

## **2. Modelagem e Análise de Sistemas de Ar Condicionado**

Este capítulo apresenta os principais conceitos necessários para compreensão da proposta deste trabalho. Apresenta-se inicialmente uma descrição de sistemas de condicionamento de ar em edifícios inteligentes. Em seguida é introduzida uma classificação de sistemas dinâmicos e discutem-se técnicas de modelagem de sistemas de ar condicionado.

### **2.1. Sistemas de Condicionamento de Ar em Edifícios Inteligentes**

Condicionar o ar é o processo do tratamento do ar, de modo a ajustar simultaneamente a temperatura, a umidade, a pureza e a distribuição (velocidade) de ar, para atender as necessidades de um determinado recinto [Creder, 2004].

As principais funções do sistema de ar condicionado em um edifício são garantir o conforto térmico aos seus ocupantes e propiciar condições ideais de funcionamento para equipamentos ou sistemas produtivos.

A condição de conforto térmico para um indivíduo se caracteriza pela satisfação deste com as condições térmicas do ambiente onde se encontra. Neste caso, pode-se dizer que existe uma situação de equilíbrio térmico, quando o indivíduo perde para o ambiente a mesma quantidade de calor produzida por seu metabolismo [Trane, 1980].

Com a caracterização dos aspectos que influenciam a produtividade e qualidade do trabalho humano e de equipamentos eletro-eletrônicos, eletromecânicos e mecânicos, o condicionamento do ar passou a ser um fator determinante para garantir a execução eficiente de tarefas e o perfeito funcionamento das máquinas em certos ambientes. Desta forma, não somente centrais de processamento de dados, com seus computadores, mas até mesmo as plantas industriais, exigem atualmente a manutenção das condições ideais de climatização ambiental. Laboratórios de metrologia, laboratórios clínicos, salas limpas industriais e estações de transmissão de sinais eletromagnéticos e/ou ópticos são exemplos de locais onde o rigoroso controle do condicionamento do ar são exigências fundamentais.

Como principais parâmetros a serem controlados por um sistema de condicionamento de ar pode-se destacar a temperatura, velocidade relativa, umidade, concentração de CO<sub>2</sub>, existência de odores e pureza quanto a particulados. Cabe ao sistema de ar condicionado manter a combinação adequada das variáveis acima, de forma a atender as necessidades de conforto térmico do usuário e/ou para funcionamento ideal de equipamentos [Trane, 1980].

Um sistema de ar condicionado pode ser dividido em duas partes básicas: o sistema de produção térmica, responsável pela produção de frio e/ou de calor e, o sistema de distribuição térmica, responsável pelo encaminhamento do frio ou calor gerado ao ambiente a ser climatizado [Carrier, 1986 ]. Um exemplo é apresentado na Figura 2.1.

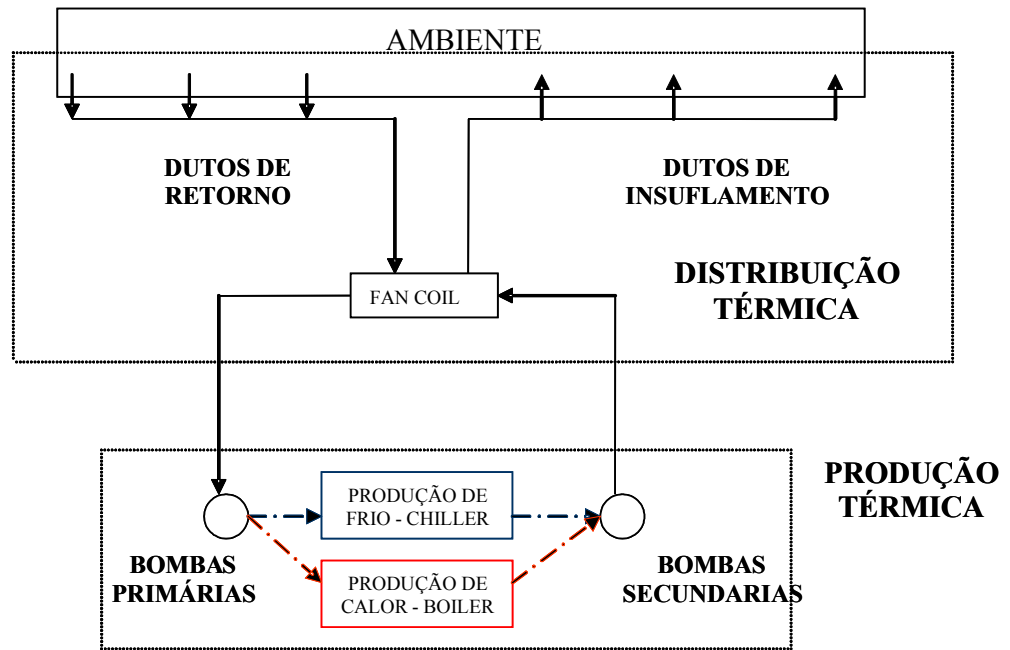


Fig. 2.1. Esquema de um sistema de ar condicionado central por expansão indireta.

Quanto à produção térmica, um sistema de ar condicionado pode ser classificado em dois tipos [Creder, 2004]:

- Expansão direta: neste caso, a troca de calor é feita diretamente entre o fluido refrigerante e o ar a ser condicionado. A serpentina de troca térmica trabalha como o evaporador do ciclo de refrigeração do fluido refrigerante. Dentre os equipamentos que utilizam esta tecnologia, pode-se destacar os aparelhos convencionais de ar condicionado de janela, os aparelhos de ar condicionado do tipo *split* e *self-contained*, que podem ter insuflamento direto no ambiente ou trabalhar com redes de distribuição.
- Expansão indireta: neste caso, existe um fluido intermediário (ou auxiliar), normalmente água, que é resfriado em unidades relativamente grandes de resfriamento, chamadas *chillers*, ou aquecido em unidades de aquecimento, chamadas *boilers*, para então ser conduzido às unidades onde ocorre a troca térmica entre o fluido intermediário e o ar a ser condicionado. Estas unidades, compostas basicamente de uma serpentina para troca térmica e um ventilador para insuflamento e retorno do ar são chamadas de *fan coils*. A

partir destas unidades, o insuflamento para os ambientes também pode ser direto ou através de redes de distribuição.

Nos dois casos, a transferência do calor removido do ambiente interno para o ambiente externo pode ser feita diretamente para o ar, através dos condensadores a ar, ou utilizando também a água como fluido auxiliar, encaminhando-a para as torres de resfriamento, onde ocorre a liberação do calor para a atmosfera.

O sistema de distribuição térmica é responsável por levar o ar após o seu condicionamento ao ambiente de destino, assim como promover o retorno do ar que se encontrava no ambiente para ser novamente condicionado. O condicionamento do ar envolve a sua renovação, a partir da admissão de ar externo pela tomada de ar exterior e mistura com o ar de retorno do ambiente, o seu resfriamento/aquecimento, através da troca térmica na serpentina e sua filtragem, para retenção de impurezas e particulados. O ar é então levado aos ambientes através de uma rede de dutos de insuflamento, termicamente isolada, projetada de forma a garantir vazão de ar e níveis de ruído compatíveis com os ambientes climatizados. Após a troca térmica no ambiente, o ar retorna através de uma rede de dutos de retorno, ou através de venezianas, para o recondicionamento. Normalmente, a mistura do ar de retorno com o ar exterior para renovação é efetuada em uma caixa de mistura. O fluxo de ar através do sistema é assegurado pelo acionamento de um ventilador, do tipo turbina, que mantém a pressão e vazão necessárias para o funcionamento do sistema [Carrier, 1986].

Existem diversas variações sobre a forma de controle da temperatura dos ambientes climatizados. O sistema de controle por zonas, que mantém toda área atendida (chamada de zona) por um mesmo climatizador sob a mesma temperatura tem, em geral, um sensor de temperatura instalado no duto de retorno, próximo ao climatizador, após a parte que mistura o ar de todos os ambientes. A partir do sinal emitido por este sensor, a vazão de água gelada que passa pela serpentina de transferência de calor do climatizador é regulada através de uma válvula de duas ou três vias, ajustando desta forma a temperatura do ar insuflado. Este sistema

é conhecido como sistema de controle de temperatura VAC (volume de ar constante), uma vez que não há variação na vazão do ar insuflado, somente na sua temperatura do ar insuflado.

Em sistemas de controle individualizado por ambiente, onde a temperatura pode ser regulada de forma independente, cada ambiente tem seu próprio sensor de temperatura, cujo sinal determina o posicionamento do *dampers* VAV (volume de ar variável), instalado no duto de insuflamento do ambiente. Neste caso, o ajuste da temperatura é feito através da regulação do volume de ar insuflado sobre o ambiente, conforme apresentado na Figura 2.2 [Honeywell, 1995].

Assim, no sistema VAV de controle de temperatura, tem-se dois sistemas de controle em malha fechada, normalmente utilizando inversores de frequência, para determinar a velocidade do ventilador do *fan coil*, a partir da pressão do ar na rede de dutos de insuflamento de ar e, para determinar a velocidade de funcionamento das bombas secundárias de distribuição de água, a partir da pressão da água na rede de distribuição [Sauer et al., 2001].

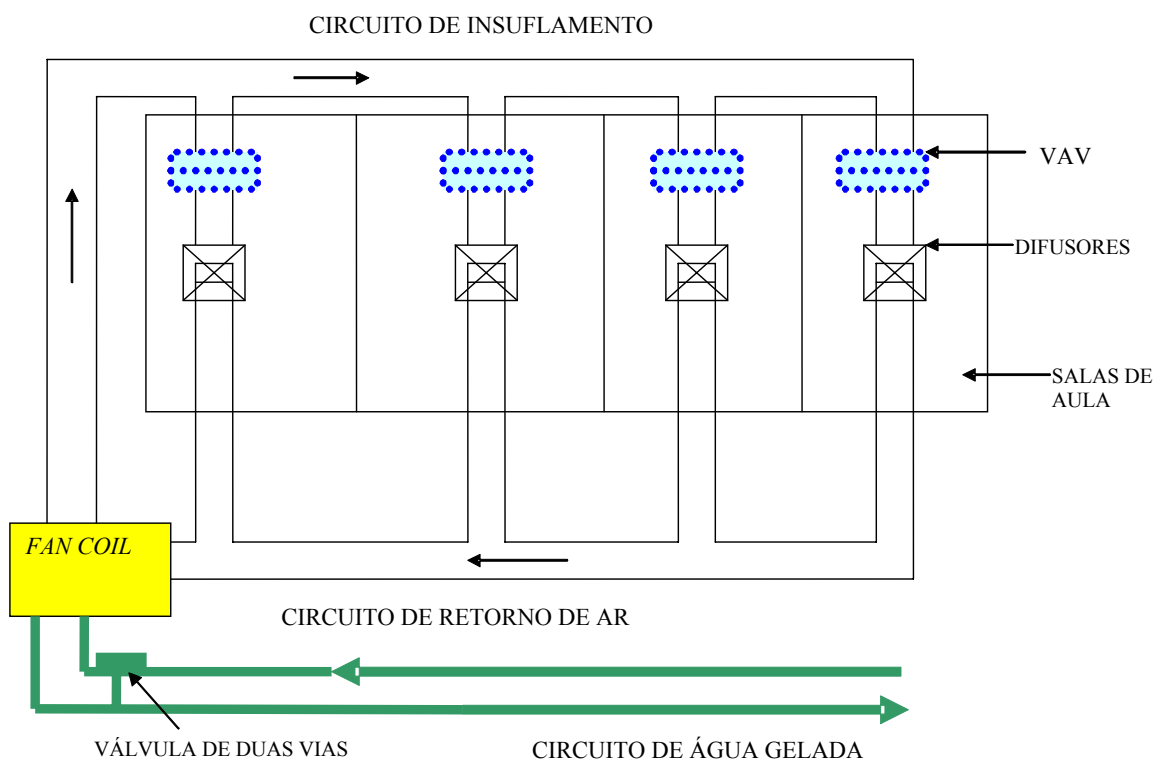


Fig. 2.2. Esquema de operação para sistema VAV

Em uma edificação comercial, o sistema de ar condicionado é responsável por aproximadamente 55% do consumo de energia elétrica, envolvendo as atividades de aquecimento, refrigeração e movimentação de ar. O aumento do custo da energia elétrica tem motivado o desenvolvimento de novas tecnologias para redução do consumo. Para os sistemas de ar condicionado, têm sido introduzidas tecnologias como sistemas de volume de ar variável (VAV), sistemas de controle com malha fechada para bombas de distribuição de água, com inversores de frequência e controle de desempenho para compressores de refrigeração [Sauer et al, 2001].

Segundo dados da ABRAVA (Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento), praticamente todos os sistemas de ar condicionado instalados a mais de 10 anos são candidatos ao *retrofitting*, que consiste na atualização de sistemas antigos, tornando-os compatíveis com as modernas tecnologias de automação para otimização de recursos. Em termos comparativos, os sistemas atuais chegam a ser 60% mais eficientes, com relação custo-benefício mais favorável quanto à economia de energia e investimento direto [Bolzani, 2004].

Em edifícios inteligentes, o sistema de ar condicionado encontra-se integrado aos demais sistemas prediais. Como exemplo, pode-se citar a integração a sistemas de controle de acesso, o que proporciona o acionamento do sistema de ar condicionado somente quando é verificada a presença de usuários nos ambientes, ou com o sistema de combate a incêndio, de forma a controlar o fluxo de ar para zonas onde esteja ocorrendo o incêndio, reduzindo assim o volume de ar que venha a alimentar o fogo, ou em zonas adjacentes à de ocorrência do incêndio, de forma a impedir a propagação da fumaça.

## 2.2. Classificação de Sistemas

Os sistemas de ar condicionado são sistemas dinâmicos, e como tais, podem ser classificados com base na caracterização de suas variáveis de estado em relação ao tempo, conforme Figura 2.3 [Cardoso & Valette, 1997].

Os sistemas a eventos discretos (SEDs) caracterizam-se pelas transições instantâneas entre estados discretos. As variáveis de estado variam abruptamente em determinados instantes. Estes sistemas são em geral baseados em regras e procedimentos definidos pelo homem. Para este tipo de sistema, o objetivo do controle é a execução de operações, caracterizados pela ocorrência de eventos, conforme um procedimento pré-definido [Miyagi, 1996].

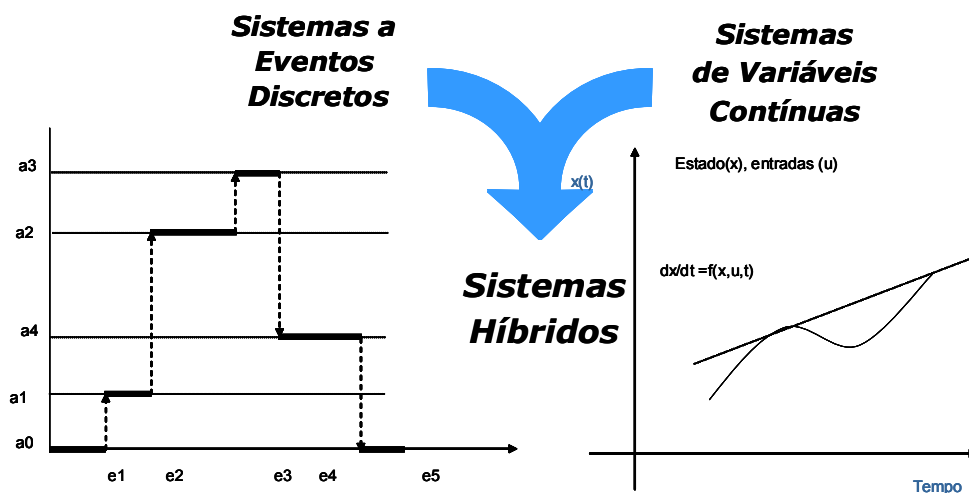


Fig. 2.3. SED x SVC x Sistema Híbrido

A principal característica dos sistemas de variáveis contínuas (SVCs) é que as variáveis de estado evoluem de forma contínua no tempo, em função de fenômenos da natureza, isto é, baseadas em leis físicas. Para sua modelagem, os sistemas de equações diferenciais são ferramentas comprovadamente eficazes. Nestes sistemas, o objetivo básico do controle normalmente é igualar o valor de uma variável de controle a um valor de referência.

A partir destes conceitos, deriva-se a idéia de sistemas híbridos, onde é necessária a análise tanto do ponto de vista contínuo quanto das interferências proporcionadas pelos eventos discretos. São encontradas aqui características tanto dos SEDs como dos SVCs. Um exemplo prático deste tipo de sistema são os sistemas de ar condicionado em edifícios inteligentes, onde existem estados discretos, caracterizados pelos status de equipamentos e variáveis contínuas no tempo, como os sinais dos sensores de temperatura, além da interação necessária com outros sistemas, como os de combate a incêndio, controle de acesso e iluminação. A característica contínua também é marcante, através de variáveis contínuas como temperatura e umidade, com comportamentos regidos por leis físicas, assim como na interação com os ambientes interno e externo, conforme ilustrado na Figura 2.4 [Villani & Miyagi, 2004].

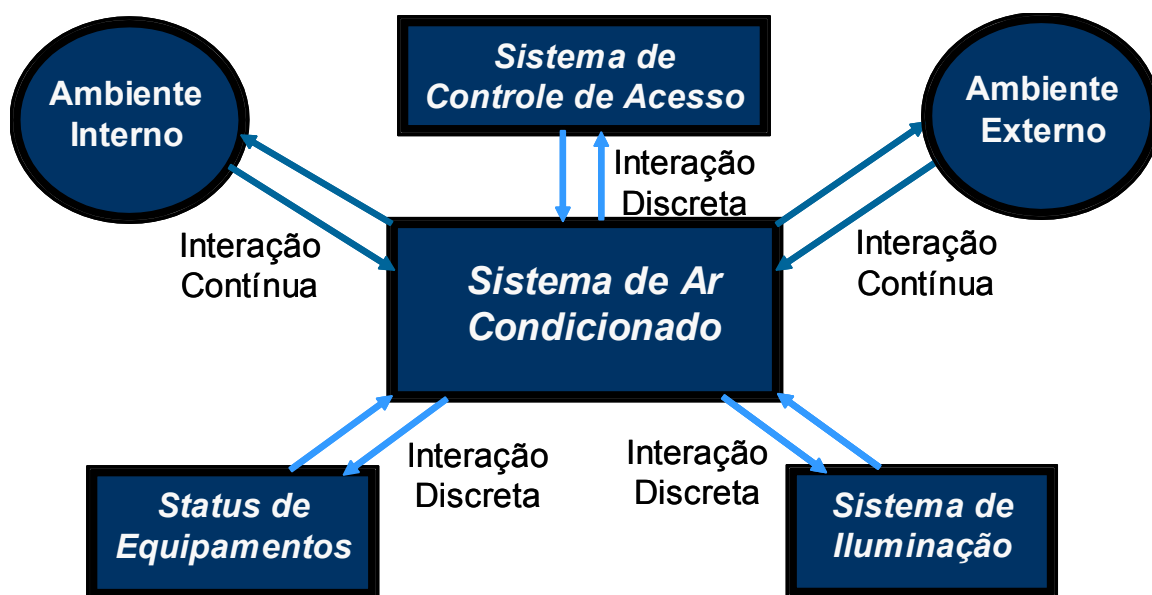


Fig. 2.4. Interações do sistema de ar condicionado em EI.

## 2.3. Modelagem de Sistemas Híbridos

Entre os formalismos disponíveis para modelagem de SEDs, destaca-se a rede de Petri. A rede de Petri foi proposta por Carl Adam Petri em 1962 e pode ser vista de diversas formas [Cardoso & Vallete, 1997]:



- Como um grafo orientado com dois tipos de nós e um conjunto de regras que regem o comportamento dinâmico de elementos do grafo;
- Como um conjunto de matrizes de inteiros positivos ou nulos, com comportamento dinâmico descrito por uma equação linear;
- Como um sistema de regras sob a forma condição  $\rightarrow$  ação.

Formalmente, pode-se definir uma rede de Petri ordinária como uma 4-tupla:  $R = \langle L_r, T_r, Pre, Pos \rangle$ , onde:

- $L_r$  = conjunto finito de lugares de dimensão  $n$ ;
- $T_r$  = conjunto finito de transições de dimensão  $m$ ;
- $Pre: L_r \times T_r$  que define os arcos orientados de entrada das transições, isto é, arcos orientados de lugares para transições;
- $Pos: T_r \times L_r$  que define os arcos de saída das transições, isto é, arcos orientados de transições para lugares;
- $L_r \cap T_r = \emptyset, L_r \cup T_r \neq \emptyset$

Uma rede de Petri é um grafo bipartido contendo lugares e transições. Arcos orientados conectam lugares a transições e transições a lugares. Os lugares representam estados e podem possuir marcas. Na rede de Petri ordinária, os lugares têm capacidade ilimitada para hospedar marcas. As transições representam eventos. Um conjunto de regras define a habilitação e o disparo de transições em função do número de marcas nos lugares conectados a estas transições. O disparo de uma transição também altera a marcação da rede, representando assim o comportamento dinâmico do sistema modelado [Villani, 2000].

Para modelagem de sistemas híbridos, encontram-se duas vertentes de abordagem. A primeira baseia-se em extensões de modelos contínuos, com a inclusão de variáveis discretas. A segunda abordagem fundamenta-se em técnicas de modelagem utilizadas em SEDs, como a

rede de Petri, com a inclusão de elementos representando a variação contínua no tempo das variáveis. Como o foco deste trabalho é a análise do sistema de controle e gerenciamento, com características eminentemente discretas, optou-se pela segunda abordagem.

Em Villani & Miyagi (2004), é feita uma análise das propostas presentes na literatura para extensões da rede de Petri para modelagem de sistemas híbridos. São apresentadas e analisadas a rede de Petri Híbrida, a rede de Petri Diferencial, a rede de Petri de Alto Nível e a rede de Petri Predicado/Transição Diferencial. Ao final do estudo, conclui-se que a rede de Petri Predicado/Transição Diferencial é a mais adequada para modelagem de um sistema de ar condicionado, pois permite a descrição da dinâmica discreta associada aos modos de gerenciamento do sistema através da rede de Petri ordinária e, da dinâmica contínua associada aos fluxos de ar e calor através de sistemas de equações diferenciais.

A rede de Petri Predicado/Transição Diferencial define uma interface entre a rede de Petri e sistemas de equações diferenciais algébricas, associando-as aos lugares<sup>1</sup>. Em SVCs, um determinado conjunto de equações diferenciais algébricas define a evolução das variáveis contínuas de um sistema. No caso de sistemas híbridos, este conjunto de equações diferenciais sofre influência da ocorrência de eventos discretos. Assim, na rede de Petri Predicado/Transição Diferencial, sistemas de equações diferenciais são associadas aos lugares e as variáveis contínuas são associadas às marcas. A modularidade também é considerada neste caso para tratar problemas relacionados com as dimensões de uma rede que pode envolver um número relativamente grande de marcações (estados) possíveis. Desta forma, tem-se a representação das diversas configurações discretas possíveis do ponto de vista discreto na rede de Petri, e a representação da evolução contínua do sistema para cada uma das configurações através das equações diferenciais algébricas associadas aos lugares [Villani & Miyagi, 2005].

---

<sup>1</sup> No presente texto, os elementos estruturais da rede de Petri estão em Arial

Uma rede Predicado/Transição Diferencial marcada pode ser definida formalmente pela 3-tupla  $NPTD = \langle R, A, M_0 \rangle$ , onde:

-  $R$  é uma rede de Petri definida pela 4-tupla  $\langle L_r, T_r, Pre, Pos \rangle$ , onde:

- $L_r$  é um conjunto finito de lugares,
- $T_r$  é um conjunto finito de transições,
- $Pre$  é o mapeamento dos arcos que saem de um lugar e estão orientados a uma transição,
- $Pos$  é o mapeamento dos arcos que saem uma transição e estão orientados a um lugar;

-  $A$  é a inscrição da NPTD,  $A = \langle X, AL, AC, AA, AF \rangle$ , onde:

- $X$  é um conjunto de variáveis formais, cujo valor é um número real,
- $AL$  associa a cada lugar  $p_i$  um vetor  $X_{p_i}$  de variáveis pertencentes a  $X$ ,
- $AC$  associa uma função de habilitação  $e_i(\cdot)$  a cada transição  $t_i$ ,
- $AA$  associa uma função de junção  $j_i(\cdot)$  a cada transição  $t_i$ ,
- $AF$  associa um sistema de equações diferenciais algébricas  $F_i$ , cujas variáveis são  $X_{p_i}$  e suas derivadas no tempo;

-  $M_0$  é a marcação inicial da rede.

Um exemplo de disparo de uma transição em rede de Petri Predicado/Transição Diferencial é apresentado na Figura 2.5.

## 2.4. Controle Baseado em Rede de Petri

A crescente complexidade dos sistemas produtivos tornou necessário o desenvolvimento de ferramentas efetivas para o projeto e implementação de sistemas de controle, que permitam sua concepção, detalhamento, verificação e validação antes da aquisição e instalação de equipamentos e controladores. Neste sentido, a rede de Petri destaca-

se como ferramenta eficaz de modelagem e análise do comportamento de SEDs e de sistemas híbridos. Inicialmente, o desenvolvimento de procedimentos de conversão de modelos em redes de Petri em programas de controladores restringia-se aos SEDs, mas a necessidade de considerar processos híbridos tem demandado o desenvolvimento de procedimentos válidos também para estes tipos de sistemas [Frey, 2000].

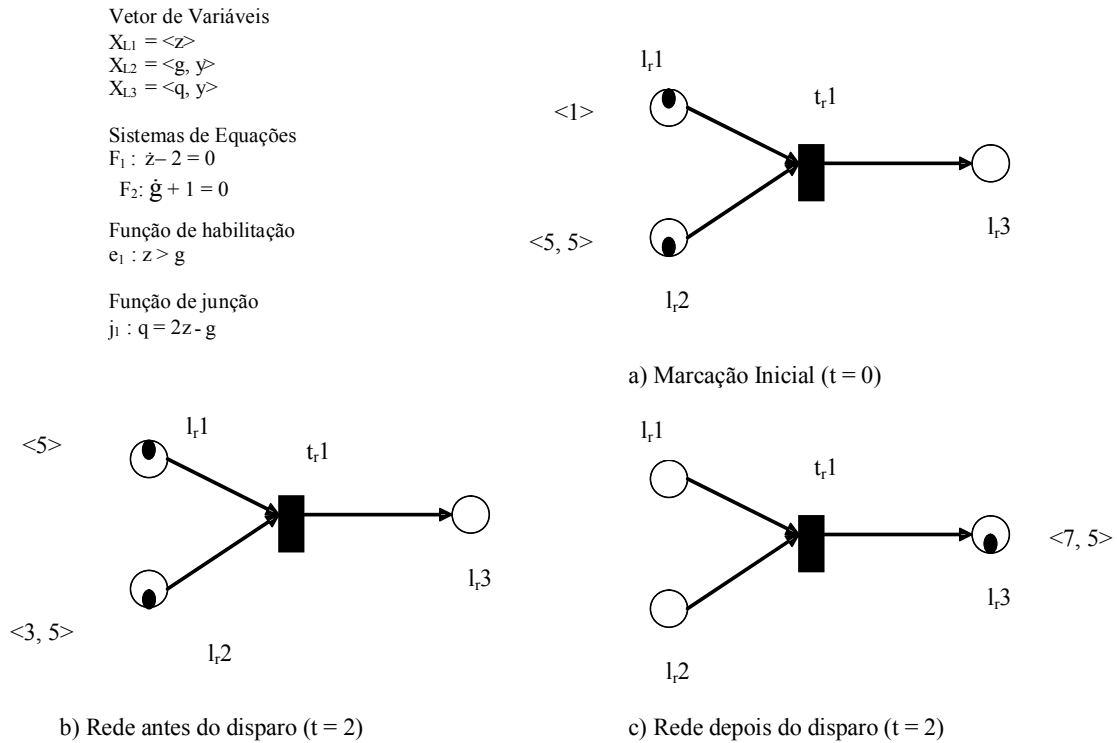


Fig. 2.5. Rede de Petri Predicado/Transição Diferencial.

Em Uzam et al. (1996), é utilizada a técnica do TPL (*token passing logic*), que se aplica à rede de Petri com temporização em lugares e transições (*P-timed and T-timed*) e à rede de Petri Colorida. Esta técnica, própria para SEDs, facilita a conversão da rede de Petri numa especificação da lógica de controle adequada para a geração de programas em diagrama *ladder*, usados amplamente nos controladores programáveis atualmente no mercado. A presença ou ausência de sinais de sensores é tratada através de interpretações das pré-condições para disparo das transições. Os sinais para os atuadores são associados a lugares. Na

essência, lugares da rede de Petri representam os estados lógicos do processo e as transições representam as ocorrências dos eventos.

Em Lima II (2002) é apresentada uma outra alternativa que converte modelos de SEDs desenvolvidos em rede de Petri interpretada para uma linguagem texto, no caso o STL (*statement list*), através de uma ferramenta computacional.

Em Lee et al. (2004) é introduzida a rede de Petri de controle - CoPN (*control Petri net*), que tem como característica básica ser determinística e utilizar transições temporizadas e sincronizadas. Este tipo de rede permite uma análise funcional de um processo a partir das operações e condições do sistema, associando posições a lugares, incluindo saídas e ações, e associando as condições às transições. A partir de modelos em CoPN, é feita a análise da evolução das marcas, transformando a CoPN em funções booleanas, para posterior geração de diagramas *ladder*.

Em Frey (2000), é introduzida a utilização de rede de Petri para modelagem e implementação de controle de sistemas híbridos. Para isso, é apresentado o conceito da rede de Petri com interpretação de sinais - SIPN (*signal interpreted Petri net*), que considera a influência do ambiente sobre o sistema através da definição de sinais, ao invés da influência baseada nos eventos utilizada em outras interpretações de elementos da rede de Petri. Na SIPN, as transições são associadas às condições de disparo determinadas por uma função booleana dos sinais de entrada. Os lugares são associados às ações especificadas pelos sinais de saída. É introduzido também o conceito de SIPN temporizada, onde tempos de atraso são associados aos arcos de entrada das transições. A implementação em controladores programáveis é feita através da conversão da SIPN temporizada em SFC (*sequential function chart*). Estes conceitos são estendidos em Frey (2003), onde é apresentado a SIPN hierárquica, baseando a análise da rede hierárquica na análise das sub-redes, inserindo ainda sinais não binários. Em Klein et al. (2003) é apresentada uma ferramenta computacional que

permite a conversão automática do modelo em SIPN para programação em lista de instruções (*instruction list*) para controladores programáveis.

Em Venkatesh et al. (1994), foi introduzida a utilização da rede de Petri não somente para a implementação, mas principalmente para validação de sistemas de controle existentes através da comparação entre a lógica dos diagramas *ladder* e modelos em rede de Petri. Esta aplicação vem a ser reforçada em Frey & Litz (2000), onde é feita uma análise de metodologias para implementação e validação de sistemas de controle a partir da rede de Petri, para as mais variadas linguagens de programação, tais como lista de instruções, SFC (*sequential flow chart*), diagramas *ladder*, diagramas de blocos funcionais (*functional block diagrams*) e textos estruturados (*structured texts*).

Todos estes trabalhos confirmam que um sistema de controle devidamente modelado, simulado e validado, utilizando a rede de Petri Predicado/Transição Diferenciais pode ser convertido para programas de controladores programáveis, dentro do contexto de edifícios inteligentes.

## 2.5.Comentários Adicionais

A necessidade contínua de desenvolver novas formas de otimização de recursos e de economia de energia propiciou a evolução dos sistemas de ar condicionado, integrando-os ao conceito de edifício inteligente. O sistema de controle de temperatura ambiente utilizando o método de volume de ar variável VAV e a variação de velocidade nas bombas de água gelada são exemplos de melhorias introduzidas em virtude das novas formas de monitoração e controle.

Partindo dos conceitos já validados de modelagem híbrida de sistemas de ar condicionado e usando rede Predicado/Transição Diferenciais, este trabalho explora estes na metodologia de construção e análise dos modelos.