

ANDRE FELIPE MOREIRA MONTEZANO

**MODELO EM REDE DE PETRI DE UM SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE
ELEVADOR DE PASSAGEIROS**

Rio de Janeiro

2009

MODELO EM REDE DE PETRI DE UM SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE ELEVADOR DE PASSAGEIROS

Andre Felipe Moreira Montezano

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Marcos Vicente de Brito Moreira, D. Sc.
(Orientador)

João Carlos dos Santos Basílio, D. Phil.

Richard Magdalena Stephan, Dr.Ing.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
AGOSTO DE 2009

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à minha mãe Rogéria que sempre apoiou minhas realizações e tem sido paciente comigo nesses 27 anos, principalmente os últimos da faculdade. Dedico aos meus irmãos Bruno e Gustavo pelo convívio e estímulo, e a meu pai Roberto que sempre investiu nos meus estudos.

Faço menção especial ao meu tio Ary que foi meu coach, me ajudando a desenvolver disciplina e me impulsionando para o término desse trabalho. Agradeço também o apoio de minha companheira Bianca que nas etapas finais me incentivou a seguir firme na conclusão desse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiro de tudo, agradeço a minha família, principalmente aos meus pais que me trouxeram ao mundo, suprimindo minhas necessidades, me dando amor e carinho e me orientando sobre o certo e errado. Agradeço também aos meus amigos do colégio, da faculdade e da vida pelo convívio e experiências felizes.

Agradeço à UFRJ por me proporcionar essa oportunidade de aprendizado e qualificação profissional e aos professores do DEE que contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

RESUMO

Andre Felipe M. Montezano

UFRJ - DEE

Projeto de Graduação

Agosto 2009

MODELO EM REDE DE PETRI DE UM SISTEMA DE AUTOMAÇÃO DE ELEVADOR DE PASSAGEIROS

Este trabalho apresenta o modelo em rede de Petri interpretada para controle do sistema de elevador de passageiros, para um edifício residencial com quatro (T, 1º, 2º e 3º) pavimentos no modo normal de operação. Para elaboração desse modelo são apresentados os fundamentos básicos da teoria de sistemas, em que é definido o conceito de sistema a eventos discretos, que é o tipo de sistema modelado por redes de Petri, no qual o sistema de elevadores está inserido.

Nos fundamentos de redes de Petri são introduzidos os conceitos dos seus elementos básicos (lugares, transições, arcos ordinários e fichas) e a dinâmica da transição de estados. As redes de Petri possuem variações que agregam simplificações e novas funcionalidades ao modelo original, e estão classificadas como abreviadas e estendidas. Entre elas se encontram as redes de Petri com arco inibidor, com arco habilitador, temporizadas e sincronizadas, estas são brevemente descritas e suas funcionalidades são adicionadas ao modelo de redes de Petri interpretadas para controle de David e Alla [1] modificado, que será utilizada para a modelagem do controle supervisão do elevador de passageiros.

São abordados os fundamentos e principais componentes de elevador de passageiros para entendimento de sua dinâmica em operação normal, que são modelados pela rede de Petri interpretada para controle modificada. A estruturação da rede de Petri foi feita utilizando o método de composição modular. O modelo final em rede de Petri apresenta o comportamento do sistema controlado o que facilita seu entendimento e futuras alterações.

ÍNDICE

<u>DEDICATÓRIA</u>	II
<u>AGRADECIMENTOS</u>	II
<u>RESUMO</u>	III
<u>ÍNDICE</u>	IV
<u>LISTA DE FIGURAS</u>	VII
<u>LISTA DE TABELAS</u>	IX
<u>1 INTRODUÇÃO</u>	1
<u>2 FUNDAMENTOS BÁSICOS DA TEORIA DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS</u>	2
<u>2.1 Definição de sistemas</u>	2
<u>2.2 Classificação de sistemas</u>	2
2.2.1 <u>Sistemas estáticos e dinâmicos</u>	3
2.2.2 <u>Sistemas dinâmicos variantes e invariantes no tempo</u>	3
2.2.3 <u>Sistemas lineares e não-lineares</u>	3
2.2.4 <u>Sistema com espaço de estados contínuo e espaço de estados discreto</u>	3
2.2.5 <u>Sistemas determinísticos e estocásticos</u>	4
2.2.6 <u>Sistemas dirigidos pelo tempo e dirigidos por eventos</u>	4
<u>2.3 Definição de sistemas a eventos discretos</u>	4
<u>2.4 Monitoramento e controle de sistemas complexos</u>	5
<u>2.5 Considerações finais</u>	6
<u>3 REDES DE PETRI</u>	7
<u>3.1 Fundamentos de redes de Petri</u>	7
3.1.1 <u>Marcação de redes de Petri</u>	8
3.1.2 <u>Dinâmica de redes de Petri</u>	9
3.1.3 <u>Interpretações de transições e lugares</u>	10
<u>3.2 Classificação das redes de Petri</u>	11
<u>3.3 Variações dos tipos de arcos das redes de Petri</u>	11
3.3.1 <u>Redes de Petri com arco inibidor</u>	12
3.3.2 <u>Redes de Petri com arco habilitador ou de teste</u>	13
3.3.3 <u>Resumo dos tipos de arcos encontrados em redes de Petri</u>	14
<u>3.4 Redes de Petri temporizadas</u>	14
3.4.1 <u>Redes de Petri p-temporizada</u>	14
3.4.2 <u>Redes de Petri t-temporizada</u>	15
<u>3.5 Redes de Petri sincronizadas</u>	16
3.5.1 <u>Princípios da rede de Petri sincronizada</u>	16
<u>3.6 Considerações finais</u>	17
<u>4 REDES DE PETRI INTERPRETADAS PARA CONTROLE</u>	18
<u>4.1 Modelo de redes de Petri interpretadas para controle</u>	18

4.1.1	Definição de redes de Petri interpretadas para controle	20
4.2	Condições e eventos externos	21
4.3	Rede de Petri interpretada para controle para modelagem do controle do elevador	21
4.3.1	Definições da rede de Petri interpretada para controle do elevador	22
4.4	Estruturação	23
4.4.1	Método de composição modular (Bottom-up)	23
4.4.2	Método de refinamentos sucessivos (Top-down)	23
4.4.3	Métodos híbridos	24
4.5	Comentários finais	24
5	ELEVADORES DE PASSAGEIROS	26
5.1	Introdução aos elevadores de passageiros	26
5.1.1	Breve histórico	26
5.1.2	Terminologia	27
5.1.3	Estrutura mecânica do elevador	28
5.2	Descrição dos equipamentos	28
5.2.1	Máquina de tração	29
5.2.2	Freio	31
5.2.3	Portas automáticas	31
5.2.4	Comandos	31
5.2.5	Dispositivos de detecção do elevador	33
5.2.6	Posicionamento dos componentes	36
5.3	Estrutura de controle do elevador	37
5.3.1	Descrição do controle básico da operação normal de um elevador	37
5.3.2	Etapas para o atendimento de Passageiros	38
5.4	Comentários Finais	39
6	MODELAGEM EM REDES DE PETRI	40
6.1	Caso base do controle do elevador elétrico de passageiros para modelagem em redes de Petri	40
6.2	Modelagem simplificada da dinâmica do sistema de elevadores de passageiros	43
6.2.1	Processo de acionamento	43
6.2.2	Processo de parada para atendimento	44
6.2.3	Processo de transporte de passageiros	45
6.3	Considerações da modelagem em redes de Petri interpretada para controle do elevador de passageiros	46
6.3.1	Etapas e predefinições da modelagem em redes de Petri interpretadas para controle	47
6.4	Subsistema dos atuadores	48
6.4.1	Motor CA	52
6.4.2	Controle de velocidade	53
6.4.3	Controle de posição	55
6.4.4	Freio do motor	57
6.4.5	Dispositivo operador de portas	58

<u>6.5</u>	<u>Subsistema da lógica de comando automático</u>	62
6.5.1	<u>Lógica de acionamento do botão da cabina e do botão do andar</u>	64
6.5.2	<u>Lógica de definição do sentido do movimento</u>	68
6.5.3	<u>Lógica de parada no andar extremo inferior (Térreo) e extremo superior (3º andar)</u>	70
6.5.4	<u>Lógica de parada nos andares intermediários (1º e 2º andar)</u>	72
<u>6.6</u>	<u>Considerações finais</u>	75
<u>7</u>	<u>CONCLUSÕES</u>	76
7.1	<u>Sugestões para trabalhos futuros</u>	77
	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	78
	<u>ANEXO A – DEFINIÇÕES E PROPRIEDADES DE CONDIÇÕES E EVENTOS</u>	
	<u>EXTERNOS</u>	79

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura 2.1 - Classificação dos sistemas</u>	3
<u>Figura 2.2 - Arquitetura conceitual de monitoramento e controle de sistemas [7]</u>	5
<u>Figura 3.1 - Elementos de grafos de rede de Petri</u>	8
<u>Figura 3.2 - Marcação inicial M_0 de um grafo de rede de Petri</u>	9
<u>Figura 3.3 - Exemplo de rede de Petri: (a) marcação inicial; (b) após disparo de t_1; (c) após disparo de t_2; (d) após disparo de t_3; (e) partindo de M_2, após o disparo de t_3 ou partindo de M_3, após o disparo de t_2</u>	10
<u>Figura 3.4 - Exemplo de rede de Petri com arco inibidor: (a) transição não habilitada; (b) transição habilitada; (c) transição após disparo</u>	12
<u>Figura 3.5 - Estrutura ordinária equivalente do arco habilitador e as representações encontradas na literatura</u>	13
<u>Figura 3.6 - Exemplo de rede de Petri com arco habilitador: (a) transição não habilitada; (b) transição habilitada; (c) transição após disparo</u>	13
<u>Figura 3.7 - Exemplo de rede de Petri p-temporizada: (a) marcação inicial com temporização d_2 associada ao lugar p_2; (b) situação de ficha indisponível após disparo de t_1; (c) situação de ficha disponível depois de decorrido o tempo d_2</u>	15
<u>Figura 3.8 - Exemplo de rede de Petri t-temporizada: (a) marcação inicial com temporização d_2 associada à transição t_2; (b) iniciada a contagem do tempo d_2 após disparo de t_1; (c) transição t_2 disparada depois de decorrido o tempo d_2</u>	15
<u>Figura 3.9 - Exemplo de rede de Petri sincronizada [1]: (a) marcação inicial com transições sincronizadas a eventos; (b) gráfico da ocorrência dos eventos e variação da marcação em função do tempo</u>	17
<u>Figura 4.1 - Rede de Petri interpretada para controle de David e Alla [10]</u>	19
<u>Figura 4.2 - Típico controle de sistemas a eventos discretos apresentado em [3]</u>	21
<u>Figura 4.3 - Rede de Petri interpretada para controle de David e Alla [1] modificada</u>	22
<u>Figura 4.4 - Exemplo de refinamentos sucessivos de [1]: (a) rede de Petri de primeiro nível do sistema; (b) blocos de substituição das macro-transições t_1 e t_2; (c) rede de Petri depois do refinamento</u>	24
<u>Figura 5.1 - Curvas de velocidade dos tipos de acionamento [12]</u>	29
<u>Figura 5.2 - Esquema ilustrativo do encoder linear [13]</u>	34
<u>Figura 5.3 - Esquemas das disposição usuais dos componentes do elevador: (a) com casa de máquinas; e (b) sem casa de máquinas [12]</u>	36
<u>Figura 5.4 - Esquema de um sistema de controle [14]</u>	37
<u>Figura 6.1 - Ilustração do caso base de elevador de passageiros a ser modelado</u>	41
<u>Figura 6.2 - Esquema do ciclo de transporte de passageiros</u>	43
<u>Figura 6.3 - Esquema ilustrativo do processo de acionamento</u>	44
<u>Figura 6.4 - Esquema ilustrativo do processo de parada para atendimento</u>	45
<u>Figura 6.5 - Esquema ilustrativo do processo completo de transporte de passageiros</u>	46
<u>Figura 6.6 - Esquema ilustrativo da seqüência de atividades realizadas pelos atuadores</u>	48
<u>Figura 6.7 - Rede de Petri interpretada para controle do subsistema dos atuadores</u>	49

<u>Figura 6.8 - Módulo 1 (Motor CA)</u>	52
<u>Figura 6.9 - Módulo 5 (Controle de velocidade)</u>	53
<u>Figura 6.10 - Sincronização entre os módulos 1 e 4 (Motor CA e controle de velocidade)</u>	54
<u>Figura 6.11 - Módulo 5 (Controle de posição)</u>	56
<u>Figura 6.12 - Sincronização entre os módulos 1, 4 e 5 (Motor CA, controle de velocidade e controle de posição)</u>	57
<u>Figura 6.13 - Módulo 2 (Freio motor)</u>	57
<u>Figura 6.14 - Sincronização entre os módulos 1,2, 4 e 5 (Motor CA, freio motor, controle de velocidade e controle de posição)</u>	58
<u>Figura 6.15 - Módulos que compõem o módulo 3 (Dispositivo operador de portas)</u>	59
<u>Figura 6.16 - Módulo 3 (Dispositivo operador de portas)</u>	60
<u>Figura 6.17 - Rede de Petri interpretada para controle do subsistema dos atuadores</u>	60
<u>Figura 6.18 - Esquema das atividades realizadas pela lógica de comando automático do elevador</u>	62
<u>Figura 6.19 - Módulo 6 (Lógica de acionamento do botão da cabina)</u>	64
<u>Figura 6.20 - Módulo 7 (Lógica de acionamento do botão do andar)</u>	67
<u>Figura 6.21 - Módulo 8 (Lógica do sentido do movimento)</u>	68
<u>Figura 6.22 - Sincronização entre os módulos 6, 7 e 8 (Lógica de acionamento do botão da cabina, lógica de acionamento do botão do andar e lógica de definição do movimento)</u>	69
<u>Figura 6.23 - Módulos 9 e 10 (Lógica de parada no andar Térreo e no 3º andar)</u>	71
<u>Figura 6.24 - Módulo 11 (Lógica de parada no 1º andar)</u>	72
<u>Figura 6.25 - Módulo 12 (Lógica de parada no 2º andar)</u>	73
<u>Figura 6.26 - Sincronização entre os módulos 9, 10, 11 e 12 (Lógica de parada nos andares Térreo, 3º, 1º e 2º, respectivamente)</u>	74

LISTA DE TABELAS

<u>Tabela 3.1 - Interpretações típicas de transições e lugares [2].</u>	11
<u>Tabela 3.2 - Resumo das definições dos diferentes tipos de arcos apresentados.</u>	14
<u>Tabela 5.1 - Faixas de velocidade dos tipos de acionamento [12].</u>	30
<u>Tabela 5.2 - Classificação dos dispositivos de um elevador [14].</u>	37
<u>Tabela 5.3 - Etapas de atendimento e transporte de passageiros.</u>	38
<u>Tabela 6.1 - Simbologia dos elementos das redes de Petri interpretadas para controle do elevador.</u>	47
<u>Tabela 6.2 - Descrição dos lugares do subsistema dos atuadores com ações de nível e impulsionalis.</u>	50
<u>Tabela 6.3 - Descrição dos lugares do subsistema dos atuadores sem ações de nível e impulsionalis.</u>	50
<u>Tabela 6.4 - Descrição das variáveis de entrada do subsistema dos atuadores.</u>	51
<u>Tabela 6.5 - Descrição das transições do subsistema dos atuadores com eventos.</u>	51
<u>Tabela 6.6 - Descrição das transições do subsistema dos atuadores com condições externas.</u>	52
<u>Tabela 6.7 - Descrição das transições dos módulos 1 e 4 e as condições e eventos associados.</u>	54
<u>Tabela 6.8 - Descrição das transições do módulo 5 e as condições e eventos associados.</u>	56
<u>Tabela 6.9 - Descrição das transições dos módulos 2 e 3 e condições, eventos e temporização associados.</u>	62
<u>Tabela 6.10 - Diferença entre a lógica de parada entre as chamadas dos andares e da cabina.</u>	63
<u>Tabela 6.11 - Descrição dos lugares do módulo 6 e ações associadas.</u>	65
<u>Tabela 6.12 - Descrição da condição testada pelas transições do módulo 6.</u>	65
<u>Tabela 6.13 - Descrição das transições do módulo 6 e eventos associados.</u>	66
<u>Tabela 6.14 - Descrição dos lugares do módulo 7 e ações associadas.</u>	67
<u>Tabela 6.15 - Descrição das transições do módulo 7 e as condições e eventos associados.</u>	68
<u>Tabela 6.16 - Descrição dos lugares do módulo 8 e ações associadas.</u>	70
<u>Tabela 6.17 - Total de elementos da rede de Petri interpretada para controle do elevador.</u>	75

1 INTRODUÇÃO

Hoje em dia existe uma grande quantidade de processos automatizados que vêm se tornando cada vez mais complexos em função das necessidades do mundo pós-moderno e, portanto, demandam, nas fases de projeto e de implementação, ferramentas de engenharia cada vez mais poderosas para modelá-los e analisá-los de maneira eficiente. Para esse propósito, as redes de Petri são ótimas ferramentas matemáticas que permitem, em um mesmo modelo, a análise formal e simulação de sistemas a eventos discretos, com uma visualização gráfica simultânea da sua estrutura e comportamento.

Um exemplo de sistema a eventos discretos é o controle automático de um elevador de passageiros. Os elevadores influenciaram muito a organização social ao permitir a verticalização das cidades, pelo deslocamento vertical rápido e seguro de passageiros. Hoje em dia, os elevadores fazem parte do cotidiano de muitas pessoas, sendo utilizados em centros comerciais, hospitais, edifícios de apartamentos, entre outros. O controle automático de um elevador de passageiros tem como finalidade garantir o deslocamento rápido, seguro e eficiente, de maneira confortável para seus usuários.

A proposta deste trabalho é elaborar um projeto de controle automático de elevadores em redes de Petri. Para essa finalidade, existem as redes de Petri interpretadas para controle de [1], que possuem estruturas para representar as entradas do sistema real (leitura de sensores) e as saídas para o sistema real (ações de controle). As redes de Petri interpretadas para controle são extensões do modelo original de Carl Adam Petri (rede de Petri ordinária), e vários modelos de redes de Petri interpretadas para controle são encontrados na literatura [1, 2, 3].

O modelo em rede de Petri interpretada para controle automático do elevador possui estruturas e definições que facilitam a sua programação e implementação utilizando CLPs, microprocessadores e afins. Além de facilitar o entendimento da lógica que representa, devido a sua estrutura gráfica de representação, facilita as mudanças dessa lógica, o que, muitas vezes, é mais complicada de se realizar quando em forma de programa. Uma das linguagens usadas para programação de lógicas representadas por redes de Petri são os diagramas Ladder implementadas em CLPs, cuja metodologia é apresentada por diversos autores [3, 4, 5, 6].

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira: no capítulo 2 são apresentados os fundamentos básicos da teoria de sistemas a eventos discretos; no capítulo 3 são introduzidos os fundamentos das redes de Petri e suas variações; no capítulo 4 é abordada a rede de Petri interpretada para controle que será utilizada na modelagem do elevador; no capítulo 5 são abordados os conceitos fundamentais dos elevadores de passageiros e seus principais componentes; no capítulo 6 é definido o caso base e elaborado o modelo em rede de Petri interpretada para controle do elevador de passageiro; e, finalmente, no capítulo 7 são apresentadas a conclusão do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTOS BÁSICOS DA TEORIA DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS

Neste capítulo são apresentados resumidamente os critérios fundamentais pelos quais os sistemas são classificados e são apresentadas as características básicas de um sistema a eventos discretos, comentando algumas de suas formas de modelagem.

Esse capítulo está estruturado da seguinte forma: na seção 2.1 é definido o conceito de sistemas e os objetivos da teoria de sistemas; na seção 2.2 são abordadas resumidamente as principais classificações de sistemas; na seção 2.3 é apresentado o conceito de sistema a eventos discretos; na seção 2.4 descreve-se a estrutura da aplicação de sistemas a eventos discretos para monitoração e controle de sistemas complexos e, na seção 2.5 são apresentados os comentários finais sobre o capítulo.

2.1 Definição de sistemas

Sistema é um conceito antigo cujo entendimento pode ser intuitivo. De acordo com o IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) um sistema pode ser definido da seguinte forma:

Definição 2.1: *“Um sistema é uma combinação de componentes que atuam em conjunto para desempenhar uma função que é impossível de ser realizada por uma de suas partes individualmente”.* •

Devido à complexidade de um sistema real, são elaborados modelos para um melhor entendimento de seus componentes e dinâmica. A modelagem de sistemas provê a infra-estrutura necessária para a solução de problemas reais de engenharia e para a construção de sistemas práticos que desempenham um conjunto de funções desejáveis com eficiência e economicamente factíveis de controle.

O trabalho em questão tem como foco o controle de um elevador de passageiros baseado no conceito de sistemas a eventos discretos, cuja classificação e definição são apresentadas a seguir

2.2 Classificação de sistemas

Os sistemas são classificados de acordo com suas propriedades. A figura 2.1 apresenta as principais classificações de sistemas. Em negrito estão as classificações que definem um sistema a eventos discretos determinístico, que é a classe de sistemas estudada para o controle do elevador. Um resumo das classificações será apresentado nas subseções a seguir.

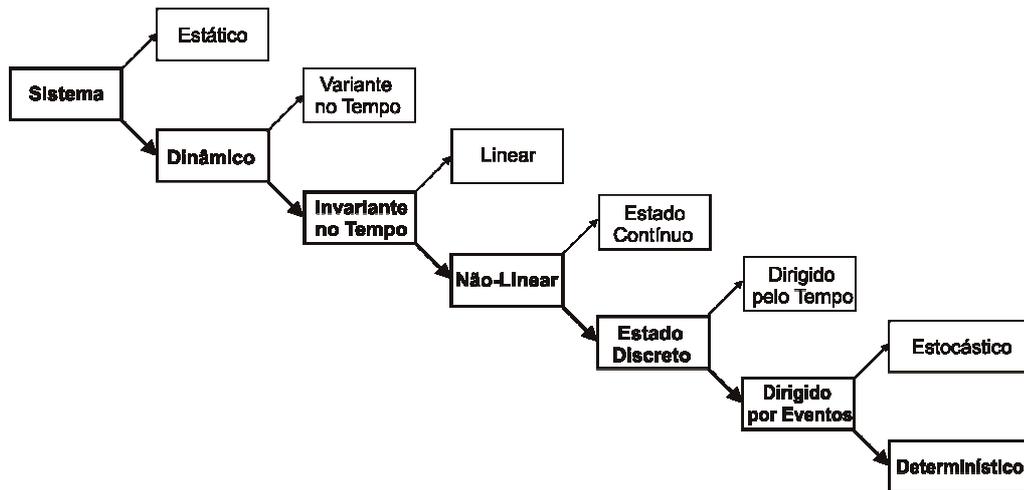


Figura 2.1 - Classificação dos sistemas.

2.2.1 Sistemas estáticos e dinâmicos

Os sistemas podem ser classificados em estáticos ou dinâmicos. Um sistema é dito ser estático quando a sua saída em determinado instante de tempo t , $y(t)$, depende somente do valor da entrada no instante de tempo t , $u(t)$. Um sistema é dito dinâmico quando sua saída no instante t , $y(t)$, depende dos valores passados da entrada.

2.2.2 Sistemas dinâmicos variantes e invariantes no tempo

Um sistema dinâmico invariante no tempo possui a seguinte propriedade: se uma entrada $u(t)$ resulta em uma saída $y(t)$, então uma entrada $u(t - \tau)$ resulta em uma saída $y(t - \tau)$, para qualquer valor de τ . Em outras palavras, se a função de entrada é aplicada ao sistema τ unidades de tempo depois de t , a função de saída resultante é idêntica a obtida em t , deslocada τ unidades de tempo. Caso contrário, o sistema é dito variante no tempo.

2.2.3 Sistemas lineares e não-lineares

Os sistemas dinâmicos invariantes no tempo podem ser classificados em lineares ou não-lineares. A linearidade está associada ao princípio da superposição, isto é, se as entradas $u_1(t)$ e $u_2(t)$ levam às saídas $y_1(t)$ e $y_2(t)$, respectivamente, então a entrada $u(t) = \alpha_1 u_1(t) + \alpha_2 u_2(t)$ leva à saída $y(t) = \alpha_1 y_1(t) + \alpha_2 y_2(t)$, para todo $\alpha_1, \alpha_2 \in \mathbb{R}$. Quando alguma dessas propriedades não for satisfeita, o sistema será dito não linear.

2.2.4 Sistema com espaço de estados contínuo e espaço de estados discreto

Em sistemas com espaço de estados contínuo, as variáveis de estado podem possuir qualquer valor real ou complexo. Em sistemas com espaço de estados discreto, as variáveis de

estado são elementos de um conjunto discreto, podendo inclusive ter valores simbólicos como alto, baixo, cheio, vazio etc.

2.2.5 Sistemas determinísticos e estocásticos

Um sistema é dito determinístico quando para uma dada entrada existe uma única saída, considerando-se as mesmas condições iniciais. Um sistema é dito estocástico quando para uma dada entrada, a saída correspondente é definida em termos probabilísticos.

2.2.6 Sistemas dirigidos pelo tempo e dirigidos por eventos

Para compreensão de um sistema dirigido por eventos é necessário definir o que é “evento”. Um evento ocorre instantaneamente e pode causar a transição de um estado do sistema para outro. Este pode ser identificado como um acontecimento, uma ocorrência espontânea da natureza ou o resultado do encontro de várias condições. Denota-se um evento pelo símbolo “ e ” e o conjunto discreto formado por todos os eventos possíveis para um determinado sistema discreto é representado pelo símbolo “ E ”.

Nos sistemas contínuos no tempo, normalmente ocorre uma mudança de estado quando o tempo varia, pode-se dizer que a evolução das variáveis de estado está relacionada com a evolução do tempo. O mesmo ocorre nos sistemas discretos no tempo, quando em instantes espaçados uniformemente, um evento do conjunto de eventos é selecionado promovendo uma mudança de estados. Simplificando, as transições de estado são sincronizadas pelo tempo e a cada instante um evento ou nenhum evento é selecionado. Em ambos os sistemas, contínuos e discretos no tempo, como o tempo é responsável pelas transições de estado, diz-se que se trata de um sistema dirigido pelo tempo.

Em sistemas dirigidos por eventos, os eventos ocorrem de forma assíncrona no tempo, isto é, a ocorrência do evento é independente do tempo.

2.3 Definição de sistemas a eventos discretos

Um sistema a eventos discretos é classificado como um sistema dinâmico, invariante no tempo, não-linear, com espaço de estados discreto e dirigido por eventos. A não-linearidade de um sistema a eventos discretos é inerente à descontinuidade das transições de estado resultantes da ocorrência de eventos. Para formalizar esse conceito pode-se utilizar a definição 2.2 [7].

Definição 2.2: “Um sistema a eventos discretos é um sistema com espaço de estados discreto e dirigido por eventos, isto é, a evolução de estados do sistema depende inteiramente da ocorrência de eventos discretos assíncronos.” •

Especificamente, em um sistema a eventos discretos o estado do sistema pode se alterar em instantes discretos no tempo, que fisicamente correspondem a ocorrências de eventos discretos gerados assincronamente. Do ponto de vista da modelagem, caso seja possível identificar um conjunto de eventos em que cada evento pode causar uma transição de estado, então a variável tempo não serve para dirigir esse sistema e não pode mais ser uma variável independente.

2.4 Monitoramento e controle de sistemas complexos

O controle de sistemas automáticos complexos, como manufatura, processos químicos, protocolos de comunicação, entre outros, tipicamente requer uma hierarquia de múltiplos níveis de controladores, desde servomecanismos, no nível inferior de hierarquia, até programas de software que implementam o controle lógico necessário no nível superior da hierarquia.

As realimentações nos níveis inferiores da hierarquia são baseadas em representações de sistemas dinâmicos com variáveis contínuas. Em um nível superior, uma visão em sistema a eventos discretos é normalmente adequada para lidar com situações como acionamento e desligamento de um sistema, mudança no modo de operação, gestão de exceções, diagnóstico de falhas, recuperação de falhas, reconfiguração do sistema etc. [7].

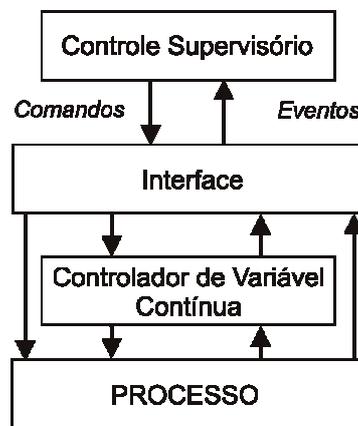


Figura 2.2 - Arquitetura conceitual de monitoramento e controle de sistemas [7].

A figura 2.2 ilustra a arquitetura completa de monitoramento e controle de um sistema complexo automatizado. O propósito dessa ilustração é mostrar os limites entre controles realimentados baseados em sistemas dinâmicos com variáveis contínuas e a lógica de controle implementada por um controle supervisão.

2.5 Considerações finais

Os sistemas possuem diversas classificações que devem ser adequadas ao sistema físico que representam, ao propósito da aplicação e ao nível de detalhamento desejado. A modelagem de sistemas a eventos discretos é bastante utilizada para monitoramento e controle de sistemas automáticos complexos. Um método de modelagem de sistemas a eventos discretos são as redes de Petri, a partir do qual se pode modelar e analisar um sistema para elaboração de um projeto de controle adequado. O presente trabalho demonstra esse tipo de aplicação de redes de Petri, em que será elaborado o controle supervisorio de um elevador de passageiros que é um sistema a eventos discretos.

3 REDES DE PETRI

As redes de Petri devem seu nome ao trabalho de Carl Adam Petri que na sua tese de doutorado, submetida em 1962, à Faculdade de Matemática e Física da Universidade Técnica de Darmstadt na Alemanha, apresentou um tipo de grafo bipartido com estados associados, com o objetivo de estudar a comunicação entre autômatos. Essa ferramenta matemática oferece um ambiente uniforme para a modelagem, análise formal e simulação de sistemas a eventos discretos, permitindo uma visualização simultânea de sua estrutura e comportamento. Mais especificamente, as redes de Petri modelam dois aspectos desses sistemas: eventos e condições, bem como as relações entre eles. Suas numerosas aplicações continuam sendo largamente utilizadas por pesquisadores para realizar modelos mais condensados, inclusive onde o fator tempo intervém.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: na seção 3.1 são apresentados os elementos fundamentais que compõem as redes de Petri e sua dinâmica; na seção 3.2 é feito um resumo das principais classificações das redes de Petri; na seção 3.3 são abordados os diferentes tipos de arcos que podem compor uma rede de Petri; na seção 3.4 são detalhadas as redes de Petri temporizadas; na seção 3.5 é apresentada a rede de Petri sincronizada e, na seção 3.6, são apresentados os comentários finais sobre o capítulo.

3.1 Fundamentos de redes de Petri

O processo de definição de uma rede de Petri envolve dois passos. Primeiro é definido o grafo da rede de Petri, também denominado estrutura da rede de Petri. Em seguida, é adicionado a esse grafo um estado inicial, um conjunto de estados marcados e uma função de rotulação de transições, o que resulta no modelo completo de rede de Petri.

Um grafo de uma rede de Petri tem dois tipos de nós, lugares e transições, e arcos que os conectam definindo a relação entre eles. O grafo é denominado bipartido no sentido que arcos não podem conectar nós do mesmo tipo, isto é, arcos somente conectam os lugares às transições e as transições aos lugares. Em um grafo de rede de Petri é permitido múltiplos arcos conectarem dois nós, ou equivalentemente, associar pesos para cada arco representando o número de arcos. Os pesos possuem valores inteiros diferentes de zero. Essa estrutura de associação de pesos aos arcos é denominada multigrafo.

Graficamente os arcos são representados por círculos, as transições por barras ou retângulos e os arcos por setas, como apresentado na figura 3.1. Quando o peso é unitário, não é necessário explicitá-lo.

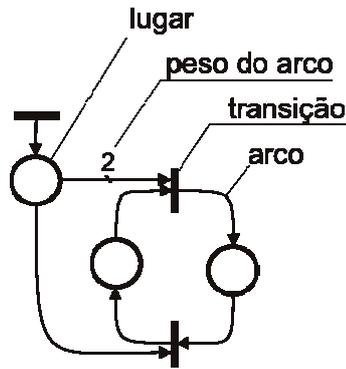


Figura 3.1 - Elementos de grafos de rede de Petri.

Definição 3.1: Um grafo de rede de Petri (P, T, A, w) é um grafo bipartido com pesos associados em que:

P é o conjunto de lugares, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$;

T é o conjunto de transições, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$;

A é o conjunto de arcos de lugares para transições e de transições para lugares, $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$;

w é a função peso associada aos arcos, $w : A \rightarrow \{1, 2, 3, \dots, K\}$.

É importante ressaltar que os conjuntos P e T são disjuntos e não vazios, ($n \geq 1, k \geq 1$ e $P \cap T = \emptyset$) •

Alguns autores costumam separar o conjunto de arcos em: arcos de entrada, que é o conjunto os arcos que conectam lugares às transições, e arcos de saída, que é o conjunto de arcos que ligam transições aos lugares. Assim, ao invés de definir um conjunto A para os arcos, podem-se definir dois conjuntos de arcos: I , o conjunto de arcos de entrada, $I \subseteq (P \times T)$, e O o conjunto de arcos de saída, $O \subseteq (T \times P)$, de forma que $A \subseteq I \cup O$.

3.1.1 Marcação de redes de Petri

A transição em um grafo de uma rede de Petri representa eventos de um sistema a eventos discretos e os lugares descrevem as condições sobre as quais esse evento pode ocorrer [8]. Nessa configuração é necessário um mecanismo indicando quando essas condições são verdadeiras ou não. Esse mecanismo é definido pela adição de **marcas** ou **fichas** aos lugares. A marca essencialmente indica o fato que a condição descrita pelo lugar está satisfeita. A ficha é representada por pontos pretos desenhados dentro dos lugares.

Uma Rede de Petri é **marcada** quando os lugares contêm um número inteiro, não negativo, de fichas. O número de fichas contidas em um lugar p_i é denominado $m(p_i)$ ou m_i . A marcação de uma rede de Petri é definida pelo vetor $M = [m_0, m_1, \dots, m_n]$ e determina o estado do sistema

descrito em um dado momento. Neste trabalho, redes de Petri marcadas serão denominadas apenas como redes de Petri.

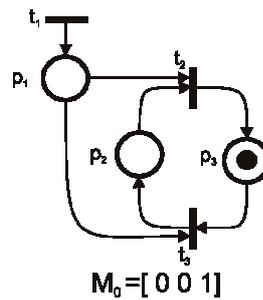


Figura 3.2 - Marcação inicial M_0 de um grafo de rede de Petri.

O grafo da figura 3.2 serve para exemplificar o conceito de marcação de rede de Petri. Caso seja definido o estado atual como sendo o estado inicial (M_0) da rede, então $m(p_1) = 0$, $m(p_2) = 0$ e $m(p_3) = 1$, e $M_0 = [0 \ 0 \ 1]$.

Definição 3.2: Uma rede de Petri marcada é a quintupla (P, T, A, w, M_0) , em que (P, T, A, w) é um grafo de rede de Petri, e M_0 é a marcação inicial do conjunto de lugares, $M = [m_0, m_1, \dots, m_n] \in \mathbb{N}^n$ •

3.1.2 Dinâmica de redes de Petri

A dinâmica de transição de estados de uma rede de Petri é representada pelo movimento de marcas entre os lugares da rede de Petri. A mudança de posição das marcas nos lugares muda a marcação da rede de Petri e por consequência seu estado. Quando a transição está habilitada diz-se que pode ser disparada. Basicamente, para que uma transição $t_j \in T$ possa ocorrer ou esteja habilitada, é necessário que o número de fichas (marcação) em todos os lugares de entrada de t_j seja maior ou igual aos pesos dos arcos de entrada associados. A definição 3.3 apresenta essa condição.

Definição 3.3: Uma transição $t_j \in T$ em uma rede de Petri é dita estar habilitada se

$$m(p_i) \geq w(p_i, t_j) \text{ para todo } p_i \in I(t_j) \bullet \quad (3.1)$$

A função de transição de estados de uma rede de Petri é definida pela mudança no estado da rede de Petri devido ao disparo de uma transição habilitada. A função de transição de estados que define esse conceito é apresentada a seguir.

Definição 3.4: A função de transição de estados, $f : N^n \times T \rightarrow N^n$, de uma rede de Petri (P, T, A, w, M_0) é definida para uma transição $t_j \in T$ se e somente se t_j está habilitada.

Se $f(M, t_j)$ é definida, então o estado alcançado após o disparo de t_j é dado por $M'(p_i) = [m'(p_1) \ m'(p_2) \ \dots \ m'(p_n)]$ em que

$$m'(p_i) = m(p_i) - w(p_i, t_j) + w(t_j, p_i), i = 1, K, n \quad (3.2)$$

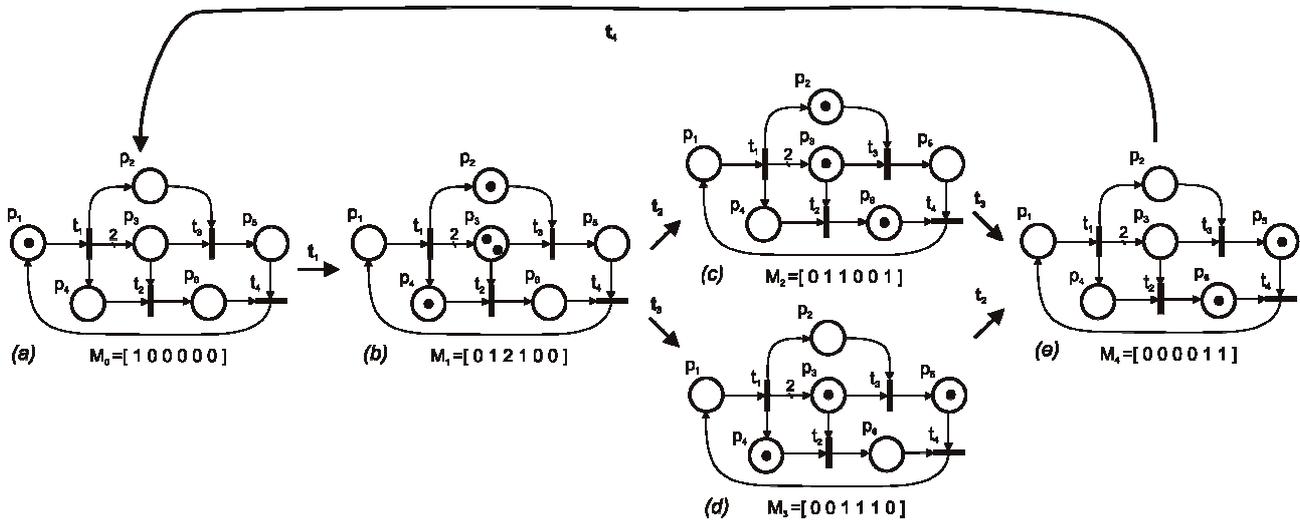


Figura 3.3 - Exemplo de rede de Petri: (a) marcação inicial; (b) após disparo de t_1 ; (c) após disparo de t_2 ; (d) após disparo de t_3 ; (e) partindo de M_2 , após o disparo de t_3 ou partindo de M_3 , após o disparo de t_2 .

A figura 3.3 apresenta a evolução de uma Rede de Petri. Parte-se da marcação inicial M_0 (figura 3.3.a) em que a transição t_1 está habilitada, após seu disparo é alcançada a marcação M_1 (figura 3.3.b) em que ambas as transições, t_2 e t_3 , estão habilitadas. Em M_1 , caso seja disparada a transição t_2 , obtém-se a marcação M_2 (figura 3.3.c) em que somente t_3 está habilitada e quando t_3 é disparada obtém-se a marcação M_4 (figura 3.3.e). Em M_1 , caso seja disparada t_3 obtém-se M_3 (figura 3.3.d), em que apenas t_2 está habilitada e quando t_2 é disparada o estado alcançado é M_4 . Pode-se observar que a seqüência de disparos $t_2 \ t_3$ ou $t_3 \ t_2$ leva ao mesmo estado M_4 . Em M_4 apenas t_4 se encontra habilitada e quando t_4 é disparada o sistema retorna a marcação inicial M_0 (figura 3.3.a).

3.1.3 Interpretações de transições e lugares

Na modelagem de sistemas, basicamente os lugares são usados para representar condição, situação de um componente ou uma operação no sistema, e as transições representam os eventos e/ou atividades. Na tabela 3.1 são apresentados significados usualmente utilizados para a representação de sistemas a eventos discretos. Inserindo os lugares e transições na representação de sistemas de aplicação, podem ser encontrados alguns significados na literatura [2], apresentados na tabela 3.1. Essa tabela ilustra a potencialidade das redes de Petri, que são aplicadas na modelagem de sistemas diversos.

Tabela 3.1 - Interpretações típicas de transições e lugares [2].

Lugares de Entrada	Transições	Lugares de Saída
Pré-condições	Eventos	Pós-Condições
Dados de Entrada	Etapa de Computação	Dados de Saída
Recursos Necessários	Tarefas ou Trabalhos	Recursos Liberados
Condições	Condição Lógica	Conclusão
Armazenadores (Buffers)	Processador	Armazenadores (Buffers)

3.2 Classificação das redes de Petri

Buscando aumentar o poder de modelagem das redes de Petri, vários autores vêm propondo simplificações e acrescentando funcionalidades. Em [8] as redes de Petri são classificadas em três grupos: ordinárias, abreviações e extensões.

- **Ordinárias:** são redes de Petri em que os arcos possuem peso unitário.
- **Abreviações:** Correspondem a representações simplificadas, úteis para tornar mais leve a representação gráfica, mas que sempre podem ser representadas por redes de Petri ordinárias. Entre elas estão as redes de Petri generalizadas, de capacidade finita e com arco habilitador ou de teste.
- **Extensões:** Correspondem a modelos com adição de regras de funcionamento de forma a enriquecer o modelo inicial, permitindo o tratamento de um grande número de aplicações. Inseridas nessa classificação, existem as redes de Petri com prioridade, com arco inibidor, temporizadas, sincronizadas, interpretadas etc.

Entre as extensões de redes de Petri estão as redes de Petri interpretadas para controle que são sincronizadas com eventos externos e temporizadas. Essas redes de Petri possuem uma estrutura formal para lidar com sensores e atuadores.

No presente trabalho serão abordadas as redes de Petri com arco inibidor e com arco habilitador, importantes para elaboração da estrutura do modelo do elevador, pois simplificam o modelo e o tornam de mais fácil visualização.

3.3 Variações dos tipos de arcos das redes de Petri

Os arcos representam a relação entre lugares e transições. Até o momento foi definido apenas um tipo de arco, denominado ordinário ou normal. Os arcos ordinários possuem peso unitário e ligam tanto lugares às transições, $I:(P \times T)$, como transições aos lugares, $O:(T \times P)$. Durante o disparo da transição t_j , todos os lugares p_i associados a $I(t_j)$ perdem uma ficha e os lugares p_i associados a $O(t_j)$ ganham uma ficha. A fim de aumentar o poder de modelagem das

redes de Petri, outros tipos de arcos são definidos na literatura: o arco inibidor e habilitador. Esses novos tipos de arcos somente conectam lugares a transições ($P \times T$).

O arco inibidor é a negação do arco ordinário, isto é, a transição t_j com arco inibidor somente é disparada quando a condição de disparo do arco ordinário é falsa. O arco inibidor é utilizado para traçar prioridades de disparo em caso de conflito, isto é, quando duas transições estão habilitadas e o disparo de uma desabilita a outra e vice-versa. O arco habilitador é uma simplificação da estrutura característica de sistemas a eventos discretos denominada leitura, isto é, quando a transição t_j é disparada, não existe alteração do lugar p_i ao qual o arco está associado. A dinâmica desses novos elementos será apresentada nas seções 3.3.1 e 3.3.2.

3.3.1 Redes de Petri com arco inibidor

O Arco Inibidor somente conecta um lugar p_i a uma transição t_j , fazendo parte da pré-condição de t_j . A transição t_j somente é habilitada se a condição da inequação 3.1 for falsa, isto é, o número de marcas em p_i for menor que o peso do arco inibidor $w(p_i, t_j)$, ou seja,

$$m(p_i) < w(p_i, t_j) \text{ para todo } p_i \in In(t_j). \quad (3.3)$$

Após o disparo, diferentemente dos arcos ordinários, o arco inibidor não perde marcas e mantém a marcação do lugar p_i inalterada. A representação deste arco consiste numa seta com um círculo vazio na ponta.

Definição 3.5: Uma rede de Petri com arco inibidor é a dupla (R, In) em que R é uma rede de Petri marcada e In é o conjunto dos arcos inibidores, orientados somente do conjunto dos lugares as transições, com pesos $w(p_i, t_j)$ associados. •

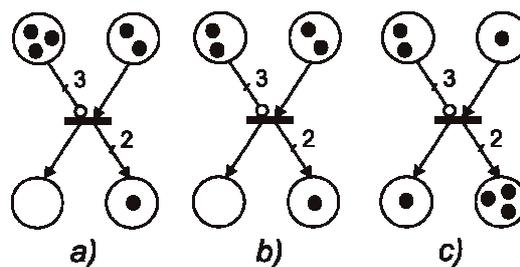


Figura 3.4 - Exemplo de rede de Petri com arco inibidor: (a) transição não habilitada; (b) transição habilitada; (c) marcação após disparo da transição.

Como exemplo, a figura 3.4 apresenta uma rede de Petri com arco inibidor com peso três. Na figura 3.4.a a transição não está habilitada visto que o número de marcas é igual ao peso do arco. Na figura 3.4.b a transição se encontra habilitada, pois o número de marcas é menor que o peso do arco. Após o disparo (figura 3.4.c), não ocorre alteração da marcação do lugar associado ao arco inibidor.

Os arcos inibidores ajudam a estabelecer prioridades de disparo entre as transições. Assim redes de Petri com prioridades, uma subclassificação das redes de Petri estendidas, podem ser sempre representadas por redes de Petri com arco inibidor [8].

3.3.2 Redes de Petri com arco habilitador ou de teste

Assim como nas redes de Petri com arco inibidor em uma rede de Petri com arco habilitador ou de teste, o arco habilitador somente conecta um lugar p_i a uma transição t_j , pertencendo a pré-condição de t_j . A condição para a habilitação de uma transição t_j é a mesma que o arco ordinário descrita pela equação 3.1, no entanto, após o disparo, a marcação $m(p_i)$ se mantém inalterada, assim como no arco inibidor. Sua representação gráfica consiste em uma seta tracejada com o triângulo na ponta, como apresentado na figura 3.5. No modelo do controle do elevador, apresentado no capítulo 6, para facilitar a visualização optou-se pela utilização de uma seta tracejada com triângulo vazio na ponta.

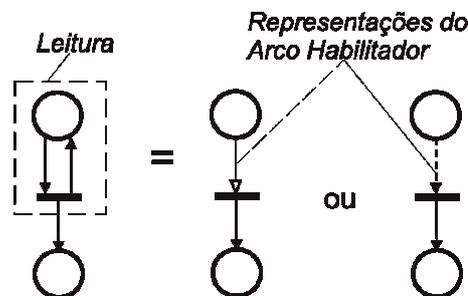


Figura 3.5 - Estrutura ordinária equivalente do arco habilitador e as representações encontradas na literatura.

A definição 3.6 formaliza o conceito de redes de Petri com arco habilitador ou de teste.

Definição 3.6: Uma rede de Petri com arco habilitador é uma dupla (R, En) em que R é uma rede de Petri marcada e En é o conjunto dos arcos habilitadores, orientados somente dos lugares as transições, com pesos $w(p_i, t_j)$ associados. •

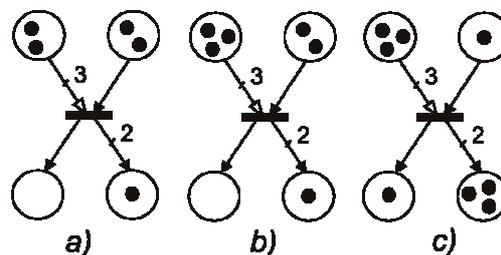


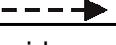
Figura 3.6 - Exemplo de rede de Petri com arco habilitador: (a) transição não habilitada; (b) transição habilitada; (c) transição após disparo.

Como exemplo, a figura 3.6 apresenta uma rede de Petri com arco habilitador com peso três, em que no primeiro caso a transição não está habilitada (figura 3.6.a) visto que o número de marcas é menor que o peso do arco. No segundo caso a transição se encontra habilitada (figura 3.6.b), pois, o número de marcas é igual ao peso do arco. Quando a transição for disparada não ocorrerá alteração da marcação do lugar associado ao arco habilitador (figura 3.6.c).

3.3.3 Resumo dos tipos de arcos encontrados em redes de Petri

Para simplificar os conceitos dos diferentes tipos de arcos apresentados até o momento, foi definida a tabela 3.2, partindo do princípio da associação de somente um tipo de arco ao lugar p_i e a transição t_j .

Tabela 3.2 - Resumo das definições dos diferentes tipos de arcos apresentados.

Arcos	Símbolo	Conjunto	Critério para habilitação	Marcação do lugar p_i após o disparo da transição t_j
Ordinário ou normal		$A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$	$m(p_i) \geq w(p_i, t_j)$	$m'(p_i) = m(p_i) - w(p_i, t_j) + w(t_j, p_i)$
Inibidor	 ou 	$In \subseteq (P \times T)$	$m(p_i) < w(p_i, t_j)$	$m'(p_i) = m(p_i)$
Habilitador ou de teste	 ou 	$En \subseteq (P \times T)$	$m(p_i) \geq w(p_i, t_j)$	$m'(p_i) = m(p_i)$

Resumidamente, o arco ordinário define a relação de “Verdade” para pré-condições com alteração da marcação, o arco inibidor a relação de “Falsidade” e o arco habilitador a relação de “Verdade”, no entanto na condição de “somente leitura”, isto é, sem alteração da marcação do lugar após o disparo da transição ao qual está associado.

3.4 Redes de Petri temporizadas

Redes de Petri temporizadas são úteis para avaliação de desempenho de um sistema. Basicamente, existem dois modelos temporizados, um em que tempo está associado aos lugares e outro em que tempo está associado às transições.

3.4.1 Redes de Petri p-temporizada

Nessas redes de Petri uma temporização d_i é associada a cada lugar p_i . Quando uma ficha é depositada no lugar p_i , esta permanece nesse lugar ao menos durante o tempo d_i . Nesse período de tempo a ficha é dita estar indisponível, se tornando novamente disponível depois de passado o tempo d_i .

Definição 3.7: Uma rede de Petri p-temporizada é uma dupla (R, D) sendo R é uma rede de Petri marcada e D uma função que associa à cada lugar $p_i \in P$, um número real não negativo, sendo $D(p_i) = d_i$, o valor do tempo associado ao lugar. •

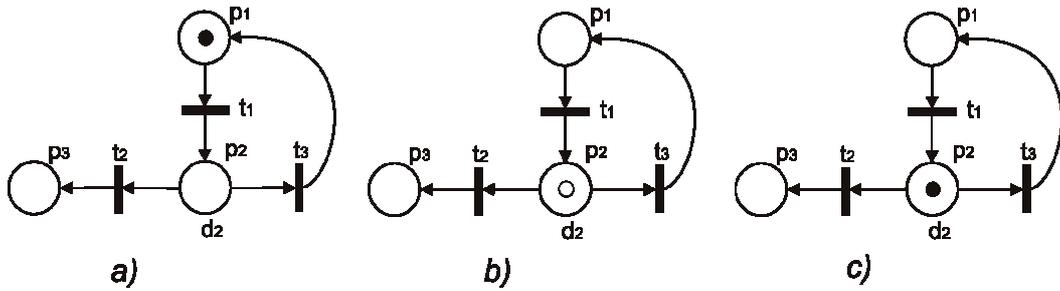


Figura 3.7 - Exemplo de rede de Petri p -temporizada: (a) marcação inicial com temporização d_2 associada ao lugar p_2 ; (b) situação de ficha indisponível após disparo de t_1 ; (c) situação de ficha disponível depois de decorrido o tempo d_2 .

A figura 3.7 exemplifica uma rede de Petri p -temporizada em que o lugar p_2 possui temporização d_2 (figura 3.7.a). Após o disparo da transição t_1 o lugar p_2 recebe uma ficha habilitando as transições t_2 e t_3 (figura 3.7.b), no entanto, estas somente podem ser disparadas depois de decorrido o tempo d_2 , durante esse tempo a ficha fica indisponível, representada por uma circunferência. Assim, passado d_2 , a ficha se torna novamente disponível e habilita as transições t_2 ou t_3 (figura 3.7.c).

3.4.2 Redes de Petri t -temporizada

Nas redes de Petri t -temporizadas a temporização d_j é associada a cada transição t_j . Quando a transição t_j se torna habilitada, esta não é disparada imediatamente, sendo disparada somente depois de decorrido o tempo d_j iniciado no instante da habilitação. Uma transição temporizada é usualmente representada por uma barra vazia.

Definição 3.8: Uma rede de Petri temporizada é uma dupla (R, D) em que R é uma rede de Petri marcada e D é uma função que associa a cada transição $t_i \in T$, um número real não negativo, sendo $D(t_j) = d_j$, o valor do tempo associado à transição. •

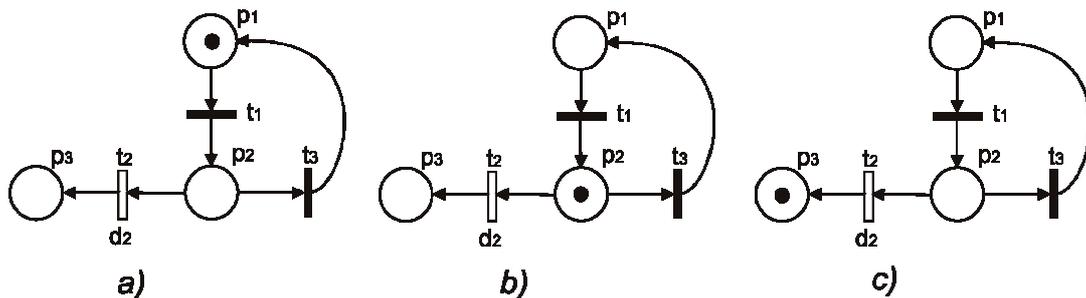


Figura 3.8 - Exemplo de rede de Petri t -temporizada: (a) marcação inicial com temporização d_2 associada à transição t_2 ; (b) iniciada a contagem do tempo d_2 após disparo de t_1 ; (c) transição t_2 disparada depois de decorrido o tempo d_2 .

A figura 3.8 exemplifica uma rede de Petri t -temporizada em que a transição t_2 possui temporização d_2 (figura 3.8.a). Após o disparo da transição t_1 o lugar p_2 recebe uma ficha habilitando as transições t_2 e t_3 (figura 3.8.b), nesse instante somente t_3 somente poderá ser disparada a qualquer antes de ter decorrido o tempo d_2 . Decorrido o tempo d_2 , a transição t_2 é disparada (figura 3.8.c) imediatamente.

A rede de Petri t-temporizada descrita é sem reservas de marcas, isto é, após habilitação de uma transição t_j , esta habilitação pode ser cancelada pelo disparo de outra transição. Existe também a opção da rede t-temporizada com reserva de marcas. Neste caso, quando a transição t_j é habilitada as marcas necessárias para essa habilitação se tornam indisponíveis durante o tempo d_j associado à transição.

3.5 Redes de Petri sincronizadas

Em uma rede de Petri autônoma, que é o caso dos modelos de redes de Petri apresentados até o momento, uma transição pode ser disparada se habilitada. No entanto, não é definido quando isto ocorre. Em redes de Petri sincronizadas, um evento é associado a cada transição e o disparo da transição somente ocorrerá: (i) se a transição estiver habilitada e (ii) quando o evento associado ocorrer.

Definição 3.9: Uma rede de Petri sincronizada é uma tripla $(R, E, Sync)$ em que: R é uma rede de Petri marcada; E é o conjunto de eventos externos; e $Sync$ é uma função do conjunto T das transições de R para $E \cup \{e\}$ onde e é o evento que sempre ocorre. •

O conceito de sincronização é muito importante para elaboração de modelos em rede de Petri para projetos de controle, já que sincroniza a dinâmica da rede a eventos externos, que representam as alterações do mundo real. Do ponto de vista de controladores, os eventos externos são interpretações da leitura dos sensores. A partir dos conceitos de rede de Petri sincronizadas, será definido o modelo de rede de Petri interpretada para controle, apresentado no capítulo 4.

3.5.1 Princípios da rede de Petri sincronizada

O conjunto de eventos de uma rede de Petri sincronizada é definido por $E = \{e^1, e^2, \dots\}$. A notação e^j corresponde à descrição do evento externo e a notação e_j ao evento sincronizado à transição t_j , que pode ser qualquer um dos eventos e^1, e^2, \dots do conjunto E . Quando uma transição t_j com evento e^j associado está habilitada, diz-se que t_j está **receptiva** ao evento e^j . Nesse caso t_j somente é disparada no momento em que e^j ocorre, sendo o disparo neste instante imediato [1].

Para ilustrar os aspectos de uma rede de Petri sincronizada, é utilizado a rede de Petri da figura 3.9.a. O comportamento desse sistema no tempo é apresentado na figura 3.9.b, em que são apresentados os instantes de ocorrência dos eventos, e a marcação resultante. Os gráficos da figura 3.9.b seguem a lógica descrita da rede de Petri sincronizada, pois só ocorreu a mudança de estado quando a transição estava habilitada e seu evento associado ocorreu.

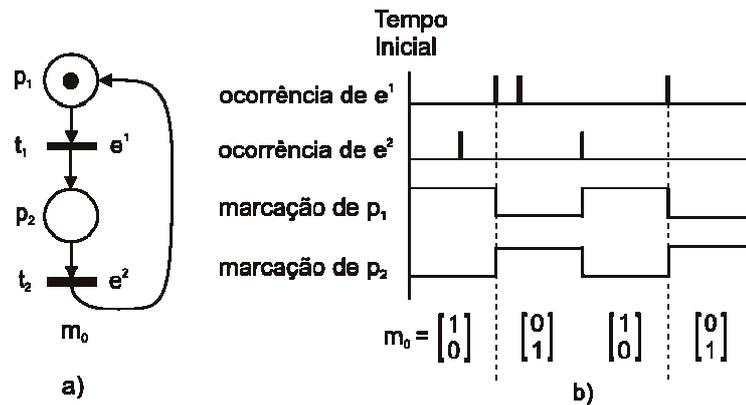


Figura 3.9 - Exemplo de rede de Petri sincronizada [1]: (a) marcação inicial com transições sincronizadas a eventos; (b) gráfico da ocorrência dos eventos e variação da marcação em função do tempo.

Pode-se considerar um novo evento que não é um evento externo, o evento e que significa “**evento que sempre ocorre**”. Estando uma transição t_j associada a e habilitada, esta estará receptiva a e , portanto imediatamente disparada. Assim, uma transição associada ao evento e é definida como **imediate** ou **sincronizada pelo evento e** .

O mesmo evento pode ser associado a várias transições em uma rede sincronizada. Caso um conjunto de transições $\{t_1, t_2, \dots\}$ associadas ao evento e^i estejam receptivas e não estejam em conflito, na ocorrência do evento e^i todas as transições t_1, t_2, \dots são simultaneamente disparadas.

3.6 Considerações finais

Conclui-se que as redes de Petri possuem uma fundamentação simples, com uma representação gráfica de fácil visualização, com riqueza de detalhes e passível de análise formal. Representam bem as relações entre condições e eventos usados na modelagem de sistemas a eventos discretos. Ao longo dos anos foi bastante utilizada, sofrendo a adição de novas funcionalidades que aumentam seu poder de modelagem e as possibilidades de aplicações.

Entre as novas funcionalidades estão os arcos inibidores, os arcos habilitadores, as temporizações associadas aos lugares ou transições e a sincronização da rede a eventos externos. Todas essas funcionalidades serão utilizadas para elaboração do modelo do controle supervisorio do elevador, sendo a mais importante a sincronização, que é a funcionalidade básica para elaboração da rede de Petri interpretada para controle que será discutida no capítulo 4.

4 REDES DE PETRI INTERPRETADAS PARA CONTROLE

A expressão “rede de Petri interpretada” pode ser aplicada em várias interpretações de acordo com a aplicação desejada. São encontradas interpretações adaptadas à descrição de software, hardware, controladores lógicos, linguagens formais, avaliação de performance etc. A interpretação a ser utilizada será a rede de Petri interpretada para controle baseada principalmente no modelo apresentado em [1] com algumas alterações. Também existem outros autores que apresentam modelos de redes de Petri interpretadas para controle como as redes de Petri para controle de eventos discretos em tempo real [2] e as redes de Petri para automação [3].

Basicamente, em uma rede de Petri interpretada para controle, uma transição habilitada é disparada se alguma *condição* é satisfeita, quando algum *evento* ocorre. Quando a marca é adicionada a um lugar, **ações ou operações** são realizadas. Assim caso os eventos sejam definidos como informações oriundas do **ambiente**, que é o sistema real controlado, as ações serão dados de saída para o ambiente, para a execução de operações, como, no caso do modelo do elevador, a partida e parada do motor.

No modelo de rede de Petri apresentado em [1], as redes de Petri possuem a propriedade da segurança, isto é, seus lugares podem possuir marcação menor ou igual uma ficha para evitar a dúvida de quantas vezes a operação associada a um lugar será executada, caso a marcação do lugar fosse maior que um. Essa escolha é justificada para descrever controladores lógicos cujos variáveis podem possuir somente os valores são zero ou um. Os conceitos e simbologias de redes de Petri interpretadas para controle serão mais detalhados nas subseções a seguir. Será apresentada a rede de Petri interpretada para controle de David e Allá [15] que será modificada para utilização na construção do controle supervisorio do elevador de passageiros.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: na seção 4.1 é descrito o modelo de redes de Petri interpretadas para controle de David e Allá [1]; na seção 4.2 é apresentado resumidamente os conceitos de condições externas e eventos; na seção 4.3 é proposta a rede de Petri interpretada para controle para modelagem do controle supervisorio do elevador; na seção 4.4 são apresentados os três métodos básicos para estruturação de uma rede de Petri e, na seção 4.5, são apresentados os comentários finais sobre o capítulo.

4.1 Modelo de redes de Petri interpretadas para controle

A rede de Petri interpretada para controle é um modelo de controlador lógico baseado em redes de Petri sincronizadas. A figura 4.1.a ilustra os conceitos principais do modelo de rede de Petri interpretada para controle de David e Alla [1].

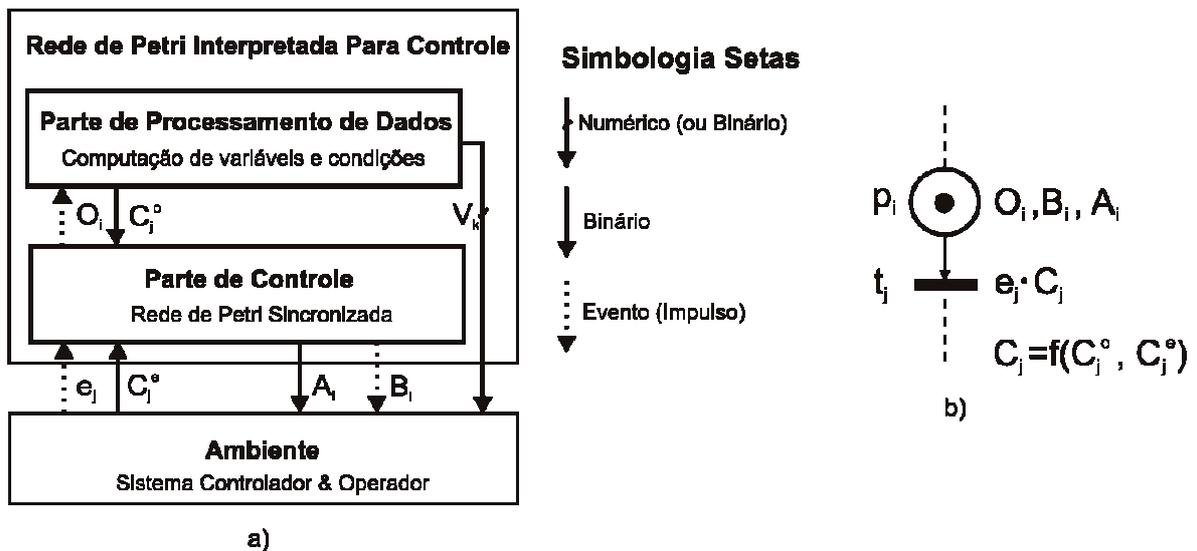


Figura 4.1 - Rede de Petri interpretada para controle de David e Alla [10].

A rede de Petri interpretada para controle recebe informações do ambiente, composto por sistemas controlados, operadores humanos e outras rede de Petri para controle. Essa informação consiste de **variáveis binárias** ou Booleanas (C_j^e) e **eventos** (e_j). Os eventos podem ser deduzidos das variáveis binárias, pois o conhecimento de $x(t)$ para $t \geq 0$ implica no conhecimento da ocorrência no tempo dos eventos $\uparrow x$ e $\downarrow x$. Detalhes sobre a álgebra dos eventos e condições externas são apresentados no anexo A.

A rede de Petri interpretada para controle envia três tipos de saída para o ambiente: (i) saídas de nível dependendo da marcação da rede de Petri (A_i); saídas impulsivas, isto é, eventos dependendo da mudança da marcação (B_i); e variáveis numéricas ou binárias resultantes de cálculos computacionais (V_k). Internamente na rede de Petri interpretada para controle, a parte de controle envia ordens de operação (O_i) e recebe informações binárias da parte de processamento de dados (C_j^o). O modelo assume que o cálculo não tem duração e o resultado é imediatamente disponível.

A figura 4.1.b apresenta uma parte de uma rede de Petri interpretada para controle em que as entradas estão associadas às transições e as saídas associadas aos lugares. Pode-se observar que o evento e_j e a condição C_j estão associados com a transição t_j , sendo que a condição C_j é uma função Booleana que depende da parte de processamento de dados e do ambiente. O evento e_j é um evento externo do ambiente ou o 'evento que sempre ocorre' e . Assim sendo, a transição t_j vai ser disparada somente: (i) se a transição t_j está habilitada, (ii) se a condição C_j é verdadeira e (iii) quando o evento e_j ocorrer.

O produto $R_j = e_j \cdot C_j$ é denominado **receptividade** da transição t_j . Estando essa habilitada diz-se que está receptiva a R_j . Se a transição t_j estiver habilitada e se a condição C_j for verdadeira,

então t_j estará receptiva ao evento e_j . Seguindo essa lógica, a transição t_j é uma transição imediata se e somente se $C_j = 1$ e $e_j = e$.

As ações O_i , B_i e A_i são associadas ao lugar p_i (figura 4.1.b). Quando uma marca é depositada no lugar p_i no instante τ , a operação O_i é carregada e a **ação impulsional** B_i é enviada para o ambiente. A saída binária A_i manterá o valor um enquanto a marca permanecer em p_i , sendo denominada **ação de nível**.

Na modelagem em redes de Petri interpretadas para controle, caso não sejam explicitadas as condições iniciais das ações, condições e eventos, os seguintes valores serão predefinidos como:

- a) Se e_j não for especificado, então $e_j = e$ (evento que sempre ocorre);
- b) Se C_j não for especificado, então $C_j = 1$;
- c) Se O_i não for especificado, então O_i será o operador identidade, isto é, não existirá modificação no estado das variáveis da parte de processamento de dados;
- d) Se B_i não for especificado, não existirá ação impulsional;
- e) Se A_i não for especificado, todas as saídas de nível possuirão valor zero.

4.1.1 Definição de redes de Petri interpretadas para controle

Uma rede de Petri interpretada para controle descreve um controlador. Esse controlador é determinístico se, para toda seqüência de entrada, sua seqüência de saída for determinística. O estado de uma rede de Petri para controle é definida por dois componentes: a marcação e o estado da parte de processamento de dados. Assim para que a rede de Petri Interpretada para controle seja determinística é necessário que ambos os componentes também o sejam [1]. Define-se que uma rede de Petri interpretada para controle é segura, se a capacidade máxima de fichas no lugar for igual a um.

Apresentada toda a conceituação de rede de Petri interpretada para controle de David e Allá [1], podem-se estabelecer as características que as definem.

Definição 4.1: *Uma Rede de Petri interpretada para controle possui as seguintes características (sendo as características 1 a 3 necessárias e 4 e 5, possíveis)*

- 1- *É sincronizada com eventos externos e estável;*
- 2- *É segura;*
- 3- *É determinística;*
- 4- *Possui parte de processamento de dados cujo estado é definido por um conjunto de variáveis $V = \{V_1, V_2, \dots\}$. Esse estado é modificado por operações O_i , associadas com os lugares, que determinam o valor do predicado C_j^o ;*
- 5- *Recebe informação binária C_j^e do ambiente e envia ações de nível A_i (binária) e ações impulso B_i (tipo evento), associados com os lugares, para o ambiente. •*

4.2 Condições e eventos externos

O comportamento de um sistema a eventos discretos pode depender de dois tipos de informação originárias do ambiente do sistema: *condições* e *eventos externos*. Em controladores lógicos, o ambiente é constituído do processo a ser controlado, um operador e outros sistemas, porém os conceitos de condições e eventos externos podem ser aplicados a outros tipos de sistema. O estado do controlador lógico pode mudar se a condição externa C_j for verdade, no momento em que o evento e_j ocorrer. O estado de um sistema a eventos discretos, supondo ser finito, sempre pode ser definido por valores booleanos [1].

As condições externas relacionam um estado do ambiente do sistema dinâmico a eventos discretos modelado, como por exemplo, a condição de detecção de bloqueio por um sensor óptico de presença (seção 5.2.5.2) que faz com que seu valor varie de 1 para 0. Os eventos estão relacionados a uma variação no estado do ambiente do sistema no instante que esta ocorre. Um evento não tem duração, mesmo que o valor da variável booleana dure algum tempo. Um evento pode sempre ser definido como uma borda de subida (\uparrow) ou descida (\downarrow) de uma variável ou função booleana.

4.3 Rede de Petri interpretada para controle para modelagem do controle do elevador

A partir do modelo de David e Alla [1] foram feitas algumas alterações e acréscimos para elaborar o modelo de redes de Petri interpretadas para controle que será utilizado nesse trabalho. No modelo aqui proposto, a parte de processamento de dados, que transcreve variáveis contínuas do modelo em variáveis discretas, não está incluída no controlador e, sim, no ambiente como no modelo de redes de Petri de automação [3] cujo esquema básico é apresentado na figura 4.2. As variáveis numéricas são passíveis de serem modeladas por sistemas a eventos discretos; assim mais aspectos do sistema real são representados no seu modelo a eventos discretos.

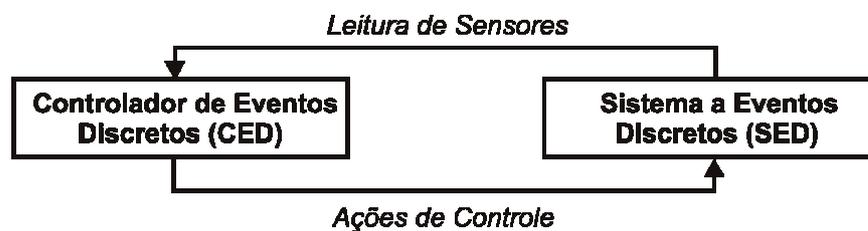


Figura 4.2 - Típico controle de sistemas a eventos discretos apresentado em [3].

Essas alterações implicam que as ordens de operações O_i e as ações impulsivas B_i farão parte do mesmo conjunto B . As variáveis numéricas não farão parte do modelo e não haverá distinção entre as condições C_j^o e C_j^e . Além dessas alterações, serão acrescentadas

temporizações às transições e arcos habilitadores e inibidores aos grafos. Os demais aspectos e suas respectivas dinâmicas se mantêm inalterados. Para ilustrar esse novo modelo a figura 4.3 é apresentada.

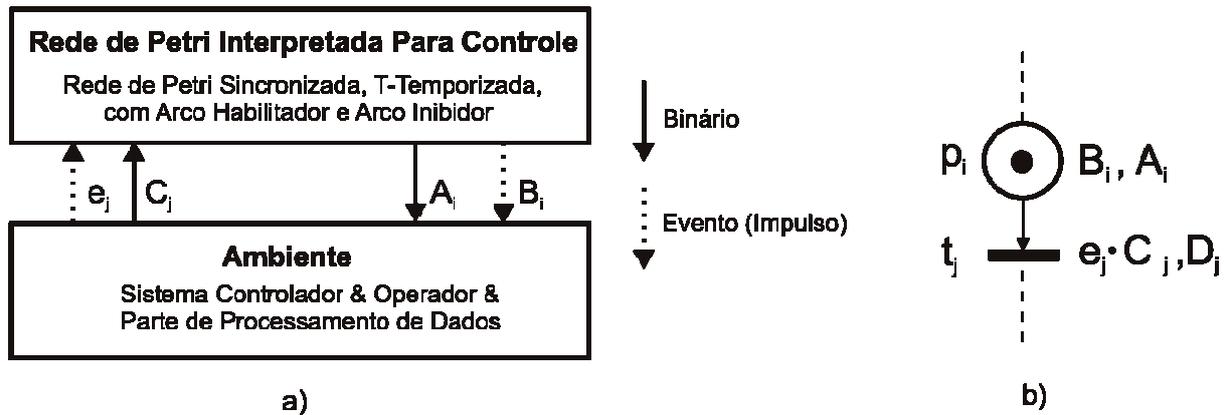


Figura 4.3 - Rede de Petri interpretada para controle de David e Alla [1] modificada.

Com as alterações e acréscimos as características da rede de Petri interpretada para controle do elevador pode ser definida como:

Definição 4.2: A rede de Petri interpretada para controle do modelo do elevador possui as seguintes características

- 1- É sincronizada com eventos externos e estável;
- 2- É segura;
- 3- É determinística;
- 4- É t-temporizada;
- 5- Possui arcos inibidor e habilitador;
- 6- Recebe informação binária do ambiente, definidas como a condição externa C_j , e envia ações de nível A_i (binária) e ações impulsinais, associados aos lugares, para o ambiente. •

4.3.1 Definições da rede de Petri interpretada para controle do elevador

A rede de Petri interpretada para controle do elevador é sintetizada na definição 4.3.

Definição 4.3: A rede de Petri interpretada para controle do elevador é definida por $(P, T, I, O, E, Sinc, En, In, D, C, M_0)$ em que:

P é o conjunto de lugares, $P = \{p_1, p_2, K, p_n\}$;

T é o conjunto de transições, $T = \{t_1, t_2, K, t_m\}$;

I é o conjunto de arcos de entrada, $I \subseteq (P \times T)$;

O é o conjunto de arcos de saída, $O \subseteq (T \times P)$;

E é o conjunto de eventos externos, $E = \{e^1, e^2, K, e^z\} \cup \{e\}$;

$Sinc$ é função de sincronização, $Sinc : T \rightarrow E \cup \{e\}$;

E_n é o conjunto dos Arcos Habilitadores, $E_n \subseteq (P \times T)$;

I_n é o conjunto dos Arcos Inibidores, $I_n \subseteq (P \times T)$;

D é o conjunto de temporização associado às transições, $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$, $D \in R^+ \cup \{0\}$;

C é o conjunto de condições do ambiente, $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$;

M_0 é a marcação inicial. •

4.4 Estruturação

Para estruturação de um modelo em redes de Petri, são definidas três abordagens principais [1,2]: (i) composição modular (Bottom-up); (ii) refinamentos sucessivos (Top-down); e (iii) híbrida.

4.4.1 Método de composição modular (Bottom-up)

A abordagem por composição modular [1,2] pode ser resumida em dois aspectos: decomposição e composição. A decomposição envolve divisão do sistema em vários subsistemas. Dependendo da complexidade do sistema, a composição hierárquica por subsistemas pode ser necessária; assim todos os subsistemas podem ser modelados com redes de Petri. Esses submodelos são integrados formando um modelo completo do sistema, definindo assim a composição. Geralmente, o processo de composição não garante as propriedades do modelo resultante.

Todos os modelos individuais podem ser compostos em uma rede de Petri completa nos seguintes passos:

- **Compartilhamento de lugares**, sendo estes, freqüentemente, recursos que são compartilhados entre diferentes operações e processos.
- **Compartilhamento de transições**, que servem como pontos de sincronização que reforçam certas sincronizações entre os subsistemas.
- **Compartilhando trajetos elementares**, que podem começar com um lugar ou uma transição e terminar com um lugar ou transição diferente.
- **Adicionando estruturas de redes de Petri** como uma interface para conectar dois ou mais módulos.

4.4.2 Método de refinamentos sucessivos (Top-down)

Refere-se ao projeto em redes de Petri usando refinamentos sucessivos de lugares, transições ou subestruturas, que é alcançado pela substituição destes por sub-redes mais complexas ou módulos pré-projetados. Cada passo sucessivo contém um aumento de detalhamento até o alcance do nível desejado, depende do propósito do método, que pode ser

simples para uma análise inicial ou pré-planejamento, e também para análises complexas mais detalhadas ou implementação de controle.

O primeiro passo para iniciar o projeto de refinamentos é achar uma rede de Petri apropriada para primeiro nível do sistema. Nesse ponto, a análise global do sistema a ser modelado e suas especificações são necessárias. A decomposição do sistema em subsistemas independentes também é realizada nesse passo. Depois que a rede de Petri de primeiro nível é decidida, essas transições, lugares ou estruturas simples que representam atividades agregadas necessitam ser refinadas para representar mais detalhes.

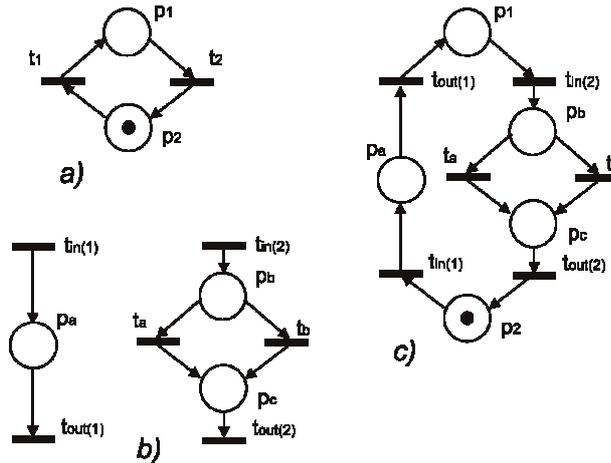


Figura 4.4 - Exemplo de refinamentos sucessivos de [1]: (a) rede de Petri de primeiro nível do sistema; (b) blocos de substituição das macro-transições t_1 e t_2 ; (c) rede de Petri depois do refinamento.

Cada refinamento introduz novos detalhes e pode ser feito para satisfazer certas condições e, assim, as propriedades da rede de Petri global são garantidas, como exemplificado na figura 4.4. Como esses refinamentos são frequentemente locais, a interação entre sub-redes é muito difícil de lidar com essa estratégia. Os métodos de refinamentos sucessivos são apropriados para descrever estruturas de tarefas hierárquicas, onde cada tarefa pode consistir de sub-tarefas.

4.4.3 Métodos híbridos

Consiste na combinação das duas abordagens anteriores, divididos em dois estágios; projeto por composição modular e projeto por refinamentos sucessivos. O projeto por refinamentos sucessivos visa o refinamento da rede passo a passo para assim incluir detalhes suficientes da operação do sistema para implementação, e o método de composição modular foca na correta construção de interações entre subsistemas ou operação detalhada do processo.

4.5 Comentários finais

Neste capítulo foi elaborado um modelo de rede de Petri interpretada para controle baseado no modelo de David e Alla [1]. Foi feita a inserção das funcionalidades dos arcos inibidor e

habilitador e temporização que ampliam o poder de modelagem da rede de Petri. Foram apresentados os conceitos de condições e eventos, que são informações oriundas do ambiente.

Toda essa fundamentação serve de embasamento para entendimento da aplicabilidade das redes de Petri e definição do modelo de rede de Petri interpretada para controle que será utilizada para a modelagem do controle de elevadores de passageiros. Apresenta funcionalidades e nível adequado de detalhamento para elaboração do modelo proposto nesse trabalho; modelo esse que será construído com base nos conceitos e dinâmicas do sistema e componentes do elevador, que serão apresentados no capítulo 5.

5 ELEVADORES DE PASSAGEIROS

O elevador de passageiro é um sistema cada vez mais presente no cotidiano das pessoas. Por ser um exemplo de sistema a eventos discretos, pode ser modelado utilizando as redes de Petri. Devido sua importância atual, sendo familiar e acessível a muitas pessoas, o controle automático de elevadores de passageiros foi escolhido como objeto de aplicação de projeto de controle a eventos discretos. A modelagem será feita utilizando as redes de Petri interpretadas para controle definida na seção 4.3.

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos básicos de um sistema de elevadores tais como: conceito, estrutura, principais dispositivos, lógicas de atendimento e dinâmica de controle. O intuito é descrever o sistema e seus componentes para elaboração do modelo em redes de Petri do controle do elevador.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: na seção 5.1 é apresentado um breve histórico, conceito base, normas e terminologia dos elevadores de passageiros; na seção 5.2 são descritos seus principais componentes; na seção 5.3 é descrita a estrutura do controle do elevador e na seção 5.4 são apresentados os comentários finais sobre o capítulo.

5.1 Introdução aos elevadores de passageiros

O conceito do elevador é simples – um compartimento preso a um sistema de elevação. Existem dois tipos predominantes de elevadores utilizados hoje em dia: hidráulico e de tração. Elevadores de tração são os mais comuns, sendo utilizados em grandes edificações comerciais ou residenciais. São muito mais versáteis e atingem maiores velocidades que os hidráulicos, com a vantagem de possuírem sistemas de segurança mais robustos. Os hidráulicos, para atendimento de vários pavimentos, possuem como desvantagem o tamanho e espaço do sistema de bombeamento e do cilindro, e ter limitações de velocidade e maior custo de instalação. No entanto, os elevadores hidráulicos possuem maior eficiência que os de tração e por isso são mais utilizados para uso em pequenos prédios.

5.1.1 Breve histórico

A base dos elevadores atuais é atribuída a Elisha Graves Otis, devido ao desenvolvimento do freio de segurança em 1852. Na época, não se podia imaginar como esse simples dispositivo de segurança iria alterar de forma tão profunda a estrutura das cidades, uma vez que permitiria sua verticalização [9]. Ao longo dos anos, os elevadores vêm sendo aprimorados por muitos outros inventores, entre eles se encontra Alexander Miles, desenvolvedor de mecanismos mais seguros de abertura e fechamento das portas da cabina do elevador, até alcançar os modelos atuais de elevadores com melhor desempenho, segurança e estética.

Hoje existem reguladores e esquemas de comando para controlar cuidadosamente a velocidade da cabine em qualquer situação. Botões têm dado lugar a teclados. Virtualmente todos os elevadores comerciais operam automaticamente, e a era do computador trouxe com os microchips a capacidade de operar um conjunto de elevadores com horário prefixado, maximizando a eficiência e segurança [11].

5.1.2 Terminologia

Antes de apresentar o funcionamento do elevador, é importante estabelecer algumas terminologias, retiradas da Norma NBR NM 207 [10], importantes para o entendimento do sistema:

Para-choque: Batente resiliente no final do percurso constituído de meios de retardamento usando fluidos ou molas (ou outro meio similar).

Elevador de tração: Elevador cujos cabos são acionados por atrito nas ranhuras da polia motriz da máquina.

Armação do carro ou do contrapeso: Estrutura metálica sustentando a cabina ou os pesos do contrapeso, ligado aos meios de suspensão. Esta armação pode ser integrada com o fechamento da cabina

Cabina: A parte do elevador que transporta passageiros e objetos.

Carga nominal: Carga para o qual o equipamento foi construído.

Contrapeso: Massa que assegura a tração.

Casa de máquinas: Recinto no qual estão instaladas as máquinas e o equipamento relacionado a elas.

Casa de polias: Recinto que não contém a máquina e no qual estão localizadas as polias e no qual podem também estar localizados o limitador de velocidade e o equipamento elétrico.

Guias: Os componentes rígidos destinados a manter a direção do movimento do carro ou do contrapeso.

Caixa: Espaço onde o carro e o contrapeso viajam. Este espaço é limitado pelo fundo do poço, as paredes e o teto.

Limitador de velocidade: Dispositivo que, quando o elevador atinge uma velocidade predeterminada, causa a parada do elevador e, se necessário, aciona o freio de segurança.

Máquina: unidade que aciona e para o elevador.

Nivelamento: Operação que proporciona precisão de parada nos pavimentos.

Freio de segurança instantâneo com efeito amortecido: Freio de segurança no qual a ação de freada plena nas guias é quase imediata, mas a reação no carro ou no contrapeso é limitada pela presença de um sistema intermediário de amortecimento.

Freio de segurança instantâneo: Freio de segurança no qual a ação de freada plena nas guias é quase imediata.

Freio de segurança progressivo: Freio de segurança cujo retardamento é obtido pela ação de freada nas guias e para o qual são feitas prescrições especiais de modo a limitar as forças no carro ou no contrapeso a um valor admissível.

Freio de segurança: Dispositivo mecânico para freiar e manter travado nas guias o carro do elevador ou o contrapeso em caso de sobrevelocidade no sentido de descida ou ruptura da suspensão.

Poço: Parte da caixa situada abaixo do nível de parada mais baixo servido pelo elevador

Renivelamento: Operação que permite corrigir a posição de parada durante o carregamento e descarregamento, se necessário, por meio de movimentos sucessivos (automático ou manual).

Velocidade nominal: Velocidade do carro para a qual o equipamento foi construído.

Zona de destravamento: Zona que se estende acima e abaixo do piso de um pavimento na qual o piso da cabina deve situar-se para que a porta de pavimento correspondente seja destravada.

5.1.3 Estrutura mecânica do elevador

Em um esquema básico de funcionamento do elevador de tração, descrito em [11], a cabina é montada sobre uma plataforma, em uma armação de aço constituída por duas longarinas, que são conjuntos metálicos em forma de cadeiras acopladas lateralmente, fixadas em cabeçotes (superior e inferior). O conjunto cabina, armação e plataforma é denominado carro.

O contrapeso consiste em uma armação metálica formada por duas longarinas e dois cabeçotes, onde são fixados pesos (intermediários), de tal forma que o conjunto tenha peso total igual ao do carro acrescido de 40 a 50% da capacidade licenciada. A escolha desse percentual de carga se dá pelo valor médio normalmente transportado. Assim quando o carro e o contrapeso ficam balanceados o torque necessário do motor é menor o que torna o sistema mais eficiente.

Tanto a cabina como o contrapeso deslizam pelas guias (trilhos de aço do tipo T), através de corrediças. As guias são fixadas em suportes de aço, os quais são chumbados em vigas de concreto ou de aço na caixa. O carro e o contrapeso são suspensos por cabos de aço ou novos elementos de tração que passam por polias, de tração e de desvio, instaladas na casa de máquinas ou na parte superior da caixa.

O movimento de subida e descida do carro e do contrapeso é proporcionado pela máquina de tração, que imprime à polia, a rotação necessária para garantir a velocidade especificada para o elevador. A aceleração e o retardamento ocorrem em função da variação de corrente elétrica no motor. A parada é possibilitada pela ação de um freio instalado na máquina.

5.2 Descrição dos equipamentos

Os equipamentos básicos para operação normal do elevador são: máquina de tração, freio, portas automáticas, botões de comando e dispositivos de detecção. Além destes, existem vários

outros dispositivos importantes para o funcionamento do elevador tais como: dispositivos de segurança (limitadores de velocidade, freio de segurança, para-choque etc.), dispositivos de monitoração (displays, leds para sinalização, alarmes etc.) e acessórios (botão de fechamento, botão de reabertura, interfone, ventilador etc.).

O modelo do controle do elevador que será apresentado neste trabalho abrange somente os equipamentos básicos; assim, somente estes serão descritos mais detalhadamente. A inserção dos demais equipamentos na modelagem em redes de Petri é sugerida para trabalhos futuros.

5.2.1 Máquina de tração

Responsável pelo movimento do elevador, a máquina de tração é ligada à cabina do elevador e ao contrapeso através dos cabos de aço de tração [12]. Os motores das máquinas de tração dos elevadores podem ser de corrente alternada (CA) ou de corrente contínua (CC - fornecida por conversores estáticos que substituem os motores geradores), sendo a energia elétrica fornecida pela rede do edifício.

São quatro as configurações encontradas em elevadores de passageiros [12]:

- (a) Motor de corrente alternada (CA) - uma velocidade;
- (b) Motor de corrente alternada (CA) - duas velocidades;
- (c) Motor de corrente alternada (CA) - com controle eletrônico de velocidade;
- (d) Motor de corrente contínua (CC).

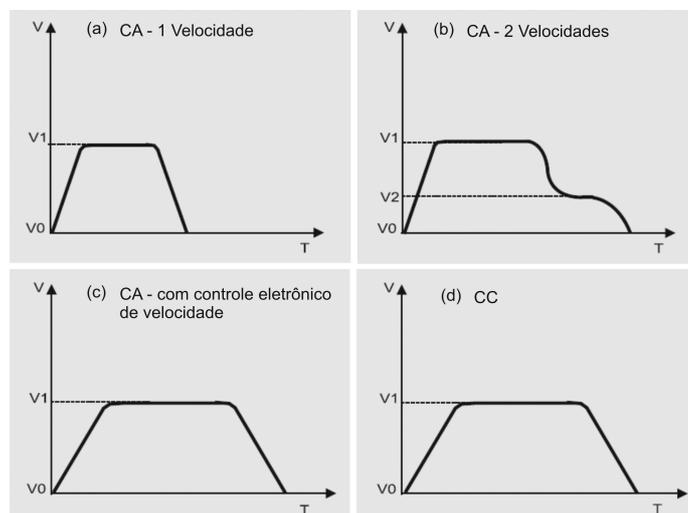


Figura 5.1 - Curvas de velocidade dos tipos de acionamento [12].

(a) Motor de corrente alternada (CA) - uma velocidade

O elevador parte da velocidade zero (V0) diretamente para a sua velocidade nominal (V1), invertendo o processo na frenagem (figura 5.1.a). Utilizado no passado para acionamento de elevadores de passageiros, sua aplicação se restringe hoje ao acionamento de equipamentos de transporte vertical de cargas como monta-cargas. Este acionamento não proporciona qualquer

parâmetro de conforto e de consumo de energia exigidos pelo mercado. Não apresenta também compatibilidade com os modernos recursos de hardware e software dos sistemas de comando microprocessados.

(b) Motor de corrente alternada (CA) - duas velocidades

O elevador parte da mesma forma que o motor CA de 1 velocidade, mas antes da frenagem final reduz sua velocidade a $\frac{1}{4}$ da velocidade nominal (figura 5.1.b). Esta solução tem parâmetros de conforto e número de partidas por hora que restringem sua aplicação a edifícios de pequeno e médio porte ou média intensidade de tráfego.

(c) Motor de corrente alternada (CA) - com controle eletrônico de velocidade

O acionamento é feito por tensão e frequência variáveis “VVVF” (variable voltage, variable frequency). Através de um circuito tiristorizado, a velocidade é controlada em função de um padrão desejado; o que permite obter aceleração (V0 para V1) e desaceleração (V1 para V0) suaves do carro, evitando-se assim o salto na passagem da velocidade alta para zero ou vice-versa. Perfeitamente integrada aos mais modernos recursos de hardware e software de comando, controle de velocidade e despacho, permite operar em condições ideais e em todas as velocidades, alcançando 10,00 m/s.

O motor CA com controle eletrônico de velocidade é a solução tecnológica mais avançada para acionamento de equipamentos de transporte vertical, aliando alto grau de conforto à economia de energia. Supera em até 60% a redução na demanda por energia quando comparada aos sistemas de frenagem dinâmica aos quais veio substituir. Aplica-se a edifícios de pequeno, médio e grande porte ou qualquer intensidade de tráfego. Por ser uma tecnologia atual mais utilizada por sua eficiência e controlabilidade, é o mecanismo de acionamento utilizado no modelo de controle do elevador do capítulo 6.

(d) Motor de corrente contínua (CC)

A diferença dos motores CC para os motores CA com VVVF consiste no fato de que nos motores CC o controle da aceleração e desaceleração é possibilitado pela existência de conversores estáticos, Ward-Leonard Estático, ou motogeradores, Ward-Leonard Clássico, que fornecem a tensão variável (corrente contínua) ao motor de tração do elevador. Esta é hoje uma solução restrita que vem sendo substituída pela aplicação de acionamento VVVF.

A tabela 5.1 apresenta as faixas alcançáveis pelos diferentes tipos de acionamento apresentados.

Tabela 5.1 -Faixas de velocidade dos tipos de acionamento [12].

Tipos de Acionamento	Faixa de Velocidade (m/s)
CA - 2V	0,75 - 1,00
VVVF	0,75 - 10,00
CC	1,00 - 6,00

5.2.2 Freio

O freio tem a função de parar o elevador e mantê-lo estacionado nos pavimentos. Nos elevadores mais modernos, o quadro de comando com inversor de frequência desacelera o carro e o freio atua mantendo o equipamento estacionado. Atualmente, os novos modelos de freios dispensam o uso de engrenagem e possuem menos partes móveis, proporcionando maior confiabilidade, redução dos custos com a substituição de peças e consumo de energia [12]. Para fins de segurança o relé eletromecânico do freio é do tipo normalmente fechado, para que em caso de falta de energia ou de falha elétrica o freio fique acionado travando o movimento.

5.2.3 Portas automáticas

As portas automáticas de um elevador evitam quedas no vão aberto, cortes e esmagamentos [10]. Os elevadores usam dois diferentes conjuntos de portas: portas de acesso a cabina e aos andares. Podem ser de abertura central ou abertura lateral, em ambos os casos as portas do pavimento e da cabina devem ter o mesmo tipo de abertura. As portas da cabina são operadas por um motor elétrico, que é conectado ao computador do elevador. O computador aciona o motor para abertura das portas quando o carro chega ao pavimento e fecha as portas antes do carro se movimentar novamente. Todos os elevadores modernos de passageiros têm um sistema de sensor de presença que evita que as portas fechem com alguém ou alguma coisa entre elas.

No caso de porta com abertura central, existe um elemento mecânico chamado de rampa articulada posicionada no meio da porta que é acoplada por correias ao eixo do motor da porta. Durante o acionamento da abertura da porta o motor da porta produz o movimento da correia que mecanicamente aciona a rampa que destrava as portas dos andares no mesmo instante em que produz o acoplamento mecânico entre as portas da cabina e do andar. O conjunto motor e o conjunto mecânico da rampa articulada são denominados de dispositivo operador de portas.

Assim, as portas dos andares somente se abrem caso o carro esteja posicionado no pavimento, isto é, na zona de destravamento, caso contrário a rampa articulada não atua. Isso impede que as portas dos andares se abram para o vão vazio. Outro quesito importante é que o elevador somente se movimenta com a confirmação de fechamento de todas as portas dos andares, obtida com utilização de sensores mecânicos.

5.2.4 Comandos

O sistema de comando influencia sensivelmente no rendimento da instalação. A finalidade do comando é estabelecer a prioridade e o sentido de atendimento às chamadas de acordo com as características do edifício. Para isso, são instalados na casa de máquinas painéis de comando

e de despacho que controlam a partida, a parada, o sentido de movimento do carro, a seleção das chamadas e outras funções correlatas.

5.2.4.1 Princípios de atendimento

Os algoritmos de atendimento mais conhecidos são baseados nos princípios coletivo e seletivo [12]. As chamadas internas, denominadas chamadas de cabina, sempre são atendidas pelo princípio coletivo. São lógicas de comando automático caracterizadas pela existência de botões de chamadas de cabina que indicam o andar de destino e um único botão de chamada instalado em cada andar, ambos conectados ao controle local de forma que as chamadas fiquem nele registradas.

Princípio coletivo: o elevador efetua as paradas sequencialmente procurando a chamada do pavimento mais próximo e na mesma direção do movimento.

Princípio seletivo: o elevador seleciona o mais alto ou mais baixo pavimento que foi realizada a chamada definindo qual será o próximo andar a ser atendido em um dado momento.

5.2.4.2 Comando automático coletivo

É o comando automático caracterizado pela existência de botões de chamada, um para cada pavimento, instalados na cabina, e por possuir um único botão de chamada instalado em cada pavimento, todos ligados ao painel central, de tal maneira que todas as chamadas fiquem nele registradas. O carro vai efetuando as paradas em ordem seqüencial, independentemente da ordem em que as chamadas tenham sido registradas, e prossegue no sentido do movimento inicial atendendo a todas as chamadas feitas.

Aplica-se a edifícios de poucos andares (de 2 até 3 pavimentos) e pouco movimento, em que o tráfego predominante seja entre andares, como estabelecimentos comerciais e industriais pequenos.

5.2.4.3 Comando automático coletivo seletivo na descida

É o comando automático coletivo no qual as chamadas do botão do pavimento somente são atendidas quando o elevador se movimenta em sentido descendente, a partir do último andar superior com chamada. Aplica-se a edifícios em que o movimento principal é constituído pelo tráfego entre o térreo e os demais pavimentos, sem que haja tráfego apreciável entre os próprios pavimentos. É, portanto, o sistema ideal para edifícios residenciais.

Por ser um dos mais utilizados, será a lógica de comando que será implementado no modelo em redes de Petri interpretado para controle automático do elevador apresentado no capítulo 6.

5.2.4.4 Comando automático coletivo seletivo na subida e na descida

É o Comando automático coletivo no qual dois botões, um de “subida” e um de “descida” estão disponíveis nos pavimentos intermediários, e um botão nos pavimentos extremos. Neste sistema de comando, as chamadas de pavimento para subir são selecionadas separadamente das chamadas de pavimento para descer, sendo atendidas primeiramente todas as chamadas em um dos sentidos para depois serem atendidas as de sentido oposto.

É aplicado em edifícios onde o fluxo predominante seja entre os andares, tais como escritórios em geral ou de uma única entidade, repartições públicas etc. Em edifícios residenciais se aplica ao pavimento térreo sempre que existirem pavimentos inferiores de garagem.

5.2.4.5 Comando em grupo

É o comando automático para grupo de dois ou mais elevadores que operam em conjunto e que tenham o mesmo número de paradas, entradas no mesmo hall, somente um pavimento principal de acesso e a mesma destinação de uso, não incluindo elevadores isolados.

Nos mais simples, o comando, além de efetuar a seleção de chamadas de descida ou chamadas de subida e descida, seleciona também qual o elevador deverá atender a determinada chamada de pavimento. Estes sistemas são indicados para qualquer tipo de edifício, sempre com melhor rendimento para o fluxo de tráfego. Nos sistemas mais complexos, além das seleções acima descritas, o comando determina nas horas de pico, quais são as chamadas prioritárias (chamadas de pavimento principal, chamadas de descida, chamadas de subida etc.). Além disso, esses comandos têm extrema flexibilidade, adaptando-se às mais variadas situações de tráfego. São indicados para edifícios com grande fluxo de tráfego.

5.2.5 Dispositivos de detecção do elevador

Para controlar qualquer sistema, são necessários dispositivos que meçam as grandezas e condições do sistema e a convertam em sinais elétricos que sejam processados pelos controladores (CLPs, microcontroladores ou microprocessadores embutidos) através de módulos de entrada. Para isso são utilizados os sensores ou detectores que são definidos como dispositivos que recebem e respondem a um estímulo ou um sinal.

Os sensores artificiais são aqueles que respondem com sinal elétrico a um estímulo ou um sinal. Um transdutor, por sua vez, é um dispositivo que converte um tipo de energia em outra não necessariamente em um sinal elétrico. Muitas vezes, um sensor é composto de um transdutor e uma parte que converte a energia resultante em um sinal elétrico. Uma maior quantidade de sensores possibilita um melhor controle do sistema.

Como a função básica do elevador é o transporte de passageiros, os sensores mais importantes são o de velocidade e posição. Outros sensores também importantes são: o sensor de presença da porta, que evita que a mesma se feche, esmagando o passageiro e a chave de fim de curso, que confirma o fechamento das portas para evitar a movimentação do elevador com as portas abertas. Alguns elevadores atuais possuem também sensores de peso da cabine que ajudam no controle do elevador a fim de evitar sobrecarga e otimizar o tráfego. No modelo em redes de Petri do controle do elevador, somente serão utilizados os sensores de posição, velocidade e presença que serão descritos a seguir.

5.2.5.1 Sensor óptico de posição e velocidade (Encoder)

Para medição de posição e velocidade, são utilizados encoders que são transdutores de movimento capazes de converter movimentos lineares ou angulares em informações elétricas que podem ser transformadas em informações binárias e trabalhadas por um programa que converta as informações passadas em algo que possa ser entendido como distância, velocidade etc. Em outras palavras, o encoder é uma unidade de realimentação que informa sobre posições atuais de forma que possam ser comparadas com posições desejadas e seus movimentos sejam planejados [13].

Os encoders possuem internamente um ou mais discos (máscaras) perfurados, que permitem, ou não, a passagem de um feixe de luz infravermelha, gerado por um emissor que se encontra de um dos lados do disco e captado por um receptor que se encontra do outro lado do disco. Dessa forma a velocidade ou posicionamento é registrado contando-se o número de pulsos gerados. A quantidade de pulsos em uma volta, nos encoders rotativos, demonstra a relação impulso/volta do mesmo. Quanto maior for esta relação maior a precisão obtida.

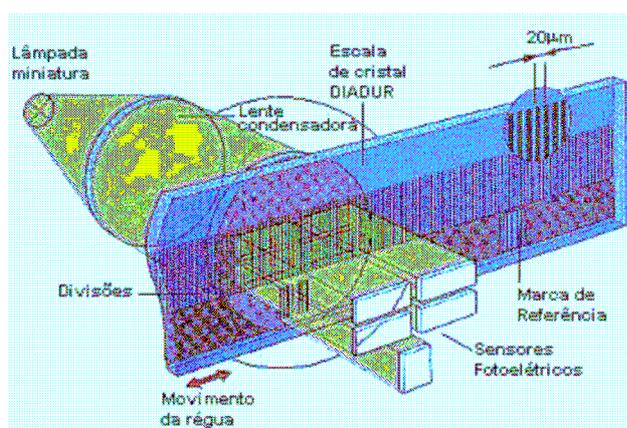


Figura 5.2 - Esquema ilustrativo do encoder linear [13].

Os sensores de posição e velocidade podem, basicamente, ser divididos em: (i) lineares (figura 5.2), também conhecidos como régua digital, que são instalados diretamente no local onde se realiza o movimento e fornecem medidas de posicionamento direto e instantâneo; (ii) rotativos, que são acoplados diretamente ao eixo de motores para medir a sua posição.

O sensor óptico, embora seja mais utilizado no controle de posição, também é utilizado para medir velocidade, uma vez que medindo a distância total percorrida (através da contagem dos pulsos na saída) e o tempo necessário para esta distância ser percorrida, consegue-se calcular a velocidade. São muito precisos, e apresentam longa vida útil, se alguns cuidados elementares forem tomados em relação à sua utilização. No caso base do elevador do capítulo 6, o sensor óptico utilizado será o rotativo para controle da velocidade do inversor de frequência.

5.2.5.2 Sensor de presença da porta da cabina

Os sensores de presença têm como objetivo detectar a presença de pessoas e objetos que possam vir a obstruir o fechamento das portas da cabina. São sensores infravermelhos ativos (como o enconder) do tipo de sistema por barreira, onde o elemento transmissor de irradiação infravermelha é alinhado frontalmente a um receptor infravermelho, a uma distância pré-determinada para cada tipo de sensor. Se ocorrer alguma interrupção desta irradiação, ocorrerá um chaveamento eletrônico, pois não haverá sinal recebido pelo receptor.

5.2.5.3 Sensores mecânicos (Chaves de fim de curso)

Os sensores mecânicos monitoram movimentos, posições ou presença usando recursos mecânicos como, por exemplo, chaves (switches) que emitem um sinal elétrico (ou pneumático) quando há um contato físico entre o objeto a ser detectado e o mecanismo de detecção. Possui uma construção simples e robusta com funções de contato normalmente aberto, normalmente fechado ou reversivo. Nessa categoria, inclui-se os micro-switches e chaves de fim-de-curso [13].

É possível usar esses sensores de diversas formas: para detectar a abertura ou fechamento de uma porta, a presença de um objeto em um determinado local, ou ainda quando uma parte mecânica de uma máquina está numa certa posição. Uma variação desse tipo de sensor é o sensor de “fim-de-curso” que, conforme o nome indica, detecta quando uma parte mecânica de um dispositivo atinge seu deslocamento máximo.

Sensores mecânicos podem ainda ser utilizados para posicionamento da cabina do elevador e para a confirmação do fechamento ou abertura de portas. Especificamente confirmam o fechamento das portas dos andares e da cabina e a abertura da porta da cabina.

5.2.5.4 Sensores magnéticos

Os sensores magnéticos possuem o mesmo princípio de funcionamento que os mecânicos, no entanto, captam a variação do campo magnético pela proximidade de um ímã. Funciona como uma chave que quando o sensor magnético fica próximo de um ímã, a variação do campo

magnético gera um sinal que muda seu estado de fechado para aberto ou vice versa. É o mais utilizado atualmente para o posicionamento dos elevadores, pelo seu baixo custo, durabilidade, robustez e precisão.

Os sensores magnéticos são muito utilizados no posicionamento do cabina do elevador. Os sensores ficam posicionados no teto do carro e ímãs são posicionados na guia do elevador em distancias pré-estabelecidas no projeto construtivo do elevador. Numa configuração básica, para operação normal, são utilizados três sensores magnéticos, um para cada uma das seguintes aplicações: confirmar a posição na zona de destravamento, confirmar a posição de início de desaceleração de subida e confirmar a posição de início de desaceleração de descida.

5.2.6 Posicionamento dos componentes

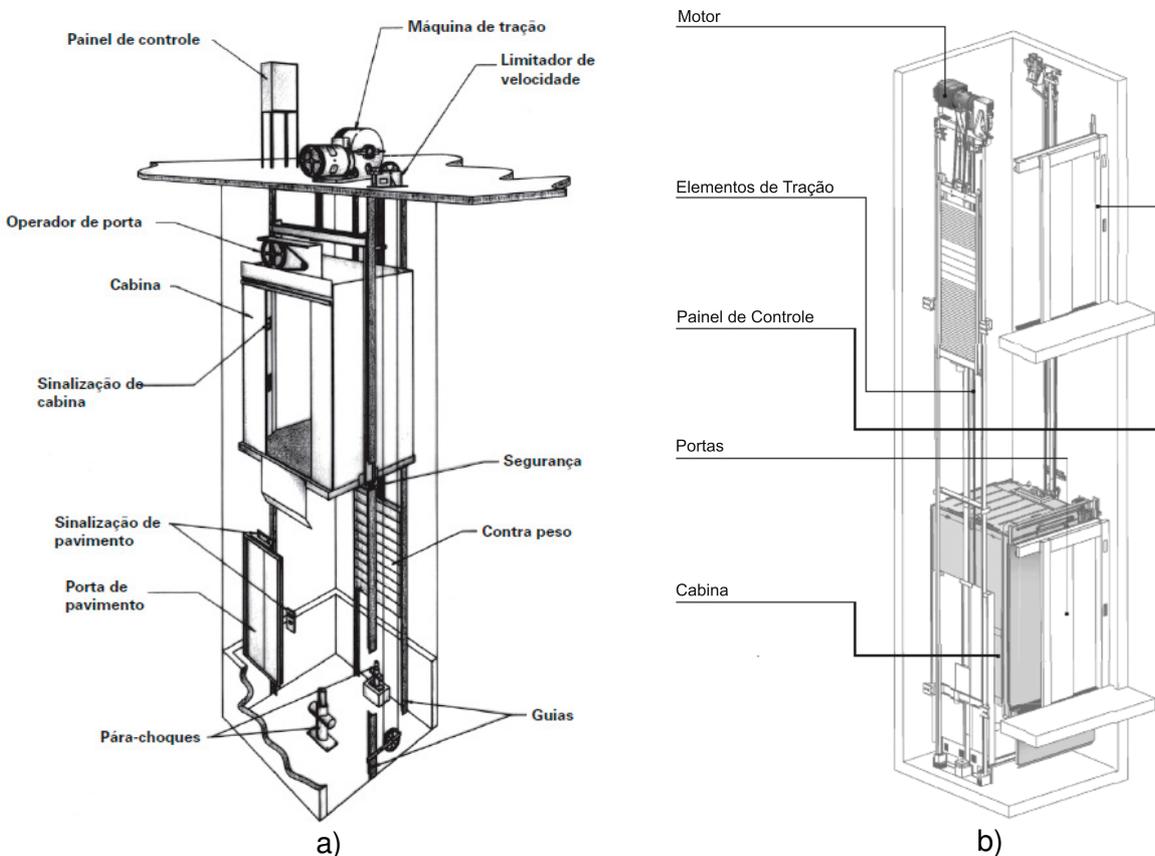


Figura 5.3 - Esquemas das disposição usuais dos componentes do elevador: (a) com casa de máquinas; e (b) sem casa de máquinas [12].

Usualmente existem duas configurações possíveis do elevador de passageiros: com casa de máquinas (figura 5.3.a) e sem casa de máquinas (figura 5.3.b). A construção de edifícios sem casa de máquinas para instalação de elevadores se tornou possível para edifícios residenciais de médio porte e edifícios comerciais de pequeno porte. Nessa configuração, os equipamentos de tração passam a ser instalados na parte da extremidade superior da caixa, enquanto que os dispositivos de controle se distribuem pela cabina, botoeiras de chamadas dos pavimentos e interior do batente da porta do último pavimento. Nestas instalações o contrapeso está localizado normalmente ao lado do carro [12].

5.3 Estrutura de controle do elevador

O controle de um único elevador é denominado controle local do elevador. Este implementa o sistema de movimentação da cabina, controlando o motor do elevador, motor da porta, controle de velocidade e aceleração, displays de apresentação de estados, entre outras interfaces. Os controladores locais do elevador são comumente implementados por controladores lógicos programáveis (CLP) ou dispositivos microcontrolados [14]. Na figura 5.4 é mostrado um esquema básico de um sistema de controle.

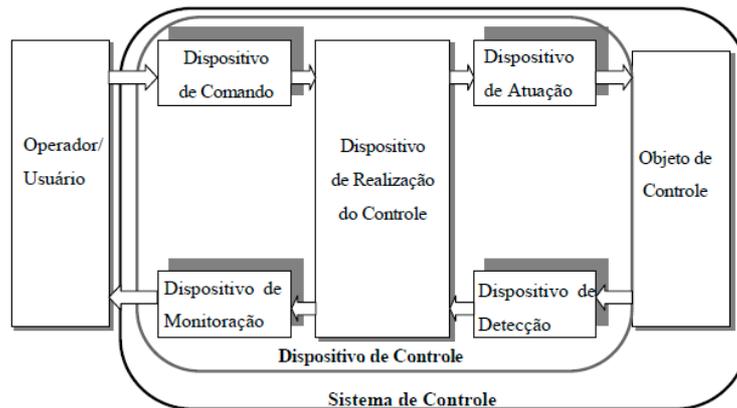


Figura 5.4 - Esquema de um sistema de controle [14].

Os dispositivos existentes no sistema de elevadores podem ser classificados de acordo com a tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Classificação dos dispositivos de um elevador [14].

Classificação	Dispositivos
Comando	Botões (cabina e andar)
Atuação	Máquina do elevador, atuadores das portas, ventilador de cabina
Detecção	Fotocélulas, detectores do peso nas cabinas, detectores de posição e velocidade, chaves de fim de curso e sensores de presença
Realização	Controlador lógico programável, computador e microprocessadores embutidos
Monitoração	Sinalizadores de posição e direção, sinalizadores de registro e comando (cabina e andar), alarmes sonoros, etc.

5.3.1 Descrição do controle básico da operação normal de um elevador

Para controlar um elevador é necessário obter toda informação relevante sobre seu estado atual e acionar o motor o necessário para posicionar o carro onde ele deve estar. Para isso é necessário observar três questões:

- Qual é o destino dos passageiros?
- Onde está posicionado cada pavimento?
- Qual é a posição atual do carro?

A primeira pergunta é respondida com auxílio dos botões de chamadas existentes na cabina e nos andares, que quando apertado registram a chamada. As demais perguntas são respondidas com sensores magnéticos (5.2.5.4) que definem o posicionamento do carro (hoje em dia alguns

elevadores utilizam o sistema de posição ultra-sônico). Durante a movimentação, o computador varia a velocidade do motor desacelerando gradualmente até o alcance do andar de destino, permitindo assim uma viagem tranquila para os passageiros.

Em um edifício com muitos pavimentos, o computador tem de ter estratégias para movimentação mais eficiente possível dos carros. Antigamente a estratégia era evitar a reversão da direção do elevador até o atendimento do último pavimento com chamada registrada, e quando reverte o movimento anterior mantém o mesmo padrão. Essa lógica funciona bem para um atendimento rápido, mas é muito inflexível. Algoritmos mais avançados levam em consideração a configuração do tráfego de passageiros daquela instalação. Em um sistema de carros múltiplos a movimentação do carro é baseada também na posição dos demais.

Deve-se também considerar o controle automático das portas que devem garantir a segurança da entrada e saída dos passageiros. Para isso, a condição básica é que todas as portas, dos pavimentos e andar, estejam fechadas quando o motor estiver acionado. Sua abertura somente é permitida após o motor estar desenergizado, o freio do motor travado e as portas destravadas por um dispositivo eletromecânico.

O controle então aciona o motor para abertura das portas da cabina que se mantêm abertas por um tempo mínimo. Depois que esse tempo é decorrido, caso haja alguma chamada, as portas se fecham. Para evitar esmagamentos pelas portas durante o fechamento, existem os sensores de presença (seção 5.2.5.2) que enviam um comando de reabertura das portas quando obstruídos. Confirmado o fechamento das portas da cabina e dos andares, o freio é destravado e o motor novamente acionado.

5.3.2 Etapas para o atendimento de Passageiros

A fim de descrever melhor o ciclo de atendimento e transporte dos passageiros, este foi dividido em oito etapas. Supondo um passageiro no andar X sendo transportado ao andar Y, o mecanismo de atendimento, transporte e chegada ao destino prossegue no formato apresentado na tabela 5.3.

Tabela 5.3 -Etapas de atendimento e transporte de passageiros.

<i>Etapas</i>	<i>Atividade</i>
1	O passageiro no andar X, pressiona o botão de chamada instalado no pavimento, que é registrada.
2	A chamada registrada é sinalizada ao usuário através de um sinal luminoso próximo ou acoplado ao botão.
3	O freio é destravado e o motor é acionado com aceleração constante até a chegada à velocidade limite. Sua rotação gera o movimento de subida ou descida da cabina, dependendo da posição em que se encontra em direção ao andar X.
4	O passageiro pode observar a posição e direção de movimento do elevador através de sinalizadores dos andares e sinalizadores de direção atualizados com o movimento do elevador.

Tabela 5.3 (Continuação) - Etapas de atendimento e transporte de passageiros.

Etapa	Atividade
5	Próximo ao andar X, o elevador inicia a frenagem de modo que o piso da cabina fique no mesmo nível que o do pavimento, sendo a sinalização desligada, o freio travado, as portas destravadas e abertas permitindo o acesso do passageiro.
6	O passageiro entra na cabina e pressiona o botão no painel referente ao andar Y, seu destino, que é sinalizado por um sinal luminoso próximo ou acoplado ao botão.
7	As portas são fechadas e travadas e o elevador inicia seu movimento em direção ao andar Y, com uma aceleração confortável ao passageiro, até alcançar a velocidade limite do elevador.
8	Próximo ao andar Y ele inicia o processo de frenagem, parada e abertura das portas permitindo o desembarque do passageiro.

5.4 Comentários Finais

Os conceitos abordados neste capítulo permitem entender o mecanismo de funcionamento dos elevadores de passageiros. Foi detalhado o funcionamento de seus dispositivos fundamentais e descrita a dinâmica simplificada da operação normal. Assim, tem-se a fundamentação necessária para elaborar a modelagem em redes de Petri interpretadas para controle do elevador de passageiros.

6 MODELAGEM EM REDES DE PETRI

Utilizando os conceitos de redes de Petri, apresentados nos capítulos 2 e 3, e a definição da rede de Petri interpretada para controle, apresentada no capítulo 4, pode-se modelar o sistema de controle supervisorio do elevador de passageiros. O sistema é baseado em um elevador com quatro pavimentos para aplicação residencial em condição normal de operação. Esse sistema pode facilmente ser estendido inserindo-se outros componentes, mecanismos e condições de operação.

A estruturação da rede de Petri utiliza o método de composição modular apresentado na seção 4.4.1, que consiste na criação de grafos com lugares, transições e estruturas de redes de Petri compartilhados e que são subgrafos da rede de Petri do sistema. Para facilitar o entendimento da dinâmica do sistema e a realização de futuras adaptações do controle supervisorio, a rede de Petri interpretada para controle do elevador foi construída representando o comportamento do sistema controlado.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: na seção 6.1 são apresentados os componentes e mecanismos do caso base a ser modelado; na seção 6.2 é feita uma modelagem simplificada utilizando um fluxograma para facilitar o entendimento do sistema do elevador; na seção 6.3 são feitas considerações sobre a simbologia do modelo e o método de modelagem; na seção 6.4 são apresentadas as redes de Petri interpretadas para controle do subsistema dos atuadores; na seção 6.5 são apresentadas as redes de Petri interpretadas para controle do subsistema da lógica de comando automático; por fim, na seção 6.6 são realizados os comentários finais sobre o capítulo.

6.1 Caso base do controle do elevador elétrico de passageiros para modelagem em redes de Petri

O sistema automático de elevador de passageiros escolhido para ser modelado em redes de Petri interpretadas para controle consiste em um elevador de quatro pavimentos (T, 1^o, 2^o e 3^o) de um prédio residencial. O algoritmo de comando para esse tipo de aplicação é o automático coletivo seletivo na descida, detalhado na seção 5.2.4.3. O acionamento é realizado por um motor CA com controle eletrônico de velocidade (seção 5.2.1). O acesso à cabina é por meio de portas automáticas com abertura central cuja operação, abertura e fechamento, é realizada pelo dispositivo operador de portas (seção 5.2.3). Na condição de elevador parado e sem chamadas, as portas se mantêm abertas. Para ilustrar o caso, é apresentado um esquema (figura 6.1) que apresenta os dispositivos de comando, atuação, detecção que serão inseridos no modelo.

Caso base para elaboração do modelo em rede de Petri interpretada para controle do elevador de passageiros

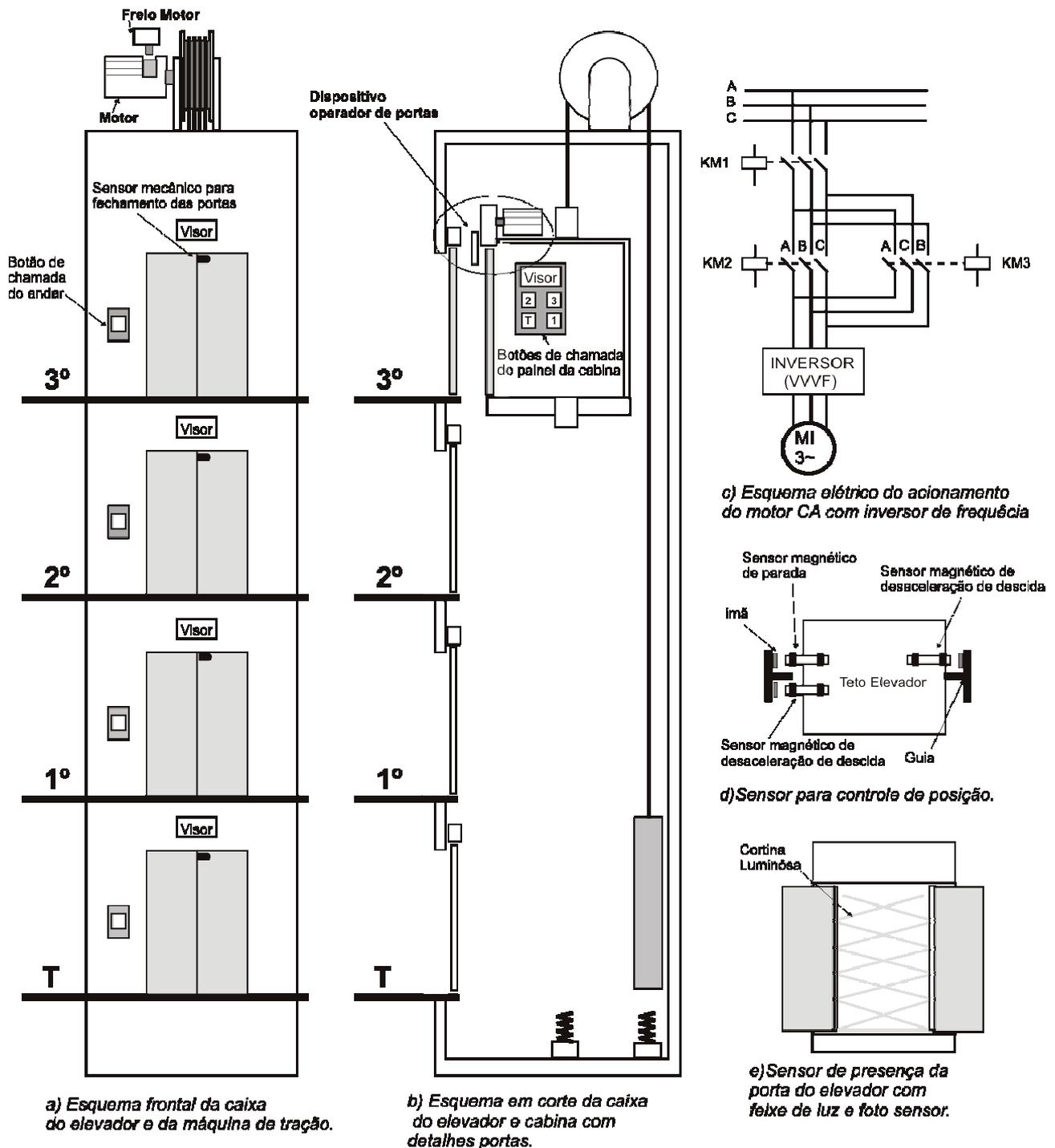


Figura 6.1 - Ilustração do caso base de elevador de passageiros a ser modelado.

O esquema elétrico de partida do motor CA trifásico controlado por inversor de frequência é apresentada na figura 6.1.c. O motor é alimentado por uma rede trifásica e apresenta três contatos normalmente abertos (NA):

- KM1 – Liga/ Desliga
- KM2 – Seqüência de fases para rotação de subida
- KM3 – Seqüência de fases para rotação de descida

Inicialmente os três contatos estão abertos, isto é, suas bobinas estão desenergizadas e o motor está desligado. A sequência para partida do motor consiste em, primeiramente, energizar a bobina do contato KM2, no caso de subida, ou do contato KM3 no caso da descida e então energizar a bobina do contato KM1. A sequência de desligamento consiste em, assim que o processo de frenagem do inversor de frequência terminar, desenergizar a bobina do contato KM1 e depois a bobina do contato KM2 ou KM3 que estiver energizada. Como o acionamento do motor não é o foco principal deste trabalho, este não será detalhado no modelo. As sequências de partida para subida ou descida e a de desligamento serão representadas no modelo como operações simples.

O dispositivo de comando é formado por quatro botões de chamada, cada um em um andar (T, 1º, 2º e 3º), posicionados próximos as portas (figura 6.1.a), e quatro botões de chamada na cabina, no painel de comando (figura 6.1.b). Para monitoração existem leds associados aos botões dos andares e do painel da cabina, que sinalizam que a chamada foi registrada e o atendimento está sendo providenciado, e o display na cabina que indica o número do andar onde a cabina está posicionada e a direção do movimento através de setas.

O dispositivo de detecção é formado pelos seguintes elementos:

- Seis chaves de fim de curso, sendo cinco para confirmação do fechamento das portas dos andares e da cabina e uma para confirmação da abertura da porta da cabina;
- Encoder linear para controle do inversor de frequência;
- Sensor magnético de parada;
- Sensor magnético de desaceleração de subida;
- Sensor magnético de desaceleração de descida;
- Sensor de presença nas portas da cabina (cortina luminosa).

As chaves de fim de curso (seção 5.2.5.3) para detecção do fechamento ficam posicionadas no contato entre as portas (figura 6.1.a) e a chave de fim de curso para detecção da abertura é posicionada no fim do trilho de abertura da porta da cabina. Os sensores magnéticos de parada, de desaceleração de subida e de descida, apresentados na seção 5.2.5.4, geram os sinais de entrada para controle de posição do elevador, cujo esquema é representado na figura 6.1.d. O sensor óptico de presença do tipo cortina luminosa, que se mantém ativado enquanto a porta estiver aberta, está apresentado na figura 6.1.e.

O controle do sistema é realizado utilizando um controlador lógico programável (CLP), que coordena a partida e a parada do motor do elevador, o acionamento do freio do motor, o acionamento do dispositivo operador de portas, o controle do display e também gerencia o registro das chamadas executando o algoritmo de controle automático escolhido.

Esse modelo simplificado corresponde à operação normal do elevador, não levando em consideração falhas do sistema, operação indevida do equipamento e rotinas de manutenção. A opção por quatro pavimentos se deve à configuração mínima que permite a análise do

deslocamento entre os andares intermediários, onde é necessária a definição do sentido de deslocamento de acordo com o posicionamento atual da cabina, as chamadas registradas e o algoritmo de atendimento. O caso residencial escolhido serve para facilitar o entendimento da dinâmica do sistema, já que é comum e de fácil acesso.

6.2 Modelagem simplificada da dinâmica do sistema de elevadores de passageiros

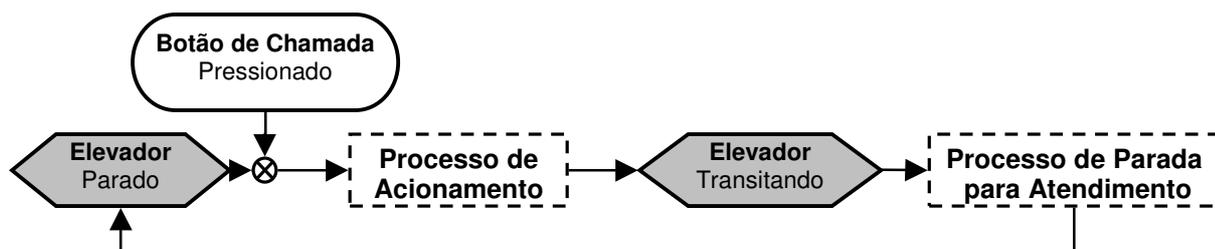


Figura 6.2 - Esquema do ciclo de transporte de passageiros.

O processo de transporte de passageiros pode ser genericamente dividido em dois grandes processos: o processo de acionamento, em que ocorre o acionamento do elevador para o trânsito vertical dos passageiros, e o processo de parada para atendimento, que consiste na parada do elevador e abertura das portas para entrada e saída de passageiros. Os processos apresentam comportamentos sequenciais, que dependem da condição do botão de chamada pressionado que inicia o processo de acionamento do elevador, seguido pelo processo de parada para atendimento, conforme ilustrado na figura 6.2.

6.2.1 Processo de acionamento

O fluxograma da figura 6.3 ilustra resumidamente o processo de acionamento, não levando em consideração os sensores e a lógica de comando automático específico. As condições iniciais do processo de acionamento são o “Botão de Chamada Pressionado” e o “Elevador Parado”. Esse processo pode ser dividido em duas partes:

- **Comando automático para acionamento**, que consiste no gerenciamento de registros de chamada e comparação da posição atual do elevador com a chamada, e apresenta três possíveis resultados:
 1. Se a posição do elevador for **IGUAL** à chamada, **esta é descartada e o elevador se mantém parado**;
 2. Se a posição do elevador for **MENOR** do que a chamada registrada, **inicia a seqüência de acionamento na direção de subida**;
 3. Se a posição do elevador for **MAIOR** do que a chamada registrada, **inicia a seqüência de acionamento na direção de descida**.
- **Seqüência de acionamento**, que consiste na seqüência das atividades executadas pelos atuadores do sistema para acionamento do elevador. É inicializado pelo comando automático

para início do acionamento, que pode ser no sentido de subida ou de descida, e apresenta a seguinte sequência de atividades:

- o dispositivo operador de portas fecha e trava as portas automáticas;
- o freio do motor é destravado;
- os contatos do circuito do motor são energizados para rotação de subida ou descida de acordo com o definido pela lógica;
- o inversor inicia a partida do motor.

Ao final da execução dessa sequência de atividades o elevador inicia o trânsito vertical na direção da chamada.

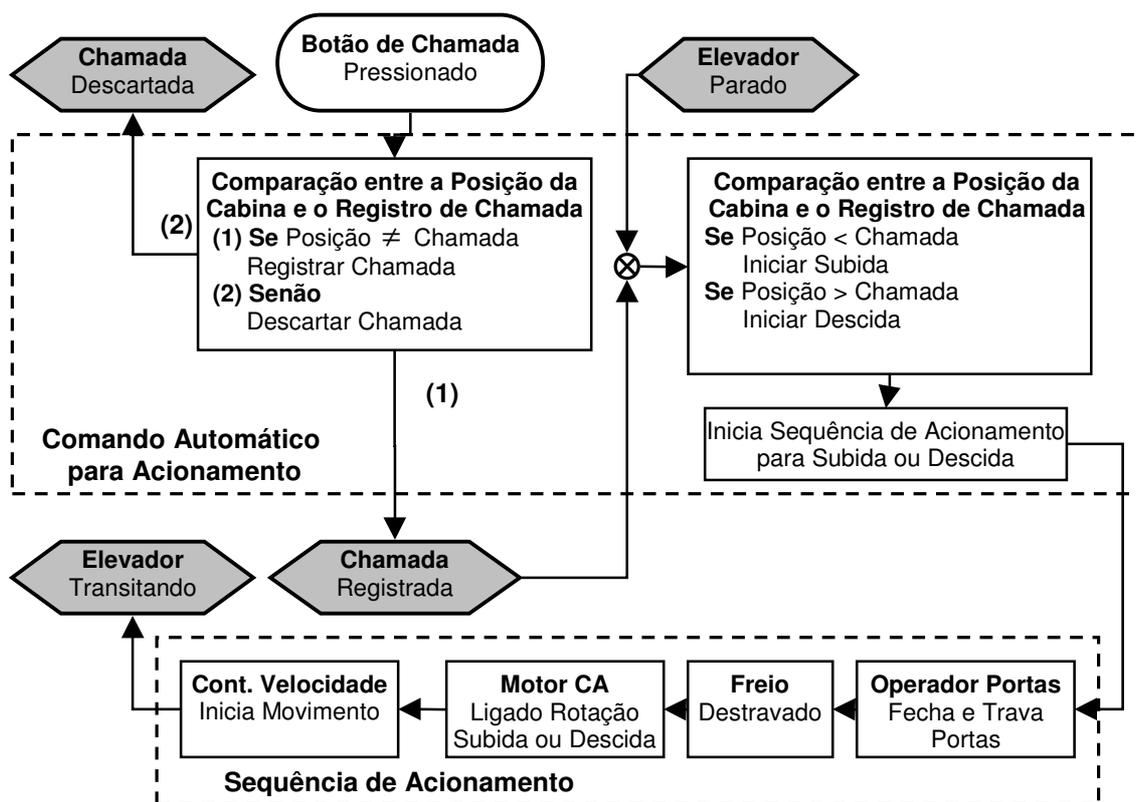


Figura 6.3 - Esquema ilustrativo do processo de acionamento.

6.2.2 Processo de parada para atendimento

O fluxograma da figura 6.4 ilustra resumidamente o processo de parada para atendimento, não levando em consideração os sensores e o comando automático específico. As condições iniciais do processo de parada para atendimento são o “Elevador Transitando” e a “Chamada Registrada”. Esse processo também pode ser dividido em duas partes:

- **Comando automático para parada**, que consiste no gerenciamento de registros de chamada e comparação da posição atual do elevador com a chamada registrada, e apresenta dois resultados possíveis:
 1. Se a posição do elevador for **IGUAL** à chamada registrada, **o registro da chamada é apagado e a sequência de parada para atendimento é iniciada;**

2. Se a posição do elevador for **DIFERENTE** da chamada registrada, **o elevador é mantido em trânsito.**

- **Sequência de parada para atendimento**, que consiste na sequência das atividades realizadas pelos elementos de atuação para parada do elevador para o atendimento aos passageiros. Apresenta a seguinte sequência de atividades:

- o inversor de frequência inicia frenagem elétrica do motor;
- os contatos do circuito do motor são desenergizados, desligando o motor;
- o freio do motor é travado;
- o dispositivo operador de portas destrava e abre as portas.

Ao final da execução dessa sequência de atividades o elevador permanece parado com as portas abertas para entrada e saída dos passageiros.

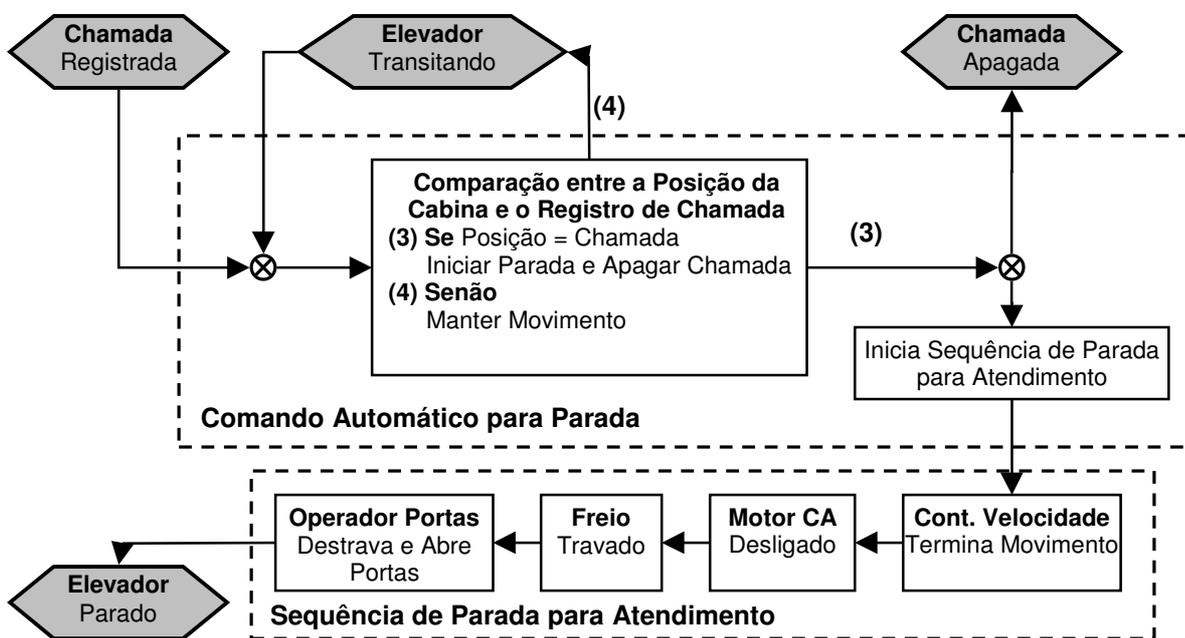


Figura 6.4 - Esquema ilustrativo do processo de parada para atendimento.

6.2.3 Processo de transporte de passageiros

Fazendo a junção dos dois processos obtém-se o processo completo de transporte de passageiros apresentado na figura 6.5. Pode-se notar, a partir dessa análise básica, que o sistema do elevador de passageiros pode ser decomposto em duas grandes partes:

Atuadores: composto pelos atuadores do sistema que executam as sequências de acionamento e parada para atendimento.

Lógica de comando automático: composto pelos dispositivos de comando e a lógica de comando automático definida.

A modelagem em rede de Petri interpretada para controle do elevador seguirá essa divisão com o detalhamento do modelo do caso base, onde serão adicionados os dispositivos de detecção, controles de posição e velocidade e os dispositivos de monitoramento.

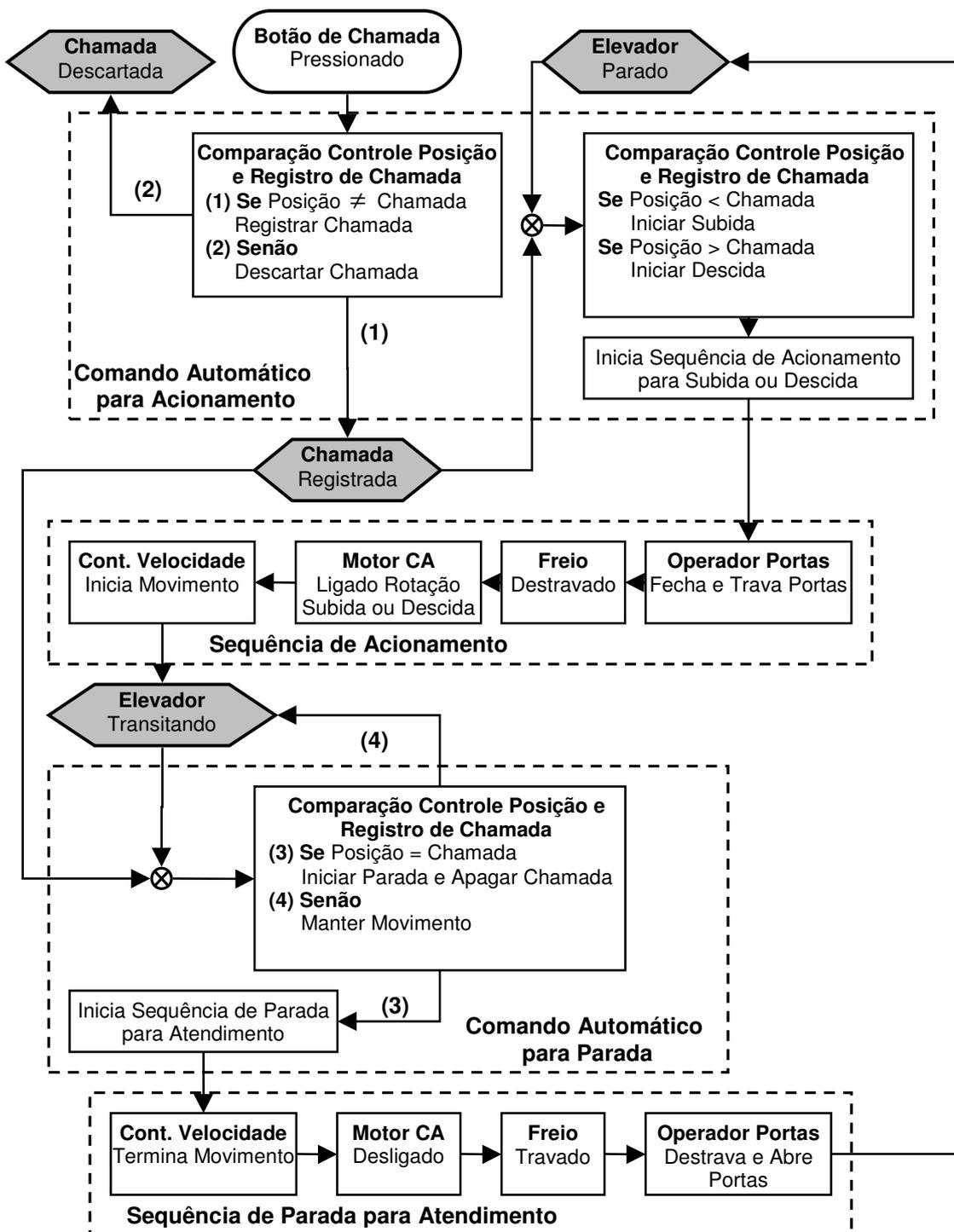


Figura 6.5 - Esquema ilustrativo do processo completo de transporte de passageiros.

6.3 Considerações da modelagem em redes de Petri interpretada para controle do elevador de passageiros

A rede de Petri do controle automático do elevador, seguindo os requisitos apresentados no caso base (seção 6.1), será dividida em dois subsistemas: atuadores e lógica de comando automático. Esses subsistemas serão formados pela junção de módulos relacionados aos seus componentes seguindo os princípios de composição modular apresentados na seção 4.4.2.

O **subsistema dos atuadores** consiste na representação em redes de Petri dos atuadores do sistema de elevador apresentados no caso base: o motor CA, o freio do motor e o dispositivo operador das portas. Ficam agregados a esse subsistema os grafos do controle da posição e velocidade do elevador.

O **subsistema da lógica de comando automático** contém o algoritmo de comando automático coletivo seletivo na descida acrescidos da representação dos botões de chamada da cabina e do andar.

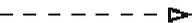
A rede de Petri interpretada para controle foi modelada visando representar o comportamento do sistema controlado, permitindo uma melhor visualização da dinâmica do sistema e acompanhamento do estado de seus componentes. A partir da modelagem do comportamento do sistema controlado é mais fácil fazer alterações no algoritmo de controle representado pela rede de Petri.

6.3.1 Etapas e predefinições da modelagem em redes de Petri interpretadas para controle

Inicialmente o sistema foi modelado por redes de Petri autônomas, definindo-se somente as transições, lugares e a marcação inicial no sistema. Ao término da modelagem autônoma foram adicionadas no modelo as ações de nível (A_i) e impulsionalis (B_i) aos lugares, e condições externas (C_j), eventos (e_j) e temporizações (d_j) às transições, como descrito na seção 4.3. Assim, foi obtido o modelo final em redes de Petri interpretadas para controle do elevador, apresentado nas seções 6.4 e 6.5. As redes de Petri foram desenvolvidas e simuladas no HPSim para verificação da lógica representada. O HPSim é um software livre para fins acadêmicos que simula redes de Petri e está disponível para download no site http://www.dee.ufrj.br/controle_automatgico/.

Para facilitar a visualização e entendimento do modelo, as ações possuem a mesma indexação que os lugares aos quais estão associados, assim como as condições externas, eventos e temporizações em relação às transições.

Tabela 6.1 - Simbologia dos elementos das redes de Petri interpretadas para controle do elevador.

Elemento	Simbologia
Lugar	 p_i, A_i, B_i
Lugar marcado	 p_i, A_i, B_i
Transição normal	 t_j, e_j, C_j
Transição t-temporizada	 t_j, e_j, C_j, d_j
Arco ordinário	
Arco inibidor	
Arco habilitador	

A simbologia padrão utilizada para os elementos está apresentada na tabela 6.1, baseada nas simbologias usuais descritas no capítulo 3. A única variante é o arco habilitador que é uma seta tracejada com triângulo vazio na ponta para facilitar a visualização no modelo. Os lugares p_{C1} , p_{C2} , p_{C3} e p_{C4} , apresentados na seção 6.4, representam as saídas do subsistema da lógica de comando automático para o subsistema dos atuadores. Devido à sua importância na dinâmica de controle, estes lugares serão coloridos para dar destaque, não apresentando diferença funcional em relação aos demais lugares

Como a rede de Petri é segura, o peso dos arcos é unitário. Na modelagem em redes de Petri interpretadas para controle, caso não seja explicitado a condição inicial das ações, condições externas e eventos, os seguintes valores serão definidos:

- Se e_j não for especificado, então $e_j = e$ (evento que sempre ocorre);
- Se C_j não for especificado, então $C_j = 1$;
- Se B_j não for especificado, não existirá ação impulsional;
- Se A_j não for especificado, não existirá ação de nível.

6.4 Subsistema dos atuadores

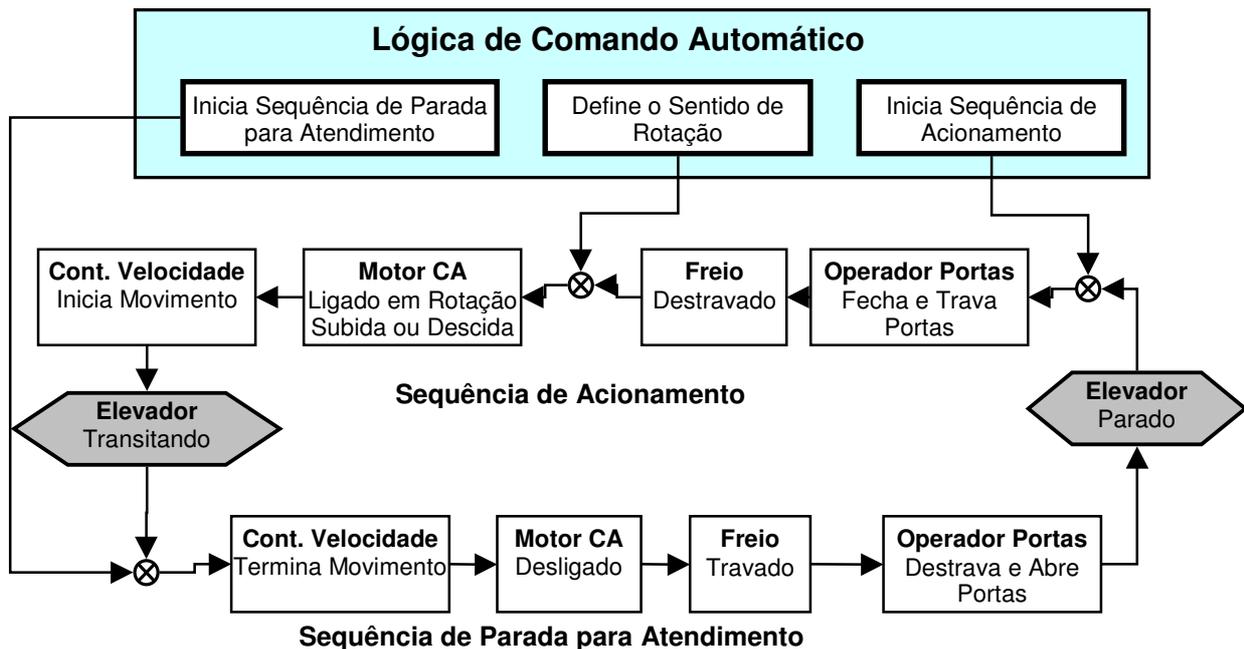


Figura 6.6 - Esquema ilustrativo da seqüência de atividades realizadas pelos atuadores.

Seguindo a divisão do sistema do elevador de passageiros definida na seção 6.3, pode-se elaborar um esquema, baseado no esquema da figura 6.5, que ilustra os componentes e condições que serão modeladas em redes de Petri referente ao subsistema de atuadores, apresentado na figura 6.6. Como a opção de estruturação da rede de Petri foi pelo método de composição modular (seção 4.4.1), baseando-se no caso base pré-estabelecido na seção 6.1, o grafo do subsistema dos atuadores foi construído a partir dos seguintes módulos:

- Módulo 1 - Motor CA;
- Módulo 2 - Freio do motor;
- Módulo 3 - Dispositivo operador das portas;
- Módulo 4 - Controle de velocidade;
- Módulo 5 - Controle de posição.

A rede de Petri interpretada para controle do subsistema dos atuadores resultante da fusão dos lugares, transições e estruturas de redes de Petri é apresentada na figura 6.7. A marcação desse grafo define o estado do elevador parado no andar Térreo sem chamadas registradas. A dinâmica representada nesse grafo será descrita nas seções subseqüentes a partir do detalhamento da dinâmica de cada um dos módulos que compõem o subsistema dos atuadores.

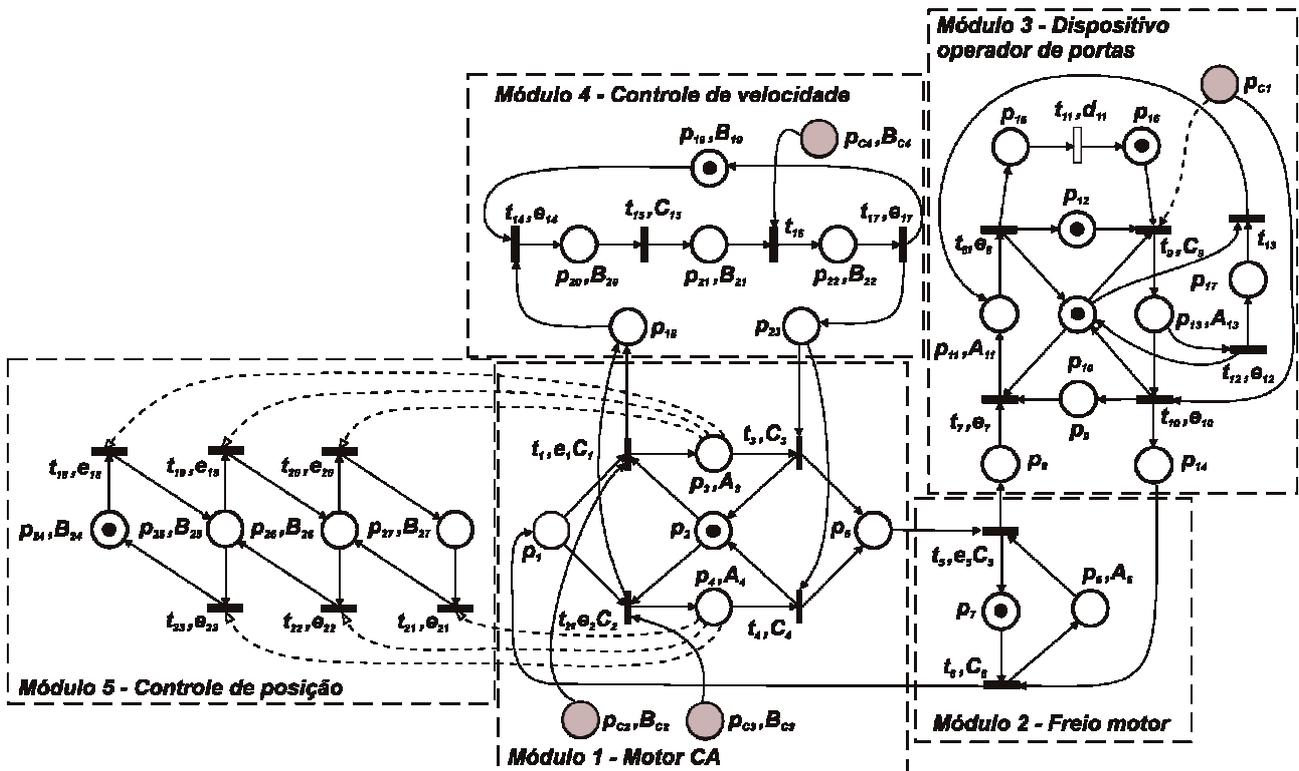


Figura 6.7 - Rede de Petri interpretada para controle do subsistema dos atuadores.

A rede de Petri do subsistema dos atuadores, apresentada na figura 6.7, é composto por 31 lugares ($p_1, p_2, \dots, p_{27}, p_{C1}, \dots, p_{C2}$) e 23 transições (t_1, t_2, \dots, t_{23}). Os lugares p_{C1} , p_{C2} , p_{C3} e p_{C4} representam, respectivamente, os comandos automáticos para início do acionamento, movimento de subida, movimento de descida e início da parada, que são condições de saída do subsistema da lógica de comando automático e são compartilhados pela rede de Petri dos dois subsistemas.

Os lugares com ações de nível e impulsionalis, que representam o sinal de saída do controlador para o sistema real, são descritos na tabela 6.2 com seus respectivos valores iniciais e os módulos que os compartilham.

Tabela 6.2 - Descrição dos lugares do subsistema dos atuadores com ações de nível e impulsionalis.

Nó	Ação	Inicial	Descrição	Mod.
p ₃	A ₃	0	Energizar bobinas tipo NA KM1 e KM2 p/ rotação de subida do motor	1;8;11;12
p ₄	A ₄	0	Energizar bobinas tipo NA KM1 e KM3 p/ rotação de descida do motor	1;8;11;12
p ₆	A ₆	0	Energizar bobina do relé eletromecânico tipo NF de freio (Destruar)	2;6;7
p ₁₁	A ₁₁	0	Acionar dispositivo operador de portas para abertura	3
p ₁₃	A ₁₃	0	Acionar dispositivo operador de portas para fechamento	3
p ₁₉	B ₁₉	1	Selecionar modo desligado do controlador de velocidade	4
p ₂₀	B ₂₀	0	Selecionar modo aceleração do controlador de velocidade	4
p ₂₁	B ₂₁	0	Selecionar modo velocidade nominal do controlador de velocidade	4
p ₂₂	B ₂₂	0	Selecionar modo frenagem do controlador de velocidade	4
p ₂₄	B ₂₄	1	Indicar “T” no display	5
p ₂₅	B ₂₅	0	Indicar “1º” no display	5
p ₂₆	B ₂₆	0	Indicar “2º” no display	5
p ₂₇	B ₂₇	0	Indicar “3º” no display	5
p _{C2}	B _{C2}	0	Indicar “↑” (subindo) no display	1;8
p _{C3}	B _{C3}	0	Indicar “↓” (descendo) no display	1;8
p _{C4}	B _{C4}	0	Apagar “↑” ou “↓” (sem chamadas) no display	5;9-12

A tabela 6.3 apresenta a descrição dos lugares que representam situações e condições dos componentes do sistema sem ações associadas, com seus respectivos valores iniciais e os módulos que os compartilham.

Tabela 6.3 - Descrição dos lugares do subsistema dos atuadores sem ações de nível e impulsionalis.

Nó	Inicial	Descrição	Mod.
p ₁	0	Início operação motor/ Término operação freio	1;2
p ₂	1	Motor desligado	1;9-12
p ₅	0	Término operação motor/ Início operação freio	1;2
p ₇	1	Freio travado	2;6;7
p ₈	0	Início operação do operador de portas	3
p ₉	0	Portas cabina totalmente fechadas	3
p ₁₀	0	Dispositivo operador de portas desligado	3
p ₁₂	1	Portas cabina totalmente abertas	3
p ₁₄	0	Término operação do operador de portas	3
p ₁₅	0	Início da espera para atendimento	3
p ₁₆	1	Término da espera para atendimento	3
p ₁₇	0	Comando de reabertura das portas	3
p ₁₈	0	Início operação do inversor de freqüência	4
p ₂₃	0	Término operação do inversor de freqüência	4
p _{C1}	0	Comando para iniciar acionamento	3;8

Os sensores e suas respectivas variáveis, que são os sinais de entrada do sistema, são descritas na tabela 6.4 com seus respectivos valores iniciais.

Tabela 6.4 - Descrição das variáveis de entrada do subsistema dos atuadores.

Var	Descrição	Inicial
s	Sensor magnético de desaceleração de subida	0
d	Sensor magnético de desaceleração de descida	0
z	Sensor magnético da zona de destravamento (parada)	1
a	Chave de fim de curso de abertura da porta da cabina	1
f	Chave de fim de curso de fechamento da porta da cabina	0
f_t	Chave de fim de curso de fechamento da porta do andar Térreo	0
f₁	Chave de fim de curso de fechamento da porta do 1º andar	1
f₂	Chave de fim de curso de fechamento da porta do 2º andar	1
f₃	Chave de fim de curso de fechamento da porta do 3º andar	1
vt	Velocidade do tacômetro (variável numérica)	0
ks	Bobinas das contadoras tipo NA KM1 e KM2 energizadas	0
kd	Bobinas dos contadoras tipo NA KM1 e KM3 energizadas	0
rf	Bobina do relé eletromecânico tipo NF do freio	0
o	Sensor óptico de presença (cortina luminosa)	1

Com base nas variáveis definidas na tabela 6.4, condições e eventos externos são associados às transições. Somente a variável vt (velocidade do tacômetro) obtida pelo encoder de velocidade (seção 5.2.5.1) não é binária, quando for comparada com a velocidade nominal apresentará uma saída binária que é condição externa para o controle de velocidade (seção 6.4.2). A dinâmica das condições e eventos externos foi descrita na seção 4.1. A tabela 6.5 apresenta a descrição das transições com eventos associados. As transições que não são listadas nessa tabela possuem o evento e (evento que sempre ocorre) associado, como foi definido na seção 6.3.

Tabela 6.5 - Descrição das transições do subsistema dos atuadores com eventos.

Nó	Evento	Descrição	Mod.	
t₁	e₁	↑rf	Destravamento do freio	1;4
t₂	e₂	↑rf	Destravamento do freio	1;4
t₅	e₅	↓ks+↓kd	Bobinas dos contatos tipo NA KM1 e KM2 ou KM3 desenergizadas	2
t₇	e₇	↓rf	Travamento do freio	3
t₈	e₈	↑a	Detectada abertura total das portas da cabina	3
t₁₀	e₁₀	↑f	Detectada fechamento total das portas da cabina	3
t₁₂	e₁₂	↓o	Detectado bloqueio na porta	3
t₁₄	e₁₄	↑ks+↑kd	Bobinas dos contatos tipo NA KM1 e KM2 ou KM3 energizadas	4
t₁₇	e₁₇	↑z	Detectado posicionamento na zona de destravamento	4
t₁₈	e₁₈	↑s	Detectada proximidade do andar durante subida	5
t₁₉	e₁₉	↑s	Detectada proximidade do andar durante subida	5
t₂₀	e₂₀	↑s	Detectada proximidade do andar durante subida	5
t₂₁	e₂₁	↑d	Detectada proximidade do andar durante descida	5
t₂₂	e₂₂	↑d	Detectada proximidade do andar durante descida	5
t₂₃	e₂₃	↑d	Detectada proximidade do andar durante descida	5

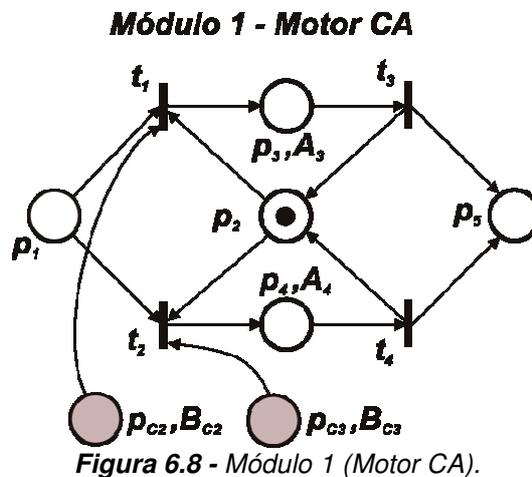
A tabela 6.6 apresenta a descrição das transições com condições externas associadas. As transições que não são listadas nessa tabela possuem condição $C_j = 1$, como foi definido na seção 6.3.

Tabela 6.6 - Descrição das transições do subsistema dos atuadores com condições externas.

Nó	Condição	Descrição	Mod.
t_1	C_1	$f \cdot f_T \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3$	1;4
t_2	C_2	$f \cdot f_T \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3$	1;4
t_3	C_3	z	1;4
t_4	C_4	z	1;4
t_5	C_5	z	2
t_6	C_6	$f \cdot f_T \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3$	2
t_9	C_9	o	3
t_{15}	C_{15}	$vt \geq vn$	4

6.4.1 Motor CA

O motor CA, apresentado na seção 5.2.1, pode estar desligado, ligado em rotação de subida ou de descida. Para modelar sua dinâmica básica de funcionamento para uma partida direta é construído o módulo 1 apresentado na figura 6.8. A rede de Petri obtida apresenta 7 lugares ($p_1, \dots, p_5, p_{C2}, p_{C3}$) e 4 transições (t_1, \dots, t_4).



A interpretação dessa rede de Petri interpretada para controle apresenta duas ações de nível que comandam o esquema de acionamento, apresentado na figura 6.1.c. As ações de nível são: energizar bobinas dos contatos KM1 e KM2 para rotação de subida do motor (A_3); e energizar bobinas dos contatos KM1 e KM3 para rotação de descida do motor (A_4). O motor é desligado quando $A_3 = A_4 = 0$, sendo a situação de motor desligado representada pelo lugar p_2 .

Os lugares p_1 e p_5 representam a condição de início e término da operação do motor, respectivamente. Os lugares p_{C2} e p_{C3} foram inseridos pra resolução do conflito existente entre as transições t_1 e t_2 , que representam, respectivamente, a decisão da lógica de comando para subida ou descida. São lugares compartilhados entre o módulo 1 (Motor CA) e módulo 8 (Lógica de definição do sentido do movimento), fazem a sincronização dos dois módulos. O módulo 8

pertence ao subsistema da lógica de comando automático e é descrito na seção 6.5.2. Associados à p_{C2} e p_{C3} existem as ações impulsivas indicar subindo no display (B_{C2}) e indicar descendo no display (B_{C3}). Na tabela 6.2 e 6.3 são apresentados os lugares do módulo 1 com suas respectivas ações associadas.

Como as transições t_1 , t_2 , t_3 e t_4 estão relacionadas com o módulo 4 (Controle de velocidade), os módulos 1 e 4 estão sincronizados. Para a descrição completa das transições é necessário que sejam apresentados ambos os módulos. A sincronização das transições com condições externas e eventos será descrita após a apresentação de todos os módulos do subsistema que possuem que estão sincronizados à transição.

6.4.2 Controle de velocidade

O motor CA possui controle eletrônico de velocidade (seção 5.2.1), que é realizado pelo inversor de frequência, que é um circuito tiristorizado cujo chaveamento. A abertura e fechamento dos tiristores provocam a variação da tensão e frequência elétrica do motor, permitindo um aumento ou diminuição gradativa da velocidade. O inversor de frequência possui um controlador de variáveis contínuas próprio com realimentação da velocidade através de um encoder óptico rotativo (seção 5.2.5.1) acoplado ao eixo do motor. Como o motor é acionado por controle eletrônico de velocidade, o freio do motor, como apresentado na seção 5.2.2, não atua na frenagem, que é feita pelo inversor de frequência.

O controlador do inversor possui algoritmo de funcionamento pré-estabelecido comandado por um controle de velocidade, representado no grafo da figura 6.9. A rede de Petri apresenta 7 lugares ($p_{18}, \dots, p_{23}, p_{C4}$) e 8 transições ($t_1, \dots, t_4, t_{14}, \dots, t_{17}$).

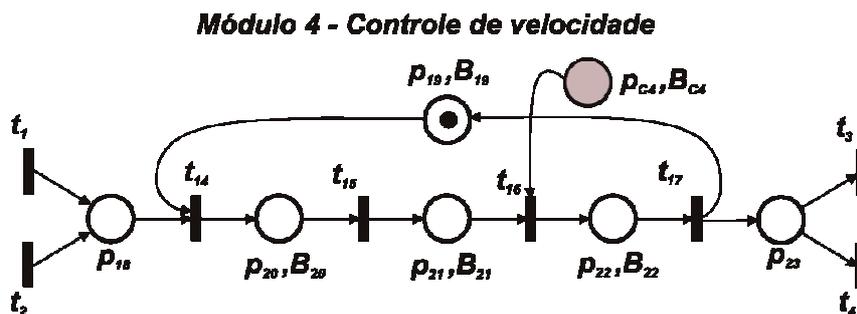


Figura 6.9 - Módulo 5 (Controle de velocidade).

A interpretação dessa rede de Petri interpretada para controle apresenta quatro ações impulsivas que comandam o microcontrolador do inversor de frequência. As ações impulsivas são: selecionar modo desligado do controlador de velocidade (B_{19}); selecionar modo aceleração do controlador de velocidade (B_{20}); selecionar modo velocidade nominal do controlador de velocidade (B_{21}); e selecionar modo frenagem do controlador de velocidade (B_{22}).

Os lugares p_{18} e p_{23} representam a condição de início e término de operação do inversor de frequência, respectivamente. O lugar p_{C4} representa a decisão da lógica de comando para iniciar a

parada e é um lugar compartilhado entre o módulo 4 (Controle de Velocidade) e os módulos 9 a 12 que modelam a lógica de parada nos andares. Os módulos 9 a 12 pertencem ao subsistema da lógica de comando automático e são descritos nas seções 6.5.3 e 6.5.4. Associado ao lugar p_{C4} existe a ação impulsional de apagar “↑” ou “↓” (sem chamadas) no display. Nas tabelas 6.2 e 6.3 são apresentados os lugares do módulo 4 com suas ações associadas.

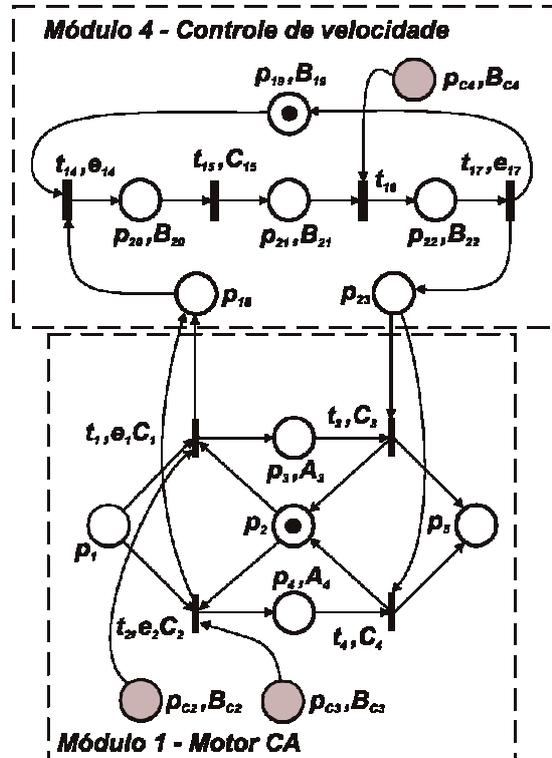


Figura 6.10 - Sincronização entre os módulos 1 e 4 (Motor CA e controle de velocidade).

A operação do inversor de frequência é iniciada somente quando as bobinas dos contatos para a rotação de subida ou descida forem energizadas e o motor só pode ser desligado depois de terminada a operação do inversor de frequência. Portanto, a operação do inversor de frequência ocorre em paralelo com a situação das bobinas dos contatos para a rotação de subida ou descida energizadas. Por esse motivo as transições t_1 , t_2 , t_3 e t_4 são compartilhadas entre os dois módulos. A figura 6.10 apresenta o resultado da junção dos dois módulos. A tabela 6.7 apresenta a descrição dos eventos e condições externas aos quais as transições dos módulos 1 e 4 estão associadas.

Tabela 6.7 - Descrição das transições dos módulos 1 e 4 e as condições e eventos associados.

Nó	Sincronização	Descrição	Mod.
t_1	$e_1 \cdot C_1$	$\uparrow rf (f \cdot f_T \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3)$	1;4
t_2	$e_2 \cdot C_2$	$\uparrow rf (f \cdot f_T \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3)$	1;4
t_3	C_3	z	1;4
t_4	C_4	z	1;4
t_{14}	e_{14}	$\uparrow ks + \uparrow kd$	4
t_{15}	C_{15}	$vt \geq vn$	4
t_{17}	e_{17}	$\uparrow z$	4

As transições do módulo 1 (Motor CA) são descritas da seguinte forma: se o motor está desligado, em condição de início de operação e com comando para subida, este pode ser acionado em rotação de subida e o inversor de frequência ficar na condição de início de operação (t_1); se o motor está desligado, em condição de início de operação e com comando para descida, este pode ser acionado em rotação de descida e o inversor de frequência ficar na condição de início de operação (t_2); se o motor está acionado na rotação de subida e o inversor de frequência está na condição de término de operação, o motor pode ser desligado e ficar na condição de término de operação (t_3); se o motor está acionado na rotação de descida e o inversor de frequência está na condição de término de operação, o motor pode ser desligado e ficar na condição de término de operação (t_4).

As transições t_1 e t_2 estão sincronizadas com o evento externo de destravamento do freio na condição de todas as portas fechadas ($\uparrow f(f \cdot f_T \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3)$), pois o motor só pode ser acionado quando o freio estiver destravado e se as portas de todos os pavimentos e da cabina estiverem fechadas. As transições t_3 e t_4 possuem a condição externa de posicionamento da cabina na zona de destravamento (z), pois é necessário o mesmo nível entre a cabina e o andar para que ocorra o acoplamento mecânico entre as portas (seção 5.2.3).

As transições do módulo 4 (Controle de velocidade) são descritas da seguinte forma: se o inversor está desligado e em condição de início de operação, este pode ser acionado no modo de aceleração (t_{14}); se o inversor está no modo de aceleração, este pode entrar no modo de velocidade nominal (t_{15}); se o inversor está no modo de velocidade nominal e foi dado comando de início da parada, então o inversor pode entrar no modo de frenagem (t_{16}); se o inversor está no modo de frenagem, este pode ser desligado e ficar na condição de término de operação (t_{17}).

A transição t_{14} está sincronizada com o evento externo do motor energizado na subida ou descida ($\uparrow ks + \uparrow kd$), pois é quando se inicia o ciclo de trabalho do microcontrolador do inversor. A transição t_{15} possui a condição externa de velocidade do tacômetro maior ou igual à velocidade nominal ($vt \geq vn$). A transição t_{17} está sincronizada com o evento externo de posicionamento da cabina na zona de destravamento pelo sensor magnético de parada ($\uparrow z$).

6.4.3 Controle de posição

O posicionamento do elevador é feito pelos sensores magnéticos de parada e de desaceleração de subida e de descida, como descrito na seção 5.2.5.4. Os sensores são entradas para o controle da posição do elevador que possui a memória de sua posição atual que é alterada à medida que o elevador se aproxima de um andar. O algoritmo de comando automático do elevador necessita da informação da posição do elevador para definir o início do acionamento e da parada para atendimento. A rede de Petri obtida apresenta 6 lugares ($p_3, p_4, p_{24}, \dots, p_{27}$) e 6 transições (t_{18}, \dots, t_{23}) e está apresentado na figura 6.11

Módulo 5 - Controle de Posição

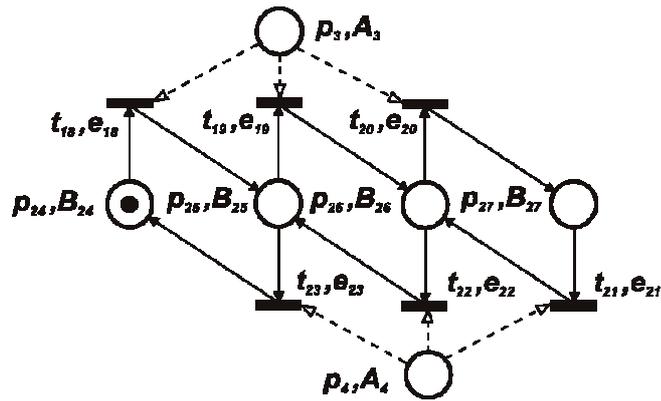


Figura 6.11 - Módulo 5 (Controle de posição).

Os lugares p_{24} , p_{25} , p_{26} e p_{27} representam o posicionamento da cabina nos andares Térreo, 1º, 2º e 3º, respectivamente. A interpretação dessa rede de Petri interpretada para controle apresenta quatro ações impulsoriais que comandam o display, que são: Indicar “T” no display (B_{24}); Indicar “1º” no display (B_{25}); Indicar “2º” no display (B_{26}); e indicar “3º” no display (B_{27}).

Os lugares p_3 e p_4 são compartilhados com o módulo 1 (Motor CA). Deve-se notar que os arcos de saída dos lugares p_3 e p_4 são arcos habilitadores, portanto o disparo das transições associadas não altera a marcação desses lugares. O objetivo desses lugares é sincronizar ambos os módulos. Assim, o posicionamento da cabina pode ser acompanhado no modelo da rede de Petri permitindo observar o comportamento do sistema controlado. As tabelas 6.2 e 6.3 apresentam os lugares do módulo 5 com suas ações associadas.

As transições t_{18} , t_{19} e t_{20} podem, respectivamente, ser descritas da seguinte forma: se a cabina está posicionada nos andares Térreo ou 1º ou 2º e o motor está energizado em rotação de subida, então a cabina pode ser posicionada no andar acima, 1º ou 2º ou 3º, respectivamente. As transições t_{21} , t_{22} e t_{23} podem, respectivamente, ser descritas da seguinte forma: se a cabina está posicionada nos andares 3º ou 2º ou 1º e o motor está energizado em rotação de descida, então a cabina pode ser posicionada no andar abaixo, 2º ou 1º ou Térreo, respectivamente.

Tabela 6.8 - Descrição das transições do módulo 5 e as condições e eventos associados.

Nó	Sincronização		Descrição	Mod.
t_{18}	e_{18}	↑s	Detectada proximidade do andar durante subida	5
t_{19}	e_{19}	↑s	Detectada proximidade do andar durante subida	5
t_{20}	e_{20}	↑s	Detectada proximidade do andar durante subida	5
t_{21}	e_{21}	↑d	Detectada proximidade do andar durante descida	5
t_{22}	e_{22}	↑d	Detectada proximidade do andar durante descida	5
t_{23}	e_{23}	↑d	Detectada proximidade do andar durante descida	5

O evento de detecção da proximidade do andar durante a subida (↑s) está sincronizado com as transições t_{18} , t_{19} e t_{20} . O evento de detecção da proximidade do andar durante a descida (↑d)

está sincronizado com as transições t_{21} , t_{22} e t_{23} . A tabela 6.8 apresenta a descrição dos eventos aos quais as transições do módulo 5 estão associadas.

Fazendo a fusão dos lugares p_3 e p_4 com a rede de Petri da figura 6.10, obtém-se como resultado a rede de Petri da figura 6.12 que é a composição dos módulos 1, 4 e 5.

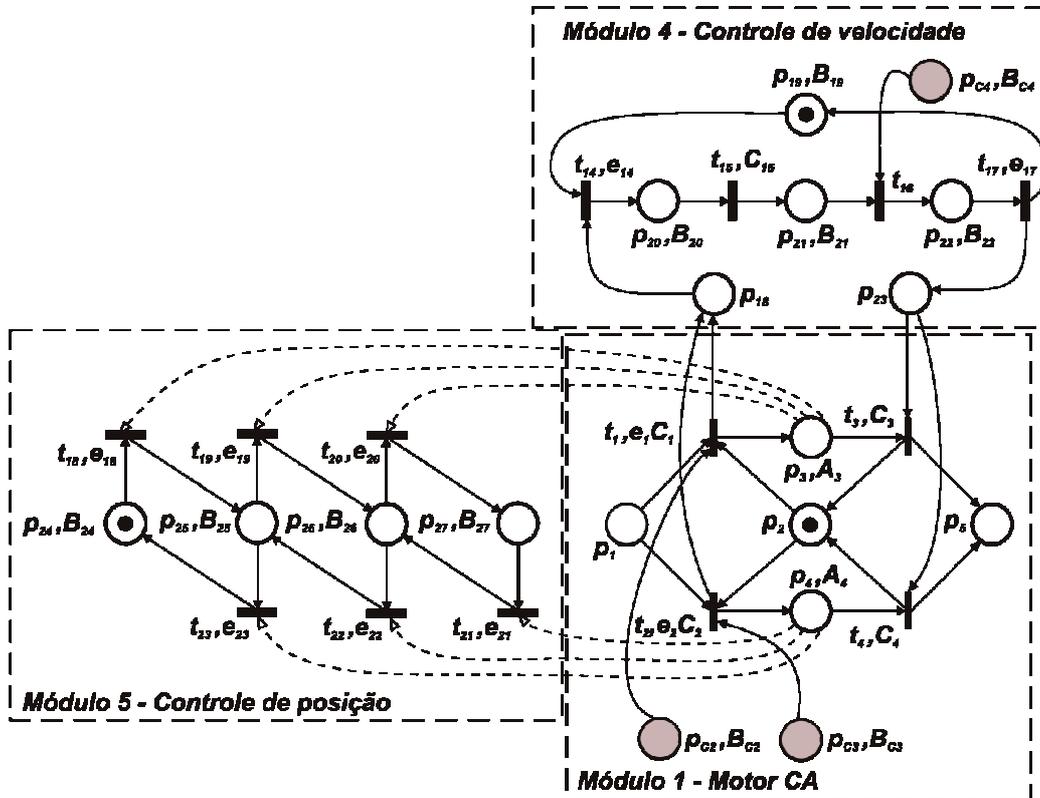


Figura 6.12 - Sincronização entre os módulos 1, 4 e 5 (Motor CA, controle de velocidade e controle de posição)

6.4.4 Freio do motor

O freio do motor, apresentado na seção 5.2.2., quando ativado muda da condição de destravado para travado. A dinâmica do freio motor é modelada no módulo 2, apresentado na figura 6.13. O grafo obtido apresenta 4 lugares (p_1 , p_5 , p_6 , p_7) e 2 transições (t_1 , t_2).

Módulo 2 - Freio motor

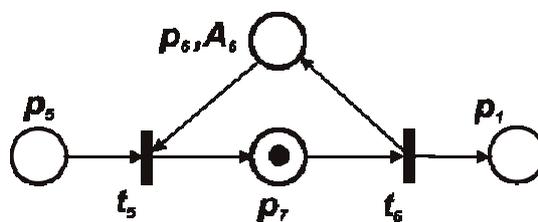


Figura 6.13 - Módulo 2 (Freio motor).

Os lugares p_5 e p_1 representam o início e término da operação do freio do motor, respectivamente. A interpretação desse grafo para controle apresenta uma ação de nível que é: energizar bobina do relé eletromecânico de freio (A_6). Quando $A_6=1$ o freio está destravado. O lugar p_7 representa a condição de freio travado. Como as transições t_5 e t_6 são compartilhadas com o módulo 3 (Dispositivo operador de portas), para a descrição completa das transições desta

rede de Petri é necessário que sejam apresentados ambos os módulos. As tabelas 6.2 e 6.3 apresentam os lugares do módulo 2 e suas ações associadas.

A atuação do freio consiste em manter o motor estacionado na mesma posição, por isso somente é acionado quando a operação de acionamento do motor termina. Como as operações do motor e do freio são complementares, ou seja, o início da operação de um ocorre mediante o fim da operação do outro, os lugares p_5 e p_1 são compartilhados pelos dois módulos que apresentam uma estrutura cíclica, pois o término de um é o início do outro.

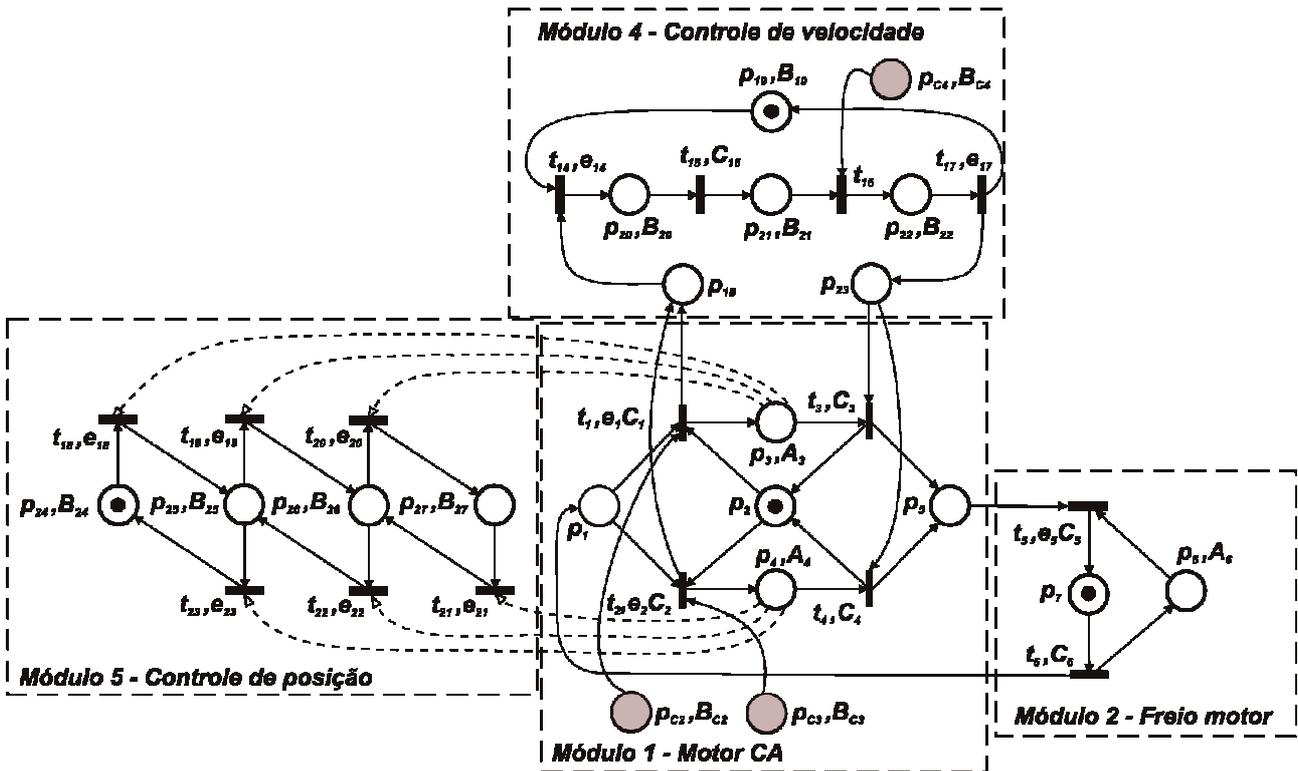


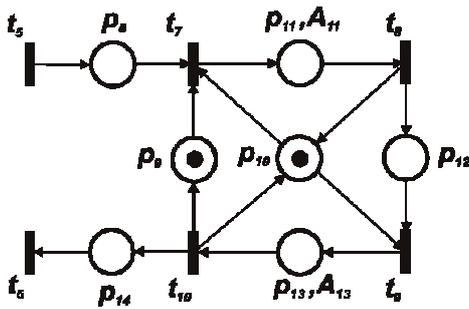
Figura 6.14 - Sincronização entre os módulos 1, 2, 4 e 5 (Motor CA, freio motor, controle de velocidade e controle de posição).

Fazendo a fusão dos lugares p_1 e p_5 com a rede de Petri da figura 6.12, obtém-se como resultado a rede de Petri da figura 6.14 que é a composição dos módulos 1, 2, 4 e 5. Completa-se assim a modelagem de todos os elementos necessários para execução do deslocamento do elevador, restando apenas o módulo 3 (Dispositivo operador de portas), que controla as portas para entrada e saída dos passageiros.

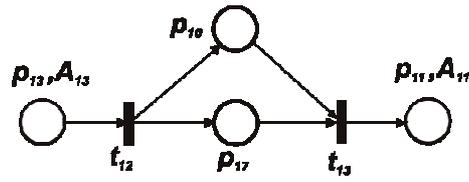
6.4.5 Dispositivo operador de portas

As portas automáticas são comandadas pelo dispositivo operador de portas, seção 5.2.3. A dinâmica desse dispositivo pode ser considerada como um sistema composto por três partes: (a) ciclo de abertura e fechamento de portas; (b) sequência de espera para atendimento; e (c) mecanismo de reabertura das portas. As redes de Petri que representam essas partes são apresentadas na figura 6.15.

(a) Ciclo de abertura e fechamento de portas



(c) Mecanismo de reabertura das portas



(b) Sequência de espera para atendimento

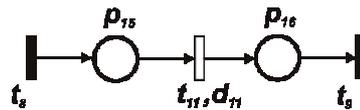


Figura 6.15 - Módulos que compõem o módulo 3 (Dispositivo operador de portas).

A figura 6.15.a representa a dinâmica do ciclo de abertura e fechamento de portas. A interpretação desse grafo para controle apresenta duas ações de nível: acionar dispositivo operador de portas para abertura (A_{11}); e acionar dispositivo operador de portas para fechamento (A_{13}). O dispositivo operador de portas é desligado quando $A_{11} = A_{13} = 0$, sendo a situação de operador de portas desligado representada pelo lugar p_{10} . Os lugares p_8 e p_{14} representam a condição de início e término de operação do dispositivo operador de portas, respectivamente. É importante para o controle conhecer a situação de abertura e fechamento total das portas representadas, respectivamente, pelos lugares p_9 e p_{12} .

Para que haja fluxo de passageiros é necessária a definição de um tempo de espera mínimo para o fechamento das portas, representado pela rede de Petri de sequência de espera para atendimento (figura 6.15.b). A contagem do tempo mínimo de espera é iniciada assim que as portas estiverem na situação de abertura total, por essa razão as transições t_8 e t_9 são compartilhadas com a rede de Petri do ciclo de abertura e fechamento de portas (figura 6.15.a). Esse tempo é definido pela temporização d_{11} associada à transição t_{11} . Os lugares p_{15} e p_{16} representam a condição de início e término da espera para atendimento, respectivamente.

Todos os elevadores atualmente devem possuir mecanismo automático de reabertura das portas em caso de bloqueio da porta durante o seu fechamento, para evitar corte e esmagamento dos passageiros. O mecanismo de reabertura, que desliga o dispositivo operador de portas quando acionado para fechamento e, em seguida, faz o acionamento para abertura, é representado pelo grafo da figura 6.15.c. Por esse motivo compartilha os lugares p_{10} , p_{11} e p_{13} com o módulo do ciclo de fechamento e abertura de portas. O lugar p_{17} representa a condição de comando para início da reabertura.

Módulo 3 - Dispositivo operador de portas

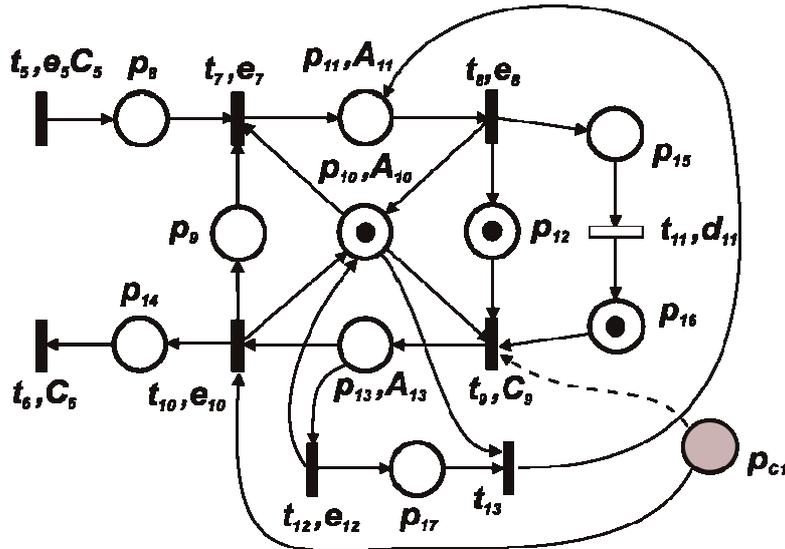


Figura 6.16 - Módulo 3 (Dispositivo operador de portas).

O módulo 3 (Dispositivo operador de portas) é obtido pela fusão dos lugares p_{10} , p_{11} e p_{13} , e transições t_8 e t_9 dos módulos apresentados na figura 6.15. O grafo obtido apresenta 11 lugares (p_8, \dots, p_{17}) e 9 transições (t_5, \dots, t_{13}). De acordo com o caso definido na seção 6.1, quando o elevador está parado as portas se mantêm abertas, assim quando é iniciada a sequência de acionamento (figura 6.6) a primeira atividade é o fechamento das portas. Para representar o comando para o início do acionamento foi inserido o lugar p_{C1} , que é compartilhado com o subsistema da lógica de comando automático, descrito na seção 6.5.

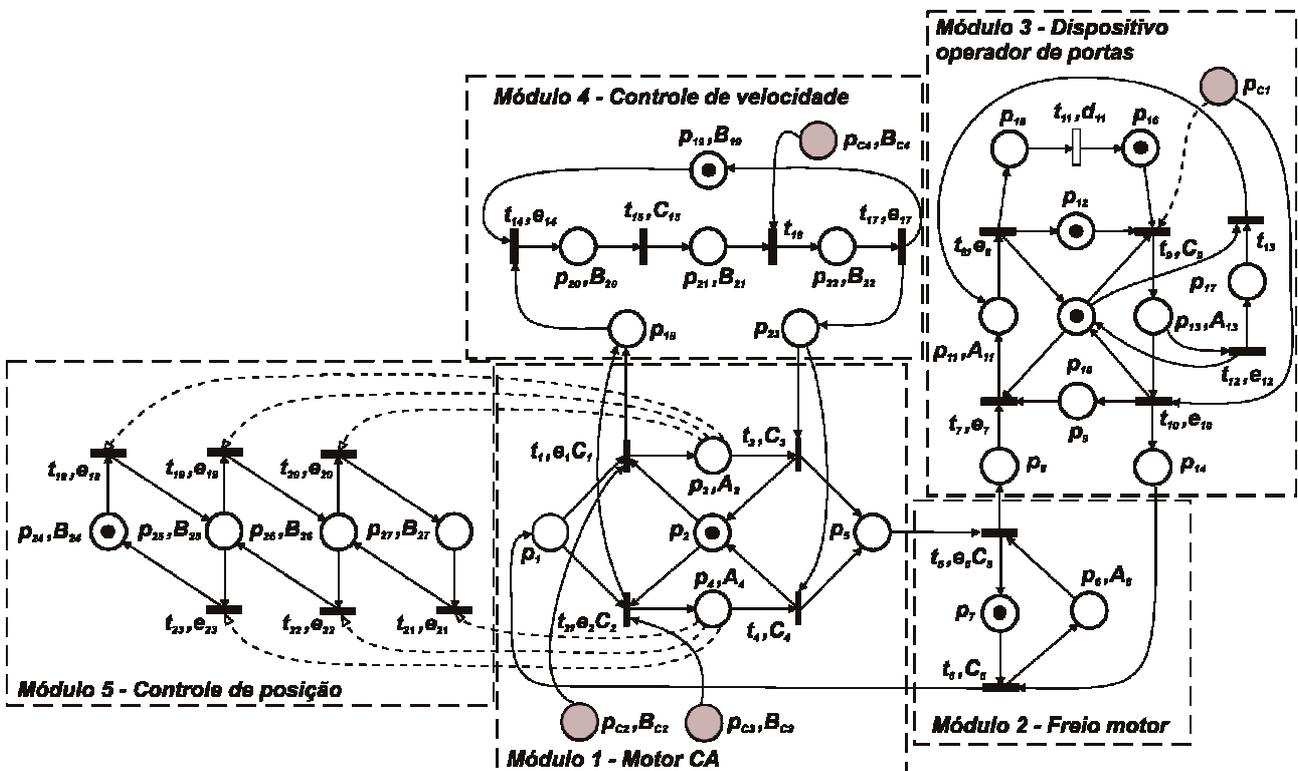


Figura 6.17 - Rede de Petri interpretada para controle do subsistema dos atuadores.

A operação do dispositivo operador de portas só pode ocorrer caso o freio esteja travado e o freio só pode ser destravada depois de terminada a operação do dispositivo operador das portas.

O modelo descreve essa relação pelo compartilhamento das transições t_5 , travando o freio, e t_6 , destravando o freio, que são comuns aos módulos 2 e 3. Realizando a composição modular com a rede de Petri da figura 6.14, obtém-se o subsistema completo dos atuadores novamente apresentado na figura 6.17.

Agora podem ser descritas as transições do módulo 2 (Freio motor) da seguinte forma: se o freio está destravado e na condição de início de operação do freio, este pode ser travado e operador das portas ficar na condição de início de operação (t_5). Se o freio está travado e operador das portas na condição de término de operação, então o freio pode ser destravado e ficar na condição de término de operação (t_6).

A transição t_5 está sincronizada com o evento externo do motor desenergizado na subida ou descida e na condição externa de posicionamento da cabina na zona de destravamento ($(\downarrow ks + \downarrow kd)z$), pois é necessário o posicionamento do piso da cabina no mesmo nível do piso do andar, para que ocorra o acoplamento mecânico entre as portas (seção 5.2.3). A transição t_6 possui como condição externa a condição de todas as portas fechadas ($f \cdot f_T \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3$), pois o movimento só pode ser permitido sob esta condição.

As transições do módulo 3 (Dispositivo operador de portas) são descritas da seguinte forma: se o operador de portas está desligado e em condição de início de operação e as portas da cabina totalmente abertas, então o operador pode ser acionado para abertura (t_7); se o operador das portas está acionado para abertura, este pode ser desligado, as portas serem totalmente abertas e iniciada a espera para atendimento (t_8); se em condição de início da espera para atendimento, depois de decorrido o tempo d_{11} , é terminada a espera para atendimento (t_{11}); se terminada a espera para atendimento, o operador estando desligado, as portas estando totalmente abertas e na condição de comando para início de atendimento, então o operador de portas é acionado para fechamento (t_9); se o operador de portas está acionado para fechamento e na condição de comando para início de atendimento então, este pode ser desligado e as portas totalmente fechadas e ficar na condição de término de operação (t_{10}) ou ser dado o comando de reabertura (t_{12}); se existe o comando de reabertura e o operador está desligado, este é acionado para abertura (t_{13}).

As transições do módulo 3 estão sincronizadas aos seguintes eventos e condições: t_7 está sincronizada com o evento externo de travamento do freio ($\downarrow rf$); t_8 , com o evento externo de abertura total das portas da cabina ($\uparrow a$); t_9 , com a condição externa de ausência de bloqueio para o fechamento da porta da cabina; t_{10} com o evento externo de fechamento total das portas da cabina; e t_{12} , com o evento externo de bloqueio na porta da cabina. A tabela 6.9 apresenta a descrição dos eventos e condições externas aos quais as transições dos módulos 2 e 3 estão associadas.

Tabela 6.9 - Descrição das transições dos módulos 2 e 3 e condições, eventos e temporização associados.

Nó	Sincronização		Descrição	Mod.
t ₅	e ₅ · C ₅	(↓ks+↓kd)z	Bobinas dos contatos tipo NA KM1 e KM2 ou KM3 desenergizadas e posicionamento na zona de destravamento	2;3
t ₆	C ₆	f·f _T ·f ₁ ·f ₂ ·f ₃	Condição fechada de todas as portas	2;3
t ₇	e ₇	↓rf	Travamento do freio	3
t ₈	e ₈	↑a	Detectada abertura total das portas da cabina	3
t ₉	C ₉	o	Ausencia de bloqueio para o fechamento da porta da cabina	3
t ₁₀	e ₁₀	↑f	Detectada fechamento total das portas da cabina	3
t ₁₁	d ₁₁	10 seg	Tempo de espera para fechamento de portas	3
t ₁₂	e ₁₂	↓o	Detectado bloqueio na porta da cabina	3

6.5 Subsistema da lógica de comando automático

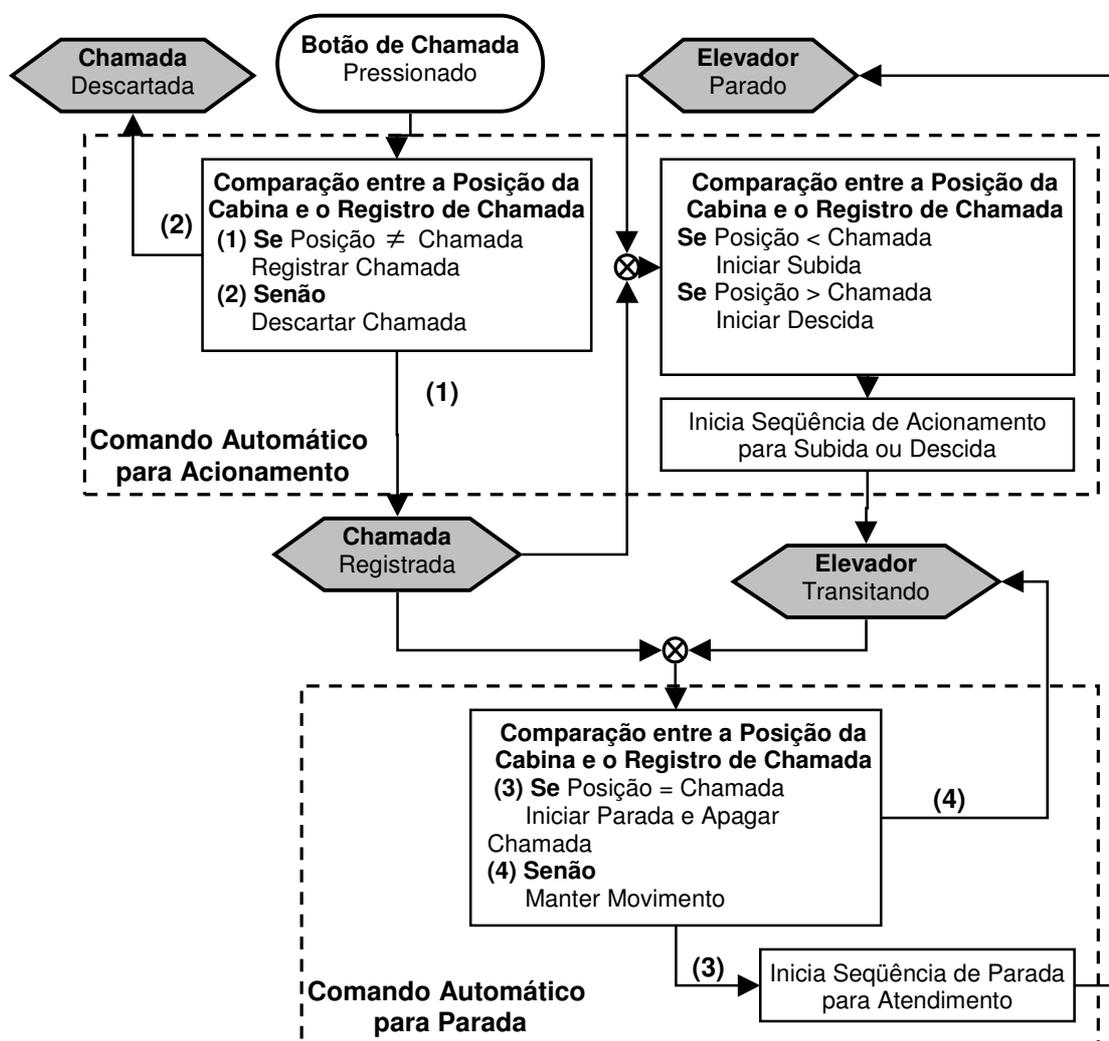


Figura 6.18 - Esquema das atividades realizadas pela lógica de comando automático do elevador.

Construída a rede de Petri do subsistema dos atuadores, chega-se a etapa de construção do modelo em redes de Petri do subsistema de lógica do comando automático, como descrito na seção 6.3. Deixando apenas as partes referentes ao comando automático do esquema do processo de transporte de passageiros (figura 6.5), obtém-se o esquema ilustrado na figura 6.18,

que descreve a lógica do acionamento e parada simplificada do elevador, inicialmente parado, para apenas uma chamada.

No entanto, o elevador pode possuir mais de uma chamada registrada, estas podem ser registradas na situação do elevador parado ou em trânsito. Para gerenciar as chamadas registradas definem-se lógicas de comando automático, descritas na 5.2.4, que são algoritmos de atendimento que buscam atender o tipo de demanda do elevador e que possuem como foco a redução do tempo de espera e do consumo de energia do elevador.

O caso escolhido é o residencial que apresenta o comando automático coletivo seletivo na descida, descrito na seção 5.2.4. Para um mesmo andar as chamadas podem ser registradas pelo botão de chamada no andar ou na cabina. Os botões de chamada da cabina possuem o princípio de atendimento coletivo e os botões dos andares o princípio seletivo na descida.

Para otimizar o desempenho do sistema do elevador, as chamadas são contabilizadas e atendidas priorizando o último sentido de deslocamento, mudando de sentido caso alcance um dos andares extremos ou não haja mais chamadas a serem atendidas nesse sentido.

No comando automático para acionamento não existe diferença entre as chamadas dos andares e da cabina. A diferença acontece somente no comando automático para parada, apresentada na tabela 6.10.

Tabela 6.10 - Diferença entre a lógica de parada entre as chamadas dos andares e da cabina.

Botões	Princípio	Comando Automático para Parada
Andar	Seletivo na Descida	A parada acontece sempre que o elevador estiver próximo do andar no sentido descendente ou quando não houver nenhuma chamada registrada para o andar acima
Cabina	Coletivo	A parada acontece sempre que o elevador estiver próximo do andar, não importa o sentido

Seguindo a divisão proposta na seção 6.2.3, o subsistema de lógica de comando automático pode ser dividido em duas partes:

Lógica de acionamento, onde, estando o elevador parado, é comparada a posição atual do elevador com a chamada registrada para comandar o acionamento e define-se o sentido de rotação do motor priorizando o movimento anterior. O modelo em rede de Petri ficou dividido em três módulos:

- Módulo 6 - Lógica de acionamento do botão da cabina;
- Módulo 7 - Lógica de acionamento do botão do andar;
- Módulo 8 - Lógica de definição do sentido de rotação.

Lógica de parada, onde, estando o elevador em movimento, é comparada a posição atual do elevador com a chamada registrada para comandar a parada, seguindo a diferenciação dos princípios de atendimento do botão do andar e da cabina. A modelagem em redes de Petri fica dividida em quatro módulos, cada um deles representa a lógica de parada para cada andar:

- Módulo 9 - Lógica de parada no andar Térreo;
- Módulo 10 - Lógica de parada no 3º andar;
- Módulo 11- Lógica de parada no 1º andar;
- Módulo 12 - Lógica de parada no 2º andar;

Devido à complexidade e tamanho dos módulos que compõe o subsistema da lógica de comando automático fica difícil fazer sua composição modular completa, pois dificulta a visualização e entendimento. Fica graficamente factível apenas a composição dos módulos 6, 7 e 8 para obtenção da lógica de acionamento, e a composição dos módulos 9, 10, 11 e 12 para obtenção da lógica de parada. A rede de Petri da lógica de acionamento é apresentada seção 6.5.2 e da lógica de parada na seção 6.5.4, depois de serem descritos os módulos que as compõe.

6.5.1 Lógica de acionamento do botão da cabina e do botão do andar

A lógica de comando automático de acionamento depende das chamadas registradas pelos botões da cabina e dos andares, da posição da cabina e da condição de elevador estacionado, como é ilustrado no esquema da figura 6.18. Para ser iniciada basta a ocorrência de uma chamada diferente do posicionamento atual da cabina. A rede de Petri obtida para representar essa lógica para os botões de chamada da cabina é apresentada na figura 6.19 e possui 15 lugares ($p_7, p_{24}, \dots, p_{27}, p_{B1}, \dots, p_{B4}, p_{B9}, \dots, p_{B12}, p_{C5}, p_{C6}$) e 12 transições ($t_{C1}, \dots, t_{C8}, t_{B1}, \dots, t_{B4}$).

Módulo 6 - Lógica de acionamento do botão da cabina

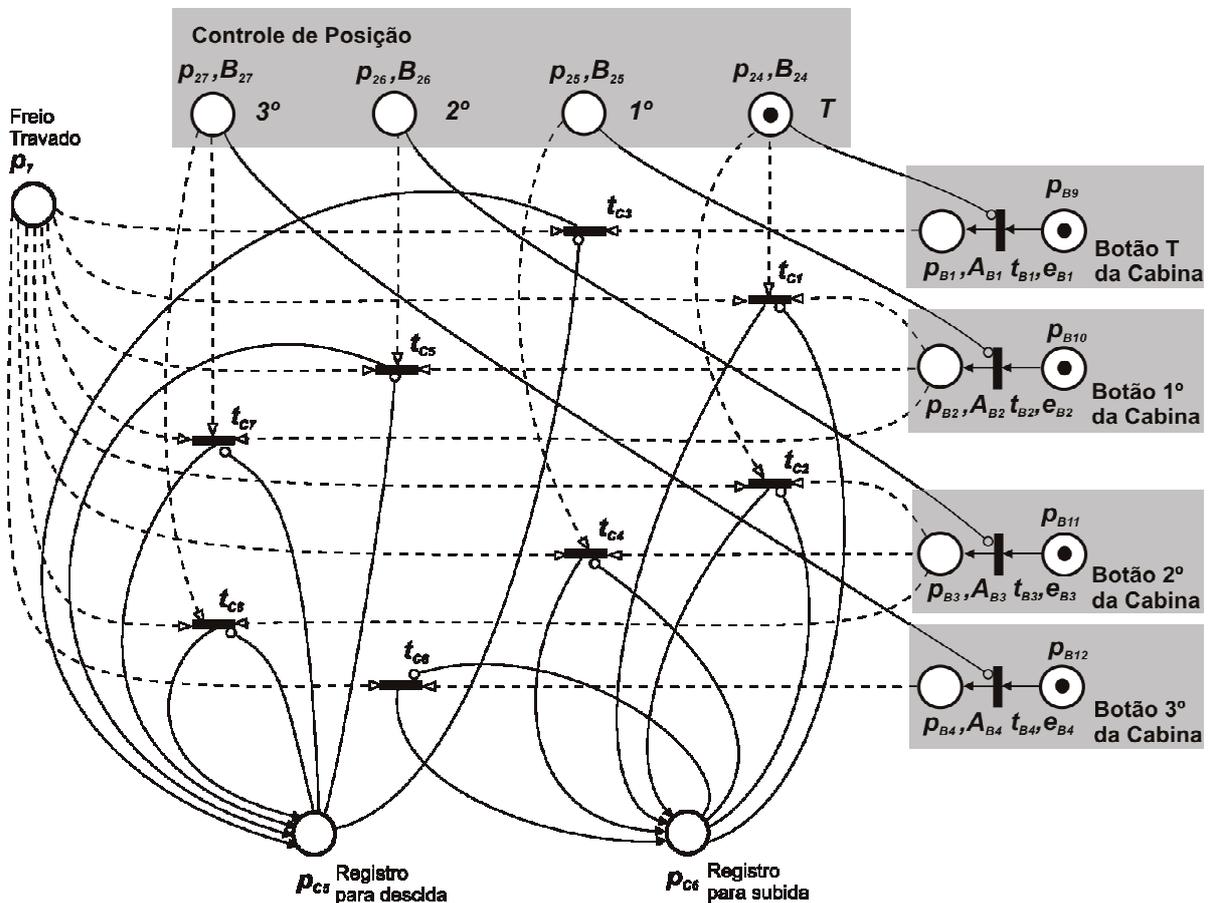


Figura 6.19 - Módulo 6 (Lógica de acionamento do botão da cabina).

Os lugares p_{24}, \dots, p_{27} , referem-se ao posicionamento da cabina, nos andares Térreo, 1º, 2º e 3º, respectivamente, sendo compartilhados com o módulo 5 (Controle de posição). O lugar p_7 representa a situação de freio travado e é compartilhado com o módulo 2 (Freio motor). Os lugares p_{B1}, \dots, p_{B4} , representam as chamadas registradas que são sinalizadas pelo led do botão da cabina aceso do andar Térreo, 1º, 2º e 3º, respectivamente. Os lugares p_{B9}, \dots, p_{B12} , representam o led do botão da cabina apagado para o andar Térreo, 1º, 2º e 3º, respectivamente.

A interpretação dessa rede de Petri interpretada para controle apresenta quatro ações de nível para sinalização das chamadas registradas: acender LED do botão da cabina do Térreo (A_{B1}); acender LED do botão da cabina do 1º andar (A_{B1}); acender LED do botão da cabina do 2º andar (A_{B1}); e acender LED do botão da cabina do 3º andar (A_{B1}). Os lugares p_{C5} e p_{C6} representam a condição de registro para descida e subida que são os resultados das comparações entre as chamadas registradas e o posicionamento atual da cabina, descritas no esquema da lógica de comando automático do elevador na figura 6.18. A tabela 6.11 apresenta os lugares do módulo 6 com suas ações associadas.

Tabela 6.11 - Descrição dos lugares do módulo 6 e ações associadas.

Nó	Ação	Descrição	Mod.
p_7	-	Freio travado	2;6;7
p_{24}	B_{24}	Indicar "T" no display	5;6;7
p_{25}	B_{25}	Indicar "1º" no display	5;6;7
p_{26}	B_{26}	Indicar "2º" no display	5;6;7
p_{27}	B_{27}	Indicar "3º" no display	5;6;7
p_{B1}	A_{B1}	Acender LED do botão de chamada do Térreo na cabina	6;9
p_{B2}	A_{B2}	Acender LED do botão de chamada do 1º andar na cabina	6;11
p_{B3}	A_{B3}	Acender LED do botão de chamada do 2º andar na cabina	6;12
p_{B4}	A_{B4}	Acender LED do botão de chamada do 3º andar na cabina	6;10
p_{B9}	-	LED do botão de chamada do Térreo na cabina apagado	6;9
p_{B10}	-	LED do botão de chamada do 1º andar na cabina apagado	6;11
p_{B11}	-	LED do botão de chamada do 2º andar na cabina apagado	6;12
p_{B12}	-	LED do botão de chamada do 3º andar na cabina apagado	6;10
p_{C5}	-	Registro para descida	6;7;8
p_{C6}	-	Registro para subida	6;7;8

As comparações entre as chamadas registradas e o posicionamento atual da cabina são realizadas pelas transições t_{C1}, \dots, t_{C8} . Essas transições possuem como arcos de entrada somente os inibidores e habilitadores, assim, seus disparos não afetam a condição dos lugares de entrada. A tabela 6.17 ilustra à quais transições do módulo 6 essas possíveis decisões estão associadas.

Tabela 6.12 - Descrição da condição testada pelas transições do módulo 6.

Transições	Condição Testada	Decisão se verdadeira
$t_{C1}, t_{C2}, t_{C4}, t_{C6}$	Se Posição < Chamada registrada	Registrada subida (p_{C6})
$t_{C3}, t_{C5}, t_{C7}, t_{C8}$	Se Posição > Chamada registrada	Registrada descida (p_{C5})

Deve-se observar que nas transições t_{C2} e t_{C6} que geram o registro para descida por chamada no Térreo e registro para subida por chamada no 3º andar, respectivamente, não apresentam nas suas pré-condições o posicionamento atual da cabina. Isso se deve ao fato de corresponderem ao andar extremo inferior (T), que só pode ser alcançado na descida, e extremo superior, que só pode ser alcançado na subida (3º), não importando a posicionamento atual da cabina, pois para todos os andares exceto eles mesmos o sentido do movimento de chegada é único.

As transições t_{B1} , t_{B2} , t_{B3} e t_{B4} estão relacionadas aos botões da cabina do andar Térreo, 1º, 2º e 3º, respectivamente. A descrição para cada uma dessas transições é a seguinte: se não existe posicionamento da cabina no andar e o led do botão da cabina para andar está apagado, então o led do botão da cabina desse mesmo andar pode ser aceso. A condição de não posicionamento da cabina definida pelo arco inibidor consiste na questão de descarte imediato da chamada caso o elevador já esteja posicionado no andar da chamada, como ilustrado no esquema da figura 6.18.

As transições t_{B1} , t_{B2} , t_{B3} e t_{B4} estão sincronizadas com os eventos externos e_{B1} , e_{B2} , e_{B3} e e_{B4} que consistem no botão de chamada da cabina pressionado para o andar Térreo, 1º, 2º e 3º, respectivamente. A tabela 6.18 apresenta a descrição dos eventos aos quais as transições do módulo 6 estão associadas.

Tabela 6.13 - Descrição das transições do módulo 6 e eventos associados.

Nó	Sincronização		Descrição	Mod.
t_{B1}	e_{B1}	$\uparrow b_1$	Pressionado o botão de chamada do Térreo na cabina	6;9
t_{B2}	e_{B2}	$\uparrow b_2$	Pressionado o botão de chamada do 1º andar na cabina	6;11
t_{B3}	e_{B3}	$\uparrow b_3$	Pressionado o botão de chamada do 2º andar na cabina	6;12
t_{B4}	e_{B4}	$\uparrow b_4$	Pressionado o botão de chamada do 3º andar na cabina	6;10

Todos os lugares e transições que contém indexação “B” representam a modelagem do registro de chamada realizados através dos botões da cabina e do andar e são compartilhados com os módulos 9 a 12 que compõe a lógica de parada, que serão apresentadas nas seções 6.5.3 e 6.5.4. Portanto, o entendimento completo de sua dinâmica será possível quando estes módulos forem apresentados.

Como definido anteriormente na seção 6.5, os botões da cabina e do andar não tem diferenciação alguma na lógica de acionamento, portanto, os módulos 6 e 7 possuem a mesma estrutura, e compartilham os lugares $p_7, p_{24}, \dots, p_{27}$ com o subsistema dos atuadores. Compartilham também os lugares de registro de subida (p_{C4}) e descida (p_{C5}), pois qualquer um dos dois tipos de botões aciona o elevador. Portanto, para os demais lugares e transições a sua dinâmica é a mesma que a descrita para o módulo 6. A figura 6.20 apresenta o módulo 7 (Lógica de acionamento do botão do andar).

Módulo 7 - Lógica de acionamento do botão do andar

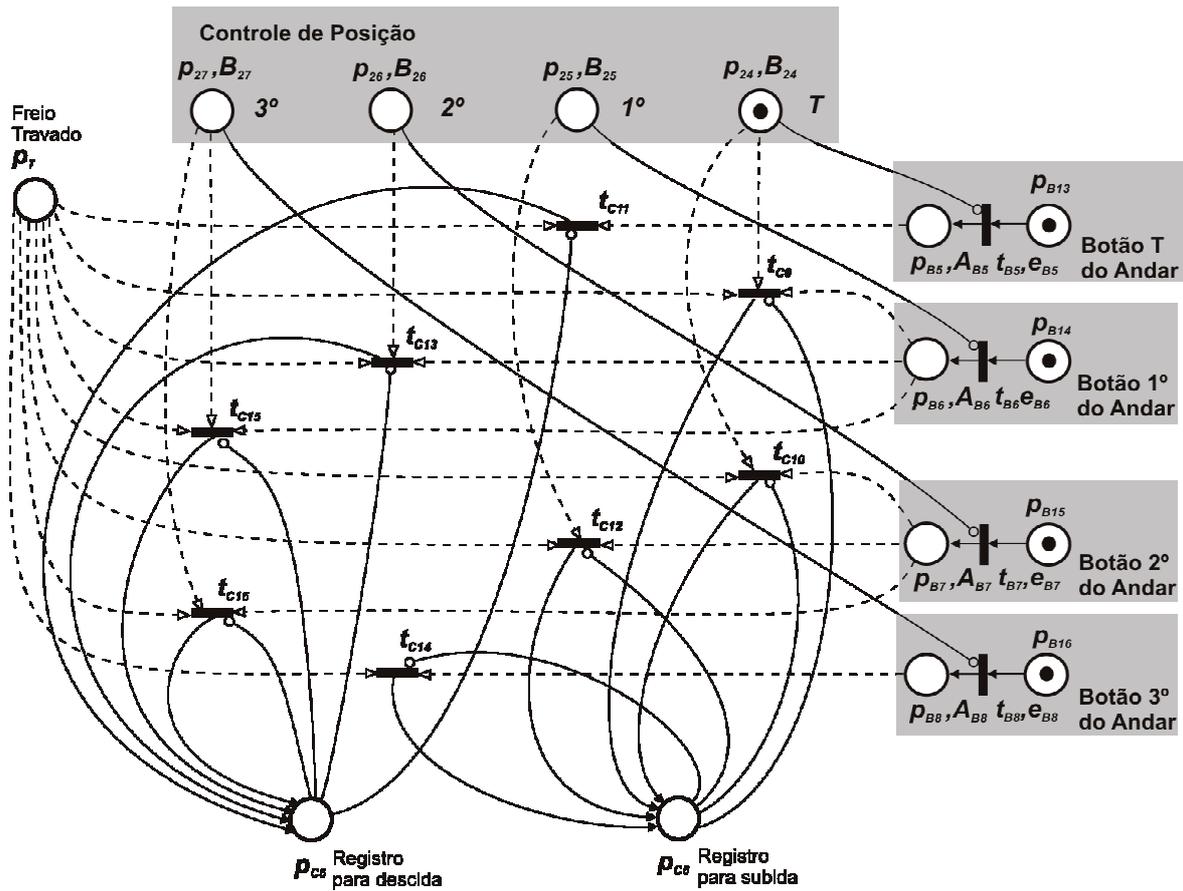


Figura 6.20 - Módulo 7 (Lógica de acionamento do botão do andar).

Seguindo a semelhança entre os dois grafos, a tabela 6.14 apresenta os lugares do módulo 7 com suas ações associadas.

Tabela 6.14 - Descrição dos lugares do módulo 7 e ações associadas.

Nó	Ação	Descrição	Mod.
p_7	-	Freio travado	2;6;7
p_{24}	B_{24}	Indicar "T" no display	5;6;7
p_{25}	B_{25}	Indicar "1º" no display	5;6;7
p_{26}	B_{26}	Indicar "2º" no display	5;6;7
p_{27}	B_{27}	Indicar "3º" no display	5;6;7
p_{B5}	A_{B5}	Acender LED do botão de chamada do Térreo no andar	7;9
p_{B6}	A_{B6}	Acender LED do botão de chamada do 1º andar no andar	7;11
p_{B7}	A_{B7}	Acender LED do botão de chamada do 2º andar no andar	7;12
p_{B8}	A_{B8}	Acender LED do botão de chamada do 3º andar no andar	7;10
p_{B9}	-	LED do botão de chamada do Térreo no andar apagado	6;9
p_{B10}	-	LED do botão de chamada do 1º andar no andar apagado	6;11
p_{B11}	-	LED do botão de chamada do 2º andar no andar apagado	6;12
p_{B12}	-	LED do botão de chamada do 3º andar no andar apagado	6;10
p_{Cs}	-	Registro para descida	6;7;8
p_{Cs}	-	Registro para subida	6;7;8

A tabela 6.20 apresenta a descrição dos eventos aos quais as transições do módulo 7 estão associados.

Tabela 6.15 - Descrição das transições do módulo 7 e as condições e eventos associados.

Nó	Sincronização	Descrição	Mod	
t_{B5}	e_{B5}	$\uparrow b_5$	Pressionado o botão de chamada do Térreo no andar	7;9
t_{B6}	e_{B6}	$\uparrow b_6$	Pressionado o botão de chamada do 1º andar no andar	7;11
t_{B7}	e_{B7}	$\uparrow b_7$	Pressionado o botão de chamada do 2º andar no andar	7;12
t_{B8}	e_{B8}	$\uparrow b_8$	Pressionado o botão de chamada do 3º andar no andar	7;10

6.5.2 Lógica de definição do sentido do movimento

Quando existe somente uma chamada registrada não existe dúvida com relação o sentido do movimento, no entanto, quando existe mais de uma chamada deve-se decidir qual será o sentido do movimento. Para otimizar o sistema a preferência do movimento é o último sentido de deslocamento, mudando de sentido caso alcance um dos andares extremos ou não haja mais chamadas a serem atendidas nesse sentido. A rede de Petri obtida para representar essa dinâmica apresenta 9 lugares ($p_3, p_4, p_{C1}, p_{C2}, p_{C3}, p_{C5}, \dots, p_{C8}$) e 6 transições (t_{C17}, \dots, t_{C23}) e está representado na figura 6.21.

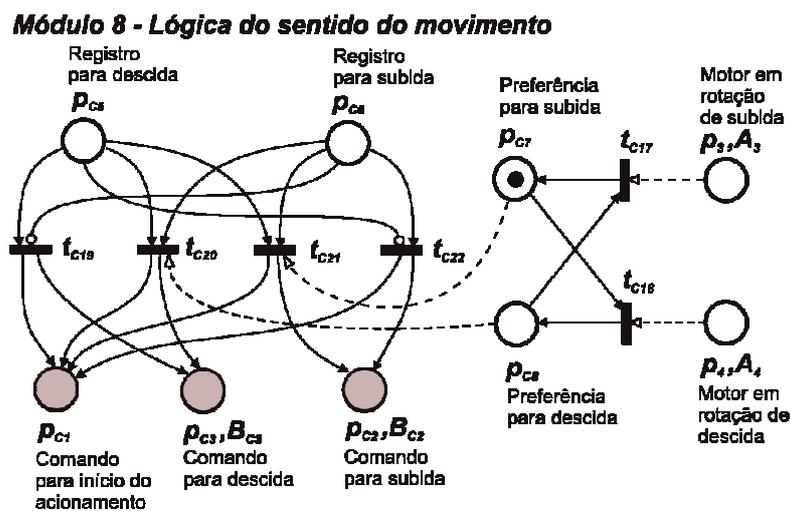


Figura 6.21 - Módulo 8 (Lógica do sentido do movimento).

Apenas os lugares p_{C7} e p_{C8} que representam preferência para subida e descida, respectivamente, não são compartilhados com outros módulos. Todos os lugares compartilhados já foram apresentados nas seções anteriores e suas descrições estão apresentadas na figura 6.21 para facilitar o entendimento.

Apresentados os módulos 6, 7 e 8 fica completa a lógica de acionamento do elevador apresentada no esquema da figura 6.18, que inicia com o botão de chamada pressionado, representados pelos lugares p_{B1}, \dots, p_{B8} e termina com os comandos para início de atendimento, para subida e para descida, representados pelos lugares p_{C1}, p_{C2} e p_{C3} , respectivamente, compartilhados com o subsistema dos atuadores. Fazendo a sincronização dos módulos 6, 7 e 8 é obtida a rede de Petri da lógica de acionamento apresentado na figura 6.22

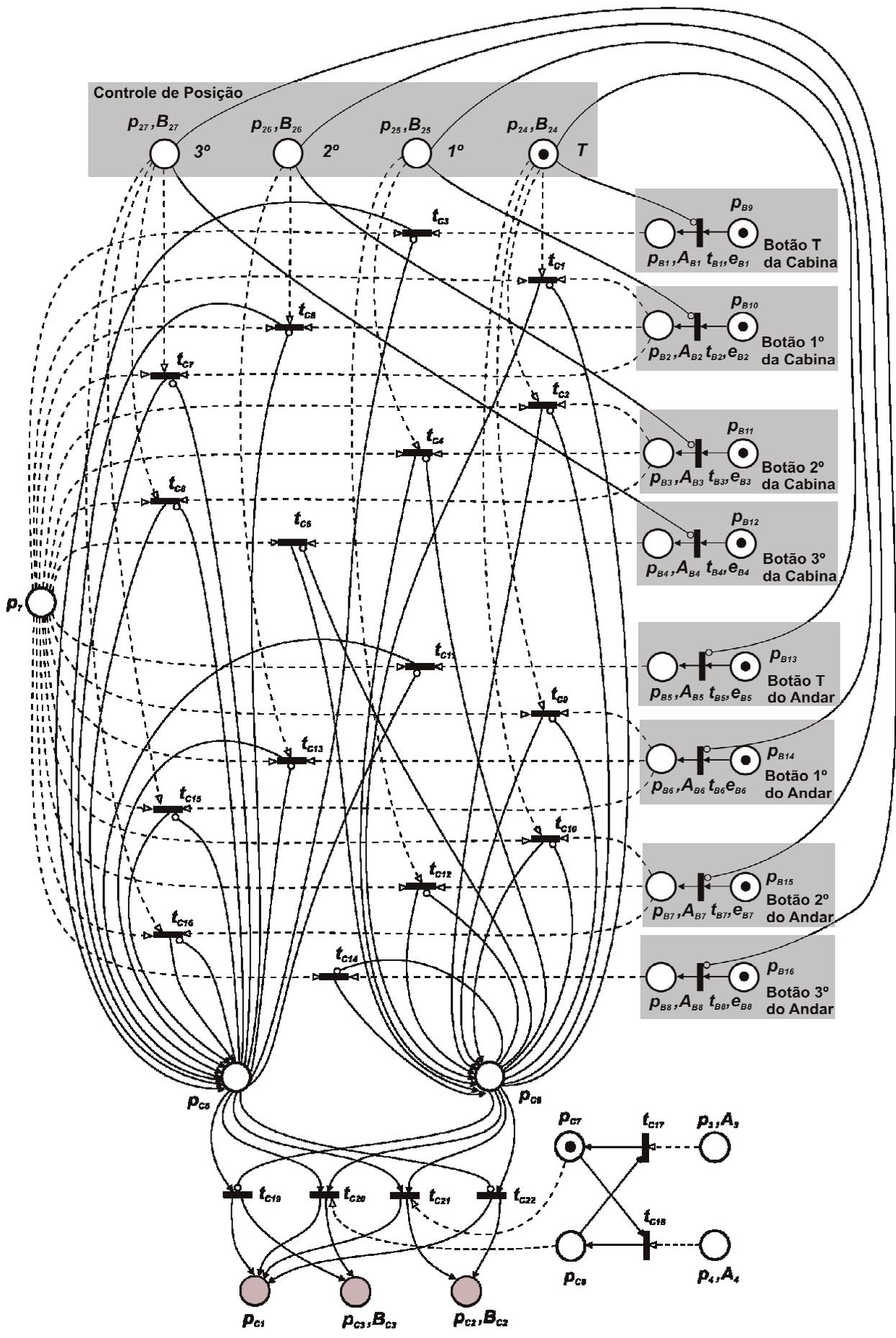


Figura 6.22 - Sincronização entre os módulos 6, 7 e 8 (Lógica de acionamento do botão da cabina, lógica de acionamento do botão do andar e lógica de definição do movimento).

A tabela 6.16 apresenta os lugares do módulo 8 com suas ações associadas.

Tabela 6.16 - Descrição dos lugares do módulo 8 e ações associadas.

Nó	Ação	Descrição	Mod.
p₃	A₃	Energizar bobinas tipo NA KM1 e KM2 p/ rotação de subida do motor	1;8;11;12
p₄	A₄	Energizar bobinas tipo NA KM1 e KM3 p/ rotação de descida do motor	1;8;11;12
p_{C1}	-	Comando para iniciar acionamento	3;8
p_{C2}	B_{C2}	Indicar “↑” (subindo) no display	1;8
p_{C3}	B_{C3}	Indicar “↓” (descendo) no display	1;8
p_{C5}	-	Registro para descida	6;7;8
p_{C6}	-	Registro para subida	6;7;8
p_{C7}	-	Preferência para rotação de subida	8
p_{C8}	-	Preferência para rotação de descida	8

As transições são descritas da seguinte forma: se a preferência é para descida e o motor está em rotação de subida, a preferência passa a ser para subida (t_{17}); se a preferência é para subida e o motor está em rotação de descida, a preferência passa a ser para descida (t_{18}); se existe registro para descida e não existe registro para subida, então é dado o comando para início de atendimento para descida (t_{19}); se existe registro para descida, registro para subida e a preferência é para descida, então é dado o comando para início de atendimento e para descida (t_{20}); se existe registro para descida, registro para subida e a preferência é para subida, então é dado o comando para início de atendimento para subida (t_{21}); e se existe registro para subida e não existe registro para descida, então é dado o comando para início de atendimento para descida (t_{22}).

Os módulos 6, 7 e 8 que definem a lógica de acionamento foram elaborados para o caso de um sistema de elevador para um edifício de quatro andares. Caso se queira ampliar o número de andares atendidos basta alterar os módulos 6 e 7 da Lógica de acionamento adicionando lugares para registro de chamada para os novos andares e as transições de comparação entre a posição e a chamada registrada. É necessário também adicionar um lugar de posicionamento da cabina no andar ao módulo 5 (figura 6.14), do controle de posição. O módulo 8 (Lógica de sentido do movimento) permanecerá inalterado.

6.5.3 Lógica de parada no andar extremo inferior (Térreo) e extremo superior (3º andar)

A lógica de comando automático de parada depende das chamadas registradas pelos botões da cabina e do andar, da posição da cabina e da condição de elevador em trânsito, como é ilustrado no esquema da figura 6.18. Se existir chamada no andar, a parada no andar é iniciada quando o andar do posicionamento atual da cabina for igual ao andar da chamada. A lógica de parada pode ser dividida em quatro módulos, um para cada um dos andares.

As lógicas de parada dos andares extremos (Térreo e 3º) possuem a mesma dinâmica, devido à limitação de ser alcançado por somente um sentido, pela descida ou pela subida,

respectivamente. Assim, não existe diferenciação na lógica de parada para o botão da cabina ou descida, como é apresentado na tabela 6.15, pois são sempre os últimos andares possíveis de serem atendidos em um dado sentido. A lógica dos andares intermediários (1º e 2º), no entanto, apresentam a diferenciação dos princípios de atendimento entre os botões dos andares e da cabina e será descrita na seção 6.5.4.

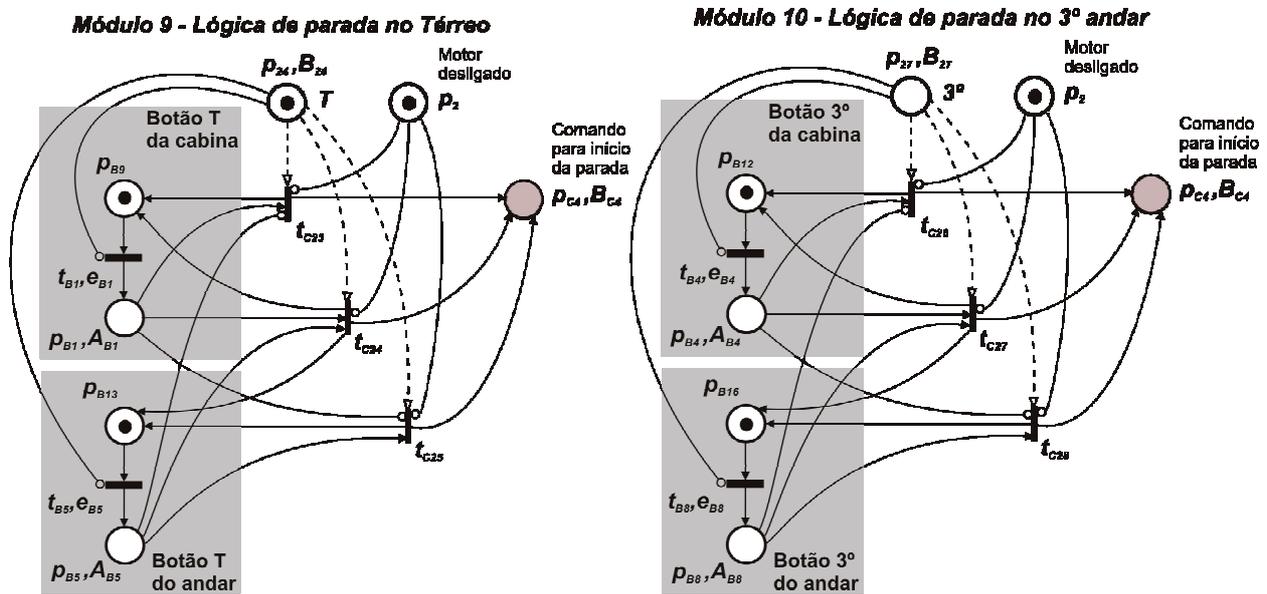


Figura 6.23 - Módulos 9 e 10 (Lógica de parada no andar Térreo e no 3º andar).

A rede de Petri obtida do módulo 9 (Lógica de parada no Térreo) possui 7 lugares (p_2 , p_{24} , p_{B1} , p_{B5} , p_{B9} , p_{B13} , p_{C4}) e 5 transições (t_{C23} , t_{C24} , t_{C25} , t_{B1} , t_{B5}). A rede de Petri do módulo 10 (Lógica de parada no 3º) possui 7 lugares (p_2 , p_{27} , p_{B4} , p_{B8} , p_{B12} , p_{B16} , p_{C4}) e 5 transições (t_{C26} , t_{C27} , t_{C28} , t_{B4} , t_{B8}). Ambos os módulos estão apresentados na figura 6.23 e possuem a mesma estruturação e dinâmica. Assim, será explicado somente o módulo 9 (Lógica de parada no Térreo). Todos os lugares do módulo 9 e 10 são compartilhados com outros módulos e já foram apresentados nas tabelas 6.2, 6.3, 6.11 e 6.14, suas descrições estão apresentadas na figura 6.23 para facilitar o entendimento.

As transições não compartilhadas do módulo 9 (t_{C23} , t_{C24} , t_{C25}) podem ser descritas da seguinte forma: se a cabina está posicionada no andar Térreo, o motor não está desligado, existe chamada registrada na cabina e não há registro de chamada no andar para o Térreo, então a chamada da cabina é apagada e o comando para início da parada é dado (t_{C23}); se a cabina está posicionada no andar Térreo, o motor não está desligado, existe chamada registrada no andar e na cabina para o Térreo, então a chamada do andar e da cabina são apagadas e o comando para início da parada é dado (t_{C24}); e se a cabina está posicionada no andar Térreo, o motor não está desligado, existe chamada registrada no andar e não há registro de chamada na cabina para o Térreo, então a chamada do andar é apagada e o comando para início da parada é dado (t_{C25}). As transições t_{B1} e t_{B5} , relacionadas ao botão da cabina e do andar, já foram descritas nas tabelas 6.13 e 6.15.

6.5.4 Lógica de parada nos andares intermediários (1º e 2º andar)

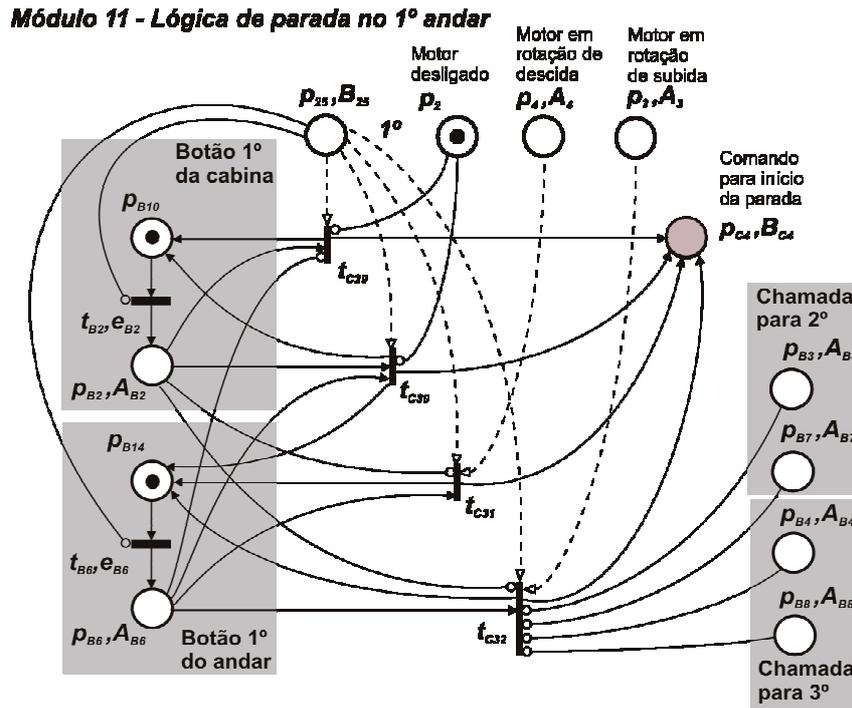


Figura 6.24 - Módulo 11 (Lógica de parada no 1º andar).

Como comentado na seção 6.5.3, os módulos dos andares intermediários apresentam maior complexidade devido aos diferentes princípios de atendimento entre os botões da cabina, que apresenta o princípio coletivo, e dos andares, que apresentam o princípio seletivo na descida, descritos na tabela 6.10. Se for o último andar com chamada registrada. A rede de Petri obtida do módulo 11 (Lógica de parada no 1º andar) possui 13 lugares ($p_2, p_3, p_4, p_{25}, p_{B2}, p_{B3}, p_{B4}, p_{B6}, p_{B7}, p_{B8}, p_{B10}, p_{B14}, p_{C4}$) e 6 transições ($t_{C29}, t_{C30}, t_{C31}, t_{C32}, t_{B2}, t_{B6}$) e está apresentado na figura 6.24. Todos os lugares do módulo 11 são compartilhados com outros módulos e já foram apresentados nas tabelas 6.2, 6.3, 6.11 e 6.14. Suas descrições já estão apresentadas na figura 6.24 para facilitar o entendimento.

As transições próprias do módulo 11 ($t_{C29}, t_{C30}, t_{C31}, t_{C32}$) podem ser descritas da seguinte forma: se a cabina está posicionada no 1º andar, o motor não está desligado, existe chamada registrada na cabina e não no andar para o 1º andar, então a chamada da cabina é apagada e o comando para início da parada é dado (t_{C29}); se a cabina está posicionada no 1º andar, o motor não está desligado, existe chamada registrada no andar e na cabina para o 1º andar, então a chamada do andar e da cabina são apagadas e o comando para início da parada é dado (t_{C30}); se a cabina está posicionada no 1º andar, o motor está ligado em rotação de descida, existe chamada registrada no andar e não na cabina para o 1º andar, então a chamada do andar é apagada e o comando para início da parada é dado (t_{C31}); se a cabina está posicionada no 1º andar, o motor está ligado em rotação de subida, existe chamada registrada no andar e não na cabina para o 1º andar e não existe chamada registrada nos andares superiores, então a chamada do andar é apagada e o comando para início da parada é dado (t_{C32});

Módulo 12 - Lógica de parada no 2º andar

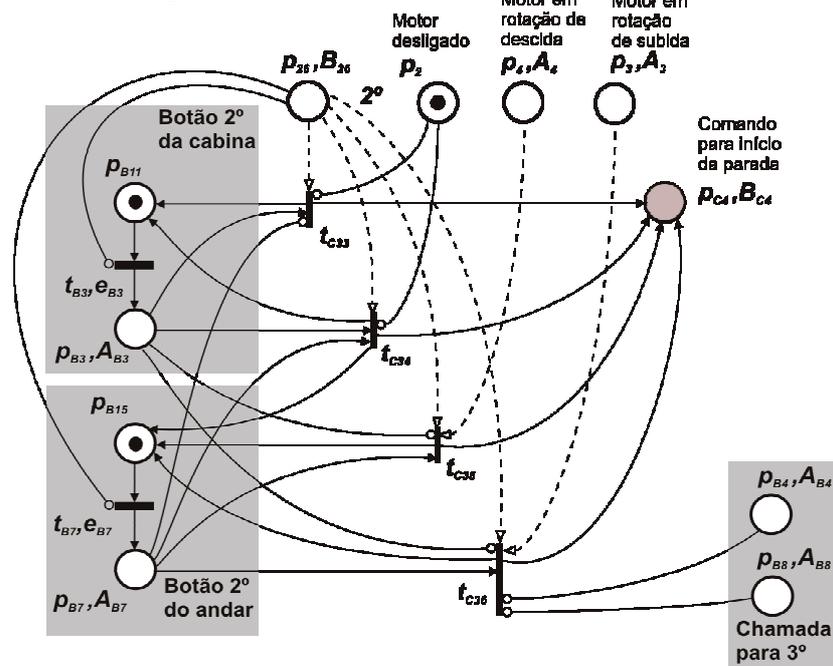


Figura 6.25 - Módulo 12 (Lógica de parada no 2º andar).

A rede de Petri obtida do módulo 12 (Lógica de parada no 2º andar) possui 11 lugares (p_2 , p_3 , p_4 , p_{26} , p_{B3} , p_{B4} , p_{B7} , p_{B8} , p_{B11} , p_{B15} , p_{C4}) e 6 transições (t_{C33} , t_{C34} , t_{C35} , t_{C36} , t_{B3} , t_{B7}) e está apresentado na figura 6.25. Assim como todos os demais módulos da lógica de parada, todos os lugares do módulo 12 são compartilhados com outros módulos e já foram apresentados nas tabelas 6.2, 6.3, 6.11 e 6.14.

Comparando os módulos 11 e 12 pode-se notar que as transições t_{C33} , t_{C34} , t_{C35} possuem a mesma dinâmica de disparo que as transições t_{C29} , t_{C30} , t_{C31} , de acordo com seu andar de referência. A única transição que possui variação na dinâmica de disparo em relação ao módulo 11 é a transição t_{C36} , que ocorre devido à referência do andar, pois para que ocorra a parada na subida pelo botão do 1º andar deve-se levar em consideração as chamadas para os andares acima, nesse caso 2º e 3º andar. Seguindo essa lógica para o botão do 2º andar, somente são levadas em consideração as chamadas para o 3º andar.

Apresentados os módulos 9, 10, 11 e 12, fica completa a lógica de parada nos andares seguindo o algoritmo do comando automático coletivo seletivo na descida. A rede de Petri obtida pela fusão dos lugares compartilhados é apresentada na figura 6.26. Deve-se observar que a rede de Petri da lógica de acionamento (figura 6.22) e da lógica de parada possuem os lugares do controle de posição (p_{24}, \dots, p_{27}) e as redes de Petri dos botões (p_{B1}, \dots, p_{B16} , t_{B1}, \dots, t_{B8}) compartilhados, que são pré-condições de disparo das transições de ambos os módulos, definindo assim uma condição de conflito. A resolução desse conflito é realizada pelos lugares p_7 , que representa a operação do freio, e os lugares p_2 , p_3 e p_4 , que representam a operação do motor. As operações do motor e do freio são sequenciais e não ocorrem ao mesmo tempo (seção 6.4).

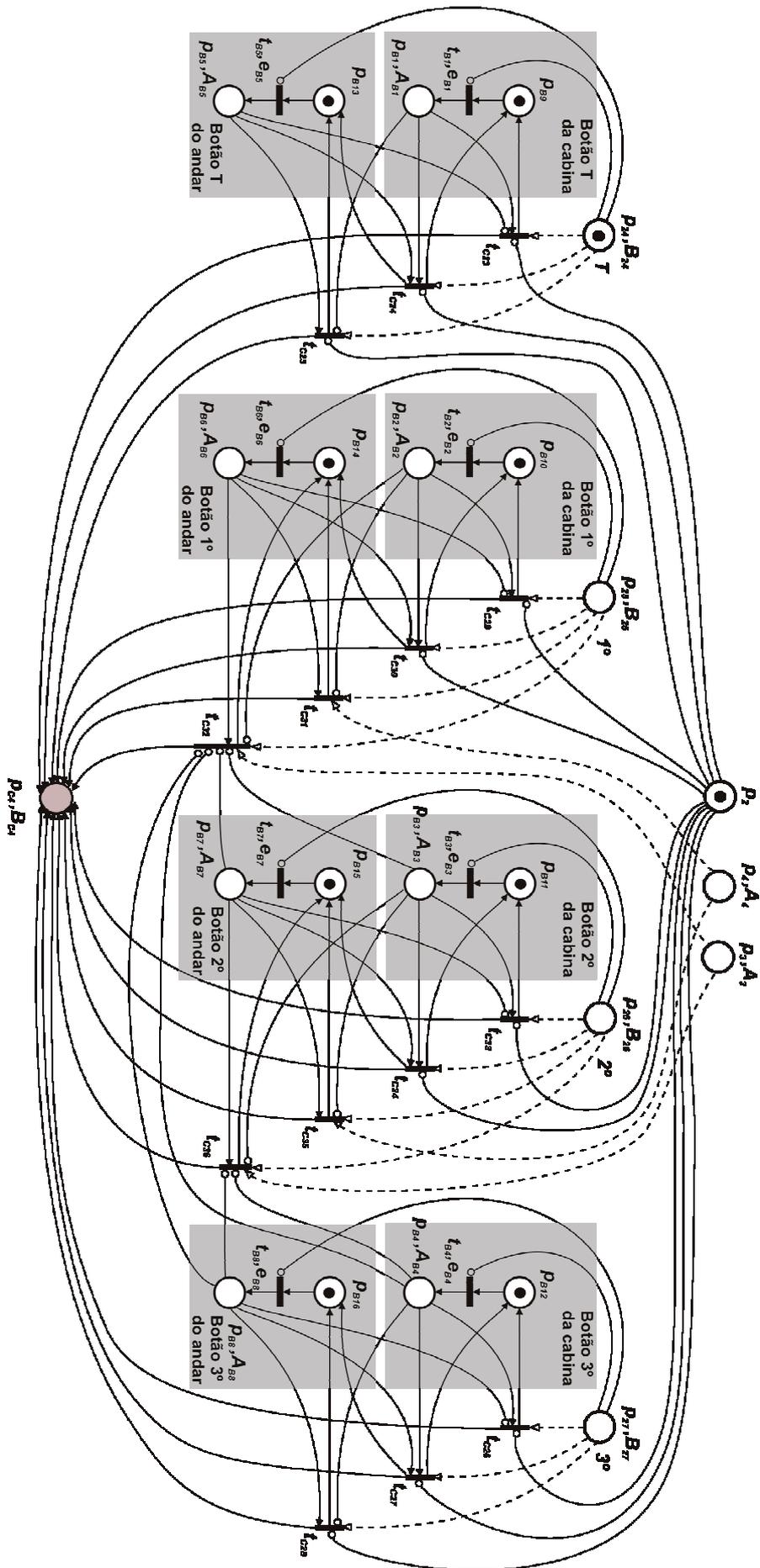


Figura 6.26 - Sincronização entre os módulos 9, 10, 11 e 12 (Lógica de parada nos andares Térreo, 3º, 1º e 2º, respectivamente).

6.6 Considerações finais

O controle supervísório do elevador foi modelado a partir a rede de Petri interpretada para controle apresentado no capítulo 4 e que é uma modificação do modelo de David e Alla [1], com o objetivo de aumentar o poder de modelagem da rede de Petri e simplificar o modelo. A estruturação foi feita utilizando-se composição modular.

A rede de Petri foi modelada visando descrever o comportamento do sistema controlado de modo que o estado dos seus principais componentes fossem observados. Aos lugares foram associadas ações de nível e impulsiais e as transições foram sincronizadas com eventos, condições externas e temporizações, obtendo-se assim a interpretação para controle desse sistema.

Visando descrever o comportamento do sistema do elevador controlado, os módulos ficaram agrupados em dois subsistemas: O subsistema dos atuadores, que representam os dispositivos atuadores do elevador, ou seja, o motor CA, o freio motor e o dispositivo atuador das portas, juntamente com os controles de velocidade e posição; e o subsistema da lógica de comando automático, que representa a lógica de comando automático coletivo seletivo na descida e o registro de chamadas realizadas pelos botões.

Como resultado final, a rede de Petri interpretada para controle do elevador de passageiros para o caso, estabelecido na seção 6.1, apresenta a seguinte totalização de seus elementos, apresentados na tabela 6.17. A lógica do modelo em rede de Petri interpretado para controle automático do elevador de passageiros pode facilmente ser convertida para uma linguagem de programação de um CLP, microprocessador ou computador e ser implementada na prática. Aplicando a lógica em diagramas Ladder utilizando CLPs, com a ajuda metodologias de conversão apresentadas em [3, 4, 5, 6].

Tabela 6.17 - Total de elementos da rede de Petri interpretada para controle do elevador.

Totalização dos elementos da rede de Petri interpretada para controle	
Lugares	51
Transições	67
Ações de Nível	13
Ações de Impulso	8
Variáveis externas	19
Eventos	24
Condições	7
Temporizações	1

7 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo a elaboração de um projeto para controle automático de um sistema de elevador de passageiros utilizando redes de Petri interpretadas para controle.

Para alcançar esse objetivo foi abordado o conceito de sistemas a eventos discretos, que são modelados pelas redes de Petri. Foram estudados os conceitos fundamentais das redes de Petri e algumas de suas variações encontradas na literatura, classificadas como redes de Petri abreviadas e estendidas [8], que adicionam novas funcionalidades ao modelo original. Entre as novas funcionalidades estão o arco inibidor, o arco habilitador, a temporização e, principalmente, o conceito de sincronização, que é base para elaboração das redes de Petri interpretadas para controle.

A rede de Petri interpretada para controle baseou-se no modelo de David e Alla [1], que sofreu modificações para melhor atender às necessidades do modelo do controle do elevador do caso proposto. A rede de Petri interpretada para controle do elevador foi construída utilizando o método de composição modular. Buscou-se estruturar o modelo de forma que se representasse o comportamento do sistema controlado, para facilitar o entendimento do modelo e observação dos estados dos componentes principais do sistema; entre eles o motor, o freio, as portas da cabina e a posicionamento do elevador.

Assim obteve-se o controle supervisorio do elevador de passageiros seguindo os requisitos do caso base (seção 6.1), entre eles, o atendimento de um prédio residencial de quatro andares (T, 1º, 2º e 3º) com lógica de comando automático coletivo seletivo na descida. Como o modelo apresenta o comportamento do sistema controlado e foi estruturado a partir de módulos, é facilmente alterável, tanto pela adição de outros componentes e mecanismos ao sistema como por alterações de sua dinâmica. Como, por exemplo, o atendimento de mais de quatro andares em que seria necessária somente a alteração dos módulos 5, 6 e 7 e a inserção de um novo módulo para o andar intermediário baseado nos módulos 11 e 12.

E também, como resultado deste trabalho, foi elaborado um novo modelo de redes de Petri interpretada para controle, que não era inicialmente previsto na elaboração deste trabalho, que pode ser utilizado em outras aplicações.

Com isto, pode-se concluir que as redes de Petri são de fácil aplicação e possuem alto poder de modelagem, representando lógicas complexas como é o caso do controle automático do elevador de passageiros. Apresenta-se uma ferramenta de modelagem muito útil na elaboração de projetos de controle e automação de sistemas complexos.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

Podem ser sugeridos os seguintes trabalhos futuros como complementação deste:

- Implementar a lógica de controle automático do elevador representada em redes de Petri fazendo a conversão para diagramas Ladder entre outras, utilizando CLPs.
- Modelar outros algoritmos de comando automático para atendimento do elevador; alguns deles apresentados na seção 5.2.4. E até o controle coordenado para atendimento de um grupo de elevadores, bastante versátil, porém com uma maior complexidade no controle.
- Inserir outros dispositivos de detecção para rotina de segurança como os sensores de fim de curso da caixa do elevador e o sensor de peso na cabina, que detecta o peso da carga sendo transportada, entre outros.
- Acrescentar módulos para alarmes e dispositivos de emergência como o sistema do freio de segurança, operações de nivelamento e renivelamento, sobrevelocidade de subida, situação de falhas, rotina de emergência e de manutenção, entre outras, previstas pela Norma [9], ao modelo em rede de Petri elaborado.
- Desenvolver metodologias para aplicação da rede de Petri interpretada para controle desenvolvida para a modelagem do controle do elevador para o controle de outros sistemas a eventos discretos.

Assim sendo, espera-se que este trabalho venha estimular a aplicação e o desenvolvimento de metodologias para utilização das redes de Petri interpretadas para controle em projetos de controles de sistemas a eventos discretos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] David, R. e Alla, H. Discrete, Continuous and Hybrid Petri Nets, Springer, 1994.
- [2] Zhou, M. e Venkatesh, K. Modeling, Simulation, and Control of Flexible Manufacturing Systems: A Petri Net Approach, World Scientific, 1998.
- [3] Uzam, M., Jones, A.H. e Ajlouni, N. Conversion of Petri Net Controllers for Manufacturing Systems into Ladder Logic Diagrams, IEEE, 1996.
- [4] Jiménez, I., López, E. e Ramírez, A. Synthesis of Ladder Diagrams from Petri Nets Controller Models, IEEE, 2001.
- [5] Lee, G. B., Zandong, H. e Lee, J. S. Automatic generation of ladder diagram with control Petri Net, Kluwer Academic Publishers, 2004
- [6] Peng, S. S. e Zhou, M. C. Ladder Diagram and Petri-Net-Based Discrete-Event Control Design Methods, IEEE, 2004.
- [7] Cassandras, C.G. e Lafortune, S. Introduction to Discrete Event Systems - 2ª edition, Springer Science, 2008.
- [8] David, R. e Alla, H. Petri Nets for Modeling of Dynamic Systems – A Survey, Automatica Vol. 30, No. 2, pp.175-202,1994.
- [9] Disponível em <http://inventors.about.com/gi/dynamic/offsite.htm?site=http://www.columbia-elevator.com/info/index.html>, Visitado em 07/11/08.
- [10] Norma NBR NM 207 Elevadores elétricos de passageiros - Requisitos de segurança para construção e instalação, ABNT, 1999.
- [11] Disponível em <http://science.howstuffworks.com/elevator.htm>, Visitado em 07/11/08.
- [12] Manual de Transporte Vertical em Edifícios: Elevadores de Passageiros, Escadas Rolantes, Obra Civil e Cálculo de Tráfego, Elevadores Atlas Schindler, 2004.
- [13] Borges, A. G. Sensores Ópticos de Passagem e Medição de Distância. Brasília: UnB, 2005.
- [14] Gustin, G. D. B. Aplicação de Redes de Petri Interpretadas na Modelagem de Sistemas de Elevadores em Edifícios Inteligentes. São Paulo: USP, 1999.

ANEXO A – DEFINIÇÕES E PROPRIEDADES DE CONDIÇÕES E EVENTOS EXTERNOS

Para estabelecer condições e eventos externos de um sistema a eventos discretos é importante estabelecer algumas definições e propriedades dos mesmos, com objetivo de entender como utilizá-los dentro do modelo de redes de Petri interpretadas para controle. As definições A.1, A.2 e A.3 de [1] apresentam as definições e equacionamentos das condições e eventos.

Definição A.1: *Seja $f(a_1, a_2, K, a_m)$ uma função Booleana cujo valor seja definido no instante inicial igual a zero, e suponha que, para $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3 < K < \tau_n < \tau_{n+1} < K$ tenha-se*

1- $f = 0$ nos intervalos de tempo $[0, \tau_1[, [\tau_2, \tau_3[, K, [\tau_{2p}, \tau_{2p+1}[, K$;

2- $f = 1$ nos intervalos de tempo $[\tau_1, \tau_2[, [\tau_3, \tau_4[, K, [\tau_{2p+1}, \tau_{2p+2}[, K$;

Se $\tau_1 > 0$, o evento $\uparrow f = \uparrow f(a_1, a_2, K, a_m)$ ocorre nos instantes $\tau_1, \tau_3, K, \tau_{2p+1}, K$ e o evento $\downarrow f (= \uparrow f')$ ocorre nos instantes $\tau_2, \tau_4, K, \tau_{2p}, K$.

Se $\tau_1 = 0$, isto é, se o valor inicial de $f = 1$, o evento $\uparrow f = \uparrow f(a_1, a_2, K, a_m)$ ocorre nos instantes $\tau_3, K, \tau_{2p+1}, K$ e o evento $\downarrow f$ ocorre nos instantes $\tau_2, \tau_4, K, \tau_{2p}, K$ •

A partir de agora a, b, K irão denominar variáveis ou funções booleanas com a seguinte simbologia: $\uparrow a \cdot b = (\uparrow a) \cdot b$ e $\uparrow a + b = (\uparrow a) + b$.

Definição A.2:

- O produto $\uparrow a \cdot b$ é um evento ocorrendo no mesmo instante que $\uparrow a$ em cada vez que $b = 1$ no instante correspondente.
- O produto $\uparrow a \cdot \uparrow b$ é um evento ocorrendo nos instantes em que $\uparrow a$ e $\uparrow b$ ocorrem simultaneamente; somente é possível se a e b não são independentes.
- A soma $\uparrow a + \uparrow b$ é um evento ocorrendo sempre que $\uparrow a$ "OU" $\uparrow b$ ocorram.
- Seja S um sistema cujo comportamento depende do conjunto de eventos E . Seja $E(\tau)$ o sinal do evento associando a S no instante $\tau : E(\tau) \in E \cup \{\varepsilon\}$, onde ε é a ausência de evento em E no instante τ . •

A figura A.1 apresenta graficamente a definição A.1 (figura A.1.a) e os itens a, b e c da definição A.2 (figuras A.1.b, A.1.c e A.1.d, respectivamente)

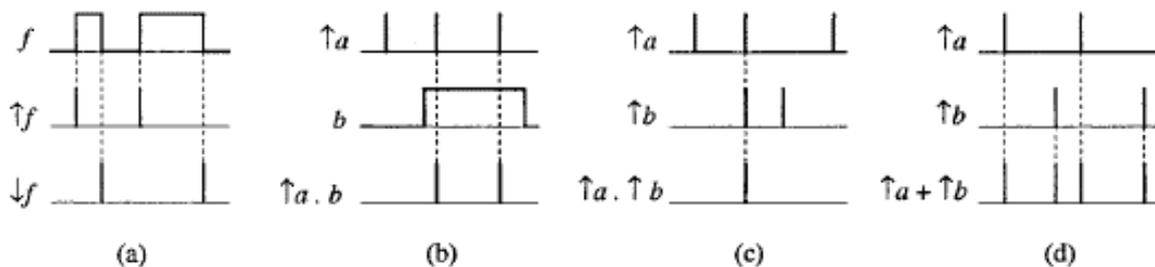


Figura A.1: Ilustração das definições A.1 e A.2 [10].

Definição A.3: Dois eventos e_1 e e_2 são independentes se não existe evento e_i tal que $e_1 = x + A \cdot e_i$ e $e_2 = y + B \cdot e_i$ em que x e y são eventos, A e B são funções booleanas ou eventos e são tais que $x + y + A \cdot B \cdot e_i > x + y$. •

Por exemplo $e_1 = \uparrow f$ e $e_2 = \uparrow g$ podem não ser independentes se ambos dependem da mesma variável Booleana a , por exemplo, $f = a \cdot b$ e $g = a$. Nesse exemplo pode se verificar que $e_i = \uparrow a$, $x = \uparrow b \cdot a$, $A = b$, $y = 0$ e $B = 1$. Determina-se a hipótese que dois eventos independentes nunca ocorrem simultaneamente, em outras palavras $\uparrow a \cdot \uparrow b = 0$, se a e b são duas variáveis independentes. A seguir algumas propriedades de eventos e condições:

- a) $\uparrow a = \downarrow \bar{a}$
- b) $\uparrow a \cdot a = \uparrow a$, $\uparrow a \cdot \bar{a} = 0$, $\downarrow a \cdot \bar{a} = \downarrow a$, $\downarrow a \cdot a = 0$,
- c) $\uparrow a \cdot \uparrow a = \uparrow a$, $\uparrow a \cdot \uparrow \bar{a} = 0$, $\uparrow a \cdot e = \uparrow a$,

Se a e b são duas variáveis independentes, então:

d) $\uparrow (a \cdot b) = \uparrow a \cdot b + \uparrow b \cdot a$ e $\uparrow (a + b) = \uparrow a \cdot \bar{b} + \uparrow b \cdot \bar{a}$

Se a , b e c são três variáveis independentes, então:

e) $\uparrow (a \cdot b) \uparrow (a \cdot c) = \uparrow a \cdot b \cdot c$.