

Antonio Gabriel Souza Almeida

**Modelagem de Sistema de Controle de Ar  
Condicionado Baseado em Redes de Petri**

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

São Paulo  
2008

Antonio Gabriel Souza Almeida

# **Modelagem de Sistema de Controle de Ar Condicionado Baseado em Redes de Petri**

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

Departamento de Engenharia Mecatrônica  
e de Sistemas Mecânicos

Orientador: Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi

São Paulo  
2008

# Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi pela orientação sempre pertinente, coerente e lúcida, que permitiram encontrar o rumo correto e o destino alcançado por este trabalho.

A Prof. Dra. Emilia Villani, pela paciência e atenção constantes, com sugestões e contribuições que permitiram que este trabalho alcançasse seu objetivo.

Ao SENAI-CIMATEC, pelo apoio durante todo o desenvolvimento do trabalho, desde a entrada no programa até sua conclusão, permitindo a sua divulgação em vários eventos.

A minha família, minha mãe Conceição, minha esposa Graça e meu filho Henrique, verdadeira motivação, não só para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho, mas para toda minha vida.

# Índice

<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>ii</b>
<b>Lista de Símbolos.....</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Sinais.....</b>	<b>vi</b>
<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivação e Justificativa.....	1
1.2. Objetivo.....	5
1.3. Organização do trabalho.....	6
<b>2. Modelagem e Análise de Sistemas de Ar Condicionado....</b>	<b>7</b>
2.1. Sistemas de Condicionamento de Ar em Edifícios Inteligentes.....	7
2.2. Classificação de Sistemas.....	13
2.3. Modelagem de Sistemas Híbridos.....	14
2.4. Controle Baseado em Redes de Petri.....	17
2.5. Comentários Adicionais.....	20

<b>3. Metodologia.....</b>	<b>21</b>
3.1. Metodologia Original.....	21
3.2. Modificações propostas.....	26
3.3. Comentários Adicionais.....	32
<b>4. Exemplo de aplicação da metodologia.....</b>	<b>33</b>
4.1. O Senai-Cimatec.....	33
4.2. Definição e modelagem das estratégias de gerenciamento.....	39
4.3. Construção dos modelos dinâmicos.....	44
4.3.1. Modelagem do sistema de gerenciamento.....	44
4.3.2. Modelagem dos sistemas de controle local.....	58
4.3.3. Modelagem do sistema de ar condicionado.....	70
4.4. Análise estrutural e dinâmica dos modelos.....	92
<b>5. Conclusões.....</b>	<b>104</b>
<b>6. Referências Bibliográficas.....</b>	<b>107</b>

# Lista de Figuras

Figura 1.1. <i>Building Management System</i> .....	04
Figura 2.1. Esquema de um sistema de ar condicionado central por expansão indireta.....	09
Figura 2.2. Esquema de operação para sistema VAV.....	11
Figura 2.3. SED x SVC x Sistema Híbrido.....	13
Figura 2.4. Interações do sistema de ar condicionado em EI.....	14
Figura 2.5. Rede de Petri Predicado/Transição Diferencial.....	18
Figura 3.1. Etapas da metodologia (derivado de Villani & Miyagi, 2004).....	22
Figura 3.2. Detalhamento da etapa Construção dos Modelos (derivado de Villani & Miyagi, 2004).....	23
Figura 3.3. Exemplo de um modelo em <i>Production Flow Schema</i> – PFS.....	24
Figura 3.4. Detalhamento para estratégia [ <i>Redução da Produção de Frio</i> ] (derivado de Villani & Miyagi, 2004).....	28
Figura 3.5. Detalhamento proposto para estratégia [ <i>Redução da Produção de Frio</i> ].....	29
Figura 3.6. Detalhamento proposto para sistema de controle local de <i>chiller</i> .....	30
Figura 3.7. Modelo do fluxo de água gelada no resfriamento do <i>chiller</i> .....	32
Figura 4.1. Planta baixa do nível 1.....	34
Figura 4.2. Planta baixa do nível 2.....	35

Figura 4.3. Planta baixa do nível 3.....	35
Figura 4.4. Planta baixa do nível 4.....	36
Figura 4.5. Modelo em PFS das estratégias de controle para zona 2.....	45
Figura 4.6. Modelo em PFS das estratégias de controle para Zonas 1 e 3.....	45
Figura 4.7. Modelo PFS das estratégias para equipamentos de produção de água gelada..	46
Figura 4.8. Detalhamento da atividade [ Incêndio – para as Zonas 1 ou 3].....	46
Figura. 4.9. Detalhamento da atividade [Área em Parada Longa – para a Zona 1].....	47
Figura 4.10. Detalhamento da atividade [Área Utilizada – para a Zona 1].....	48
Figura 4.11. Estratégia de gerenciamento para [ Área não utilizada] (E3) ou [ Área em Parada Longa ] (E2).....	49
Figura. 4.12. Estratégia de gerenciamento para [ Área utilizada ] (E1).....	51
Figura 4.13. Estratégia de controle [Aumento na produção de frio].....	54
Figura 4.14. Detalhamento da estratégia [Redução da Produção de Frio].....	56
Figura 4.15. Novo detalhamento da estratégia [ Redução da Produção de Frio].....	59
Figura 4.16. Controle local de tomada de ar exterior.....	59
Figura 4.17. Controle local de <i>fan coil</i> .....	61
Figura 4.18. Controle local de VAV.....	63
Figura 4.19 Controle local de <i>chillers</i> .....	64

Figura 4.20. Controle local de desempenho dos <i>chillers</i> .....	65
Figura 4.21. Controle local de bombas primárias.....	68
Figura 4.22. Controle local da bomba secundária 1.....	69
Figura 4.23. Controle local das bombas secundárias 2 e 3.....	70
Figura 4.24. Sub-sistemas do ar condicionado.....	71
Figura 4.25. Detalhamento da atividade [Condicionamento de ar – Sub-sistema i].....	72
Figura 4.26. Detalhamento da atividade [ Distribuição do ar].....	73
Figura 4.27. Detalhamento da atividade [ Produção de Água Gelada].....	74
Figura 4.28. Modelo da atividade [Mistura do ar de retorno].....	76
Figura 4.29. Modelo da atividade [Mistura do ar de retorno com o ar de renovação].....	77
Figura 4.30. Modelo das atividades que ocorrem no <i>fan coil</i> .....	78
Figura 4.31. Modelo das atividades relacionadas ao insuflamento e retorno de ar.....	81
Figura 4.32. Detalhamento da atividade [Mistura de água gelada].....	87
Figura 4.33. Detalhamento da atividade [Imposição de fluxo em bombas].....	89
Figura 4.34. Detalhamento da atividade [Divisão no fluxo de água gelada].....	90
Figura 4.35. Modelo do sistema de água gelada no simulador Virtual Object Net.....	94
Figura 4.36. Simulação 2 do sistema de água gelada indisponibilizando <i>chiller</i> 1 e BS1 no simulador.....	98

Figura 4.37. Modelo do sistema de distribuição de ar no simulador.....	101
Figura 4.38. Modelo do fluxo de ar nos ramais no simulador.....	103

# Lista de Símbolos e Abreviaturas

$\varepsilon$  – efetividade do trocador de calor

$\sigma$  - densidade

$\tau$  - constante de tempo do sistema

A – seção reta de tubulação ou duto

AL - cada lugar  $p_i$  um vetor  $X_{p_i}$  de variáveis pertencentes a X

AC - função de habilitação  $e_i(.)$  a cada transição  $t_i$ ,

AA - função de junção  $j_i(.)$  a cada transição  $t_i$ ,

AF - sistema de equações diferenciais algébricas  $F_i$ , cujas variáveis são  $X_{p_i}$  e suas derivadas

BMS - *building management system*

BP – bomba primária

BS – bomba secundária

C - capacidade térmica

$C_p$  – calor específico do ar a pressão constante

CT - carga térmica

CoPN - *control Petri net*

g - gravidade

$F_{i\text{ cor}}$  – fator de correção devido a cor da parede ou teto

IA – inter-atividade

L – comprimento equivalente de perda de carga em linha reta

$L_r$  - conjunto finito de lugares de dimensão n

NTU – unidades de transferência térmica da serpentina

P - pressão

PFS - *production flow schema*

PID – proporcional integral derivativo

Pre:  $L_r \times T_r$  - arcos orientados de lugares para transições

Pos:  $T_r \times L_r$  - arcos orientados de transições para lugares

PTD – predicado transição diferencial

Q - vazão

SED – sistema a eventos discretos

SFC - *sequential function chart*

SIPN - *signal interpreted Petri net*

STL - *statement list*

SVC – sistema de variáveis contínuas

T – temperatura

$T_r$  - conjunto finito de transições de dimensão  $m$

$t$  – tempo

TAE – tomada de ar exterior

TR – tonelada de refrigeração

U – coeficiente de incidência solar

UA – coeficiente global de transferência de calor

VAC – volume de ar constante

VAV – volume de ar variável

X - conjunto de variáveis formais em uma rede

Z – diferença de altura

# Lista de Sinais

$A_N$  – Sinal do supervisorio (intervenção do operador) tornando *fan coil* N indisponível

$B_N$  – Sinal do supervisorio (intervenção do operador) tornando bomba N indisponível

$G_N$  – Sinal do supervisorio (intervenção do operador) tornando *chiller* N indisponível

$F_N$  – Sinal do supervisorio (intervenção do operador) desligando o *chiller* N, em 100%

$D_N$  – Sinal de equipamento indisponível para uso

$I_X$  – Sinal de programação do supervisorio ou do sensor de presença x

$O_N$  – Sinal de condição *fan coil* N ligado

$Y_N$  – Sinal de condição *chiller* N ligado

$W_N$  – Sinal de condição bomba N ligada

$R_N$  – Sinal de condição bomba N desligada e disponível para uso

$U_Y$  – Sinal de condição sistema de controle da VAV y em funcionamento

$E1_N$  – Sinais de habilitação da estratégia área utilizada

$E2_N$  – Sinais de habilitação da estratégia área em parada longa

$E3_N$  – Sinais de habilitação da estratégia área não utilizada

$E4_N$  – Sinais de habilitação da estratégia aumento de produção de frio

$E5_N$  – Sinais de habilitação da estratégia redução de produção de frio

$DC_N$  – Sinal determinando o desligamento do *chiller*, a partir do sistema de controle de desempenho.

$CM_N$  – Sinal que o *chiller* N está atuando com desempenho máximo (100%)

S - Sinal do sensor na saída das bombas primárias:  $T > T_{SETPOINT\ CHILLER}$

# Resumo

Dentre as tendências de uso racional de recursos, principalmente energia, e da necessidade de assegurar a produtividade e qualidade na execução de atividades produtivas, destaca-se o conceito de edifício inteligente. Este ambiente materializa o conceito de integração dos sistemas prediais potencializando a otimização dos recursos e a eficiência do trabalho humano.

Neste contexto, abordagens conceituais baseadas em sistemas a eventos discretos e técnicas derivadas de rede de Petri têm sido introduzidas como uma alternativa eficaz de modelagem e análise das soluções de integração dos sistemas prediais. Um resultado expressivo destas iniciativas são os métodos propostos para a modelagem e análise de estratégias de gerenciamento de sistemas de ar condicionado, utilizando uma abordagem híbrida, onde são considerados os aspectos de sistemas a eventos discretos e as variáveis de dinâmica contínua.

Contudo, as abordagens e métodos existentes são limitados a soluções específicas de implementação, como os sistemas de ar condicionado com volume de ar contínuo. Assim, o presente trabalho introduz uma extensão destas abordagens para modelar e analisar soluções de automação predial que incluem sistemas de ar condicionado com volume de ar variável. A eficiência deste método na concepção e validação destas soluções é ilustrada através de um estudo de caso.

# Abstract

Among the trends of rational use of resources, especially energy, and the need to ensure productivity and quality in the implementation of productive activities, there is the concept of intelligent building. This environment materializes the concept of integrating building systems, powering the optimization of resources and the efficiency of human labor.

In this context, conceptual approaches that are based on systems of discrete events and techniques, which are derived from the Petri nets, have been introduced as an effective alternative to modeling and analysis of solutions of building systems integration. A significant result of these initiatives are the proposed methods for modeling and the analysis of strategies for air conditioning systems management using a hybrid approach where the aspects of systems of discrete events and the variables of continuing dynamic are considered.

However, the existing methods and approaches are limited to their specific implementation solutions, such as air conditioning systems with continuous volume of air. Thus, this work introduces an extension of these approaches to model and analyze the building automation solutions that include air conditioning systems with variable volume of air. The efficiency of this method in the design and validation of these solutions is illustrated through a case study.