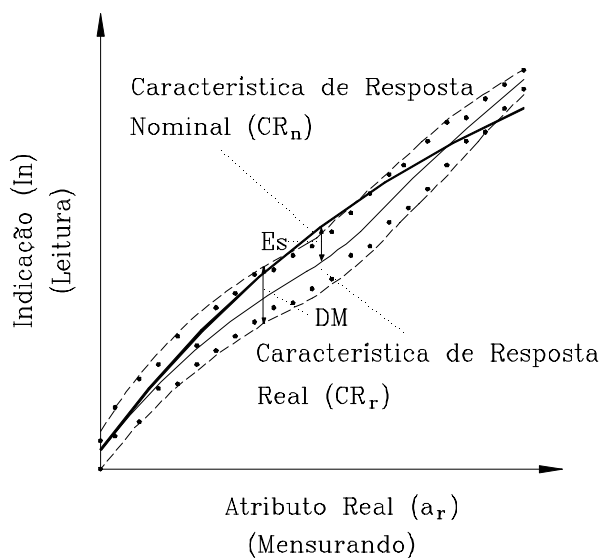


Figura 2.6 - Resultados da calibração da cadeia de instrumentos de medição - transdutor, condicionador de sinais e interface.

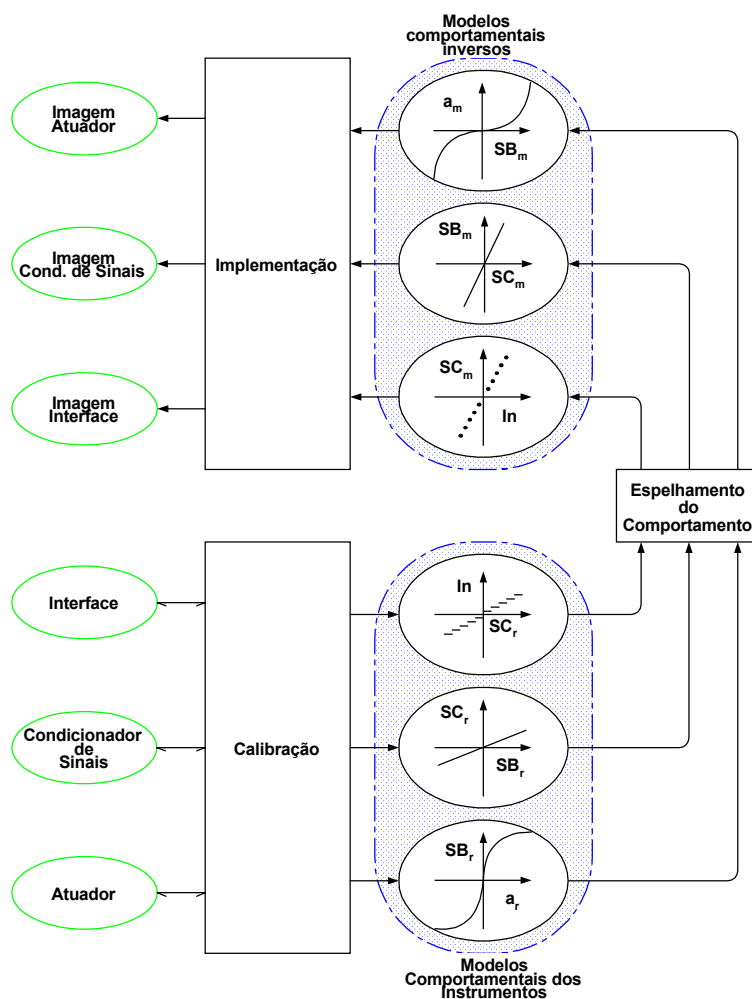


Figura 2.7 - Mecanismo de criação das imagens.

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.

2.3.1 - Concretização dos Sistemas de Medição

De acordo com a figura 2.7, 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 1.2, 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 2.8) 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 2.8.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 2.8.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 bits x U .

Detalhes quanto ao projeto e implementação dos objetos-imagem e acerca dos meios técnicos usados para interfaceamento com o computador estão descritos em (MADEIRA, 1995).

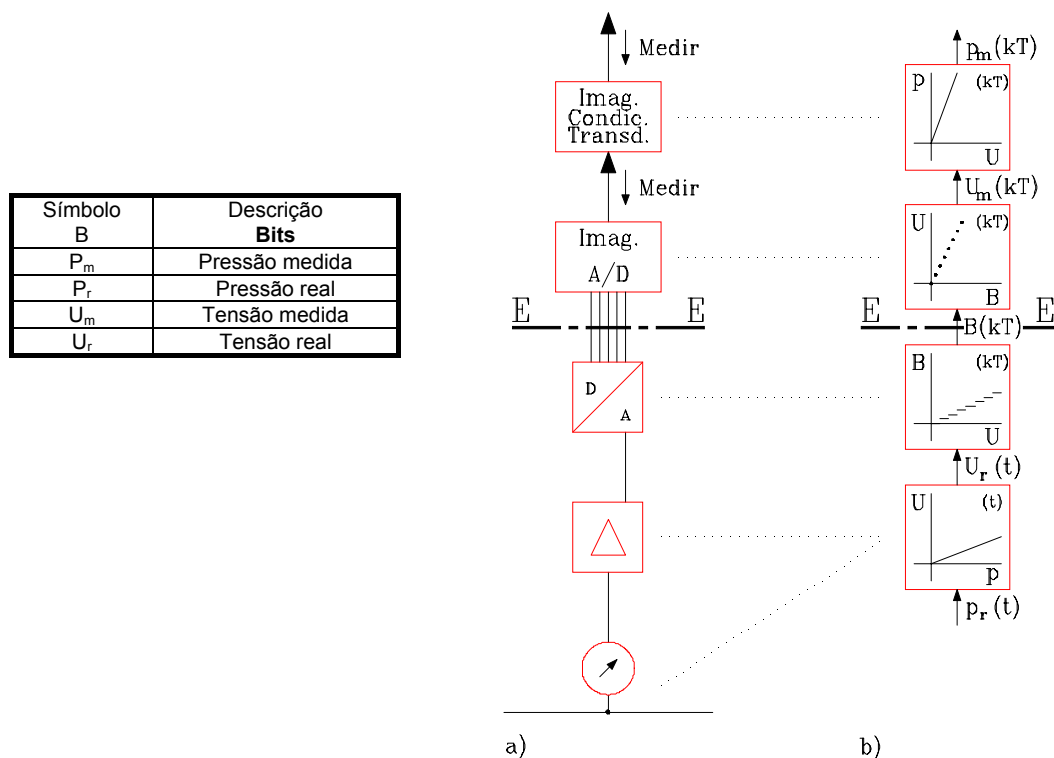


Figura 2.8 - Sistema de medição de pressão. a) Modelo funcional/estrutural; b) Modelo comportamental.

2.4 - 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 2.9, a qual é derivada da perspectiva estrutural/funcional dos sistemas de medição (figura 2.5) e utiliza o mesmo mecanismo de criação das imagens.

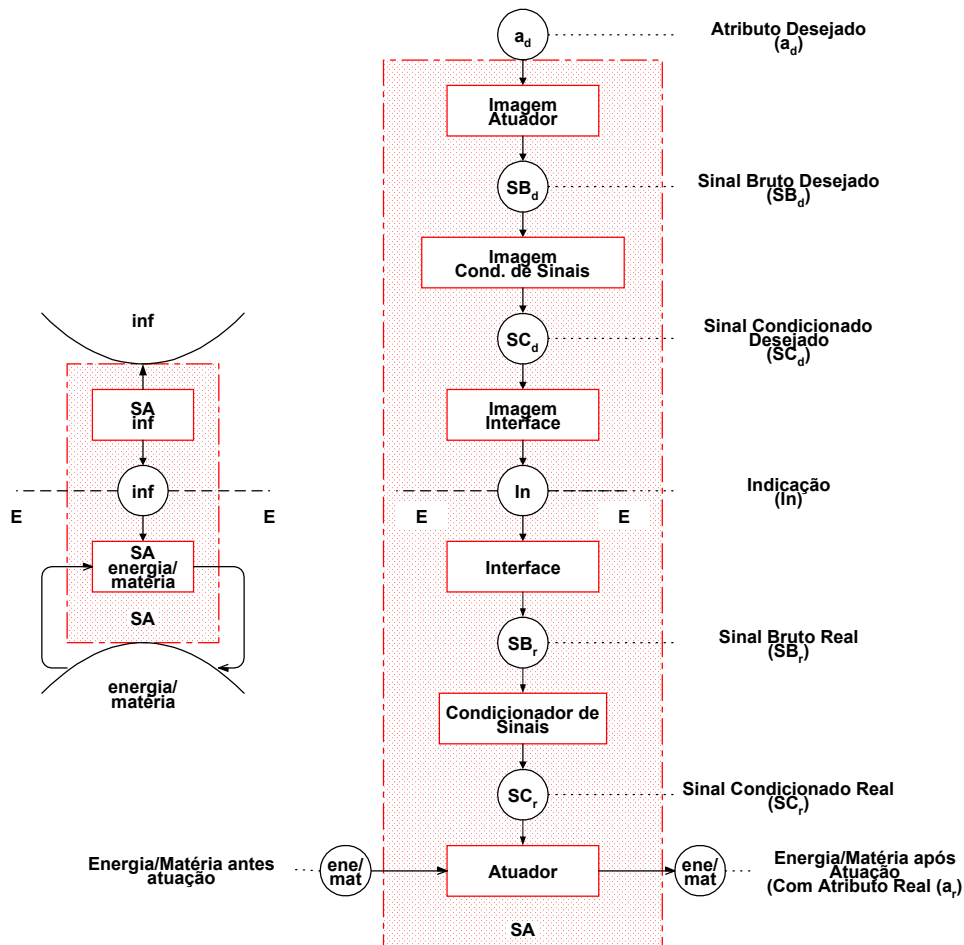


Figura 2.9 - Modelo funcional/estrutural de um sistema de atuação genérico.

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 2.1.

Na figura 2.10 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 2.10.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 2.10.c ilustra as curvas características dos instrumentos que, através do mecanismo de espelhamento, são implementadas nos objetos.

Tabela 2.1 - Simbologia das variáveis empregadas nas figuras 2.10 à 2.14.

Símbolo	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.					

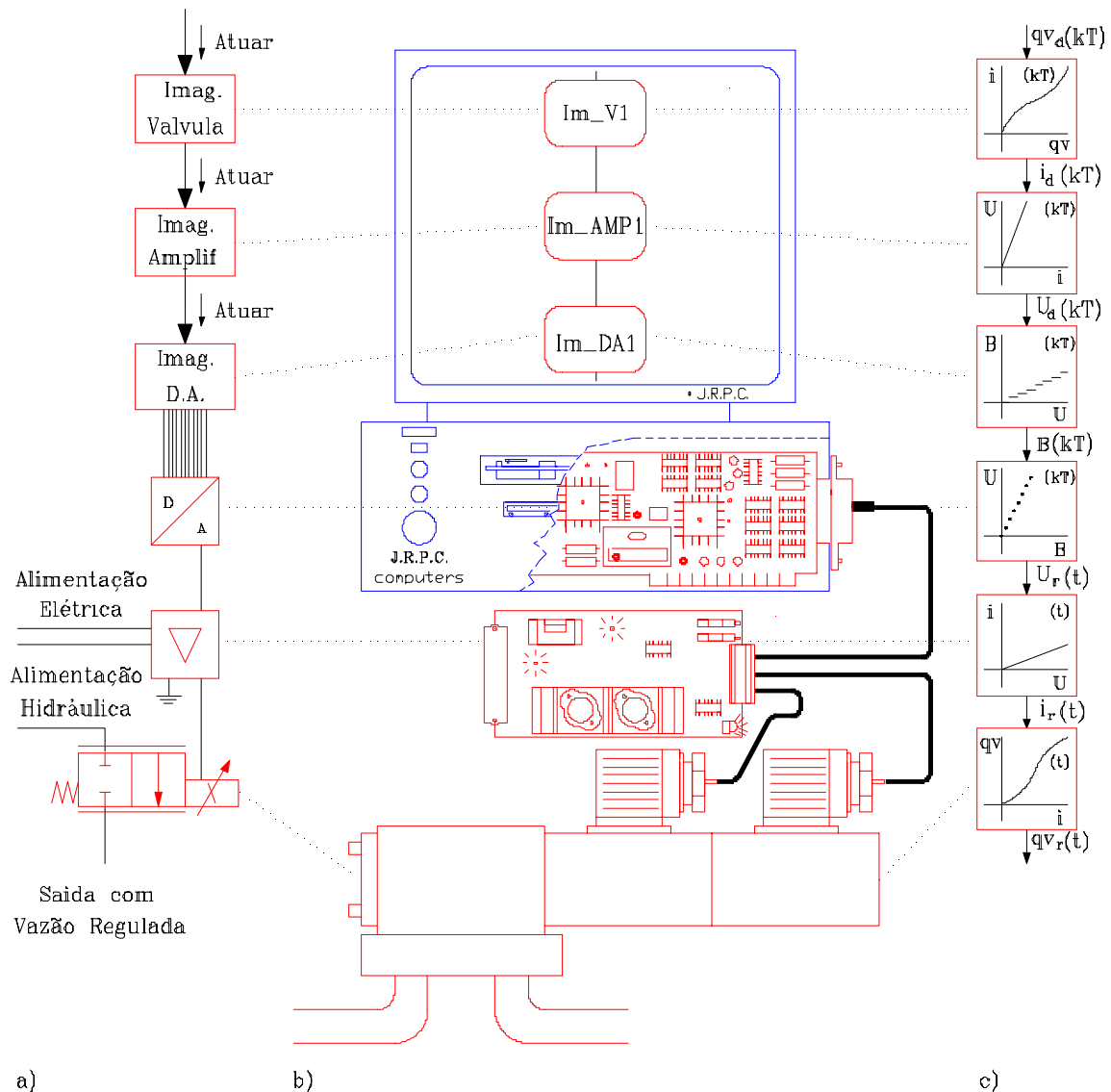


Figura 2.10 - Sistema de atuação em vazão: a) Modelo funcional/estrutural; b) Modelo estrutural; c) Modelo comportamental.

A rede C/A da figura 2.11 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*).

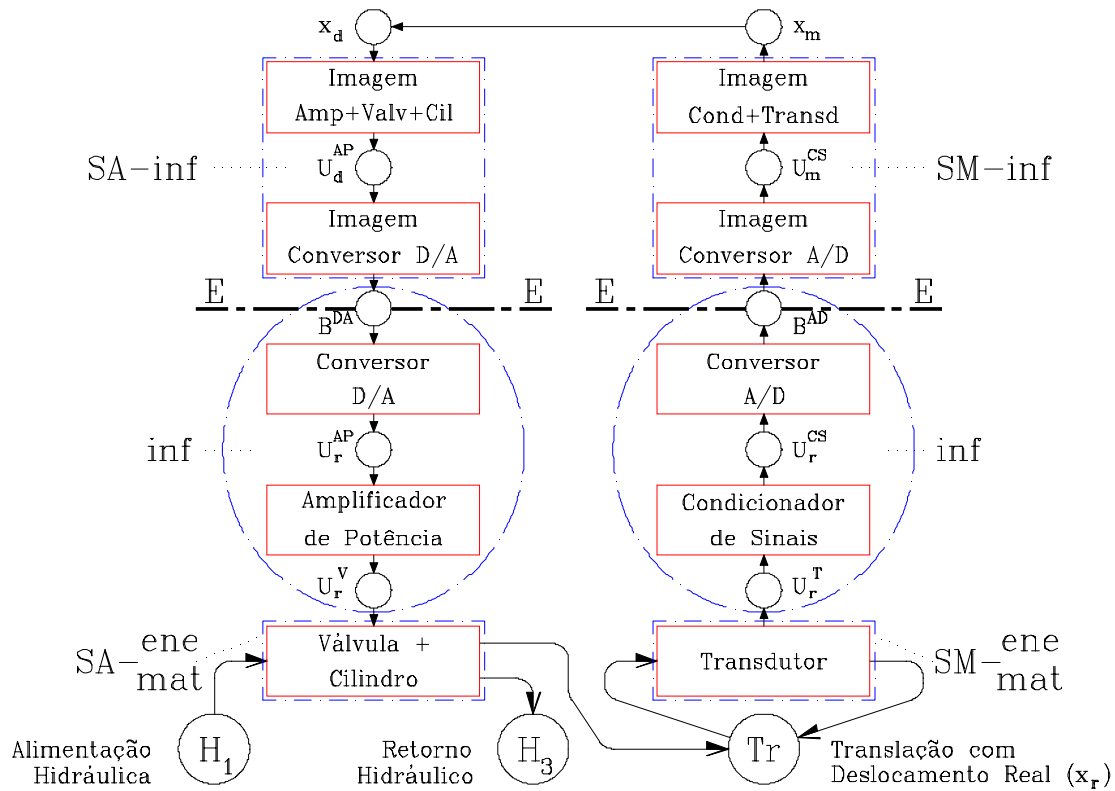


Figura 2.11 - Sistema de atuação em posição com controlador digital - Modelo funcional/estrutural.

Na figura 2.12 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).

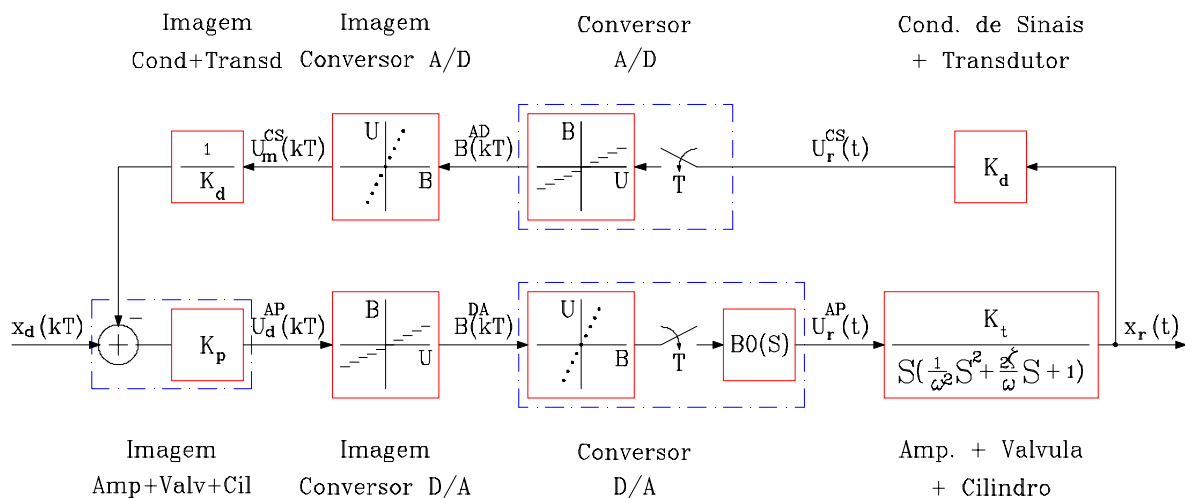


Figura 2.12 - Sistema de atuação em posição com controlador digital - Modelo comportamental.

Conforme modelado pela figura 2.13, 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 2.14 mostra que a característica de resposta da imagem do circuito em malha fechada é o ganho do transdutor-condicionador de sinais (K_d).

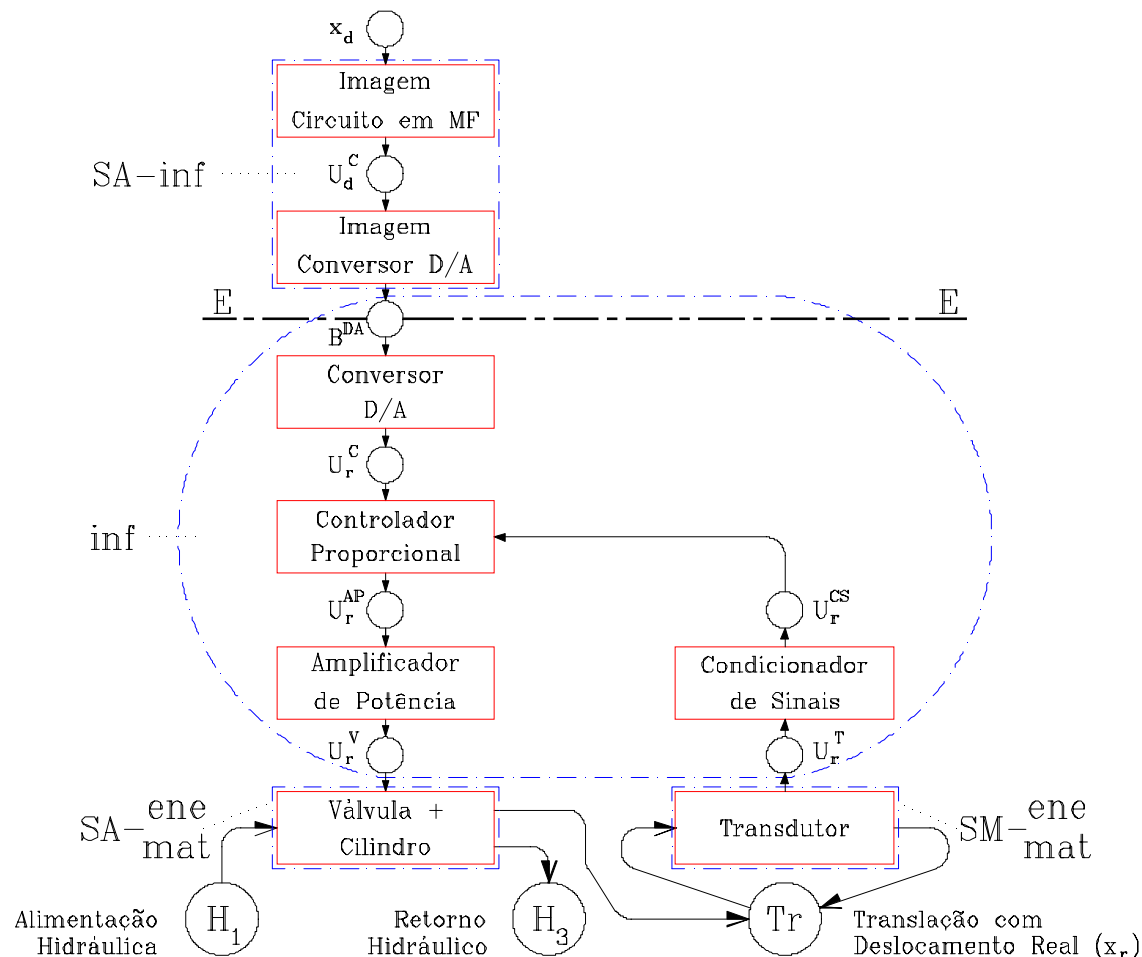


Figura 2.13 - Sistema de atuação em posição com controlador analógico - Modelo funcional/estrutural.

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 2.11 pelo da figura 2.13) não implica em nenhuma modificação no restante do **software**, fato este que é uma característica do desenvolvimento orientado por objetos.

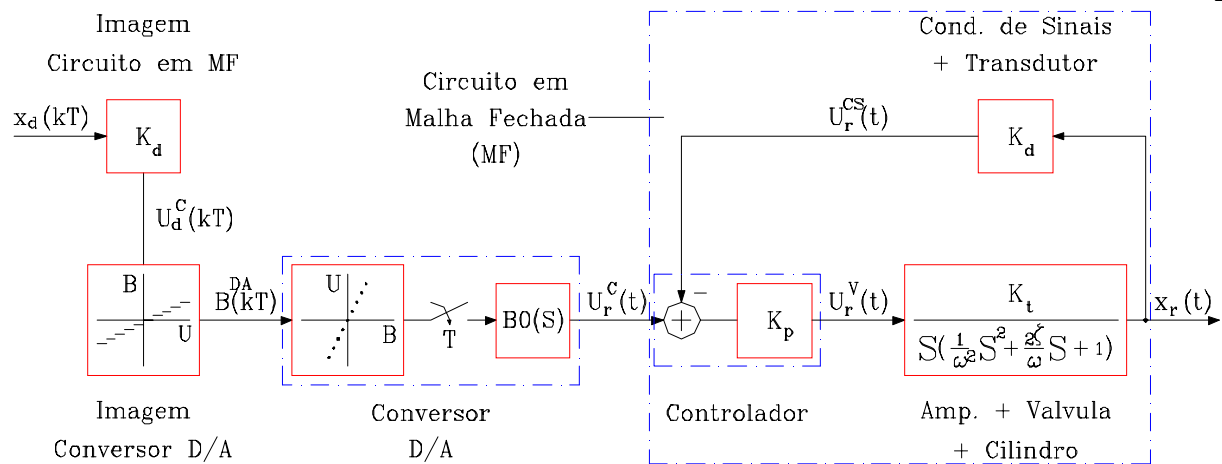


Figura 2.14 - Sistema de atuação em posição com controlador analógico - Modelo comportamental.

2.5 - 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 2.1), chega-se ao modelo da figura 2.15 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.

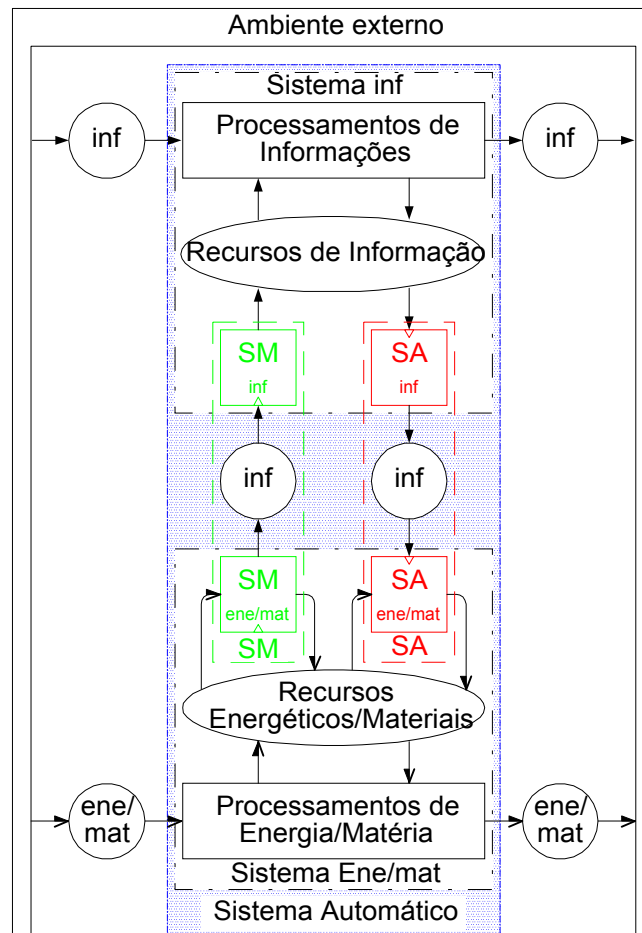


Figura 2.15 - Modelo funcional/estrutural refinado de um sistema automático.

Destaca-se que as figuras 2.1 e 2.15 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.

3 - PROJETO DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS

No capítulos anteriores 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, é empregada para caracterizar genericamente os sistemas automáticos e modelos comportamentais e estruturais mais concretos, como diagramas de blocos, desenhos esquemáticos e diagramas de circuitos, possibilitam 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 anteriormente, a mecatrônica emergiu como uma tecnologia que visa o projeto de produtos e de processos que envolvam áreas técnicas diversas. 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).

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 3.2, as diretrizes para o projeto de sistemas automáticos.

3.1 - 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.

Tabela 3.1 - Subdivisão do projeto de produtos industriais.

Fases	Passos	Meios	Atividades	Resultados
Estudo do Problema (Definição da Tarefa)	Estudo da Tarefa	✦ Discussão interativa ✦ Coleta de dados ✦ Questões padronizadas	✦ Esclarecer os objetivos a serem alcançados ✦ Esclarecer a tarefa ampla e exaustivamente ✦ Coletar dados técnicos, econômicos, mercadológicos ✦ Avaliar economicamente	
	Especificação de Requisitos de Projeto	✦ Lista de itens característicos	✦ Elaborar lista de requisitos: •em linguagem comum aos envolvidos •formal e completa	<i>Lista de Requisitos Obrigatórios e Desejáveis</i>
Concepção (Projeto Conceitual)	Estudo da Função a ser Desempenhada		✦ Formular a tarefa através de função (descrição funcional)	<i>Função Global</i>
		✦ Critérios lógicos ✦ Critérios físicos	✦ Decompor a função global em funções parciais e interligações	1 ou + <i>Estruturas de Funções Parciais</i>
	Pesquisa de Princípios de Solução	✦ Métodos: ▪Convencionais, ▪Intuitivos, ▪Discursivos	✦ Encontrar princípios de solução para cada função parcial	1 ou + <i>Princípios de Solução para cada Função Parcial</i>
	Estruturação de Módulos Realizáveis	✦ Matriz morfológica ✦ Métodos matemáticos	✦ Agrupar os princípios de solução em módulos realizáveis	
		✦ Critérios funcionais, técnicos e econômicos	✦ Selecionar a(s) solução(ões) proposta(s) (síntese do sistema total)	1 ou + <i>Estruturas Modulares com Princípios de Solução</i>
Projeto de Configuração (Projeto Preliminar)	Configuração dos Módulos Principais	✦ Normas ✦ Cálculos ✦ Critérios espaciais, econômicos, segurança, ergonomia,	✦ Estabelecer forma, medidas básicas, materiais e processos de fabricação, para princípios de solução ✦ Avaliar técnica e economicamente ✦ Obter soluções para funções auxiliares	1 ou + <i>Princípios Construtivos para cada Princípio de Solução</i>
	Configuração do Produto Total	✦ Desenhos formais ✦ Listas provisórias de peças ✦ Recomendações genéricas de fabricação e montagem	✦ Descrever detalhes finais de princípios construtivos ✦ Analisar acoplamentos de princípios construtivos ✦ Avaliar técnica e economicamente o produto global (identificação de erros de projeto)	<i>Princípio Construtivo Global</i>
Projeto Detalhado	Fixar Instruções de Execução e Uso	✦ Normas de fabricação, montagem, transporte e utilização	✦ Especificar os princípios construtivos ✦ Definir o arranjo final ✦ Reavaliar técnica e economicamente ✦ Elaborar instruções para fabricação e utilização	<i>Solução Técnica</i>

Por outro lado, conforme apresentado na seção 1.2, as metodologias de desenvolvimento¹ de **software** podem ser categorizadas em *decomposição funcional e orientadas por objetos* mas, apesar da possibilidade de utilizar inicialmente uma 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.

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 3.2 reflete a divisão em fases e passos descritos por

¹No 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.

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 3.2 - Subdivisão do desenvolvimento de software orientado por objetos.

Fases	Passos	Meios	Atividades	Resultados
Análise	Análise de Requisitos do Usuário	✦ Entrevistas ✦ Discussão interativa ✦ Questões padronizadas	✦ Definir o problema ✦ Analisar as necessidades, problemas e as tendências de desenvolvimento ✦ Estudar a viabilidade	
	Especificação de Requisitos do Usuário		✦ Listar preliminarmente as especificações do sistema ✦ Identificar requisitos alcançáveis em linguagem do usuário	Especificações em linguagem natural e diagramas simples
	Especificação de Requisitos do Software	✦ Técnicas de especificação comportamental ✦ Métodos formais de especificação	✦ Descrever formal e completamente os requisitos do sistema: ▪ na linguagem do programador, ▪ uso de classes/objetos do domínio do problema, ▪ modelos da estrutura, função e comportamento	Diagramas de Classes/ Objetos, Estados e Funções para o domínio do problema
Projeto	Projeto do sistema (projeto preliminar)		✦ Tomar decisões acerca da arquitetura global: ▪ Adicionar classes/objetos e relações do domínio da solução aos modelos, ▪ Enfoque na visão externa das classes/ objetos	Diagramas de Classes/ Objetos, Estados e Funções para o domínio da solução
	Projeto Detalhado		✦ Definir e documentar cada componente que será realizado como código: ▪ Enfoque na visão interna de classes, ▪ Criação da estrutura de dados e algoritmos ✦ Adicionar detalhes ao modelo	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. As informações constantes da tabela 3.2 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.

3.2 - 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	Fases	Passos	Fases	Passos
Análise do Problema	Estudo do Problema	✦ Estudo da Tarefa ✦ Especificação de Requisitos de Projeto	Análise	✦ Análise de Requisitos do Usuário ✦ Especificação de Requisitos do Usuário
Projeto Conceitual (Concepção)	Concepção	✦ Estudo da Função ✦ Pesquisa de Princípios de Solução ✦ Estruturação em Módulos Realizáveis	Análise	✦ Especificação de Requisitos do Software
Projeto de Configuração	Projeto de Configuração	✦ Configuração dos Módulos Principais ✦ Configuração do Produto Total	Projeto	✦ Projeto do Sistema
Projeto Detalhado	Projeto Detalhado	✦ Fixar Instruções de Execução e Uso	Projeto	✦ Projeto Detalhado

A decomposição do processo de projeto em fases distintas, conforme as tabelas 3.1, 3.2 e 3.3, estabelece a seqüência de resultados que deve ser obtida para, a partir dos requisitos, chegar

progressivamente a uma especificação própria para construção¹. 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 3.1 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 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.

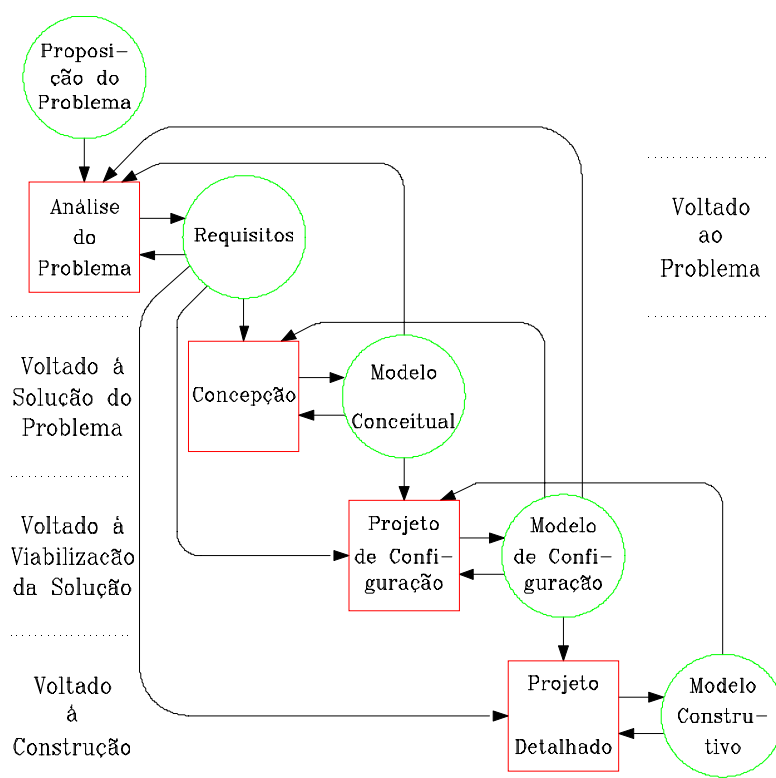


Figura 3.1 - Modelo funcional do processo de projeto para sistemas automáticos.

É importante frisar que o modelo da figura 3.1 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

¹ O termo *construção* é entendido como fabricação, montagem ou implementação.

comportamental como, por exemplo, por diagrama de estados ou rede de Petri marcada. Todavia, a disposição descendente dos modelos (canais) indica, informalmente, a sequência 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 sequenciais. 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.

3.2.1 - 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 2, onde as redes C/A mostradas na figura 2.9 refletem a fase de concepção do sistema e a figura 2.10.a o resultado do projeto de configuração em que são estabelecidos princípios construtivos e objetos computacionais. Na figura 2.10.b e 2.10.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 3.2 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 estados¹. 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.

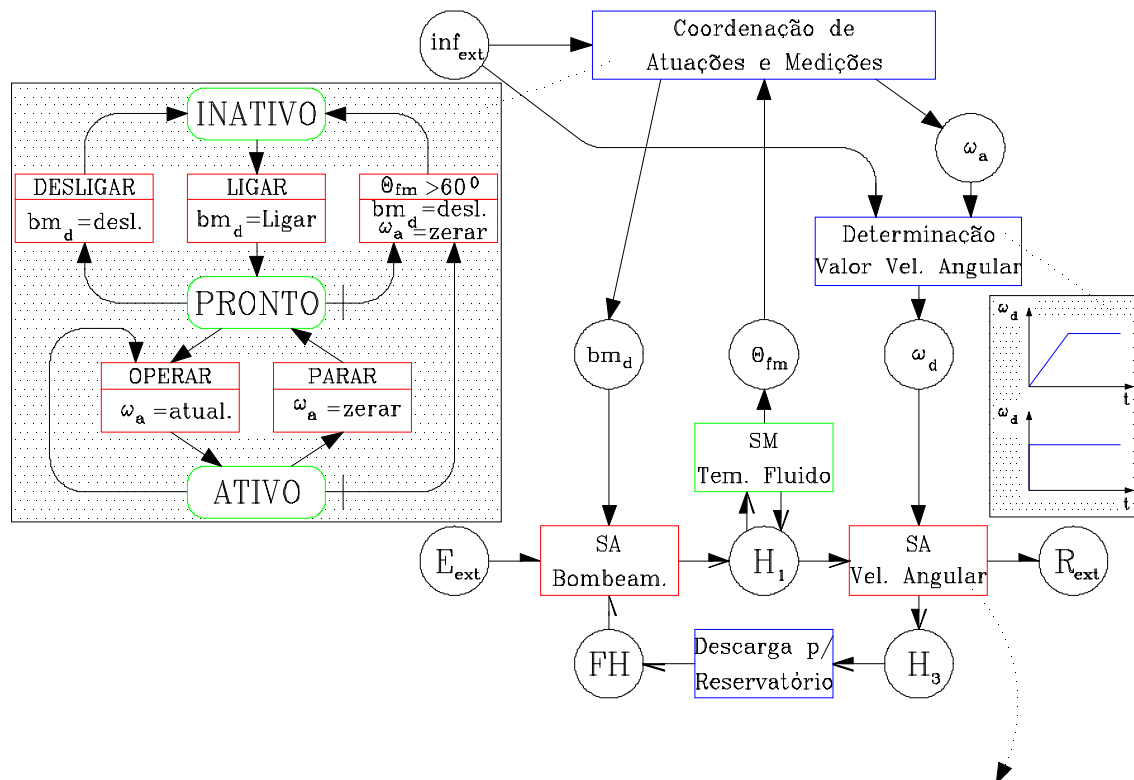
Como coordenação de atuações e medições toma apenas decisões lógicas, é delegado à atividade de *determinação do valor da velocidade angular* a atualização da velocidade angular desejada, que pode ocorrer na forma de degrau ou rampa. Nesta figura exemplifica-se também a concepção e configuração *do sistema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

¹ Notação segundo EMBLEY et alii (ver apêndice 2).

- 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,
- 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.).



Símbolo	Descrição
bm_d	Bombeamento desejado
θ_{fm}	Temperatura do fluido medida
ω_a	Atualização v.ang.
ω_d	Velocidade angular desejada
ω_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 ω_r)

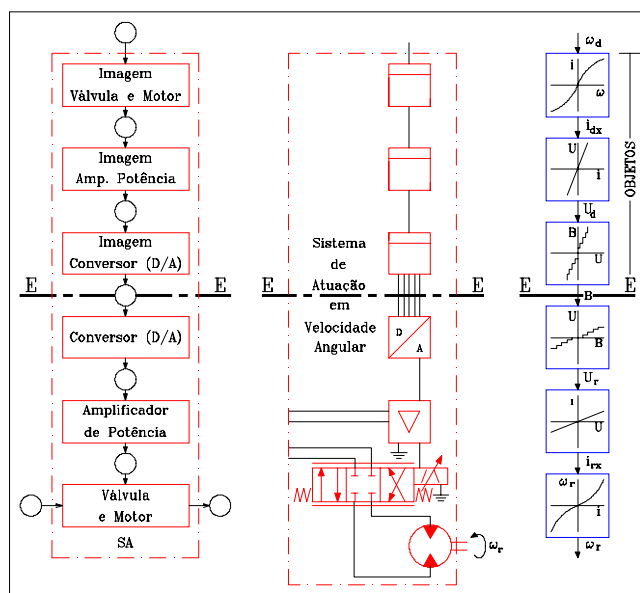


Figura 5.2 - Sistema de acionamento com velocidade angular regulável - Modelos funcionais/estruturais e comportamentais na fase de concepção.

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 2.15 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.

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 1.4. 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			

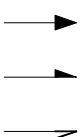
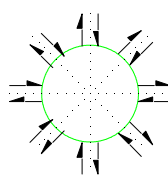
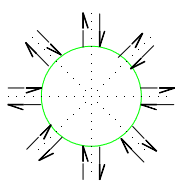
Símbolo	Arcos Direcionados	Posição Setas Energia	Posição Setas Matéria
	Fluxo de Informação Fluxo de Energia Fluxo de Matéria		

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

A.2 - Regras de Interpretação

Conforme ilustrado na figura A.2.a, um arco direcionado de um canal para uma agência implica que a atividade pode depender, mas não necessariamente depende, do conteúdo do canal ou, em outras palavras, o recurso pode ser consumido pela atividade. Um arco saindo da agência indica que o conteúdo do canal pode ser alterado, mas não necessariamente o é, pela atividade, isto é, o recurso pode ser produzido pela atividade. Esta interpretação é válida para qualquer configuração de rede C/A como, por exemplo, a ilustrada na figura A.2.b que mostra a possibilidade de múltiplos recursos serem consumidos e/ou produzidos por uma atividade ou múltiplas atividades consumirem ou produzirem um único recurso. Na figura A.2.c é representada uma configuração particular que estabelece que a atividade utiliza temporariamente o recurso e libera-o novamente.

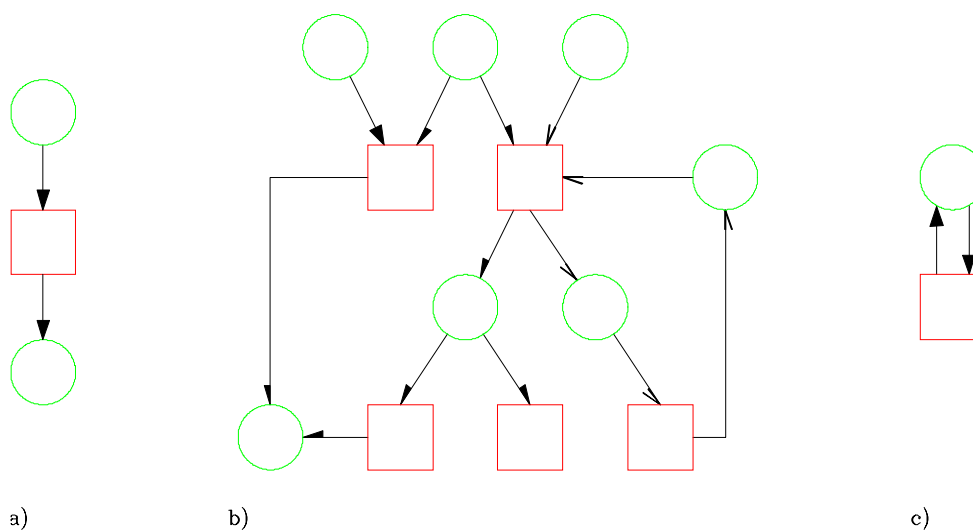


Figura A.2 - Exemplos de configurações da rede C/A.

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.

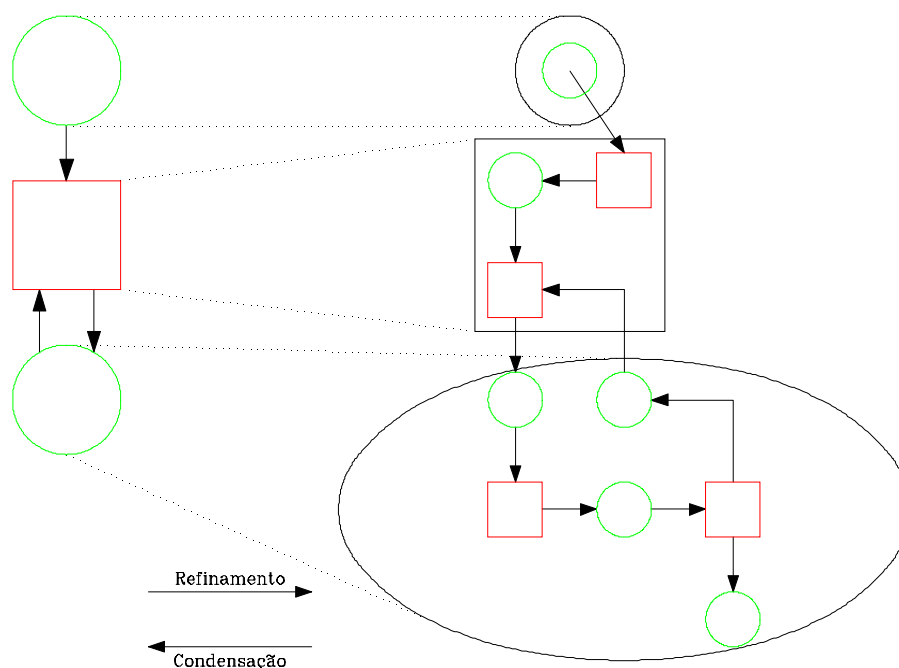


Figura A.3 - Mecanismo de refinamento e condensação de redes C/A.

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.