

# METODOLOGIA PARA A MODELAGEM DE SISTEMAS DE ELEVADORES EM EDIFÍCIOS INTELIGENTES

**Gladys Bastidas Gustin**  
**Paulo Eigi Miyagi**  
**Diolino Dos Santos Filho**

Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Dinâmicos, 05508-900 São Paulo, SP, Brasil. E-mail: [gladysbg@usp.br](mailto:gladysbg@usp.br)

## Resumo

O sistema de elevadores é um recurso fundamental para o transporte vertical de pessoas e bens e, constitui um componente imprescindível dos edifícios inteligentes. Neste contexto, sua integração com outros sistemas prediais, sua disponibilidade e a eficiência do seu serviço, devem ser objetos de cuidadosa análise em função de sua influência no desempenho e produtividade de todo o edifício e das atividades dos usuários do mesmo. Considerando estes aspectos e o fato destes sistemas terem um comportamento dinâmico definido principalmente pela ocorrência de eventos discretos, o presente trabalho introduz uma metodologia para a modelagem destes sistemas baseada em redes de Petri interpretadas.

**Palavras-chave:** Redes de Petri, Edifícios inteligentes, Sistemas de elevadores, Modelagem de sistemas a eventos discretos.

## 1. INTRODUÇÃO

As demandas atuais de maior eficiência, produtividade e segurança, têm-se convertido em considerações cada vez mais relevantes no projeto de sistemas. Neste contexto, observa-se que para o caso específico dos edifícios inteligentes, novas metodologias estão sendo desenvolvidas no sentido de considerar peculiaridades relacionadas à funcionalidade que se deseja associar ao edifício. De acordo com estas abordagens, o comportamento e interação dos usuários que utilizam um determinado edifício devem ser considerados, permitindo incrementar a produtividade destes neste ambiente, uma vez que o prédio estaria assim, mais apto a atender às suas necessidades (Finley et al., 1991).

Nos projetos mais recentes para construção de edifícios inteligentes procura-se a instalação de sistemas automatizados, cuja função é a realização autônoma e integrada das diversas funções e serviços existentes em seus ambientes. A maior parte destes sistemas possuem como característica um comportamento dinâmico definido através das mudanças de estados devido à ocorrência de eventos discretos. A classe de sistemas definida por esse comportamento é denominada Sistemas a Eventos Discretos – SED (Ramadge & Wonham, 1989) para os quais têm sido desenvolvidas várias técnicas (Redes de Petri, Cadeias de Markov, Teoria de filas, Álgebra mini-max, Máquinas de estados, etc.) para sua modelagem, análise, controle e projeto. Entre estas técnicas uma de comprovada eficiência para sistemas desta natureza é a baseada na teoria de redes de Petri (Peterson, 1981). Os principais sistemas onde esta técnica é aplicada são: sistemas de comunicações, sistemas de software, sistemas de

manufatura e mais recentemente nos sistemas prediais (Gomes, 1997). Esta técnica consiste em utilizar as redes de Petri e suas extensões, para a modelagem gráfica da estrutura do sistema e do seu comportamento dinâmico. Entretanto, na modelagem de sistemas complexos e com diferentes níveis hierárquicos se evidencia um detrimento em uma de suas principais características: sua visualização gráfica. Assim é adequado considerar que a modelagem seja realizada usando interpretações não formais, seguida de procedimentos de detalhamento gradativo e com interpretações formais. É neste contexto que as técnicas do PFS (*Production Flow Schema*) e do MFG (*Mark Flow Graph*) (Miyagi, 1996) foram desenvolvidas. O PFS e o MFG são extensões interpretadas das redes de Petri, próprias para aplicação em diferentes níveis de modelagem, análise e controle de SED. Este procedimento é denominado metodologia PFS/MFG.

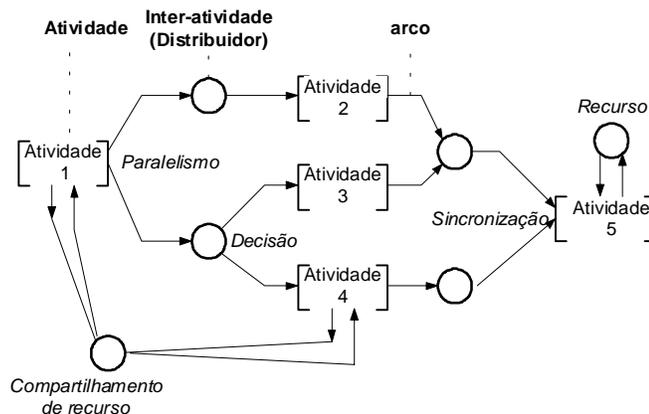
Assim, o objetivo deste trabalho é introduzir uma metodologia de modelagem de sistemas de elevadores em edifícios inteligentes, mediante o uso do PFS/MFG, que considere a integração deste com outros sistemas prediais, e sirva de auxílio para o projeto destes sistemas.

## 2. REDES DE PETRI

### 2.1 Metodologia PFS/MFG

A metodologia PFS/MFG consiste num procedimento sistemático e racional baseado na interpretação da abordagem hierárquica de redes de Petri. Inicialmente o modelo conceitual (representando um alto nível de abstração do sistema e sem consideração de sua dinâmica) do sistema é desenvolvido através do PFS. Nesta etapa o propósito é modelar as principais características das funções que serão consideradas no sistema, isto é, a ênfase está na identificação dos componentes ativos e passivos do sistema, assim como do fluxo de itens (pessoas, material e/ou informação) entre estes elementos. Para a modelagem do comportamento dinâmico do sistema, o modelo em PFS é convertido progressivamente em um modelo em MFG, isto é, uma classe de rede de Petri interpretada que detalha a dinâmica das diversas partes do sistema (Miyagi, 1996).

Os elementos estruturais de um PFS estão representados na fig. 1. São eles: a) *atividade* que representa os componentes ativos; b) *Inter-atividade ou distribuidor* que representa os componentes passivos e c) *arco orientado* que indica a relação lógica entre os componentes do sistema. O PFS não possui o conceito de marcação.

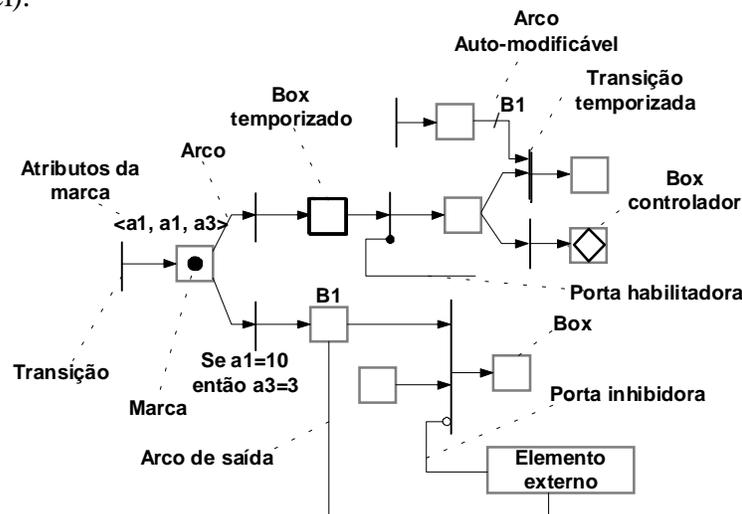


**Figura 1.** Exemplo de um modelo em PFS com a identificação de seus elementos estruturais e algumas das características de SEDs que é capaz de modelar.

Para a descrição funcional (da dinâmica) do sistema, os elementos do grafo PFS são então detalhados. Este detalhamento pode gerar sub-grafos totalmente em PFS ou sub-grafos híbridos (PFS/MFG) com alguns elementos em PFS e outros em MFG ou, sub-grafos inteiramente em MFG. Os elementos estruturais do MFG (ilustrados na fig. 2) são: a) *marcas*: que indicam a manutenção de condições; b) *boxes*: que representam condições (pré e pós-condições) que podem estar associadas ao modo de operação ou à disponibilidade de um recurso do sistema. Estes são chamados *boxes temporizados* quando consideram um intervalo de tempo de manutenção de marcas em seu interior; c) *transições*: correspondem a um evento que causa a mudança de estado do sistema. Estas podem ter inscrições que representam regras adicionais de disparo. Quando nesta é considerado o decorrer do tempo, a transição é chamada de *transição temporizada*; d) *arcos*: os quais estabelecem relações causais entre os eventos e as condições ou vice-versa; f). *portas*: que habilitam ou inibem a ocorrência dos eventos correspondentes as transições, sendo denominadas *habilitadoras* ou *inibidoras* segundo seja o caso; g) *arco de sinal de saída*: permitem a representação explícita da interação do grafo com elementos externos do modelo. Destaca-se que no MFG, é usado o conceito de marcação (distribuição dinâmica das *marcas*), e é através deste que se reflete a dinâmica dos estados do sistema.

Além disso, o MFG apresenta extensões que incrementam o seu poder de modelagem e adicionam novos elementos a este, algumas destas extensões são: o E-MFG (Santos, 1993) que possui uma hierarquia no processo de disparo das *transições*, e é composto por a) *marcas com atributos*; b) *boxes controladores*: os quais executam atribuições de valores aos atributos de uma marca; c) *regras de produção nas transições* e d) *filtros dos atributos nos arcos* e o MFG auto-modificável (Gustin, 1999) que permite alterar dinamicamente a estrutura do modelo em função do estado atual do sistema, através do uso de *arcos auto-modificáveis* cujos pesos, dependem da marcação em lugares específicos definidos previamente (vide fig. 2).

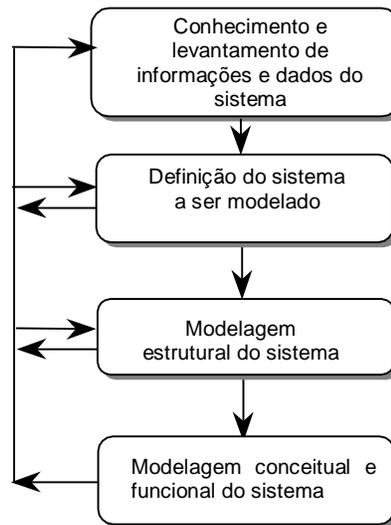
Esta metodologia permite assim que, através de uma visão macro (genérica) e conceitual do sistema, os diferentes sub-sistemas e suas funções sejam detalhados até o nível de interface com os dispositivos físicos instalados no edifício. Este nível de detalhe facilita o controle (nível de hardware e conexões) do sistema e explicita sua implementação computacional (controle programável).



**Figura 2.** Exemplo de um modelo em MFG e algumas das suas extensões com a identificação de seus elementos estruturais.

### 3. METODOLOGIA DE MODELAGEM

A metodologia para a modelagem de sistemas de elevadores pode ser dividida nas etapas gerais ilustradas na fig. 3. Em cada etapa é considerada a avaliação da mesma e o retorno a uma etapa anterior de ser necessário.



**Figura 3.** Metodologia para a modelagem de sistemas de elevadores em edifícios inteligentes.

#### *Etapa 1: Conhecimento e levantamento de informações e dados do sistema*

Esta etapa tem como finalidade identificar as características do sistema que permitam a sua definição. Aqui devem considerar-se os requisitos e funções necessárias do sistema.

Nesta etapa procura-se conhecer o sistema de elevadores, através do levantamento de informações (tanto do edifício, como do sistema propriamente dito), para realizar uma análise preliminar e identificar os dados relevantes ao sistema, pertinentes para a modelagem do mesmo e que permitam caracterizar quantitativamente os elementos deste, tanto para o caso de um edifício existente ou para um em fase de projeto.

#### *Etapa 2: Definição do sistema a ser modelado*

Nesta etapa, as informações levantadas são analisadas e avalia-se a validade e viabilidade técnica do atendimento das necessidades, considerando as normas relacionadas com os sistemas de elevadores e o tipo e função do prédio onde são instalados, além da tecnologia disponível, para se ter uma definição precisa do que é requerido.

Estas considerações permitem também que nesta etapa, sejam definidas as estratégias de controle a serem implementadas no sistema.

#### *Etapa 3: Modelagem estrutural do sistema*

Esta etapa consiste no desenvolvimento do modelo estrutural do sistema de elevadores, onde são identificadas as partes que o compõem, considerando-o dentro do contexto dos edifícios inteligentes e levando em conta a arquitetura de controle adotada para o sistema.

Nesta etapa o sistema é abordado de forma bipartida, dado que este pode ser representado mediante a inter-conexão de dois subsistemas fundamentais que se comunicam cooperativamente, estes subsistemas representam a parte operativa relacionada ao objeto de controle (cabins dos elevadores) e a parte de controle relacionada ao sistema de controle.

Esta decomposição permite tratar mais adequadamente a complexidade do sistema de elevadores para a construção do modelo global do sistema.

#### *Etapa 4: Modelagem conceitual e funcional do sistema*

Nesta etapa a modelagem de cada um dos elementos do modelo estrutural do sistema é realizada de forma sistemática e hierárquica. Inicialmente, aborda-se a modelagem conceitual

para então através de um refinamento do mesmo, obter seu modelo funcional. Assim, primeiramente aborda-se o sistema em um nível de abstração que não considera o seu comportamento dinâmico e, posteriormente realiza-se o detalhamento dos modelos.

Para esta etapa é adotada como ferramenta a metodologia PFS/MFG, pelas suas características e eficiência no desenvolvimento de modelos.

## 4. ESTUDO DE CASO

### 4.1 Prédio dos ambulatórios (PAMB-HC)

O estudo de caso considerado neste trabalho refere-se à modelagem do sistema de elevadores do prédio dos ambulatórios (PAMB) do Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo (HC-FMUSP). Este é formado por 6 institutos (Central, Coração, Pediatria, Ortopedia, Psiquiatria e Medicina Nuclear) e mais 6 hospitais auxiliares. O prédio do PAMB faz parte do Instituto Central.

A seguir é apresentada a modelagem do sistema de elevadores do PAMB, resultante da aplicação da metodologia descrita.

#### *Etapa 1: Conhecimento e levantamento de informações e dados do sistema*

Inicialmente foi identificada a função do sistema de elevadores dentro do PAMB: possibilitar o transporte vertical de pacientes, visitantes, funcionários da área de saúde e funcionários em geral, além evidentemente de equipamentos e outras cargas móveis.

Algumas das informações levantadas foram:

- O edifício do PAMB possui uma área construída de cerca de 116.000 m<sup>2</sup> e, é composto por 11 andares e mais 7 andares técnicos (interandares).

- O PAMB conta com 12 elevadores de uso geral (5 grupos) e 2 elevadores para manutenção, distribuídos em quatro blocos de circulação (A, B, C, D)

#### *Etapa 2: Definição do sistema a ser modelado*

Segundo a norma brasileira para este tipo de edifícios (hospitais), deve-se ter em conta entre outras as seguintes especificações:

- Os elevadores de pacientes servindo a mais de quatro andares devem ter comando automático coletivo.

- Deve existir pelo menos, um elevador adaptável para as manobras do corpo de bombeiros.

- O sistema de elevadores deverá contar com estratégias adequadas em caso de incêndio e falta de energia.

A análise das informações levantadas do sistema e, a consideração das normas que existem para hospitais, resultaram na especificação e descrição da seqüência de eventos requerida para cada uma das seguintes estratégias (detalhes das estratégias podem ser encontrados em (Barney, 1985; Elevator world, 1990)) de funcionamento e integração do sistema de elevadores com outros sistemas prediais:

Estratégia duplex/triplex (de atendimento aos usuários);

Estratégia para tráfego de pico de subida (de atendimento aos usuários);

Estratégia para tráfego de pico de descida (de atendimento aos usuários);

Estratégia em caso de incêndio;

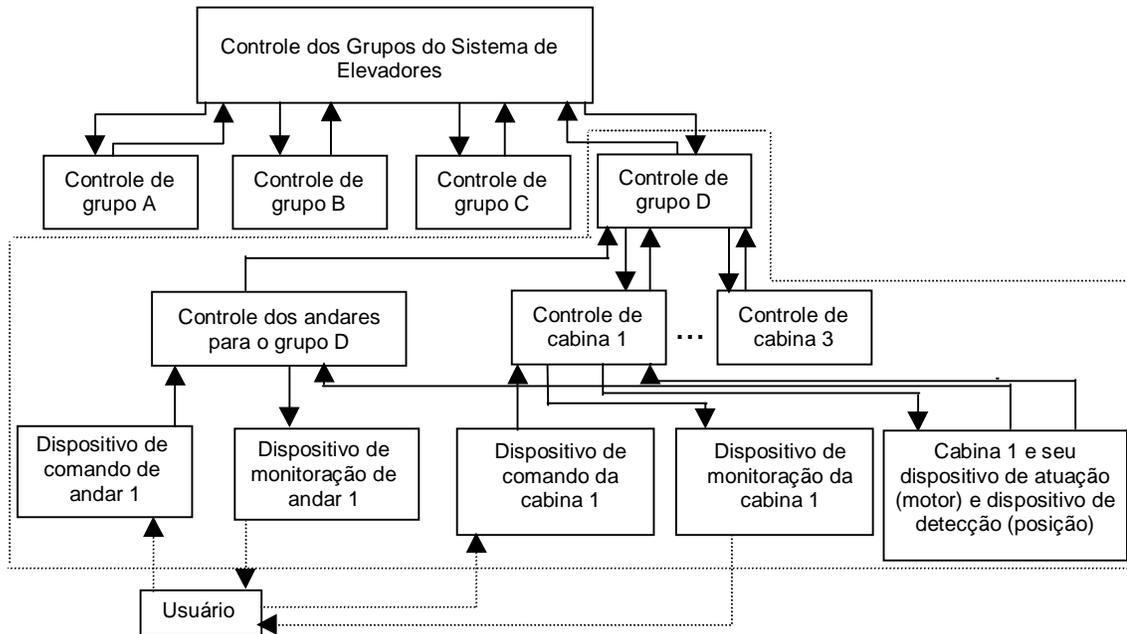
Estratégia em caso de falta de energia;

Estratégia para manutenção preventiva;

Estratégia em caso de falha.

#### *Etapa 3: Modelagem estrutural do sistema*

O modelo estrutural do PAMB é apresentado na fig. 4. Nele são identificados (linha tracejada) tanto os elementos que pertencem a um grupo (grupo D) como as partes que correspondem a cada cabina (cabina 1) do grupo (relacionados com os blocos de circulação A,B,C e D).



**Figura 4.** Modelo estrutural do sistema de elevadores do PAMB.

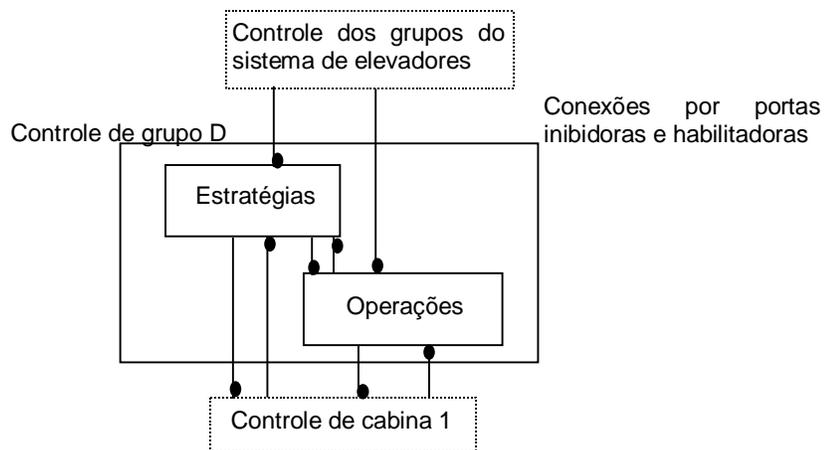
*Etapa 4: Modelagem conceitual e funcional do sistema de elevadores*

Os modelos conceitual e funcional do sistema de elevadores do PAMB são desenvolvidos de acordo com as informações e a definição do sistema e segundo o modelo estrutural. Assim a modelagem conceitual considera cada um dos elementos estruturais do sistema em uma abordagem *top - down*. Esta modelagem é realizada usando o PFS e o MFG e suas extensões.

Considerando a complexidade do modelo completo do sistema de elevadores do PAMB, devido ao número de elevadores e andares envolvidos e, com a finalidade de exemplificar modelos mais compactos e de fácil entendimento, serão apresentados aqui apenas alguns dos modelos mais gerais e representativos do sistema.

*- Modelagem do controle de grupo*

Neste nível são consideradas duas partes: as estratégias a serem executadas pelo grupo, e as operações sobre os controles de cabina. (vide fig. 5).

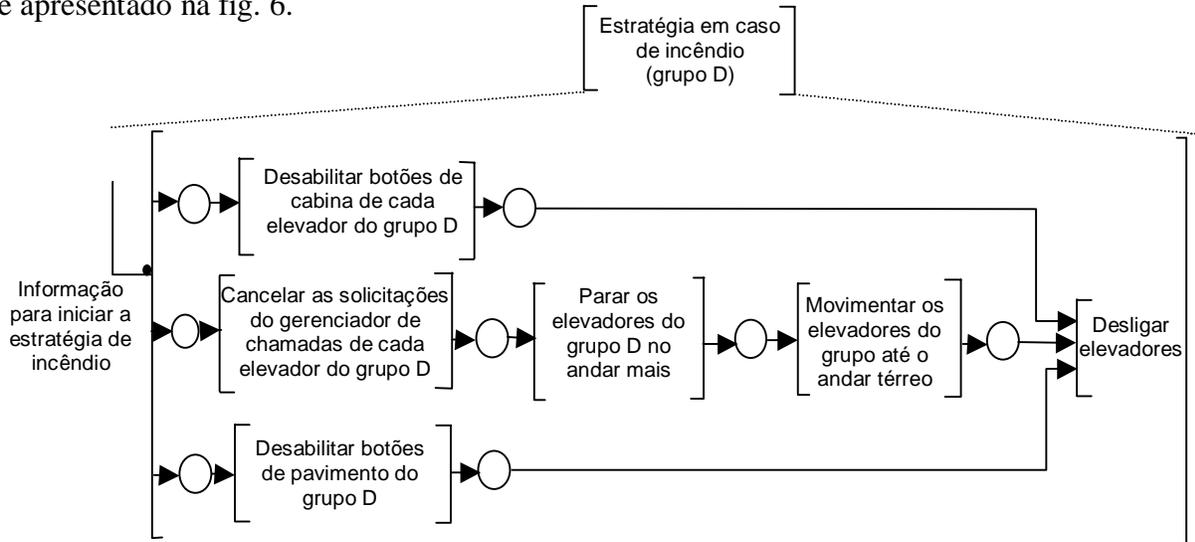


**Figura 5.** Esquema das atividades realizadas pelo controle de grupo D.

Um modelo desta parte é apresentado a seguir:

*Modelagem das estratégias*

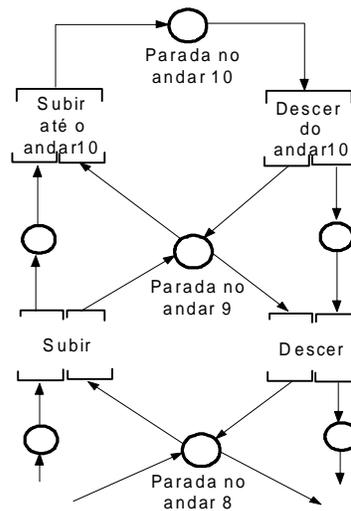
Um exemplo da modelagem das estratégias correspondente à estratégia em caso de incêndio, é apresentado na fig. 6.



**Figura 6.** Modelo em PFS da estratégia em caso de incêndio para o grupo D.

*- Modelagem do objeto de controle (cabina e dispositivo de atuação)*

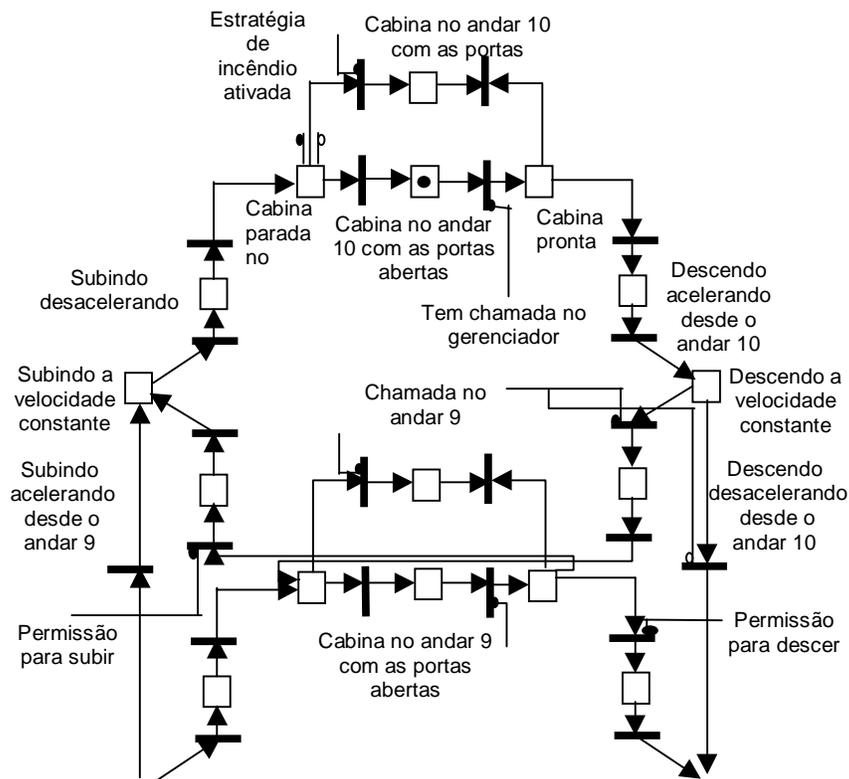
No nível do objeto de controle, são identificadas duas *atividades* básicas para cada elevador: [subir], [descer] e um elemento *inter-atividade* que representa a parada nos andares (vide fig. 7).



**Figura 7.** Modelo em MFG do objeto de controle (cabina 1).

A partir do modelo conceitual em PFS desenvolve-se um modelo MFG através de refinamentos das atividades consideradas. Este modelo é apresentado na fig. 8.

Como ilustrado nos modelos apresentados o detalhamento sucessivo das atividades permite a construção do modelo completo do sistema, ao explicitar as interações entre os diferentes dispositivos dos sistemas, e identificar os sinais de controle do sistema e os parâmetros de entrada/saída da programação. Desta forma a presente abordagem confirma ser efetiva para o projeto de integração dos sistemas de elevadores com outros sistemas prediais.



**Figura 8.** Modelo em MFG do objeto de controle (cabina 1).

## 5. CONCLUSÕES

No trabalho foi proposta uma metodologia para a modelagem de sistemas de elevadores através do uso das redes de Petri e suas extensões, mediante a utilização da metodologia PFS/MFG, visando o apoio ao projeto destes sistemas em edifícios inteligentes. Para demonstrar a efetividade da metodologia, foi considerado como estudo de caso um prédio hospitalar (PAMB), no qual a modelagem resultou satisfatória ao permitir o estudo da dinâmica e a integração do sistema de elevadores com outros sistemas prediais, a geração da especificação funcional de todo o sistema (objeto e controle e sistema de controle) e explicitar as interações entre os diferentes dispositivos deste.

A metodologia PFS/MFG também confirmou através da especificação do modelo funcional do sistema, ser efetiva para definir as funções de controle para o projeto de controladores programáveis, facilitando desta forma a implementação do controle, além da integração com outros sistemas.

## Agradecimentos

Os autores agradecem as entidades que auxiliam diferentes partes desta pesquisa: HC-FMUSP, FSP-USP, CNPq e FAPESP.

## 6. REFERÊNCIAS

- Barney, G. C; Dos Santos, S. M., 1985, Elevator Traffic Analysis, Design and Control. Ellis Horwood Limited, Chichester.

- ELEVATOR WORLD, 1990, *Educational Package and Reference Library*, v. 1, Mobile, Editor Elevator World Educational Division.
- Finley, M.R.; Karakura, A.; Nbogni, R, 1991, Survey of intelligent buildings concepts, *IEEE Communications Magazine*, vol 29, n. 4, pp. 18-23.
- Gomes, L.F., 1997, Redes de Petri reactivas e hierárquicas - integração de formalismos no projecto de sistemas reactivos de tempo-real, Tese de Doutorado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Gustin, G. B., 1999, Aplicação de redes de Petri interpretadas na modelagem de sistemas de elevadores em edifícios inteligentes. *Dissertação de mestrado*, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Miyagi, P.E., 1996, Controle Programável, Editora Edgard Blücher, São Paulo.
- Peterson, J.L., 1981, Petri Net Theory and The Modeling of Systems, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Ramadge, P.J. & Wonham, W.M.,1989, The control of discrete event systems, *Proceedings of the IEEE*, vol.77, n. 1.
- Santos, D., 1993, Proposta do Mark Flow Graph estendido para a modelagem e controle de sistemas integrados de manufatura. *Dissertação de mestrado*, Universidade de São Paulo, São Paulo.