ROBSON MARINHO DA SILVA

**Modelagem de Sistemas de Controle de Edifícios Inteligentes
Considerando a Ocorrência de Falhas**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia.

São Paulo
2008

ROBSON MARINHO DA SILVA

**Modelagem de Sistemas de Controle de Edifícios Inteligentes
Considerando a Ocorrência de Falhas**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Controle e Automação

Orientador:
Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi

São Paulo
2008

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 04 de dezembro de 2008

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Robson Marinho da

**Modelagem de sistemas de controle de edifícios inteligentes considerando a ocorrência de falhas / R.M. da Silva. – ed. rev. -- São Paulo, 2008.
183 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Sistemas de controle 2.Edifícios inteligentes 3.Falhas computacionais 4.Redes de Petri I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

*Aos meus pais Ribeiro e Olimpia responsáveis pela minha
existência e educação*

*Aos meus filhos Rafael e Felipe e a minha esposa Jomailsa pelo
apoio, incentivo e compreensão nos momentos de ausência*

*Aos meus sogros João e Maria e a meus irmãos pela união e
dedicação em todas as situações*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi pelo auxílio e incentivo, pela constante e incondicional atenção, e por tudo que aprendi com ele durante o mestrado.

Aos professores Dr. José Reinaldo Silva, Dr. José Roberto de Almeida Amazonas e Dr. Julio Arakaki pelas inúmeras e valiosas contribuições, e pelo direcionamento e acompanhamento deste trabalho.

Aos meus colegas da sala MC-09 pelas sugestões, contribuições e amizade ao longo destes anos.

Ao pessoal do edifício *Accenture*, pela colaboração para a realização desta pesquisa.

A Escola Politécnica da USP, ao Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, que institucionalmente viabilizaram esta pesquisa.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia – FAPESB, e Universidade Salvador – UNIFACS que auxiliaram financeiramente diferentes partes desta pesquisa.

A todos meus amigos e a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

Silva, R.M. **Modelagem de sistemas de controle de edifícios inteligentes considerando a ocorrência de falhas**. 2008. 183f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

Sistemas de controle de edifícios inteligentes têm evoluído consideravelmente e a sua confiabilidade também tem melhorado. Mesmo assim, falhas são inevitáveis em sistemas concebidos, construídos e operados pelo homem e uma abordagem alternativa envolve a minimização das consequências das falhas. Isto é possível através da reconfiguração do sistema que se faz realocando funções de controle e escolhendo outras formas de interação entre os processos. Apesar disso, na literatura ainda não existe muito material que trate da modelagem de processos em que desde a sua concepção as falhas são consideradas. Assim, propõe-se neste trabalho o desenvolvimento de um procedimento para a modelagem de sistemas de controle considerando além das especificações funcionais, em situação normal, a ocorrência de falhas. Em função da base teórica existente e ferramentas disponíveis a abordagem proposta adota o conceito de sistemas a eventos discretos, holon e a técnica de rede de Petri e suas extensões para descrever a estrutura e o funcionamento deste sistema de controle. Um exemplo de aplicação é aqui apresentado para ilustrar as principais características deste procedimento.

Palavras chaves: sistema de controle, edifício inteligente, tolerância à falha, reconfiguração, sistema a eventos discretos, holon, rede de Petri.

ABSTRACT

Silva, R.M. **Control systems modeling of intelligent buildings considering the faults occurrence.** 2008. 183p. Master's thesis – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

Control systems of intelligent buildings have evolved and its reliability has evidently improved. However, faults are inevitable in systems conceived, constructed and operated by humans and an alternative approach is the minimization of the faults consequences. This is possible through the reconfiguration of the system, i.e., re-allocating control functions and choosing other forms of interaction between the processes. Despite this, there are few publications that deal with the modeling of processes where since its conception the faults are considered. Thus, this work proposes the development of a procedure for the modeling of control systems considering beyond the functional specifications in normal situation, the occurrence of faults. Based on the existing theoretical base and available tools the proposal adopts the concept of discrete event system, holon and Petri net technique with its extensions to describe the structure and the operation of these control systems. An application example is here presented to illustrate the principal characteristics of this proceeding.

Keywords - Control system, intelligent building, fault tolerance, reconfiguration, discrete event system, holon, Petri net.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	ix
 1.INTRODUÇÃO.....	 1
1.1. Edifícios inteligentes.....	1
1.2. Sistemas de controle de edifícios inteligentes.....	3
1.3. Motivações e justificativas.....	6
1.4. Objetivo.....	11
1.5. Organização do texto.....	11
 2.CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	 13
2.1. Sistemas produtivos.....	13
2.2. Sistemas supervisórios.....	16
2.3. Sistemas de controle.....	18
2.3.1.Projeto de sistemas de controle.....	20
2.3.2.Arquitetura de sistemas de controle.....	22
2.4. Holons.....	24
2.4.1.Trabalhos em sistemas de controle com holons.....	26
2.5. Falha, erro e defeito.....	28
2.6. Sistema de controle tolerante a falhas (FTCSs).....	30
2.6.1.Deteção, diagnóstico, validação e decisão.....	33
2.7. Rede de Petri.....	36
2.7.1. <i>Production Flow Schema</i> (PFS).....	39
2.7.2.Redes de Petri lugar transição temporizada e com arcos habilitadores e inibidores.....	40
2.7.3.Modelagem de tratamento de falhas.....	42

2.8. Síntese do capítulo	43
3.ARQUITETURA E FUNCIONAMENTO DO FTCS PARA EIs.....	46
3.1. Arquitetura de controle.....	46
3.2. Mecanismos de adaptação do FTCS para EI.....	49
3.2.1. Negociação.....	49
3.2.2. Autonomia.....	51
3.2.3. Propagação de mensagens.....	52
3.3. Chaveamento do modo de controle.....	53
3.4. Estimação do tempo.....	54
3.5. Fases do FTCS.....	56
3.5.1.Estimação.....	57
3.5.2.Planejamento.....	59
3.5.3.Execução.....	60
3.5.4.Aprendizagem.....	60
3.6. Síntese do capítulo.....	61
4.PROCEDIMENTO PROPOSTO PARA O PROJETO DE FTCSs DE	
EIs.....	63
4.1.Etapa 1 – Análise de requisitos.....	64
4.1.1.Sub-etapa 1.1 – Identificação dos holons.....	65
4.1.2.Sub-etapa 1.2 – Especificações para FTCS do EI.....	70
4.1.3.Sub-etapa 1.3 – Definição dos padrões da interação entre holons.....	74
4.2. Etapa 2 – Modelagem	87
4.2.1.Sub-etapa 2.1 - Modelagem dos <u>holons do subsistema</u> (HSSs).....	87
4.2.2.Sub-etapa 2.2 - Modelagem dos <u>holons de estratégia</u> (HEs).....	89
4.2.3.Sub-etapa 2.3 - Modelagem dos <u>holons supervisores</u> (HSs).....	92
4.2.4.Sub-etapa 2.4 - Modelagem dos <u>holons operacionais</u> (HOs).....	94
4.2.5.Sub-etapa 2.5 - Modelagem do objeto de controle.....	98
4.2.6.Sub-etapa 2.6 – Modelagem para FTCS do EI.....	99
4.3. Etapa 3 – Análise/ simulação	109

4.3.1. Sub-etapa 3.1: Análise Qualitativa.....	112
4.3.2. Sub-etapa 3.2: Análise Quantitativa.....	113
4.4. Etapa 4 – Implementação.....	113
4.5. Síntese do capítulo.....	114
5. EXEMPLO DE APLICAÇÃO.....	115
5.1. Etapa 1 – Análise de requisitos.....	115
5.1.1. Sub-etapa 1.1 – Identificação dos holons.....	115
5.1.2. Sub-etapa 1.2 – Especificações para FTCSs de EIs.....	141
5.1.3. Sub-etapa 1.3 – Definição dos padrões da interação entre holons.....	143
5.2. Etapa 2 – Modelagem.....	146
5.2.1. Sub-etapa 2.1 - Modelagem dos <u>holons do subsistema</u> (HSSs).....	146
5.2.2. Sub-etapa 2.2 - Modelagem dos <u>holons de estratégia</u> (HEs).....	147
5.2.3. Sub-etapa 2.4 - Modelagem dos <u>holons operacionais</u> (HOs).....	147
5.2.4. Sub-etapa 2.5 - Modelagem do objeto de controle.....	147
5.2.5. Sub-etapa 2.6 – Modelagem para FTCS do EI.....	150
5.3. Etapa 3 – Análise/ simulação	156
5.4. Síntese do capítulo.....	162
6. CONCLUSÕES.....	163
6.1. Trabalhos futuros.....	165
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	167
8. ANEXO A.....	176
9. APENDICE I – TRABALHOS PUBLICADOS.....	183

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Processo de abstração/ refinamento (adaptado de GUSTIN, 2005).....	4
Figura 1.2. Arquitetura hierárquica típica em edifícios inteligentes.....	5
Figura 1.3. Diagrama do sistema de controle para EI (adaptado de MIYAGI, 1996).....	5
Figura 1.4. Subsistemas de edifícios inteligentes com reconfiguração (adaptado de ARAKAKI, 2004).....	6
Figura 1.5. Requisitos dos atuais sistemas de controle de EIs.....	9
Figura 2.1. Classificação geral de sistemas (adaptado de CASSANDRAS, 1993).....	15
Figura 2.2. Níveis de controle	16
Figura 2.3. Diagrama conceitual dos sistemas de controle (MIYAGI, 1996).....	19
Figura 2.4. Diagrama conceitual do sistema de controle para SEDs (MIYAGI, 1996).....	20
Figura 2.5. Procedimento de projeto de sistemas de controle (MIYAGI, 1996).....	20
Figura 2.6. Ciclo de prototipagem de <i>software</i> (MIYAGI, 1996).....	22
Figura 2.7. Modelo de propagação de erro, adaptado de a) WEBER, 2003 e b) AVIZIENIS et al., 2004.....	29
Figura 2.8 Processo de FDD, de validação e de decisão durante a operação de sistemas (KATIPAMULA & BRAMBLEY, 2005a, 2005b).....	32
Figura 2.9. Elementos da rede de Petri estendida.....	38
Figura 2.10. Elementos do PFS	40
Figura 2.11. Exemplo de disparo de transição.....	41
Figura 2.12. Indicação do peso em arcos habilitadores (a) e inibidores (b).....	42
Figura 3.1. Arquitetura do sistema de controle de EI baseado em holons: a) modo estacionário e b) modo transitente.....	47
Figura 3.2. Modelo de representação do <u>holon operacional</u> (HO) por holarquias.....	49
Figura 3.3. Evolução do fator de autonomia (α) (baseado em LEITÃO et al., 2005).....	52
Figura 3.4. A propagação de mensagem de uma falha (adaptado de LEITÃO et al., 2005)....	53
Figura 3.5. Janela temporal para a estimação do tempo de recuperação (adaptado de LEITÃO et al., 2005).....	54
Figura 3.6. Fases do FTCS proposto.....	56
Figura 3.7. Exemplo de ação reflexo para sistema de controle.....	60
Figura 4.1. PFS das etapas de desenvolvimento do procedimento.....	63
Figura 4.2. PFS da sub-etapa 1.1: identificação dos holons.....	65

Figura 4.3. PFS da sub-etape 1.2: especificações para FTCS de EIs.....	70
Figura 4.4. Diagrama das mudançás de estado de um componente.....	72
Figura 4.5. PFS da sub-etape 1.3: definição dos padrões de interações entre holons.....	74
Figura 4.6. Interação entre os holons na solicitação de serviços do EI.....	77
Figura 4.7. Exemplo da interação “preparação e execução”.....	79
Figura 4.8. Acionamento de dispositivo através de um HO.....	80
Figura 4.9. <u>Supervisão passiva</u> (a) sem a presença do HS e (b) com HS.....	81
Figura 4.10. Exemplo de <u>supervisão ativa</u>	82
Figura 4.11. A propagação de mensagens e o chaveamento do modo de controle entre holons.....	84
Figura 4.12. A programação distribuída durante o "modo transiente".....	85
Figura 4.13. O processo de negociação durante o "modo transiente" entre holons.....	86
Figura 4.14. PFS e detalhamento em rede de Petri da “sub-etape 2.1: modelagem dos HSSs”.....	88
Figura 4.15. PFS e detalhamento em rede de Petri da “sub-etape 2.2: modelagem dos HEs”.....	91
Figura 4.16. PFS e detalhamento em rede de Petri da “su-etape 2.3: modelagem dos HSs”.....	93
Figura 4.17. PFS da “sub-etape 2.4: modelagem dos HOs”.....	93
Figura 4.18. Modelo da atividade “recebe anúncio” em PFS do <u>holon operacional</u> (HO).....	95
Figura 4.19. Detalhamento da atividade “recebe proposta” em rede de Petri do <u>holon operacional</u> (HO).....	96
Figura 4.20. Detalhamento da atividade “preparação para execução” em rede de Petri do <u>holon operacional</u> (HO).....	97
Figura 4.21. Detalhamento da atividade “execução” em rede de Petri do <u>holon operacional</u> (HO).....	98
Figura 4.22. Detalhamento da atividade “supervisão da execução” em rede de Petri do <u>holon operacional</u> (HO).....	98
Figura 4.23. Modelo estendido em rede de Petri do componente válvula e de seu controlador.....	99
Figura 4.24. Modelagem em rede de Petri estendida de a) estratégia e objeto de controle, mecanismos b) diagnosticador e c) decisor.....	102
Figura 4.25. Modelo da atividade “tratamento de falhas” em PFS do ponto de vista do <u>holon de estratégia</u> (HE).....	103

Figura 4.26. Detalhamento da atividade “ordens atrasadas” em rede de Petri do ponto de vista do <u>holon de estratégia</u> (HE).....	105
Figura 4.27. Detalhamento das atividades a) “atuador quebrado” e b) “sensor quebrado”, em rede de Petri do ponto de vista do <u>holon de estratégia</u> (HE).....	105
Figura 4.28. Modelo da atividade “falha no controle de rede” em PFS do ponto de vista do <u>holon de estratégia</u>	105
Figura 4.29. Detalhamento da atividade “queda de desempenho” em rede de Petri do ponto de vista do <u>holon de estratégia</u> (HE).....	106
Figura 4.30. Detalhamento da atividade “programação distribuída” em rede de Petri do ponto de vista do <u>holon de estratégia</u> (HE).....	106
Figura 4.31. Detalhamento da atividade “negociação para a reconfiguração” em rede de Petri do ponto de vista do <u>holon de estratégia</u> (HE).....	107
Figura 4.32. Detalhamento da atividade “negociar prioridade” em rede de Petri do ponto de vista do <u>holon de estratégia</u> (HE).....	107
Figura 4.33. Modelo da atividade “chaveamento do modo de controle” em PFS do <u>holon de estratégia</u> (HE).....	108
Figura 4.34. Modelo da atividade “tratamento de falha” em PFS do ponto de vista do <u>holon operacional</u> (HO).....	108
Figura 4.35. Modelos do <u>holon operacional</u> em rede de Petri no <i>software</i> HPSim.....	112
Figura 5.1. a) Prédio comercial do edifício <i>Accenture</i> e b) HSSs definidos para estudo.....	117
Figura 5.2. (a) Diagrama estrutural de um HVAC e (b) de uma caixa VAV.....	119
Figura 5.3. Exemplo de rede do tipo par-a-par: a) conexão física e b) conexão lógica.....	125
Figura 5.4. Arquitetura de controle incluindo <u>holons de estratégias</u> do conforto térmico.....	128
Figura 5.5. Holarquias de HSs e HOs para o conforto térmico.....	135
Figura 5.6. Diagrama lógico de uma parte do sub-sistema de produção de frio.....	142
Figura 5.7. Diagramas lógicos de mudança de estado a) do nó e b) do <i>link</i>	142
Figura 5.8 Interação entre holons para “solicitação de produção de frio”.....	145
Figura 5.9 Interação entre holons para “execução” de comando em válvula.....	146
Figura 5.10. PFS da modelagem dos HSSs e do HSS do conforto térmico.....	148
Figura 5.11. PFS das estratégias do conforto térmico.....	148
Figura 5.12 PFS da estratégia “condicionamento de ar para zona 01”.....	149
Figura 5.13 Modelagem do <u>holon operacional</u> do componente válvula 1.....	149
Figura 5.14. Modelagem em rede de Petri dos componentes da produção de frio.....	150

Figura 5.15. Modelos da estratégia de controle e fluxômetro (a) e dos componentes do subsistema principal de produção de frio (b).....	151
Figura 5.16. Modelo do <u>diagnosticador</u> para o subsistema principal de produção de frio.....	152
Figura 5.17. Modelo do <u>decisor</u> para o subsistema da produção principal de frio.....	153
Figura 5.18. PFS das estratégias para tratamento de falhas do conforto térmico.....	154
Figura 5.19. PFS das estratégias para tratamento de falha no fluxo de água gelada.....	155
Figura 5.20. PFS para reconfiguração para atender áreas prioritárias.....	156
Figura 5.21. Tela do HPSim para simulação do cenário 1: “simula incêndio”.....	157
Figura 5.22. Tela do HPSim ao fim da simulação do cenário 1 “simula incêndio”.....	158
Figura 5.23. Modelo em rede de Petri estendida para simulação do <u>cenário 2</u> “simula produção de água gelada.....	159
Figura 5.24. Resultado da simulação do <u>cenário 2</u> no HPSim atendendo a restrição (i).....	160
Figura 5.24. Resultado da simulação do <u>cenário 2</u> no HPSim atendendo a restrição (ii).....	161
Figura 5.24. Resultado da simulação do <u>cenário 2</u> no HPSim atendendo a restrição (iv).....	161
Figura A.1. Holarquia de HSs e HOs da segurança de acesso.....	168
Figura A.2.PFSs dos HEs para segurança de acesso.....	178
Figura A.3 .Modelos do objeto de controle para controle de acesso.....	179
Figura A.4. PFS dos HEs- FTCS do controle de acesso.....	179
Figura A.5 .Holarquia entre HSs e HOs da segurança contra o fogo.....	179
Figura A.6. PFSs dos HEs da segurança contra o fogo.....	180
Figura A.7.Modelos dos objeto de controle da segurança contra o fogo.....	180
Figura A.8. holarquias dos HSs e HOs do conforto de movimentação.....	180
Figura A.9. PFSs dos HEs do conforto de movimentação.....	181
Figura A.10. Modelos dos objetos de controle do conforto de movimentação.....	181
Figura A.11.PFS dos HEs-FTCS da reconfiguração do conforto de movimentação.....	181
Figura A.12 Holarquia dos HSs e HOs da segurança de transmissão de sinais.....	182
Figura A.13. PFSs dos HEs da segurança de transmissão de sinais.....	182
Figura A.14. Modelos dos objetos de controle da segurança de transmissão de sinais.....	182

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Controle Automático (MIYAGI, 1996).....	19
Tabela 2.2. Comparativo entre arquiteturas de controle.....	23
Tabela 3.1. Evolução de créditos durante a execução de tarefas de controle (adaptado de LEITÃO et al., 2005).....	50
Tabela 4.1. Questões a serem respondidas para especificações do FTCSs de EI.....	71
Tabela 4.2. Mapeamento dos eventos para o exemplo do <u>diagnosticador</u>	101
Tabela 5.1. Lista de dispositivos do subsistema HVAC.....	120
Tabela 5.2. Lista de dispositivos do subsistema de segurança de acesso.....	121
Tabela 5.3. Lista de dispositivos da subsistema de combate e prevenção a incêndio.....	122
Tabela 5.4. Definição do tipo de elevadores, uso e andares.....	123
Tabela 5.5. Relação das falhas e dos pontos críticos do sistema predial.....	141
Tabela 5.6. Lista de tratamento de falhas, reconfiguração e/ou degeneração do edifício <i>Accenture</i>	144
Tabela 5.7. Mapeamento parcial de estados para o <u>diagnosticador</u> de produção de frio.....	151
Tabela 5.8. Verificação do cenário 2 “simula produção de água gelada”.....	160

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADACOR	<i>ADaptative holonic Control aRchitecture for distributed manufacturing systems</i>
CLP	controlador lógico programável
CP	controlador programável
HE	<u>holon de estratégias</u>
EI	edifícios inteligentes
EIBG	<i>european intelligent building group</i>
FDD	<i>fault detection and diagnosis</i>
FTCSs	<i>fault tolerance control systems</i>
HCBA	<i>holonic component-based architecture</i>
HMS	<i>holonic manufacturing systems</i>
HPLC	<i>holonic programmable logic controller</i>
HSCADA	<i>holonic supervisory control and data acquisition</i>
HVAC	sistemas de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar
IBI	<i>intelligent building institute</i>
MFG	<i>mark flow graph</i>
MFRC	<i>model-following reconfigurable control</i>
MTU	<i>master terminal unit</i>
HO	<u>holon operacional</u>
PDCH	<i>partial dynamic control hierarchy</i>
PID	proporcional integral-derivativo
PFS	<i>production flow schema</i>
RTU	<i>remote terminal unit</i>
SEDs	sistemas a eventos discretos
SROCK	<i>supervisory request oriented control kernel</i>
HS	<u>holon supervisor</u>
HSS	<u>holon do subsistema</u>
SVC	sistemas de variáveis contínuas
UCA	unidade de condicionamento de ar
UML	<i>unified Modeling Language</i>
VAV	volume de ar variável

1. INTRODUÇÃO

1.1. Edifícios inteligentes

Nas publicações relacionadas com edifícios inteligentes verifica-se a existência de diversos termos que em princípio possuem significados similares como: automação predial, *building automation*, *smart buildings* e domótica, este último relacionado inicialmente com as moradias e sistemas residenciais integrados e automatizados. Todos estes termos estão associados com a construção dos ambientes físicos para uso do ser humano, dentro de uma abordagem de sistema integrado e com características de inteligência.

O *Intelligent Building Institute* (IBI) dos Estados Unidos define um edifício inteligente como aquele que fornece um ambiente produtivo com eficácia de custo através da otimização de uso de quatro elementos básicos: estruturas, sistemas, serviços e gerenciamento, e incluindo os inter-relacionamentos entre eles. O *European Intelligent Building Group* (EIBG) define um edifício inteligente como um meio ambiente que maximiza a produtividade dos ocupantes do edifício, enquanto disponibiliza gerenciamento eficiente dos recursos com eficácia de custos. Ou seja, a definição do IBI é mais focada no uso da tecnologia e do EIBG nas exigências dos usuários (WONG et al., 2004).

Diante da necessidade de definir EI de forma mais precisa e detalhada, SO et al., (2001) e CHOW (2004) sugeriram o *Quality Environment Modules* (QEMs) baseado em dez módulos que definem características para estruturar e compreender o que é edifício inteligente. Os módulos (m1 a m6) são relacionados com a qualidade do ambiente, exigências funcionais e de

segurança; os módulos (m7 a m9) são relacionados com exigências culturais, de utilização do espaço e de tecnologia e o módulo (m10) considera aspectos de saúde. Assim, tem-se:

- m1: ambiente amigável para conservação da saúde e de energia;
- m2: utilização e flexibilidade do espaço;
- m3: eficácia de custo de operação e manutenção com ênfase na eficácia;
- m4: conforto humano;
- m5: eficiência no trabalho;
- m6: medidas de segurança de funcionamento e de segurança ao fogo, terremotos, desastres e danos estruturais;
- m7: imagem de cultura;
- m8: imagem de tecnologia elevada;
- m9: processo e estrutura de construção; e
- m10: terapêutico e sanitário.

Assim, SO et al. (2001) definem edifício inteligente como aquele que foi projetado e construído baseado numa seleção apropriada de QEMs para satisfazer as necessidades dos usuários pela escolha adequada das facilidades que devem ser fornecidas pelo edifício com custo-benefício de longo prazo. Segundo WONG et al. (2004) esta definição permite um projeto de alta qualidade e fornece uma base para avaliar o edifício inteligente.

Segundo ARKIN E PACIUK (1995), BOYD (1994), FLAX (1991) e GOMES (1998), um edifício inteligente é composto por vários subsistemas como, por exemplo:

- subsistema de transporte/ movimentação;
- subsistema de segurança patrimonial, pessoal e controle de acesso;
- subsistema de controle de energia/ iluminação;

- subsistema de combate e prevenção ao fogo;
- subsistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC);
- subsistema de controle de tráfego de voz e dados; e
- subsistema de controle da malha de transmissão de sinais de controle.

1.2 Sistemas de controle de edifícios inteligentes

O edifício inteligente é um exemplo prático de sistema produtivo (VILLANI et al., 2007) voltado a execução de serviços, que abrange sistemas de controle com um comportamento híbrido onde co-existem variáveis discretas, relacionadas com o estado desejado de conforto; e variáveis contínuas como, por exemplo, temperatura, velocidade do ar e fluxo de água. No entanto, pode-se considerar a interface entre os subsistemas prediais como um sistema a eventos discretos (SED) (HO, 1989 e MIYAGI, 1996), isto é, a parte das variáveis contínuas é vista como uma característica interna dos subsistemas.

Em GUSTIN (2005) é apresentada uma proposta de desenvolvimento e descrição da arquitetura de sistemas de controle de edifícios inteligentes dividida em quatro etapas gerais: 1) modelagem do domínio do sistema, 2) modelagem dos relacionamentos do sistema, 3) modelagem dinâmica e análise formal dos modelos e 4) implementação. Faz-se uso de mecanismos de estruturação numa abordagem combinada de refinamento e abstração (Figura 1.1).

Nas arquiteturas hierárquicas é comum encontrar uma estrutura com vários níveis de controle. Na Figura 1.2, tem-se um exemplo de como esta estrutura pode ser implementada. Em geral, define-se o sistema de controle dentro de uma hierarquia em que:

- o nível do componente corresponde à planta a ser controlada representada por sensores e atuadores que são responsáveis pelas atividades de detecção e atuação de variáveis controláveis na planta;
- o nível 1 corresponde ao controle local, aos quais estão ligados os sensores e os atuadores (nível dos componentes); representado por exemplo pelos controladores da válvula da serpentina, das bombas, do *chiller* e da torre de resfriamento;
- o nível 2 é constituído por controladores intermediários, que agem sobre o sistema de controle local (nível 1);
- o nível 3 gerencia os subsistemas, que supervisionam a evolução do sistema; e
- o nível do edifício se refere ao sistema de gerenciamento do edifício, que é responsável por integrar os sistemas supervisórios das diferentes instalações.

Figura 1.1. Processo de abstração/ refinamento (adaptado de GUSTIN, 2005).

No que se refere à identificação do sistema de controle, considerando-o no contexto de um sistema produtivo, pode-se adotar o modelo apresentado em MIYAGI (1996) ilustrado na Figura 1.3, para a classificação dos componentes do sistema de controle. Nesta figura tem-se:

- a “atuação” e “detecção”, se referem aos respectivos dispositivos e fluxo de informações entre os níveis de controle local com o do gerenciamento do subsistema do edifício;

• a “monitoração” e “comando” podem se referir tanto a dispositivos físicos como botões, chaves, mostradores, etc. (para o caso de operadores e usuários), como o fluxo de informação (para o nível representado pelo sistema de gerenciamento do edifício).

Figura 1.2. Arquitetura hierárquica típica em edifícios inteligentes.

Figura 1.3. Diagrama do sistema de controle para EI (adaptado de MIYAGI, 1996).

Segundo ARAKAKI (2004), a inclusão da reconfiguração no sistema de controle de edifícios inteligentes pode ser feita conforme ilustrado na Figura 1.4. Neste caso, todos os subsistemas

possuem uma conexão com o módulo de reconfiguração global, que é o responsável pela alteração dos requisitos de controle no caso de ocorrência de alguma situação de falha.

Figura 1.4. Subsistemas de edifício inteligente (EI) com reconfiguração (adaptado de ARAKAKI, 2004).

Destaca-se ainda a necessidade de detalhar todas as funções e interações entre os processos envolvidos para a efetiva implementação dos conceitos citados. Neste contexto, a rede de Petri e suas extensões têm sido aplicadas nos sistemas prediais (GUSTIN, 2005), e nos subsistemas de transporte/ movimentação de pessoas (GUSTIN, 1999), sistemas de ar condicionado e ventilação (HVAC) (VILLANI, 2000), de combate e prevenção ao fogo (VILLANI et al., 2006) (IGEI et al., 2007), etc., para a modelagem e análise da estrutura do sistema de controle e de seu comportamento dinâmico, assim como na especificação de estratégias de controle.

1.3 Motivações e justificativas

Atualmente existe um consenso quanto às vantagens que os edifícios agora chamados de inteligentes oferecem para o suporte adequado e flexível às atividades das organizações como por exemplo: poupança de energia, minimização dos custos de operação, maior segurança e

conforto aos usuários e, aumento de produtividade, seja pela melhoria das condições de trabalho ou pelo uso de recursos que facilitam as atividades produtivas. Existe também um consenso quanto à necessidade de integração de todos os sistemas existentes no edifício, combinando mais eficazmente a utilização dos recursos disponíveis.

Além de oferecer novas funcionalidades, o grau de confiabilidade destes sistemas também tem melhorado. Mesmo assim, sistemas totalmente infalíveis são do ponto de vista prático inviáveis, pois as falhas são ocorrências inevitáveis em sistemas concebidos, construídos e operados pelo homem (MIYAGI & RIASCOS, 2006). Por outro lado, as conseqüências das falhas, ou seja, o colapso do sistema, a interrupção no fornecimento do serviço e a perda de dados, podem ser minimizadas pelo uso de novas técnicas e de uma abordagem adequada do sistema que considere previamente estas características (CAI et al, 2003).

De acordo com trabalhos na área de sistemas com arquitetura distribuída, para que estes não sofram interrupção devido às falhas em seus componentes, deve-se prever mecanismos de tolerância às falhas que envolvem a detecção da falha, estudo dos seus efeitos, identificação das suas causas e finalmente do isolamento delas através da reconfiguração do sistema. Essa reconfiguração se faz através de realocação de processos e escolhendo caminhos alternativos de interação entre os processos (ARAKAKI, 2004). A idéia é reduzir funcionalidades do sistema no caso de ocorrência de falhas, de modo a manter operações críticas, de tal forma que algumas partes do sistema sejam desativadas de forma controlada, não afetando outras partes (degeneração) ou se recupere as partes afetadas para o funcionamento normal (regeneração).

A complexidade envolvida torna necessária a adoção de uma arquitetura de controle que integre diferentes funções para a plena execução das tarefas desejadas, como tolerância às falhas e recursos de aprendizagem (MOORE et al., 1999). Esta arquitetura de controle deve unir uma visão global do sistema com mecanismos de reação relativamente ágeis às variações imprevistas da planta, ou seja, apresentar de acordo com a conveniência um comportamento ao mesmo tempo hierárquico e heterárquico (ou distribuído).

O edifício inteligente é um exemplo prático de sistema, em que se deve considerar sistemas de controle com uma arquitetura distribuída e hierárquica. São sistemas de controle relativamente complexos, pois envolvem grande número de subsistemas que interagem entre si (FLAX, 1991 e WONG et al, 2004) e, onde o papel do homem e suas interações como usuário, operador, supervisor, etc. devem ser necessariamente considerados.

Assim, técnicas que facilitem o desenvolvimento de sistemas tolerantes a falhas devem ser consideradas nos sistemas de controle em que se deseja maior grau de confiabilidade e gestão do desempenho. Sistemas baseados em holons como o HMS (*Holonic Manufacturing Systems*) (HMS, 2007) traduzem para sistemas de controle os conceitos desenvolvidos por Arthur Koestler para organismos vivos e organizações sociais (KOESTLER, 1969). Koestler concluiu que as “partes” e o “todo” não existem no domínio da vida e propôs a palavra *holon* para representar esta natureza híbrida, sendo uma combinação da palavra grega *holos*, que significa inteiro, e do sufixo *on*, que significa partícula. Koestler identificou também características importantes de um holon como: autonomia e cooperação (HMS, 2007).

Pode-se afirmar que o procedimento para identificar os holons de um sistema de controle permite uma representação para os novos desafios dos atuais sistemas de controle, ou seja,

apresenta mecanismos para tratar aspectos de modularidade, descentralização, autonomia e escalabilidade. Estes requisitos são fundamentais para assegurar a eficiência, a flexibilidade e a robustez dos sistemas de controle (SANZ & ARZEN, 2003).

A flexibilidade aqui significa a facilidade de se modificar os sistemas produtivos (HITOMI, 1990) de tal forma a melhorar a qualidade dos produtos e/ou serviços e a capacidade de customizar os itens (materiais e/ou informações a serem produzidos ou processados) (WADA e OKADA, 2002).

Estudos desenvolvidos (KAPATIMULA & BRAMBLEY, 2005a, 2005b) indicam que se deve considerar também um sistema de diagnóstico e tratamento de falhas no sistema de controle de edifícios que trate de: 1) falha devido a erro na seleção do modo de controle, 2) falha devido a problemas na instalação de equipamentos, 3) falha devido à falta de comissionamento¹, 4) falha devido à manutenção inapropriada e 5) falha devido à queda de desempenho de algum componente/elemento. Estes problemas são comuns na maioria de sistemas prediais.

Na Figura 1.5 são apresentados os principais requisitos citados acima e que são fundamentais para o projeto dos atuais sistemas de controle de EIs.

Figura 1.5. Requisitos dos atuais sistemas de controle de EIs.

¹procedimento para verificar, inspecionar e testar o funcionamento de componentes do edifício (KATIPAMULA & BRAMBLEY, 2005a)

Entende-se nesse trabalho que o edifício inteligente (EI) é um sistema composto por diferentes elementos (onde o papel do homem como usuário, operador, supervisor, etc. deve ser necessariamente considerado), com as características de serem independentes e autônomos, e cujas funcionalidades são essencialmente baseadas na ocorrência de eventos (vistos como instantâneos) que provocam uma transição abrupta de um estado discreto para outro.

Assim, o EI é caracterizado como sistema produtivo que pode ser tratado como um SED e com componentes fisicamente distribuídos, sendo que o desenvolvimento do seu sistema de controle deve ainda considerar:

- a utilização de requisitos de sistemas de controle tolerantes à falhas (FTCSs) para aumentar a robustez e a flexibilidade do sistema;
- procedimentos de desenvolvimento de sistemas de controle para SEDs, que assegurem o atendimento das especificações; e
- técnicas que facilitem a estruturação e organização das funções de controle para garantir a integração entre os vários subsistemas e seus componentes.

Neste contexto, observa-se que existem publicações sobre procedimentos e técnicas de especificação de processos em sistemas sem considerar a ocorrência de falhas e sobre propostas de procedimentos e técnicas com o foco restrito ao problema de tratamento de falhas específicas. De fato, foram encontrados poucos trabalhos que tratam a ocorrência de falhas nos sistemas de controle de edifícios inteligentes, em conjunto com os procedimentos de especificação dos processos normais. Assim, caracteriza-se a necessidade de uma sistematização da tarefa de construção de modelos de um sistema de controle que considere a

ocorrência de falhas focando na possibilidade de degeneração ou reconfiguração das funções de controle. Salienta-se ainda o fato do sistema de controle de edifícios inteligentes envolver diferentes tipos de usuários, em geral, com limitado ou mesmo nenhum conhecimento específico sobre a operação dos sistemas.

Entretanto, a grande maioria dos sistemas de controle de edifícios inteligentes não é concebida considerando os mecanismos de reconfiguração. O ideal seria que no caso de ocorrência de algum evento inesperado, o sistema mantivesse o funcionamento mesmo que parcial, com degradação mínima no desempenho. Neste caso, é necessária uma supervisão efetiva do funcionamento do sistema, sendo que o projeto do controle deve considerar um grau adequado de autonomia e de inteligência, de modo que os componentes do sistema de controle atuem como agentes inteligentes dentro de um sistema integrado e cooperativo.

1.4. Objetivo

Propõe-se neste trabalho o estudo e desenvolvimento de um procedimento para modelagem de sistema de controle de edifícios inteligentes, considerando além das especificações funcionais em situação normal, a ocorrência de falhas. O procedimento proposto adota os conceitos de holon, sistema a eventos discretos (SED) e a técnica de rede de Petri e suas extensões para a descrição da estrutura e da operação deste sistema de controle.

1.5. Organização do texto

Apresenta-se abaixo uma descrição de como o presente texto está organizado:

O capítulo 2 trata dos conceitos e métodos básicos relacionados ao tema da pesquisa e explica por que estes são considerados fundamentais. Os conceitos e métodos apresentados são: sistemas produtivos, sistemas supervisórios, sistemas de controle, holons, falha, erro e defeito, sistemas de controle tolerantes a falhas (FTCSs – *faults tolerance control systems*) e rede de Petri. A partir destes conceitos e métodos, busca-se fundamentar o procedimento proposto.

No capítulo 3 são descritos a arquitetura de controle e o funcionamento do FTCS proposto para edifícios inteligentes. O FTCS aqui é baseado em holons, cada um possuindo uma visão parcial do sistema e que assim devem cooperar entre si para alcançar os objetivos planejados. São detalhados a arquitetura de controle, os componentes do sistema, os mecanismos que garantem agilidade e autonomia ao FTCS e, os mecanismos para tratamento de falhas e de aprendizagem.

No capítulo 4 é apresentado o procedimento desenvolvido para a modelagem de sistema de controle de edifícios inteligentes considerando a ocorrência de falhas.

No capítulo 5 é apresentado um exemplo de aplicação em edifício inteligente para ilustrar vantagens do procedimento proposto.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho, as suas contribuições e as propostas para novos desenvolvimentos.

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

O projeto de sistemas de controle envolve a adoção e correlação de conceitos, teorias e procedimentos de desenvolvimento. Assim, neste capítulo são introduzidos aspectos conceituais de sistemas produtivos, supervisão e controle, para caracterização da natureza dos elementos envolvidos e escolha da abordagem para o desenvolvimento de sistemas de controle. É apresentado o conceito de holon, para especificação de regras e interpretações próprias para a implementação de sistemas de controle tolerantes a falhas (FTCSs), ou seja, de sistemas capazes de se amoldar às variações imprevistas da planta, mantendo, apesar dessas alterações um desempenho adequado. Este capítulo apresenta ainda a teoria de rede de Petri com suas extensões como ferramenta de modelagem de um sistema de controle.

2.1. Sistemas produtivos

Um sistema é um conjunto de componentes interagindo, isto é, trabalhando juntos para atingir um objetivo. Em outras palavras, um sistema pode ser definido como um grupo de objetos que estão agregados de acordo com uma relação de interdependência para atingir certos objetivos. De acordo com a finalidade do estudo deve-se definir a fronteira do sistema em estudo e o seu ambiente externo (MIYAGI, 1996).

Sistemas produtivos são sistemas cuja finalidade é a produção de itens (HITOMI, 1990; GROOVER, 2000 e MOREIRA, 2002). Este conceito de sistema produtivo pode ser estendido a sistemas de prestação de serviços, entendendo-se que a prestação do serviço implica na alteração do estado do item que recebe o serviço (SANTOS FILHO, 2000; MIYAGI et al., 1999 e GAITHER & FRAIZER, 2001). Neste trabalho considera-se esta

extensão de sistema produtivo para serviços de edifícios inteligentes. Sistemas produtivos são também chamados de sistemas desenvolvidos pelo homem e para o homem (*man made systems*) (VILLANI et al., 2007).

Um conceito que tem sido objeto de interesse é a flexibilidade em sistemas produtivos. Assim, a flexibilidade neste caso pode ser definida como sendo “a habilidade de mudar ou reagir com pouca perda de tempo, esforço, custo e desempenho” (UPTON, 1994 apud BEACH et al. 2000) e pode ser classificada de diferentes formas: 1) flexibilidade de recurso, 2) flexibilidade do processo, 3) flexibilidade de produto/ serviço, 4) flexibilidade de rota, 5) flexibilidade de volume, 6) flexibilidade de expansão, 7) flexibilidade de operação e 8) flexibilidade de produção (BROWNE et al., 1984 apud BEACH et al., 2000).

A flexibilidade de um sistema, em geral, envolve assim, a execução de múltiplos processos simultâneos através do compartilhamento dos recursos, o que torna a modelagem do processo global de um sistema produtivo consideravelmente complexo. A complexidade provém de dois aspectos: indeterminismo em relação ao instante das ocorrências dos eventos devido à natureza de seu comportamento dirigido por eventos, e indeterminismo em relação à seqüência de ocorrência dos eventos devido à possibilidade de execução simultânea de múltiplos processos produtivos (SANTOS FILHO, 1998 e SANTOS FILHO, 2000).

Um enfoque tradicional para tratar a complexidade nos sistemas produtivos é a divisão em subsistemas menos complexos e que possuem uma solução de controle mais simples que o sistema como um todo (MOORE et al., 1999).

Conforme definido por CASSANDRAS (1993) uma classificação geral para sistemas é ilustrada na Figura 2.1. Assim, do ponto de vista conceitual, como destacado nesta figura, os sistemas produtivos podem ser classificados como sistemas a eventos discretos (SEDs) (HO, 1989 e RAMADGE & WONHAM, 1987), pois possuem as seguintes características:

- **sistemas dinâmicos:** os valores das saídas num determinado instante dependem dos valores das entradas no respectivo instante e dos valores anteriores destas entradas;
- **invariantes no tempo:** dado um estado inicial e uma sequência de eventos, o comportamento resultante não varia ao longo do tempo, ou seja, o comportamento do sistema só se altera se o valor de entrada ou a sequência de eventos forem modificados;
- **não lineares:** atendem a relação $g(a_1 u_1 + a_2 u_2) \neq a_1 g(u_1) + a_2 g(u_2)$, onde u_1 e u_2 são dois vetores de entrada, a_1 e a_2 são os coeficientes (que caracterizam um sistema) e $g(.)$ é a função de saída resultante (sinal de saída de acordo com valor da entrada do sistema);
- **de estado discreto:** as variáveis de estado pertencem ao domínio de inteiros não negativos;
- **dirigido por eventos:** a ocorrência assíncrona de eventos considerados instantâneos e que causa uma mudança abrupta de estado do sistema.

Figura 2.1– Classificação geral de sistemas (adaptado de CASSANDRAS , 1993)

2.2. Sistemas supervisórios

De acordo com RAMADGE & WONHAM (1987) o sistema de controle supervisório determina a evolução do sistema a ser controlado através da habilitação ou não de certos eventos, chamados de controláveis, levando assim o sistema ao estado desejado. Neste sentido o termo “sistema supervisório” é usado de uma forma específica e segundo um formalismo bem definido (TAKAI, 1997 e CHO & LIM, 1999).

Segundo SILVA et al. (1998), CHAMPAGNAT (1998) e ANDREU (1996), o controle supervisório é definido dentro de uma estrutura hierárquica de controle que apresenta os seguintes níveis: processo, controle local, supervisão, ordenação e planejamento (Figura 2.2).

Figura 2.2. Níveis de Controle.

O nível de controle local interage diretamente com atuadores e sensores da planta. Em geral, é formado por controladores programáveis (por exemplo, os controladores lógicos programáveis) ou reguladores (por exemplo, o regulador PID - proporcional integral-derivativo).

O nível de supervisão tem duas funções principais:

- agir sobre os níveis hierárquicos inferiores de modo a executar as tarefas determinadas pelo nível de ordenação;

- supervisionar a evolução do sistema de modo a executar uma programação otimizada das tarefas, agindo e informando aos níveis hierárquicos inferiores e superiores em caso de ocorrência de falhas.

De forma mais detalhada o nível de supervisão deve:

- executar o gerenciamento dos recursos da planta sob controle;
- executar as tarefas definidas pelo nível de ordenação e ser capaz de, no caso de um comportamento anormal, auxiliar numa reconfiguração do sistema;
- assumir a responsabilidade pela configuração dinâmica do processo de modo a otimizar seu funcionamento de acordo com um critério coerente com seu nível de atuação;
- apresentar dados atuais e históricos sobre a operação do sistema de modo a permitir ao supervisor o acompanhamento do processo através de informações que provêm do nível inferior e confirmar a execução das tarefas definidas no nível superior.

O nível de ordenação determina previamente para certo intervalo de tempo e de acordo com uma estratégia pré-definida, as tarefas a serem executadas pelo nível supervísório. Em geral, as atividades aqui envolvem a especificação de processos que atendem as decisões estratégicas do nível de planejamento.

O nível de planejamento toma decisões para um horizonte de tempo relativamente maior. Também é chamado de nível tático, onde, em geral se define as estratégias de atuação da empresa.

De uma forma genérica os níveis mais baixos são mais reativos, enquanto os mais altos envolvem decisões que agregam mais informações e consomem um tempo bem maior de

processamento. De acordo com esta visão pode-se classificar os níveis de controle local e de supervisão como de tomada de decisão em tempo-real, o nível de ordenação como reativo e o de planejamento como predominantemente não reativo.

A estrutura hierárquica apresentada na Figura 2.2 para a definição de sistemas supervisórios admite variações. Muitos sistemas não apresentam todos os níveis de controle citados. Tem-se ainda casos onde o nível de supervisão é subdividido ou, de acordo com a organização da planta, algumas de suas funções estão contidas no nível de controle local interagindo diretamente com alguns dispositivos de detecção.

2.3. Sistemas de controle

Controle é a aplicação de uma ação pré-planejada para que aquilo que se considera objeto de controle atinja objetivos definidos. No caso de sistemas de variáveis contínuas geralmente corresponde a igualar uma variável de controle a um valor de referência, no caso de SEDs corresponde à execução de operações conforme um procedimento pré-estabelecido (MIYAGI, 1996).

Existem dois tipos básicos de controle: 1) controle de malha aberta, onde o sinal de saída é determinado em função apenas do tratamento/processamento do sinal de entrada, isto é, não existe uma comparação entre os valores desejados e os efetivamente obtidos, e 2) controle de malha fechada, onde o sinal de saída é realimentado para a entrada e, através de um regulador procura-se manter a saída a mais próxima de um valor de referência (desejado) (MIYAGI, 1996).

Segundo MIYAGI (1996), o controle chamado de automático pode ser dividido em duas classes: 1) sistemas de controle quantitativo, normalmente implementados para sistemas de variáveis contínuas e 2) sistemas de controle qualitativo, que podem ser implementados para SEDs. A Figura 2.3 ilustra os diagramas conceituais dos sistemas de controle de variáveis contínuas e para SEDs. A Tabela 2.1 apresenta uma comparação entre os dois controles.

Figura 2.3 Diagrama conceitual dos sistemas de controle (MIYAGI, 1996).

Tabela 2.1 Controle Automático (MIYAGI, 1996).

Controle Quantitativo (SVC)	Controle Qualitativo (SED)
Majoritariamente, o objeto de controle manipula informações contínuas.	Majoritariamente, o objeto de controle manipula informações discretas.
Envolve em geral, o controle com realimentação negativa.	Envolve o controle qualitativo e o processamento do comando de controle.
Estrutura de controle é geralmente em malha fechada.	Estrutura de controle não é necessariamente em malha fechada.

O sistema de controle interage com o objeto de controle e o operador (ou usuário) através dos dispositivos de atuação, detecção, comando e monitoração, conforme ilustrado na Figura 2.4 (MIYAGI, 1996).

Figura 2.4 Diagrama conceitual do sistema de controle para SEDs (MIYAGI, 1996).

2.3.1. Projeto de sistemas de controle

Segundo MIYAGI (1996), o projeto e o desenvolvimento de sistemas de controle de SEDs pode ser dividido nas etapas ilustradas na Figura 2.5.

Figura 2.5. Procedimento de projeto de sistemas de controle (adaptado de MIYAGI, 1996)

As etapas do projeto de controle são definidas em quinze atividades da seguinte maneira:

- análise das necessidades: 1) identificação do objetivo final do sistema; 2) compreensão do objeto de controle, instalações e equipamentos; 3) organização dos conhecimentos sobre o sistema de controle (dispositivos de controle, equipamentos periféricos, etc.) e 4) abstração e análise das funções de controle, como os modos de operação e monitoração das instalações e equipamentos;
- definição das necessidades: 5) definição das funções de controle e 6) definição do fluxo das funções de controle;
- projeto do sistema de controle: 7) divisão das funções e definição das interfaces; 8) definição e alocação dos sinais de entrada e saída e 9) definição da estrutura do programa de controle;
- projeto do *software* de controle: 10) projeto da reutilização; 11) projeto do programa e 12) projeto de programas não padronizados;
- desenvolvimento do *software*: 13) desenvolvimento do programa e seu carregamento na máquina; e
- testes: 14) testes por unidade e 15) teste do sistema.

Destaca-se que conforme mencionado anteriormente, na etapa de análise das necessidades é importante considerar não somente a operação em condições normais, mas também as medidas a serem tomadas em caso de falha e modo de reinicialização do sistema.

Os *softwares* desenvolvidos na etapa de projeto, em linguagem de controle, podem ser carregados diretamente nos controladores programáveis ou codificados na etapa de desenvolvimento do *software* para posterior carregamento nos controladores programáveis (CPs) (MIYAGI, 1996).

As técnicas de análise baseadas em simulação, têm um papel fundamental no desenvolvimento das especificações de controle. Este recurso possibilita a validação das estratégias de controle, facilitando assim a identificação de erros de projeto através das propriedades matemáticas e/ou verificação de cenários e situações críticas. Isto possibilita o aumento da qualidade da solução de controle na etapa de projeto. De fato, este recurso na etapa de projeto, possibilita também o desenvolvimento de *softwares* para dispositivos de realização do controle segundo os conceitos de prototipagem rápida (vide Figura 2.6) (MIYAGI, 1996).

Figura 2.6 Ciclo de prototipagem de *software* (MIYAGI, 1996).

2.3.2. Arquitetura de sistemas de controle

O aumento da demanda para a utilização dos sistemas de automação cada vez mais complexos, no sentido de envolver quantidade maior de requisitos conflitantes, torna necessária a adoção de uma arquitetura de controle que reflita uma organização hierárquica e distribuída, que integra funções e características que permitam plena execução das tarefas desejadas, previsibilidade dos resultados, tolerância à falhas e aprendizagem (MOORE et al, 1999).

A definição de uma arquitetura de controle consiste em especificar os componentes, suas interfaces, inter-relações e restrições. Tais especificações servem de base para as atividades de desenvolvimento do sistema de controle. As arquiteturas dos sistemas de controle precisam ter a habilidade de adaptar-se à mudança, mas não devem resultar em sistemas que sejam inflexíveis, frágeis e difíceis de manter (BUSSMANN, 1998). A Tabela 2.2 apresenta os principais modelos de arquiteturas de controle e suas principais características (DILTIS et al., 1991).

Tabela 2.2. Comparativo de arquiteturas de controle.

Tipo de arquitetura Legenda: Componente do sistema de controle Dispositivo sob controle	Características principais (os termos entre aspas indicam uma qualificação relativa)
Centralizada	-utiliza um único componente central para decisões -resulta em “bom” gerenciamento e otimização do sistema -“fraca” robustez e “baixa” velocidade de resposta a falhas -“difícil” utilização em sistemas complexos -“baixa” capacidade de expansão
Hierárquica	-arquitetura normalmente distribuída em três níveis de controle -“boa” robustez, capacidade de predição e eficiência melhor que na arquitetura centralizada -“fraca” velocidade de resposta a falhas
Distribuída ou heterárquica	-“rápida” resposta a falhas de solução local e “boa” velocidade de resposta a estas falhas -visão parcial do sistema que implica em “fraca” tolerância a falhas que exigem soluções que consideram o sistema como um todo
Hierárquica parcial dinâmica	-permite de acordo com a conveniência um comportamento ao mesmo tempo hierárquico e heterárquico que resulta em “melhor” resposta a falhas -inclui interação entre o mesmo nível.

A arquitetura hierárquica parcial dinâmica une uma visão global do sistema com uma estrutura para uma reação relativamente ágil às variações imprevistas da planta. Desse modo, esta arquitetura permite de acordo com a conveniência um comportamento ao mesmo tempo hierárquico e heterárquico. Assim os componentes devem ser cooperativos, autônomos, e em

certas situações assumir uma estrutura de coordenação hierárquica. Para que o sistema sempre mantenha certo grau de desempenho é também necessário assegurar uma função de supervisão do funcionamento global do sistema.

2.4. Holons

Nos anos 60, Arthur Koestler (KOESTLER, 1969) introduziu a palavra *holon* para descrever a unidade básica de organização de sistemas em organismos vivos e em organizações sociais, baseada em teorias de Herbert Simon e em suas observações. Koestler concluiu que as partes e o todo não existem no domínio da vida, e propôs a palavra *holon* para representar esta natureza híbrida, sendo uma combinação da palavra grega *holos*, que significa inteiro, e do sufixo *on*, que significa partícula (HMS, 2007). *Holon* combina o todo e a parte, sendo simultaneamente o próprio todo com suas partes subordinadas e, partes dependentes quando vistas de níveis mais elevados. A propriedade que um *holon* pode ser parte de um outro *holon*, permite representar um *holon* por diversos outros *holons*, que por sua vez podem ser representados por outros *holons*, permitindo o tratamento da complexidade de um problema.

Koestler identificou também duas características importantes de um *holon* (HMS, 2007): autonomia, em que a estabilidade do *holon* resulta de sua habilidade de agir de forma autônoma em caso de circunstâncias imprevisíveis, e cooperação, que é a habilidade dos *holons* poderem cooperar para atingir objetivos.

Um *holon* pode representar uma atividade física ou lógica, tal como um robô, uma máquina, uma ordem, um sistema de manufatura flexível, ou mesmo um operador humano (LEITÃO & RESTIVO, 1999). O *holon* tem a informação sobre si mesmo e o seu ambiente, contendo uma

parte do processamento de informação e uma parte do processamento físico, quando o holon representa um dispositivo físico, tal como robô (WINKLER & MEY, 1994). Ou seja, por definição, nos sistemas produtivos holônicos, os holons possuem informações de processamento de dados e também da parte física dos processos envolvidos.

Uma holarquia é definida como um sistema de holons cooperando para atender objetivos, combinando suas habilidades e conhecimento individual. Cada holarquia tem regras e diretrizes definidas, e um holon pode pertencer a várias holarquias ao mesmo tempo, que é uma diferença importante do conceito tradicional de hierarquias. Os holons podem formar uma holarquia e, ao mesmo tempo, preservar sua autonomia e individualidade. Os comportamentos e as atividades dos holons são determinados pela cooperação e interação com outros holons, ao contrário de ser determinado por um mecanismo centralizado (WINKLER & MEY, 1994).

Um holon é um caso especial de um agente², e ambos nos níveis de controle inferiores podem ser vistos como estruturas de códigos executáveis adaptadas de acordo com a implementação. A maioria das técnicas utilizadas em sistemas holônicos estão presentes em sistemas multiagentes³. A escolha de holons ou agentes para desenvolvimento de sistemas de controle será determinado pelo ponto de vista do projeto. No entanto, pode-se considerar que sistemas holônicos é um modelo geral para concepção de sistemas de controle considerando autonomia, inteligência e com arquitetura distribuída; e sistemas multiagentes é uma técnica para desenvolvimento do *software* de controle que pode ser usada para implementar sistemas holônicos (GIRET & BOTTI, 2004).

² um sistema autônomo e flexível, que é capaz de agir em um ambiente (WOOLDRIDGE & JENNINGS, 1995)

³ sistema que relaciona dois ou mais agentes

2.4.1. Sistemas de controle com holons

O conceito de holon tem sido aplicado em pesquisas de diferentes domínios, tais como programação e controle, controladores de máquinas, sistemas de fabricação, e edifícios inteligentes. HASEGAWA et al. (1994) apresentaram umas das primeiras representações holônicas para o planejamento e programação de sistemas de manufatura, propondo um sistema de planejamento para simular um sistema de montagem robótica.

BRENNAN et al. (1997) usam uma arquitetura de controle híbrida, denominada PDCH (*partial dynamic control hierarchy*), combinando arquiteturas hierárquicas e heterárquicas, para sistemas de controle de manufatura. Num trabalho posterior, BRENNAN et al. (2002) utilizam o PDCH junto com a norma IEC 61499 explorando a técnica de “construção de blocos” para representar um sistema de controle com reconfiguração dinâmica.

Os trabalhos de BRUSSEL et al. (1998) e WYNS (1999) usam holons para representar produtos, recursos, ordens e atividades lógicas. Esta arquitetura é baseada em três tipos básicos de holons: o holon de recurso que representa o recurso e uma parte da informação que controla o recurso; o holon de produto que contém o processo e toda informação sobre o produto; e o holon de ordenação que representa as tarefas do sistema de manufatura. Adicionalmente, existe o gerente de holons, cuja missão é assistir e avisar os outros holons. Esta arquitetura combina a predição de falhas e a robustez no controle hierárquico com a reação a distúrbios no controle heterárquico.

ZHANG et al. (2000) apresentam uma arquitetura baseada em HPLC (*holonic programmable logic controller*) que permite uma reconfiguração multinível. A reconfiguração dinâmica é

realizada em três níveis: controle de blocos funcionais (alto nível), controle de componentes (nível médio) e controle de tarefas (nível baixo).

No trabalho apresentado por CHIRN & MCFARLANE (2000) descreve-se uma arquitetura baseada em componentes (na perspectiva de desenvolvimento de *software*) e nos sistemas produtivos holônicos denominada de HCBA (*holonic component-based architecture*). A identificação dos componentes é realizada de acordo com os conceitos de projeto *bottom-up* e sistemas distribuídos, ou seja, a identificação das unidades básicas (holons e os componentes holônicos) é feita inicialmente com os elementos fundamentais de uma planta física. Segundo CHIRN & MCFARLANE (2000) os objetos físicos de um sistema produtivo, podem ser caracterizados em dois grupos de acordo com suas propriedades: **recursos** – que realizam as operações produtivas e **item/produto** – que recebem as operações/atividades produtivas (que agregam valor). Desta maneira definem-se os holons de recursos ou componentes de recursos que são os elementos responsáveis pela fabricação, montagem, transporte e testes de itens (materiais e/ou informações). Para a realização destas operações, o holon de recurso possui uma parte responsável pelo controle, tomada de decisão e a troca de informações entre outros componentes. De forma similar, definem-se os holons de produtos ou componentes de item/produto cuja parte física são as peças, matéria prima, *pallets* e a parte de controle que contém as informações sobre as rotas, o processo, a tomada de decisões e os dados de produção.

No trabalho de LEITÃO et al. (2005) é apresentado um sistema de controle, chamado ADACOR (*adaptive holonic control architecture for distributed manufacturing systems*) que é baseado em holons autônomos e cooperativos. ADACOR é dividido em holons de produto, holons de tarefas, holons operacionais e holon supervisor. A autonomia, a negociação e o

desempenho dos holons são regulados principalmente pelo mecanismo chamado de “fator de autonomia”. Este fator, associado a cada holon operacional, é um parâmetro que serve para adaptar o comportamento do holon de acordo com seus objetivos, limitações e com o ambiente. É uma variável contínua ou discreta, regulada por um mecanismo de decisão e que permite uma reconfiguração dinâmica do sistema de controle.

Em CHEN & HSIH (2000) um protótipo do mecanismo de HSCADA (*holonic supervisory control and data acquisition*) é apresentado e aplicado em edifícios inteligentes. Há dois modelos de holons principais no mecanismo de HSCADA, conhecidos como holon do *software* e holon do *firmware*. O holon do *software* inclui três holons, conhecidos como o holon do MTU (*master terminal unit*), o holon de RTU (*remote terminal unit*), e o SROCK (*supervisory request oriented control kernel*). O holon do *software* é encarregado do nível do controle do *software* e de levantamento de dados. O holon do *firmware* é controlado e monitorado pelo holon do *software*. O SROCK faz a interação entre os holons do *software* e os holons dos *firmware*. O mecanismo HSCADA tem programação distribuída e ambiente central do controle através do SROCK e segundo CHEN & HSIH (2000) apresenta as características de flexibilidade, escalabilidade, reconfiguração e integração.

2.5. Falha, erro e defeito

Em sistemas produtivos falhas são consideráveis como inevitáveis, pois, componentes físicos envelhecem e sofrem com interferências externas, sejam ambientais ou humanas. Neste contexto, os projetos de *software* e *hardware* (dos sistemas de controle), são vítimas da fragilidade humana em trabalhar com grande volume de detalhes ou com deficiências de especificação (PORTUGAL, 2005).

Define-se **falha** (*fault*) como a causa física ou algorítmica do erro. Define-se **erro** (*error*) como a causa de um defeito. Um **defeito** (*failure*) é definido como um desvio da especificação. Em geral, defeitos não podem ser tolerados. É interessante observar que uma falha não necessariamente leva a um erro e um erro não necessariamente conduz a um defeito. A presença prévia de uma vulnerabilidade, isto é, uma falha interna que permita que um evento externo prejudique o sistema, é a condição necessária para que se tenha um erro e possivelmente um defeito subsequente. Esta definição é representada na Figura 2.7 (AVIZIENS et al., 2004 e WEBER, 2003).

Figura 2.7. Modelo de propagação de erro, adaptado de a) WEBER, 2003 e b) AVIZIENIS et al., 2004.

O primeiro universo analisado é o físico, que engloba os dispositivos físicos ou defeitos na execução de tarefas; alguns exemplos são elementos mecânicos, fontes de energia, algoritmos irregulares, e é nesse universo que surge a falha. O segundo universo é o da informação, onde os dados são manipulados pelo sistema; é onde surge o erro, devido à existência de uma falha no universo físico. O universo do usuário é tido como o último a ser analisado, pois é nele que o usuário percebe o comportamento errôneo resultante de um erro. O defeito surge no último universo, e engloba tipos diferentes de problemas, com características particulares (WEBER, 2003).

Considerando estes estudos em relação à falhas, erros e defeitos os pesquisadores têm estudado uma forma de conceber e avaliar se um sistema de controle é tolerante a ocorrência de falha.

2.6. Sistema de controle tolerante a falhas (FTCS)

De acordo com ZHANG & JIANG (2003), para projetar um sistema de controle tolerante a falhas (FTCS- *faults tolerance control system*), uma das decisões importantes a considerar é se o sistema deve recuperar completamente o desempenho original do sistema ou pode aceitar algum grau de degradação do desempenho após a ocorrência de uma falha.

No caso de situações anormais em alguma parte do sistema, um controle inteligente deve conduzir a sua recuperação de acordo com alguma contingência, ligando e/ou desligando os serviços e/ou processos “suavemente”, sem afetar de forma drástica todo funcionamento do sistema produtivo, fazendo com que o sistema retorne parcialmente ou plenamente ao seu funcionamento normal (ARAKAKI, 2004).

Segundo ZHANG & JIANG (2003), o projeto de FTCSs deve considerar o desempenho dinâmico do sistema não somente sob a operação normal, mas também sob falhas. Os comportamentos do sistema nestas duas modalidades de operação podem ser significativamente diferentes. ZHANG & JIANG (2003), propõem um FTCS o qual inclui os módulos de gerência do comando, modelos da referência, diagnóstico e detecção de falhas (FDD - *faults detection and diagnosis*), mecanismo reconfigurador, e controle reconfigurável que segue um modelo (MFRC - *model-following reconfigurable control*). Nota-se que dois modelos são usados: um para o sistema sob a operação normal e o outro para o sistema com as falhas.

Nos trabalhos de ISERMANN (1984) e ROSSI & BRAUN (1997) o FTCS é apresentado como ilustrado na Figura 2.8, envolvendo quatro etapas funcionais. A primeira etapa envolve capturar dados do sistema e detectar condições anormais. Esta etapa é normalmente denominada **detecção** da falha. Quando uma condição anormal é detectada, o **diagnóstico** é usado para comprovar a ocorrência da falha e determinar suas causas. Estas duas etapas constituem o processo de FDD. Após o diagnóstico a **validação** deve informar o tipo e a importância do impacto da falha no desempenho do sistema (em termos de uso de energia, custo, disponibilidade, ou efeitos em outros indicadores de desempenho). Baseado na validação a **decisão** é a etapa que decide como responder à falha (isto é, por uma ação corretiva ou não) (KATIPAMULA & BRAMBLEY, 2005a, 2005b).

Segundo PORCARELLI et al. (2004), o processo de decisão é executado usando a avaliação *on-line* de um modelo estocástico baseado na ocorrência de falhas. Tal atividade depende da política especificada, das exigências da aplicação e do *status* do sistema no tempo da

reconfiguração. No trabalho de PORCARELLI et al. (2004) são criados procedimentos estratégicos para reconfiguração que são elegíveis na ocorrência de falhas priorizando aqueles em que a queda de desempenho do sistema é minimizada.

Figura 2.8 Processo de FDD, de validação e de decisão durante a operação de sistemas (KATIPAMULA & BRAMBLEY, 2005a, 2005b).

Segundo ARAKAKI (2004), a reconfiguração de um sistema, em caso de falhas, pode ser feita com uma degradação gradual, ou seja, através de uma reconfiguração o sistema continua realizando atividades com uma redução do seu desempenho. O objetivo primário é reconfigurar o sistema e obter como resultado um sistema ainda flexível, com um comportamento estável e mantendo suas atividades, mesmo que com menor desempenho, num ambiente de tempo real.

Apesar dos procedimentos para reconfiguração terem, em geral, como base uma estrutura distribuída, isto é, com relativa autonomia entre as partes, a dependência entre os componentes sempre existe e a reconfiguração deve considerar os impactos entre os vários componentes. Uma entidade responsável pela coordenação tem assim a função de considerar

estas dependências, a fim de manter a consistência do sistema durante e após a reconfiguração (PORCARELLI et al., 2004).

Segundo ARAKAKI (2004), o componente de tratamento de falha deve estar inserido no sistema de controle para garantir a robustez deste. O componente de reconfiguração é constituído pelos componentes chamados de reconfigurador e supervisor de pontos críticos.

Para conseguir um desempenho adequado um sistema que considere a reconfiguração precisa ter recursos redundantes. Em condições de operação normal, os recursos redundantes podem não ser necessários para atingir o desempenho especificado, entretanto, tornam-se imprescindíveis na ocorrência de falhas (CHEN & JIANG, 2005).

2.6.1. Detecção, diagnóstico, validação e decisão

Para uma correta identificação da falha é importante analisar todos os possíveis tipos de falhas que podem ocorrer no nível da planta sob controle em particular as principais falhas que podem causar impacto na programação e no nível de planejamento do processo produtivo. As falhas do nível inferior podem ser agrupadas em duas classes: interna e externa (AVIZIENIS et al., 2004).

A quebra de um atuador ou a falta de energia causam, por exemplo, a indisponibilidade de recursos para executar comandos, provocando queda de desempenho e o comprometimento da qualidade. Este problema num atuador pode ocorrer devido a colisões físicas ou um erro no programa de controle do atuador, conduzindo a um período fora de serviço que o torna incapaz de executar o comando durante o tempo de recuperação. Os componentes não-

reparáveis tais como transdutores, devem ser substituídos no menor tempo possível. Os componentes reparáveis são aqueles que envolvem manutenção e/ou conserto após a ocorrência da falha, como por exemplo um motor de um elevador (AVIZIENIS et al., 2004).

Um problema de indisponibilidade de um atuador conduz a necessidade de re-programação do processo produtivo no nível de planejamento e envolve a consideração de aspectos relacionados a atrasos ou reconfiguração de *layout*. O objetivo neste caso é reparar o atuador e, em paralelo, encontrar soluções alternativas para reduzir o desvio do plano inicial. Os efeitos de uma falha num atuador podem ser refletidos em serviços executados de forma incorreta, e no próprio dispositivo de atuação que pode sofrer danos físicos. O estado do serviço e do atuador determina o tipo de reação à falha que deve ser acionado pelo sistema de controle (LEITÃO et al., 2005).

A reconfiguração de *layout* envolve a reorganização dos recursos disponíveis na planta, com a adição de novos recursos ou a remoção de um recurso. A adição de um recurso resulta num impacto relativamente pequeno no sistema, porque aumenta o número de soluções alternativas para a execução das tarefas. A remoção de recursos conduz a problemas mais complexos, pois pode introduzir conflitos no sistema. Neste caso a tarefa alocada ao recurso indisponível deve ser realocada a outros recursos disponíveis (LEITÃO et al., 2005).

No nível externo uma falha pode ser usualmente relacionada a atrasos de outros sistemas na entrega de itens ou execução de serviços; adiantamento, cancelamento ou mudanças de tarefas; e variações de demanda (AVIZIENIS et al., 2004). Os atrasos causam a necessidade de reprogramação da agenda do sistema de controle.

O cancelamento de um comando ou de uma tarefa pode ser devido, por exemplo, ao cancelamento do serviço pelo cliente ou a detecção de algum outro problema. Esta ação causa um impacto relativamente pequeno no sistema, porque em geral, basta liberar o recurso já alocado para execução do comando ou tarefa e reprogramar a agenda de forma a otimizar a programação local, respeitando as datas devidas. O adiantamento de uma ordem pode conduzir a problemas mais complexos que requerem a reprogramação de todas as ordens alocadas. A introdução de ordens de adiantamento implica em reprogramação das tarefas que pode gerar conflitos temporais com ordens já alocadas e assim tem-se, em geral, a necessidade de reorganizar todo o sistema para execução das tarefas (AVIZIENIS et al., 2004).

Para a etapa de validação deve-se verificar o potencial impacto da ocorrência de falha nos indicadores de desempenho. O impacto da falha é relacionado à propagação da falha no sistema e as consequências associadas. Avaliando os parâmetros de desempenho, de acordo com os objetivos de produção, é possível obter um indicador sobre o impacto da falha no sistema (AVIZIENIS et al., 2004).

Os estudos indicam que o nível de impacto é dependente do tipo de falha e das condições físicas e temporais de sua ocorrência. Em termos do tipo de falha, cada evento conduz a consequências específicas no sistema, requerendo a execução de diferentes ações. Por exemplo, uma falha que resulte na adição de um recurso tem um impacto no sistema que, em geral, é menor do que a ocorrência de problemas de indisponibilidade de um atuador. Outro fator importante na definição do impacto da falha é a localização física de sua ocorrência, por exemplo, se uma falha ocorre em uma das tarefas do caminho crítico do processo produtivo, terá maior impacto do que uma falha ocorrida em uma tarefa associada a processos

alternativos. O nível do impacto da falha é também dependente do momento que ela ocorre, por exemplo, o impacto de uma falha, em geral, é maior se, naquele instante, processos alternativos não estão disponíveis.

Face a relevância do tema vários estudos procuram formas eficientes para representar a detecção e o diagnóstico de defeitos em SED. RIASCOS (2002), por exemplo, demonstra que através da caracterização de padrões é possível desenvolver modelos e detectar falhas através de sinais emitidos por sensores. SAMPAHT (1996), apresenta um procedimento para modelagem de um mecanismo chamado diagnosticador baseado em modelos de autômatos finitos para diagnóstico de defeitos em sistemas.

2.7. Rede de Petri

O conceito de rede de Petri foi introduzido inicialmente por Carl Adam Petri, em sua tese de doutorado em 1962 (BOWDEN & PEARCE, 2000) como uma técnica de modelagem gráfica e matemática para descrição de relações entre condições e eventos no estudo de protocolos de comunicação entre componentes assíncronos (VASSILIS et al., 1998). Entretanto, logo se confirmou que a proposta envolvia uma área mais abrangente que envolvia os SEDs.

As redes de Petri são grafos bipartidos compostos de **arcos** (representados por círculos), **transições** (representados por barras), **arcos** orientados interligando os elementos anteriores e **marcas** (utilizadas para definir o estado de uma rede de Petri).

O **peso** de um arco indica o número de **arcos** orientados de mesmo sentido entre dois elementos.

Considerando o sentido dos **arcos**, chama-se **lugares** de entrada de uma **transição**, os **lugares** que possuem **arcos** no sentido destes **lugares** para a citada **transição** e, chama-se **lugares** de saída de uma **transição**, os **lugares** que possuem **arcos** no sentido da citada **transição** para estes **lugares**.

A execução de uma rede de Petri é caracterizada pela variação do número de **marcas** nos **lugares**. As **marcas** nos **lugares** determinam o disparo das **transições**. Uma **transição** dispara removendo as **marcas** dos seus **lugares** de entrada e criando novas **marcas** em seus **lugares** de saída.

As regras básicas⁴ para a modelagem da evolução dos estados da rede de Petri incluem:

- uma **transição** só pode ser disparada se seus **lugares** de entrada estão **marcados** (eles devem ter pelo um número de **marcas** igual ou maior que o **peso** dos respectivos **arcos**);
- ⁵ no disparo, a **transição** remove um número de **marcas** de cada lugar de entrada igual ao respectivo **peso** do arco (de entrada da **transição**) e coloca um número de **marcas** em cada lugar de saída igual ao respectivo **peso** do arco (de saída da **transição**);
- as **marcas** não têm identificação e são usadas apenas para indicar se a condição representada é verdadeira (**marcada**) ou falsa (**não marcada**).

Para atender diferentes objetivos, extensões têm sido consideradas às redes de Petri. Uma destas extensões associa temporizações às **transições** para representar o tempo requerido para completar uma atividade, neste caso a **transição** só pode disparar se as regras de

⁴ estas regras são da classe de rede de Petri conhecida como rede de Petri lugar/transição ou rede de Petri ordinária (REISIG, 1985)

⁵ os **arcos** só podem interligar elementos de natureza diferente (PETERSON, 1981)

disparo estão atendidas e após o término do tempo associado. Outras extensões consideram outros tipos de arcos que indicam condições adicionais a serem atendidas para o disparo das transições: o arco habilitador que habilita a transição, caso o lugar a que se refere esteja marcado, e o arco inibidor, que desabilita a transição caso o lugar a que se refere esteja marcado. A ocorrência do disparo desta transição (em ambos os casos) não altera a marcação do lugar na origem do arco habilitador ou inibidor. A Figura 2.9 ilustra os principais elementos da rede de Petri apresentada nesta seção e que neste texto será denominada rede de Petri estendida.

Figura 2.9. Elementos da rede de Petri estendida.

Se comparadas com outras técnicas de descrição de SEDs (cadeias de Markov, teoria das filas, álgebra de processo, álgebra max-plus, lógica temporal, teoria de linguagem e/ou autômatos), a rede de Petri possui uma capacidade equivalente de modelagem. Entretanto, o diferencial é sua facilidade de visualização do sistema e a possibilidade de derivação para programas de controle.

Como técnica genérica de descrição de sistemas, a rede de Petri não possui regras de interpretação ou de construção do grafo, o que, entretanto, causa certa dificuldade de sua aplicação, do ponto de vista de desenvolvimento do algoritmo de controle de SEDs. Este problema é agravado para sistemas de grande porte e complexos onde a rede de Petri resultante apresenta dimensões e conexões que comprometem sua principal característica, isto é, a facilidade de visualização e interpretação dos dados.

Assim, foram desenvolvidas interpretações e outros mecanismos próprios para certas áreas de aplicação.

2.7.1. *Production flow schema* (PFS)

O PFS (*Production Flow Schema*) (MIYAGI, 1988) é uma classe de rede de Petri chamada de canal-agência (REISIG, 1985) devidamente interpretada para sistemas produtivos. Constitui uma técnica para desenvolver uma descrição estrutural hierárquica de um sistema a partir de seu modelo conceitual, ou seja, num nível relativamente alto de abstração (SANTOS FILHO et al., 2001) sem o detalhamento do seu comportamento dinâmico.

O PFS baseia-se em aplicar a técnica de refinamentos sucessivos através de uma abordagem *top-down*, de maneira que seja possível inserir progressivamente no modelo o detalhamento dos processos do sistema. O objetivo é representar o fluxo de operações tendo como referência a evolução dinâmica de um determinado processo. A idéia é que uma rede de Petri gerada a partir do PFS apresente propriedades de interesse no sentido de atender especificações próprias de sistemas produtivos reais.

Os elementos do PFS, ilustrados na Figura 2.10, são os seguintes:

- elementos ativos chamados **atividades**: representam um sub-processo ou um componente ativo do sistema capaz de realizar transformações. As **atividades** podem agregar uma ou mais operações e pode ser refinada em **sub-atividades**. Correspondem a um macro-elemento delimitado por “[“ e”]”.
- elementos passivos chamados **distribuidores**: representam componentes passivos, capazes de armazenar, permanecer em determinados estados ou tornar os itens visíveis. É indicado

graficamente por uma circunferência. Entre duas atividades sempre existe um elemento distribuidor.

•**arcos:** conectam “atividades” e “distribuidores” representando o fluxo de materiais e/ou informações. Explicitam uma relação lógica entre estes elementos. No PFS se tem os fluxos primários, que estão conectados diretamente aos símbolos “[” e “]”, e os fluxos secundários, que estão conectados à parte interna da atividade (a representação deste fluxo é opcional).

Figura 2.10. Elementos do PFS

A partir do PFS pode ser gerado um outro modelo em rede de Petri para descrever o comportamento dinâmico do sistema (HASEGAWA & OKINO, 1985), (MATSUSAKI & SANTOS FILHO, 2006).

2.7.2. Rede de Petri estendida

A rede de Petri utilizada no presente trabalho denominada aqui como rede de Petri estendida é baseada nas redes de Petri Lugar/Transição, a qual foram adicionados transições temporizadas com arcos habilitadores e inibidores (DAVID & ALLA, 1994). A seguir apresenta-se a sua definição:

- i) $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_m\}$ é um conjunto finito ($m \in \mathbb{N}^6$) de lugares da rede;
- ii) $T = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_m\}$ é um conjunto finito ($m \in \mathbb{N}$) de transições da rede;

⁶

$\mathbb{N}$ corresponde ao conjunto dos números naturais maiores que zero

iii) $F \subseteq \{P \times T\} \cup \{T \times P\}$ é o conjunto de arcos orientados;

iv) $I \subseteq \{P \times T\}$ é o conjunto de arcos inibidores;

v) $H \subseteq \{P \times T\}$ é o conjunto de arcos habilitadores;

vi) $W : \{F, I, H\} \rightarrow \mathbb{N}$ é uma função **peso** associados aos arcos;

vii) $Tm = \{Tm_1, Tm_2, Tm_3, \dots, Tm_n\}$ é o conjunto finito de temporizações associadas às respectivas transições;

viii) M_0 é a marcação inicial da rede.

Observa-se que:

- a omissão da temporização associada à transição indica uma temporização nula;
- a omissão de **peso** associado ao arco indica **peso unitário**.

Os diversos estados do sistema são representados através da associação de um número de marcas a cada lugar. Diferentes marcações da rede de Petri correspondem a diferentes estados do sistema.

A evolução dinâmica desta rede de Petri ocorre através do disparo de transições que alteram a marcação da rede. Quando uma transição dispara os lugares de entrada e de saída da transição têm a sua marcação reduzida e aumentada, respectivamente, pelo peso do arco que conecta o lugar a transição. Um exemplo é apresentado na Figura 2.11.

Figura 2.11. Exemplo de disparo de transição.

Uma transição está habilitada para **disparo** quando:

- os lugares de entrada possuem um número de **marcas** igual ou superior ao peso do **arco** que o conecta a **transição**;
- os **arcos habilitadores** e **inibidores** conectados à **transição** se encontram habilitados;
- sendo θ a temporização associada a esta **transição**, ela está habilitada se todas as condições para seu **disparo** permanecerem satisfeitas por um tempo igual ou superior a θ .

A associação de **pesos** a **arcos habilitadores** e **inibidores** obedece as seguintes regras (Figura 2.12):

- a **transição T1** é habilitada se o **lugar P1** contém **N** ou mais **marcas**;
- a **transição T2** é habilitada se o **lugar P2** contém **menos de N** **marcas**.

Figura 2.12. Indicação do **peso** em (a) **arcos habilitadores** e (b) **arcos inibidores**.

2.7.3. Modelagem de tratamento de falhas

Em RIASCOS (2002) propõe-se a aplicação da rede de Petri distribuída (DPN) com **arco auto-modificável** para a representação do processo de detecção e tratamento de falhas em sistemas produtivos. O procedimento divide a abordagem destes sistemas em 3 módulos: módulo dos processos normais, módulo para tratamento de falhas e módulo para detecção de falhas. Têm-se basicamente quatro formas de modelar o tratamento de falhas no sistema através da descrição do processo produtivo original (em situação normal) para incluir uma sub-rede de Petri adicional (referente a detecção e o tratamento da falha): entrada condicionada, rota alternativa, recuperação inversa e recuperação direta.

SAMPATH et al. (1996) também consideram o tratamento de falhas do ponto de vista de SEDs, focando na modelagem de sistemas com propósito de diagnóstico e na solução de casos de um sistema HVAC (*heating, ventilation and air conditioning*). São construídos dois modelos: 1) modelo geral de funcionamento do sistema e 2) modelo do diagnosticador. É proposto um método para obter o modelo do sistema completo através da representação de componentes individuais e da informação fornecida por sensores. Para o modelo do diagnosticador são considerados sistemas parcialmente observáveis.

2.8. Síntese do capítulo

O estudo de sistemas de controle deve considerar: a natureza dos processos envolvidos, a capacidade de manter um desempenho adequado na eventual ocorrência de falhas, a técnica de modelagem e análise das soluções estudadas, e definições e aspectos da aplicação. Assim, para a concepção de sistema controle de edifícios inteligentes deve-se considerar os requisitos de FTCSs para aumentar a robustez e a flexibilidade do sistema, procedimentos de desenvolvimento de sistemas de controle que assegurem o atendimento das especificações, e técnicas que facilitem a estruturação e organização das funções de controle para garantir a integração entre os vários subsistemas e seus componentes.

A revisão bibliográfica identificou pontos em que a introdução de novas ferramentas e procedimentos é relevante. Sistemas holônicos é um conceito que pode ser combinado com a hierarquia em sistemas descentralizados e com os mecanismos apresentados de reação à falhas. Mecanismos de reconfiguração também são relevantes para a concepção de sistema de controle com características de robustez, agilidade e flexibilidade. A rede de Petri por se tratar

de uma ferramenta matemática e gráfica permite a modelagem e análise formal de SEDs e além do seu papel no projeto do sistema é fundamental principalmente para a implementação dos sistemas de controle. O procedimento para o projeto de sistemas de controle pode ser mais sistematizado quando apoiado por técnicas como a do PFS que explora a técnica de refinamentos sucessivos para a implementação de estratégias de controle.

O edifício inteligente é um caso representativo de sistema produtivo, em que se deve considerar uma arquitetura de sistema de controle distribuído e hierárquico, pois, envolve processos relativamente complexos com grande número de subsistemas que interagem entre si e onde o papel do homem como usuário, operador, supervisor, e etc. deve ser necessariamente considerado. Entende-se nesse trabalho os edifícios inteligentes como um sistema composto por vários subsistemas, com as características de serem independentes e autônomos, e cujos comportamentos dinâmicos podem ser caracterizados como de sistema a eventos discretos (SEDs).

Há várias razões para considerar um FTCS para edifício inteligente, que em geral são problemas como: 1) falha devido a erro na seleção do modo de controle, 2) falha devido a problemas na instalação de equipamentos, 3) falha devido à falta de comissionamento, 4) falha devido à manutenção inapropriada e 5) falha devido à queda de desempenho de algum componente/elemento.

Assim, verifica-se que a organização de conceitos, técnicas e ferramentas é relevante para compor um procedimento sistematizado para o projeto e implementação de FTCSs de edifícios inteligentes. Isto é, apesar de identificar trabalhos específicos nesta área, existem

ainda aspectos que devem ser melhor avaliados para assegurar maior qualidade e produtividade na tarefa de projeto destes sistemas.

3. ARQUITETURA E FUNCIONAMENTO DO FTCS PARA EIs

De acordo com os estudos citados anteriormente, o projeto do sistema de controle tolerante a falhas (FTCS) deve considerar:

- flexibilidade operacional, isto é, funções de adaptação e de reação às mudanças no sistema sejam estas internas (dispositivos de controle) ou externas (objeto de controle, usuários, operadores, supervisores);
- agilidade para efetuar as mudanças em curto período de tempo; e
- robustez para manter certo nível de estabilidade com um mínimo de variação na presença de fatores que influenciem a operação do sistema.

Dentro deste contexto, apresenta-se neste capítulo a proposta de uma arquitetura e de funcionamento de um FTCS para edifícios inteligentes (EIs). São detalhados a arquitetura de controle, os componentes do sistema, os mecanismos que garantem agilidade e autonomia ao FTCS e, os mecanismo para tratamento de falhas e de aprendizagem.

3.1. Arquitetura de controle

Adota-se aqui uma arquitetura baseada em holons e adaptada para EIs, derivada dos trabalhos de BRUSSEL et al. (2000) e LEITÃO et al. (2005). Esta arquitetura, ilustrada na Figura 3.1, explora as vantagens associadas ao conceito de holon, tais como a presença de estruturas distribuídas com componentes autônomos e cooperativos. Nesta representação, cada holon pode ser um recurso físico (*chiller, sprinkler, CLP, etc.*) ou um componente lógico (serviço, ordem, etc.). Cada holon é responsável por executar diferentes funcionalidades.

Figura 3.1. Arquitetura do sistema de controle de EI baseado em holons: (a) modo estacionário e (b) modo transiente.

Os mecanismos adotados para o FTCS permitem o chaveamento do controle (que é descrito no item 3.3) em dois modos de operação: o “modo estacionário” em que o sistema de controle é coordenado de forma hierárquica e os HOs seguem a coordenação do HS, e o “modo transiente”, em que os HOs assumem o controle e ocorre na presença de falhas.

A arquitetura de controle baseada em holons está dividida nos seguintes **níveis: de planejamento, de ordenação, de supervisão e de controle local**.

Os **holons** do **nível de planejamento** (**HSSs – holons dos subsistemas**) contém todo o conhecimento necessário para o funcionamento do subsistema do edifício inteligente e para escolher a estratégia que atende os objetivos especificados.

O **holon** do **nível de ordenação** (**HE – holon de estratégias**) contém todo o conhecimento

para gerenciar a execução de cada estratégia de produção que resulta num serviço.

O **holon do nível de supervisão (HS – holon supervisor)** contém todo o conhecimento para coordenar os holons dos níveis hierárquicos inferiores, agregando as habilidades de cada componente e dispondo de serviços combinados com outras entidades do sistema de controle. Este holon atua de acordo com um conjunto pré-definido de regras de adaptação às mudanças (descritas neste capítulo) e tem como principal função a elaboração e execução de planos otimizados para os holons sob seu domínio.

Os holons supervisores (HSs) são também responsáveis pela constituição de holarquias e sua evolução dinâmica de acordo com o contexto do ambiente. Estas holarquias podem representar um subsistema, um conjunto de equipamentos ou um equipamento com sensores, atuadores, detectores, etc. Um holon pode ser adicionado a uma holarquia coordenada por um holon supervisor (HS). Uma vez que um novo membro é adicionado à holarquia, o holon supervisor (HS) agrega as informações relacionadas ao novo membro.

O **holon do nível de controle local (HO – holon operacional)** representa os recursos físicos da planta que possuem algum dispositivo de controle para o seu funcionamento e caracterizam o comportamento destes recursos de acordo com seus objetivos e habilidades. O holon operacional (HO) segue uma agenda, ou seja, a lista planejada de tarefas que o recurso tem de executar.

Para assegurar flexibilidade à estrutura de controle e criar as condições para uma visão global, ou seja que considera o sistema como um todo, além de uma reação ágil e eficaz à ocorrência de falhas, um holon operacional (HO) pode ser representado por uma holarquia formada por

um holon supervisor (HS) e por outros holons operacionais (HOs), conforme ilustrado na Figura 3.2. Cada holon contribui com seu comportamento individual que em conjunto formam o comportamento do holon original.

Figura 3.2. Modelo de representação do holon operacional (HO) por holarquias.

3.2 Mecanismos de adaptação do FTCS para EI

A seguir apresentam-se os mecanismos para execução de tarefas com autonomia e agilidade, que facilitam a interação e verificação do desempenho dos holons, e a alteração da estrutura de controle hierárquico para heterárquico, de acordo com a presença de falhas.

3.2.1 Negociação

Este mecanismo é apresentado em LEITÃO et al. (2005). É baseado em regras que permitem negociação entre holons baseada em créditos (recompensas) e débitos (penalidades) entre holons, dependendo se uma ordem é executada com sucesso ou não.

Quando um holon de estratégia (HE) está encarregado de executar um determinado serviço,

ele recebe as seguintes informações do holon do subsistema (HSS) sobre este serviço:

- a estratégia escolhida,
- uma medida quantitativa chamada fundo do serviço (π),
- o tempo programado,
- um valor de penalidade pelo atraso (φ), e
- um valor de recompensa (ε) por finalizar com sucesso.

O holon de estratégia (HE) deve gerenciar a negociação com os holons operacionais (HOs) para atingir o objetivo sem ultrapassar o valor limite previsto para o fundo do serviço.

Durante alocação de novas ordens, há interação entre holons de estratégia (HEs) e holons operacionais (HOs). Após esta interação o holon de estratégia (HE) aceita transferir (pagar) uma recompensa ε ao holon operacional (HO) pela conclusão da ordem e receber uma penalidade φ se a ordem não for concluída no tempo devido. O desempenho dos holons operacionais (HOs) baseado em créditos é dado pela lista de recompensas menos as penalidades.

A Tabela 3.1 sumariza a evolução desse mecanismo dos holons de estratégia (HEs) e dos holons operacionais (HOs) durante a execução de tarefas de controle.

Tabela 3.1. Evolução de créditos durante a execução de tarefas de controle (adaptado de LEITÃO et al., 2005).

Fase	<u>holon de estratégia (HE)</u>	<u>holon operacional (HO)</u>
Alocação de uma ordem	contrata a execução da ordem por ε e a penalidade por φ .	contrata a execução da ordem por ε e a penalidade por φ .
Finaliza uma operação com sucesso.	paga o valor ε ao HO, i.e., $\pi \leftarrow \pi - \varepsilon$	aumenta o total dos créditos por ε , i.e., $\mu \leftarrow \mu + \varepsilon$
Finaliza de uma operação com atraso.	paga o valor ε e recebe o valor φ do HO, i.e., $\pi \leftarrow \pi - \varepsilon + \varphi$	diminui o total de créditos por φ e aumenta por ε , i.e., $\mu \leftarrow \mu + \varepsilon - \varphi$
Operação cancelada (atraso, defeito, etc.)	recebe o valor φ do HO, i.e., $\pi \leftarrow \pi + \varphi$	diminui o total de créditos por φ , i.e., $\mu \leftarrow \mu - \varphi$

3.2.2. Autonomia

Este mecanismo é baseado no trabalho de LEITÃO et al. (2005). A autonomia de cada holon operacional (HO) é neste caso associado a um fator (fator de autonomia), i.e., uma variável discreta {Baixo, Alto}, regulada por um mecanismo que facilita o comportamento de adaptação à falhas. Normalmente, o holon operacional (HO) tem um fator de autonomia "Baixo", que permite a sua coordenação pelo holon supervisor (HS), executando quando disponível, os planos que o HS indica.

A evolução do fator de autonomia, ilustrada em rede de Petri na Figura 3.3, funciona da seguinte forma: quando uma falha ocorre, assume-se que esta é identificada, e inicia-se o tratamento da falha (este processo pode ser iniciado tanto pelo holon que representa o recurso que sofreu a falha, como pelo holon que recebeu a informação de falha de outro holon). A função de tratamento da falha adapta o comportamento dos holons para processar a falha. As entradas para esta função são:

- o fator de autonomia (α);
- o tempo de restabelecimento (τ) que é o tempo estimado necessário para a recuperação da falha; e
- o parâmetro falha (ρ) que indica a ocorrência de uma determinada falha.

No caso de um fator de autonomia "Baixo", a ocorrência de uma falha representada por "Ativa", gera a mudança do fator de autonomia para "Alto" e a seleção de um comportamento adequado para o tratamento da falha. A seleção do comportamento é função do tipo de falha, do estado atual do holon e de dados históricos da planta sob controle.

Figura 3.3. Evolução do fator de autonomia (α) (baseado em LEITÃO et al., 2005).

Depois de transcorrido o tempo de restabelecimento, se o fator de autonomia é "Alto" e a falha ainda está "ativa", isto significa que o sistema ainda não foi recuperado e, reestima-se o tempo de restabelecimento. Caso a falha já tenha se dissipado (situação indicada por falha "inativa"), ou seja, se a falha e a situação causada pela mesma já foi resolvida, o holon pode retornar a estrutura anterior à ocorrência da falha, mudando o fator de autonomia para "Baixo". Os outros casos não implicam qualquer ação.

3.2.3. Propagação de mensagens

A propagação de mensagens, baseado em LEITÃO et al. (2005), assegura a agilidade de resposta à falhas ou perturbações e está ilustrada na Figura 3.4. O mecanismo envolve o envio de mensagens da ocorrência de uma falha do holon operacional (HO) para o holon supervisor (HS) ao qual este HO está subordinado. Quando recebe esta informação, o holon supervisor (HS) inicia a propagação de mensagens que indica a necessidade de reorganização. É

estimado o tempo de restabelecimento que é definido de acordo com o tipo de falha e os dados históricos da planta. Os holons associados ao holon supervisor (HS) recebem a mensagem propagando esta necessidade aos holons vizinhos na estrutura de controle. A intensidade da mensagem de falha torna-se menor com o aumento da distância do holon supervisor (HS) que propagou a falha.

Figura 3.4. A propagação de mensagem de uma falha (adaptado de LEITAO et al., 2005).

3.3. Chaveamento do modo de controle

Os mecanismos adotados para o FTCS permitem o chaveamento do controle em dois modos de operação: o “modo estacionário” em que o sistema de controle é coordenado de forma hierárquica e os HOs seguem a coordenação do HS, e o “modo transiente”, em que os HOs assumem o controle (vide Figura 3.1). Durante o “modo estacionário” os HOs interagem com os níveis hierárquicos superiores e durante o “modo transiente”, bem como, durante a execução de serviços ou comandos, os HEs interagem diretamente com os HOs. Estas interações são detalhadas no capítulo seguinte.

No “modo transiente”, o holon supervisor (HS) propaga a mensagem de falha, por um período

de tempo igual ao previsto para a recuperação, para os holons sob seu domínio de coordenação e para holons de níveis superiores. Os holons operacionais (HOs) que recebem a informação começam uma interação direta com os holons de estratégia (HEs).

O holon operacional (HO) pode prever possíveis ações locais para recuperar fisicamente um recurso afetado por uma falha, baseado em soluções usadas em ocorrências anteriores, e passa esta informação para o holon operacional (HO) que é responsável por executar a operação de manutenção.

Quando a falha é removida, ou seja, quando a sua causa e suas conseqüências são sanadas, cada holon operacional (HO) reduz novamente seu fator de autonomia e retorna a estrutura de controle hierárquica, entrando novamente no “modo estacionário”.

3.4. Estimação do tempo

Baseado em PORCARELLI et al. (2004) e LEITAO et al. (2005), descreve-se aqui uma forma de estimar o tempo de reconfiguração. Se o recurso afetado pela falha ficar indisponível por um longo período de tempo, o holon operacional (HO) prevê o tempo de recuperação (t_r), para poder revisar sua agenda, verificar as ordens planejadas durante o tempo de recuperação e, então cancelar a alocação atual destas ordens, notificando o holon de estratégias (HE). Para isto, conforme representado na Figura 3.5, o holon operacional (HO) estima dois parâmetros distintos:

- t_e que define o tempo em que as ordens precisam retornar para o holon de estratégia (HE), e
- t_c que é o tempo para verificar se a falha foi recuperada, re-estimar e re-aplicar os parâmetros do tempo se a falha não foi recuperada como previsto. Este tempo é menor que t_e .

Uma possível maneira para calcular estes dois valores é determinar o tempo de recuperação (t_r) dispendido em tratamento de falhas anteriores e assumir 50% para t_c e 90% para t_e .

Figura 3.5. Janela temporal para a estimativa do tempo de recuperação (adaptado de LEITAO et al., 2005).

Se a falha está recuperada, então o equipamento está disponível para retornar a sua operação normal, então é necessário re-estimar os parâmetros de tempo e cancelar as estratégias que estão planejadas para o novo intervalo de tempo. Obtém-se o novo tempo estimado somando t_c a t_e e verificando novamente a recuperação em t_c . O holon operacional (HO) remove a ordem planejada que seria executada dentro do novo intervalo de tempo ($t_c + t_e$) de sua agenda local, enviando mensagens para os holons de estratégia (HEs) responsáveis por cada uma destas ordens.

Durante o tempo que o recurso está indisponível, o holon operacional (HO) somente recebe novos comandos se estes puderem ser executadas fora do intervalo de tempo estimado para recuperação. Após a execução da ação de recuperação, o holon operacional (HO) armazena as informações relevantes sobre a falha, principalmente o tempo de recuperação e a solução utilizada para recuperá-la. O registro destas informações permite criar novo conhecimento que suportará futuras reações às falhas.

3.5. Fases do FTCS

As fases do FTCS estão presentes em cada holon independente do nível hierárquico. A Figura 3.6 ilustra a relação entre estas fases que são as seguintes: estimação, planeamento, execução e aprendizagem.

Figura 3.6. Fases do FTCS proposto.

A fase de estimação envolve:

- a detecção de sintomas, onde se confirma a existência de falhas através da supervisão dos processos, e
- o isolamento da falha que é baseado em informações características (tipo, dados estatísticos, etc.) que asseguram a identificação da falha. Quando os sintomas detectados não permitem qualquer conclusão, o sistema deve ser programado para identificar o tipo de falha baseado em casos similares ou requisitar intervenção externa.

A fase de planeamento decide a ação de reconfiguração baseada em prioridades pré-definidas como, por exemplo: menor queda de desempenho, menor tempo de recuperação, etc. A partir de dados históricos, é possível medir a significância estatística de cada tipo de falha em termos como a taxa de frequência, o tempo de recuperação e o custo operacional.

A fase de execução envolve o envio de comandos para execução do plano de ação

selecionado.

A última fase é a fase de aprendizagem que envolve a armazenagem dos dados relevantes relacionados com o plano executado.

Portanto, pode-se afirmar que o FTCS atua de acordo com as seguintes regras:

- se **sintomas** então **seleciona falha**;
- se **falha selecionada** então **seleciona ação**;
- se **ação selecionada** então **ativa reconfiguração**; e
- se **reconfiguração executada** então **armazena dados relevantes**.

3.5.1. Estimação

Esta fase é dividida em duas etapas, detecção de sintomas e identificação de falhas:

Detecção de sintomas

O primeiro passo é a descoberta ou detecção de sintomas que podem indicar a existência de uma falha. Um sintoma pode ser um atraso de ordem, uma ordem adiantada, um problema de qualidade, mas também um valor inesperado em um sinal de sensor, tal como um valor anormal de temperatura em um equipamento.

As informações do ambiente são adquiridas através do uso de sensores e através de mensagens recebidas de outros holons. Quando a informação disponível não é suficiente, o holon pode contar, dentro de um processo de cooperação, com outros holons ou com os dados

do recurso físico controlado, para derivar a informação necessária.

O conjunto de sintomas de cada tipo de falha é continuamente atualizado de acordo com o conhecimento adquirido em ocorrências anteriores. Quando os sintomas detectados não permitem qualquer conclusão, os mecanismos de aprendizagem precisam ser programados para indicar o tipo de falha em casos similares ou análogos, ou para requisitar intervenção externa. Em ambos os casos, o conhecimento é adquirido e armazenado numa base de conhecimento.

A detecção usa supervisão passiva e ativa. A supervisão ativa é implementada em cada holon para esta notificar quando ocorre uma falha. A supervisão passiva ocorre quando a iniciativa é do holon que precisa de alguma informação específica e requisita esta informação a outros holons (por exemplo, o valor de um sensor).

Identificação de falhas

Nesta etapa, o FTCS deve isolar os sintomas para permitir o diagnóstico, a identificação da falha e analisar o impacto da falha identificada.

A informação relacionada à ocorrência de uma falha é armazenada em uma estrutura de dados, contendo o tipo de falha, a data da ocorrência, o tempo necessário e a solução utilizada em situações anteriores para recuperar esta falha. Cada tipo de falha tem uma lista associada de sintomas e de possíveis soluções para serem aplicadas na sua recuperação. Na fase de projeto do FTCS deve-se identificar os principais pontos críticos do sistema, ou seja, as falhas que afetam as execuções das funções consideradas indispensáveis ao funcionamento do

sistema.

3.5.2. Planejamento

Uma vez que a falha é identificada, o próximo passo do sistema é reagir apropriadamente adaptando o seu comportamento de acordo a falha. O mecanismo de reação, dependente do tipo de falha, é baseado em controle com reconfiguração.

A partir de dados históricos da planta, é possível avaliar a significância estatística de cada tipo de falha em termos de frequência (número de vezes que a falha ocorre por unidade de tempo), tempo estimado de recuperação e custo potencial envolvido. A partir da identificação dos pontos críticos de um sistema deve-se analisar aqueles que podem ser candidatos a reconfiguração e dispor recursos redundantes para as funções envolvidas. As prováveis reações a estes pontos críticos também devem ser descritas.

Para realizar a reconfiguração do sistema é necessário que a função que tem seu desempenho comprometido pela ocorrência de falha, possa ser realizada ou pela utilização de outros recursos não afetados pela falha ou pela mudança de algum parâmetro na configuração do componente em falha.

Uma das formas de reação à ocorrência de falha são as “ações reflexo”, proposto em RUSS (2003), que para o caso de sistemas de controle de edificios inteligentes são exemplificadas na Figura 3.7. Neste exemplo, uma tubulação de água (a) apresenta um vazamento que é detectado por um sensor de umidade (b), e uma válvula é então acionada para fechar a tubulação (c). Em (d) está ilustrado o mecanismo de reação local dos holons envolvidos.

Figura 3.7. Exemplo de ação reflexo para sistema de controle.

3.5.3. Execução

Após a decisão de recuperação ser tomada as ações devidas devem ser despachadas e executadas. Estas ações podem ser na forma de sinais para atuadores, mensagens para outros componentes ou execução de procedimentos.

Outra questão importante a considerar no processo de reconfiguração é que isto envolve o retorno à situação normal em caso de eliminação da falha, isto é, a reativação gradual das funções desligadas durante o processo de atuação da reconfiguração.

3.5.4. Aprendizagem

Para melhorar o desempenho do holon, em situações futuras, é necessária a implementação de

mecanismos de aprendizagem, pois, os resultados das ações executadas precisam ser validados e de acordo com os resultados, novos conhecimentos são gerados, aumentando a eficiência do holon no processo de tomada de decisão. A capacidade de aprendizagem é dependente dos mecanismos de decisão e dos algoritmos de aprendizagem. RUSSEL & NORVIG (1995) apresentam um levantamento sobre técnicas de aprendizagem que podem ser utilizadas.

3.6 Síntese do capítulo

Neste capítulo são descritos a arquitetura de controle e o funcionamento do FTCS proposto para edifícios inteligentes. O FTCS proposto é baseado em holons, cada um possuindo uma visão parcial do sistema e que assim devem cooperar entre si para alcançar os objetivos planejados. A arquitetura é dividida em níveis: o nível de planejamento formado pelos HSSs (holons do subsistema), o nível de ordenação formado pelos HEs (holons de estratégias), o nível de supervisão formado pelo HSs (holons supervisores) e o nível de controle local formado pelos HOs (holons operacionais).

Os mecanismos descritos são: negociação, autonomia, propagação de mensagens, chaveamento do modo de controle e estimação do tempo. Estes mecanismos garantem ao FTCS uma autonomia de funcionamento envolvendo:

- a verificação de desempenho dos holons;
- a reorganização para tratamento de falhas;
- a agilidade na troca de informações; e
- a alternância entre a arquitetura de controle hierárquica e heterárquica na ocorrência de falhas.

São descritas também as fases do FTCS que estão presentes em cada holon: fase de estimação, fase de planejamento, fase de execução e, fase de aprendizagem.

4. PROCEDIMENTO PARA O PROJETO DE FTCSs DE EIs

Este capítulo apresenta o procedimento proposto para o desenvolvimento do sistema de controle para edifícios inteligentes que procura explorar os conceitos e métodos citados nos capítulos anteriores. A estrutura básica do procedimento de projeto e implementação de um FTCS de edifício inteligente (EI) é descrito através de um PFS na Figura 4.1 e que envolve as seguintes etapas:

- etapa 1 - análise dos requisitos;
- etapa 2 – modelagem;
- etapa 3 - análise dos modelos/simulação; e
- etapa 4 – implementação.

Considera-se o uso do PFS no *workflow* do próprio procedimento, que permite uma sistematização das tarefas do projeto de sistemas de controle de EI e explora o potencial de técnicas de modelagem que facilitam a estruturação e o detalhamento das funções de controle, bem como a implementação. Considera-se também, desde a fase de concepção do EI, os requisitos de FTCS. Como o foco do presente trabalho está no projeto, a seguir são descritas como cada uma das 3 primeiras etapas devem ser conduzidas. Evidentemente a implementação efetiva do FTCS envolve a etapa 4, mas como isso envolve características específicas de produtos e recursos em geral disponíveis no mercado este problema é tratado como parte de trabalhos futuros a serem conduzidos em função de aplicações de casos práticos.

Figura 4.1. PFS das etapas de desenvolvimento do procedimento.

As etapas do procedimento são ainda subdivididas em sub-etapas e passos. O retorno às etapas anteriores é considerado durante o desenvolvimento do procedimento sempre que necessário. Nos itens seguintes, são detalhados os documentos que devem ser gerados e as ferramentas utilizadas na execução de cada etapa.

4.1. Etapa 1 – Análise de requisitos

Com base nas especificações gerais de um EI, o objetivo nesta etapa é: 1) definir as especificações do sistema de controle predial e de seu tratamento de falhas, e 2) caracterizar a interação entre as partes que compõem este sistema e o tratamento de falhas. Antes de analisar as necessidades ou as características do projeto do EI é importante definir o objetivo final do

sistema de controle do EI. Esta informação é utilizada como referência para todas as decisões envolvidas no projeto e para definição dos serviços disponíveis. A estrutura das atividades é dividida em três sub-etapas que são detalhadas na sequência.

4.1.1. Sub-etapa 1.1 – Identificação dos holons

A estrutura desta sub-etapa está representada no PFS da Figura 4.2 e seu objetivo é definir o EI em estudo, seguindo a arquitetura apresentada na Figura 3.1. Nesta sub-etapa caracterizam-se os holons correspondentes desta arquitetura. A identificação dos holons envolve a definição: das operações envolvidas e suas relações, do conjunto de requisitos e das características que os recursos envolvidos precisam ter para poder executarem estas operações para a realização de cada serviço oferecido pelo EI. Vale ressaltar que para garantir que o sistema seja tolerante a falhas de componentes, é necessário considerar algum tipo de redundância e, portanto, é importante considerar durante esta fase os equipamentos ou funções que garantam esta redundância.

Figura 4.2. PFS da sub-etapa 1.1: identificação dos holons.

i) Identificação dos holons do subsistema (HSS)

Os **holons do subsistema** (HSSs) são as entidades responsáveis pela execução dos serviços de cada subsistema predial. Para identificar os HSSs, deve-se levantar os requisitos necessários para concepção do sistema de controle do edifício e de cada serviço fornecido pelos vários subsistemas que é representado por um HSS. As necessidades são levantadas a partir de exigências muitas vezes ambíguas, assim é necessário encontrar uma forma de agrupar e conciliar as diferentes informações. Portanto, este levantamento exige grande conhecimento do desenvolvedor e deve ser realizado muito cuidadosamente.

De acordo com os objetivos citados no item 1.1, para maioria dos EIs pode-se definir os seguintes HSSs:

- HSS do conforto térmico representando o subsistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC);
- HSS de segurança de acesso representando o subsistema de segurança patrimonial/segurança e de controle de acesso;
- HSS de segurança contra o fogo representando o subsistema de combate e prevenção ao fogo;
- HSS de energia representando o subsistema de controle de energia/ iluminação;
- HSS de movimentação representando o subsistema de transporte/movimentação de pessoas ou produtos;
- HSS de voz e dados representando o subsistema de controle da transmissão de voz e dados; e
- HSS da segurança de transmissão de sinais representando o subsistema de controle da malha de transmissão de sinais de controle.

Deve-se descrever para cada subsistema associado a um HSS quais os equipamentos envolvidos e representá-los em um diagrama contendo o *lay-out* destes equipamentos. Conforme citado nos estudos anteriores, a divisão em partes do sistema facilita a concepção do sistema de controle.

ii) Identificação dos holons de estratégia (HEs)

Após a definição dos HSSs deve-se definir as funções de controle. Estas funções podem ser classificadas em: funções de inicialização, funções operacionais, funções de seleção de modos de operação, funções de manutenção, funções de tratamento de falhas, funções de tratamento de exceção, funções de finalização, entre outras. Para cada tipo de função deve ser definido um conjunto de estratégias de controle.

Em projeto de EIs, em geral, é possível obter significativos ganhos com a adoção de estratégias de controle que prevêm o tratamento de certas situações que são possíveis de serem previstas durante a fase de projeto. Estas estratégias devem ter sua especificação realizada nesta etapa. Por exemplo:

- em caso de incêndio: o subsistema HVAC pode aumentar a pressão de ar nas áreas adjacentes a região afetada inibindo a propagação do fogo e o subsistema de transporte deve desligar os elevadores e enviá-los ao andar térreo;
- em caso de acesso não permitido a uma determinada área, o subsistema de controle de acesso pode acionar o pessoal da segurança; e
- em caso de área desocupada: o subsistema HVAC pode desligar o condicionamento na área e o subsistema de controle de energia desligar a iluminação.

As funções identificadas devem ser classificadas por ordem de prioridade. Esta definição de prioridade auxilia o desenvolvimento de ações de reconfiguração. Há diversas maneiras de se especificar as prioridades, por exemplo, estas podem ser de natureza estática ou dinâmica; pode haver uma prioridade para ação de controle ou a prioridade pode depender de uma composição de ações de controle; pode haver uma prioridade para uma situação específica do objeto de controle; pode haver uma prioridade para um evento, etc. Existem funções que exigem respostas em alta velocidade, programas que necessitam de gerenciamento de prazos, etc. Para EIs adota-se a seguinte classificação de prioridades, começando pela de maior importância:

- prioridade 6: funções que envolvem situações perigosas ao ser humano, por exemplo vazamento de gás ou incêndio;
- prioridade 5: funções que envolvem o desempenho do EI como a manutenção das condições de trabalho humano e de equipamentos;
- prioridade 4: funções associadas ao estado anormal de uma variável, por exemplo temperatura alta;
- prioridade 3: funções relativas a ações locais de reação à falhas, ou seja, ações reflexo;
- prioridade 2: funções operacionais regulares como ligar/desligar dispositivos; e
- prioridade 1: funções operacionais de seleção no ambiente, por exemplo atualização da temperatura de referência ou abertura de janelas.

A análise das funções de controle é efetuada para definir as estratégias de controle que devem ser seguidas durante a execução dos serviços do EI. Nesta etapa deve-se descrever as estratégias utilizados no EI. A estruturação destas estratégias é feita utilizando a técnica do PFS na sub-etapa 2.2. Os **holons de estratégia** (HEs) são as entidades responsáveis pela tarefa de gerência de execução destas estratégias de controle. Um HE é definido para cada

estratégia de controle.

iii) **Identificação dos holons supervisores (HSs)**

A execução das estratégias de controle necessárias para a execução de serviços no EI envolve, em geral, um conjunto de equipamentos cujas operações devem ser devidamente coordenadas. Os **holons supervisores** (HSs) são as entidades responsáveis por esta tarefa de coordenação. Um HS é construído para cada conjunto de dispositivos que necessitam ter suas operações coordenadas, por exemplo os dispositivos para manter o fluxo de ar num duto a certa velocidade ou dispositivos para posicionar as portas de elevadores.

iv) **Identificação dos holons operacionais (HOs)**

Os **holons operacionais** (HOs) são as entidades responsáveis pela execução das funções de operações dos dispositivos de atuação, detecção, comando e monitoração. Para edifícios inteligentes propõe-se a seguinte identificação:

- **holons operacionais** de comando, tais como interruptores, botões e seletores, teclados e telas sensíveis ao toque;
- **holons operacionais** de atuação, tais como *chillers*, torres de resfriamento, motores, portas ou janelas automáticas, válvulas, *sprinklers* e catracas de acesso;
- **holons operacionais** de detecção, tais como, detectores de fumaça, sensores de temperatura, fluxostatos, câmeras e sensores de presença;
- **holons operacionais** de monitoração, tais como alarmes sonoros, CFTV e mostradores; e
- **holons operacionais** representados pelo homem, tais como operadores, time de manutenção e usuários.

Na identificação dos holons operacionais utiliza-se a representação em holarquias (vide Figura 3.2), que pode ser baseada na necessidade de combinar sinergias para facilitar a execução de tarefas ou na disposição física de dispositivos na planta sob controle.

Deve-se identificar todos os estados possíveis de cada componente incluindo as falhas, por exemplo, para o dispositivo de atuação “bomba” o respectivo HO pode indicar um dos possíveis estados {*ligada, desligada, quebrada*}.

4.1.2. Sub-etapa 1.2 – Especificação para FTCS do EI

Nesta sub-etapa, cuja estrutura está descrita pelo PFS da Figura 4.3, deve-se considerar além da operação em condições normais, as medidas a serem tomadas em casos imprevistos como falhas, falta de energia, erros de operação, etc.

Figura 4.3. PFS da sub-etapa 1.2: especificações para FTCS do EI.

As especificações geradas nesta sub-etapa estão relacionadas com as fases do FTCS de EIs presente em cada holon, ilustrado na Figura 3.6. Sendo que o conjunto de regras é dependente

do tipo de holon, seus objetivos e suas habilidades. Em outras palavras, estas especificações regulam o comportamento do sistema definindo, por exemplo, a execução da agenda, gerenciamento da execução, a supervisão ativa, o fator de autonomia, o chaveamento do modo de controle e a reorganização estrutural da arquitetura do FTCS. A Tabela 4.1 relaciona algumas questões que facilitam o desenvolvimento desta etapa.

Tabela 4.1. Questões a serem respondidas para a especificação do FTCS do EI.

Sobre as falhas	Que falhas podem ser detectadas e diagnosticadas? Em que condições estas falhas podem ser detectadas e diagnosticadas? Quais as soluções e o tempo necessário para recuperação destas falhas de acordo com dados históricos?
Sobre os pontos críticos	Que falhas podem levar a uma reconfiguração do sistema?
Sobre os componentes do sistema	Que parâmetros podem ser reconfigurados?
Sobre os sensores	Que informações devem ser coletadas e em que frequência?
Sobre a arquitetura do sistema	Que recursos podem ser utilizados para reconfigurar o sistema? Qual o grau de redundância a ser considerado?
Sobre o sistema	Qual grau de degradação de desempenho é aceitável para cada serviço?

Os objetivos nesta sub-etapa são: 1) listar a identificação das falhas e dos pontos críticos do EI, 2) listar as especificações para o diagnóstico de falhas e 3) descrever as estratégias para tratamento de falhas e para reconfiguração. Esta sub-etapa envolve as seguintes atividades:

v) Identificação das falhas e dos pontos críticos

O levantamento dos principais pontos críticos do sistema é realizado identificando as falhas de cada subsistema do EI e caracterizando aquelas que podem afetar a execução normal das funções indispensáveis ao sistema, ou seja, que a falha afete pontos cruciais que permitam o funcionamento básico do sistema.

vi) Especificações para tratamento de falhas

Esta atividade foca a fase de estimação (em especial no diagnóstico de defeitos) e a fase de planejamento (decisão) do FTCS. Para a fase de detecção sintomas adota-se, por exemplo, o procedimento descrito em RIASCOS (2002) em que demonstra-se que através da caracterização de padrões é possível desenvolver modelos em rede de Petri e detectar falhas através de sinais emitidos por sensores.

Deve-se levantar as probabilidades (p) entre mudanças de estado normal e estado de falha dos componentes do sistema, como o exemplo ilustrado na Figura 4.4 que apresenta um componente com seus possíveis estados (“NORMAL” e “FALHA”). Pode-se associar uma lógica a cada estado, por exemplo, para uma válvula no estado ABERTA o fluxo de entrada na válvula deve ser igual ao fluxo de saída. Este exemplo pode assim ser estendido para sistemas compostos por mais de um elemento. Esta informação é utilizada durante a fase de planejamento (decisão) do FTCS onde podem ser consideradas ferramentas desenvolvidas e aplicadas com êxito para este processo de decisão. Em PORCARELLI et al. (2004) são apresentadas ferramentas que fazem este processo de decisão *online* utilizando modelos em rede de Petri.

Figura 4.4. Diagrama das mudanças de estado de um componente.

No processo de decisão, principalmente quando o diagnóstico não é preciso, considera-se a utilização de regras de inferência de sistemas especialistas baseado em raciocínio (KUIPERS, 1994). Por exemplo, se o diagnóstico acusa que um sistema formado por dois componentes

podem estar com defeito, o que não permite que o sistema cumpra com seu objetivo, pode-se inferir que o componente em falha é o que possui o menor MTBF, e então adotar as ações necessárias para correção desta falha. Se isto não resolver o problema o outro componente é o que está com falha.

O diagnóstico (parte da estimação) e a decisão (parte do planejamento) estão presentes nas fases do FTCS de cada holon, descritas no item 3.5. Para a modelagem do diagnóstico, adota-se o procedimento apresentado em SAMPATH et al. (1996) para construção de um mecanismo denominado diagnosticador, com a inclusão de modelos em rede de Petri estendida no lugar de modelos em autônomos finitos. Para a fase de decisão adota-se regras de inferência, tipo “se...então...” baseadas em raciocínio (KUIPERS, 1994). Esta modelagem é feita na sub-etapa 2.6.

vii) Identificação dos holons para tratamento de falhas

Feita a identificação da falha, deve-se analisar quais os pontos críticos que são candidatos a reconfiguração. A reconfiguração poderá ser realizada se a função a qual tem seu desempenho comprometido pela ocorrência da falha, puder ser realizada ou pela utilização de outros recursos não afetados pela falha ou pela mudança de algum parâmetro na configuração do componente em falha.

Devem ser concebidas quantas estratégias forem possíveis para a reconfiguração. Estas estratégias são elegíveis durante a execução no mecanismo de tratamento de falha do sistema de controle com base nas estratégias de decisão, em geral, com prioridade para aqueles em que a queda de desempenho é minimizada. Assim são especificados os HEs responsáveis pela

gerência destas funções

Deve-se também especificar qual o grau de degradação de desempenho é aceitável para as funções indispensáveis, por exemplo, recursos como ventiladores de teto (muitas vezes desnecessários/redundantes quando se dispõe de sistema de ar condicionado) podem garantir um mínimo de conforto térmico no caso de impossibilidade de refrigeração do subsistema de condicionamento de ar de um sistema HVAC. Assim, para um sistema de controle que permita reconfiguração deve-se especificar os componentes redundantes que possam realizar as funções indispensáveis, mesmo que seja com desempenho relativamente inferior.

Os holons operacionais (HOs) podem reagir a falhas conforme descrito no item 3.5.2, assim deve-se especificar reações passíveis de serem tratadas entre os HOs (vide Figura 3.7).

4.1.3. Sub-etapa 1.3 – Definição dos padrões da interação entre holons

Nesta etapa conforme estrutura descrita pelo PFS da Figura 4.5, três processos iterativos são considerados na modelagem do FTCS: solicitação de serviços, execução destes serviços e reconfiguração, que envolve a reconfiguração da estrutura de controle na ocorrência de falhas.

Figura 4.5. PFS da sub-etapa 1.3: definição dos padrões de interações entre holons.

O FTCS proposto busca potencializar as vantagens de cada arquitetura de controle utilizada em estudos anteriores (vide Tabela 2.2), assim considera a comunicação direta entre holons de estratégia e holons operacionais durante a alocação de comandos para executar os serviços e na ocorrência de falhas. Isto permite ao FTCS utilizar diferentes estruturas de controle que permitam uma ágil reação a distúrbios com conhecimento global do sistema.

Durante o desenvolvimento do modelo do sistema de controle são definidas interações adicionais que envolvem o envio de comandos específicos das estratégias de controle entre HEs, HOs e objeto de controle.

As interações entre holons são descritas utilizando o PFS e a rede de Petri estendida.

viii) Interações para solicitação de serviços

Na introdução de novos serviços ocorrem as seguintes interações: i) interações entre os holons do subsistema (HSSs) e de estratégia (HEs); ii) interações entre HEs e holons supervisores (HSs); e iii) interações entre HSs e holons operacionais (HOs).

Quando um serviço é solicitado ao holon do subsistema (HSS) este transmite aos HEs quais as estratégias que devem ser executadas, como ilustrado na Figura 4.6. Ao final da execução, os holons de estratégias (HEs) passam as informações relevantes ao holon do subsistema (HSS). Os holons de estratégias (HEs) interagem com os holons supervisores (HSs) para anunciar estas ordens de execução. O holon supervisor (HS) elabora periodicamente, uma programação otimizada das ordens para os holons operacionais (HOs) sob sua coordenação e

propõe estas ordens aos holons operacionais (HOs). O holon operacional (HO) recebe a programação proposta como um anúncio, i.e., envio de mensagem que precisa alocar ordens, e tem autonomia para aceitar ou rejeitar este, baseado em seu conhecimento local e comportamento atual do sistema. Se o holon operacional (HO) rejeita uma ou mais propostas, o holon supervisor (HS) reprograma as tarefas procurando uma alternativa. Se as ordens são aceitas pelos holons operacionais (HOs), o holon supervisor (HS) propõe uma agenda (calendário) ao holon de estratégia (HE) que deve informar seu aceite ou não. Em caso de aceite, as ordens são alocadas e posteriormente executadas. Caso contrário, são canceladas.

Figura 4.6. Interação entre os holons na solicitação de serviços do EI.

ix) Interações para execução

Na execução de um serviço ocorrem as seguintes interações: i) interações de preparação para

execução e a própria execução entre holons de estratégia (HEs) e operacionais (HOs); ii) interações para supervisão da execução entre holons de estratégia (HEs) e entre holons operacionais (HOs) ou entre holons operacionais (HOs) e holon supervisor (HS) ou entre holons operacionais (HOs) e; iii) interações entre HOs e objeto de controle para envio de comandos e obter informações oriundas de sensores.

Após a solicitação de serviços é necessário garantir que algumas atividades de inicialização sejam executadas antes de outras, ou seja, que haja uma preparação para execução, em EIs, por exemplo, para o acionamento de movimentação da cabine de um elevador é necessário antes acionar as travas das portas. Esta interação pode ter a presença do holon de estratégia (HE) atuando como coordenador ou os holons operacionais podem interagir diretamente entre eles. Na Figura 4.7 é apresentado um exemplo, Em alguns casos, os holons operacionais (HOs) interagem de forma similar à apresentada na mesma figura sem a presença do coordenador.

Na “preparação e execução” o holon de estratégia (HE) requisita a atividade “pré-execução” ao HO responsável por este serviço auxiliar. Em caso de falha ou recusa o HE realiza nova programação. O holon operacional (HO) de serviço auxiliar avisa ao holon de estratégia (HE) quando termina a execução e se houve algum problema. Após o serviço auxiliar ter sido executado com sucesso, o holon de estratégia (HE) solicita o início da execução da ordem ao holon operacional (HO) executor do serviço principal.

Figura 4.7. Exemplo da interação “preparação e execução”.

Para coordenar as atividades programadas é necessário supervisionar a execução das ordens. Nos níveis inferiores, a supervisão é efetuada com o processamento de informações do processo físico, através do estado de dispositivos de detecção (sensores), dispositivos de comando, dispositivos de atuação e dispositivos de monitoração. É através desta interação, representada na Figura 4.8, que cada holon operacional (HO) envia ordens e tem informações dos recursos sob seu controle.

Figura 4.8. Acionamento de dispositivo através de um HO.

Nos níveis superiores, os componentes do sistema de controle devem interagir para adquirirem novos conhecimentos e aumentar o desempenho global do sistema. Neste caso cada holon interage com outros holons requisitando a informação desejada. Esta interação pode ser feita de duas formas, aqui chamadas de supervisão passiva e supervisão ativa.

Na supervisão passiva a iniciativa é do holon que necessita de alguma informação, e pode ser sem a presença (Figura 4.9a) ou com a presença (Figura 4.9b) de um holon supervisor (HS). Neste último caso observa-se que o holon supervisor (HS) pode possuir a informação disponível ou então requisitar esta ao holon operacional (HO). Denomina-se ao holon que solicita a informação de “requisitor”.

Figura 4.9. Supervisão passiva (a) sem a presença do HS e (b) com HS.

Na supervisão ativa (Figura 4.10), o holon “requisitor”, que pode ser um holon de estratégia (HE), um holon supervisor (HS) ou um holon operacional (HO), solicita a informação desejada (relacionada à ocorrência de um evento). Quando o evento ocorre, o holon “requisitor” é informado pelo holon operacional (HO) que está sob supervisão.

Figura 4.10. Exemplo de supervisão ativa.

x) Interação para o tratamento de falha

No tratamento de falha ocorrem as seguintes interações: i) interações entre os holons afetados para propagação da mensagem de falha; e ii) interações entre os holons operacionais (HOs) e os holons de estratégias (HEs) para realocação das ordens.

Conforme representado na Figura 4.11, o holon operacional (HO) que detecta a falha deve enviar mensagens ao holon supervisor (HS) que informa o problema aos outros holons que

fazem parte de seu domínio, ou seja, para os holons de níveis inferiores e para os de níveis superiores que segundo a estrutura hierárquica interagem com o holon supervisor (HS) envolvido. Os HE, HOs que receberam a mensagem de falha acionam o mecanismo do sistema de controle para o chaveamento da estrutura de controle do “modo estacionário” para o “modo transiente”. No “modo estacionário”, o sistema de controle é coordenado de forma hierárquica e os HOs seguem a coordenação do HS. No "modo transiente", os HOs assumem o controle (vide Figuras 3.1 e 3.3). Durante o “modo estacionário” os HOs interagem com os holons supervisores (HSs) e durante o "modo transiente", bem como, durante a execução de serviços ou comandos, os HEs interagem diretamente com os HOs. O fator de autonomia é alterado para “alto” durante a presença da falha no sistema. Quando a falha é removida, ou seja, quando a sua causa e suas conseqüências são sanadas, cada holon operacional (HO) reduz novamente seu fator de autonomia e retorna para a estrutura de controle hierárquica, entrando novamente no “modo estacionário”.

Figura 4.11. A propagação de mensagens e o chaveamento do modo de controle entre holons.

Após a identificação da falha, os holons acionam um processo de programação distribuída que consiste de uma re-alocação de ordens e que está indicado na Figura 4.12. Nesta interação de programação distribuída o holon de estratégia (HE) aloca as ordens nos holons operacionais (HOs) analisando as propostas recebidas, podendo fazer um dos seguintes procedimentos: 1) aceitar uma proposta e rejeitar outras, 2) aceitar uma parte das propostas e começar outra negociação para as outras partes restantes, e 3) rejeitar todas as propostas iniciando outras interações com novos parâmetros.

Figura 4.12. A programação distribuída durante o "modo transiente".

Quando ocorre uma falha os holons se organizam no "modo transiente", utilizando o mecanismo já descrito. No entanto, ocorre um problema se duas ações precisam ser executadas ao mesmo tempo por dois holons de estratégia (HE), isto requer uma negociação especial para introduzir novas ordens no lugar das previamente programadas.

Como cada ordem tem uma prioridade associada, o holon operacional (HO) leva esta informação em consideração. A ordem que tem maior prioridade precisa ser executada antes e o holon operacional (HO) tenta reprogramar, relaxando as ordens de menores prioridades, i.e., aquelas que podem ser atrasadas.

No caso de impossibilidade de atendimento às ordens, os holons operacionais (HOs) enviam

uma mensagem ao holon de estratégia (HE) indicando que estes têm que alocar novas ordens no mesmo intervalo temporal. No caso de impossibilidade de alocar as novas ordens, o holon de estratégia (HE) tem que negociar com outros holons de estratégia (HEs) que têm recursos aptos a executar as ações envolvidas.

Para convencer os holons de estratégia (HEs) a priorizar a nova ordem abrindo um intervalo temporal na agenda pré-programada, é utilizado o mecanismo de “recompensas” e “penalidades”, já descrito. No processo de negociação, ilustrado na Figura 4.13, o holon de estratégia (HE) pode “pagar” aos outros holons até o valor limite previsto da “penalidade” para a ordem que não completar na data devida, gerenciando assim o conflito. O holon de estratégia (HE) inicialmente envia uma mensagem de proposta a outro holon de estratégia (HE), requisitando a execução do comando prioritário e oferecendo uma recompensa. Cada um dos holons analisa a oferta e caso a recompensa supere a penalidade que o holon de estratégia (HE) terá que pagar pelo atraso, ele aceita caso contrário, ele a rejeita.

Figura 4.13. O processo de negociação durante o "modo transiente" entre holons.

No caso em que todos os holons de estratégias (HEs) rejeitam, o holon de estratégia (HE) responsável por alocar o comando prioritário, aumenta o valor da recompensa e faz outra oferta a todos os outros holons de estratégia (HEs). O holon de estratégia (HE) repete este procedimento até que um dos outros holons de estratégias (HEs) aceite a oferta ou até que a recompensa oferecida atinja o valor máximo, que é igual a penalidade a pagar no caso de atraso.

No caso em que um holon de estratégia (HE) aceita a oferta, ele notifica os seus holons operacionais (HOs) da diminuição da prioridade para liberar a execução. Em paralelo, o holon de estratégia (HE) responsável pela ordem prioritária, anuncia novamente esta ordem aos holons operacionais (HOs).

4.2. Etapa 2 - Modelagem

Após a especificação e documentação dos requisitos, nesta etapa desenvolve-se os modelos dos holons do sistema de controle do EI, utilizando-se as técnicas do PFS e da rede de Petri. Por questões de simplificação, atividades que envolvem uma única ação não são detalhadas nesta modelagem.

.

4.2.1. Sub-etapa 2.1 – Modelagem dos holons do subsistema (HSSs)

As atividades da “sub-etapa 2.1: modelagem dos HSSs” estão ilustradas no PFS da Figura 4.14 e envolve a seleção do serviço, o envio do conjunto de estratégia aos holons de estratégias e armazenagem dos dados relevantes após a execução. O holon do subsistema

(HSS) deve ser capaz de comandar simultaneamente vários serviços. A modelagem dos HSSs envolve definir as funções de controle de cada serviço oferecido pelos subsistemas do edifício inteligente e a especificação de como executar o modelo comportamental.

Figura 4.14. PFS e detalhamento em rede de Petri da “sub-etapa 2.1: modelagem dos HSSs”.

A atividade “seleciona serviço” envolve listar os serviços que serão fornecidos pelo HSS. A atividade “elabora planos” consiste na elaboração de planos para executar o serviço. A atividade “decompõe plano em estratégias”, envolve a decomposição da estratégia em uma lista de operações, obtenção da lista de precedências e da lista de requisitos de cada ordem.

A atividade “analisa ordens das estratégias”, compreende a análise dos recursos disponíveis para execução das operações da estratégia adotada, ou seja, quais os recursos que possuem as habilidades e requisitos necessários para execução de cada estratégia requerida.

A atividade “compila planos” envolve a reunião dos planos alternativos para posterior execução destas pelo holon de estratégia (HE).

A atividade “executa”, envolve a execução dos planos pelo holon de estratégia (HE) ao qual a partir desta atividade é o encarregado da execução de uma estratégia para fornecer o determinado serviço. Ao término da execução das atividades previstas o holon do subsistema (HSS) recebe as informações relevantes do holon de estratégia (HE).

4.2.2. Sub-etapa 2.2 - Modelagem dos holons de estratégias (HEs)

A estrutura das atividades da “sub-etapa 2.2: modelagem dos HEs” do holon de estratégia (HE) está descrito no PFS da Figura 4.15 e compreende principalmente as atividades “modelagem das estratégias” e “executa modelo comportamental”. A atividade “modelagem das estratégias” envolve a modelagem em PFS das várias estratégias necessárias para execução das funções de controle de cada subsistema do EI.

A atividade “elabora plano de alocação das novas ordens” aloca as ordens recebidas nos recursos disponíveis. A alocação começa com o anúncio, do holon de estratégia (HE) para o holon supervisor (HS) (que por sua vez informa aos holons operacionais envolvidos) das novas ordens aos recursos disponíveis, informando o objetivo desejado e os atributos requeridos para a execução da ordem. Estes atributos são, por exemplo, datas de início e de finalização, lista de requisitos e as precedências de cada ordem. Após o recebimento da

agenda do holon supervisor (HS), o holon de estratégia (HE) decide se a aceita ou não. Em caso de recusa uma nova interação é requerida e novos parâmetros devem ser definidos. Por exemplo, um usuário solicita que uma determinada temperatura deve ser mantida numa certa área, mas a capacidade de refrigeração não é suficiente, sendo necessário redefinir a faixa de temperatura solicitada.

A atividade “recebe propostas” compreende o recebimento das propostas originada nos holons operacionais (HOs), que podem ser aceitas, neste caso as ordens são alocados enviando uma mensagem ao holon operacional (HO) selecionado, ou rejeitadas, neste caso são definidos novos parâmetros para aquele comando. A atividade “recebe proposta” compreende o recebimento por um tempo determinado de propostas dos holons operacionais (HOs). Quando o tempo estiver transcorrido ou quando todas as propostas são recebidas inicia-se a atividade “valida proposta”. A atividade “valida proposta”, verifica o fundo do serviço, a localização, o MTBF e o desempenho do recurso (definido de acordo com o mecanismo de negociação), e o tempo de entrega proposto pelo holon operacional (HO).

A atividade “executa ordens” compreende o envio das ordens aos holons operacionais (HOs), a preparação e execução destas ordens, e o tratamento de falhas, no caso de ocorrência de falhas. A atividade “preparação para execução” envolve verificar as ações de preparação da fase de execução das ordens. Inicialmente é verificada a necessidade de algum tipo de atividade para inicialização, ou seja, se há dependência de que outra ordem tenha que ser realizada primeiro. Por exemplo, para liberar o acesso de pessoas a um determinado local deve-se verificar uma determinada base de dados ou entrar em contato com um responsável local solicitando autorização. Após esta verificação é informado ao holon operacional (HO) que a execução pode iniciar. O controle da execução das ordens passa então a ser do holon operacional (HO) que deve informar se a execução foi completada com sucesso ou se houve a

A atividade “supervisão da execução” compreende as ações para supervisão especificada na sub-etapa 1.3 sob o ponto de vista do holon de estratégia. A atividade “tratamento de falhas e reconfiguração” é modelada na sub-etapa 2.6.

4.2.3. Sub-etapa 2.3 – Modelagem dos holons supervisores (HSs)

O holon supervisor (HS) deve ter comportamento pró-ativo e reativo simultaneamente. Reativo enquanto aguarda requisições dos outros holons e pró-ativo gerando programações de tarefas otimizadas a serem executadas pelos holons de menor nível. A “sub-etapa 2.3: modelagem dos HSs” envolve a atividade “executar modelo comportamental” que está representada na Figura 4.16.

A função do holon supervisor (HS) envolve a elaboração de uma programação de tarefas e a coordenação de decisões para que estas tarefas sejam executadas. A atividade “programar” realiza a programação otimizada de tarefas. A atividade “agregar habilidades” envolve a formação de holarquias (estrutura de holons) de acordo com as habilidades de cada recurso visando a execução otimizada das tarefas, esta nova formação também é necessária na inclusão ou exclusão de recursos do sistema.

Os novos programas e as ordens alocadas que foram modificados devido à nova programação, são propostos pelo holon supervisor (HS) aos holons apropriados sob seu domínio de coordenação, como um anúncio. Em caso de aceite o holon supervisor (HS) propõe um calendário ao holon de estratégia (HE), caso contrário, ele reprograma as tarefas levando em consideração a rejeição.

Figura 4.16. PFS e detalhamento em rede de Petri da “su- etapa 2.3: modelagem dos HSs”.

A atividade “programar” está relacionada às ações associadas à supervisão da execução, tratamento de falha e novos anúncios de ordens.

A atividade “recebe anúncios” envolve a elaboração de planos otimizados para os holons operacionais (HOs) após recebimento de anúncios de ordens do holon de estratégia (HE), e os avisos dos holons operacionais (HOs) que podem aceitar ou recusar o plano. No caso de recusa, novos planos são elaborados pelo holon supervisor (HS). No caso de aceite as propostas são enviadas ao holon de estratégia (HE) que podem aceitar ou cancelar as propostas enviadas.

A atividade “supervisão da execução” envolve ações relacionadas aos mecanismos de supervisão ativa ou passiva, descritos anteriormente.

A atividade “tratamento de falhas” envolve ações relacionadas ao tratamento de falha e basicamente envolve a propagação da informação de falha aos holons operacionais (HOs) e supervisores (HSs), que estão ao alcance do holon supervisor (HS) que recebeu a informação de falha.

4.2.4. Sub-etapa 2.4 – Modelagem dos holons operacionais (HOs)

O holon operacional representa os recursos, tais como operadores, controladores de acesso e *chillers*, e gerencia o comportamento destes de acordo com seus objetivos, características e habilidades.

As atividades da “sub-etapa 2.4: modelagem dos holons operacionais (HOs)” estão representadas no PFS da Figura 4.17. Inicialmente, o holon operacional (HO) inicializa seus componentes, registrando suas habilidades e o programa de tarefas no holon supervisor (HS) ao qual está subordinado, de acordo com a arquitetura de controle.

Figura 4.17. PFS da “sub-etapa 2.4: modelagem dos HOs”.

Na presença de um anúncio de ordem, o holon operacional (HO) baseado em sua programação local, analisa sua disponibilidade para executar a tarefa como ilustrado na Figura 4.18. Esta análise compreende a verificação se o holon tem as habilidades requeridas para executar a ordem, e se tem a capacidade de executar a ordem atendendo o tempo de entrega e requisitos especificados.

Figura 4.18. Modelo da atividade “recebe anúncio” em PFS do holon operacional (HO).

Se os requisitos estão definidos de forma incompleta ou se não tem capacidade o holon recusa o anúncio enviado. Em caso de disponibilidade o holon operacional (HO) calcula o fundo do serviço para executar o comando incluindo na proposta e informando ao holon de estratégia

(HE).

Quando um holon operacional (HO) recebe uma proposta ele a aceita ou não, de acordo com seu grau de autonomia e a capacidade atual de sua agenda. A atividade “recebe proposta” representa o comportamento do holon quando recebe uma mensagem, conforme descrito no modelo da Figura 4.19. A proposta para a execução pode ser uma de três tipos: 1) uma requisição para uma operação, 2) uma permissão relacionada à propostas anteriores enviados pelo holon operacional (HO), que requer a reprogramação da agenda atual, e 3) uma proposta enviada pelo holon supervisor (HS).

Figura 4.19. Detalhamento da atividade “recebe proposta” em rede de Petri do holon operacional (HO).

A atividade “preparação para execução” é representada na Figura 4.20 e envolve a preparação da máquina para iniciar a execução de um serviço onde, se for preciso, é solicitado um *set-up* ao holon operacional (HO) que é responsável por esta função. Esta atividade também envolve a execução de atividades auxiliares de pré-execução. Algumas nomenclaturas de possíveis situações foram simplificadas e estão explicadas na legenda abaixo do modelo.

Figura 4.20. Detalhamento da atividade “preparação para execução” em rede de Petri do holon operacional (HO).

Após a fase de preparação a ordem é executada o que compreende a atividade “execução” que é representada em detalhe na Figura 4.21. Quando todos os serviços são executados a ordem é finalizada retornando ao estado onde fica aguardando para executar outro comando.

Figura 4.21. Detalhamento da atividade “execução” em rede de Petri do holon operacional (HO).

A atividade “supervisão da execução” envolve os mecanismos de supervisão passiva e ativa descritos anteriormente e está ilustrada na Figura 4.22.

Figura 4.22. Detalhamento da atividade “supervisão da execução” em rede de Petri do holon operacional (HO).

A modelagem da atividade “tratamento de falhas” é apresentada na sub-etapa 2.6.

4.2.5. Sub-etapa 2.5 - Modelagem do objeto de controle

Para detalhamento do comportamento dinâmico do sistema, representa-se o funcionamento de cada um dos componentes do objeto de controle. Para representar cada um dos componentes do objeto de controle em rede de Petri estendida considera-se o seu possível conjunto de estados (definido na sub-etapa 1.1) e as condições necessárias para as mudanças de estados (definido na sub-etapa 1.2).

Para modelar um componente do objeto de controle com o requisito de tolerância à falhas

considera-se tanto seu possível conjunto de estados em operação normal, bem como os processos sob efeitos de falhas e as condições necessárias para mudanças de estado. A influência do hardware da solução de controle também pode ser modelada considerando os estados (normal e sob falhas) dos dispositivos de atuação em conjunto com os estados (disponível ou indisponível) dos outros dispositivos de controle. Um exemplo de modelo de dispositivo de atuação é apresentado na Figura 4.23.

Figura 4.23. Modelo em rede de Petri estendida do componente válvula e de seu controlador local.

4.2.6. Sub-etapa 2.6 - Modelagem para FTCS do EI

A ocorrência de falha precisa ser representada nos modelos dos holons operacionais (HOs) e de estratégias (HEs). Assim, nesta fase é feita a modelagem destes HOs e HEs, bem como a modelagem dos mecanismos diagnosticador e decisor.

Modelagem dos mecanismos diagnosticador e decisor

Para a modelagem em rede de Petri estendida do diagnosticador tem-se os seguintes passos :

- construção dos modelos a eventos discretos para os diversos componentes do objeto de

controle (desenvolvidos na sub-etapa 2.5);

- construção dos modelos em rede de Petri das estratégias controle (desenvolvidos na sub- etapa 2.2);
- definição dos eventos observáveis, em geral são aqueles relacionados aos comandos da estratégia de controle, e os eventos não-observáveis, em geral relacionados a eventos de falhas;
- construção dos modelos em rede de Petri estendida dos sensores (conforme sub-etapa 2.5);
- iniciar a construção do diagnosticador a partir do estado inicial NORMAL;
- relacionar, através de transições e arcos habilitadores, as estratégias executadas com os possíveis eventos observáveis e não-observáveis que podem ocorrer a partir do estado inicial;
- e
- relacionar os estados obtidos com os estados dos sensores.

Para ilustrar este procedimento, na Figura 4.24a apresenta-se um sistema formado por um atuador e um sensor, além da estratégia de controle adotada. Neste caso, o atuador possui três estados possíveis, sendo dois estados normais (fechado e aberto) e um não observável (estado em falha fechado), e o sensor indica quando o atuador está aberto ou fechado. Após modelar os objetos de controle e a estratégia de controle, faz-se a modelagem do diagnosticador (Figura 4.24b) que envolve relacionar, os estados que podem ser obtidos após a execução de comandos da estratégia de controle (C1 e C2). Em seguida estes estados possíveis devem ser correlacionados com os estados dos sensores. Assim, conforme relacionado na Tabela 4.2, tem-se os seguintes eventos e estados:

a) após execução do comando C1:

- se ocorreu o evento “a” tem-se estado normal ABERTO e o sensor acusa ABERTO; e
- se ocorreu o evento “ φ ” tem-se estado em falha F1 e sensor acusa FECHADO;

b) após execução do comando C2:

- se ocorreu o evento “b” tem-se estado normal FECHADO e sensor acusa FECHADO; e
- se ocorreu o evento “ φ ” tem-se estado em falha F1 e sensor acusa FECHADO.

Tabela 4.2. Mapeamento dos eventos para o exemplo do diagnosticador.

Comandos	Eventos	Estado	Sensor
C1	a	2N - ABERTO	ABERTO
	φ	4F1 - FALHA	FECHADO
C2	b	3N - FECHADO	FECHADO
	φ	5F1 - FALHA	

Para a fase de decisão define-se regras do tipo “se ... *então*...”. Se o diagnosticador não indicar um estado correto deve-se inferir as possíveis causas para as falhas, para resolver possíveis conflitos. Este mecanismo de decisão é chamado aqui de decisor. Estas regras de decisão podem se basear em dados probabilísticos, alguma relação lógica ou em outras formas, de acordo com a conveniência, para inferir qual o estado real do sistema.

Na Figura 4.24c, tem-se o modelo do decisor em rede de Petri estendida. Neste decisor se o sistema executou a estratégia C1, é possível definir qual o estado real do sistema mesmo que tenha ocorrido o evento não-observável φ , i.e., basta verificar o estado do sensor. Entretanto, se o sistema executou a estratégia C2, não é possível saber o estado real pois pode ter acontecido o evento não-observável φ , e para os dois casos o sensor acusa FECHADO. Nos casos em que o sistema não tem habilidade em diagnosticar a falha, deve-se prever outras soluções para decisão. Neste exemplo, o sistema só teria condições de descobrir a falha após a execução da estratégia C1 e verificando o estado do sensor. Para casos deste tipo em que se deseja o diagnóstico de uma situação anormal, uma alternativa é a inclusão de mais sensores no sistema.

(a)

(b)

(c)

Figura 4.24. Modelagem em rede de Petri estendida de a) estratégia e objeto de controle, mecanismos b) diagnosticador e c) decisor.

Modelagem dos holon de estratégia (HEs) para FTCS (HEs-FTCS)

O comportamento do holon de estratégia (HE) na reação à falhas é regulado de acordo com o tipo de falha, como ilustrado na Figura 4.25. Tem-se aqui a atividade “tratamento de falhas e reconfiguração” e dependendo da reação à falha o sistema executa outras atividades relacionadas ao tratamento da falha. A atividade “preparação para reconfiguração” e “reconfiguração” envolve ações idênticas a atividade “preparação para execução” e “execução”, respectivamente, modeladas na sub-etapa 2.2, a diferença aqui é que o sistema está em "modo transiente".

Figura 4.25. Modelo da atividade “tratamento de falhas” em PFS do ponto de vista do HE.

Após o diagnóstico o holon reage conforme o tipo de falha. Identifica-se os tipos de falhas que estão presentes na maioria dos sistemas de controle de edifícios inteligentes como: “ordens atrasadas”, “atuador quebrado”, “sensor quebrado”, “queda de desempenho”, “falha no controle da rede (de comunicação)” etc. No entanto, de acordo com o edifício em estudo, outras estratégias de reação devem ser consideradas.

Quando os sintomas detectados não permitem qualquer conclusão ou quando o componente afetado pela falha não é reparável, o holon que está executando este caso, requisita

intervenção externa através da atividade “requer intervenção externa”, informando isto ao holon que representa a equipe de manutenção.

Uma falha que pode ocorrer é o atraso na execução das ordens. A ordem em espera para execução é removida do programa local somente se o holon de estratégia (HE) não aceitar o atraso. No caso de recusa e, se a ordem já está em execução, as ordens posteriores devem ser reprogramadas. O modelo do holon de estratégia (HE) para ordens atrasadas está representado na Figura 4.26.

Figura 4.26. Detalhamento a atividade “ordens atrasadas” em rede de Petri do ponto de vista do holon de estratégia (HE).

A atividade “atuador quebrado”, ilustrada na Figura 4.27a, envolve ações relacionadas à ocorrência de falhas de um dispositivo de atuação. É necessário cancelar todas as ordens programadas durante o tempo estimado de recuperação do atuador. Na Figura 4.27b está ilustrado a atividade “sensor quebrado” que envolve a verificação de outras variáveis que possam atestar a situação local. Por exemplo, se um detector de fumaça do sistema de combate ao fogo está comprovadamente quebrado, uma forma de monitorar a área é através da variável temperatura que pode estar disponível pelo sensor de temperatura do HVAC.

Figura 4.27. Detalhamento das atividades a) “atuador quebrado” e b) “sensor quebrado”, em rede de Petri do ponto de vista do holon de estratégia (HE).

A atividade “falha no controle da rede”, apresentada na Figura 4.28, envolve as ações relacionadas ao tratamento de falhas na rede de comunicações. Estas ações são: i) verificar as rotas alternativas e o tempo médio entre falhas de cada rota (MTBF); ii) verificar outras estratégias e o tempo de reconfiguração e MFTBF para cada estratégia; e iii) decidir com base na ordem em execução qual a melhor estratégia.

Figura 4.28. Modelo da atividade “falha no controle de rede” em PFS do ponto de vista do holon de estratégia.

A atividade “queda de desempenho”, ilustrada na Figura 4.29, envolve ações relacionadas à queda de desempenho de alguma função do sistema de controle. Neste caso é necessário verificar se esta queda é tolerável e se não for, o sistema deve verificar recursos que podem auxiliar a conseguir o objetivo programado. Por exemplo, para o caso de uma queda de

desempenho do condicionamento de ar de um edifício inteligente, pode-se ligar ventiladores de teto para evitar maior degradação das condições ambientais.

Figura 4.29. Detalhamento da atividade “queda de desempenho” em rede de Petri do ponto de vista do holon de estratégia (HE).

Após a reação típica de cada falha o holon de estratégia (HE) inicia a atividade “programação distribuída”, ilustrada na Figura 4.30, que envolve negociações diretas entre holon de estratégia (HE) e holons operacionais (HOs).

Figura 4.30. Detalhamento da atividade “programação distribuída” em rede de Petri do ponto de vista do holon de estratégia (HE).

Durante a atividade “negociação para a reconfiguração” o holon de estratégia (HE) reprograma as ordens que retornaram dos holons operacionais (HOs) durante o tempo de recuperação da falha, conforme ilustrado na Figura 4.31.

Figura 4.31. Detalhamento da atividade “negociação para a reconfiguração” em rede de Petri do ponto de vista do holon de estratégia (HE).

A atividade “negociar prioridade”, ilustrada na Figura 4.32, envolve ações relacionadas à abertura de janelas temporais através do mecanismo de negociação de prioridades, já descrito.

Figura 4.32. Detalhamento da atividade “negociar prioridade” em rede de Petri do ponto de vista do holon de estratégia (HE).

A atividade “chaveamento do modo de controle”, ilustrada na Figura 4.33, envolve a mudança da estrutura do sistema de controle, aumentando o fator de autonomia na presença de falhas ou enquanto não transcorreu o tempo de estimação de recuperação.

Figura 4.33. Modelo da atividade “chaveamento do modo de controle” em PFS e rede de Petri estendida do holon de estratégia (HE).

Modelagem dos holons operacionais (HOs) para FTCS HOs-FTCS

Na Figura 4.34 é apresentada a atividade “tratamento de falhas” sob o ponto de vista do holon operacional (HO).

Figura 4.34. Modelo da atividade “tratamento de falhas” em PFS sob o ponto de vista do holon operacional (HO).

No caso de uma falha, o holon operacional (HO) executa um diagnóstico utilizando o mecanismo diagnosticador apresentado no passo (vi) do procedimento. A partir do diagnóstico uma de duas atividades é ativada: ou a atividade se “recupera localmente” e, neste caso o próprio holon operacional (HO) se encarrega de resolver o caso, ou a atividade “requer reorganização”, que envolve atividades de otimização do sistema como um todo. A atividade

“requer reorganização” envolve a propagação do pedido de reorganização no "modo transiente" informando isto ao holon supervisor (HS), ao qual o holon operacional (HO) está subordinado.

A atividade “chaveamento do modo de controle” segue as mesmas especificações do holon de estratégia e a atividade “preparação e reconfiguração” segue as especificações da atividade “preparação e execução”. Durante o chaveamento ocorre aumento do fator de autonomia e a organização em uma estrutura heterárquica. O holon operacional (HO) aguarda o restabelecimento do tempo, sendo capaz de executar outras ordens. Quando o tempo para restabelecimento é finalizado, o holon operacional (HO) verifica se a falha já se dissipou, se não, o holon operacional (HO) fica em "modo transiente" durante um tempo adicional. Quando a falha já se dissipou o holon operacional (HO) pode retornar a estrutura de controle anterior reduzindo seu fator de autonomia.

4.3. Etapa 3 - Análise/ Simulação

Para a validação do sistema de controle resultante da aplicação do procedimento proposto considera-se a análise de determinados cenários e situações baseada em simulação de modelos dos processos no EI.

Os parâmetros para analisar a efetividade do sistema de controle de EI envolvem: a flexibilidade, a reconfigurabilidade, a robustez e a agilidade, mas estes parâmetros são difíceis de avaliar por apresentarem certo grau de subjetividade em sua análise.

A flexibilidade neste caso está relacionada à capacidade do sistema de controle suportar uma

re-organização interna no caso de mau funcionamento de alguns recursos e de mudanças de demanda. A reconfigurabilidade do sistema de controle é a habilidade de suportar diferentes configurações do sistema, pela adição ou remoção de equipamentos, ou seja, diferentes configurações com um custo mínimo de esforço. Isto está considerado na própria estrutura do procedimento e construção dos modelos.

Uma medida de robustez pode ser a forma como o sistema de controle reage a possíveis entradas errôneas ou fatores ambientais que afetam o sistema. O ideal seria testar todos os possíveis erros, mas na realidade não é possível testar todos os erros que podem ocorrer no sistema. Neste trabalho, o procedimento para medir a robustez compreende a introdução de possíveis falhas e a análise de como deve ser a reação do sistema de controle.

Destaca-se aqui que a rede de Petri foi adotada no procedimento proposto para descrever tanto a estrutura como as funcionalidades do sistema de controle. Assim, a análise do sistema é efetuado sobre os respectivos modelos, isto é, as propriedades estruturais e comportamentais da rede de Petri que dependem apenas da estrutura do grafo são exploradas para identificar por exemplo invariantes de lugares e invariantes de transições que caracterizam certos comportamentos do sistema de controle. Além disso existem também propriedades da rede de Petri que dependem da marcação inicial, como vivacidade, re-iniciabilidade, alcançabilidade e limitação no número de marcas. Estas propriedades caracterizam aspectos funcionais do sistema de controle. Desta forma, estas análises permitem verificar e validar o sistema de controle face as suas especificações.

Na análise das funcionalidades do sistema utiliza-se a simulação que também é uma ferramenta fundamental para adquirir maior conhecimento e implementar melhorias sobre o

modelo e o respectivo sistema de controle.

No presente trabalho, a edição, simulação e validação dos modelos em rede de Petri são feitos utilizando o *software* (ANSCHUETZ, 2006). Este *software* é uma ferramenta para simulação de rede de Petri que apresenta uma interface relativamente intuitiva e de fácil utilização e suporta redes de Petri com transições temporizadas e arcos habilitadores e inibidores. A análise qualitativa é baseada na simulação de eventos discretos e na análise estrutural na matriz de representação da rede de Petri. A análise quantitativa é realizada por meio da simulação de rede de Petri com as transições temporizadas.

A maior parte da análise por simulação é realizada para estudos de desempenho. Assim, o comportamento do modelo em diferentes cenários pode ser examinado executando-os com entradas consistentes (CARDOSO & VALETTE, 1997). É possível verificar propriedades investigadas nos modelos como *deadlock*, estabilidade de seu comportamento dinâmico, e existência de certos estados.

Segundo VILLANI (2004) hipóteses são criadas para simulação e análise, tendo como base o conhecimento do sistema modelado (isto é, conhecimento da interpretação do modelo). Junto com estas hipóteses, deve-se definir as restrições, que delimitam os casos onde espera-se que a hipótese seja verdadeira. A análise do modelo: inicia-se com a busca de situações onde se determinam os cenários relativos à evolução do modelo nas condições definidas pela hipótese. Em seguida simula-se o modelo e faz-se a verificação se todas as propriedades consideradas são satisfeitas baseadas na simulação destes cenários.

Na Figura 4.35 é mostrado como exemplo o modelo da atividade “preparação para execução”

do holon operacional (HO) editado no *software* HPSim.

Figura 4.35. Modelo do holon operacional (HO) em rede de Petri no *software* HPSim.

4.3.1. Sub-etapa 3.1 -análise qualitativa

A análise qualitativa permite a verificação de propriedades estruturais e comportamentais dos modelos, extraindo conclusões sobre a operação do sistema tais como: 1) vivacidade, significa que a rede nunca entra em *deadlock* e que não existem estados que nunca podem ser atingidos na rede, 2) re-iniciabilidade, significa que a rede volta ao estado inicial, 3) conservação e limitação, significa que não se tem algum tipo de controle sobre o número de marcas da rede, e 4) invariantes de lugar e invariantes de transição, que são constantes derivadas diretamente da estrutura da rede e não dependem da sua marcação inicial.

Como os modelos são criados usando uma representação *top-down*, isto é, pelo refinamento dos modelos em PFS, analisa-se as propriedades de cada bloco de sub-rede que compõe uma atividade ou macro-atividade. Assim, com os procedimentos estabelecidos para o desenvolvimento do PFS, a composição dos modelos de atividades em rede de Petri preserva suas propriedades de acordo com VALLETE (1979).

4.3.2. Sub-etapa 3.2 - análise quantitativa

A análise qualitativa garante que o modelo está correto do ponto de vista funcional. Neste caso, o próximo passo é usar os mesmos modelos, mas agora com o parâmetro tempo associado às transições para representar o comportamento dinâmico do sistema.

A análise quantitativa ou de desempenho requer a introdução do parâmetro tempo associado às transições. Para este propósito, tempos de distribuição determinística (temporizações) devem ser associados a cada transição. Associando condições para disparo e temporizações é possível verificar nos resultados fornecidos no HPSim se o disparo está coerente com as especificações dos modelos.

4.4. Etapa 4: Implementação

As análises anteriores permitem validar a correção e as especificações de cada evento, atividade e macro-atividade. O sucesso da fase de implementação depende de como foram conduzidos os passos anteriores. Explorando assim uma das características mais relevantes da rede de Petri do ponto de vista de controle, tem-se que a partir dos modelos desenvolvidos

pode-se derivar de um modo relativamente simples a especificação dos programas que deverão ser executados, por exemplo, em CPs (controladores programáveis) e computadores de um sistema supervisório. Isto é, o modelo em rede de Petri pode ser interpretado diretamente como a especificação de uma estratégia de controle e assim a implementação desta solução é baseada em controladores que fazem com que o objeto de controle se comporte exatamente como o modelo em rede de Petri.

De qualquer modo como esta etapa envolve informações técnicas específicas de dispositivos disponíveis no mercado e do caso prático considerado esta não é aprofundada neste trabalho cujo foco está na parte de projeto do sistema de controle de EI.

4.5 Síntese do capítulo

Este capítulo apresenta um procedimento para modelagem de sistemas de controle de edifícios inteligentes (EIs) considerando a ocorrência de falhas. A abordagem para construção de modelos é baseada em holons e na implementação de sistema de controle através de modelos em rede de Petri onde são incluídos os requisitos de FTCSs (*faults tolerance control systems*), com foco na reconfiguração de sistemas. A técnica de refinamento do PFS (*production flow schema*) é utilizada facilitando o desenvolvimento dos modelos e no *workflow* do próprio procedimento.

5. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Neste capítulo apresenta-se um exemplo de aplicação do procedimento proposto ao edifício *Accenture* (BUILDINGS, 2008), (SOUZA, 2004), ocupado pela empresa de mesmo nome (ACCENTURE, 2008) e localizado em São Paulo, SP. Este edifício não é considerado um EI, pois, adota alguns conceitos de automatização de forma isolada e os subsistemas não estão todos integrados. No entanto, é um caso representativo de prédio comercial atendendo o objetivo traçado para esta aplicação, que é buscar soluções de efetiva integração dos sistemas prediais envolvidos aumentando seu grau de proteção contra falhas com o uso da reconfiguração. Na sequência são apresentadas a aplicação de todas as etapas do procedimento proposto e descrito no capítulo anterior.

5.1 - Etapa 1 – Análise de requisitos

O sistema de controle baseado em holons deve controlar o edifício, otimizar planos de serviço, aceitar as solicitações de usuários, executar o serviço solicitado, cooperar com os holons para atingir objetivos, prover informações sobre recursos, iniciar as ordens de execução, cancelar ordens, e reconfigurar o sistema quando necessário. Para atingir o objetivo traçado são considerados equipamentos adicionais na definição dos subsistemas no prédio *Accenture*.

5.1.1 Sub-etapa 1.1- Identificação dos holons

i) Identificação dos holons do subsistema (HSSs)

O prédio comercial *Accenture* tem cinco andares e está representado na Figura 5.1a, sendo:

- sub-solo (G1) para estacionamento e onde se localiza o sistema supervisorio;
- três andares (0 a 2) distribuídos da seguinte forma: andar 0 – térreo contendo recepção, andar (1) e (2) para salas/ escritório; e
- terraço (3) que contém equipamentos e máquinas do edifício como a torre de resfriamento.

Os seguintes subsistemas e respectivos holons dos subsistemas (HSSs), conforme ilustrado na Figura 5.1b, são considerados:

- HSS de conforto térmico** representando o subsistema HVAC (aquecimento, ventilação e condicionamento do ar);
- HSS de segurança de acesso** representando o subsistema de segurança patrimonial, pessoal e controle de acesso;
- HSS de segurança contra o fogo** representando o subsistema de combate e prevenção ao fogo;
- HSS de movimentação** representando o subsistema de transporte/movimentação de pessoas; e
- HSS de segurança de transmissão de sinais** representando o subsistema de controle da malha de transmissão de sinais de controle.

(a)

(b)

Figura 5.1. a) Prédio do edifício *Accenture* (adaptado de SOUZA, 2004) e b) HSSs definidos para estudo.

Define-se a seguir para cada holon do subsistema (HSS): as operações envolvidas e suas relações, o conjunto de requisitos e, as características que os recursos envolvidos precisam ter para poderem executar estas operações. Para que o sistema seja tolerante a falhas de componentes, é considerado algum tipo de redundância na definição dos subsistemas.

HSS de conforto térmico

O subsistema HVAC é representado pelo HSS de conforto térmico. Assume-se que um dos objetivos do EI é proporcionar conforto térmico a seus ocupantes e que o principal responsável por isso é o subsistema HVAC. Este conforto térmico é assim função do controle de subsistemas de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar. Conforme apresentado no diagrama estrutural esquematizado na Figura 5.2a, divide-se este subsistema em três

holarquias: produção de frio, produção de calor e condicionamento de ar. Para cada uma apresenta-se a lista de equipamentos envolvidos:

- produção de frio: envolve duas torres, dois *chillers*, quatro bombas, duas válvulas de bloqueio e um fluxômetro (F), que têm como função fornecer água gelada para o trocador de calor da unidade de condicionamento de ar.
- produção de calor: envolve dois aquecedores a vapor, quatro bombas, duas válvulas, um fluxômetro (F), que têm como função fornecer água quente para o trocador de calor da unidade de condicionamento de ar.
- unidade de condicionamento de ar (UCA): envolve o trocador de calor, a caixa de mistura e os ventiladores de insuflamento e de retorno. O trocador de calor é formado pelas serpentinas de resfriamento e de aquecimento, válvulas de serpentina de aquecimento e de resfriamento. A caixa de mistura é formada por *dampers* de entrada, de saída e interno, e garante a renovação do ar.

Os dutos de insuflamento são conectados diretamente ao ambiente sob condicionamento, porém para o condicionamento de ambientes independentes em que deseja-se temperaturas diferentes utiliza-se a caixa de volume de ar variável (VAV). Esta caixa regula o fluxo de ar diferentemente para cada ambiente, garantindo um ajuste de temperatura individual para cada sala. Além disso, proporciona economia de energia, pois permitem que os *dampers*, em geral, funcionem em posições próximas a totalmente aberta o que dissipa menor energia. A Figura 5.2b ilustra um diagrama de uma caixa VAV. O atuador proporcional regula a vazão de ar nos ambientes sob condicionamento abrindo ou fechando a passagem de ar.

Figura 5.2. (a) Diagrama estrutural de um HVAC e (b) de uma caixa VAV.

Considera-se neste subsistema a existência de zonas, ou seja, regiões em que se divide a distribuição de ar condicionado. Neste caso, considera-se uma zona por andar, sendo que alguns andares têm prioridade em relação a outros, e alguns ambientes possuem ventiladores de teto para auxiliar a ventilação. Considera-se também a presença de caixas VAVs para atuar na vazão de ar de cada ambiente, sensores de vazão de ar e de sensores de temperatura. Os dispositivos de controle estão distribuídos conforme a relação apresentada na Tabela 5.1. No

térreo (G1) e terraço (andar 3) não se tem o condicionamento de ar.

Tabela 5.1. Lista de dispositivos do subsistema HVAC.

Andar	Zonas	Equipamentos				
		UCAs	VAVs	Sensores de vazão	Sensores de temperatura	Painel de controle do andar
G1	1	Sistema de controle supervisão do prédio todo.				
0	1	2	8	8	8	1
1	1	4	19	19	19	1
2	1	2	8	8	8	1
3	1	Equipamentos da parte de produção de frio e da produção de calor, painel de controle e interfaces para operação.				

HSS de segurança de acesso:

O edifício *Accenture* possui um subsistema de segurança patrimonial, pessoal e de controle de acesso. Este subsistema é representado aqui pelo HSS da segurança de acesso. O subsistema envolve identificação para visitantes na recepção, catracas de acesso individual sendo duas na recepção e uma para cada andar, tem-se catracas para veículos no estacionamento e câmeras que registram o movimento de entrada e saída de carros. Uma interface gráfica pode mostrar em várias telas o itinerário de uma pessoa na empresa. Os elevadores e escadas do estacionamento levam os usuários somente para a recepção. As portas das escadas são travadas para uso somente emergencial. As funções deste subsistema são:

- identificação de usuários regulares: todos os usuários possuem crachás de identificação magnéticos que liberam catracas de acesso a entrada do edifício e que contém a identificação para liberação a áreas restritas do andar. É possível com esta identificação o controle de frequência dos funcionários;
- identificação de visitantes: ao se apresentar na recepção do edifício o visitante é fotografado e um documento seu é digitalizado. É emitida uma etiqueta adesiva com a foto e os dados do visitante, que deve ser fixada em um crachá cuja tarja magnética é registrada no computador

do controle;

- localização de pessoas: o crachá é especialmente desenvolvido para a emissão de sinais para localização das pessoas;
- controle de acesso de veículos: todos os visitantes que entram de carro recebem cartões e registra-se o horário e a data do acesso ao estacionamento. Os condôminos possuem cartões de acesso definitivo que permitem também o acesso ao andar, os visitantes devem se dirigir à recepção para identificação;
- controle por imagem: através de um sistema de circuito fechado de televisão. Este sistema pode movimentar câmeras quando percebe qualquer problema em áreas determinadas pelo usuário, realizando uma gravação contínua para análise posterior; e
- controle de acessórios: com o uso de etiquetas que permitem ao sistema verificar se o usuário possui a permissão para transportar acessórios como um laptop.

Na Tabela 5.2 apresenta a distribuição por andar dos dispositivos de controle deste subsistema.

Tabela5.2. Lista de dispositivos do subsistema de segurança de acesso.

Andar	Equipamentos				
	Catraca de carro	portas de escadas	câmeras	catracas de acesso	sensor de presença
G1	1	1	4	0	8
0	0	1	21	1	42
1	0	1	24	1	48
2	0	1	16	1	32
3	0	1	4	1	8

HSS segurança contra o fogo

Este HSS representa o subsistema de combate e prevenção ao fogo e possui capacidade de funcionamento mantido por baterias em caso de emergência, além disso, deve funcionar de

forma autônoma mesmo na falta de comunicação com o sistema central de gerenciamento do edifício e em caso de eventos que possam causar incêndio. As funções deste subsistema são:

- alertar usuários e funcionários do edifício sobre situações de incêndio;
- supervisionar níveis do tanque de armazenagem de água para as mangueiras e *sprinklers*;
- solicitar ao subsistema de controle de energia para desenergização do setor afetado pelo incêndio;
- solicitar ao subsistema de transporte/movimentação de pessoas o deslocamento dos elevadores até o térreo, o desligamento dos elevadores e disponibilização de um elevador para serviço independente, para eventual evacuação com auxílio dos bombeiros;
- solicitar ao subsistema de controle de acesso a liberação de acesso dos bombeiros; e
- orientar e conduzir usuários em caso de necessidade de fuga em função da posição destas no edifício.

Para prevenção e combate ao fogo utiliza-se de sensores de temperatura, sensores de fumaça, acionadores manuais posicionados em locais estratégicos para disparo de alarme, bombas que de forma automática mantém pressurizados a linha de água, gabinetes com mangueiras, *sprinklers* e sensores de vazão de água, conforme relacionados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Lista de dispositivos do subsistema de combate e prevenção a incêndio.

Andar	Equipamentos				
	Gabinetes	Acionadores manuais	<i>Sprinklers</i>	Sensores de fumaça	Sensores de vazão
G1	1	2	8	8	8
0	1	11	42	42	42
1	1	12	48	48	48
2	1	4	8	8	8
3	1	1	4	4	4

HSS de movimentação

Este HSS representa o subsistema de transporte/movimentação de pessoas que tem como objetivo oferecer aos usuários um transporte vertical com conforto, segurança e rapidez além de prover serviços integrados com outros subsistemas. Este estudo considera o uso com “controle de grupo” em que dois ou mais elevadores operam em conjunto. Este controle além de atender as solicitações normais, seleciona através de estratégias qual é o elevador que de maneira eficiente e de acordo com a utilização atende as chamadas dos andares. Prevê-se o atendimento a situações de “*rush*” e chamadas prioritárias. Considera-se o uso de botoeiras nos andares para o caso de falha no subsistema de controle de acesso.

O subsistema possui dispositivo eletromecânico que é acionado em situações de falta de energia elétrica e que é encarregado de fazer descer (mediante entrada em operação do gerador de energia de emergência) os elevadores (um de cada vez, para evitar sobrecarga de energia gerada) até o pavimento térreo e ali abrir as portas e este elevador travado neste estado. As cabines dos elevadores contam com chaves para que funcionários autorizados possam deixar o elevador em serviço independente, ou seja, retirar o elevador do controle de grupo. Este subsistema é formado por três elevadores que atuam conforme descrito na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Definição do tipo de elevadores, uso e andares.

Grupo	No	Lotação (no de pessoas e peso em kg)	Uso	Andares atendidos
A	1	20 e 1400	público geral	andares pares
	2	20 e 1400	público geral	andares ímpares
B	3	3000 kg	serviço e manutenção	todos os andares

HSS de segurança de transmissões de sinais

Uma importante característica de sistemas de controle de EIs baseado em holons é que deve-

se ter uma capacidade relativamente grande de troca de informações entre os controladores para coordenar suas ações e manter atualizado a informação do estado do sistema. Essa troca de informação é realizada pelo subsistema de controle da malha de transmissão de sinais, que é representado por este HSS, que envolve a conexão dos controladores, roteadores e outros computadores capazes de transmitir e receber informações digitais. Falhas nesta malha de comunicação podem impedir a execução das tarefas, inibir a troca de informações e corromper dados podendo gerar perturbações ou até mesmo a ausência de ações de controle.

Este subsistema só pode ser completamente especificado após a definição dos outros subsistemas e de todos os dispositivos que devem ser conectados, no entanto uma análise preliminar de um caso relevante pode ser aqui considerado. Na Figura 5.3a tem-se um caso com dois *hosts* (H5 e H6) que estão tentando se comunicar através de quatro outros *hosts* (H1, H2, H3 e H4). A rede de comunicação considerada neste exemplo é do tipo par-a-par e consiste de *hosts* fisicamente conectados. Para evitar interrupções, caminhos redundantes entre os controladores são considerados.

Para facilitar o gerenciamento, divide-se a rede de comunicação em duas holarquias: Rede_1 e Rede_2 que contêm os *hosts* (H1, H2) e (H3, H4) respectivamente. Para evitar interrupções, caminhos redundantes entre os controladores (H5 e H6) são considerados. A rede lógica é composta por nós lógicos⁷ conectados através de *links* lógicos instalados nos *hosts* gerenciados. Assim, os nós {N1, N2, N3, N4} são conectados através dos *links* {a, b, c, d, e, f, g} como ilustrado na Figura 5.3b. Estes nós e *links* oferecem diferentes possibilidade de caminho para estabelecer a comunicação entre os nós clientes (H5 e H6).

⁷ nós e *links* lógicos correspondem a recursos computacionais sob ponto de vista da aplicação que auxiliam o controle da rede de comunicação (PORTUGAL, 2005)

Figura 5.3. Exemplo de rede do tipo par-a-par: a) conexão física e b) conexão lógica.

ii) Identificação dos holons de estratégias (HEs)

Para definir os HEs considera-se aqui as principais estratégias para cada subsistema do prédio. As estratégias por sua vez são baseadas na especificação e no detalhamento das funções e do fluxo de controle. Na sequência as funções de controle de cada subsistema são descritas. Conforme previsto no procedimento, a modelagem destas estratégias é feita na sub-etapa 2.2. Aqui é apresentado uma descrição de cada estratégia.

HEs de conforto térmico

Divide-se as estratégias de acordo em funções operacionais, de modo de operação, de tratamento de falhas, de combate e prevenção a incêndio.

As funções operacionais envolvem as estratégias de “condicionamento de ar”, “área utilizada”, “área não-utilizada”, “pré-condicionamento”, “aciona VAV”. Na estratégia “condicionamento de ar para zona 01” (que é idêntica às estratégias de condicionamento das demais zonas) tem-se as principais ações que garantem o condicionamento de ar nos vários ambientes do prédio. Envolve por exemplo a atividade “renovação do ar” que pode ser feita de três formas na caixa de mistura, sendo: “renovação 0%”, “renovação 50%” e “renovação 100%”, esta forma de “renovação 100%” é realizada abrindo os *dampers* de entrada e de saída do ar externo e fechando o *damper* interno. A atividade “produção de água gelada” pode ser feita no subsistema de frio principal ou no subsistema de frio auxiliar ou em ambos. No subsistema principal pode ser feito o bombeamento pela bomba A ou pela bomba B, e a distribuição de água gelada pela válvula 1, no subsistema auxiliar pode ser feito o bombeamento pela bomba C ou pela bomba D, e a distribuição de água gelada pela válvula 2. A atividade “aciona VAV” envolve modificar a posição do atuador VAV de acordo com a vazão de ar requerida. A atividade “pré-condicionamento” envolve ações para ligar o ar-condicionado em horários pré-programados, por exemplo, trinta minutos antes do expediente de trabalho.

As funções de combate e prevenção a incêndio envolvem estratégias para aumentar o fluxo de ar nas regiões adjacentes (colocando o ventilador de retorno em velocidade alta) e diminuir nas áreas afetadas pelo fogo (colocando o ventilador de retorno em velocidade baixa), fechar os *dampers* nos locais de incêndio para isolar o fluxo de fumaça, diminuir a temperatura no local do incêndio e aumentar de pressão do ar nas escadas para facilitar a evacuação.

As funções de modo de operação envolvem ajustar ou regular a temperatura após um

comando do operador e dentro de uma faixa pré-definida (valores iniciais de referência são pré-definidos no programa), ligar/desligar o resfriamento e/ ou o aquecimento, e modificar a velocidade do ventilador de insuflamento de ar.

Assim, são definidos os principais holons de estratégias para o conforto térmico, conforme ilustrado na Figura 5.4 e relacionado abaixo:

- HEs relacionados às funções operacionais, isto é, funções para condicionamento do ar das zonas, da área utilizada, da área não-utilizada e, pré-condicionamento;
- HEs relacionados às funções de combate e prevenção a incêndio, isto é, funções para aumento da pressão do ar em zonas adjacentes, redução da pressão do ar em zonas afetadas, isolamento da fumaça, redução da temperatura no local do incêndio, aumento da pressão do ar nas escadas; e
- HEs relacionados às funções de modo de operação, isto é, funções para ajustar temperatura, ligar/desligar o resfriamento, ligar/desligar o aquecimento, ajustar a ventilação.

Figura 5.4. Arquitetura de controle incluindo holons de estratégias do conforto térmico.

HEs de segurança de acesso

O subsistema de segurança patrimonial, pessoal e de controle de acesso integrado aos demais subsistemas pode afetar o conforto do usuário provendo serviços para assegurar facilidades e segurança. Descrevem-se aqui as principais funções para conseguir esta integração.

As funções operacionais envolvem as estratégias para “entrada de usuário”, “controle de acessórios”, “chamada de elevadores”, “localização de pessoas”, “alerta de intrusão”, “combate a incêndio” e “pré-condicionamento”. A estratégia “entrada de usuário” envolve atividades relacionadas à recepção de usuário sejam estes usuários regulares ou visitantes. Se o usuário regular for se dirigir a outro andar diferente do habitual deve solicitar autorização para que a recepção contate o usuário visitado para conceder a liberação. Este procedimento é o mesmo para o usuário visitante. Quando o usuário tem seu acesso liberado os dados são armazenados e o crachá poderá destravar as catracas para os acessos solicitados.

A estratégia “controle de acessórios” serve para controlar o transporte de acessórios que devem ter uma etiqueta própria para verificar se o usuário que está transportando está autorizado, como por exemplo *laptops*. Para implementar este controle os dispositivos devem dispor de recursos para troca de sinais entre eles, ou seja, os HOs da etiqueta e do crachá devem trocar sinais com os demais holons HEs, HSs e HOs envolvidos na holarquia.

A estratégia “chamada de elevadores” envia informação de chegada de usuários ao HSS de movimentação assim que o usuário passa pela catraca de acesso. Enquanto esta estratégia estiver em estado normal de ativação os botões de chamada de elevadores nos andares estão desativados.

A estratégia “pré-condicionamento” envolve atividades para solicitar o acionamento ao HSS do conforto térmico e ao HSS do controle de iluminação assim que for detectada a presença do usuário no prédio. Esta estratégia é considerada fundamental para o uso racional de energia.

A estratégia “alerta de intrusão” envolve atividades para alarme e aviso ao pessoal da segurança quando for detectado algum usuário não identificado ou acessos indevidos devido a quebra de janelas por exemplo.

A estratégia “localização de pessoas” envolve, através de troca de sinais entre crachás e o subsistema de controle de acesso, localizar pessoas dentro do prédio. Se utilizada integrada com um sistema de voz pode servir, por exemplo, para transferência de uma ligação telefônica para a pessoa procurada.

A estratégia “combate a incêndio” envolve desabilitar as chamadas de elevadores, informar localização das pessoas, travar portas anti-pânico (portas que somente abrem por fora) nos locais desabitados e afetados pelo fogo, informar usuários sobre procedimentos a serem seguidos e monitorar os ambientes para confirmação da situação de incêndio. Através de dispositivos para localização de pessoas, o pessoal de resgate pode ter conhecimento prévio de onde procurar os ocupantes que precisam ser evacuados e, assim, salvar vidas e reduzir o risco de entrar em áreas perigosas desnecessariamente. Além disso, o sistema de controle de acesso deve possibilitar uma evacuação mais rápida dos seus ocupantes, sinalizando aos mesmos o caminho mais adequado.

Assim, são definidos os HEs para a segurança de acesso:

- HEs relacionados a funções operacionais, isto é, funções para controle da entrada de usuários, controle de acessórios, chamada de elevadores, localização de pessoas, alerta de intrusão, combate a incêndio, preparação local para os usuários;
- HEs relacionados a funções de modo de operação, isto é, funções para selecionar se o acesso é controlado no modo automático, manual em um andar, manual em todos os andares; e
- HEs relacionados ao funções de combate e prevenção a incêndio, isto é, funções para desabilitar chamadas de elevadores, informar a localização das pessoas, travar portas anti-pânico, informar usuários, e visualizar e confirmar situações de incêndio.

HEs de movimentação

Para funções operacionais envolvem as seguintes estratégias para a movimentação das

cabines dos elevadores: “pico de subida”, “pico de descida”, “combate a incêndio”, “pico de subida”, “pico de descida”, “mudança de serviço” e “estratégia duplex/triplex”. Esta última requer dois botões em cada andar um para solicitar o pedido de descer e um para solicitar o pedido de subir. Considera-se o princípio do sentido do movimento onde, se não existe nenhuma solicitação de serviço no atual sentido de movimento da cabine do elevador, este atender os pedidos no sentido oposto. Nas estratégias citadas seleciona-se o elevador considerado como o melhor posicionado para responder uma determinada chamada de andar segundo a menor diferença entre a posição atual da cabine do elevador e o andar onde foi realizada a chamada. A chamada é cancelada quando uma cabine de elevador no sentido solicitado parar no andar correspondente.

A estratégia “falta de energia” envolve deslocar as cabines dos elevadores, uma de cada vez, até o térreo e depois desligá-los para não sobrecarregar os geradores do sistema de alimentação de energia. A estratégia “mudança de serviço” envolve deixar o elevador em serviço de controle de grupo ou em serviço independente (fora do controle de grupo).

A “estratégia combate a incêndio” é dividida em duas etapas, a primeira etapa envolve parar o movimento das cabines dos elevadores, deslocá-las até o térreo e em seguida desligá-los. A segunda etapa envolve deixar um dos elevadores em serviço independente para uso exclusivo dos bombeiros.

Assim, os HEs de movimentação são:

- HEs relacionados a funções operacionais: pico de subida, pico de descida, combate a incêndio, estratégia duplex/triplex; mudança de serviço; e
- HEs relacionados a funções de combate a incêndio: etapa 1: traslado ao térreo e

desligamento e etapa 2: liberação para utilização de bombeiros.

HEs de segurança contra fogo

As funções operacionais para o sub-sistema de prevenção e combate a incêndio envolvem as seguintes estratégias: “combate a incêndio”, “ativação de alarme manual”, “correção de vazão”. A estratégia “combate a incêndio” é ativada com a confirmação de fumaça e alta temperatura de acordo com indicações de sensores. Nesta situação, deve-se aguardar um tempo que possibilite o eventual aborto da estratégia devido a alarme falso. Esta estratégia considera ainda o acionamento de alarmes e *sprinklers* e, a informação aos demais subsistemas para atuação de estratégias integradas. Considera-se que a energia aos dispositivos do subsistema é mantida através de geradores. A estratégia “alarme manual” envolve o acionamento por algum usuário de um botão manual que deve ser confirmado através de operadores habilitados ou de sistema de câmeras ou de detecção de queda de pressão na linha de água do sistema de combate a incêndio. A estratégia “correção de vazão” é para manter a pressão projetada na rede de água contra incêndio, compensando pequenos decrementos de pressão através do acionamento de bombas. No caso de uma emergência, a demanda de água solicitada por qualquer dispositivo contra incêndio deve resultar, após a confirmação da presença de fogo, numa queda de pressão na linha que indicará ao HS do controlador das bombas a necessidade de assegurar o fluxo de água mantendo a pressão do sistema.

Assim, os HEs de segurança contra fogo são:

- HEs relacionados a funções operacionais: combate a incêndio, ativação de alarme manual de incêndio e correção de vazão.

HEs de segurança de transmissão de sinais

As funções operacionais para este subsistema que consiste basicamente em estratégia que inicializa os nós e *links* para o estado de conexão formando o caminho de comunicação entre os clientes. Esta estratégia é acionada para que o caminho desejado seja implementado. Assim, considerando o presente caso, são verificados planos alternativos sendo que neste caso estão disponíveis as seguintes rotas para conectar os clientes H5 e H6:

- 1) a-N1-c-N3-f;
- 2) a-N1-c-N3-d-N2-e-N4-g;
- 3) b-N2-d-N3-f; e
- 4) b-N2-e-N4-g.

Assim, os HEs para transmissão de sinais são:

- HEs relacionados a funções operacionais: conectar clientes.

iii) Identificação dos holons supervisores (HSs) e (iv) dos holons operacionais (HOs)

Por questão de simplificação, bem como para um melhor entendimento a identificação dos holons supervisores (HSs) é feita aqui em conjunto com a identificação dos holons operacionais (HOs). Nesta identificação utiliza-se as características de formação de holarquias (vide Figura 3.2). Estas holarquias são coordenadas pelos HSs que podem dinamicamente modificá-las. Assim, dependendo do ponto de vista, todo o EI pode ser visto como um holon operacional (vide Figura 5.5), ou seja, o holon operacional EI pode ser representado por holons supervisores que coordenam os holons operacionais HVAC, segurança e controle de acesso, combate e prevenção ao fogo, transporte/movimentação e controle da malha de

transmissão de sinais, além de HOs que representam os usuários e o time de manutenção.

HSs e HOs do conforto térmico

Conforme representado na Figura 5.5, para concepção dos HSs e HOs do sistema, inicialmente considera-se o subsistema representado pelo HO HVAC. Em seguida, utilizando a propriedade de representação em holarquias tem-se os seguintes holons HS HVAC, e HOs de condicionamento, de produção de frio e de produção de calor. O HO de produção de frio é formado pelos HS que representa o controlador da produção de frio e os HOs que representam as holarquias: produção principal, produção auxiliar e distribuição, i.e., tem-se as três seguintes subpartes: produção principal (PP), produção auxiliar (PAux) e distribuição(Dist). Estes HOs por sua vez são representados em outros holons supervisores e operacionais, por exemplo, o holon operacional HO PP, que representa o subsistema principal de produção de frio, é representado pelo holon supervisor HS PP e holons operacionais das bombas (BomA, BomB) e *chiller* (*chiller* Princ). Segundo este mesmo princípio o subsistema *chiller* poderia também ser representado por holon supervisor (HS) de funcionamento dos *chiller* e holons operacionais (HO) de outros recursos físicos que compõem este *chiller*, como o compressor e os sensores.

Figura 5.5. Holarquias de HSs e HOs para o conforto térmico.

Listando os holons do último nível de detalhamento tem-se os seguintes **holons supervisores** (HSs) e **holons operacionais** (HOs) para o conforto térmico:

- **holarquia** de condicionamento (por simplificação apresenta-se os holons correspondentes somente para uma zona): **holons de supervisão** da caixa de mistura, da ventilação, do trocador de calor, e do *set-point*; e os **holons operacionais** do *damper* de entrada, do *damper* de saída, do *damper* interno, do ventilador de retorno, do ventilador de insuflamento, da serpentina de resfriamento, do sensor de temperatura ambiente e do ventilador de teto. Por simplificação e por serem similares não são apresentados os holons da zona 2.

•holarquia de produção de frio

- a. holarquia de produção principal de frio: formado pelo holon supervisor de produção (subsistema principal) de frio (HS PP) e pelos holons operacionais (HO) dos dispositivos físicos: *chiller* (subsistema principal) (*chiller* Princ), bomba a (BomA) e bomba b (BomB);
- b. holarquia de produção auxiliar de frio: formado pelo holon supervisor de produção (subsistema auxiliar) de frio (HS Paux) e pelos holons operacionais (HO) dos dispositivos físicos: *chiller* (subsistema auxiliar) (*chiller* Aux), bomba c (BomC) e bomba d (BomD);
- c. holarquia de distribuição de água: formado pelo holon supervisor de distribuição de água gelada (HS Dist) e pelos holons operacionais (HO) válvula 1 (Valv1) e válvula 2 (Valv2); e do fluxômetro;

•holarquia de produção de calor

- a. holarquia de produção principal de calor: formado pelo holon supervisor do subsistema principal de calor e pelos holons operacionais (HOs) dos dispositivos: aquecedor principal, bomba a, bomba d.
- b. holarquia de produção auxiliar de calor: formado pelo holon supervisor de produção (subsistema auxiliar) de calor e pelos holons operacionais (HO) dos dispositivos físicos: aquecedor auxiliar, bomba c e bomba d;
- c. holarquia de distribuição de água: formado pelo holon supervisor de distribuição de água quente e pelos holons operacionais (HO) válvula 1, válvula 2; e do fluxômetro;

•holarquia VAV: formado pelos holon supervisor do VAV e pelos holons operacionais do atuador principal, do sensor de posicionamento e do sensor do ambiente.

A seguir, indentificam-se todos os estados possíveis de cada um dos componentes das holarquias. Assim, tem-se:

•holarquia de condicionamento {ventilador de insuflamento: velocidade alta, normal, quebrado}; {damper de entrada: aberto, fechado, parcialmente aberto, emperrado}; {damper de saída: aberto, fechado, parcialmente aberto, emperrado}, {ventilador de retorno: velocidade alta, normal, quebrado}, {serpentina de resfriamento: com fluxo, sem fluxo, falha de vazamento}; {serpentina de aquecimento: com fluxo, sem fluxo, falha de vazamento}; {sensor de temperatura: ativado, desativado, quebrado com sinal, quebrado sem sinal}, {ventilador de teto: ligado, desligado, quebrado}

•holarquia de produção de frio: {*chiller* principal: ligado, desligado, quebrado}; {bomba a: ligada, desligada, quebrada}; {bomba b: ligada, desligada, quebrada}; {*chiller* auxiliar: ligado, desligado, quebrado}; {bomba c: ligada, desligada, quebrada}; {bomba d: ligada, desligada, quebrada}; {válvula 1: ligada, desligada, emperrada aberta, emperrada fechada}; {válvula 2: ligada, desligada, emperrada aberta, emperrada fechada}; e {fluxômetro: há fluxo, não há fluxo, quebrado}.

•holarquia de produção de calor: {aquecedor principal: ligado, desligado, quebrado}; {bomba a: ligada, desligada, quebrada}; {bomba b: ligada, desligada, quebrada}; {aquecedor auxiliar: ligado, desligado, quebrado}; {bomba c: ligada, desligada, quebrada}; {bomba d: ligada, desligada, quebrada}; {válvula 1: ligada, desligada, emperrada aberta, emperrada fechada}; {válvula 2: ligada, desligada, emperrada aberta, emperrada fechada}; e {fluxômetro: há fluxo, não há fluxo, quebrado}.

•holarquia de VAV: {atuador principal: aberto, fechado, parcialmente aberto, emperrado aberto, emperrado fechado}.

HSs e HOs da segurança e controle de acesso

Divide-se o HO do controle e segurança de acesso em holon supervisor do controle de acesso,

e holons operacionais de controle de patrimônio, controle de trânsito de pessoas, controle de intrusão e controle de veículos (vide Figura A.1).

No nível de detalhamento tem-se os seguintes holons supervisores (HSs) e holons operacionais (HOs) para a segurança de acesso:

- holarquia de controle de patrimônio: formado por holon supervisor de controle de patrimônio e pelos holons operacionais das etiquetas;
- holarquia de controle de trânsito de pessoas: formado holon supervisor das catracas de acesso e das portas de escadas e pelos holons operacionais das catracas e das escadas;
- holarquia de controle de intrusão: formado por holon supervisor de controle da intrusão e por holons operacionais dos sensores de janelas e atuadores de fechamento das janelas
- holarquia de controle de veículos formado por holon supervisor de controle de veículos e os holons operacionais de catracas de acesso; e
- holarquia de controle de imagens formado por holon supervisor de controle de imagem e os holons operacionais das câmeras.

Listando os estados possíveis de cada um dos componentes, tem-se: {etiqueta: normal, falha}, {catraca de acesso: normal, emperrada}, {porta de escada: aberta, fechada, emperrada aberta}, {sensor de janela: ativado, desativado, quebrado}, {janela: aberta, fechada, parcialmente aberta, emperrada aberta, emperrada fechada} e, {câmera: normal, falha}.

HSs e HOs de combate e prevenção ao fogo

Inicialmente divide-se o subsistema de combate e prevenção ao fogo em holon supervisor de segurança contra o fogo e holons operacionais do controle de vazão, do sensoramento, dos

alarmes e de atuação (vide Figura A.5).

No nível de detalhamento tem-se os seguintes **holons supervisores** (HSs) e **holons operacionais** (HOs) para combate e prevenção ao fogo:

- **holarquia** do controle de vazão: formado por **holon supervisor** de controle de vazão e pelos **holons operacionais** da bomba e do sensor de vazão;
- **holarquia** de sensoriamento: formado pelo **holon supervisor** do sensoriamento e pelos **holons operacionais** do sensor de fumaça e do sensor de fogo;
- **holarquia** de alarme: formado pelo **holon supervisor** de alarme e pelos **holons operacionais** das sirenes e luzes.
- **holarquia** de atuação: formado pelos **holons supervisores** de atuação e pelos **holons operacionais** de gabinete de mangueiras e de *sprinklers*.

Listando os estados possíveis de cada um dos componentes, tem-se: {bomba: ligada, desligada, quebrada}, {sensor de vazão: normal, falha}, {sensor de fumaça: normal, falha}, {sensor de temperatura: ativado, desativado, falha com sinal: falha sem sinal}, {sirene, ligada, desligada, quebrada}, {lâmpadas: ligada, desligada, queimada}, {gabinete de mangueiras: normal, falha}, {*sprinklers*: aberto, fechado, emperrado aberto e emperrado fechado}.

HSs e HOs de movimentação

Divide-se o subsistema de transporte/movimentação de pessoas em **holon supervisor** de transporte/movimentação e em **holons operacionais** de controle de grupo A e controle de grupo B (vide Figura A.8). Cada **holon operacional** de controle de grupo é representado por **holons supervisores** e **operacionais**.

No nível de detalhamento tem-se os seguintes **holons supervisores (HSs)** e **holons operacionais (HOs)** para o subsistema transporte/ movimentação:

- **holarquia** de controle de andar: **holon supervisor** de andar e **holons operacionais** de comando de andar (botoeiras) e de monitoração de andar (painéis)
- **holarquia** de controle de cabine: **holon supervisor** de cabine e **holons operacionais** de comando de cabina (botoeiras), monitoração de cabine (painéis) e do motor. Se conveniente, este holon ainda pode ser representado por exemplo por **holon supervisor** do motor e **holons operacionais** do *driver*, de detecção de velocidade e do motor.

Listando os estados possíveis de cada um dos componentes, tem-se: {botoeiras: ligada, desligada, quebrada}, {painéis: ligado, desligado, quebrado} e {motor: ligado, desligado, quebrado}

HSs e HOs da segurança de transmissão de sinais

Na Figura A.12 apresenta-se as **holarquias** formadas para este subsistema. No nível de detalhamento tem-se os seguintes **holons supervisores (HSs)** e **holons operacionais (HOs)** para segurança de sinais de comunicação:

- **holarquia da rede 1**: são representados o holons da rede 1: os holons supervisores da rede1 (HS Rede1), do host 1 (HS host1) e do host 2 (HS host2) e do link (HS link); os holons operacionais dos nós (N1, N2, N3 e N4) e dos links (link a, link b, ...,link g);
- **holarquia da rede 2**: são representados o holons da rede 2: os holons supervisores da rede2 (HS Rede2), do host 3 (HS host3) e do host 4 (HS host4) e do link (HS link); os holons operacionais dos nós (N5, N6, N7 e N8) e dos links (link h, link i, ...,link n);

Os estados dos componentes são {nós: pronto, *up*, degradado, *down*} e {links:pronto, *up*, *down*}. O estado “pronto” é o estado inicial para inicializar a conexão, este estado ocorre após a instalação ou *setup* do componente, o estado “*down*” é o estado que o componente está indisponível e o estado “degradado” é o estado que o componente está funcionando com alguma queda de desempenho.

5.1.2 Sub-etapa 1.2: Especificações para FTCS de EIs

v) Identificação das falhas e dos pontos críticos

Na Tabela 5.5 são apresentados falhas e pontos críticos identificados para os subsistemas em estudo.

Tabela 5.5. Relação das falhas e dos pontos críticos do sistema predial.

Subsistema	Falha	pontos críticos
HVAC	<ul style="list-style-type: none"> -falha no fluxo de água gelada - falha no fluxo de água quente -a carga térmica não atinge a demanda -vazamento em serpentina (aquecimento e/ou resfriamento) - falha na renovação de ar - falha no desempenho do condicionamento de ar 	<ul style="list-style-type: none"> -falha em áreas consideradas prioritárias de condicionamento de ar -renovação de ar atingir níveis insuportáveis
Segurança de acesso	<ul style="list-style-type: none"> - falha no controle de acesso 	<ul style="list-style-type: none"> -falha em um ambiente considerado de alta segurança
Combate e prevenção ao fogo	<ul style="list-style-type: none"> - falha nos sensores - falhas nos alarmes - falha no sistema de pressurização de água 	<ul style="list-style-type: none"> - falhas em áreas consideradas de risco - falha no sistema de pressurização de água
Transporte/movimentação	<ul style="list-style-type: none"> - falha no intertravamento das portas - falha no motor parado - sobrecarga ou sobre aquecimento - parada desnivelada 	<ul style="list-style-type: none"> - falha em todos os elevadores em conjunto
Controle da malha de transmissão de sinais	<ul style="list-style-type: none"> - falta de comunicação entre dois <i>hosts</i> 	<ul style="list-style-type: none"> - perda total de comunicação entre dois <i>hosts</i>

vi) Especificações para tratamento de falhas

Nesta fase são desenvolvidos diagramas para diagnosticar falhas. Para ilustrar o desenvolvimento, dois diagramas são apresentados. Na Figura 5.6 é apresentado o diagrama para uma parte do subsistema de produção de frio. O foco está na supervisão do fluxo de água, por exemplo o fluxo de entrada na válvula 1 é a soma do fluxo de saída da bomba A e da bomba B (reduzida as possíveis perdas).

Figura 5.6. Diagrama lógico de uma parte do subsistema principal de produção de frio.

Na Figura 5.7 são apresentados os diagramas lógicos com os respectivos estados possíveis para os componentes da rede de comunicação, nós e *links*, assim como são indicadas as probabilidades entre mudanças de estados.

Figura 5.7. Diagramas lógicos de mudança de estado a) do nó e b) do *link*.

Para a supervisão ativa tem-se a verificação de sensores após a execução de estratégias para supervisionar se o sistema cumpriu o planejado. Neste caso executa-se periodicamente a verificação do estado de nós e *links*, o teste do funcionamento de sensores do sistema de combate a incêndio, a mudança de temperatura após certo tempo da ação do sistema de

condicionamento de ar e a verificação do fluxo de água após execução de estratégia de produção de frio ou de calor.

vii) Identificação dos holons para tratamento de falhas

Para especificar os holons para tratamento de falhas, na Tabela 5.6 relaciona-se os pontos críticos, sua reconfiguração ou degeneração dos serviços do edifício *Accenture*. Estas estratégias podem ser implementadas tanto nos HEs como nos HOs dependendo do nível desejado de reação. Neste texto serão apresentados somente as reações no nível dos HEs pois conforme descrito no item 3.5.2 as reações dos HOs são relativamente simples envolvendo ações mais reativas como o do HO válvula que comanda o fechamento da respectiva válvula após receber sinal de um HO sensor (vide Figura 3.7). Cada tratamento de falha descrito gera modelos que são elegíveis durante a execução no caso de ocorrência de falhas.

5.1.3 Sub-etapa 1.3 - Definição dos padrões de interação entre os holons

As interações entre os holons deve ocorrer conforme os modelos apresentados no capítulo anterior, em que os holons interagem para alocar, executar, supervisionar e tratar falhas para produzir um serviço. Na Figura 5.8, é apresentada as interações entre holons para “solicitação de produção de frio”. As interações (em azul) seguem o processo interativo “solicitação de serviço do EI” (em preto) que ocorre entre holons de estratégia HEs e operacionais HOs para execução da estratégia produção de frio. Nesta interação para executar a produção de frio tem-se por exemplo o HS PP interagindo com o HE conforto térmico e com os HOs Bom A, Bom B e *chiller* Prin. Se o pedido de produção de frio for aceito pelos HOs e o calendário proposto pelo HS também for aceito, as ordens serão executadas.

Tabela 5.6. Lista de tratamento de falhas, reconfiguração e/ou degeneração dos serviços do edifício *Accenture*.

Holarquia	Ponto crítico	Tratamento de falhas	reconfiguração e/ ou degeneração
Conforto térmico	falha no condicionamento de ar em áreas prioritárias (devido por ex. à falha no fluxo de água gelada ou quente)	atua nas variáveis de controle	ligar recursos alternativos de acordo com ordem de probabilidade se ações de tratamento de falha não resolver, desliga ou reduz o fluxo de ar para áreas menos prioritárias se ainda não for suficiente, ligar ventiladores de teto
	falha na renovação de ar (que resulta em níveis insuportáveis)	abrir renovação para 100%	desligar condicionamento de ar abrir portas e janelas nos ambientes onde a renovação está com problema ligar ventiladores de teto
Segurança de acesso	falha em um ambiente seguro	mudar parâmetros nos dispositivos para tentar resolver a falha	caso a situação de falha não seja resolvida, liberar acesso para técnicos de manutenção e acessos independentes
Movimentação	sobrecarga de energia	acionar geradores para manter o transporte	se a sobrecarga persistir diminuir o número de elevadores ativos e, se necessário reduzir a energia em outros subsistemas destravar as portas das escadas
Segurança contra o fogo	falha no sensoriamento em áreas de alto risco	confirmar presença de falhas, através de câmeras com imagem do local, se o fogo é confirmado acionar estratégia de combate ao fogo	solicitar atendimento do corpo de bombeiros e liberar o acesso a estes para utilização de hidrantes e gabinetes
Segurança de transmissão de sinais	falta de comunicação entre dois <i>hosts</i>	verificar qual a melhor estratégia a ser adotada e, se necessário reiniciar o nó com falha	identificar caminhos alternativos e adotar o que tiver menor MTBF

Figura 5.8 Interação entre holons para “solicitação de produção de frio”.

Na Figura 5.9 tem-se uma parte da interação para execução de serviço que ocorre entre HEs do conforto térmico, HO de válvula e objeto de controle válvula 1. Vale ressaltar que o HO pode receber ordens de execução de HEs diferentes.

Figura 5.9. Interação entre holons para “execução” de comando em válvula.

5.2 Etapa 2 - Modelagem

Durante esta etapa são desenvolvidos os modelos detalhados dos holons do subsistema (HSSs), holons de estratégias (HEs), do objeto de controle e dos HEs FTCS de EIs, pois os holons supervisores e operacionais (HOs) seguem o modelo comportamental desenvolvido no capítulo anterior (itens 4.2.3 e 4.2.4).

5.2.1. Sub-etapa 2.1 - Modelagem dos holons do subsistema (HSSs)

Na Figura 5.10 é apresentada a atividade “modelagem dos HSSs” do prédio *Accenture* que envolve detalhar para cada subsistema considerado os serviços oferecidos e os planos para

atingir estes objetivos. Nesta figura tem-se o detalhamento dos planos do “conforto térmico” e a atividade “elabora planos de produção de água gelada”. Os demais HSSs são modelados de forma similar e por simplificação não são apresentados.

5.2.2. Sub-etapa 2.2 - Modelagem dos holons de estratégia (HEs)

Os modelos em PFS das estratégias para o conforto térmico estão na Figura 5.11, os demais HEs dos outros serviços especificados aqui para serem oferecidos pelo *Accenture* são apresentados no Anexo A. Na Figura 5.12 tem-se o PFS da estratégia “condicionamento de ar da zona 1” (para as demais zonas, os modelos são similares).

5.2.3 Sub-etapa 2.4 – Modelagem dos holons operacionais (HOs)

A modelagem dos holons operacionais envolve o detalhamento do comportamento dos dispositivos físicos. De acordo com o objeto de controle tem-se a especificação funcional da atividade de “execução”, ou seja, do envio e recebimento de sinais do HO para o objeto de controle. Por exemplo, o componente válvula ilustrado na Figura 5.13, pode ser comandado pelo HO válvula 1.

5.2.4 Sub-etapa 2.5 – Modelagem do objeto de controle

Os modelos do objeto de controle representam a dinâmica dos processos produtivos. Na Figura 5.14 tem-se os principais modelos do objeto de controle para a holarquia produção de frio do conforto térmico. No Anexo A, são apresentados os modelos dos demais subsistemas.

Figura 5.10. PFS da modelagem dos HSSs e do HSS do conforto térmico.

Figura 5.11. PFS das estratégias do conforto térmico.

Figura 5.12 PFS da estratégia “condicionamento de ar para zona 01”.

Figura 5.13 Modelagem do holon operacional do componente válvula 1.

Figura 5.14. Modelagem em rede de Petri dos componentes da produção de frio.

5.2.5. Sub-etapa 2.6 - Modelagem para FTCS do EI.

Modelagem do diagnosticador e do decisor

Para desenvolver a modelagem do diagnosticador adotou-se a holarquia formada pelos holons do subsistema principal de produção de frio do HVAC. A estratégia de controle adotada está representada na Figura 5.15a, ou seja, a produção de água gelada a partir do *chiller* principal (por simplificação aqui não se considera a torre de resfriamento principal e as falhas no controlador ou no fluxômetro). Neste caso, apenas uma métrica é verificada, que é a existência ou não de fluxo. Na Figura 5.15b tem-se os modelos em rede de Petri dos objetos de controle do processo de produção principal de frio modelados na sub-etapa 2.5 deste exemplo.

Figura 5.15. Modelos da estratégia de controle e fluxômetro (a) e dos componentes do subsistema principal de produção de frio (b).

Na Figura 5.16 tem-se o modelo em rede de Petri estendida do diagnosticador. Os estados em azul são os que representam a situação normal, cada estado envolve uma seqüência de eventos, conforme exemplificado na Tabela 5.7 que relaciona também o estado do fluxômetro. Alguns estados são identificados pela letra “n” por simplificação pois, correspondem a mais de uma seqüência de eventos que podem levar o sistema a apresentar o mesmo tipo de falha.

Tabela 5.7. Mapeamento parcial de estados para o diagnosticador de produção de frio.

Comandos	Eventos	Estado	Fluxômetro
C1C2C4	b δ h	15N	há fluxo
C1C2C4	α δ h	nF1F2	não há fluxo
C1C2C4	b δ h θ	17F4	há fluxo
C1C3C5	b η h	16N	há fluxo
C1C3C5	β η λ	nF1F3F5	não há fluxo
C1C3C5	b η h θ	nF3F4	não há fluxo

Figura 5.16. Modelo do diagnosticador para o subsistema principal de produção de frio.

Na Figura 5.17 tem-se o modelo em rede de Petri do decisor que decidirá o tipo de reação baseado em regras “*se...então...*” definidas conforme segue:

- *se* o sistema executou a estratégia C1C2C4 e o sensor indica fluxo *então* o sistema deve estar ou no estado 15N (tendo ocorrido a sequência de eventos bdh) ou no estado 17F4 (tendo ocorrido a sequência de eventos bdh θ) e *então* nenhuma ação deve ser executada. Neste caso a falha somente será observada quando o sistema executar ações para impedir o fluxo e o

sistema continuar acusando fluxo;

• **se** o sistema executou a estratégia C1C2C4 e o sensor não indica fluxo *então* o estado do sistema pode apresentar várias falhas (nF1, nF2, nF1F4, etc.) e *então* o decisor irá inferir que a falha ocorrida é a que tem a maior probabilidade registrada pelos dados anteriores (isto deve ser previamente programado) e *então* informar aos holons para executar as ações para correção desta falha. **Se** a falha inferida foi a correta *então* o fluxômetro indicará existência de fluxo *se* não o sensor não indicará existência de fluxo e *então* o decisor irá inferir que a falha ocorrida é a que tem a segunda maior probabilidade e, assim por diante, até que a falha seja descoberta. **Se** o sistema não conseguir identificar a falha *então* deve requisitar auxílio ao HO responsável pelo time de manutenção.

Figura 5.17. Modelo do decisor para o subsistema da produção principal de frio

Modelagem dos HEs para tratamento de falhas (HEs-FTCS)

Os modelos complementares (aos modelos comportamentais dos holons desenvolvidos no capítulo anterior) e específicos ao estudo do *Accenture* são desenvolvidos aqui. Na Figura 5.18 estão apresentadas as estratégias para tratamento de falha do conforto térmico relacionadas na Tabela 5.6. Cada estratégia é representada por um HE FTCS responsável por coordenar a reação às falhas.

Figura 5.18. PFS das estratégias para tratamento de falhas do conforto térmico.

Na Figura 5.19 estão as principais estratégias para reconfiguração de falha no fluxo de água gelada. As estratégias “produção principal = QUEBRADA” e “produção auxiliar= QUEBRADA” requerem ações para fornecer fluxo de água através do outro subsistema (principal ou auxiliar), isto ocorre devido a quebra de dispositivos considerados essenciais para o subsistema como a torre, *chiller* ou válvula. São detalhadas as ações em caso de “válvula 1 = EMPERRADA FECHADA”, “bomba A = QUEBRADA”, e “bomba C= QUEBRADA”, ações para as bombas B e D e para válvula 2 não são apresentadas por serem similares. O mesmo vale para o caso da estratégia “falha no fluxo de água quente”.

Na Figura 5.20 são apresentadas as estratégias para “degeneração para atender áreas prioritárias” que envolve inicialmente reduzir o fluxo de ar para as áreas menos prioritárias, desligar o condicionamento de ar nestas áreas e, se isso não resolver, ligar os ventiladores de teto nas áreas que têm este recurso disponível para manter um nível de conforto mesmo que com desempenho inferior.

Figura 5.19. PFS das estratégias para tratamento de falha no fluxo de água gelada.

Figura 5.20. PFS de reconfiguração para atender as áreas prioritárias.

5.3 Etapa 3 - Análise/ simulação

Para ilustrar esta fase do procedimento apresenta-se aqui a simulação de dois cenários usando o *software* HPSim com modelos construídos neste exemplo (por questões de legibilidade no texto não é possível apresentar os modelos completos). Assim, verifica-se se os modelos atendem as restrições impostas e alcançam os objetivos traçados na hipótese. No **cenário 1** é simulada uma situação de incêndio para verificar se os holons cooperam entre si ativando e executando as estratégias integradas de combate a incêndio, assim como acionando os dispositivos especificados. No **cenário 2** é considerado o sistema em funcionamento normal e simula-se o sistema submetendo-o a situações de funcionamento incorreto dos equipamentos. A análise de desempenho funcional permite identificar e corrigir problemas na fase de projeto e que podem ser mais complexos de resolver com o edifício já ocupado.

O **cenário 1** considerado é o “simula incêndio” apresentado na Figura 5.21 que envolve:

- HEs de combate a incêndio das holarquias segurança contra o fogo, conforto térmico e de movimentação;

- HS de controle de acesso;
- HOs de sensores de fumaça e de temperatura; funcionários habilitados para possível aborto da estratégia; monitor de andar; alarmes; *sprinklers*; ventilador de retorno de ar do andar 3; ventilador de retorno de ar da zona adjacente; botões de chamada do elevador; cabina de elevador; portas de elevadores; e
- objetos de controle como alarme, *sprinkler*; ventilador de retorno do andar 3; ventilador de retorno de zona adjacente; botões de chamada do elevador; cabina de elevador e portas de elevadores.

Figura 5.21. Tela do HPSim para simulação do cenário 1: “simula incêndio”.

A hipótese é de que os holons colaboram entre si para enviar os sinais de atuação conforme especificado nos HEs. A restrição considerada é: tendo os sensores enviados os sinais (representado pela marcação inicial) os HEs comandam os respectivos HOs e após a execução das atividades o objeto de controle deve estar no estado especificado nas estratégias.

Na Figura 5.22 apresenta-se a tela do HPSim ao final de uma simulação onde os resultados obtidos confirmam que, se a restrição inicial é atendida, a hipótese é verdadeira. Ou seja, os holons cooperam entre si para atingir os objetivos. Os objetos de controle mudam seus respectivos estados de acordo com as estratégias especificadas, por exemplo, o ventilador de retorno de ar da zona adjacente é colocado em velocidade alta para aumentar a pressão nesta zona.

Figura 5.22. Tela do HPSim ao fim da simulação do cenário 1 “simula incêndio”.

O **cenário 2** considerado é o “simula produção de água gelada” apresentado na Figura 5.23 que envolve:

- HEs de chaveamento do modo de controle, diagnosticador produção de água gelada, decisor produção de água gelada, falha no fluxo de água gelada, produção de água gelada;
- HOs da bomba A, bomba B e válvula 1; e
- objeto de controle, vide diagrama apresentado na Figura 5.6 (sem a presença do *chiller*

principal): bomba A, bomba B, válvula 1, fluxômetro (não são consideradas falhas no fluxômetro, pois, envolveria situações relativamente mais complexa ou a adoção de um fluxômetro em paralelo para tornar possível a diagnostabilidade) (vide SAMPATH et al., 1996).

Figura 5.23. Modelo em rede de Petri estendida para simulação do cenário 2 “simula produção de água gelada”

Condições ambientais também são modeladas neste cenário para possibilitar a simulação de situações reais sem a interferência do projetista. Por exemplo, neste caso, se o HE produção de água gelada envia o comando “ligar bomba A” e acontece algum evento que leva a bomba A para o estado QUEBRADA, o fluxômetro deverá indicar que “não há fluxo”.

Na Tabela 5.8 e nas Figuras 5.24 a 5.26, apresentam-se os resultados da simulação do **cenário 2** “simula produção de água gelada”. Baseado na simulação e na análise estrutural conduzidas durante o desenvolvimento dos modelos no próprio *software*, pode-se afirmar que os modelos possuem as boas características indicadas pelos pesquisadores em rede de Petri. Além disso, os resultados da verificação de ambos os casos apresentados confirmaram o comportamento esperado do sistema de controle do EI.

Tabela 5.8. Verificação do cenário 2 “simula produção de água gelada”.

Restrição	Hipótese	Resultado
i) solicitação de fluxo de água gelada	o sistema deve permanecer em “modo estacionário” e fornecer fluxo de água gelada	o sistema reagiu conforme esperado, permanecendo em “modo estacionário”, ligando a bomba A ou a bomba B, abrindo a válvula 1 e o fluxômetro indicou que “há fluxo” (vide Figura 5.24)
ii) falha na bomba A	o sistema deve mudar para “modo transiente”, acionar a estratégia “bomba A = QUEBRADA” e acionar os dispositivos especificados	o sistema reagiu conforme esperado, mudando para “modo transiente” ligando a bomba B (vide Figura 5.25)
iii) falha na bomba B	o sistema deve mudar para “modo transiente”, acionar a estratégia “bomba B = QUEBRADA” e acionar os dispositivos especificados	o sistema reagiu mudando para “modo transiente” conforme esperado, ligando a Bomba A
iv) bomba A e bomba B ambos quebradas	O sistema deve mudar para “modo transiente” e acionar a estratégia “Requisitar intervenção externa”.	o sistema reagiu conforme esperado, mudando para “modo transiente”, requisitando auxílio externo e aguardando ação de reparo (vide Figura 5.26)
v) válvula 1 = Emperrada fechada		
vi) bomba A quebrada e válvula 1 = Emperrada fechada.		
vii) bomba B quebrada e válvula 1 = Emperrada fechada.

Figura 5.24. Resultado da simulação do cenário 2 no HPSim atendendo a restrição (i).

Figura 5.25. Resultado da simulação do cenário 2 no HPSim atendendo a restrição (ii).

Figura 5.26. Resultado da simulação do cenário 2 no HPSim atendendo a restrição (iv).

5.4 Síntese do Capítulo

Este capítulo apresentou um exemplo de aplicação do procedimento proposto num prédio comercial, o edifício *Accenture*. O exemplo procura ilustrar a efetividade do procedimento não só na obtenção dos modelos, mas principalmente para sistematização da tarefa de projeto de sistemas de controle de EIs.

As etapas do procedimento são aplicadas e desenvolvidas as especificações dos holons. A simulação dos modelos desenvolvidos comprovam que os modelos obtidos asseguram a agilidade, robustez e flexibilidade especificada para o sistema de controle de EIs. É observada a importância de considerar algum tipo de redundância no projeto destes sistemas e que assumindo regras de inferência para identificar causas de falhas pode-se reduzir o número de sensores. Além disso, observou-se que o procedimento proposto facilita o estudo de alternativas de operação do sistema de controle para implementar as estratégias de reconfiguração.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho propõe um procedimento para modelagem de sistemas de controle de edifícios inteligentes (EIs) considerando a ocorrência de falhas. A abordagem para construção de modelos é baseada na implementação de FTCSs (*faults tolerance control systems*), holon, rede de Petri e nos requisitos de FTCSs, com foco na reconfiguração de sistemas de controle.

A técnica de refinamento do PFS (*production flow schema*) é utilizada na sistematização do desenvolvimento dos modelos de modo que propriedades estruturais e comportamentais sejam asseguradas, no fluxo de informação entre holons e entre os níveis hierárquicos, na modelagem de reconfiguração/degeneração e no *workflow* do próprio procedimento. Assim, a partir dos modelos desenvolvidos pode-se derivar a especificação dos programas de controle para CPs (controladores programáveis) e computadores de um sistema de controle de EIs.

O sistema de controle resultante é baseado em holons, cada um possuindo uma visão parcial do sistema, e que cooperam entre si para alcançar os objetivos planejados. A arquitetura do sistema de controle é dividida em níveis: o nível de planejamento formado pelos HSSs (holons do subsistema), o nível de ordenação formado pelos HEs (holons de estratégias), o nível de supervisão formado pelos HSs (holons supervisores) e o nível de controle local formado pelo HOs (holons operacionais). Os conceitos considerados nos sistemas holônicos adotados neste caso são a autonomia e a cooperação, ou seja, a ação de controle resulta da interação dos componentes autônomos e cooperativos, cada um contribuindo com seu comportamento individual.

Mecanismos essenciais para a implementação de sistemas de controle tolerantes a falhas (FTCSs) são considerados. Os mecanismos são: negociação, autonomia, propagação de mensagens, chaveamento do modo de controle e estimação do tempo. Estes mecanismos garantem ao sistema de controle autonomia de funcionamento envolvendo a verificação de desempenho dos holons; reorganização para tratamento de falhas; agilidade na troca de informações; e alternância entre a arquitetura de controle hierárquica e heterárquica na ocorrência de falhas, tornando a reação à falhas mais ágil e considerando a visão global do sistema e aumentando o grau de proteção do sistema.

Estes mecanismos estão presentes em cada holon independentemente do nível hierárquico envolvendo ações que são classificadas em quatro fases: estimação, planejamento, execução e aprendizagem. Na fase de estimação o holon identifica a falha através de um modelo de diagnóstico desenvolvido em rede de Petri e baseado em SAMPATH et al. (1996) e regras de inferência baseada em raciocínio (KUIPERS, 1994), na fase de planejamento o holon decide a ação de reconfiguração baseado em prioridades pré-definidas, na fase de execução o novo plano de ação é acionado, e a fase de aprendizagem envolve a armazenagem dos dados relevantes.

O procedimento proposto foi desenvolvido com base em diversos estudo de casos sendo que o presente texto apresenta um exemplo de aplicação para prédio comercial. Os subsistemas considerados são os de HVAC, segurança patrimonial, pessoal e de controle de acesso, combate e prevenção ao fogo, transporte/movimentação e controle da rede de transmissão de sinais. As estratégias apresentadas visam proporcionar ganhos de produtividade, integração com outros subsistemas prediais, e a continuidade de transmissão de sinais mesmo na presença de falha de entidades do sistema. O exemplo procura indicar que a adoção do

procedimento desde a primeira fase de concepção traz benefícios como a definição do grau redundância, da quantidade de componentes envolvidos e da arquitetura do sistema. No exemplo é possível notar a economia que se obtém assumindo regras de inferência para identificar causas de falhas com um número relativamente reduzido de sensores e que durante a execução de uma ordem o sistema de controle, de EIs pode reagir a falhas e escolher a melhor estratégia de reconfiguração.

Os estudos de casos que foram considerados nesta pesquisa indicam a necessidade de aprimorar o procedimento visando uma aplicação generalizada para todos os subsistemas possíveis de um EI, pois, uma efetiva integração com os outros sistemas prediais inclui a manipulação de um número relativamente grande de variáveis contínuas e discretas que não foi possível tratar neste trabalho.

6.1 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros sugeridos em decorrência da presente dissertação considera-se:

- implementação de um protótipo de sistema de controle para um caso real;
- desenvolvimento de um simulador de rede de Petri com facilidades para descrever e analisar os mecanismo de FTCSs e reconfiguração;
- estudo da combinação dos conceitos adotados no procedimento aqui proposto com o conceito de orientação a objetos, em especial com relação a UML (Unified Modeling Language) (BOOCH et al, 1999), para determinar meta-modelos de especificação da documentação gerada no procedimento;
- desenvolvimento de uma ferramenta que considere os conceitos apresentados com uma interface que facilite a entrada de dados e análise dos modelos do projetista. Neste caso, está

se considerando o mapeamento de um número relativamente grande de falhas que podem ocorrer num EI.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCENTURE. A *Accenture* no Brasil, disponível em web site: <http://www.accenture.com/countries/Brazil.htm>, acessado em abril de 2008.
- ANDREU, D. Commande et supervision des procédés discontinues: une approche hybride supervision des Systemes Discontinus, thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1996.
- ANSCHUETZ, H. “HPSim Copyright © 1999-2001”, disponível em web site http://www.winpesim.de/petrinet/e/hpsim_e.htm, acessado em janeiro de 2006.
- ARAKAKI, J. Técnicas de Degeneração no Projeto do Controle de Sistemas Produtivos, Tese Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- ARKIN, H.; PACIUK, M. Service System Integration in Intelligent Buildings. Proceedings of IB/IC Intelligent Buildings Congress. Tel-Aviv, pp. 19-30, 1995.
- AVIZIENIS, A.; LAPRIE, J.C.; RANDELL, B.; LANDWHER, C. Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing, IEEE TRANSACTIONS, vol.1 no. 1 pp. 11-33, 2004.
- BEACH, R.; MUHLEMANN, A.P.; PRICE, D.H.R.; PATERSON, A.; HSARP, J.A. A review of manufacturing flexibility. European Journal of Operational Research, vol. 122, pp.41-57, 2000.
- BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I. The Unified Modeling Language user guide. Reading (Massachusetts): Addison-Wesley, 482p, 1999.
- BOWDEN, F.; PEARCE, C. Decision process Petri Net analysis. Proc. of 5th International Symposium On Command & Control Research And Technology, no. 1, Canberra, 2000.
- BOYD, D. Intelligent Buildings. Editor D. Boyd, Britihs Library Cataloguing in Publication Data, University of Central England, 1994.

- BRENNAN, R.; BALASUBRAMANIAN, S.; NORRIE, D. A Dynamic Control Architecture for Metamorphic Control of Advanced Manufacturing Systems. Proceedings of the International Symposium on Intelligent Systems and Advanced Manufacturing, pp.213–223, 1997.
- BRENNAN, R.; FLETCHER, M.; NORRIE, D. An Agent-based Approach to Reconfiguration of Real-Time Distributed Control Systems. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 4, no. 18, pp.444–451, 2002.
- BROWNE, J.; DUBOIS, D.; RATHMILL, K.; SETHI, S.P.; STECKE, K.E. Classification of flexible manufacturing systems. The FMS Magazine, vol. 2, no. 2, pp. 114-117, 1984.
- BRUSSEL, H. V.; VALCKENAERS, P.; WYNS, J.; PEETERS, P.; BONGAERTS, L. Holonic Manufacturing Systems, Architectural and Manufacturing Control Issues. In Proceedings of 2nd CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Capri, pp. 19–29, 2000.
- BRUSSEL, H. V.; WYNS, J.; VALCKENAERS, P.; BONGAERTS, L. Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems: PROSA. Computers In Industry, vol. 37, no.3. pp.255–274, 1998.
- BUILDINGS Buildings - Espaços Corporativos *online* disponível em web site: http://www.buildings.com.br/ficha/edificio.php?id_edificio=76, acessado em abril de 2008.
- BUSSMANN, S. (1998). An Agent-Oriented Architecture for Holonic Manufacturing Control. In Proceedings of the First Open Workshop of the Esprit Working Group on Intelligent Manufacturing Systems, Lausanne, pp. 1–12, 1998.
- CAI, X.; VYATKIN, V.; HANISCH, H.M., Design and Implementation of a Prototype Control Systems According to IEC 61499. Proc. of IEEE Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation, 2003, Lisboa, pp.269-276, 2003.

- CARDOSO, J.; VALETTE, R. Redes de Petri. Florianópolis: Editora da UFSC, 1997. 220p.
- CASSANDRAS, C. G. Discrete Event Systems – Modeling and Performance Analysis. Richard D. Irvin, Inc. and Aksen Associates, Inc. Publ., 1993.
- CHAMPAGNAT, R. Supervision des Systèmes Discontinus: Définition d'un Modèle Hybride et Pilotage en Temps-réel, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1998.
- CHEN, W.; JIANG J. Fault-tolerant control against stuck actuator faults. IEE Proceedings Control Theory Appl., vol. 152, no. 1382, 2005.
- CHEN, F., HSIH, T. Holonic supervisory control and data acquisition kernel for 21st century intelligent building system. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference Robotics and Automation, vol. 3, pp. 2641-2646, 2000.
- CHIRN, J.-L.; MCFARLANE, D. A Holonic Component-Based Approach to Reconfigurable Manufacturing Control Architecture. In Proceedings of the International Workshop on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems, London, pp. 219–223, 2000.
- CHO, K.; LIM, J. On-line tracing supervisory control of discrete-event dynamic systems based on outlook. Automatica, vol. 35, pp. 1725-1729, 1999.
- CHOW, L. The Intelligent Building Index 10: Health and Sanitation. Asian Institute of Intelligent Buildings. Hong Kong, 3rd edition, pp. 1– 3, 2004.
- DAVID, R.; ALLA, H. Petri Nets for Modeling of Dynamic Systems – A Survey. Automatica, vol.30, no.2, pp. 175-201, 1994.
- DILTIS, D.; BOYD, N.; WHORMS, H. The Evolution of Control Architectures for Automated Manufacturing Systems. Journal of Manufacturing Systems, vol. 10, no.1, pp. 63–79, 1991.

- FLAX, B. Intelligent Buildings. IEEE Communications Magazine, vol.29, n.4, p.24-27, April, 1991.
- GAITHER, N.; FRAIZER, G. Administração da Produção e Operações, Ed. Pioneira, 2001.
- GIRET, A.; BOTTI, V. Holons and agents. Journal of Intelligent Manufacturing, vol. 15, pp. 645-659, 2004.
- GOMES, L. “Edifícios Inteligentes: um conceito potencialmente mobilizador”. Tese (Doutorado), Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 1998.
- GROOVER, M. P. Automation, Production Systems and Computer Integrated Manufacturing, 2nd edition, Prentice-Hall, 2000.
- GUSTIN, G., Aplicações de redes de Petri interpretadas na modelagem de elevadores em edifícios inteligentes. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- GUSTIN, G. Modelagem e análise de um sistema distribuído e aberto para automação predial. Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- HASEGAWA, K.; OHNO, H. ‘On programming conventional programmable controller by using mark flow graph’. In: Intern. Symp. on Circuits and Systems, pp. 933-936, Kyoto, 1985.
- HASEGAWA, T.; GOU, L.; TAMURA, S.; LUH, P. B.; OBLAK, J. M. Holonic Planning and Scheduling Architecture for Manufacturing. In International Working Conference on Cooperating Knowledge Based Systems, Keele, pp. 125–139, 1994.
- HITOMI, K. Manufacturing System Engineering, Taylor and Francis Ltd., 1990.
- HMS - HOLONIC MANUFACTURING SYSTEMS CONSORTIUM disponível em web site: <http://hms.ifw.uni-hannover.de>, acessado em agosto de 2007.

- HO, Y. C. Introduction to Special Issue on Dynamics of Discrete Event Systems, Proceedings of IEEE, vol.77, pp.3-6, 1989.
- IGEI P.J.; GARCIA J.I.; MIYAGI P.E., Modelagem de redes de controle lonworks em edifícios inteligentes. In: Anais 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. Cusco, 2007.
- ISERMANN, R. Process fault detection based on modeling and estimation methods – A survey. Automatica, vol.20, no. 4, pp.387-404, 1984.
- KATIPAMULA, S.; BRAMBLEY, M.R. Methods for fault detection, diagnostics and prognostics for building systems—A Review, Part I. International Journal of Heating, Ventilating, Air Conditioning and Refrigerating Research, vol.11, no.1, pp.3-26, 2005(a).
- KATIPAMULA, S., BRAMBLEY, M.R. Methods for fault detection, diagnostics and prognostics for building systems—A Review, Part II. International Journal of Heating, Ventilating, Air Conditioning and Refrigerating Research, vol. 11, no. 2, 2005(b).
- KOESTLER, A. The Ghost in the Machine. Arkana Books, London, 1969.
- KUIPERS, B. Qualitative Reasoning: Modeling and Simulation with Incomplete Knowledge, The MIT Press, Cambridge, MA, 1994.
- LEITÃO, P.; RESTIVO, F. A Layered Approach to Distributed Manufacturing. In Proceedings of Advanced Summer Institute International Conference in Life Cycle Approaches to Production Systems: Management, Control and Supervision, Leuven, 1999.
- LEITÃO, P.; COLOMBO, A. W.; RESTIVO, F. ADACOR, A Collaborative Production Automation and Control Architecture. IEEE Intelligent Systems, vol. 20, nº 1, pp. 58-66, 2005.

- MATSUSAKI, C.T.M.; SANTOS FILHO, D.J. Modeling of Distributed Collaborative Control Systems of Production Systems. Symposium Series in Mechatronics, vol.2, pp.345-352, 2006.
- MIYAGI, P.E. Controle Programável - Fundamentos do Controle de Sistemas a Eventos Discretos, Editora E. Blucher, São Paulo, 1996.
- MIYAGI, M.M.; KISIL, M.; SANTOS FILHO, D.J.; MARUYAMA, N.; MIYAGI, P.E. Modelagem de Serviço de Saúde Utilizando Rede de Petri, Anais do 4º SBAI – Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, SBA, São Paulo, 1999.
- MIYAGI, P.E. Control system design, analysis and implementation of discrete event production system by using Mark Flow Graph. These (Doctorate), Tokyo Institute of Technology. Tokyo, 1988.
- MIYAGI, P.E.; RIASCOS, L.A.M., Modeling and analysis of fault-tolerant systems for machining operations based on Petri nets”. Control Engineering Practice, Pergamon-Elsevier Science, Oxford, vol 14, nº 4, pp. 397-408, 2006.
- MOORE, M. L. et al. Complex Control System Design and Implementation using the NIST-RCS *software* library. IEEE Control Systems Magazine, vol.19, nº 6, pp. 12-28, 1999.
- MOREIRA, D.A. Administração da Produção, Thomson Learning, 2002.
- PETERSON, J. Petri Net theory and the modeling of systems. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1981.
- PORCARELLI, S.; CASTALDI, M.; DI GIANDOMENICO, F.; BONDAVALLI, A.; INVERARDI, P. A Framework for Reconfiguration-Based Fault-Tolerance in Distributed Systems. Architecting Dependable Systems II, LNCS 3069, pp. 167–190, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.
- PORTUGAL, P.J.L., Avaliação da Confiança no Funcionamento de redes de Campo. Tese (Doutorado), Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2005.

- RAMADGE, P. J.; WONHAM, W. M. Supervisory Control of a Class of Discrete Event Process, *SIAM Journal of Control and Optimization*, vol. 25, pp. 206-230, 1987.
- REISIG, W. Petri Nets an Introduction. Springer Verlag, New York, 1985.
- RIASCOS, L., Metodologia para detecção e tratamento de falhas em sistemas de manufatura através de redes de Petri, Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- ROSSI, T.M.; BRAUN, J.E. A statistical, rule-based fault detection and diagnostic method for vapor compression air conditioners. *International Journal of Heating, Ventilating, Air Conditioning and Refrigerating Research*, vol. 3, no.1, pp. 19-37, 1997.
- RUSS, G. Situation Dependent Behavior in Building Automation, PhD Thesis, Vienna, 2003.
- RUSSEL, S. & NORVIG, P. Artificial Intelligence, A Modern Approach. Prentice-Hall, 1995.
- SAMPATH, M., SENGUPTA, R., LAFORTUNE, S., SINNAMHOIDEEN, K. AND TENEKETZIS, D.C., Failure diagnosis using discrete-event models. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 4, no. 2, pp.105-124, 1996.
- SANTOS FILHO, D.J. Aspectos de Projeto do Controle de Sistemas Produtivos. Tese (Livre Docência), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
- SANTOS FILHO, D.J. Controle de Sistemas Antropocêtricos de Produção Baseado em Redes de Petri Interpretadas. Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- SANTOS FILHO, D.J.; SILVA, J.R.; MARUYAMA, N.; MIYAGI, P.E. Estruturação da modelagem de processos em sistemas produtivos. *Anais do V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, SBA*, Canela, 2001.
- SANZ, R.; ARZÉN, K.E. Trends in Software and Control. *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 23, no. 3, pp. 61-73, 2003.

- SILVA, M.; TERUEL, E.; VALETTE, R.; PINGAUD, Petri nets and production systems, Lectures on Petri nets II: applications, Lecture notes in Computer Science, vol. 1492, pp. 85-124, 1998.
- SO, A.T.P.; WONG, A.C.W.; WONG, K.C. A new definition of intelligent buildings for Asia, The Intelligent Building Index Manual, 2nd edition, Asian Institute of Intelligent Buildings, Hong Kong, pp. 1 – 20, 2001.
- SOUZA, M.A.B. Estudo comparativo entre a aplicação de sistemas dedicados e a utilização de controladores lógico-programáveis na automação de sistemas prediais. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- TAKAI, S. A Characterization of realisable behavior in Supervisory Control of Timed Event Graphs, Automatica, vol. 33, n.11, pp. 2077-2080, 1997.
- UPTON, D. The management of manufacturing flexibility. California Management Review, Winter, pp.72-89, 1994.
- VALLETE, R. Analysis of Petri nets by Stepwise Refinements. Journal of Computer and Systems Science, vol. 18, pp. 35–46, 1979.
- VASSILIS, G.; ACHILLES, K.; PANAYOTIS, P. Comparative study and categorization of high-level Petri nets. Journal of Systems and Software, vol.43, n.2, pp.133-160, 1998.
- VILLANI, E. Abordagem Híbrida para Modelagem de Sistemas de Ar Condicionado em Edifícios Inteligentes, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- VILLANI, E. Modelagem e análise de sistemas supervisorios híbridos. São Paulo, 2004. 339f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

- VILLANI, E.; KANESHIRO, P. I.; MIYAGI, P. E. Hybrid Stochastic Approach for the Modelling and Analysis of Fire Safety Systems. *Revista Nonlinear Analysis. Theory, Methods and Applications*, Amsterdam, vol. 65, no. 6, p. 1123-1149, 2006.
- VILLANI, E.; MIYAGI, P. E.; VALETTE, R. Modeling and Analysis of Hybrid Supervisory Systems. London: Springer Verlag. v. 1, 245 p, 2007.
- WADA, H.; OKADA, S., An autonomous agent approach for manufacturing execution control systems. *Integrated Computer-Aided Engineering*, vol.9, no. 3, p. 251-262, 2002.
- WEBER, T. S. Tolerância a falhas: conceitos e exemplos. Intech Brasil, São Paulo, v. 52, p. 32-42, 2003
- WINKLER, M., MEY, M. Holonic Manufacturing Systems. *European Production Engineering*, 1994.
- WONG, J.K.W.; LI, H.; WANG, S.W. Intelligent building research: a review, *Automation in Construction*, vol.14, no. 1, pp. 143– 159, 2004.
- WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N.R. Intelligent agents-theories, architectures, and languages. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, Springer Verlag, Berlin, 1995.
- WYNS, J. Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems – the Key to Support Evolution and Reconfiguration. PhD thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 1999.
- ZHANG, Y.; JIANG, J. Fault Tolerant Control System Design with Explicit Consideration of Performance Degradation. *IEEE Transactions On Aerospace And Electronic Systems*, vol. 39, no. 3, PP. 838-848, 2003.
- ZHANG, X.; NORRIE, D.H.; BRENNAN, R.W.; XU, Y. A Multi-level Reconfiguration Control for Holonic PLC. Calgary, pp. 1762-1767, 2000.

ANEXO A

Neste anexo são apresentados os modelos para identificação das holarquias de HSs e HOs, a modelagem das estratégias dos HEs, dos HEs-FTCS, e os modelos de objeto de controle.

Figura A.1. Holarquia de HSs e HOs da segurança de acesso.

Figura A.2.PFSs dos HEs para segurança de acesso.

Figura A.3 .modelos do objeto de controle para controle de acesso.

Figura A.4. PFS dos HEs- FTCS do controle de acesso.

Figura A.5 .Holarquia entre HSs e HOs da segurança contra o fogo.

Figura A.6. PFSs dos HEs da segurança contra o fogo.

Figura A.7. Modelos dos objetos de controle da segurança contra o fogo.

Figura A.8. Holarquias dos HSs e HOs de movimentação.

Figura A.9. PFSs dos HEs de movimentação.

Figura A.10. Modelos dos objetos de controle de movimentação.

Figura A.11.PFS dos HES-FTCS da reconfiguração de movimentação.

Figura A.12 Holarquia dos HSs e HOs da segurança de transmissão de sinais.

Figura A.13. PFSs dos HEs da segurança de transmissão de sinais.

Figura A.14. Modelos dos objetos de controle da segurança de transmissão de sinais.

APÊNDICE I – TRABALHOS PUBLICADOS

Modelagem de sistemas de controle de edifícios inteligentes considerando a ocorrência de falhas. SILVA, R. M., ARAKAKI, J., MIYAGI, P.E. In: Anais do IV CONEM Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, ABCM, Recife, PE, 2006.

Modelagem de sistemas de controle considerando a ocorrência de falhas. SILVA, R.M., ARAKAKI, J., MIYAGI, P.E. In: Anais do XVI CBA Congresso Brasileiro de Automática, SBA, Salvador, BA, 2006.

Modelagem de sistemas de controle da infraestrutura predial considerando a ocorrência de falhas. SILVA, R. M., MORALES, R. A. G., ARAKAKI, J., MIYAGI, P.E. In: Anais do VIII INDUSCON Conferência Internacional de Aplicações Industriais, IEEE, Poços de Caldas, MG, 2008.