

APLICAÇÃO DE MODELOS HÍBRIDOS NA INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE AR CONDICIONADO EM EDIFÍCIOS INTELIGENTES

Emília Villani

Paulo Eigi Miyagi

Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Depto. de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

São Paulo, SP, Brasil.

e-mail: emiliav@usp.br

RESUMO

Considerando sistemas de ar condicionado em edifícios inteligentes como uma classe de sistemas híbridos, este trabalho introduz e analisa a aplicação de diferentes técnicas para a modelagem de sistemas híbridos derivadas de Redes de Petri. O objetivo é evidenciar as principais vantagens e desvantagens da utilização de cada técnica na modelagem e integração do sistema de ar condicionado com os demais sistemas prediais em um edifício inteligente.

Palavras-chave: Sistemas Híbridos, Redes de Petri, Edifícios Inteligentes, Ar condicionado.

1. INTRODUÇÃO

Um "Edifício Inteligente" (EI) pode ser definido como aquele onde a introdução de novas tecnologias e a integração de sistemas são exploradas de modo a maximizar a produtividade dos ocupantes, com utilização racional de recursos e minimização do custo [Becker, 1995; Arkin & Paciuk, 1995; Fujie & Mikami, 1991].

Em particular, em um EI o sistema de ar condicionado tem como objetivo a garantia de conforto térmico aos usuários e operadores do edifício, fator essencial no aumento da potencialidade de trabalho e otimização de desempenho [Jabardo, 1984; Fanger, 1970].

No edifício tradicional, o sistema de ar condicionado opera independentemente de outros sistemas prediais, como o de iluminação, de controle de acesso, etc. Entretanto, considerando edifícios inteligentes, um Sistema de Gerenciamento do Edifício (Building Management System - BMS) deve realizar a integração entre diversos subsistemas, permitindo o compartilhamento eficiente de informações. Para o sistema ar condicionado, esta integração possibilita o acesso às informações relativas a fatores diretamente ligados à produção de calor¹. Assim, através da utilização e processamento destas informações, pode-se, por exemplo, determinar qual a melhor atitude a ser tomada em relação ao sistema de ar condicionado.

Considerando esta possibilidade de integração, o presente trabalho introduz o conceito de sistemas híbridos para a modelagem de sistemas de ar condicionado em EI.

¹ Exemplos: número de ocupantes, número de máquinas em funcionamento, etc.

A utilização de abordagens híbridas é um tema de pesquisa relativamente recente. Enquanto a teoria de controle clássico fornece ferramentas para análise e síntese de sistemas contínuos, e abordagens equivalentes tratam de sistemas a eventos discretos, não existe uma abordagem formalizada e consolidada para modelagem e análise de sistemas com comportamento dinâmico discreto e contínuo simultaneamente [Lemmon, He & Markovsky, 1999]. Assim, este trabalho analisa diferentes propostas para modelagem de sistemas híbridos baseando-se na sua aplicação para a modelagem do sistema de ar condicionado em EI.

Este artigo está organizado da seguinte forma. A seção 2 apresenta a definição de sistemas híbridos e justifica a necessidade de se caracterizar o sistema de ar condicionado como tal. A seção 3 aborda o problema de modelagem de sistemas híbridos. São apresentadas diferentes técnicas de representação de sistemas híbridos, aplicando-as para modelagem de um exemplo de sistema de ar condicionado. A seção 4 faz uma comparação entre as ferramentas apresentadas, ressaltando suas principais vantagens e desvantagens na modelagem de sistemas de ar condicionado. Finalmente, a seção 5 apresenta algumas considerações finais.

2. SISTEMAS HÍBRIDOS

Os sistemas podem ser classificados de acordo com diversos critérios [Ho, 1987]. Uma possível dicotomia é a divisão dos sistemas em Sistemas de Variáveis Contínuas (SVC), cuja principal característica é a continuidade no tempo de suas variáveis, e Sistemas a Eventos Discretos (SED), cuja modificação do estado, ocorre em função de eventos discretos, como início do funcionamento de uma máquina, chegada de uma mensagem, etc. [Miyagi, 1996]. Dentro desta mesma classificação, foram também definidos os sistemas híbridos, onde coexistem simultaneamente característica de SVC e de SED [Antsaklis & Nerode, 1998].

O sistema de ar condicionado envolve o controle de variáveis como a temperatura, que variam de forma contínua no tempo, caracterizando o sistema como SVC. Na maioria dos casos, o controle do sistema de ar condicionado também é contínuo, sendo comumente adotadas estratégias de controle do tipo proporcional (P) e proporcional-integral (PI).

No entanto, considerando o contexto de edifícios inteligentes, torna-se imprescindível a interação com os demais sistemas prediais com características predominantemente discretas, como sistema de controle de acesso, sistema de iluminação, etc. Este sistemas são representados por variáveis discretas (ex. número de pessoas em uma sala, número de lâmpadas acesas, etc.), que variam de acordo com a ocorrência de eventos discretos (ex.: entrada de uma pessoa, acionamento de um equipamento, etc.). Isto implica em considerar-se o sistema também como SED.

O sistema resultante apresenta assim características contínuas e discretas simultaneamente, interagindo entre si, onde os eventos discretos influenciam diretamente as variáveis contínuas que afetam diretamente o conforto térmico de um ambiente. Nestes termos, o sistema deve ser representado como um sistema híbrido. A Figura 1 ilustra o que foi apresentado.

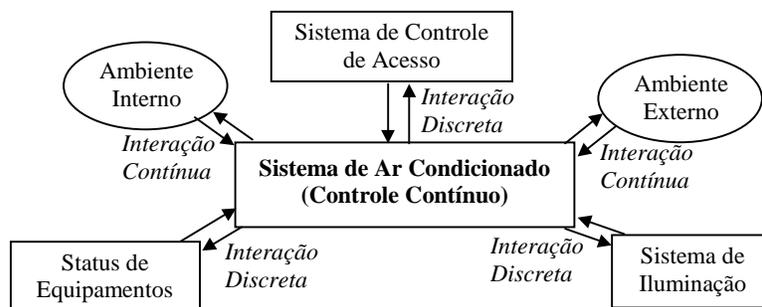


Figura 1 - Concepção híbrida de um sistema de ar condicionado de um EI.

2.1 Modelagem

Têm sido propostas diferentes abordagens para a modelagem, análise e controle de sistemas híbridos. Genericamente, as abordagens diferem entre si no que se refere à complexidade da parte contínua e discreta e à finalidade, se para análise ou controle [Antsaklis & Nerode, 1998].

Algumas abordagens consistem em extensões de modelos contínuos, nas quais são incluídas variáveis que podem ser modificadas de forma descontínua no tempo. Outras consistem na modificação de técnicas de modelagem utilizadas em SED, onde são introduzidos novos elementos que permitem a representação da dinâmica contínua.

Para o escopo do presente trabalho optou-se pelas técnicas derivadas das propostas para modelagem de SED, uma vez que o enfoque do presente trabalho está na integração do sistema de ar condicionado com os demais sistemas do edifício, que é de carácter predominantemente discreto. Entre os modelos para SED as Redes de Petri se destacam no que se refere a facilidade de interpretação do modelo e a representação de forma hierárquica. Assim, as técnicas apresentadas a seguir são derivadas das Redes de Petri.

3. MODELAGEM DE SISTEMAS DE AR CONDICIONADO

Para o estudo dos diversos tipos de redes de Petri considerou-se o sistema da Figura 2. Neste sistema um ventilador é responsável pela retirada do ar do ambiente e pela sua condução através da serpentina de água fria, onde o ar é resfriado, sendo posteriormente insuflado no ambiente. A temperatura do ambiente é controlada através da variação da temperatura do ar insuflado. Esta variação é realizada através de uma válvula de três vias que desvia parte do fluxo de água enviado à serpentina. A temperatura da água fornecida é considerada constante. O posicionamento da válvula é realizado através de um controlador do tipo PI.

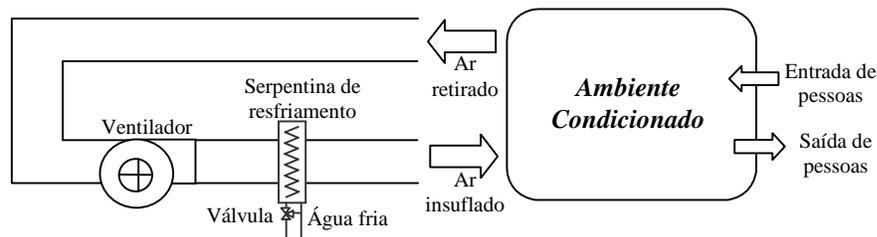


Figura 2 – Sistema de ar condicionado.

Considerou-se o ambiente condicionado como adiabático, tendo como fatores que influenciam na carga térmica o ar insuflado e a presença de pessoas no ambiente.

Obviamente o exemplo é bastante simplificado, uma vez que não considera renovação de ar, trocas de calor através de paredes, infiltração, calor liberado por iluminação e equipamentos, etc. No entanto, a utilização deste exemplo foi adotada pois, como o escopo do presente trabalho é a análise de técnicas para modelagem de sistemas híbridos, a consideração de sistemas mais complexos agregaria pouca informação.

A seguir apresenta-se os modelos do sistema de ar condicionado considerado utilizando-se três das técnicas mais representativas derivadas de redes de Petri para sistemas híbridos.

3.1 Redes de Petri Híbridas

As Redes de Petri Híbridas [Alla & David, 98] foram definidas através da adição, aos lugares e transições discretos (Figura 3 a e c), dos seguintes elementos:

- lugares contínuos: cuja marcação é um número real² (Figura 3 b);
- transições contínuas: as quais são associadas taxas de disparo representando um fluxo contínuo de marcas (Figura 3 d);

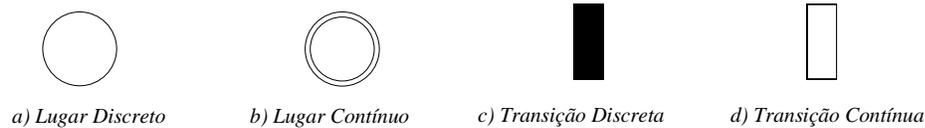


Figura 3 - Elementos da Rede de Petri Híbrida.

Observa-se que a taxa de disparo de uma transição contínua pode ser constante ou ser uma função que utiliza como variáveis a marcação de lugares discretos e contínuos. A Figura 4 ilustra a evolução no tempo (t) da marcação (m_{P_1}) de um lugar contínuo (P_1) conectado a uma transição contínua (T_1).

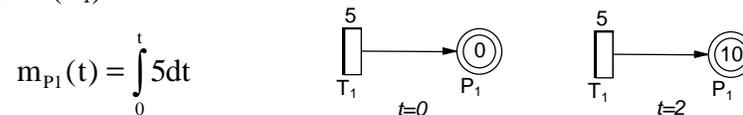


Figura 4 – Evolução no tempo da marcação de um lugar contínuo.

A modelagem do sistema da Figura 2 através das Redes de Petri Híbrida é apresentada a seguir.

Modelo do ventilador (Figura 5): o ventilador pode assumir dois estados discretos: ligado ou desligado. Quando o ventilador é ligado, a vazão de ar que circula pelo sistema de condicionamento do ar (v_{ar}) assume um determinado valor constante (γ). Quando o ventilador é desligado a vazão é zero.

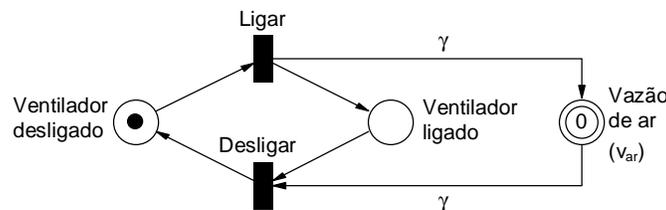


Figura 5 – Modelo em Rede de Petri Híbrida do ventilador.

Modelo da serpentina (Figura 6): a taxa de disparo (\dot{T}_{ar}) da transição contínua é função da temperatura do ar na entrada da serpentina, que é igual a temperatura no ambiente (T_{amb}), da vazão de ar (v_{ar}), da temperatura e da vazão da água fornecida a serpentina ($T_{água}$ e $v_{água}$), consideradas constante, da posição da válvula de três vias (P) e da constante de tempo (τ) do sistema.

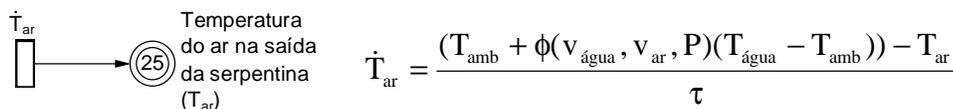


Figura 6 – Modelo em Rede de Petri Híbrida da serpentina.

² Originalmente a marcação do lugar contínuo foi definida como um número real não negativo [Alla & David, 1998], mas diversos autores a redefiniram para número real, de modo a possibilitar a representação de equações diferenciais de primeira ordem, como em [Drath, 1998], e [Demongodin & Koussoulas, 1998].

A função ϕ da expressão de \dot{T}_{ar} é determinada a partir das características da serpentina [Salsbury, 1996], e baseia-se no conceito de condutância global, onde a troca de calor é calculada através do coeficiente global de transferência de calor [Incropera, 1990].

Modelo do controlador PI (Figura 7): como o ventilador, o controlador também pode assumir dois estados discretos (ligado e desligado). Quando desligado o controlador coloca a válvula na posição fechada ($P=0$). Quando aberta a posição da válvula é determinada através da Equação 1, onde K_M , K_P , M_I são as constantes do controlador e λ é a temperatura desejada no ambiente.

$$\begin{aligned}
 P &= K_P * e + K_I * Ie + K_M \\
 e &= (T_{amb} - \lambda) \\
 Ie &= \int (T_{amb} - \lambda).dt
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

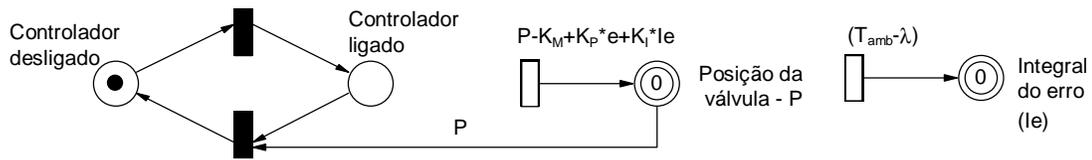


Figura 7 – Modelo em Rede de Petri Híbrida do controlador.

Modelo do ambiente (Figura 8): a evolução da temperatura do ambiente (T_{amb}) no tempo é determinada pela taxa de disparo da transição contínua (\dot{T}_{amb}), apresentada na Equação 2. Esta taxa é calculada a partir do calor introduzido/retirado do ambiente (Q_{total}), em função do número de pessoas (N_P), da carga térmica produzida por uma pessoa (K_P), considerada constante, da vazão e temperatura do ar insuflado pelo sistema de ar condicionado, do volume de ar no ambiente (vol) e da densidade (ρ) e do calor específico do ar a pressão constante (c_p).

$$\dot{T}_{amb} = \frac{Q_{total}}{vol * \rho * c_p} = \frac{(v_{ar} * \rho * c_p * (T_{ar} - T_{amb}) + N_P * C_P)}{vol * \rho * c_p}
 \tag{2}$$

Observa-se que esta expressão considera comportamento de gás perfeito e despreza diferenças de umidade entre o ar insuflado e o ar no ambiente.

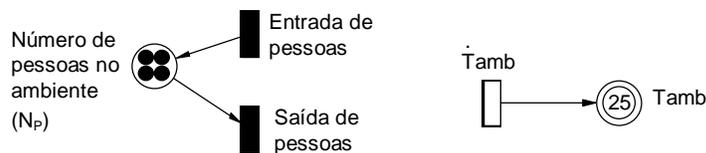


Figura 8 – Modelo em Rede de Petri Híbrida do ambiente.

3.2 Rede de Petri Híbridas de Alto Nível (HyNet)

Esta rede foi desenvolvida a partir de uma classe especial de redes de Petri de alto nível orientada a objetos chamada Thorns (Timed Hierarchical Object-Related Nets) e é definida em [Wieting, 1996].

Nesta rede utilizam-se conceitos de modelagem orientada a objetos [Meyer, 1997]. *Marcas* são “objetos” pertencentes a “classes” elementares ou a “classes” definidas. A linguagem utilizada na definição de objetos e classes é baseada em C++. Por classes

elementares entende-se as classes já definidas em C++, como “int”, “bool”, “char”, entre outras. A definição de uma nova classe é realizada através da definição de seus “atributos” e “métodos”. Os “atributos” são definidos a partir das classes elementares. Os “métodos” são definidos através de operações matemáticas.

Para a modelagem do sistema da Figura 2 são definidas 3 classes:

```

Class Fluxo_de_Ar {float var; float Tar;}
Class Ambiente {int Np; float Tamb;}
Class Controlador {float P;}
    
```

onde as variáveis entre chaves representam os “atributos” da “classe”.

Os elementos presentes na rede são *transições* discretas e contínuas e *lugares*. Aos *lugares* associa-se uma “classe”. A “classe” pode ser uma “classe” elementar (“int”, “char”, etc.) ou um “classe” definida.

Arcos têm um nome de variável a ele associado. O nome é utilizado para referenciar em uma transição os objetos de um lugar. Os arcos podem ser arcos orientados ou arcos contínuos (não orientados). Os arcos contínuos não retiram/adicionam objetos aos lugares, apenas modificam seus atributos.

Às transições são associadas *condições de ativação*, que impõem condições adicionais para o disparo da transição, e *ações de disparo*, que determinam os objetos introduzidos nos lugares de saída a partir dos objetos retirados dos lugares de entrada. Para transições contínuas a *ação de disparo* é constituída por um sistema de equações algébricas diferenciais.

O modelo em Rede de Petri de Alto Nível para o sistema da Figura 2 é apresentado na Figura 9.

As ações de disparo associadas às transições contínuas são:

$$\begin{aligned}
 Ad_1 : \frac{d(x.T_{ar})}{dt} &= \frac{(n.T_{amb} + \phi(v_{\acute{a}gua}, x.v_{ar}, o.P)(T_{\acute{a}gua} - o.T_{amb})) - x.T_{ar}}{\tau} \\
 Ad_2 : l.P &= K_P * (m.T_{amb} - \lambda) + K_I * \int (m.T_{amb} - \lambda).dt + K_M \\
 Ad_3 : \frac{d(c.T_{amb})}{dt} &= \frac{(a.v_{ar} * \rho * c_p (a.T_{ar} - c.T_{amb}) + c.N_P * C_P)}{vol * \rho * c_p}
 \end{aligned}$$

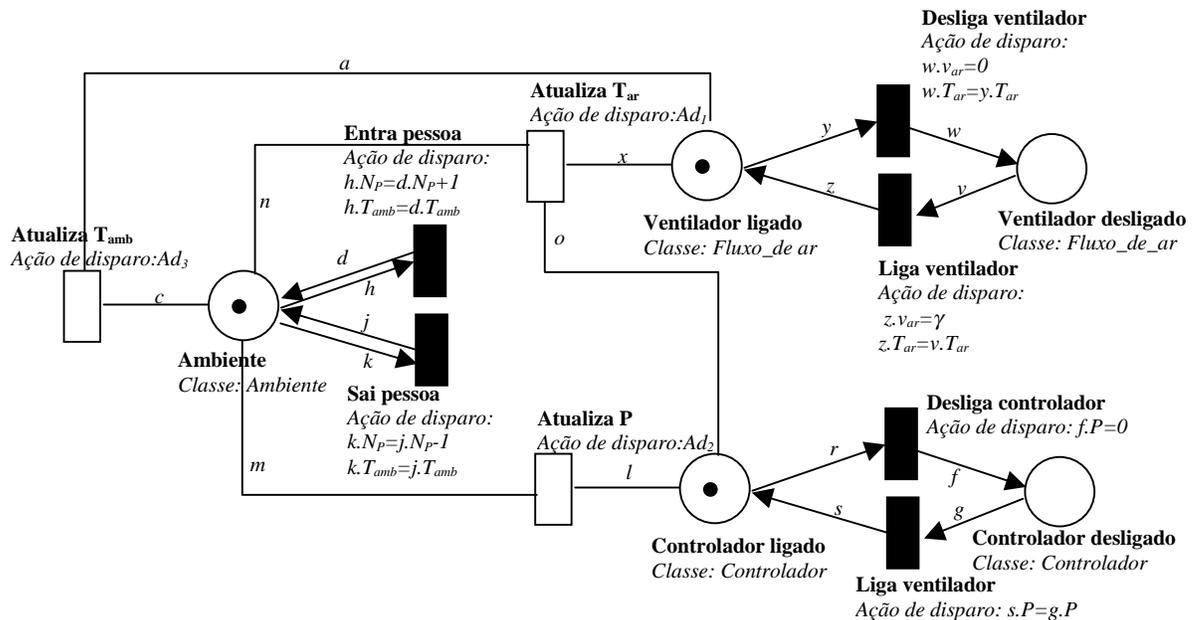


Figura 9 – Modelo em Rede de Petri de Alto Nível.

3.3 Rede de Petri Predicado/Transição Diferenciais (rede PTD)

Nas redes PTD os *lugares* representam configurações do sistema. A cada rede associa-se um vetor (V) com as variáveis contínuas a serem modeladas. A cada *lugar* (P_X) é associado um sistema de equações diferenciais (S_{P_X}) para a evolução das variáveis contínuas no tempo quando o sistema está naquela configuração. Quando um *lugar* está marcado o sistema de equações a ele associado determina a evolução no tempo das variáveis contínuas. Através do *disparo* das *transições* chaveia-se os sistemas de equações [Champagnat, 1998].

A Figura 10 apresenta um modelo em rede PTD do sistema da Figura 2.

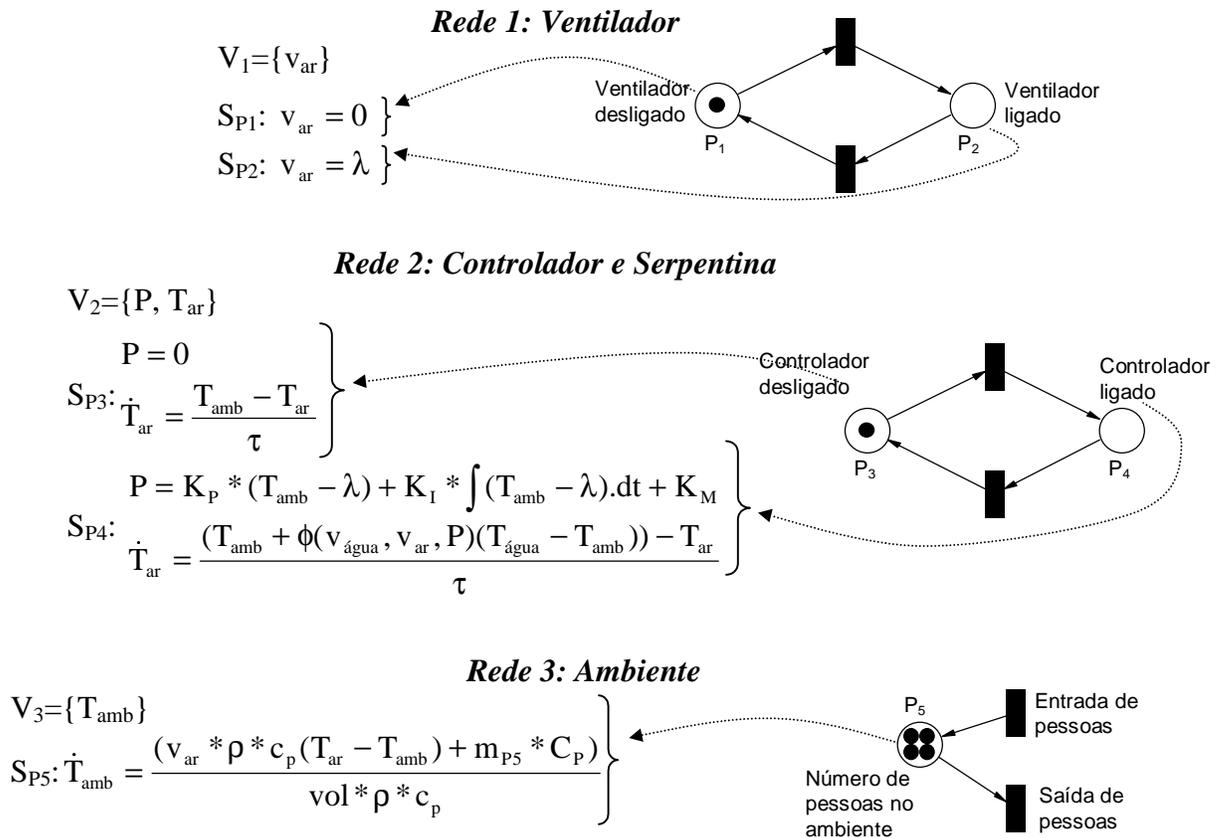


Figura 10 – Modelo em rede PTD.

4. ANÁLISE DAS TÉCNICAS DERIVADAS DE REDES DE PETRI

Para os três casos apresentados, observa-se que o modelo do sistema de ar condicionado é construído a partir da modelagem matemática da relação entre as diversas variáveis. Entretanto, no caso da Rede de Petri Híbrida, a representação da equação na forma de um par transição-lugar restringe o tipo de equação a ser representado para equações diferenciais de primeira ordem, e acrescenta pouca ou nenhuma informação ao modelo. Em contrapartida a rede PTD e a HyNet podem ser utilizadas para modelagem de sistemas mais complexos, uma vez que não existe a necessidade de transformar equações em elementos da rede, buscando-se apenas associar as equações aos elementos.

Quanto a estrutura da rede resultante, para a rede de Petri Híbrida e para a rede PTD a ligação entre as diversas sub-redes é realizada através das variáveis, por exemplo, a variável v_{ar} determinada no modelo do ventilador (Figura 5) é utilizada no modelo do ambiente (Figura

8). Esta característica faz com que esta relação entre os modelos não esteja explícita na estrutura da rede. Na HyNet esta relação fica explícita através dos arcos contínuos, como por exemplo os arcos “a”, “m”, “n” e “o” da Figura 9.

Quanto à construção do modelo híbrido, a rede PTD é aquela que apresenta maior facilidade de construção a partir da modelagem matemática. No caso da Hynet, a sua utilização, simulação e interpretação gráfica não é trivial, uma vez que o estado do sistema é representado por “atributos” das *marcas* e não está explícito no estado da rede.

A Rede de Petri Híbrida apresenta vantagens principalmente para a modelagem de sistemas onde deseja-se representar um fluxo contínuo de material, modelados através de transições contínuas, que é armazenado em pontos de sistema (ex.: tanques), modelados através de lugares contínuos. Neste caso a construção da rede híbrida é realizada principalmente a partir da observação do sistema e o modelo obtido tem um forte relacionamento físico com a estrutura do sistema, conservando a característica das Redes de Petri de ser uma descrição gráfica efetiva para análise e simulação. No entanto, de acordo com o apresentado anteriormente, este não é o caso do sistema de ar condicionado.

Quanto a utilização do conceito de orientação a objetos, observa-se que este auxilia na especificação de sistemas complexos. Em especial, para o caso do ar condicionado a adição de uma nova zona, de um novo “chiller”, etc. é simplificada pelo “instanciamento” de objetos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho abordou o problema de modelagem do sistema de ar condicionado considerando-o como um sistema híbrido. Esta abordagem é baseada na necessidade de representação de eventos e estados discretos e de variáveis contínuas, de forma a possibilitar a integração do sistema de ar condicionado com outros sistemas do edifício.

São apresentadas e comparadas diferentes técnicas para representação de sistemas híbridos, aplicando-as para modelagem de um exemplo de sistema de ar condicionado. De uma forma genérica observa-se que as ferramentas definidas a partir da especificação de uma interface entre a ferramenta de modelagem discreta (ex. Redes de Petri) e a ferramenta de modelagem contínua (ex. equações diferenciais) apresentam maior flexibilidade para utilização. Comparando as três redes apresentadas para o caso específico de modelagem de sistemas de ar condicionado, considerou-se a rede PTD como a mais adequada, devido a sua maior flexibilidade e maior facilidade de construção do modelo.

Os modelos aqui apresentados são uma simplificação dos modelos desenvolvidos para o Prédio dos Ambulatórios (PAMB) do Hospital das Clínicas, da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo (HC – FMUSP). O PAMB inclui ambulatórios, centro cirúrgico, farmácia industrial, entre outras instalações, em cerca de 10.000m² de área construída. O seu sistema de ar condicionado apresenta possibilidade de aquecimento e resfriamento. As diversas zonas nas quais o PAMB é dividido apresentam diferentes características quanto ao tipo de carga térmica e as exigências de condicionamento.

Atualmente, seu sistema de controle de ar condicionado atua de forma pouco eficaz, devido à ausência de um sistema de controle que interaja com os demais sistemas do edifício. A proposta de uma solução para este problema baseia-se fundamentalmente em desenvolver módulos que possibilitem a interação dos diversos sistemas entre si.

Para a integração do sistema, estão sendo desenvolvidos modelos em redes de Petri dos diversos sistemas do edifício. Estes modelos são então integrados entre si através do BMS. Em particular, para o ar condicionado é desenvolvido um sistema de gerenciamento discreto que é responsável por chavear estratégias de controle e modificar o estado de equipamentos em função, entre outras coisas, de eventos ocorridos em outros sistemas. O modelo deste

sistema é desenvolvido em redes de Petri e interage diretamente com os modelos híbridos do sistema de ar condicionado através de arcos habilitadores e inibidores.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Grupo de Administração dos Sistemas de Saúde da FSP-USP e a Superintendência do HC-FMUSP, que auxiliam no desenvolvimento desta pesquisa. Agradecemos também o apoio das seguintes entidades: FAPESP, CYTED, CNPq e CAPES.

7. REFERÊNCIAS

- Alla, H. & David, R., 1998, "Continuous and Hybrid Petri Nets" *Journal of Circuits, Systems and Computers*, vol.8, n.1
- Antsaklis, P. J. & Nerode, A., 1998, "Hybrid Control Systems" *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol 43, n.4, pp 457-459.
- Arkin, H. & Paciuk, M., 1995, "Service Systems Integration in Intelligent Buildings "; In: *Proceedings of IB/IC Intelligent Buildings Congress*, pp 19-30, Telaviv, Israel.
- Becker, R., 1995, "What is an "Intelligent Building"; In: *Proceedings of IB/IC Intelligent Buildings Congress*", pp 320, Telaviv, Israel.
- Champagnat, R., 1998, "Supervision des Systèmes Discontinus: Definition d'un Modèle Hybride et Pilotage en Temps-réel" PhD Thesis, Univ. Paul Sabatier, Toulouse, France.
- Demongodin, I. & Koussoulas, N. T., 1998, " Differential Petri Nets: Representing Continuous Systems in a Discrete-Event World". *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 43, n.4, pp 573-579.
- Drath, R., 1998, "Hybrid Object Nets: An Object Oriented Concept for Modelling Complex Hybrid Systems" *ADMP'98 3rd International Conference on Automation of Mixed Processes*, Reims, France.
- Fanger, P. O., 1970, "Thermal Confort" McGraw-Hill, New York, USA.
- Flax, B. M., 1991, "Intelligent Buildings"; In: *IEEE Communications Magazine*, pp 24-26, vol. 29 n. 4.
- Fujie, S. & Mikami, Y., 1991, "Construction Aspects of Intelligent Buildings"; In: *IEEE Communications Magazine*, pp 50-57, vol. 29 n. 4.
- Ho, Y. C., 1987, "Basic research, manufacturing automation, and putting the cart before the horse". *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol.AC-32, n.12, pp.1042-1043.
- Incropera, F. P., 1990, "Fundamentals of heat and mass transfer", Wiley, New York.
- Jabardo, J. M. S., 1984, "Conforto Térmico das Habitações", Eternit/IPT, São Paulo, SP.
- Lemmon, M. D., He, K. X. & Markovsky, I., 1999, "Supervisory Hybrid Systems", *IEEE Control System*, vol.8 n.1, pp 42-55.
- Meyer, B., 1997, "Object-oriented software construction", Prentice Hall, New York, USA.
- Miyagi, P.E., 1996, "Controle Programável - fundamentos do controle de sistemas a eventos discretos" Editora Edgard Blücher Ltda, S. Paulo, SP.
- Salsbury, T. I., 1996, "Fault Detection and Diagnosis in HVAC Systems using Analytical Models", PhD Thesis, Dep. of Civil and Building Engineering, Loughborough University, Loughbrough, England.
- Wieting, R., 1996, "Hybrid High-Level Nets" *Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference*, Coronado.