

EMERSON DONAISKY

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE
TÉCNICAS DE CONTROLE PARA CONFORTO TÉRMICO
EM EDIFICAÇÕES**

CURITIBA

Setembro, 2008

EMERSON DONAISKY

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE
TÉCNICAS DE CONTROLE PARA CONFORTO TÉRMICO
EM EDIFICAÇÕES**

Documento apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas.

Orientador:

Gustavo Henrique da Costa Oliveira

Co-orientador:

Nathan Mendes

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ - PUCPR

CURITIBA

Setembro, 2008

Aos meus pais, Ivaldo e Terezinha,
pela minha formação educacional.

Agradecimentos

Aos meus pais Ivaldo Donaisky e Terezinha Rosa Leichenakosky Donaisky, pelo apoio aos meus estudos na minha formação educacional, pela compreensão das necessidades de tempo e dedicação para a elaboração deste trabalho e pelo amor e carinho dedicados em todos estes anos. Também agradeço aos meus irmãos Fabio Donaisky e Diego Donaisky pelo apoio ao longo deste trabalho.

À minha namorada Gisele Sguissardi, por seu amor, carinho, incentivo e compreensão durante esses anos de mestrado.

Aos professores orientadores Gustavo Henrique da Costa Oliveira e Nathan Mendes pelo apoio, compreensão, paciência, dedicação e conhecimentos transmitidos.

Aos professores dos grupos de engenharia mecatrônica e mecânica pelo auxílio na resolução dos problemas que surgiram durante a pesquisa.

Aos meus amigos José Walter Meissner e Bruno César Reginato, pelo auxílio na realização de algumas tarefas, como no desenvolvimento de um circuito de acionamento, na implementação do aparato experimental e na concepção dos *softwares* utilizados na pesquisa.

Aos meus colegas de laboratório, que de forma direta ou indireta contribuíram na elaboração deste trabalho, em especial ao Roberto Zanetti Freire pelo primeiro trabalho realizado sobre o assunto no grupo de pesquisa, possibilitando a realização deste trabalho.

À FINEP, Financiadora de Estudos e Projetos, e ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo auxílio financeiro e suporte a este trabalho.

A todos que me ajudaram e tornaram este trabalho possível.

Sumário

| | |
|--|---------|
| Lista de Figuras | p. vii |
| Lista de Tabelas | p. xiii |
| Lista de Símbolos | p. xiv |
| Lista de Abreviaturas | p. xvii |
| Resumo | p. xix |
| Abstract | p. xx |
| 1 Introdução | p. 1 |
| 1.1 Motivação | p. 1 |
| 1.2 Conforto Térmico | p. 4 |
| 1.3 Controle de Sistemas de Climatização | p. 7 |
| 1.3.1 Controle de Temperatura e de Umidade | p. 8 |
| 1.3.2 Controle com Cálculo de Índice de Conforto Térmico | p. 9 |
| 1.4 Estrutura da Dissertação | p. 13 |
| 2 Controle de Conforto via Otimização da Referência | p. 16 |
| 2.1 Introdução | p. 16 |
| 2.2 Estratégia de Controle | p. 17 |
| 2.3 Controle Clássico para Sistemas de Climatização | p. 18 |
| 2.3.1 Controle PID | p. 19 |

| | | |
|----------|---|--------------|
| 2.3.2 | Modificações no Controle PID | p. 20 |
| 2.3.2.1 | Controle PID discreto | p. 21 |
| 2.4 | Controle Preditivo para Sistemas de Climatização | p. 22 |
| 2.4.1 | O Algoritmo MBPC e a lei de controle CRHPC | p. 24 |
| 2.4.2 | Estabilidade no CRHPC | p. 26 |
| 2.4.2.1 | Monotonicidade do Critério de Custo | p. 26 |
| 2.4.2.2 | Estabilidade no CRHPC via Monotonicidade do Critério de Custo | p. 28 |
| 2.5 | Resultados Numéricos | p. 31 |
| 2.5.1 | Definição do Ambiente de Simulação | p. 31 |
| 2.5.2 | Análise para condições normais de operação | p. 35 |
| 2.5.2.1 | Controlador PID | p. 36 |
| 2.5.2.2 | Controlador CRHPC | p. 38 |
| 2.5.2.3 | Resumo | p. 38 |
| 2.5.3 | Análise para mudanças nas condições de operação | p. 40 |
| 2.5.3.1 | Controlador PID | p. 41 |
| 2.5.3.2 | Controlador CRHPC | p. 41 |
| 2.5.3.3 | Resumo | p. 41 |
| 2.5.4 | Análise para adição de perturbação | p. 43 |
| 2.5.4.1 | Controlador PID | p. 45 |
| 2.5.4.2 | Controlador CRHPC | p. 45 |
| 2.5.4.3 | Resumo | p. 45 |
| 2.6 | Conclusões do Capítulo | p. 47 |
| 3 | Controle de Conforto via inclusão do índice PMV na Malha de Con- trole | p. 49 |
| 3.1 | Introdução | p. 49 |

| | | |
|----------|---|--------------|
| 3.2 | Modelo da Edificação | p. 50 |
| 3.3 | Controle com Realimentação do Sinal de PMV | p. 51 |
| 3.4 | Controle Preditivo para Sistemas de Climatização | p. 52 |
| 3.4.1 | Estabilidade no CRHPC com inclusão do índice PMV | p. 54 |
| 3.5 | Resultados Numéricos | p. 57 |
| 3.5.1 | Definição do Ambiente de Simulação | p. 57 |
| 3.5.2 | Análise para condições normais de operação | p. 59 |
| 3.5.2.1 | Controlador PID | p. 62 |
| 3.5.2.2 | Controlador PMV-CRHPC | p. 62 |
| 3.5.2.3 | Resumo | p. 64 |
| 3.5.3 | Análise para mudanças nas condições de operação | p. 65 |
| 3.5.3.1 | Controlador PID | p. 66 |
| 3.5.3.2 | Controlador PMV-CRHPC | p. 66 |
| 3.5.3.3 | Resumo | p. 66 |
| 3.5.4 | Análise para adição de perturbação | p. 69 |
| 3.5.4.1 | Controlador PID | p. 70 |
| 3.5.4.2 | Controlador PMV-CRHPC | p. 70 |
| 3.5.4.3 | Resumo | p. 70 |
| 3.6 | Conclusões do Capítulo | p. 73 |
| 4 | Resultados Experimentais | p. 74 |
| 4.1 | Aparato Experimental | p. 74 |
| 4.2 | Definição do Ambiente de Testes | p. 76 |
| 4.3 | Análise para condições normais de operação | p. 81 |
| 4.3.1 | Controlador PID com geração de referência ótima | p. 83 |
| 4.3.2 | Controlador PID com inclusão do índice PMV na malha | p. 86 |
| 4.3.3 | Controlador CRHPC com geração de referência ótima | p. 88 |

| | | |
|----------|---|--------|
| 4.4 | Análise para mudanças nas condições de operação | p. 90 |
| 4.4.1 | Controlador PID com inclusão do índice PMV na malha | p. 91 |
| 4.4.2 | Controlador CRHPC com geração de referência ótima | p. 92 |
| 4.5 | Análise para adição de perturbação | p. 95 |
| 4.5.1 | Controlador PID com inclusão do índice PMV na malha | p. 96 |
| 4.6 | Conclusões do Capítulo | p. 99 |
| 5 | Conclusões e Trabalhos Futuros | p. 101 |
| 5.1 | Trabalhos Futuros | p. 102 |
| | Referências | p. 104 |
| | Apêndices | p. 111 |

Lista de Figuras

| | | |
|------|--|-------|
| 1.1 | Consumo de energia no Brasil por setores. Fonte: FURNAS (2006). . . | p. 2 |
| 2.1 | Estratégia de geração de referência ótima. | p. 17 |
| 2.2 | Controlador PID de temperatura. | p. 19 |
| 2.3 | Controlador de temperatura com preditor de Smith. | p. 20 |
| 2.4 | Controlador PID <i>Antiwindup</i> de temperatura. | p. 21 |
| 2.5 | Estratégia de controle preditivo. | p. 22 |
| 2.6 | Custo no CRHPC. | p. 30 |
| 2.7 | Dimensões do ambiente utilizado nas simulações. | p. 32 |
| 2.8 | Temperatura externa, umidade relativa e radiação solar total para o período de simulação em Curitiba - Brasil. | p. 33 |
| 2.9 | Modelos para temperatura interna à edificação com aquecedor. | p. 34 |
| 2.10 | Modelos para temperatura interna à edificação com aquecedor nas quatro horas de resposta ao degrau. | p. 35 |
| 2.11 | Referência de temperatura, temperatura interna e umidade relativa para a simulação em condições normais de operação com controlador PID. . . | p. 37 |
| 2.12 | Conforto térmico e sinal de controle para a simulação em condições normais de operação com controlador PID. | p. 37 |
| 2.13 | Referência de temperatura, temperatura interna e umidade relativa para a simulação em condições normais de operação com controlador CRHPC. . . | p. 38 |
| 2.14 | Conforto térmico e sinal de controle para a simulação em condições normais de operação com controlador CRHPC. | p. 39 |
| 2.15 | Variação nos parâmetros individuais para os testes de mudanças nas condições de operação. | p. 40 |

| | | |
|------|--|-------|
| 2.16 | Referência de temperatura, temperatura interna e umidade relativa para a simulação com mudanças nas condições de operação com controlador PID. | p. 41 |
| 2.17 | Conforto térmico e sinal de controle para a simulação com mudanças nas condições de operação com controlador PID. | p. 42 |
| 2.18 | Referência de temperatura, temperatura interna e umidade relativa para a simulação com mudanças nas condições de operação com controlador CRHPC. | p. 42 |
| 2.19 | Conforto térmico e sinal de controle para a simulação com mudanças nas condições de operação com controlador CRHPC. | p. 43 |
| 2.20 | Sinal de perturbação para os testes de adição de perturbação. | p. 44 |
| 2.21 | Referência de temperatura, temperatura interna e umidade relativa para a simulação com adição de perturbação para o controlador PID. | p. 45 |
| 2.22 | Conforto térmico e sinal de controle para a simulação com adição de perturbação para o controlador PID. | p. 46 |
| 2.23 | Referência de temperatura, temperatura interna e umidade relativa para a simulação com adição de perturbação para o controlador CRHPC. | p. 46 |
| 2.24 | Conforto térmico e sinal de controle para a simulação com adição de perturbação para o controlador CRHPC. | p. 47 |
| 3.1 | Estrutura da edificação. | p. 50 |
| 3.2 | Modelo não-linear de PMV. | p. 51 |
| 3.3 | Estratégia de inclusão do índice PMV na malha de controle. | p. 51 |
| 3.4 | Estratégia de inclusão do índice PMV na malha de controle para controle preditivo. | p. 52 |
| 3.5 | Custo no PMV-CRHPC. | p. 56 |
| 3.6 | Estrutura da edificação. | p. 58 |
| 3.7 | Modelos para índice PMV à edificação com aquecedor. | p. 59 |
| 3.8 | Modelos para índice PMV à edificação com aquecedor nas quatro horas de resposta ao degrau. | p. 60 |

| | | |
|------|---|-------|
| 3.9 | Modelos para umidade relativa interna à edificação com aquecedor. . . | p. 60 |
| 3.10 | Modelos para umidade relativa interna à edificação com aquecedor nas quatro horas de resposta ao degrau. | p. 61 |
| 3.11 | Temperatura interna e umidade relativa para a simulação em condições normais de operação com controlador PID. | p. 62 |
| 3.12 | Conforto térmico e sinal de controle para a simulação em condições normais de operação com controlador PID. | p. 63 |
| 3.13 | Temperatura interna e umidade relativa para a simulação em condições normais de operação com controlador PMV-CRHPC. | p. 63 |
| 3.14 | Conforto térmico e sinal de controle para a simulação em condições normais de operação com controlador PMV-CRHPC. | p. 64 |
| 3.15 | Variação nos parâmetros individuais para os testes de mudanças nas condições de operação. | p. 66 |
| 3.16 | Temperatura interna e umidade relativa para a simulação com mudanças nas condições de operação com controlador PID. | p. 67 |
| 3.17 | Conforto térmico e sinal de controle para a simulação com mudanças nas condições de operação com controlador PID. | p. 67 |
| 3.18 | Temperatura interna e umidade relativa para a simulação com mudanças nas condições de operação com controlador PMV-CRHPC. | p. 68 |
| 3.19 | Conforto térmico e sinal de controle para a simulação com mudanças nas condições de operação com controlador PMV-CRHPC. | p. 68 |
| 3.20 | Sinal de perturbação para os testes de adição de perturbação. | p. 70 |
| 3.21 | Temperatura interna e umidade relativa para a simulação com adição de perturbação para o controlador PID. | p. 71 |
| 3.22 | Conforto térmico e sinal de controle para a simulação com adição de perturbação para o controlador PID. | p. 71 |
| 3.23 | Temperatura interna e umidade relativa para a simulação com adição de perturbação para o controlador PMV-CRHPC. | p. 72 |
| 3.24 | Conforto térmico e sinal de controle para a simulação com adição de perturbação para o controlador PMV-CRHPC. | p. 72 |

| | | |
|------|--|-------|
| 4.1 | Implementação do aparato experimental. | p. 75 |
| 4.2 | Sensor RHT-DM. | p. 76 |
| 4.3 | Sensor EE66. | p. 76 |
| 4.4 | SSR N225AC8. | p. 76 |
| 4.5 | <i>Hardware</i> NI PCI-6251. | p. 76 |
| 4.6 | Aquecedor a óleo. | p. 77 |
| 4.7 | Dimensões da edificação para testes em tempo real. | p. 77 |
| 4.8 | Posicionamento do aparato experimental. | p. 78 |
| 4.9 | Pontos 1 e 2 de sensoriamento na edificação. | p. 79 |
| 4.10 | Edificação para testes em tempo real, vista noroeste. | p. 79 |
| 4.11 | Edificação para testes em tempo real, vista nordeste. | p. 80 |
| 4.12 | Modelos para temperatura interna à edificação com aquecedor. | p. 81 |
| 4.13 | Modelos para índice PMV interno à edificação com aquecedor. | p. 81 |
| 4.14 | Temperatura externa nos testes de identificação. | p. 82 |
| 4.15 | Sinais de temperatura e umidade relativa para o teste em condições nor- mais de operação utilizando o controlador PID com geração de referência ótima. | p. 84 |
| 4.16 | Conforto térmico e sinal de controle para o teste em condições normais de operação utilizando o controlador PID com geração de referência ótima. | p. 85 |
| 4.17 | Sinais de temperatura e umidade relativa para o teste em condições nor- mais de operação utilizando o controlador PID com SP e geração de referência ótima. | p. 85 |
| 4.18 | Conforto térmico e sinal de controle para o teste em condições normais de operação utilizando o controlador PID com SP e geração de referência ótima. | p. 86 |
| 4.19 | Sinais de temperatura e umidade relativa para o teste em condições nor- mais de operação utilizando o controlador PID com inclusão do índice PMV na malha de controle. | p. 87 |

-
- 4.20 Conforto térmico e sinal de controle para o teste em condições normais de operação utilizando o controlador PID com inclusão do índice PMV na malha de controle. p. 87
- 4.21 Sinais de temperatura e umidade relativa para o teste em condições normais de operação utilizando o controlador PID com SP e inclusão do índice PMV na malha de controle. p. 88
- 4.22 Conforto térmico e sinal de controle para o teste em condições normais de operação utilizando o controlador PID com SP e inclusão do índice PMV na malha de controle. p. 89
- 4.23 Sinais de temperatura e umidade relativa para o teste em condições normais de operação utilizando o controlador CRHPC com geração de referência ótima. p. 89
- 4.24 Conforto térmico e sinal de controle para o teste em condições normais de operação utilizando o controlador CRHPC com geração de referência ótima. p. 90
- 4.25 Variação nos parâmetros individuais para os testes de mudanças nas condições de operação. p. 91
- 4.26 Sinais de temperatura e umidade relativa para o teste com mudanças nas condições de operação utilizando o controlador PID com inclusão do índice PMV na malha de controle. p. 92
- 4.27 Conforto térmico e sinal de controle para o teste com mudanças nas condições de operação utilizando o controlador PID com inclusão do índice PMV na malha de controle. p. 93
- 4.28 Sinais de temperatura e umidade relativa para o teste com mudanças nas condições de operação utilizando o controlador PID com SP e inclusão do índice PMV na malha de controle. p. 93
- 4.29 Conforto térmico e sinal de controle para o teste com mudanças nas condições de operação utilizando o controlador PID com SP e inclusão do índice PMV na malha de controle. p. 94
- 4.30 Sinais de temperatura e umidade relativa para o teste com mudanças nas condições de operação utilizando o controlador CRHPC com geração de referência ótima. p. 94

| | | |
|------|---|-------|
| 4.31 | Conforto térmico e sinal de controle para o teste com mudanças nas condições de operação utilizando o controlador CRHPC com geração de referência ótima. | p. 95 |
| 4.32 | Sinal de perturbação para os testes de adição de perturbação. | p. 96 |
| 4.33 | Sinais de temperatura e umidade relativa para o teste com mudanças nas condições de operação utilizando o controlador PID com inclusão do índice PMV na malha de controle. | p. 97 |
| 4.34 | Conforto térmico e sinal de controle para o teste com mudanças nas condições de operação utilizando o controlador PID com inclusão do índice PMV na malha de controle. | p. 97 |
| 4.35 | Sinais de temperatura e umidade relativa para o teste com mudanças nas condições de operação utilizando o controlador PID com SP e inclusão do índice PMV na malha de controle. | p. 98 |
| 4.36 | Conforto térmico e sinal de controle para o teste com mudanças nas condições de operação utilizando o controlador PID com SP e inclusão do índice PMV na malha de controle. | p. 98 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|--|-------|
| 1.1 | Relação entre PMV, PPD e sensação térmica. | p. 6 |
| 2.1 | Resumo da análise para condições normais de operação. | p. 39 |
| 2.2 | Resumo da análise para mudanças nas condições de operação. | p. 43 |
| 2.3 | Resumo da análise para adição de perturbação. | p. 47 |
| 3.1 | Resumo da análise para condições normais de operação. | p. 65 |
| 3.2 | Resumo da análise para mudanças nas condições de operação. | p. 69 |
| 3.3 | Resumo da análise para adição de perturbação. | p. 73 |

Lista de Símbolos

T_{bs} - temperatura de bulbo seco ou temperatura ambiente ($^{\circ}C$), p. 5

ϕ - umidade relativa (%), p. 5

T_{rm} - temperatura radiante média ($^{\circ}C$), p. 5

v - velocidade do ar (m/s), p. 5

M - taxa metabólica (W/m^2), p. 5

I_{cl} - índice de vestimentas (Clo), p. 5

W - potência mecânica efetiva (W/m^2), p. 6

h_c - coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície da pele (W/m^2K), p. 6

f_{cl} - fator de área que corresponde à razão entre a área do corpo coberta pela vestimenta e a área exposta ($-$), p. 6

p_V - pressão parcial de vapor da água (kPa), p. 6

P_{SAT} - pressão de saturação de vapor da água (kPa), p. 7

T_{cl} - temperatura da superfície da vestimenta ($^{\circ}C$), p. 7

t - instante de tempo contínuo, p. 19

s - variável complexa da transformada de Laplace, p. 19

u - sinal de controle, p. 19

e - sinal de erro entre a referência e a saída, p. 19

w - sinal de referência, p. 19

y - sinal de saída, p. 19

$U(s)$ - transformada de Laplace do sinal de controle, p. 19

$E(s)$ - transformada de Laplace do sinal de erro, p. 19

- K_p - ganho proporcional, p. 19
- K_i - ganho integral, p. 19
- K_d - ganho derivativo, p. 19
- k - instante de tempo discreto, p. 21
- Δt - período de amostragem, p. 21
- N_y - horizonte de previsão, p. 24
- N_1 - horizonte inicial de previsão, p. 24
- N_u - horizonte de controle, p. 24
- q^{-1} - operador atraso, p. 24
- d - atraso de transporte, p. 24
- n_a - ordem do denominador do modelo de previsão, p. 24
- n_b - ordem do numerador do modelo de previsão, p. 24
- n_c - ordem do numerador do modelo de ruído, p. 24
- $A(q^{-1})$ - denominador do modelo de previsão polinomial, p. 24
- $B(q^{-1})$ - numerador do modelo de previsão polinomial, p. 24
- $C(q^{-1})$ - numerador do modelo de ruído polinomial, p. 24
- \hat{y} - sinal de saída estimada, p. 25
- $x(k)$ - estado do sistema, p. 25
- J - critério de custo, p. 25
- μ - ponderação do erro de previsão de saída, p. 26
- λ - ponderação do sinal de controle, p. 26
- Δu - variação do sinal de controle, p. 26
- m - horizonte de restrições terminais, p. 26
- n - ordem do sistema incremental com atraso unitário, p. 26
- $\Delta \underline{u}_c$ - vetor de controles calculado e congelado, p. 27
- $\Delta \underline{u}$ - vetor de controle ótimo, p. 27

- y_{Temp} - modelo para temperatura interna ($^{\circ}\text{C}$), p. 33
- y_{Umi} - modelo para umidade relativa interna ($-$), p. 33
- U - sinal de entrada do atuador (kW), p. 33
- T_{EXT} - temperatura externa ($^{\circ}\text{C}$), p. 33
- H_{EXT} - umidade relativa externa ($-$), p. 33
- S_{EXT} - radiação solar total (W/m^2), p. 33
- ξ - sinal de ruído ($-$), p. 33
- T - constante de tempo da planta, p. 34
- K - ganho da planta, p. 34
- L - atraso de transporte da planta, p. 34
- F_{Temp} - modelo FOPDT para a temperatura interna ($^{\circ}\text{C}$), p. 34
- ϵ - parâmetro para sintonia de controlador PID, p. 36
- t_r - tempo de subida (s), p. 36
- n_{am} - número de amostras, p. 36
- \hat{y}_{PMV} - sinal de saída de PMV estimada, p. 52
- F_{PMV} - modelo FOPDT para o índice PMV ($-$), p. 58
- F_{Umi} - modelo FOPDT para umidade relativa interna ($-$), p. 59

Lista de Abreviaturas

- PMV - *Predicted Mean Vote* - Voto Médio Estimado, p. 3
- HVAC - *Heating, Ventilating and Air Conditioning* - Aquecimento, Ventilação e Condicionamento de Ar, p. 3
- ET - *Effective Temperature* - Temperatura Efetiva, p. 4
- LEE - *Least Enthalpy Estimator*, p. 5
- PPD - *Predicted Percentage of Dissatisfied* - Porcentagem Estimada de Insatisfeitos, p. 5
- PID - *Proportional, Integral and Derivative* - Proporcional, Integral e Derivativo, p. 8
- GPC - *Generalized Predictive Controller* - Controlador Preditivo Generalizado, p. 8
- MBPC - *Model Based Predictive Controller* - Controle Preditivo Baseado em Modelo, p. 10
- ET* - *New Effective Temperature* - Nova Temperatura Efetiva, p. 12
- PLSS - *Portable Life Support System* - Sistema Portátil de Suporte a Vida, p. 12
- LCG - *Liquid Cooling Garment* - Traje com Líquido Refrigerado, p. 12
- CRHPC - *Constrained Receding Horizon Predictive Control* - Controle Preditivo com Restrições Terminais, p. 14
- SP - *Smith Predictor* - Preditor de Smith, p. 19
- IDCOM - *Identification Command* - Identificação e Comando, p. 22
- DMC - *Dynamic Matrix Control* - Matriz Dinâmica de Controle, p. 22
- EHAC - *Extended Horizon Adaptive Control* - Controle Adaptativo com Horizonte Estendido, p. 23
- EPSAC - *Extended Prediction Self-Adaptive Control* - Controle Preditivo Auto-Adaptativo Estendido, p. 23
- CRHPC - *Constrained Receding Horizon Predictive Control* - Controle Preditivo com

Restrições Terminais, p. 23

ARIMAX - *Auto Regressive Integrated Moving Average Model with eXogeneous input* - Auto-Regressivo Média Móvel Integral com Entrada Exógena, p. 24

FIR - *Finite Impulse Response* - Resposta ao Impulso Limitada, p. 24

OBF - *Orthonormal Basis Functions* - Bases de Funções Ortonormais, p. 24

ARMAX - *Auto Regressive Moving Average Model with eXogeneous input* - Auto-Regressivo Média Móvel com Entrada Exógena, p. 32

FOPDT - *First Order plus Dead Time* - Primeira Ordem com Atraso de Transporte, p. 34

IMC - *Internal Model Controller* - Controle por Modelo Interno, p. 35

MSE - *Mean Square Error* - Erro Médio Quadrático, p. 36

PMV-CRHPC - *PMV Constrained Receding Horizon Predictive Control* - Controle Preditivo com Restrições Terminais e inclusão do índice PMV, p. 53

PWM - *Pulse Width Modulation* - Modulação por Largura de Pulsos, p. 75

SSR - *Solid State Relay* - Relé de Estado Sólido, p. 75

LST - *Thermal Systems Laboratory* - Laboratório de Sistemas Térmicos, p. 76

PUCPR - *Pontifical Catholic University of Paraná* - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, p. 76

Resumo

Este trabalho aborda o problema de desenvolvimento e análise numérica e experimental de algoritmos para controle de conforto em sistemas de climatização com uma variável manipulada, como é o caso dos sistemas de aquecimento e condicionamento de ar mais usuais.

O objetivo de um equipamento de climatização é promover a sensação de conforto térmico aos ocupantes da edificação. Para tanto, será utilizado o PMV (*Predicted Mean Vote*), que é um índice para medição do nível de conforto térmico em ambientes climatizados. Duas estratégias serão apresentadas e analisadas: *i*) a primeira está baseada na definição de uma malha externa de controle que gera sinais de referência de temperatura para a otimização do PMV, sendo a malha interna definida através de um algoritmo de controle linear para temperatura. *ii*) a segunda está baseada na inclusão do modelo de PMV na malha de controle, atuando como um sensor de PMV ou como modelo de previsão, tornando-a uma malha de controle não-linear.

São utilizados dois tipos de algoritmos de controle para verificar o desempenho dos sistemas de controle de conforto. Um é baseado em estruturas clássicas de controle baseadas no algoritmo PID e o outro é uma classe dos controladores preditivos caracterizados por apresentar restrições terminais, cuja idéia é garantir ao fim deste intervalo desempenho ótimo do sistema em um intervalo de tempo futuro e, garantir que a saída seja igual à referência. Esta propriedade permite derivar resultados sobre a estabilidade do sistema em malha fechada, as quais são analisadas neste documento.

Resultados em simulação e em tempo real destas estratégias de controle são apresentados. Os resultados em tempo real foram obtidos em ambientes instrumentados com sensores de temperatura, umidade relativa, velocidade do ar e aquecedores a óleo com comando via computador. Os resultados demonstram o bom desempenho dos controladores desenvolvidos quando o ambiente é submetido a diferentes condições climáticas. Ao final, verificam-se as condições de conforto térmico no interior do ambiente para cada estratégia de controle.

Palavras-Chave: Controle Preditivo, Controle PID, Conforto Térmico, Sistemas de Climatização, Otimização, PMV.

Abstract

This work addresses the problem of numerical and experimental analysis of comfort control algorithms for air conditioning systems with one manipulated variable. This is a frequent case present in HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning) systems.

The aim of HVAC equipment is to promote thermal comfort for building occupants. So, in order to analyze the performance of those systems, an index to measure the thermal comfort level in air conditioned environments should be used and, here, such index will be the PMV (Predicted Mean Vote). Two strategies will be presented and analyzed: *i)* the first is based on the definition of an external control loop that generates optimal set-point temperature signals for minimizing the PMV. The internal loop is defined by a standard temperature control algorithm; *ii)* the second is based on the inclusion of a PMV equation in the control loop, acting as a PMV sensor or as a prediction model, therefore, defining a non-linear control loop.

Two classes of algorithms are used to verify the performance of the thermal comfort controllers. One is given by PID based control structures and the other one is a type of predictive controllers characterized by presenting terminal constraints. This property allows deriving stability results for a closed-loop system, which are analyzed in this document.

Simulation and real-time results of those control strategies are presented. The real-time results are obtained in instrumented environment, which contains sensor of temperature, relative humidity and air speed and a computer controlled oil heater. The results show the good performance of the developed controllers when the environment is subjected to different climatic conditions. To conclude, the indoor thermal comfort conditions are verified for each control strategy.

Keywords: Predictive Control, PID Control, Thermal Comfort, HVAC Systems, Optimization, PMV.

1 Introdução

O homem sempre se esforçou em criar ambientes termicamente confortáveis. Entretanto os custos da energia elevaram-se nas últimas décadas, tornando a eficiência de sistemas de climatização uma questão de grande impacto. Portanto, a criação de ambientes termicamente confortáveis e energeticamente eficientes tem uma grande importância nos projetos de edificações e de sistemas de climatização.

1.1 Motivação

Eficiência energética nos setores residencial, comercial, industrial e de transportes tem uma grande importância atualmente devido ao crescimento dos custos da energia, do consumo de energia e dos impactos ambientais. Exemplos estão no Anuário Estatístico da empresa FURNAS (2006), onde pode-se notar que a tarifa média de venda de energia (*MWh*) aumentou de US\$ 20,03 em 2001 para US\$ 28,15 em 2005.

Muitos fatores influenciam no aumento do consumo de energia. Entre estes, os principais são: os padrões de vida da população e as condições meteorológicas. É comum em climas quentes ou frios, aumentar o consumo de energia nos lares e locais de trabalho para fins de aquecimento ou de arrefecimento (Erbe, 2006). De fato, sistemas de climatização estão presentes nos setores residenciais e comerciais que, por sua vez, representam uma parcela significativa do consumo total de energia. De acordo com Erbe (2006), na União Européia, os consumos residenciais, comerciais e industriais de energia foram, respectivamente, de 341 *TWh*, 200 *TWh* e 361 *TWh* para o ano de 2005. Para o Brasil, neste mesmo ano, segundo a empresa FURNAS (2006), os consumos residenciais, comerciais e industriais de energia foram, respectivamente, de 51,2 *TWh*, 34,3 *TWh* e 87,6 *TWh*. O aumento do consumo de energia nos últimos anos pode ser observado na Figura 1.1 (FURNAS, 2006). Nota-se que os principais aumentos no consumo de energia, em relação ao ano de 2004, foram nos setores comerciais e residenciais com 7,2% e 5,4% de aumento, respectivamente.

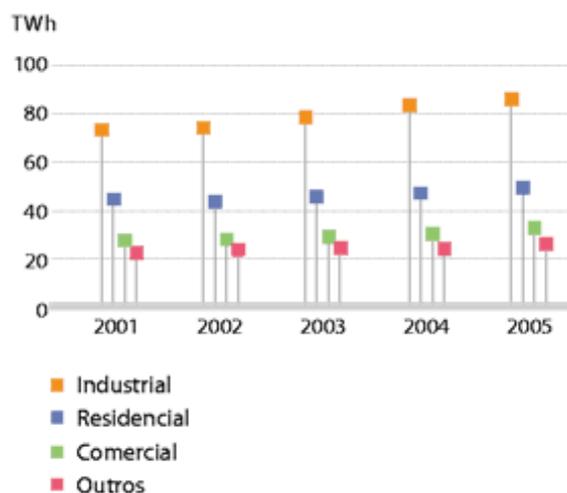


Figura 1.1: Consumo de energia no Brasil por setores. Fonte: FURNAS (2006).

Na África do Sul, o consumo de energia em escritório, creditada a sistemas de climatização, representa em média 50% do consumo total de energia do ambiente. Verificou-se também, que é possível economizar até 66% do consumo de energia do sistema de climatização, ou seja, aproximadamente 30% do consumo de energia em escritórios. Calculou-se ainda como aproximadamente nove meses o tempo necessário para o investimento ser pago pela economia de energia (Mathews *et al.*, 2001).

A utilização de sistemas de condicionamento de ar vem crescendo progressivamente nos países em desenvolvimento e, segundo Salsbury (2006), são responsáveis por até um terço da energia total consumida em países desenvolvidos. Na França, sistemas de climatização são responsáveis por 40% do consumo de energia fóssil do país (Raffenel *et al.*, 2008). Por exemplo, de acordo com os construtores destes equipamentos, no ano de 2002, 928.000 equipamentos de condicionadores de ar do tipo residencial (tipo Janela) foram vendidos no Brasil, sendo que o grau de saturação ainda é de 7% no setor residencial. Conseqüentemente, existe um grande potencial para a pesquisa no desenvolvimento de estratégias de controle energeticamente eficientes e que sejam projetadas para promover conforto térmico, pois existe uma conexão entre estes cuja relevância tem atraído progressivamente a atenção das pesquisas acadêmicas e industriais desde a década de 1970.

De fato, cada vez mais a população vem passando um tempo significativo de suas vidas em ambientes climatizados artificialmente e a lacuna entre esta climatização e o conforto térmico tem efeitos diretos na produção e na satisfação de cada indivíduo. Se os

ambientes de trabalho não oferecem conforto térmico, o desempenho dos trabalhadores diminui. Conseqüentemente, o foco é manter o conforto térmico dos ocupantes reduzindo o gasto de energia. O setor residencial, que responde por uma parcela significativa do consumo de energia e, economias nesse consumo, podem ser obtidas através de melhorias no sistema de controle de climatização (Erbe, 2006). Já no setor comercial, a palavra chave é a automação da edificação, que passa pelo controle eficiente dos sistemas de climatização. Segundo Georgiev (2006), aproximadamente 30% do consumo de energia pode ser reduzido através de um controle mais eficiente dos sistemas de climatização.

Por outro lado, conforto térmico em edificações é um conceito que é difícil de se definir. Nas últimas décadas, um número grande de índices foi estabelecido para análise de climas em ambientes fechados e projetos de sistemas de controle HVAC¹ (Fanger, 1970; Sherman, 1985; Gagge *et al.*, 1986; ASHRAE, 1993). Em comum tem-se o fato que medir conforto térmico não está restrito a medição de temperatura. Fanger (1970), por exemplo, propôs um método para estimação de conforto térmico que, além da temperatura e da umidade relativa, inclui temperatura radiante média, velocidade do ar e fatores individuais como taxa metabólica e resistência térmica da vestimenta. Um índice baseado nessas variáveis, o Voto Médio Estimado (PMV), é obtido e quanto mais próximo de zero for o valor do PMV, melhor será a sensação de conforto térmico dos ocupantes.

Muito tem-se estudado sobre controle de sistemas de climatização, porém este problema é tratado apenas como um controle de temperatura, desprezando-se a influência de outros parâmetros no conforto térmico (Dumur *et al.*, 1997; Oliveira *et al.*, 2003; Halil *et al.*, 2006; Salsbury, 2006; Raffanel *et al.*, 2008). Entretanto, com esta estratégia, mesmo quando aplicada em novos prédios comerciais equipados com modernos sistemas de climatização, pode-se encontrar indivíduos insatisfeitos em relação ao conforto térmico (Muzi *et al.*, 1998).

Desse modo, percebe-se que há uma deficiência no que diz respeito ao projeto de sistemas de climatização visando estipular melhores condições de conforto no interior de ambientes. Neste contexto, um problema relevante aparece quando o sistema de climatização disponível possui somente uma variável manipulada. Em outras palavras, no caso onde não é possível atuar independentemente em mais de uma variável psicrométrica. Assim, aborda-se neste trabalho o problema de controle de conforto térmico onde, utilizando-se somente um atuador, procura-se manter as melhores condições de conforto térmico possíveis no interior de um ambiente climatizado.

¹Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC)

1.2 Conforto Térmico

A definição de condições internas para alcançar o conforto térmico em edificações é difícil de ser estabelecida, pois a satisfação térmica depende de vários parâmetros. Isto é devido a todos os processos de transferência de calor sensível e latente, por condução, convecção e radiação, que governam o estado termodinâmico do corpo dos ocupantes. Deste modo, nos últimos quarenta anos foram conduzidos trabalhos de pesquisa em conforto térmico e alguns índices foram então propostos.

Ao quantificar o clima de um ambiente interno é importante ressaltar que o homem não sente a temperatura do corpo, mas sim a energia desprendida ou absorvida por ele. Portanto, segundo Fanger (1970), os parâmetros que influenciam nesse processo são: temperatura radiante média, umidade, temperatura e velocidade do ar. No entanto, os pesos destes parâmetros não são iguais, tampouco é suficiente basear-se apenas em um deles.²

As primeiras condições para que haja conforto térmico são: *i*) a equivalência da temperatura epitelial e da temperatura interna do corpo da pessoa e *ii*) o balanço de energia do corpo, no qual o calor produzido pelo metabolismo deve ser igual à perda de calor do corpo da pessoa. Porém, pela estrutura física do ser humano, as sensações térmicas das partes do corpo podem diferir bastante entre si, principalmente pelo efeito da temperatura radiante sobre o indivíduo (Atmaca *et al.*, 2007). Por exemplo, em ambientes frios, mãos e pés sentem mais frio que outras partes do corpo e em ambientes quentes, a cabeça sente mais calor que o resto do corpo. A sensação térmica global do corpo é definida pela sensação mais quente (cabeça) em ambientes quentes e mais fria (mãos e pés) em ambientes frios (Arens *et al.*, 2006). Nota-se ainda que a sensação de conforto térmico pode variar de pessoa para pessoa em um mesmo ambiente.

Como o conforto térmico depende de várias variáveis, existem alguns índices propostos na literatura para medir o nível de conforto térmico de indivíduos. Dentre estes índices, considera-se o conceito de temperatura efetiva (ET) como uma das maiores contribuições em pesquisas relacionadas ao conforto térmico. Introduzido em 1923 por Houghten e Yaglou (1923), a temperatura efetiva é um índice que combina as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido com pressão barométrica e velocidade do ar, visando predizer, de um modo geral, a sensação de conforto térmico dos ocupantes no interior de ambientes. Ainda proeminente na literatura, a temperatura efetiva, como originariamente proposta,

²Ver em Trebien *et al.* (2006) um estudo sobre a sensibilidade destes parâmetros no índice de conforto.

tem sido reconhecida por superestimar os efeitos da umidade em temperaturas baixas e por subestimar seus efeitos quando as temperaturas são relativamente altas (Rohles *et al.*, 1975).

Já em Chu *et al.* (2005b), é proposto o índice *Least Enthalpy Estimator* (LEE) para calcular a diferença entre as condições climáticas do ambiente e a condição de conforto ótimo. O índice LEE combina o conceito de conforto térmico, através do índice ET, e a teoria de entalpia.

Entretanto, entre os índices de conforto térmico disponíveis em pesquisas acadêmicas, o mais reconhecido é o PMV proposto por Fanger (1970). Este índice é baseado em um modelo teórico combinado com os resultados de experimentos com aproximadamente 1300 indivíduos, e é dado como uma função de quatro variáveis ambientais, a temperatura de bulbo seco ou apenas temperatura ambiente, T_{bs} ($^{\circ}C$), a umidade relativa, ϕ (%), a temperatura radiante média, T_{rm} ($^{\circ}C$), a velocidade do ar, v (m/s), e dois parâmetros individuais, dados por, taxa metabólica, M (W/m^2) e índice de vestimenta, I_{cl} (Cl). Em resumo, o PMV pode ser definido como um mapeamento não-linear sem memória G (Equação 1.1) que relaciona seis parâmetros com um número real, pertencente ao intervalo $[-3, 3]$, indicando a sensação térmica estimada de um individuo conforme a Tabela 1.1.

$$\begin{aligned} PMV &= G(T_{bs}, \phi, T_{rm}, v, M, I_{cl}), \\ G &: \mathfrak{R}^6 \rightarrow \mathfrak{R}. \end{aligned} \tag{1.1}$$

Em 1984, esta fórmula foi incluída como norma da ISO (ISO, 1984) e o limite de -0,5 e +0,5 para o PMV foi estipulado como aceitável, em ambientes com sistemas de climatização, pela ASHRAE³ (1993). Apresenta-se, ainda na Tabela 1.1, um indicador da porcentagem estimada de insatisfeitos (PPD) com a qualidade das condições climáticas do ambiente, em função do PMV. O PPD pode ser calculado pela Equação 1.2.

$$PPD = 100 - 95e^{-0,03353PMV^4 + 0,2179PMV^2}. \tag{1.2}$$

Entretanto, para o cálculo do PMV é necessária uma função de oito variáveis. A relação entre esta função e o mapeamento G da Equação 1.1 é apresentada a seguir. O índice PMV é dado por:

³American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE)

Tabela 1.1: Relação entre PMV, PPD e sensação térmica.

| PMV | Sensação Térmica | PPD (%) |
|-----|------------------|---------|
| +3 | Muito Quente | 100 |
| +2 | Quente | 75 |
| +1 | Levemente Quente | 25 |
| 0 | Neutra | 5 |
| -1 | Levemente Frio | 25 |
| -2 | Frio | 75 |
| -3 | Muito Frio | 100 |

$$\begin{aligned}
 PMV &= F(T_{bs}, T_{cl}, T_{rm}, h_c, f_{cl}, M, W, p_V) \\
 PMV &= (0,303e^{-0,036M} + 0,028) \{ (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} [5733 - 6,99(M - W) - p_V] \} \\
 &\quad - 0,42 [(M - W) - 58,15] - [1,7 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_V)] - [0,0014M (34 - T_{bs})] \\
 &\quad - \{ 3,69 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4 - (T_{rm} + 273)^4] \} - [f_{cl} h_c (T_{cl} - T_{bs})].
 \end{aligned} \tag{1.3}$$

Nesta equação, W (W/m^2) é a potência mecânica efetiva, comumente considerada nula, e h_c (W/m^2K) é o coeficiente de transferência de calor por convecção que é calculado em função da velocidade do ar (v) como apresentado na Equação 1.4. Esta equação é válida para valores de velocidade do ar baixas ou moderadas, situação comum em ambientes internos climatizados.

$$h_c = 10,4\sqrt{v}, \quad \text{para } v < 2,6 \text{ m/s.} \tag{1.4}$$

O fator de área da vestimenta f_{cl} (-) é calculado pela relação entre a área de superfície do corpo vestido e a área de superfície do corpo despido, que é função de I_{cl} , como apresentado na Equação 1.5.

$$\begin{aligned}
 f_{cl} &= 1,05 + 0,645I_{cl}, & \text{para } I_{cl} \geq 0,5032 \text{ Clo} \\
 f_{cl} &= 1 + 1,29I_{cl}, & \text{para } I_{cl} < 0,5032 \text{ Clo.}
 \end{aligned} \tag{1.5}$$

O termo p_V (kPa), que representa a pressão parcial de vapor, pode ser relacionado com a temperatura de bulbo seco T_{bs} e a umidade relativa ϕ através da seguinte equação:

$$p_V = \phi P_{\text{SAT}}(T_{\text{bs}}), \quad (1.6)$$

onde a correlação entre a pressão de saturação de vapor da água P_{SAT} e a temperatura de bulbo seco pode ser encontrada em ASHRAE (1993). A pressão de vapor p_V também pode ser calculada pela seguinte equação (Fanger, 1970):

$$p_V = 17,7747972834\phi e^{18,6686 - \frac{4030,1830}{T_{\text{bs}} + 235}}. \quad (1.7)$$

O termo T_{cl} , que é a temperatura de superfície da vestimenta ($^{\circ}\text{C}$), pode ser calculado iterativamente através da seguinte equação:

$$T_{\text{cl}} = 35,7 - 0,028(M - W) - I_{\text{cl}}\{f_{\text{cl}}h_c(T_{\text{cl}} - T_{\text{bs}}) + 3,96 \cdot 10^{-8}f_{\text{cl}}[(T_{\text{cl}} + 273)^4 - (T_{\text{rm}} + 273)^4]\}, \quad (1.8)$$

com parâmetro inicial $T_{\text{cl}} = T_{\text{bs}} + 273 + \frac{(35,5 - T_{\text{bs}})}{350(6,45I_{\text{cl}} + 0,1)}$.

Portanto, através da substituição dada pelas equações 1.4 a 1.8, chega-se à representação do PMV através dos seis parâmetros da Equação 1.1.

Com base no PMV, diversos estudos sobre conforto térmico podem ser encontrados na literatura (Fanger, 1970; Atmaca *et al.*, 2007; Gouda *et al.*, 2001; Calvino *et al.*, 2004; Hamdi e Lachiver, 1998; Yonezawa *et al.*, 2000; Freire *et al.*, 2006). Sensores de PMV são descritos em Kon (1994) e em Kang *et al.* (1997). Comercialmente, um exemplo é o sensor INNOVA 1221 da empresa INNOVA (2003). Em Trebien *et al.* (2007a) e Trebien *et al.* (2007b), o modelo de Fanger é analisado tendo como o objetivo sua utilização em sistemas de controle de equipamentos de climatização. Neste sentido, uma arquitetura de *hardware* é proposta em Trebien *et al.* (2006) e Trebien *et al.* (2007a).

1.3 Controle de Sistemas de Climatização

Tendo em vista as diversas abordagens para tratar o problema de controle energeticamente eficiente com conforto térmico em ambientes climatizados artificialmente, nota-se a existência de algumas soluções. Estas soluções podem ser divididas em duas abordagens: as que tratam dos valores de temperatura ou umidade relativa internas do ambiente e as que usam de forma explícita o conceito de conforto térmico, utilizando-se de algum índice de conforto térmico, como o PMV, disponível na literatura. A seguir, apresentam-

se alguns trabalhos que se utilizam dessas duas abordagens para manter as condições de conforto no interior de um ambiente próximas das ideais.

1.3.1 Controle de Temperatura e de Umidade

Esta abordagem possui, como variáveis controladas, o sinal de temperatura ou de umidade relativa do ar. Esta é a abordagem mais difundida no que diz respeito ao tratamento das condições climáticas em ambientes fechados. Na seqüência, apresentam-se alguns trabalhos onde procura-se compreender os aspectos da variação destas duas principais variáveis que afetam as condições higrotérmicas no interior de uma edificação.

Em Astrom *et al.* (1993), é proposta a utilização, em sistemas de climatização, de um método de sintonia automática de controladores PID digitais. Como exemplo, é apresentado o controle de temperatura em um sistema de aquecimento que utiliza um trocador de calor a água para aquecer o ar do ambiente. O controlador é utilizado no posicionamento da válvula que controla o fluxo de água quente no trocador de calor e são apresentados gráficos mostrando a eficiência do método de sintonia automática neste contexto.

Já em Dumur *et al.* (1997), propõe-se uma estratégia que antecipa futuras mudanças na referência de temperatura que ocorrem em função da presença de pessoas na edificação. O objetivo é manter o sinal o mais próximo possível do valor ideal quando o ambiente é efetivamente utilizado. Tal estratégia, primeiramente testada com controladores do tipo proporcional, integral e derivativo (PID), é aplicada com um Controlador Preditivo Generalizado (GPC). Nesta mesma linha, em Raffanel *et al.* (2008), é proposta uma estratégia de mudanças na referência de temperatura de um aquecedor elétrico, visando levar o sistema a uma temperatura agradável, calculada através de uma equação de critério de custo quadrático. O principal objetivo do trabalho é diminuir o consumo de energia por sistemas de climatização em edificações. Através de um *software* simulador de edificações, são efetuados testes para verificar o desempenho da estratégia. Em Salsbury (2006) também são apresentados testes de mudança no sinal de referência, quando a edificação não esta sendo utilizada, visando diminuir o consumo de energia.

Em Oliveira *et al.* (2003) é apresentado o controle de temperatura de um ambiente, utilizando um aquecedor a óleo, através da lei de controle *Fuzzy*. O controlador é testado em simulação através de duas estratégias, uma clássica e outra considerando o erro entre a saída e a referência nulo para qualquer valor de saída dentro da faixa de $\pm 2^{\circ}C$ em torno do sinal de referência. Considerando-se $22^{\circ}C$ como sendo a temperatura de referência, pode-

se observar que o controlador *Fuzzy* proposto apresenta uma economia no consumo de energia de aproximadamente 10% em relação ao controlador *on-off*, e de aproximadamente 15% em relação ao controlador *Fuzzy* clássico.

Em Halil *et al.* (2006), apresenta-se uma técnica de controle de temperatura interna de prédios públicos e residências coletivas. A técnica de controle *Fuzzy* utilizada no sistema de climatização, no caso um sistema de aquecimento central, utiliza os valores de temperatura externa para fazer os cálculos do aquecimento necessário. Aborda-se ainda a questão da minimização do consumo de energia através de uma geração de referência de temperatura baseada na minimização de uma função de custo que leva em consideração o custo da energia e a potência do aquecimento para cada instante de tempo.

Pode-se citar ainda, como estratégia de controle para temperatura, o trabalho proposto em Georgiev (2006), onde, emprega-se o conceito de variância mínima para avaliar o desempenho de sistemas de climatização. Neste caso, utiliza-se um condicionador de ar, com técnicas de controle de temperatura clássicas, baseadas em algoritmos PID, para manter o valor de temperatura do ambiente o mais próximo possível ao valor de referência pré-determinada. A principal proposta deste trabalho é mostrar a importância da presença de controladores bem ajustados para reduzir em aproximadamente 30% o consumo de energia elétrica.

1.3.2 Controle com Cálculo de Índice de Conforto Térmico

A segunda abordagem trata da utilização explícita de um índice de conforto térmico no sistema de controle. Isto pode ser feito assumindo como variáveis controladas, o índice de conforto térmico PMV ou o sinal de temperatura baseado na otimização do índice PMV. Assim, a definição dos sinais aplicados no sistema de climatização é feita baseada neste índice, visando a otimização das condições de conforto térmico no interior do ambiente. Descrevem-se, a seguir, alguns trabalhos relacionados com esta abordagem.

Em Gouda *et al.* (2001), é proposto o controle de conforto térmico com base no índice PMV. São comparadas duas estratégias de controle de conforto térmico em uma edificação, considerando-se constantes os parâmetros individuais (taxa metabólica e índice de vestimenta) dos ocupantes e a velocidade do ar interna. As estratégias comparadas são um controlador PID, a princípio, utilizando os ganhos do controlador já empregados para o ambiente real, na Universidade de Northumbria, que é representada por um modelo em simulação, e posteriormente otimizado por um *Toolbox* do MatLab[®] para uma melhor performance neste ambiente, e um controlador baseado em lógica *Fuzzy*, com regras de

inferência construídas usando-se o valor do PMV. Os dois controladores são aplicados a um sistema de aquecimento e testados para ambientes de alta e baixa capacidade térmica, obtendo bons resultados para ambos controladores.

Nesta mesma linha de trabalho, em Calvino *et al.* (2004) é proposto um controle de conforto térmico, utilizando um controlador PID *Fuzzy*, com adaptação automática dos parâmetros proporcional, integral e derivativo durante o período de testes. O controle de conforto é feito utilizando o índice PMV e variáveis individuais constantes. O algoritmo de controle é então testado, em tempo real, em um ambiente de escritório na Universidade de Palermo.

Ainda nesta linha de trabalho, em Liang e Du (2005), apresenta-se uma estratégia de controle de conforto térmico, que utiliza uma simplificação do índice PMV, com base em redes neurais, capaz de adquirir conhecimento a respeito da sensação de conforto térmico dos ocupantes de um ambiente equipado com um sistema de climatização. Esta lei de controle é aplicada em simulação e comparada com o algoritmo de controle PID, no mesmo ambiente, para situações de aquecimento e refrigeração, apresentando desempenhos semelhantes. A estratégia também é testada e comparada em ambientes com sistemas de climatização tipo Volume de Ar Constante e Volume de Ar Variável. Mostrou-se que, mantendo o PMV entre -0,5 e +0,5, é possível economizar aproximadamente 10% de energia.

Em Huang e Li (2006), através da utilização do índice de conforto térmico proposto por Fanger (1970), testou-se o controle de conforto térmico, aplicado a um condicionador de ar, utilizando um controlador *Fuzzy* adaptativo, porém, para o cálculo do PMV foi apenas utilizado a temperatura do ar e considerado constante os outros cinco fatores utilizados na Equação 1.1 para o cálculo do PMV.

Já em Hadjiski *et al.* (2006) um sistema supervisório formado por um Controlador Preditivo (MBPC) aplicado a um sistema de climatização, gerenciando dois sub-sistemas de controle em uma casa de madeira, é utilizado visando manter o índice PMV mais próximo do zero possível e também visando a minimização do consumo de energia nas funções de custo dos MBPC.

Em Mathews *et al.* (2001) é apresentada uma ferramenta de simulação para análise térmica e energética em edificações. Esta ferramenta é utilizada para simular um típico ambiente de escritório sul-africano, cujo consumo de energia por sistemas de climatização é de aproximadamente 50% do consumo de energia total do escritório. Visando reduzir o consumo de energia, manter um índice de conforto térmico aceitável, com base na

recomendação da ASHRAE (1993), e utilizando a técnica de controle PID, foram testadas várias modificações no sistema de climatização.

Em um contexto diferente do conforto em edificações, porém não menos importante, no trabalho proposto por Túrcio e Neto (2003), utilizam-se de estratégias clássicas de controle para testes de controle do sistema de climatização em aeronaves, onde são comparados dois casos para a realimentação da malha: um levando-se em consideração apenas a temperatura e outro levando-se em consideração a temperatura interna, umidade relativa interna e temperatura radiante média, adotando-se valores fixos para taxa metabólica (considerada sedentária) e vestimentas, efetuando-se assim controle de PMV em aeronaves. Alguns aspectos tornam peculiar o ambiente de uma cabine de aeronave e diferente de uma edificação. Devido ao número de ocupantes por volume ser elevado, a umidade relativa da cabine fica em torno de 20% ocasionando uma alta evaporação e perda de calor. A temperatura radiante média é inferior a temperatura do ar ocasionando alta perda de calor por radiação. Além disso, as condições climáticas externas a uma aeronave variam consideravelmente de acordo com sua altitude, afetando diretamente na sensação de conforto térmico dos passageiros. Logo, para uma melhor satisfação de conforto térmico dos passageiros, não se pode usar apenas um controlador de temperatura, mas sim um controlador de PMV, porém este deve ser ajustado com índice de vestimenta de acordo com a vestimenta dos passageiros no momento.

Propostas diferentes de controle de conforto térmico em edificações, mas também utilizando o índice PMV, são apresentadas em Hamdi e Lachiver (1998) e Yonezawa *et al.* (2000). Em ambos os trabalhos, métodos de geração de referências de temperatura e velocidade do ar, para um sistema de climatização, baseados na lógica *Fuzzy*, são apresentados. Essa geração de referência é feita *on-line* e com base no índice PMV. São apresentados resultados em simulação comparando a eficiência das leis de controle que levam em consideração o conforto térmico e as leis de controle que mantêm referências constantes para de sistemas de climatização, comprovando-se que são mais eficientes os que levam em consideração o índice PMV.

Nesta mesma linha de trabalho, em Chu *et al.* (2005a), uma lei de controle *Fuzzy* é utilizada para controlar sistemas de climatização visando manter o conforto térmico dos ocupantes do ambiente e reduzir o consumo de energia em horários de pico, pois o custo de geração de energia pela companhia local, a Taipower, teve um grande aumento por utilizar combustíveis fósseis importados. Para controle de conforto térmico, um conjunto de referências de temperatura e umidade para o sistema de climatização com base na

temperatura e umidade externas ao ambiente é gerado, tendo como base o índice de conforto térmico conhecido como Temperatura Efetiva (ET*) (Gagge *et al.*, 1971).

Outro trabalho abordando esta mesma proposta está apresentado em Donaisky *et al.* (2006), onde apenas um atuador está presente, no caso um aquecedor. As estratégias de controle PID e *Fuzzy* são utilizadas em simulação visando manter uma edificação, com materiais tipicamente empregados em construções nacionais, termicamente confortável para os ocupantes. Já em Donaisky *et al.* (2007a) as estratégias de controle apresentadas em Donaisky *et al.* (2006) são expandidas e implementadas em tempo real.

Em Donaisky *et al.* (2008b) e Donaisky *et al.* (2008a) a estratégia de controle linear de temperatura que visa otimizar o PMV através de uma geração *on-line* de referência de temperatura é apresentada, porém utilizando um controlador baseado em MBPC e implementados em tempo real. Testes foram realizados para verificar o desempenho do controlador em situação normal de operação e em situação com alteração de parâmetros individuais que influenciam no conforto térmico.

Outra proposta de controle de conforto térmico em edificações é trabalhar com o índice PMV no modelo de previsão de controladores preditivos, como apresentado em Freire *et al.* (2005b), Freire *et al.* (2006) e Freire (2006), onde uma estratégia de controle MBPC não-linear baseada no GPC foi proposta para o controle de conforto térmico utilizando o índice PMV. O modelo de previsão tem uma estrutura Wiener, que é dada por um modelo linear seguido de uma não-linearidade estática, representando a edificação com aquecedor e o cálculo do PMV, respectivamente. São apresentados dois estudos de caso para alcançar o conforto térmico: *i*) variação de taxas metabólicas e índices de vestimentas, representando uma pessoa trabalhando em um escritório e posteriormente dormindo e *ii*) variação de taxas metabólicas, representando uma academia de ginástica.

Nesta mesma linha de trabalho, em Donaisky *et al.* (2007b) duas estratégias de controle baseadas em MBPC são apresentadas. A primeira é um controle linear de temperatura que visa otimizar o PMV através de uma geração *on-line* de referência de temperatura e a segunda é um controle não-linear de PMV. As duas estratégias são também testadas em simulação para uma edificação com materiais tipicamente empregados em construções nacionais.

Como ilustração, outra proposta, mas ainda com base em conforto térmico, é apresentada em Cline *et al.* (2004). Neste trabalho é proposto um Sistema Portátil de Suporte a Vida (PLSS) através de um Traje com Líquido Refrigerado (LCG) para manter o usuário termicamente confortável, podendo ser usado em missões espaciais por astronautas, por

pilotos de aviões de caça, por soldados, etc. Para tanto se utilizou de um controle PID de temperatura baseado na temperatura média da pele do usuário e uma referência de temperatura calculada em função da taxa metabólica, da temperatura medida nos dedos das mãos e dos pés e de suas preferências pessoais.

1.4 Estrutura da Dissertação

Nesta dissertação aborda-se o estudo de controladores para sistemas de climatização com apenas uma variável manipulada, tendo em vista a necessidade de desenvolvimento de algoritmos de controle que proporcionem padrões de conforto térmico aceitáveis para os ocupantes. Estes controladores são avaliados e testados tanto em simulação como em tempo real para verificar o desempenho em condições reais de utilização.

O conforto térmico é garantido através de duas estruturas de malhas de controle. Na primeira assume-se uma malha de controle convencional com geração ótima do sinal de referência. Na segunda, a equação do PMV é incorporada na malha de controle seja na forma de um sensor de PMV, seja na forma de um modelo de previsão.

Estas estruturas estão baseadas em controle clássico PID e em controle preditivo (MBPC) com restrições terminais e são aplicadas ao problema de controle de conforto térmico.

As principais contribuições deste trabalho, que o diferenciam de outros presentes na literatura, são: *i*) a implementação de duas estruturas de controle de conforto térmico em tempo real, a primeira é a estratégia que assume uma malha de controle convencional com geração ótima do sinal de referência e a segunda é a estratégia onde a equação do PMV é incorporada na malha de controle; e *ii*) a prova da estabilidade em malha fechada do controlador preditivo com restrições terminais e modelo de previsão não-linear baseado em PMV.

Este trabalho de dissertação está organizado da seguinte forma:

Capítulo 2:

Neste capítulo, o problema de controle de conforto é abordado através da definição de uma malha externa que determina, a cada instante de tempo, valores ótimos para o sinal de referência de temperatura. A solução deste problema via otimização não-linear é apresentada. A malha interna de controle é implementada usando as leis de

controle PID e CRHPC⁴. No caso do PID, as principais modificações no algoritmo para sua implementação no contexto de sistemas de climatização são descritas. No caso do CRHPC, os principais resultados sobre estabilidade do sistema em malha fechada são também apresentadas. Resultados de simulação são apresentados, comparando o desempenho dos algoritmos de controle.

Capítulo 3:

O problema de controle de conforto é abordado, neste capítulo, através da inclusão do índice de conforto térmico PMV na malha de controle, o que torna a lei de controle não-linear. Esta estratégia é caracterizada por representar o sistema através de uma estrutura do tipo *Wiener*, que é determinada por conter um sistema linear, seguido de uma não-linearidade estática. No contexto do PID, esta abordagem é similar à hipótese da presença de um sensor de PMV na malha. A estabilidade do sistema em malha fechada com CRHPC não-linear é analisada. Resultados de simulação são apresentados comparando o desempenho dos algoritmos de controle.

Capítulo 4:

Neste capítulo, o aparato experimental, contendo sensores de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, um aquecedor a óleo e um computador, é descrito. Também serão apresentados os resultados da implementação em tempo real. Estes resultados serão analisados em relação ao tempo de subida, isto é, o tempo necessário para o sistema chegar à condição de conforto térmico, e às mudanças nas condições de operação, isto é, mudanças nos parâmetros individuais dos ocupantes e rejeição à perturbação.

Capítulo 5:

Este trabalho é finalizado apresentando-se as conclusões a respeito das duas estratégias de controle implementadas e a respeito dos resultados numéricos e experimentais obtidos. Por fim, apresentam-se descrições para o desenvolvimento de possíveis trabalhos futuros baseados nos resultados obtidos.

Apêndice 1:

É apresentado o artigo *Real-Time Implementation of PID-Based Thermal Comfort Control Algorithms* (Donaisky *et al.*, 2007a), que descreve resultados da implementação em tempo real de técnicas de controle de conforto térmico com base na lei de controle clássica PID. Os testes são efetuados em um quarto de uma residência da cidade de Almirante Tamandaré - PR - Brasil.

⁴Constrained Receding Horizon Predictive Control (CRHPC)

Apêndice 2:

É apresentado o artigo **Algoritmos PMV-MBPC para Conforto Térmico em Edificações: Aplicação em uma Célula-Teste** (Donaisky *et al.*, 2008a), que descreve resultados da implementação em tempo real de técnicas de controle de conforto térmico com base na lei de controle preditivo CRHPC. Os testes são efetuados em uma célula-teste no interior de uma câmara térmica na cidade de Curitiba - PR - Brasil.

2 Controle de Conforto via Otimização da Referência

Conforme apresentado na introdução deste documento, controle de conforto térmico não é sinônimo de controle de temperatura, pois envolve outros parâmetros ambientais, como temperatura radiante média, umidade, velocidade do ar, etc. e também individuais, como taxa metabólica e vestimentas. Entretanto, sistemas em malha fechada com controle de temperatura estão bem estudados na literatura com resultados de desempenho e estabilidade bem consolidados. Portanto, é atrativo encontrar uma forma de levar em consideração aspectos de conforto sem alterar estruturas clássicas da malha de controle de temperatura.

2.1 Introdução

Existem algumas maneiras de promover conforto térmico em edificações. Uma delas está baseada no cálculo de condições climáticas que seriam apropriadas para gerar conforto térmico no interior de uma edificação em função dos parâmetros individuais dos ocupantes. Estas condições ambientais podem, então, ser utilizadas como sinal de referência para malhas de controle já presentes no local.

Neste sentido, em Yonezawa *et al.* (2000), é proposto um sistema capaz de calcular o sinal de referência para o controle de temperatura de um sistema de climatização. Para tanto, são utilizadas informações ambientais, como a temperatura atual, a umidade, a temperatura radiante, a velocidade do ar e informações individuais, como atividade física e vestimentas. Estas informações alimentam uma rede neural que, com base no índice PMV, encontra a variação necessária na temperatura ambiente para promover o conforto térmico. Em Hamdi e Lachiver (1998), um sistema similar é proposto. Com base no índice PMV, um sistema *Fuzzy* encontra a variação necessária na temperatura ambiente e na velocidade do ar para promover o conforto térmico.

Em Donaisky *et al.* (2006), Donaisky *et al.* (2007a) e Donaisky *et al.* (2008a), descreve-se um sistema que se caracteriza por gerar *on-line*, isto é, a cada instante de amostragem, um sinal de referência de temperatura ótimo em função da temperatura, umidade e velocidade do ar medidos e demais parâmetros do PMV fornecidos pelo usuário, através da utilização de um método de otimização unidirecional.

A principal vantagem deste tipo de estratégia de conforto térmico é a manutenção das propriedades dinâmicas da malha de controle, sendo o módulo de conforto baseado em PMV, algo externo ao sistema.

Na Seção 2.2, a estratégia de geração de referência para uma malha de controle de temperatura, baseada nas aplicações descritas em Donaisky *et al.* (2006), Donaisky *et al.* (2007a) e Donaisky *et al.* (2008a), é detalhada. Nas Seções 2.3 e 2.4, dois algoritmos de controle possíveis de serem utilizados neste contexto, isto é, o PID e o CRHPC, são descritos. Na Seção 2.5, resultados de simulação são apresentados.

2.2 Estratégia de Controle

Nesta seção, a estratégia de controle de conforto térmico é feita através da definição de uma malha de controle de temperatura, cujo valor do sinal de referência de temperatura é dinâmico, baseado no índice PMV, e calculado de forma a gerar PMV nulo. Conseqüentemente, tem-se idealmente o conforto térmico no interior do ambiente. Esta estratégia está ilustrada na Figura 2.1.

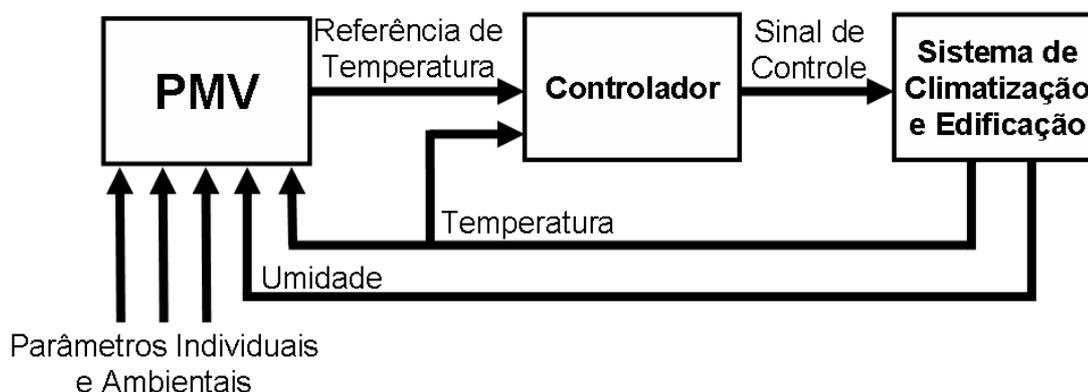


Figura 2.1: Estratégia de geração de referência ótima.

A cada instante de amostragem, baseado nos parâmetros individuais fornecidos pelo usuário e nos parâmetros ambientais medidos ou estimados, o seguinte problema de otimização é resolvido:

$$T_{\text{bs}}^*(k) = \arg \min_{T_{\text{bs}}(k)} G(T_{\text{bs}}(k), \phi(k), T_{\text{rm}}(k), v(k), M(k), I_{\text{cl}}(k))^2, \quad (2.1)$$

sujeito a

$$-3 < G(\cdot) < 3$$

sendo $G(\cdot)$ dada pela Equação 1.1. Este é um problema de otimização não-linear com uma variável, que pode ser resolvido, por exemplo, utilizando o Método da Seção Áurea (Bazaraa *et al.*, 1993). O valor de temperatura interna $T_{\text{bs}}(k)$ medido é usado para iniciar o procedimento.

Neste trabalho, $\phi(k)$ e $v(k)$ são sinais medidos por sensores presentes no ambiente. Os parâmetros individuais $M(k)$ e $I_{\text{cl}}(k)$ são fornecidos pelo usuário em função das atividades correntes no interior da edificação ou ambiente. A temperatura radiante média T_{rm} não é medida devido aos diversos problemas associados com esta medição (Trebien *et al.*, 2007a). Portanto, este parâmetro é assumido igual à temperatura do ar, o que equivale a dizer que a temperatura média das superfícies das paredes internas é igual a temperatura interna do ar. Sabe-se, porém, que se a diferença entre T_{rm} e T_{bs} não é superior a 4°C , a diferença entre o PMV real e o medido é inferior a 0,5 (Trebien *et al.*, 2007a), isto é, está dentro da margem de conforto (ASHRAE, 1993). Portanto, se o sistema de controle for capaz de manter o PMV calculado com, esta hipótese, em zero, o PMV real estará entre -0,5 e 0,5, se a diferença entre as temperaturas radiante média e a real for inferior a 4°C .

Uma hipótese útil em aplicações práticas é a estimação também da velocidade do ar, devido ao custo deste sensor ser mais elevado que aqueles de umidade ou temperatura. Isto é possível pois este parâmetro é aquele para o qual o índice PMV apresenta a menor sensibilidade (Trebien *et al.*, 2007a) e usualmente seus valores são, ou deveriam ser (ASHRAE, 1993), baixos em ambiente climatizados.

2.3 Controle Clássico para Sistemas de Climatização

Os controladores do tipo PID, primeiramente apresentado em Callender *et al.* (1936), são bastante conhecidos e aplicados ao redor do mundo em diversas situações. Já existem controladores PID comerciais que são facilmente aplicados na prática e existem várias técnicas de sintonia dos seus parâmetros (O'Dwyer, 2006; Astrom e Hagglund, 2006), como por exemplo: Método de Ziegler Nichols (Ziegler e Nichols, 1942); Método de Chien, Hrones e Reswick (Chien *et al.*, 1952); etc.

A lei de controle do tipo PID é a mais empregada na indústria de processos e sistemas de climatização não são uma exceção (Huang e Nelson, 1991; Geng e Geary, 1993; Seem, 1998). Em Nesler (1986), inclusive, afirma-se que para ser aceito na indústria de controle de sistemas de climatização, a lei de controle deve ser do tipo PI.

Portanto, nesta seção, o algoritmo de controle PID é brevemente revisado juntamente com as modificações necessárias para adequá-lo às características dos sistemas de climatização. Duas destas características encontradas com mais frequência são: a presença de limites no sinal de entrada e o atraso de transporte. Estas características são abordadas usando *Integrator Antiwindup* (Astrom e Hagglund, 2006; Franklin *et al.*, 2005) e Preditor de Smith (SP) (Smith, 1957; Levine, 1996; Ingimundarson e Hagglund, 2000; Astrom e Hagglund, 2006; Normey-Rico e Camacho, 2007).

2.3.1 Controle PID

Uma forma de utilizar a estratégia de geração de referência ótima é aplicar controladores do tipo PID na malha de controle. Os controladores PID são tipicamente descritos pela seguinte equação:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.2)$$

ou

$$C_0(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p + K_i s + K_d s^2}{s}, \quad (2.3)$$

onde t é o tempo, s é a variável complexa da transformada de Laplace, $u(t)$ é o sinal de controle, $e(t)$ é o sinal de erro entre a referência $w(t)$ e a saída $y(t)$, $U(s)$ é a transformada de Laplace do sinal de controle, $E(s)$ é a transformada de Laplace do sinal de erro, K_p é o ganho proporcional, K_i é o ganho integral e K_d é o ganho derivativo. O diagrama de blocos desta lei de controle está apresentado na Figura 2.2.

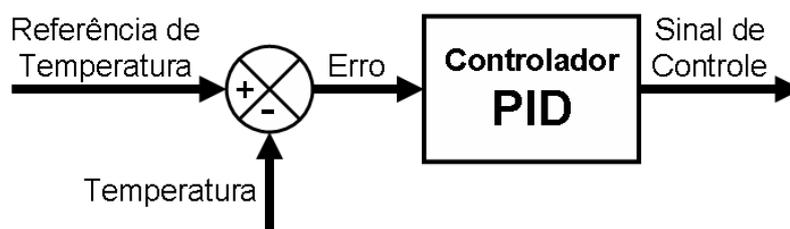


Figura 2.2: Controlador PID de temperatura.

2.3.2 Modificações no Controle PID

Uma característica presente em alguns processos e freqüente em sistemas de climatização é o atraso de transporte. Para lidar com esta característica, a compensação na malha de controle conhecida como Preditor de Smith (SP) (Smith, 1957; Levine, 1996; Normey-Rico e Camacho, 2007) foi proposta em 1957. O diagrama de blocos do controlador é apresentado na Figura 2.3. Nesta figura, $C_0(s)$, $G_n(s)$ e e^{-Lns} são, respectivamente, a função de transferência do controlador primário, por exemplo, um PID, a função de transferência do modelo da planta a ser controlada sem o atraso de transporte e o atraso de transporte. Este diagrama de blocos apresentado na Figura 2.3 pode ser substituído pela seguinte equação:

$$C(s) = \frac{C_0(s)}{1 + C_0(s)(G_n(s) - G_n(s)e^{-Lns}} \quad (2.4)$$

onde $C(s)$ é o controlador com preditor de Smith.

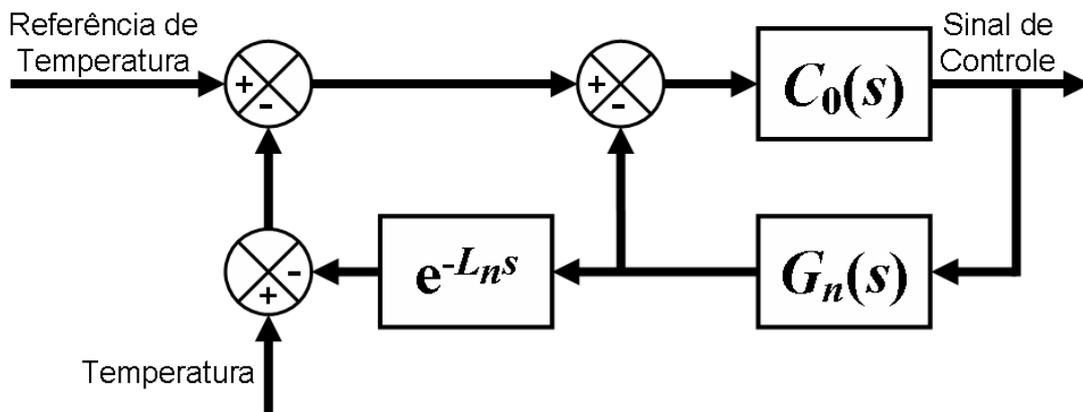


Figura 2.3: Controlador de temperatura com preditor de Smith.

Outra característica freqüente em sistemas de controle são as limitações físicas dos atuadores. Por exemplo, uma válvula não pode estar mais aberta que totalmente aberta e nem mais fechada que totalmente fechada, uma resistência não gera calor acima da potência máxima nem calor negativo, etc. No caso do controlador PID, ao trabalhar com o sinal de controle nos valores limite, o sistema em malha fechada tende a apresentar uma sobre-elevação elevada devido à ação integral. Uma modificação no PID para melhorar o desempenho do sistema é conhecida como *Integrator Antiwindup* e está apresentado na Figura 2.4. Este diagrama de blocos substitui o bloco **Controlador** da Figura 2.1. Mais detalhes sobre a compensação *Antiwindup* pode ser encontrados em Franklin *et al.* (2005).

Os blocos **P**, **I** e **D** são, respectivamente, as ações de controle proporcional, integral

e derivativa do controlador PID. Na Figura 2.4 pode-se observar a saturação do sinal de controle e a ação *Antiwindup*, que fica sem efeito quando o sinal de controle trabalha fora das restrições.

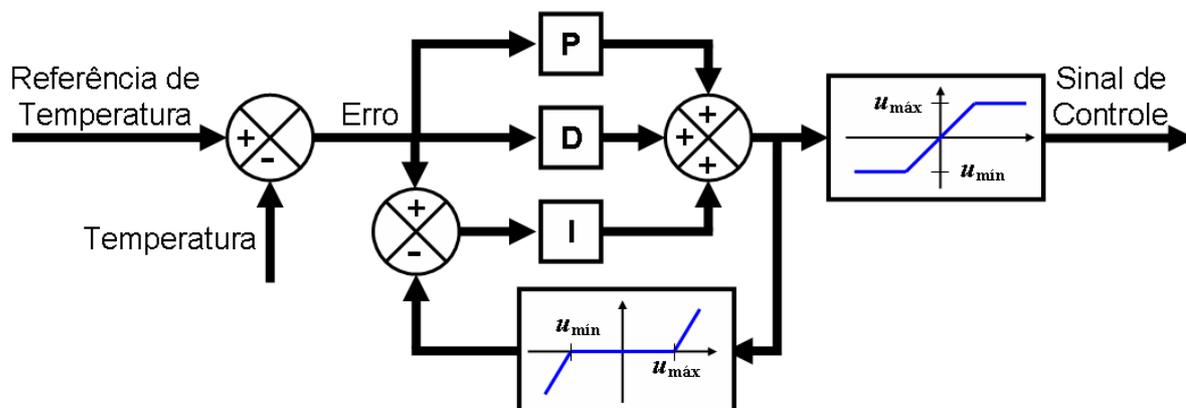


Figura 2.4: Controlador PID *Antiwindup* de temperatura.

2.3.2.1 Controle PID discreto

Para utilização desta lei de controle em sistemas digitais, é necessário utilizar a forma discreta do PID. Para tanto, a parte integral do controlador pode ser aproximada usando o método *Forward* e a parte derivativa pelo método *Backward* (Astrom e Hagglund, 1995). A equação do controlador PID digital é dada por:

$$\begin{aligned}
 u(k) &= A_0 e(k) + A_1 e(k-1) + A_2 e(k-2) + u(k-1), \\
 A_0 &= K_p + \frac{K_d}{\Delta t}, \\
 A_1 &= K_i \Delta t - K_p - 2 \frac{K_d}{\Delta t}, \\
 A_2 &= \frac{K_d}{\Delta t},
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

onde k é o instante de tempo discreto e Δt o período de amostragem. A equação do controlador com preditor de Smith em tempo discreto pode ser obtida através da Equação 2.4, utilizando o modelo em tempo discreto do processo com atraso. A ação *Antiwindup* pode ser obtida alterando-se o ganho K_i do controlador quando este está trabalhando fora da região factível.

2.4 Controle Preditivo para Sistemas de Climatização

Outra forma de utilizar a estratégia de controle de conforto via otimização da referência é aplicar controladores do tipo MBPC na malha de controle, em substituição ao bloco **Controlador** da Figura 2.1. O algoritmo de controle MBPC originou-se no final da década de 1970 pelas leis Identificação e Comando (IDCOM) (Richalet *et al.*, 1978) e Matriz Dinâmica de Controle (DMC) (Cutler e Ramaker, 1980) e tem se desenvolvido consideravelmente desde então. Este termo MBPC define métodos de controle que, baseados no modelo do processo, calculam uma seqüência de sinais de controle futuros através da otimização de uma função objetivo, como apresentado na Figura 2.5.

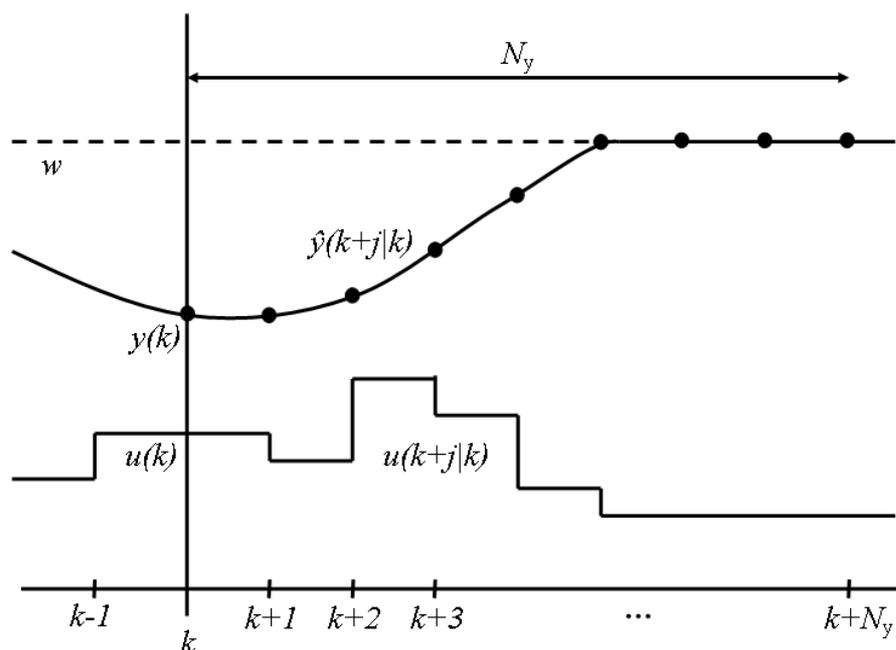


Figura 2.5: Estratégia de controle preditivo.

Em outras palavras, os MBPC são caracterizados por quatro etapas principais, descritas a seguir:

i) Modelagem do processo: as equações de previsão da saída são utilizadas para prever o comportamento do processo em um horizonte de tempo futuro. Na Figura 2.5, estas previsões estão ilustradas através de $\hat{y}(k+j|k)$, isto é, a previsão da saída no instante $k+j$, com a informação disponível até o instante k ;

ii) Definição de um critério de otimização: o desempenho do sistema em malha fechada durante o horizonte de previsão é especificado através de um critério de custo. Na Figura 2.5, este horizonte de previsão está ilustrado entre os instantes $k+1$ a $k+N_y$, isto é, N_y passos;

iii) Otimização do critério de custo: o critério de custo é minimizado em relação ao conjunto de futuros sinais de controle. Neste passo, os sinais de controle ótimos entre $u(k)$ até $u(k + N_y - 1)$ são calculados. Normalmente, um horizonte de controle N_u é utilizado, após o qual a variação no sinal de controle, isto é, $\Delta u(\cdot)$, é considerada nula;

iv) Utilização do sinal de controle ótimo no instante k , isto é $u(k)$. No instante seguinte de amostragem, todo o procedimento é repetido.

Esta classe de controladores vem atraindo, nas últimas décadas, a atenção das indústrias para aplicações reais, pois obteve sucesso em uma gama de aplicações (Qin e Badgwell, 2003; Richalet *et al.*, 1978; Camacho e Bordons, 2004), principalmente em sistemas supervisórios (Grimble e Ordys, 2001). A indústria de refinaria de petróleo é uma das principais referências na evolução do MBPC (Garcia *et al.*, 1989; Qin e Badgwell, 2003; Froisy, 2006). Porém, também pode ser encontrado em manufaturas como, por exemplo, petroquímicas, químicas, papel e celulose, gás e ar comprimido, mineração, metalurgia, processamento de comida, polímeros, fundição, aeroespacial, defesa, automotivas, entre outras (Kouvaritakis e Cannon, 2001; Qin e Badgwell, 2003).

Dentro do método de controle MBPC, existe uma vasta gama de leis de controle, como exemplos têm-se o Controle Adaptativo com Horizonte Extendido (EHAC) (Ydstie, 1984), o Controle Preditivo Auto-Adaptativo Extendido (EPSAC) (Keyser e Cuawenberghe, 1985) e o Controle Preditivo Generalizado (GPC) (Clarke *et al.*, 1987; Clarke e Mohtadi, 1989). Nesta seção, descreve-se o algoritmo conhecido como Controle Preditivo com Restrições Terminais (CRHPC) (Clarke e Scattolini, 1991). A característica desta lei de controle é o uso de restrições terminais de igualdade, forçando a saída controlada a ser igual ao sinal de referência em um horizonte de tempo futuro após o horizonte de previsão. Este fato permite derivar resultados de estabilidade nominal do sistema em malha fechada utilizando horizonte finito de previsão.

A maioria das leis de controle, como o caso do PID, não considera explicitamente as implicações futuras nas ações de controle atuais. Por outro lado, o MBPC computa explicitamente o comportamento previsto ao longo de um horizonte. Este pode, portanto, restringir a escolha do sinal de controle atual a trajetórias que não levam a dificuldades no futuro. Uma importante vantagem dos controladores preditivos é a possibilidade da inclusão de restrições de desigualdade na lei de controle. Isso pode ser usado para definir objetivos concorrentes ao seguimento da referência e incluir limitações do processo, levando a uma lei de controle não-linear. Porém, isto leva a uma performance ótima (ou quase ótima) do controlador em todas condições de operação e também permite uma

operação segura perto dos limites do processo (Scokaert e Clarke, 1994; Rossiter, 2003).

Controladores do tipo MBPC, portanto, podem ser utilizados em uma vasta gama de processos, desde aqueles com dinâmicas relativamente mais simples até aqueles mais complexos, incluindo os sistemas com atraso de transporte altos, de fase não mínima, instáveis, não-lineares, híbridos, etc. (Scokaert e Clarke, 1994; Allgower e Zheng, 2000; Kouvaritakis e Cannon, 2001; Rossiter, 2003; Camacho e Bordons, 2004; Oliveira *et al.*, 2007; Campello *et al.*, 2007).

2.4.1 O Algoritmo MBPC e a lei de controle CRHPC

A primeira etapa na síntese de algoritmos MBPC é a escolha de um modelo de previsão do processo. As previsões são realizadas em um horizonte de tempo denominado de N_y menos o horizonte inicial de previsão N_1 . Durante este intervalo, o sinal de controle pode variar em um tempo menor ou igual ao horizonte de previsão, este parâmetro é denominado horizonte de controle N_u .

Os modelos de previsão lineares mais utilizados são o Auto-Regressivo Média Móvel Integral com Entrada Exógena (ARIMAX) (Clarke *et al.*, 1987; Clarke e Mohtadi, 1989; Camacho e Bordons, 2004) e o modelo em espaço de estados (Ordys e Clarke, 1993; Morari e Zafriou, 1989; Morari, 1994), que pode ser uma realização de modelos tipo *Finite Impulse Response* (FIR) (Cutler e Ramaker, 1980; Garcia *et al.*, 1989) e Bases de Funções Ortonormais (OBF) (Elshafei *et al.*, 1994; Oliveira, 1997; Oliveira *et al.*, 1999; Oliveira *et al.*, 2007).

Portanto, o modelo do processo pode ser dado através da seguinte estrutura ARIMAX:

$$A(q^{-1})y(k) = q^{-d}B(q^{-1})u(k) + C(q^{-1})\frac{\xi(k)}{1 - q^{-1}}, \quad (2.6)$$

onde q^{-1} é o operador atraso, d é o atraso de transporte, $y(k)$ é o sinal de saída, $u(k)$ é o sinal de controle, $\xi(k)$ é um sinal aleatório, média zero, variância σ^2 , e:

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a}, \\ B(q^{-1}) &= b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b}, \\ C(q^{-1}) &= 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} + \dots + c_{n_c}q^{-n_c}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

onde n_a , n_b e n_c são, respectivamente, a ordem dos polinômios $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$ e $C(q^{-1})$.

Neste caso, a equação de previsão da saída \hat{y} é dada por:

$$\hat{y}(k+j|k) = H_j \Delta u(k+j-1) + \frac{I_j}{D} \Delta u(k-1) + \frac{F_j}{D} \Delta y(k), \quad (2.8)$$

onde D , H_j , I_j e F_j são obtidos através da resolução de equações diofantinas, conforme desenvolvimentos apresentados em Camacho e Bordons (1999).

No caso de modelos em espaço de estados, tem-se:

$$\begin{cases} x(k+1) &= A_{\text{Temp}}x(k) + B_{\text{Temp}}u(k) \\ y(k) &= C_{\text{Temp}}^T x(k), \end{cases} \quad (2.9)$$

onde $x(k)$ é o estado do sistema, e A_{Temp} , B_{Temp} e C_{Temp}^T são as matrizes que contém os coeficientes do modelo.

A Equação 2.9 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{cases} \Delta x(k+1) &= A_{\text{Temp}}\Delta x(k) + B_{\text{Temp}}\Delta u(k) \\ \Delta y(k) &= C_{\text{Temp}}^T \Delta x(k), \end{cases} \quad (2.10)$$

onde Δ é um operador tal que $\Delta = 1 - q^{-1}$, ou seja, $\Delta y(k) = y(k) - y(k-1)$.

Neste caso, a equação de previsão da saída \hat{y} é dada por:

$$\hat{y}(k+j|k) = y(k) + C_{\text{Temp}}^T \sum_{i=1}^j S_{j-i} B_{\text{Temp}} \Delta u(k+i-1) + C_{\text{Temp}}^T S_{j-1} A_{\text{Temp}} \Delta x(k), \quad (2.11)$$

com $S_j = \sum_{i=0}^j A_{\text{Temp}}^i$, conforme desenvolvimentos apresentados em Oliveira (1997).

O conjunto de sinais de controle futuro é calculado pela otimização de um determinado critério de custo $J(k)$. O segundo passo é definir este critério de desempenho para o sistema. Este critério é otimizado em função dos sinais de entrada, saída e dos sinais de controle. O resultado desta otimização é um conjunto ótimo de sinais de controle durante o horizonte de previsão. Um exemplo de função de custo bastante utilizada é mostrada a seguir:

$$J(k) = \sum_{j=N_1}^{N_y} \mu(j) [\hat{y}(k+j|k) - w(k+j|k)]^2 + \sum_{j=0}^{N_u-1} \lambda(j) \Delta u^2(k+j|k), \quad (2.12)$$

onde \hat{y} é a saída estimada, w a referência, $\mu(j)$ a ponderação do erro, $\lambda(j)$ a ponderação do sinal de controle e Δu a variação do sinal de controle.

A lei de controle CRHPC é obtida pela minimização da função de custo apresentada na Equação 2.12, submetida a restrições de igualdade, ou seja:

$$\begin{aligned} & \min_{\Delta u(k|k), \Delta u(k+1|k), \dots, \Delta u(k+N_u-1|k)} J(k) \\ & \text{sujeito a} \\ & \Delta u(k+j|k) = 0 \quad \forall j = N_u, \dots, N_y \\ & \hat{y}(k+N_y+j|k) = w(k+N_y+j|k) \quad \forall j = 1, \dots, m, \end{aligned} \quad (2.13)$$

onde m é o horizonte de restrições terminais ($0 < m \leq N_u$).

Somente o primeiro sinal de controle obtido pela minimização da Equação 2.13 é aplicado ao processo. No próximo instante de amostragem, a minimização é repetida e novos sinais de controles são calculados.

2.4.2 Estabilidade no CRHPC

Dois teoremas de estabilidade em malha fechada foram apresentados quando a lei de controle CRHPC foi introduzida, os quais estão descritos a seguir. Posteriormente, a estabilidade para horizontes finitos será analisada via monotonicidade do critério de custo.

Teorema 2.1 (Clarke e Scattolini, 1991) *Para qualquer sistema estabilizável e detectável tal que $n_a > n_b$, o CRHPC se estabiliza se $m = n$, onde $n = \max[n_b, n_a] + 1$.*

Teorema 2.2 (Clarke e Scattolini, 1991) *Para qualquer sistema estabilizável e detectável, o CRHPC se estabiliza se $m = n$ e $\mu = 0$.*

2.4.2.1 Monotonicidade do Critério de Custo

Nesta seção, a estabilidade do sistema em malha fechada é analisada através do comportamento do critério de custo. De fato, mostra-se que sob certas condições, o valor do critério de custo da lei de controle com horizonte deslizante é decrescente ao longo do

tempo, isto é, é monotonicamente decrescente, tendendo a zero. Portanto, o erro tende a zero ao longo do tempo. Juntamente com a garantia que a variação do sinal de controle também tende a zero, tem-se a prova da estabilidade do sistema em malha fechada nominal, no caso, sem perturbação.

Para tanto, é necessária a definição de uma seqüência sub-ótima de sinais de controle, aqui denominada de $\Delta \underline{u}_c$.

Seja o problema de otimização dado pela Equação 2.13 cuja solução ótima em termos do vetor de sinais futuros de controle em um determinado instante de tempo k , é dada por:

$$\Delta \underline{u}(k) = [\Delta u(k|k) \quad \Delta u(k+1|k) \quad \dots \quad \Delta u(k+N_u-1|k)]^T. \quad (2.14)$$

Neste caso, o valor ótimo do critério de custo é $J^*(k)$. No instante de tempo seguinte, isto é, $k+1$, a solução ótima do mesmo problema de otimização, seguindo a estratégia do horizonte deslizante é:

$$\Delta \underline{u}(k+1) = [\Delta u(k+1|k+1) \quad \dots \quad \Delta u(k+N_u|k+1)]^T. \quad (2.15)$$

Uma seqüência de sinais de controle factíveis para o instante $k+1$ é dada por:

$$\begin{aligned} \Delta \underline{u}_c(k+1) &= [\Delta u_c(k+1|k+1) \quad \dots \quad \Delta u_c(k+N_u|k+1)]^T \\ &= [\Delta u(k+1|k) \quad \Delta u(k+2|k) \quad \dots \quad \Delta u(k+N_u-1|k) \quad 0]^T. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Neste caso, o sinal de controle calculado (no tempo $k+1$) para o tempo $k+j$, pelo uso de $\Delta \underline{u}_c$, é o mesmo que o sinal de controle calculado (no tempo k) para o tempo $k+j$ pelo uso de $\Delta \underline{u}$.

A importância do vetor $\Delta \underline{u}_c$ resulta de suas propriedades. A primeira delas é que $\Delta u_c(k+j|k+1) = \Delta u(k+j|k)$ e, conseqüentemente, $\Delta \underline{u}_c$ satisfaz às restrições definidas pela lei de controle:

$$\Delta u_c(k+N_u+j|k+1) = 0, \quad \forall j \geq 0. \quad (2.17)$$

Além disto, na ausência de perturbações, a implementação (conceitual), no tempo $k+1$, do vetor de controle $\Delta \underline{u}_c(k+1)$ gera valores para a previsão de saída iguais as

geradas no instante k , isto é:

$$y_c(k+j|k+1) = y(k+j|k), \quad (2.18)$$

onde y é a saída e o subscrito c indica a suposição de que $\Delta u_c(k+1)$ é implementado no tempo $k+1$ (e conseqüentemente que a estratégia de controle calculado foi congelada em seu último valor).

2.4.2.2 Estabilidade no CRHPC via Monotonicidade do Critério de Custo

A seguir, o caso de estabilidade em malha fechada do CRHPC é tratado. A prova da estabilidade é feita demonstrando-se que o custo $J(k)$ é decrescente, tendendo a zero, ou seja, no instante de tempo $k+1$, seu valor é menor que aquele no instante k .

Teorema 2.3 (Scokaert, 1994) *Para qualquer sistema estabilizável e detectável, o CRHPC se estabiliza se*

$$\mu(N_y) \geq \mu(N_y - 1) \geq \dots \geq \mu(1), \quad \mu \neq 0,$$

$$\lambda(N_u - 1) \geq \lambda(N_u - 2) \geq \dots \geq \lambda(0) \quad \text{e} \quad m = n.$$

Prova: Inicialmente, o caso com $\mu(j)$ e $\lambda(j)$ constantes, para todo j , é abordado. Posteriormente, o caso geral, com $\mu(j)$ e $\lambda(j)$ crescentes, será apresentado.

Assume-se que o critério com sinal de controle ótimo é obtido para o instante k e que, no instante $k+1$, um sinal de controle sub-ótimo Δu_c é utilizado. Portanto, a mudança do critério de custo no tempo $k+1$ é:

$$\begin{aligned} J_c(k+1) - J(k) = & \mu \sum_{j=1}^{N_y} e^2(k+1+j|k+1) + \lambda \sum_{j=0}^{N_u-1} \Delta u_c^2(k+1+j|k+1) \\ & - \mu \sum_{j=1}^{N_y} e^2(k+j|k) - \lambda \sum_{j=0}^{N_u-1} \Delta u^2(k+j|k), \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned}
J_c(k+1) - J(k) &= \mu [e^2(k+2|k+1) + e^2(k+3|k+1) + \dots + e^2(k+1+N_y|k+1)] \\
&\quad + \lambda [\Delta u_c^2(k+1|k+1) + \dots + \Delta u_c^2(k+N_u|k+1)] \\
&\quad - \mu [e^2(k+1|k) + e^2(k+2|k) + \dots + e^2(k+N_y|k)] \\
&\quad - \lambda [\Delta u^2(k|k) + \Delta u^2(k+1|k) + \dots + \Delta u^2(k+N_u-1|k)],
\end{aligned} \tag{2.20}$$

onde $e(\cdot)$ é o sinal de erro entre a referência e a saída e o subscrito c indica a suposição de que $\Delta u_c(k+1)$ é implementado no tempo $k+1$ (e conseqüentemente que a estratégia de controle calculado foi congelada em seu último valor). Combinando-se a Equação 2.19 com as Equações 2.16 a 2.18, tem-se:

$$\begin{aligned}
J_c(k+1) - J(k) &= \mu [e^2(k+2|k) + e^2(k+3|k) + \dots + e^2(k+1+N_y|k)] \\
&\quad + \lambda [\Delta u^2(k+1|k) + \Delta u^2(k+2|k) + \dots + 0] \\
&\quad - \mu [e^2(k+1|k) + e^2(k+2|k) + \dots + e^2(k+N_y|k)] \\
&\quad - \lambda [\Delta u^2(k|k) + \Delta u^2(k+1|k) + \dots + \Delta u^2(k+N_u-1|k)] \\
J_c(k+1) - J(k) &= \mu [e^2(k+1+N_y|k) - e^2(k+1|k)] - \lambda \Delta u^2(k|k).
\end{aligned} \tag{2.21}$$

Além disso, o vetor de controle $\Delta u(k)$ satisfaz as restrições de igualdade na Equação 2.13. Dessa forma, tem-se $e(k+N_y+1|k) = 0$ e a substituição na Equação 2.21 leva a:

$$J_c(k+1) - J(k) = -\mu e^2(k+1|k) - \lambda \Delta u^2(k|k), \tag{2.22}$$

o qual implica que $J_c(k+1) \leq J(k)$ como ilustrado na Figura 2.6.

Se $\Delta u_c(k+1)$ é tal que as restrições de igualdade especificadas na Equação 2.13 são satisfeitas no tempo $k+1$, então ele é potencialmente um vetor de controle para o instante de tempo atual. Mas, se $m = n$, segue que a restrição de igualdade do sinal de saída na Equação 2.13 é garantida não apenas para $j \in [1, m]$ mas para todo $j \geq 1$ (Scockaert e Clarke, 1994). Combinando-se este fato com as Equações 2.17 e 2.18, encontra-se a implicação de que $\Delta u_c(k+1)$ realmente satisfaz as restrições terminais de igualdade no tempo $k+1$. Então, o vetor de controle ótimo $\Delta u(k+1)$, que também satisfaz essas restrições e futuramente minimiza o custo $J(k)$, deve levar a um custo $J(k+1) \leq J_c(k+1)$ tal que:

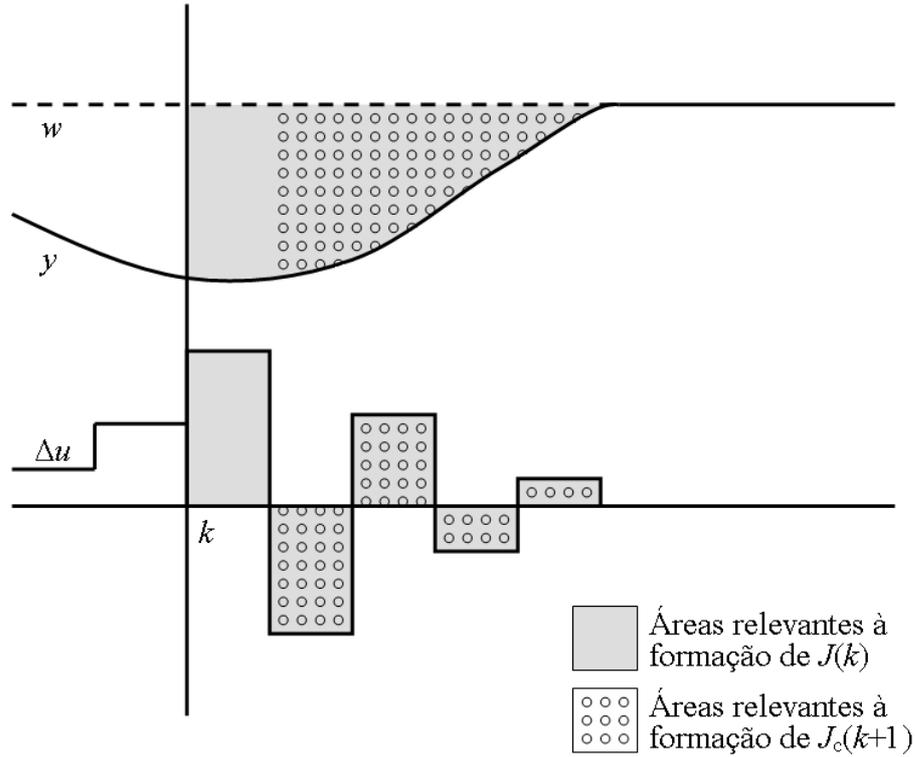


Figura 2.6: Custo no CRHPC.

$$\Delta J(k+1) \leq -\mu e^2(k+1|k) - \lambda \Delta u^2(k|k). \quad (2.23)$$

Como o custo $J(k)$ é por definição não-negativo, a Equação 2.23 leva a:

$$\begin{aligned} \lim_{k \rightarrow \infty} \mu e(k+1) &= \lim_{k \rightarrow \infty} \mu e(k+1|k) = 0 \quad \text{e} \\ \lim_{k \rightarrow \infty} \lambda \Delta u(k) &= \lim_{k \rightarrow \infty} \lambda \Delta u(k|k) = 0, \end{aligned} \quad (2.24)$$

o que implica estabilidade se $\mu \neq 0$. Se $\mu = 0$, a convergência do sinal de controle não necessariamente implica estabilidade (Scokaert e Clarke, 1994).

Usando a monotonicidade, conclui-se que:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} e(k+N_y+1) = \lim_{k \rightarrow \infty} e(k+N_y+1|k) = 0. \quad (2.25)$$

A substituição da restrição terminal $\hat{y}(k+N_y+j|k) = w(k+N_y+j|k)$ ($j \in [1, m]$) na Equação 2.25 leva à estabilidade.

Para seqüências de ponderação não-constantas $\mu(j)$ e $\lambda(j)$, a Equação 2.23 torna-se:

$$\Delta J(k+1) \leq \sum_{j=1}^{N_y} [\mu(j-1) - \mu(j)] e^{2(k+j|k)} + \sum_{j=0}^{N_u-1} [\lambda(j-1) - \lambda(j)] \Delta u^2(k+j|k), \quad (2.26)$$

com $\mu(0) = 0$ e $\lambda(-1) = 0$, o que implica estabilidade se $\mu(j) > \mu(j-1)$ e $\lambda(j) > \lambda(j-1)$. Isto quer dizer que, como $\mu(j) > \mu(j-1)$ e $\lambda(j) > \lambda(j-1)$, a Equação 2.26 é equivalente a Equação 2.23.

□□□

2.5 Resultados Numéricos

Nesta seção, analisa-se o desempenho da estratégia de geração de referência ótima, para as leis de controle baseadas em conforto térmico, propostas nas seções anteriores, isto é, o PID e o CRHPC. Para tanto, descreve-se o problema de aquecimento de um ambiente a fim de manter as condições ambientais em um nível que promova a melhor sensação de conforto térmico possível para os ocupantes. Desta forma, as propriedades do ambiente e o modelo da edificação são descritos. Na seqüência, são apresentados três testes realizados em simulação para verificar o desempenho das leis de controle. O primeiro, com condições normais de operação, é para verificar se o conforto é alcançado para determinados parâmetros climáticos e individuais. O segundo, com mudança nas condições de operação, é para verificar se o conforto é promovido para determinados parâmetros climáticos e variações nos parâmetros individuais. O terceiro é para verificar se o conforto é atingido com adição de uma perturbação, no caso, uma geração de calor interna.

2.5.1 Definição do Ambiente de Simulação

O ambiente de simulação utilizado possui as dimensões físicas do caso *benchmark Building Energy Simulation Test* (BESTest) (IEA, 2003), mostradas na Figura 2.7, porém com algumas modificações nos materiais empregados na edificação. A escolha deste ambiente de simulação deve-se ao fato de representar um padrão que os pesquisadores da área vêm utilizando com o objetivo, dentre outros, de testar e analisar programas de simulação de edificações. As modificações aqui realizadas em relação ao BESTest original têm por objetivo melhor representar uma zona térmica de uma edificação do Brasil, pois utiliza materiais tipicamente empregados nas edificações nacionais.

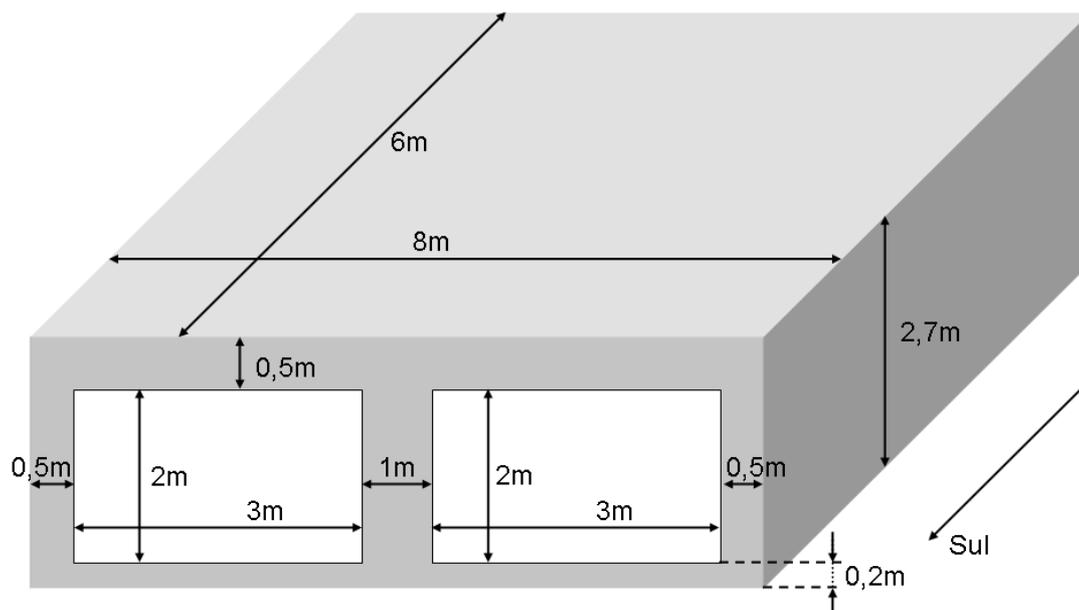


Figura 2.7: Dimensões do ambiente utilizado nas simulações.

Os materiais utilizados na edificação são, para as paredes, 0,02 *m* de reboco, 0,10 *m* de tijolo e 0,02 *m* de reboco. Para a laje superior, são utilizados os mesmos materiais das paredes. Já para o piso, são utilizados 0,02 *m* de madeira e 0,10 *m* de concreto. O sistema de climatização presente na edificação é um aquecedor com potência máxima igual a 3000 *W*.

Através deste ambiente de simulação implementado utilizando o programa PowerDomus (Mendes *et al.*, 2005), dados climáticos reais e um período de amostragem, pode-se realizar um processo de identificação de sistemas (Ljung, 1999), gerando equações que representam o ambiente. Tais equações foram obtidas por Freire (2006), através de técnicas de identificação por modelo Auto-Regressivo Média Móvel com Entrada Exógena (ARMAX) e utilizando-se dados do tipo TRY (*Test Reference Year*) para a cidade de Curitiba - PR. Estes dados climáticos, referentes aos primeiros dias de Julho, são apresentados na Figura 2.8.

Dados da edificação, como condutividade térmica, e detalhes sobre a identificação do ambiente de simulação, desenvolvido no PowerDomus, podem ser encontrados em Freire (2006).

As equações de temperatura e umidade que representam o ambiente estão apresentadas a seguir:

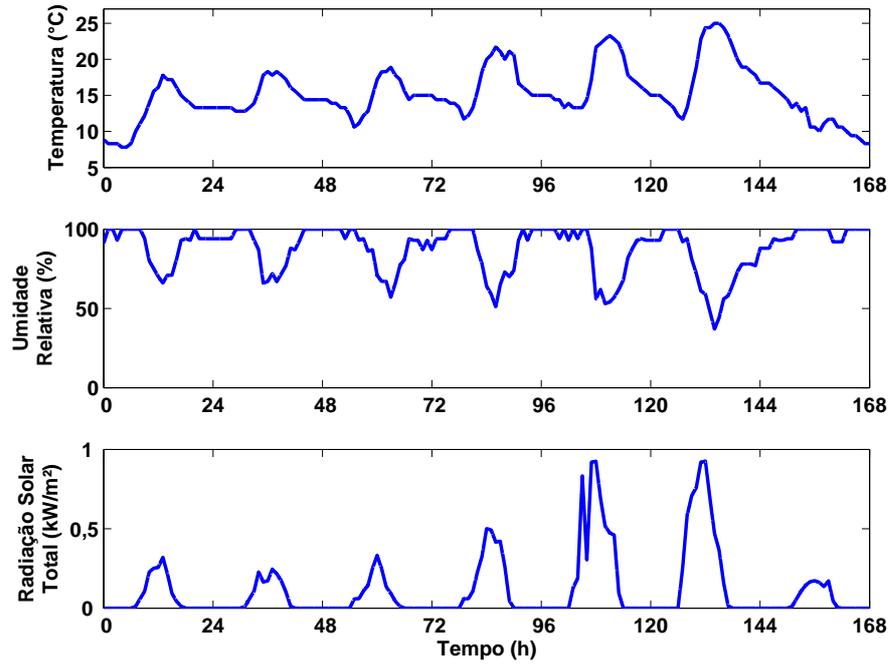


Figura 2.8: Temperatura externa, umidade relativa e radiação solar total para o período de simulação em Curitiba - Brasil.

$$\begin{aligned}
 (1 - 0,9700q^{-1})y_{\text{Temp}}(k) &= (0,0840q^{-1})U(k) + (0,0253q^{-1})T_{\text{EXT}}(k) + \\
 &+ (0,2034q^{-1})H_{\text{EXT}}(k) + (-0,0724q^{-1})S_{\text{EXT}}(k) + \quad (2.27) \\
 &+ (1 + 0,6767q^{-1})\xi(k),
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (1 - 0,9692q^{-1})y_{\text{Umi}}(k) &= (-0,0021q^{-1})U(k) + (0,0003q^{-1})T_{\text{EXT}}(k) + \\
 &+ (0,0176q^{-1})H_{\text{EXT}}(k) + (0,0033q^{-1})S_{\text{EXT}}(k) + \quad (2.28) \\
 &+ (1 + 0,7239q^{-1})\xi(k),
 \end{aligned}$$

onde y_{Temp} ($^{\circ}\text{C}$) é o modelo para temperatura interna, y_{Umi} ($-$) o modelo para umidade relativa interna, U (kW) o sinal de entrada do atuador, T_{EXT} ($^{\circ}\text{C}$) a temperatura externa, H_{EXT} ($-$) a umidade relativa externa, S_{EXT} (W/m^2) a radiação solar total e ξ representa o sinal de ruído. O período de amostragem é de 1 minuto.

Os modelos dados pelas Equações 2.27 e 2.28 são utilizados como sistema real nos exercícios de simulação descritos nesta seção.

Para fins de projeto dos controladores tipo PID, um modelo mais simples e de mais fácil obtenção em situações práticas será utilizado, isto é, uma estrutura tipo função

transferência de primeira ordem com atraso de transporte (FOPDT). Pode ser obtida em testes de resposta ao degrau e é usualmente utilizado em aplicações industriais (Normey-Rico e Camacho, 2007). É de fácil compreensão e utilização por não especialistas na área de identificação de sistemas e rápido (neste caso, quatro horas de testes contra sete dias para a identificação do modelo ARMAX), tentando reproduzir um caso prático de utilização.

O aquecedor foi ligado em sua potência máxima na hora 48 para o teste de resposta ao degrau e mediu-se a constante de tempo T , o ganho K e o atraso de transporte L da planta. Sendo assim, um modelo FOPDT que representa a edificação com o aquecedor, é dado como se segue:

$$F_{\text{Temp}}(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-Ls} = \frac{2,7925}{1980s + 1} e^{-0s}, \quad (2.29)$$

onde F_{Temp} ($^{\circ}\text{C}$) é o modelo FOPDT para a temperatura interna.

Na Figura 2.9, é possível observar a sobreposição das respostas obtidas pela função transferência de primeira ordem e pelo modelo apresentado na Equação 2.27.

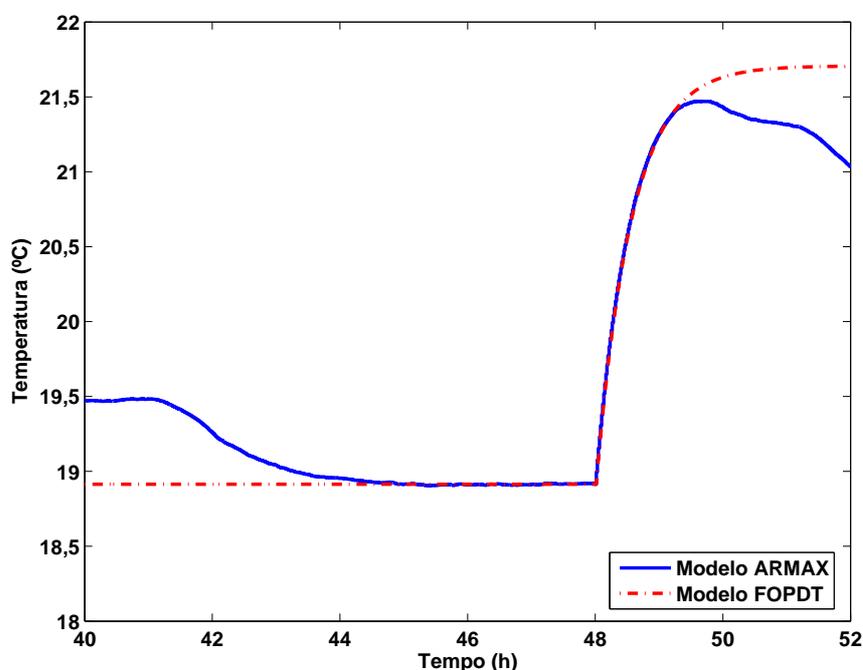


Figura 2.9: Modelos para temperatura interna à edificação com aquecedor.

Na Figura 2.10, são apresentadas as quatro horas de testes de resposta ao degrau utilizadas para obtenção do modelo FOPDT. A diferença entre os modelos observada

no final do período de testes apresentado nesta figura pode ser creditada ao fato que a temperatura externa está caindo neste momento (como pode ser observado na Figura 2.8), causando uma queda na temperatura interna que não é devida à entrada manipulada.

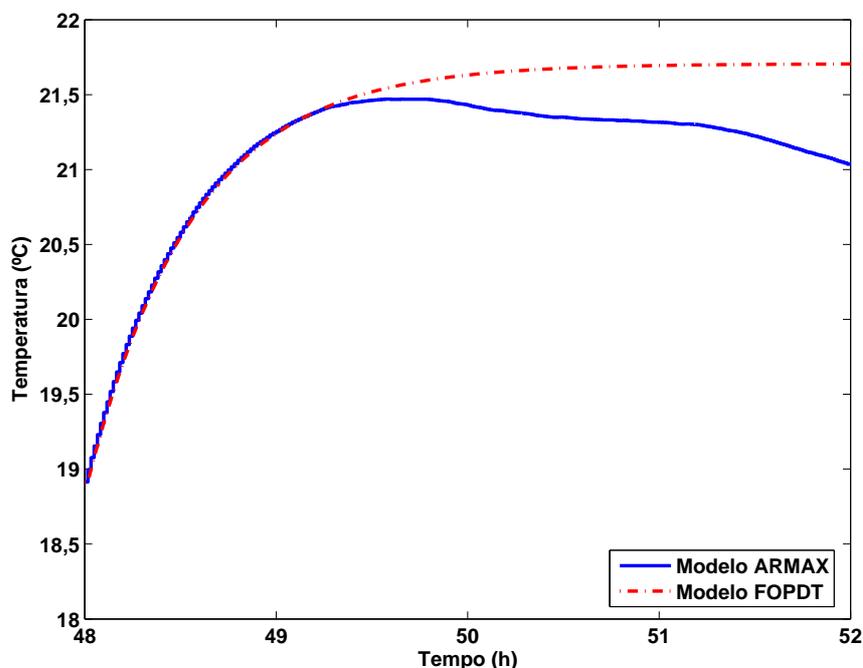


Figura 2.10: Modelos para temperatura interna à edificação com aquecedor nas quatro horas de resposta ao degrau.

2.5.2 Análise para condições normais de operação

Nesta subseção, testes em simulação são efetuados para a estratégia de geração dinâmica de referência de temperatura, utilizando o controlador clássico do tipo PID e o controlador preditivo CRHPC.

Para os testes, utilizaram-se os seguintes parâmetros do PMV apresentados na Equação 1.1: o sinal de temperatura radiante média é feito igual ao sinal de temperatura do ar, a velocidade do ar é definida igual a $v = 0,1 \text{ m/s}$ e os fatores individuais de atividade e vestimenta são $M = 69,78 \text{ W/m}^2$ ($M = 1,2 \text{ Met}$) e $I_{cl} = 0,1162 \text{ m}^2\text{ }^\circ\text{C/W}$ ($I_{cl} = 0,75 \text{ Clo}$). Tais parâmetros procuram reproduzir as condições climáticas e pessoais de um ambiente de escritório.

Os parâmetros do controlador PID são definidos através do método de projeto com base na estrutura *Internal Model Controller* (IMC) (Garcia e Morari, 1982; Rivera *et al.*, 1986; Morari e Zafiriou, 1989; Braatz, 1996), pois a lei de controle é derivada de uma

forma única e direta em função do modelo do processo. Para um sistema de primeira ordem, a sintonia do controlador é feita utilizando apenas um parâmetro, o ϵ , que é proporcional a constante de tempo esperada em malha fechada. A equação para sintonia dos parâmetros do controlador PID é dada por:

$$\begin{aligned} K_p &= \frac{T}{K(L + \epsilon)}, \\ K_i &= \frac{K_p}{T}, \\ K_d &= 0. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Portanto, para um sistema de primeira ordem conforme modelo da Equação 2.29 e, assumindo-se $\epsilon = 120$, obtém-se os parâmetros do controlador com base em algoritmo clássico do tipo PID: $K_p = 5,9087$, $K_i = 0,0030$ e $K_d = 0$.

Para o controlador preditivo CRHPC, adotaram-se os parâmetros de projeto como sendo: horizonte de previsão inicial ($N_1 = 1$), horizonte de previsão final ($N_y = 3$), horizonte de controle ($N_u = 1$), horizonte de restrições terminais ($m = 1$), ponderação do sinal de controle ($\lambda = 0$) e ponderação do sinal de erro ($\mu = 1$). A equação da previsão de saída utilizada foi a Equação 2.29.

Para verificar o desempenho dos controladores do tipo PID e CRHPC em condições normais de operação, o período de simulação é de 24 horas, com período de amostragem, de 60 segundos. Os controladores são analisados pelo tempo de subida (t_r) (de 0% a 100% do valor final), Erro Médio Quadrático (MSE), que está descrito na Equação 2.31, onde n_{am} é o número de amostras do vetor de erro e consumo de energia.

$$MSE = \frac{\sum_{k=1}^{n_{am}} |e(k)|^2}{n_{am}} \quad (2.31)$$

O MSE é calculado, em todos os testes neste capítulo, para o erro em regime permanente, ou seja, a partir da quarta hora de testes.

2.5.2.1 Controlador PID

Como pode ser observado na Figura 2.11, o tempo de subida é igual a $t_r = 2,75 h$, o MSE calculado é igual a $2,5736 \cdot 10^{-5}$, e o consumo de energia, apresentado na Figura 2.12, é de $41,7236 kWh$. Observa-se também que, no estado transitório, a taxa de melhora do

PMV em relação a zero é de $0,3511 \text{ PMV}/h$.

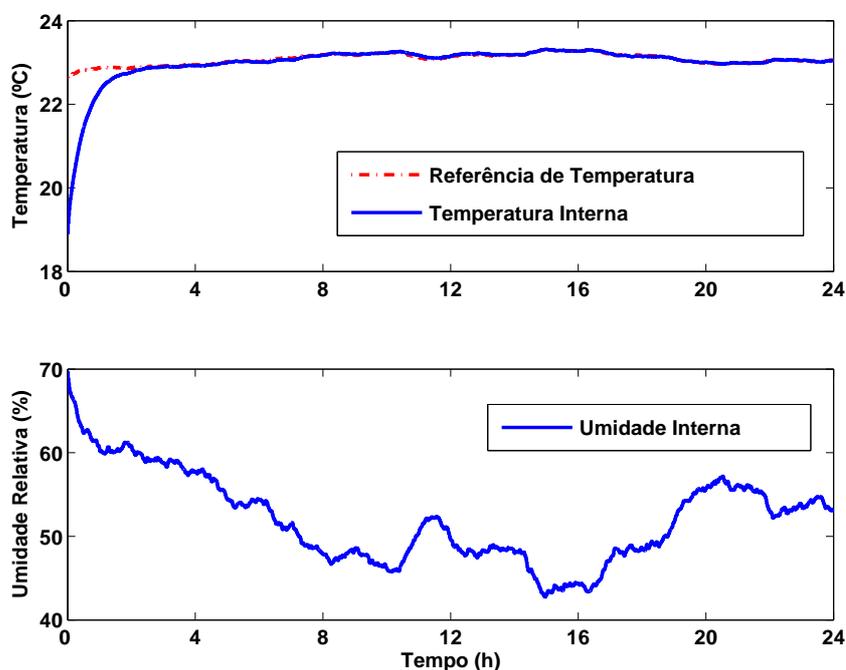


Figura 2.11: Referência de temperatura, temperatura interna e umidade relativa para a simulação em condições normais de operação com controlador PID.

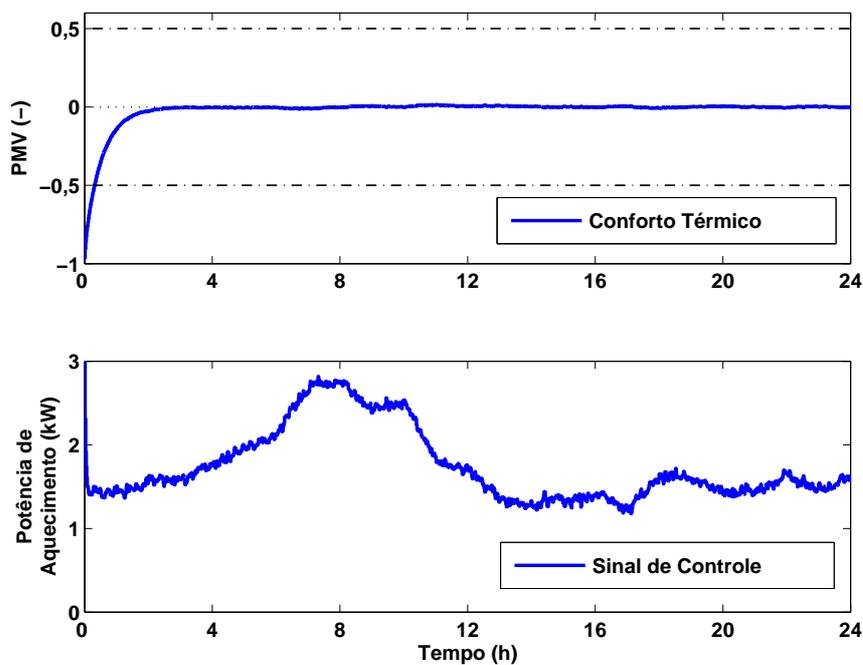


Figura 2.12: Conforto térmico e sinal de controle para a simulação em condições normais de operação com controlador PID.

2.5.2.2 Controlador CRHPC

Como pode ser observado na Figura 2.13, o tempo de subida é igual a $t_r = 0,50 h$, o MSE calculado é igual a $8,8269 \cdot 10^{-5}$, e o consumo de energia, apresentado na Figura 2.14, é de $42,2025 kWh$. Observa-se também que, no estado transitório, a taxa de melhora do PMV em relação a zero é de $1,9311 PMV/h$.

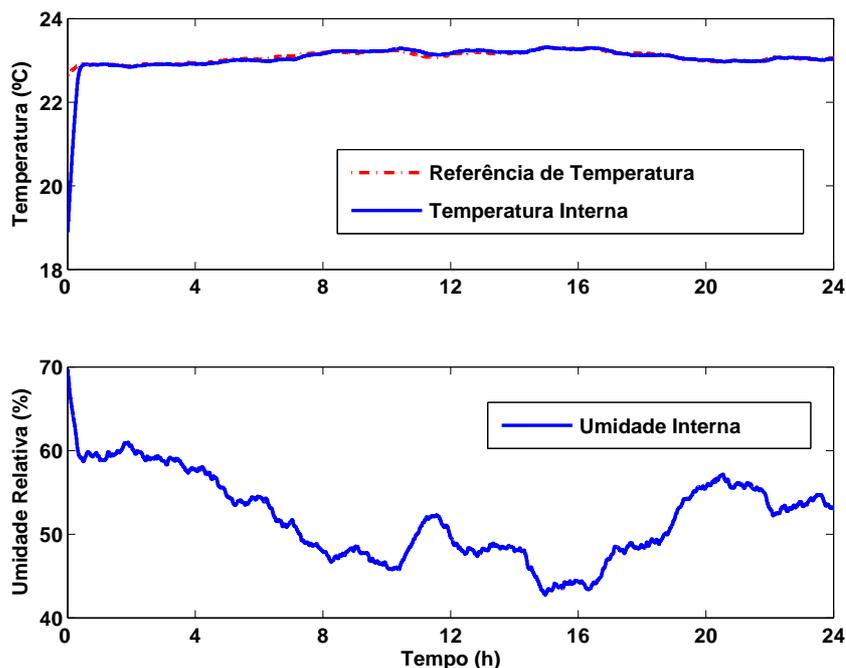


Figura 2.13: Referência de temperatura, temperatura interna e umidade relativa para a simulação em condições normais de operação com controlador CRHPC.

2.5.2.3 Resumo

Em resumo, os resultados para os controladores PID e CRHPC estão apresentados na Tabela 2.1. Pode-se observar que o CRHPC teve o menor tempo de subida e a maior taxa de melhora do PMV em relação a zero no estado transitório, porém o MSE e o consumo de energia foram menores para o controlador PID que para o CRHPC. Também na Tabela 2.1, estão apresentados resultados para o CRHPC com o parâmetro horizonte de previsão final $N_y = 10$.

Através de testes adicionais para o controlador PID variando-se o parâmetro de sintonia ϵ , verificou-se que, à medida que o valor de ϵ diminui, a resposta do sistema em malha fechada tende a ficar mais oscilatória. Aumentando-se o valor de ϵ , diminuem-se as

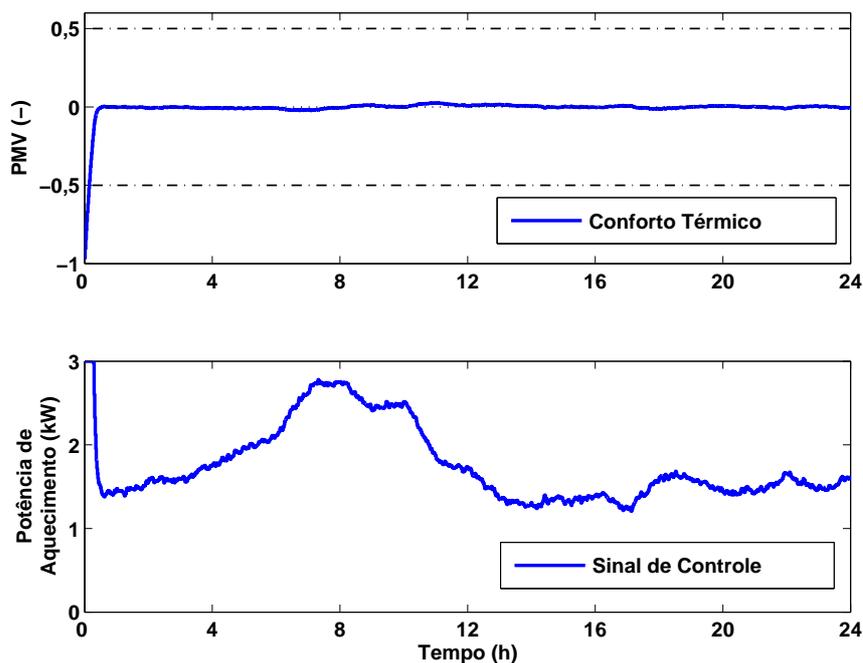


Figura 2.14: Conforto térmico e sinal de controle para a simulação em condições normais de operação com controlador CRHPC.

oscilações, porém a resposta do sistema tende a ficar mais lenta, portanto, mas suscetível às condições climáticas externas que influenciam no conforto térmico da edificação.

Outros testes adicionais, para o CRHPC, foram realizados. Nestes, utilizou-se como modelo de previsão a Equação 2.27 ao invés da Equação 2.29. Uma vez que a Equação 2.27 é também utilizada para simular a dinâmica do processo, eliminou-se os erros de modelagem entre o sinal de controle e o de saída. Verificou-se que não houveram mudanças significativas no desempenho do controlador, indicando que o modelo da Equação 2.29 identificado está adequado.

Tabela 2.1: Resumo da análise para condições normais de operação.

| Controlador | t_r (h) | MSE (-) | Consumo (kWh) | Melhora do PMV (PMV/h) |
|----------------------|-----------|------------------------|---------------|------------------------|
| PID | 2,75 | $2,5736 \cdot 10^{-5}$ | 41,7236 | 0,3511 |
| CRHPC ($N_y = 3$) | 0,50 | $8,8269 \cdot 10^{-5}$ | 42,2025 | 1,9311 |
| CRHPC ($N_y = 10$) | 0,85 | $5,1060 \cdot 10^{-4}$ | 42,1454 | 1,1359 |

2.5.3 Análise para mudanças nas condições de operação

Nesta subseção, testes em simulação são efetuados para a estratégia de geração dinâmica de referência de temperatura, utilizando o controlador clássico do tipo PID e o controlador preditivo CRHPC, em condições de operação adversas.

Para os testes, utilizam-se os seguintes parâmetros do PMV apresentados na Equação 1.1: o sinal de temperatura radiante média é feito igual ao sinal de temperatura do ar, a velocidade do ar é definida igual a $v = 0,1 \text{ m/s}$ e os fatores individuais de atividade e vestimenta são apresentados na Figura 2.15. Tais parâmetros procuram reproduzir a mudança nos parâmetros pessoais que podem ocorrer em um ambiente de escritório. Por exemplo, oito horas com $M = 69,78 \text{ W/m}^2$ ($M = 1,2 \text{ Met}$) e $I_{cl} = 0,1162 \text{ m}^2\text{°C/W}$ ($I_{cl} = 0,75 \text{ Clo}$), que representam uma pessoa com trajes comuns em escritórios e poucas movimentações pelo ambiente, e oito horas com $M = 63,97 \text{ W/m}^2$ ($M = 1,1 \text{ Met}$) e $I_{cl} = 0,1023 \text{ m}^2\text{°C/W}$ ($I_{cl} = 0,66 \text{ Clo}$), que representam uma pessoa sentada com trajes comuns em escritórios, porém mais leves.

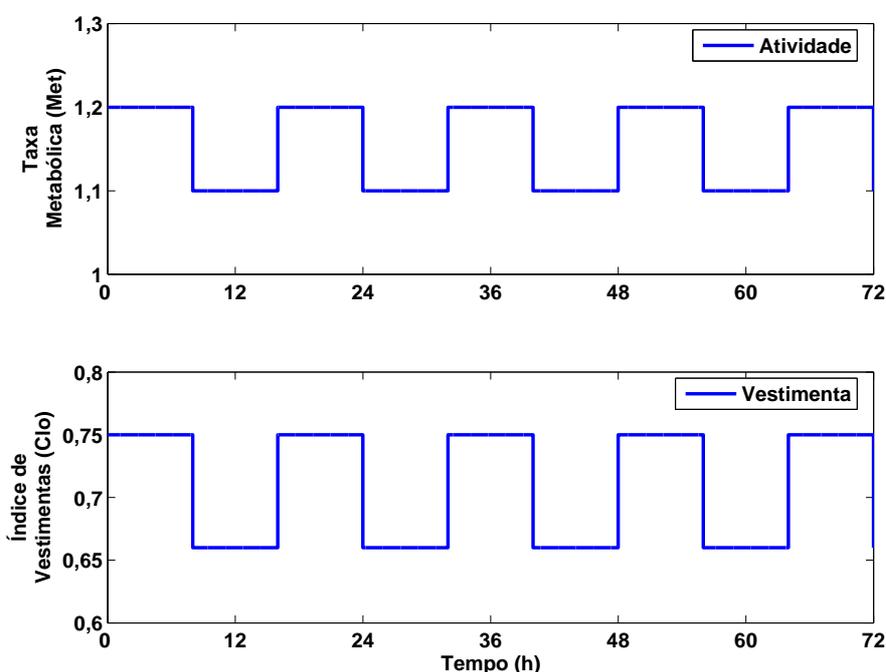


Figura 2.15: Variação nos parâmetros individuais para os testes de mudanças nas condições de operação.

Para verificar o desempenho dos controladores do tipo PID e CRHPC, em condições de operação com mudança nos parâmetros individuais, o período de simulação é de 72 horas, com período de amostragem de 60 segundos. Os controladores são analisados pelos

critérios MSE e consumo de energia.

Os parâmetros dos controladores são os mesmos apresentados na Seção 2.5.2. Para o controlador do tipo PID, $K_p = 5,9087$, $K_i = 0,0030$ e $K_d = 0$. Já para o controlador preditivo CRHPC, $N_1 = 1$, $N_y = 3$, $N_u = 1$, $m = 1$, $\lambda = 0$ e $\mu = 1$.

2.5.3.1 Controlador PID

Como pode ser observado na Figura 2.16, o MSE calculado é igual a $3,7862 \cdot 10^{-3}$, e o consumo de energia, apresentado na Figura 2.17, é de $116,3867 \text{ kWh}$.

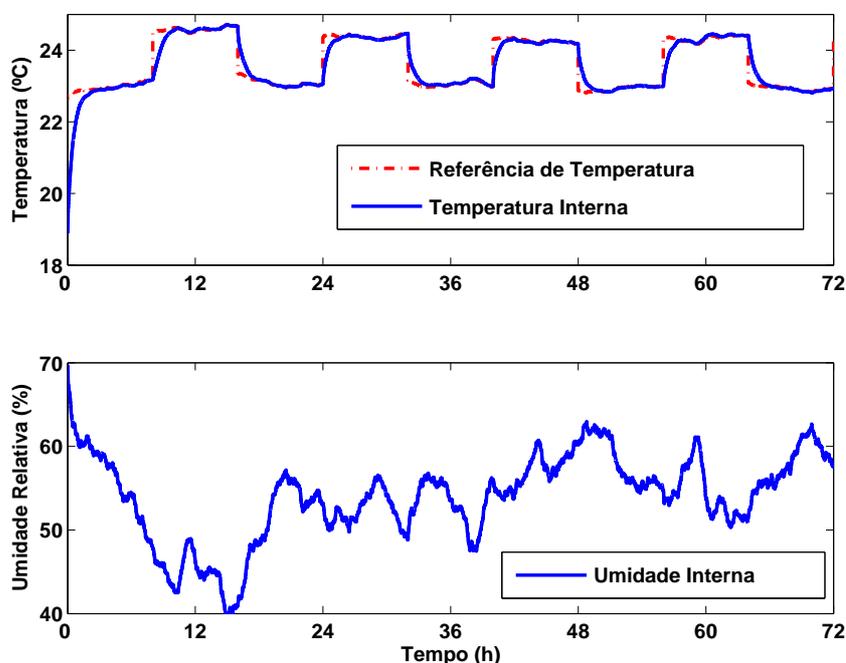


Figura 2.16: Referência de temperatura, temperatura interna e umidade relativa para a simulação com mudanças nas condições de operação com controlador PID.

2.5.3.2 Controlador CRHPC

Como pode ser observado na Figura 2.18, o MSE calculado é igual a $2,2220 \cdot 10^{-3}$, e o consumo de energia, apresentado na Figura 2.19, é de $116,7491 \text{ kWh}$.

2.5.3.3 Resumo

Em resumo, os resultados para os controladores PID e CRHPC estão apresentados na Tabela 2.2. Pode-se observar que o CRHPC teve o menor MSE, porém o consumo

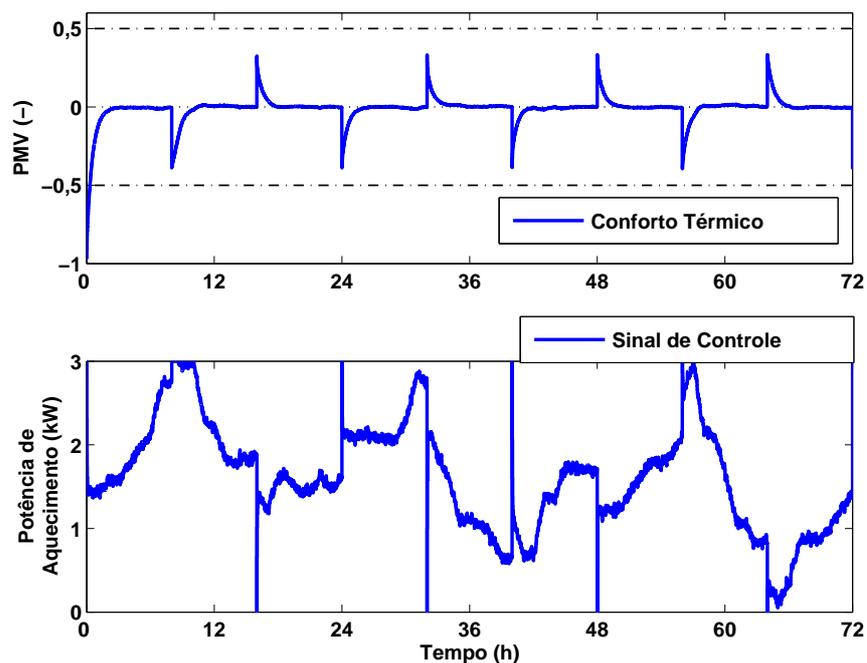


Figura 2.17: Conforto térmico e sinal de controle para a simulação com mudanças nas condições de operação com controlador PID.

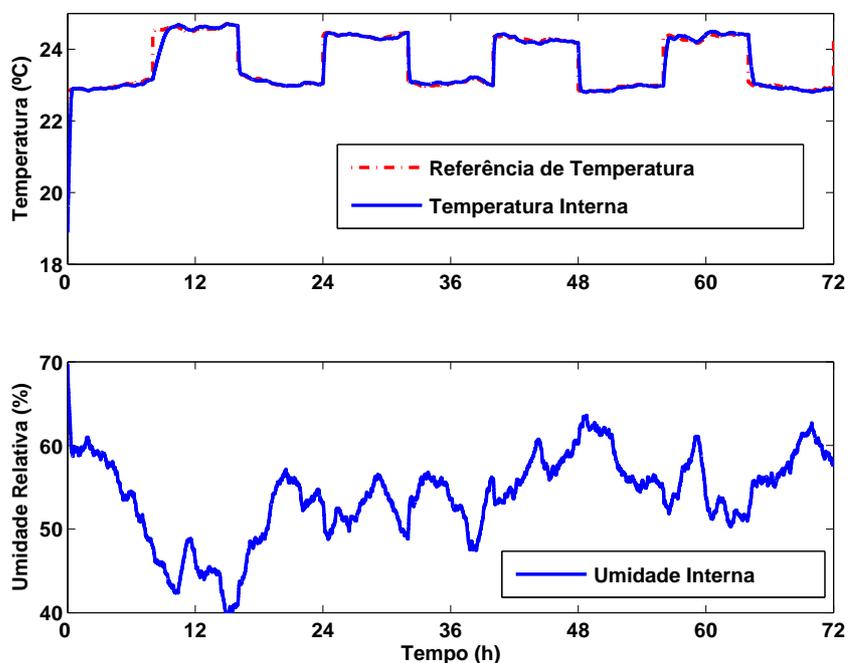


Figura 2.18: Referência de temperatura, temperatura interna e umidade relativa para a simulação com mudanças nas condições de operação com controlador CRHPC.

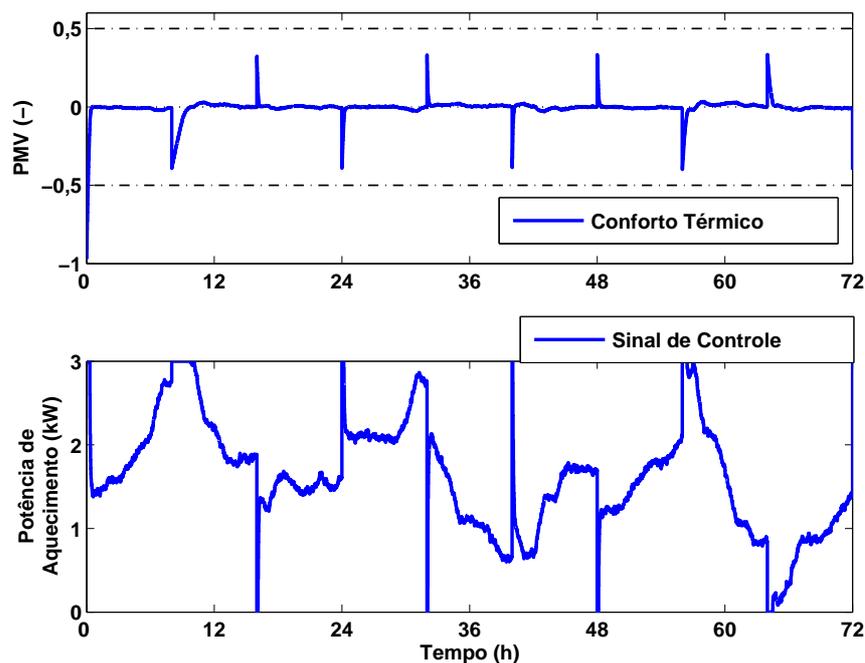


Figura 2.19: Conforto térmico e sinal de controle para a simulação com mudanças nas condições de operação com controlador CRHPC.

de energia foi um pouco menor para o PID. Também na Tabela 2.2, estão apresentados resultados para o CRHPC com o parâmetro horizonte de previsão final $N_y = 10$.

Tabela 2.2: Resumo da análise para mudanças nas condições de operação.

| Controlador | MSE (-) | Consumo (kWh) |
|----------------------|------------------------|---------------|
| PID | $3,7862 \cdot 10^{-3}$ | 116,3867 |
| CRHPC ($N_y = 3$) | $2,2220 \cdot 10^{-3}$ | 116,7491 |
| CRHPC ($N_y = 10$) | $3,1363 \cdot 10^{-3}$ | 116,7344 |

2.5.4 Análise para adição de perturbação

Nesta subsecção, testes em simulação são efetuados para a estratégia de geração dinâmica de referência de temperatura, utilizando o controlador clássico do tipo PID e o controlador preditivo CRHPC em condições de operação com adição de uma perturbação.

Para os testes, utilizaram-se os seguintes parâmetros do PMV apresentados na Equação 1.1: o sinal de temperatura radiante média é feito igual ao sinal de temperatura do

ar, a velocidade do ar é definida igual a $v = 0,1 \text{ m/s}$ e os fatores individuais de atividade e vestimenta são $M = 69,78 \text{ W/m}^2$ ($M = 1,2 \text{ Met}$) e $I_{cl} = 0,1162 \text{ m}^2\text{°C/W}$ ($I_{cl} = 0,75 \text{ Clo}$). Tais parâmetros procuram reproduzir as condições climáticas e pessoais de um ambiente de escritório e uma geração de calor adicional que pode ocorrer por indivíduos presentes na edificação. Este sinal de perturbação é de 600 W e está apresentado na Figura 2.20.

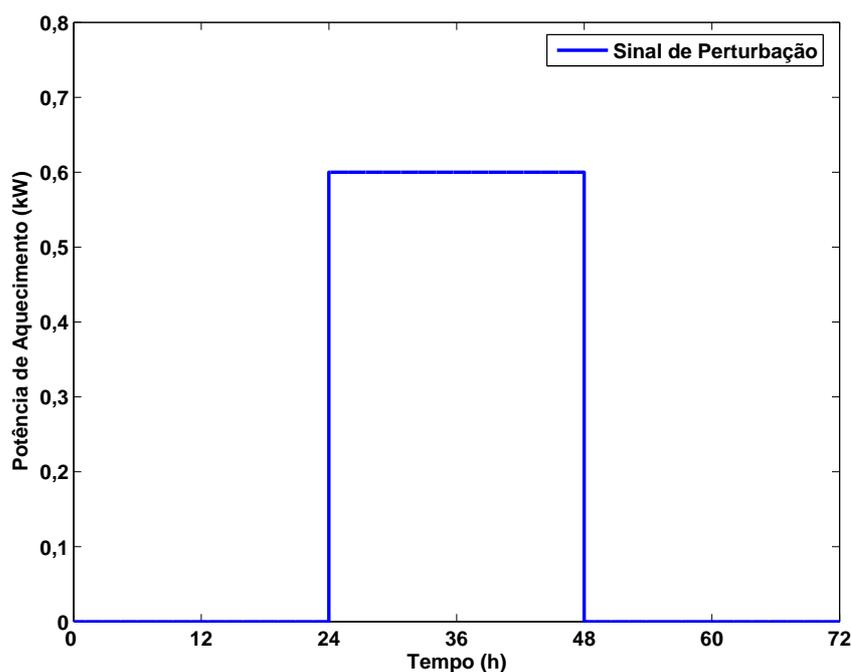


Figura 2.20: Sinal de perturbação para os testes de adição de perturbação.

Para verificar o desempenho dos controladores do tipo PID e CRHPC, em condições de operação com adição de um sinal de perturbação, o período de simulação é de 72 horas, com período de amostragem de 60 segundos. Os controladores são analisados pelos critérios MSE e consumo de energia.

Os parâmetros dos controladores são os mesmos apresentados na Seção 2.5.2. Para o controlador do tipo PID, $K_p = 5,9087$, $K_i = 0,0030$ e $K_d = 0$. Já para o controlador preditivo CRHPC, $N_1 = 1$, $N_y = 3$, $N_u = 1$, $m = 1$, $\lambda = 0$ e $\mu = 1$.

Como pode ser observado nos gráficos de desempenho das leis de controle desta subseção e nas condições climáticas externas ao ambiente de simulação, apresentadas na Figura 2.8, na hora 42 dos testes de simulação ocorre um aumento na temperatura, desviando o sinal de conforto térmico da sensação de neutralidade. Isso ocorre devido à adição de uma geração de calor não controlada. Mesmo desligando a ação de controle

aplicada ao aquecedor, não é possível levar a edificação, neste instante de tempo, ao PMV nulo, entretanto, ela continua dentro da faixa aceitável de conforto térmico.

2.5.4.1 Controlador PID

Como pode ser observado na Figura 2.21, o MSE calculado é igual a $1,2934 \cdot 10^{-3}$, e o consumo de energia, apresentado na Figura 2.22, é de $86,9132 \text{ kWh}$.

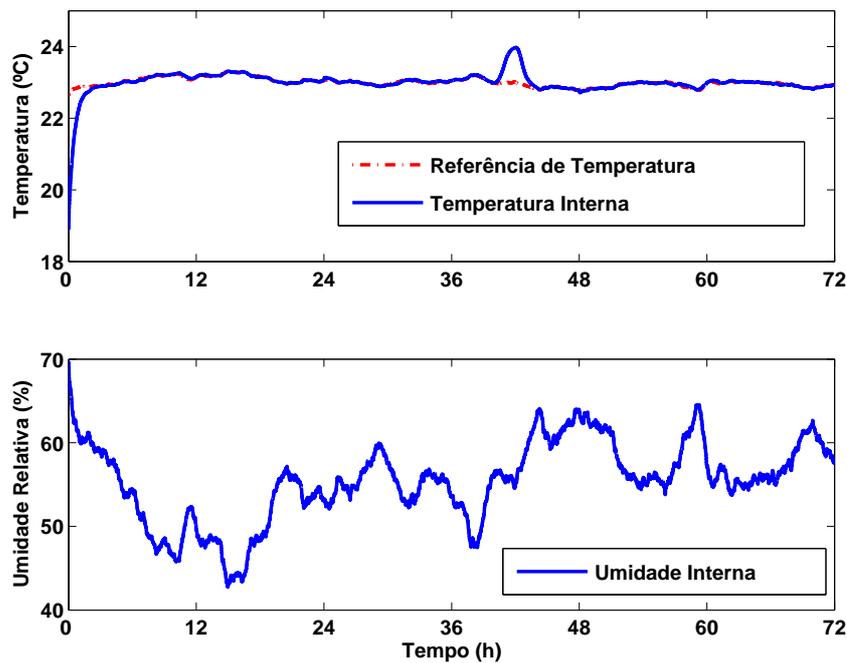


Figura 2.21: Referência de temperatura, temperatura interna e umidade relativa para a simulação com adição de perturbação para o controlador PID.

2.5.4.2 Controlador CRHPC

Como pode ser observado na Figura 2.23, o MSE calculado é igual a $1,3287 \cdot 10^{-3}$, e o consumo de energia, apresentado na Figura 2.24, é de $87,3196 \text{ kWh}$.

2.5.4.3 Resumo

Em resumo, os resultados para os controladores PID e CRHPC estão apresentados na Tabela 2.3. Pode-se observar que os controladores PID e CRHPC tiveram MSE próximos, porém o consumo de energia foi menor para o PID. Também na Tabela 2.3, estão apresentados resultados para o CRHPC com o parâmetro horizonte de previsão final $N_y = 10$.

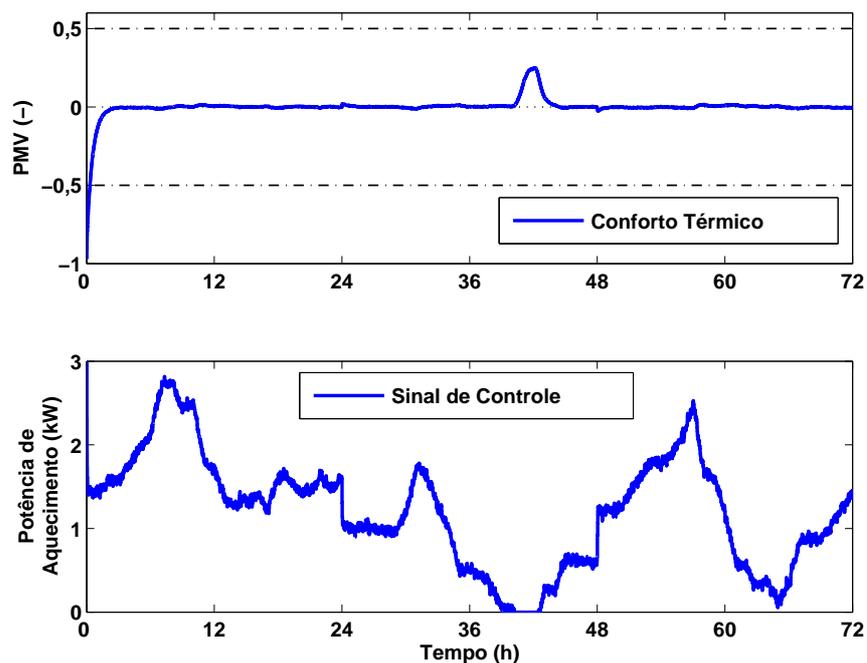


Figura 2.22: Conforto térmico e sinal de controle para a simulação com adição de perturbação para o controlador PID.

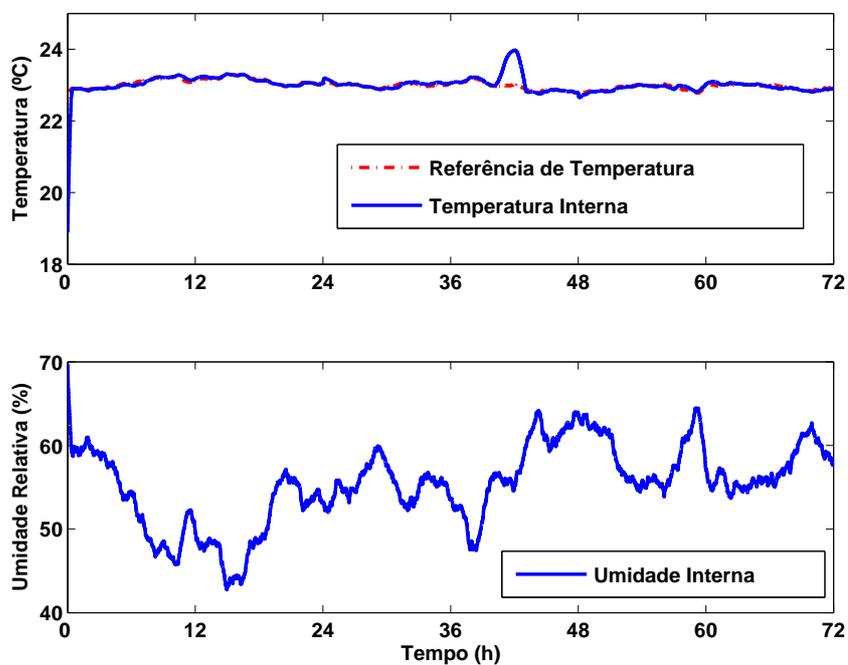


Figura 2.23: Referência de temperatura, temperatura interna e umidade relativa para a simulação com adição de perturbação para o controlador CRHPC.

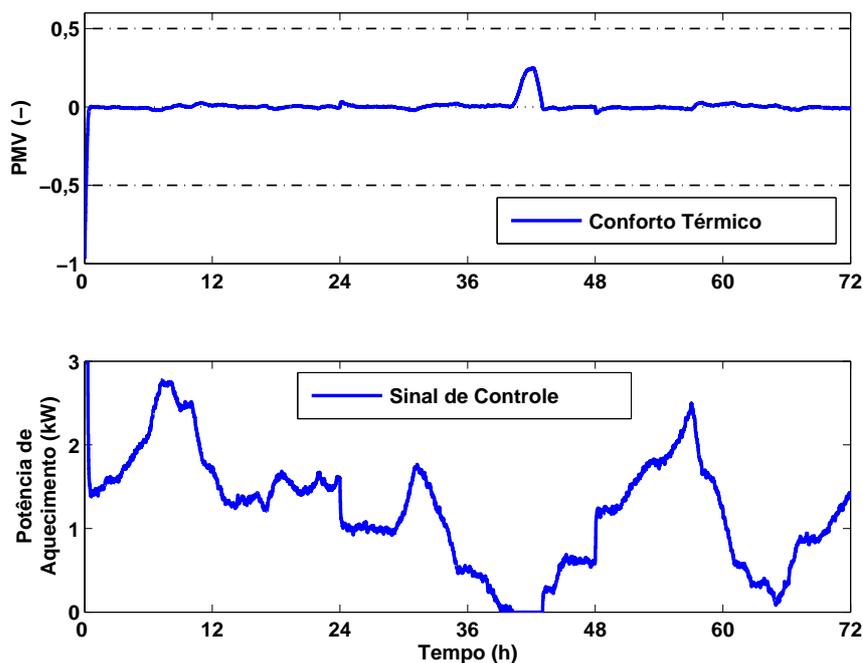


Figura 2.24: Conforto térmico e sinal de controle para a simulação com adição de perturbação para o controlador CRHPC.

Tabela 2.3: Resumo da análise para adição de perturbação.

| Controlador | MSE (-) | Consumo (<i>kWh</i>) |
|----------------------|------------------------|------------------------|
| PID | $1,2934 \cdot 10^{-3}$ | 86,9132 |
| CRHPC ($N_y = 3$) | $1,3287 \cdot 10^{-3}$ | 87,3196 |
| CRHPC ($N_y = 10$) | $1,8373 \cdot 10^{-3}$ | 87,2793 |

2.6 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo, apresentou-se uma estratégia de controle de conforto térmico sem a necessidade de alteração nas estruturas das malhas convencionais de controle de sistemas de climatização. Ela é dada por uma malha externa de geração de referência de temperatura ótima adicionada à malha de controle convencional de temperatura, geralmente presente nos sistemas de climatização.

A geração de referência é feita com base no índice de conforto térmico PMV, o qual usa informações ambientais e pessoais para análise de conforto térmico. O cálculo da referência é feito visando encontrar a temperatura ambiente que anulará o PMV e pode

ser resolvido através de um método de programação não-linear.

Revisaram-se, ainda, as leis de controle clássicas PID e PID com modificações e a lei de controle preditivo CRHPC, visando a implementação em sistemas de climatização. Testes em simulação mostraram o desempenho das leis de controle revisadas, para controle de conforto térmico por geração de referência ótima, em três situações: *i*) condições normais de operação; *ii*) mudanças nas condições de operação pela alteração de parâmetros individuais; *iii*) adição de uma perturbação.

O desempenho das leis de controle, analisadas pelos critérios MSE, tempo de subida, consumo energético e taxa de melhoramento do conforto térmico, foram bastante próximas e todas levaram o sistema para o PMV zero, com erro nulo em regime permanente, porém, o controlador preditivo CRHPC se mostrou mais rápido em levar a edificação ao conforto térmico, mesmo tendo um consumo médio de energia um pouco acima dos demais.

Pode ser observado também que nos testes para mudança nos parâmetros individuais, as variações causam uma alteração no valor do PMV, porém continuam dentro da região de conforto térmico. entretanto, para o teste de adição de perturbação, na hora 42 ocorre um leve aumento no índice PMV, devido às condições climáticas externas e da edificação, porém também se encontra dentro da região de conforto térmico.

3 Controle de Conforto via inclusão do índice PMV na Malha de Controle

Conforme apresentado na Seção 1.3.2, controle de conforto térmico pode ser abordado de diferentes formas. No capítulo anterior, o controle de conforto térmico foi abordado através de uma estratégia cuja principal característica era a manutenção de uma malha convencional de controle de temperatura, e o PMV ótimo era obtido manipulando-se o sinal de referência. Neste capítulo, a equação do PMV é introduzida na malha de controle a fim de promover conforto térmico.

3.1 Introdução

Neste capítulo, o conforto térmico é tratado como uma variável controlada do sistema em malha fechada. Duas linhas principais de estudo, neste contexto, são analisadas neste capítulo e estão apresentadas a seguir.

A primeira linha, encontrada em Gouda *et al.* (2001), Calvino *et al.* (2004), Liang e Du (2005), Donaisky *et al.* (2006) e Donaisky *et al.* (2007a) inclui o índice PMV na malha de controle através da implementação de um sensor virtual ou real de PMV. Esta proposta geralmente é encontrada quando se utilizam leis de controle do tipo PID e *Fuzzy*.

A segunda linha, proposta originalmente por Freire (2006), caracteriza-se por definir um modelo de previsão para o PMV (cálculo do índice PMV (Equação 1.1)) e incluir este modelo de previsão em um algoritmo de controle preditivo não-linear. Posteriormente, aspectos de redução de energia foram incluídos em Freire *et al.* (2006) e Freire *et al.* (2008). Finalmente, diferentes aplicações de controle de conforto com controle preditivo são encontradas em Freire *et al.* (2008). Posteriormente, em Donaisky *et al.* (2007b), aborda-se este problema através do controle preditivo com restrições terminais.

Este capítulo está organizado conforme segue. Na Seção 3.2, o modelo da edificação incluindo a equação de PMV é descrito. Na Seção 3.3, o sistema de controle em malha fechada com realimentação de PMV é descrito e, na Seção 3.4, os algoritmos de controle preditivo não-linear para conforto térmico são apresentados. Resultados de simulação são comentados na Seção 3.5.

3.2 Modelo da Edificação

Uma edificação pode ser vista como um sistema dinâmico multivariável onde os principais sinais de entrada são o sinal de controle do sistema de climatização, a temperatura externa, a umidade relativa externa e a radiação solar total. Os sinais de saída são a temperatura interna e a umidade relativa interna. Apesar deste sistema ser não-linear, principalmente pelas propriedades da umidade relativa, modelos lineares fornecem uma representação adequada para ela (Freire *et al.*, 2005a). Outro sinal de saída relevante relacionado a este problema é o sinal de PMV. Esta saída é obtida usando as saídas citadas anteriormente adicionadas de algumas informações ambientais, como temperatura radiante e velocidade do ar, e pessoais, como atividades e vestimentas (ver Seção 1.2). O diagrama de blocos deste sistema é mostrado na Figura 3.1.

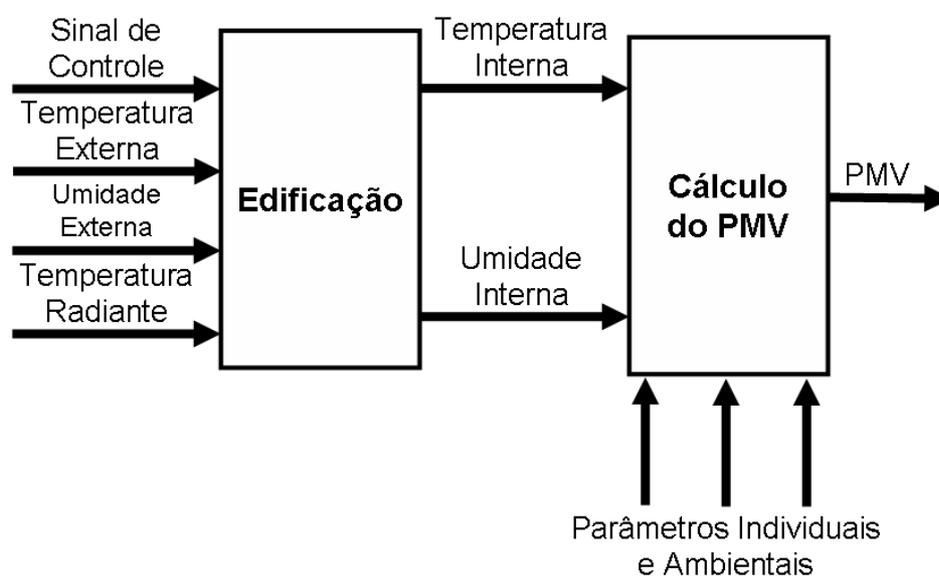


Figura 3.1: Estrutura da edificação.

Do ponto de vista de modelagem, a edificação pode ser representada por um sistema não-linear, com estrutura *Wiener* (Campello e Oliveira, 2007), como apresentado na Figura 3.2.

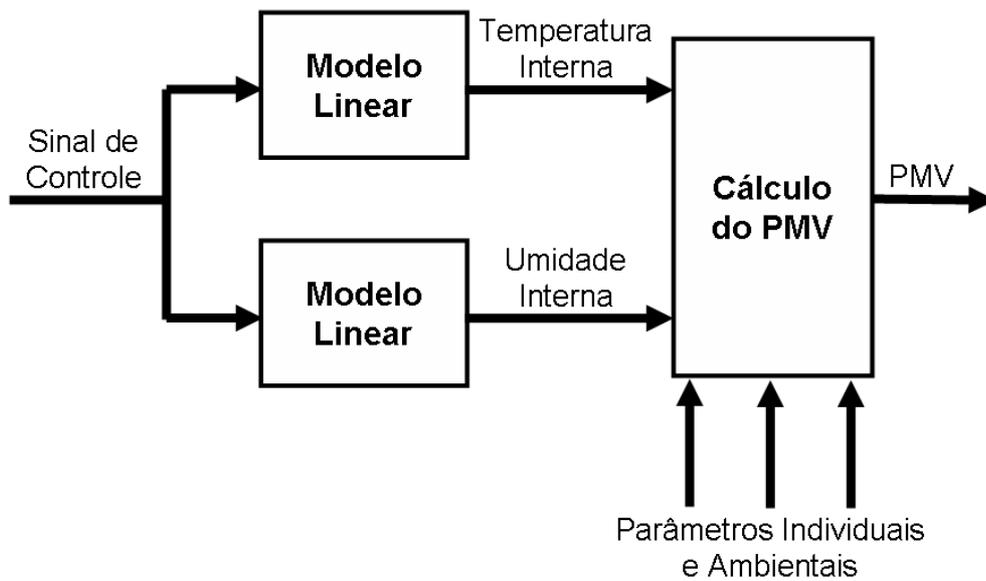


Figura 3.2: Modelo não-linear de PMV.

A equação de previsão do PMV, dada pela Equação 1.1, quando a temperatura radiante média T_{rm} é considerada igual a temperatura do ar T_{bs} (ver Seção 2.2), torna-se:

$$PMV = G(T_{bs}, \phi, v, M, I_{cl}). \quad (3.1)$$

3.3 Controle com Realimentação do Sinal de PMV

A estratégia de controle de conforto térmico, feita através da inclusão do índice PMV na malha de controle, utiliza parâmetros ambientais e individuais para encontrar o valor de erro entre o conforto térmico, ou seja, PMV nulo, e as condições do ambiente. Esta estratégia está ilustrada na Figura 3.3.

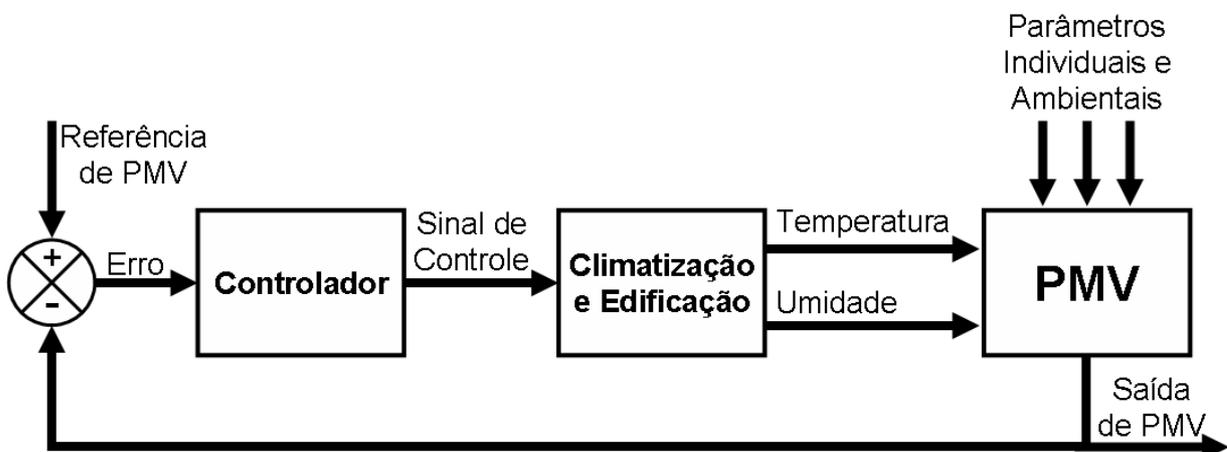


Figura 3.3: Estratégia de inclusão do índice PMV na malha de controle.

A lei de controle a ser utilizada pode ser tanto uma lei de controle clássica (PID ou PID com modificações), quanto uma outra lei de controle. Na Figura 3.3, o bloco **PMV** recebe informações dos parâmetros ambientais: umidade, temperatura do ar e radiante e velocidade do ar, e dos parâmetros individuais: taxa metabólica e índice de vestimentas, para gerar o índice PMV (Equação 3.1).

3.4 Controle Preditivo para Sistemas de Climatização

Outra maneira de utilizar a estratégia de controle de conforto via inclusão do índice PMV na malha de controle é aplicar controladores do tipo MBPC a uma edificação climatizada artificialmente, conforme apresentado na Seção 3.2. Com essa classe de controladores é possível incluir a equação de cálculo do PMV (Equação 1.1) na lei de controle. Porém, esta modificação na lei de controle torna-a não-linear com estrutura *Wiener*, que é dada por um modelo linear seguido de uma não-linearidade estática (Campello e Oliveira, 2007). A Figura 3.4 representa esta malha de controle.

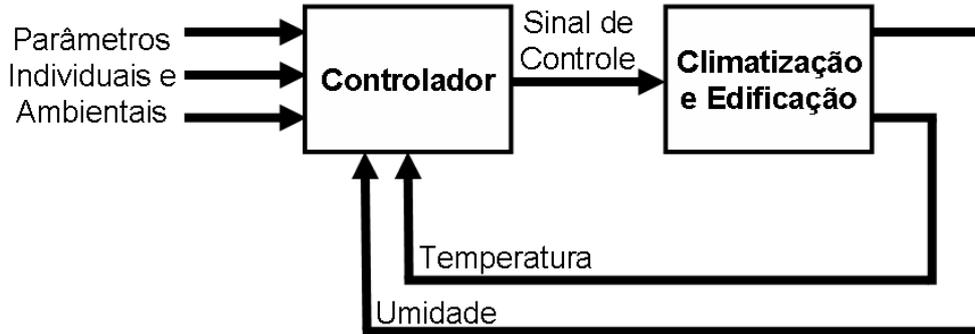


Figura 3.4: Estratégia de inclusão do índice PMV na malha de controle para controle preditivo.

Neste caso, a equação de previsão da saída $\hat{y}_{PMV}(k+j|k)$ é calculada em função dos modelos de previsão de temperatura interna e umidade relativa interna, que podem ser encontrados conforme apresentado no Capítulo 2. O modelo de previsão em espaço de estados para os sinais de temperatura interna e umidade relativa interna é definido, como se segue:

$$\begin{cases} \Delta x(k+1) &= A_{Temp,Umi} \Delta x(k) + B_{Temp,Umi} \Delta u(k) \\ y_{Temp,Umi}(k) &= C_{Temp,Umi} \Delta x(k) + y_{Temp,Umi}(k-1), \end{cases} \quad (3.2)$$

onde $\Delta x(k)$ é a variação no estado do sistema, $y_{Temp,Umi}(k) = [y_{Temp}(k) \ y_{Umi}(k)]^T$ são, respectivamente, o sinal de saída de temperatura e o sinal de saída de umidade, $\Delta u(k)$

é a variação no sinal de controle e $A_{\text{Temp,Umi}}$, $B_{\text{Temp,Umi}}$ e $C_{\text{Temp,Umi}}$ são as matrizes que contêm os coeficientes do modelo.

Usando este modelo de previsão mais informações individuais (M e I_{cl}) e ambientais (v e T_{rm}) é possível chegar aos valores de previsão do PMV para os cálculos computacionais na equação de custo, ou seja:

$$\hat{y}_{\text{PMV}}(k+j|k) = G(y_{\text{Temp}}(k+j|k), y_{\text{Umi}}(k+j|k), v(k), M(k), I_{\text{cl}}(k)), \quad (3.3)$$

sendo $G(\cdot)$ dado pela Equação 1.1. Como visto no Capítulo 2, a temperatura radiante média pode ser considerada igual à temperatura do ar, ou seja, $T_{\text{rm}} = y_{\text{Temp}}$, o que é equivalente a dizer que a temperatura média das superfícies das paredes internas é igual à temperatura interna do ar.

Para a inclusão do índice PMV na lei de controle é necessário fazer uma alteração na função de custo do controlador preditivo CRHPC, apresentada na Equação 2.13. Esta lei de controle é denominada Controle Preditivo com Restrições Terminais e inclusão do índice PMV (PMV-CRHPC). A função de custo desta lei de controle é dada por:

$$J(k) = \sum_{j=N_1}^{N_y} \mu(j) \hat{y}_{\text{PMV}}^2(k+j|k) + \sum_{j=0}^{N_u-1} \lambda(j) \Delta u^2(k+j|k), \quad (3.4)$$

onde o sinal de referência (w da Equação 2.13) é zero pois, o quanto mais próximo de zero estiver o índice PMV, melhor será a sensação térmica.

A lei de controle é obtida pela minimização da Equação 3.4 em relação às futuras variações no sinal de controle Δu , sujeito a restrições terminais, ou seja:

$$\begin{aligned} & \min_{\Delta u(k|k), \Delta u(k+1|k), \dots, \Delta u(k+N_u-1|k)} J(k) \\ & \text{sujeito a} \\ & \Delta u(k+j|k) = 0 \quad \forall j = N_u, \dots, N_y \\ & \hat{y}_{\text{PMV}}(k+N_y+j|k) = 0 \quad \forall j = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (3.5)$$

Esta função de custo define uma otimização não-linear, com restrições não-lineares. O primeiro conjunto de restrições está relacionado com a definição do horizonte de controle, enquanto o segundo conjunto implementa as restrições terminais em uma janela de restrições m .

3.4.1 Estabilidade no CRHPC com inclusão do índice PMV

Na Seção 2.4.2, foram apresentados resultados sobre a estabilidade do sistema em malha fechada para a lei de controle com restrições terminais para o caso de sistemas lineares. A seguir, estes resultados, válidos para horizonte finito e baseados na monotonicidade da função de custo, são estendidos para o caso não-linear de controle de PMV.

A monotonicidade do critério de custo, como apresentado na Seção 2.4.2.1, é obtida pelo congelamento da estratégia de controle calculado em seu último valor, e que geralmente não é ótimo no próximo instante de controle. Além disso, a futura otimização do vetor de controle obtido pela estratégia de horizonte deslizante leva a uma futura redução no custo.

Teorema 3.1 *Seja o sistema em malha-fechada, cujo processo é dado pelas equações 3.2 e 3.3 e a lei de controle dada pelas equações 3.4 e 3.5, sem perturbação, o PMV-CRHPC se estabiliza se*

$$\mu(N_y) \geq \mu(N_y - 1) \geq \dots \geq \mu(1), \quad \mu \neq 0,$$

$$\lambda(N_u - 1) \geq \lambda(N_u - 2) \geq \dots \geq \lambda(0) \quad \text{e} \quad m = n$$

Prova: Inicialmente, o caso com $\mu(j)$ e $\lambda(j)$ constantes para todo j , é abordado. Posteriormente, o caso geral, com $\mu(j)$ e $\lambda(j)$ crescentes, será apresentado.

Assume-se que o critério com sinal de controle ótimo é obtido para o instante k , isto é, $J(k)$. No instante $k + 1$, um sinal de controle sub-ótimo $\Delta u_c(k + 1)$ é utilizado, gerando um valor para o critério de custo dado $J_c(k + 1)$. $\Delta u_c(k + 1)$ corresponde ao congelamento do vetor de controle ótimo em seu último valor, conforme apresentado na Seção 2.4.2.1. Portanto, a mudança do critério de custo no tempo $k + 1$ é:

$$\begin{aligned} J_c(k + 1) - J(k) &= \mu \sum_{j=1}^{N_y} \hat{y}_{\text{PMV}}^2(k + 1 + j|k + 1) + \lambda \sum_{j=0}^{N_u-1} \Delta u_c^2(k + 1 + j|k + 1) \\ &\quad - \mu \sum_{j=1}^{N_y} \hat{y}_{\text{PMV}}^2(k + j|k) - \lambda \sum_{j=0}^{N_u-1} \Delta u^2(k + j|k), \end{aligned} \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}
J_c(k+1) - J(k) &= \mu [\hat{y}_{\text{PMV}}^2(k+2|k+1) + \hat{y}_{\text{PMV}}^2(k+3|k+1) + \dots \\
&\quad \dots + \hat{y}_{\text{PMV}}^2(k+1+N_y|k+1)] \\
&\quad + \lambda [\Delta u_c^2(k+1|k+1) + \dots + \Delta u_c^2(k+N_u|k+1)] \\
&\quad - \mu [\hat{y}_{\text{PMV}}^2(k+1|k) + \hat{y}_{\text{PMV}}^2(k+2|k) + \dots + \hat{y}_{\text{PMV}}^2(k+N_y|k)] \\
&\quad - \lambda [\Delta u^2(k|k) + \Delta u^2(k+1|k) + \dots + \Delta u^2(k+N_u-1|k)],
\end{aligned} \tag{3.7}$$

onde $\hat{y}_{\text{PMV}}(\cdot)$ é o sinal de saída do PMV, pois a referência é nula e o subscrito c indica a suposição de que $\Delta u_c(k+1)$ é implementado no tempo $k+1$ (e conseqüentemente que a estratégia de controle calculado foi congelada em seu último valor). Combinando-se a Equação 3.6 com as Equações 2.16 a 2.18, tem-se:

$$\begin{aligned}
J_c(k+1) - J(k) &= \mu [\hat{y}_{\text{PMV}}^2(k+2|k) + \hat{y}_{\text{PMV}}^2(k+3|k) + \dots + \hat{y}_{\text{PMV}}^2(k+1+N_y|k)] \\
&\quad + \lambda [\Delta u^2(k+1|k) + \Delta u^2(k+2|k) + \dots + 0] \\
&\quad - \mu [\hat{y}_{\text{PMV}}^2(k+1|k) + \hat{y}_{\text{PMV}}^2(k+2|k) + \dots + \hat{y}_{\text{PMV}}^2(k+N_y|k)] \\
&\quad - \lambda [\Delta u^2(k|k) + \Delta u^2(k+1|k) + \dots + \Delta u^2(k+N_u-1|k)] \\
J_c(k+1) - J(k) &= \mu [\hat{y}_{\text{PMV}}^2(k+1+N_y|k) - \hat{y}_{\text{PMV}}^2(k+1|k)] - \lambda \Delta u^2(k|k).
\end{aligned} \tag{3.8}$$

Além disso, o vetor de controle $\Delta u(k)$ satisfaz as restrições de igualdade na Equação 3.5. Dessa forma, tem-se $\hat{y}_{\text{PMV}}(k+N_y+1|k) = 0$ e a substituição na Equação 3.8 leva a:

$$J_c(k+1) - J(k) = -\mu \hat{y}_{\text{PMV}}^2(k+1|k) - \lambda \Delta u^2(k|k), \tag{3.9}$$

o qual implica que $J_c(k+1) \leq J(k)$ como ilustrado na Figura 3.5.

Se $\Delta u_c(k+1)$ é tal que as restrições de igualdade especificadas na Equação 3.5 são satisfeitas no tempo $k+1$, então ele é potencialmente um vetor de controle para o instante de tempo atual. Mas, se $m = n$, segue que a restrição de igualdade do sinal de saída na Equação 3.5 é garantida não apenas para $j \in [1, m]$ mas para todo $j \geq 1$ (Sckaert e Clarke, 1994). Combinando-se este fato com as Equações 2.17 e 2.18, encontram-se a implicação de que $\Delta u_c(k+1)$ realmente satisfaz as restrições terminais de igualdade no tempo $k+1$. Então, o vetor de controle ótimo $\Delta u(k+1)$, que também satisfaz essas restrições e futuramente minimiza o custo $J(k)$, deve levar a um custo $J(k+1) \leq J_c(k+1)$

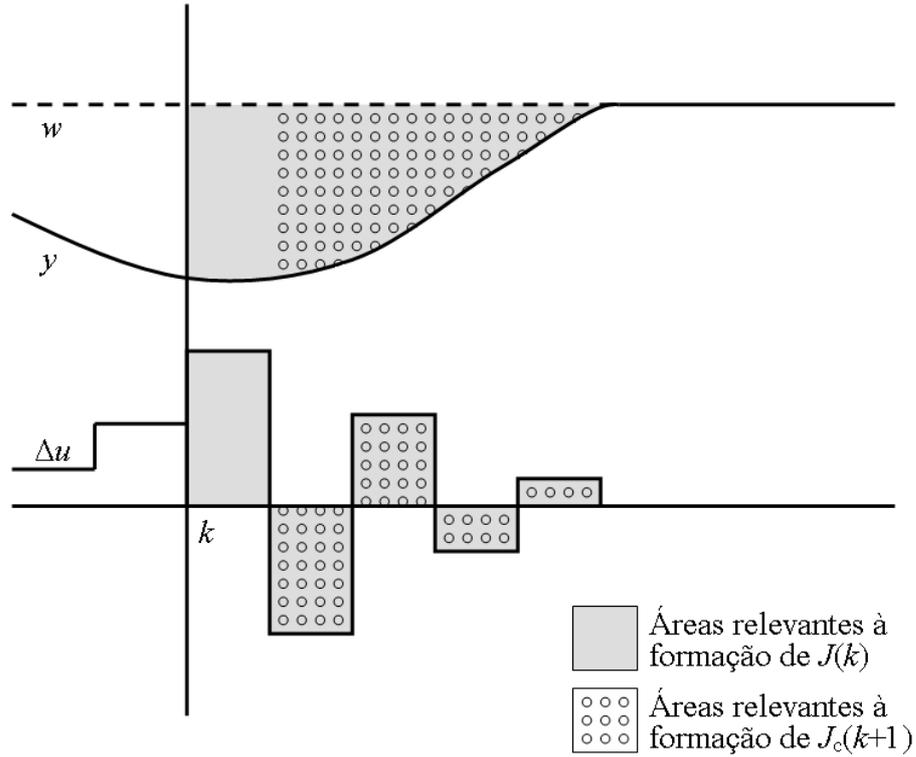


Figura 3.5: Custo no PMV-CRHPC.

tal que:

$$\Delta J(k+1) \leq -\mu \hat{y}_{\text{PMV}}^2(k+1|k) - \lambda \Delta u^2(k|k). \quad (3.10)$$

Como o custo $J(k)$ é por definição não-negativo, a Equação 3.10 leva a:

$$\begin{aligned} \lim_{k \rightarrow \infty} \mu \hat{y}_{\text{PMV}}(k+1) &= \lim_{k \rightarrow \infty} \mu \hat{y}_{\text{PMV}}(k+1|k) = 0 \quad \text{e} \\ \lim_{k \rightarrow \infty} \lambda \Delta u(k) &= \lim_{k \rightarrow \infty} \lambda \Delta u(k|k) = 0, \end{aligned} \quad (3.11)$$

o que implica estabilidade se $\mu \neq 0$. Se $\mu = 0$, a convergência do sinal de controle não necessariamente implica estabilidade (Scockaert e Clarke, 1994).

Usando a monotonicidade, conclui-se que:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \hat{y}_{\text{PMV}}(k+N_y+1) = \lim_{k \rightarrow \infty} \hat{y}_{\text{PMV}}(k+N_y+1|k) = 0. \quad (3.12)$$

A substituição da restrição terminal $\hat{y}_{\text{PMV}}(k+N_y+j|k) = 0$ ($j \in [1, m]$) na Equação 3.12 leva à estabilidade.

Para seqüências de ponderação não-constantes $\mu(j)$ e $\lambda(j)$, a Equação 3.10 torna-se:

$$\Delta J(k+1) \leq \sum_{j=1}^{N_y} [\mu(j-1) - \mu(j)] \hat{y}_{\text{PMV}}^2(k+j|k) + \sum_{j=0}^{N_u-1} [\lambda(j-1) - \lambda(j)] \Delta u^2(k+j|k), \quad (3.13)$$

com $\mu(0) = 0$ e $\lambda(-1) = 0$, o que implica estabilidade se $\mu(j) > \mu(j-1)$ e $\lambda(j) > \lambda(j-1)$. Isto quer dizer que como $\mu(j) > \mu(j-1)$ e $\lambda(j) > \lambda(j-1)$, a Equação 3.13 é equivalente a Equação 3.10.

□□□

3.5 Resultados Numéricos

Nesta seção, analisa-se o desempenho da estratégia de inclusão do índice PMV na malha de controle, proposta nas seções anteriores. Para tanto, descreve-se o problema de aquecimento de um ambiente a fim de manter as condições ambientais em um nível que promova a melhor sensação de conforto térmico possível para os ocupantes. Desta forma, as propriedades do ambiente e o modelo da edificação são descritos na seção 3.5.1. Na seqüência, são apresentados três testes realizados em simulação para verificar o desempenho das leis de controle. O primeiro, com condições normais de operação, é para verificar se o conforto é alcançado para determinados parâmetros climáticos e individuais. O segundo, com mudança nas condições de operação, é para verificar se o conforto é promovido para determinados parâmetros climáticos e variações nos parâmetros individuais. O terceiro é para verificar se o conforto é atingido com adição de uma perturbação, no caso, uma geração de calor interna.

3.5.1 Definição do Ambiente de Simulação

O ambiente de simulação utilizado possui as dimensões físicas do caso *benchmark* BESTest (IEA, 2003), mostradas na Figura 2.7, como apresentado na Seção 2.5.1.

O sistema de climatização presente na edificação é um aquecedor com potência máxima igual a 3000 W e as equações que representam o ambiente estão descritas na Seção 2.5.1 (Equações 2.27 e 2.28). Dados do tipo TRY (*Test Reference Year*) são utilizados para representar as condições climáticas da cidade de Curitiba - PR. Estes dados climáticos, referentes aos primeiros dias de Julho, estão apresentados na Figura 2.8.

Os modelos dados pelas Equações 2.27 e 2.28 são utilizados como sistema real nos

exercícios de simulação descritos nesta seção.

Entretanto, para fins de projeto das leis de controle mais utilizados na prática (Normey-Rico e Camacho, 2007), e através de testes de resposta ao degrau, obteve-se um modelo FOPDT que representa a edificação com o sistema de climatização mais o cálculo do índice PMV, ou seja, aplica-se um sinal de controle e obtém-se uma resposta da edificação em PMV, conforme apresentado na Figura 3.6.

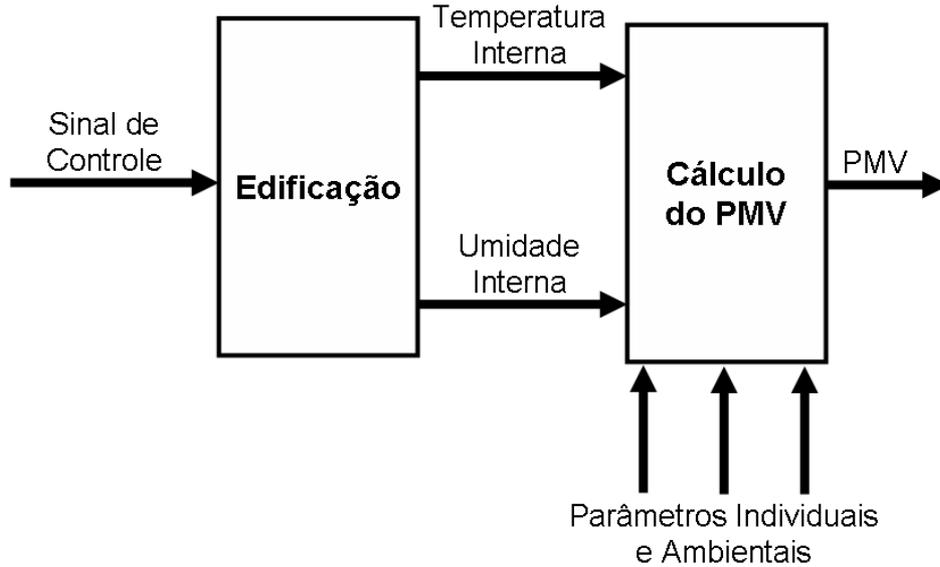


Figura 3.6: Estrutura da edificação.

Para esse processo de identificação os parâmetros individuais e ambientais utilizados na Equação 1.1 são $M = 1,2 \text{ Met}$, $I_{cl} = 0,75 \text{ Clo}$, $v = 0,1 \text{ m/s}$, $\phi = y_{Umi}$ e $T_{bs} = T_{rm} = y_{Temp}$. O aquecedor foi ligado em sua potência máxima na hora 48 e mediram-se a constante de tempo T , o ganho K e o atraso de transporte L da planta. Sendo assim, obteve-se uma função transferência de primeira ordem com atraso de transporte para o índice PMV, que representa a edificação com o aquecedor, como se segue:

$$F_{PMV}(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-Ls} = \frac{0,6429}{1860s + 1} e^{-0s} \quad (3.14)$$

onde $F_{PMV}(-)$ é o modelo FOPDT para o índice PMV.

Na Figura 3.7, é possível observar a sobreposição das respostas obtidas pela função transferência de primeira ordem e pelo cálculo do índice PMV sobre os modelos apresentados nas Equações 2.27 e 2.28.

Já na Figura 3.8, são apresentadas as quatro horas de testes de resposta ao degrau utilizadas para obtenção do modelo FOPDT. A diferença entre os modelos observada

no final do período de testes apresentado nesta figura pode ser creditada ao fato que a temperatura externa está caindo neste momento (como pode ser observado na Figura 2.8), causando uma queda na temperatura interna que não é devida à entrada manipulada.

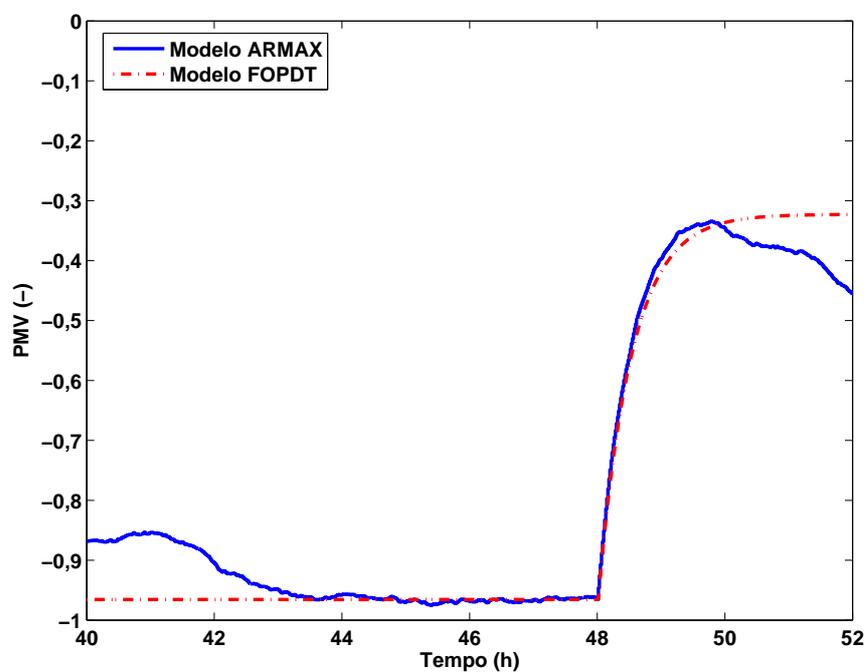


Figura 3.7: Modelos para índice PMV à edificação com aquecedor.

Para o controlador preditivo, que utiliza equações de previsão de temperatura e umidade, obteve-se uma função transferência de primeira ordem com atraso de transporte para a umidade relativa, que representa a edificação com o aquecedor, como se segue:

$$F_{U_{mi}}(s) = \frac{K}{T_s + 1} e^{-Ls} = \frac{-0,0687}{1740s + 1} e^{-0s} \quad (3.15)$$

onde $F_{U_{mi}}(-)$ é o modelo FOPDT para umidade relativa interna.

Na Figura 3.9, é possível observar a sobreposição das respostas obtidas pela função transferência de primeira ordem e pelo modelo apresentado na Equação 2.28. Já na Figura 3.10, são apresentadas as quatro horas de testes de resposta ao degrau utilizadas para obtenção do modelo FOPDT.

3.5.2 Análise para condições normais de operação

Nesta subsecção, testes em simulação são efetuados para a estratégia de inclusão do índice PMV na malha de controle, utilizando o controlador clássico do tipo PID e o

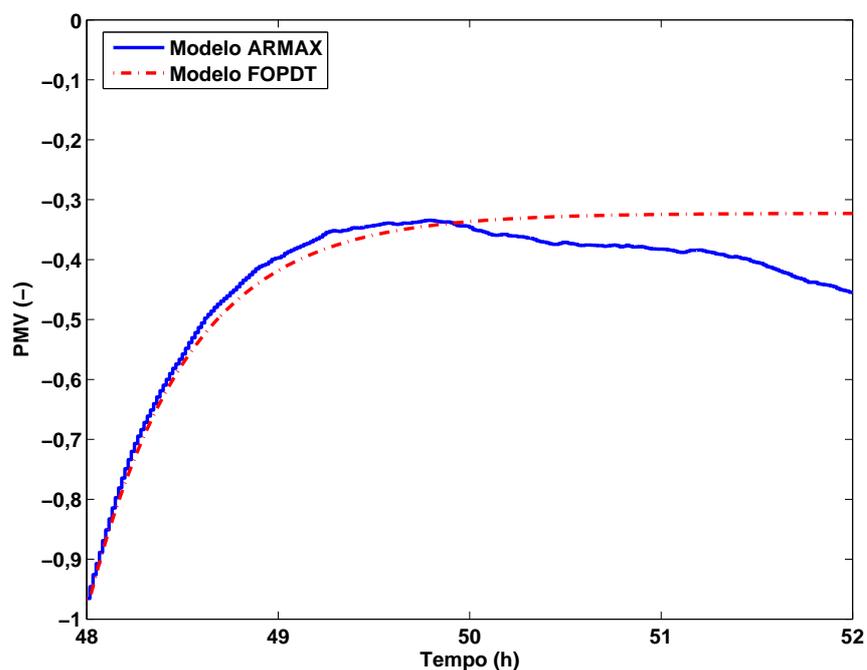


Figura 3.8: Modelos para índice PMV à edificação com aquecedor nas quatro horas de resposta ao degrau.

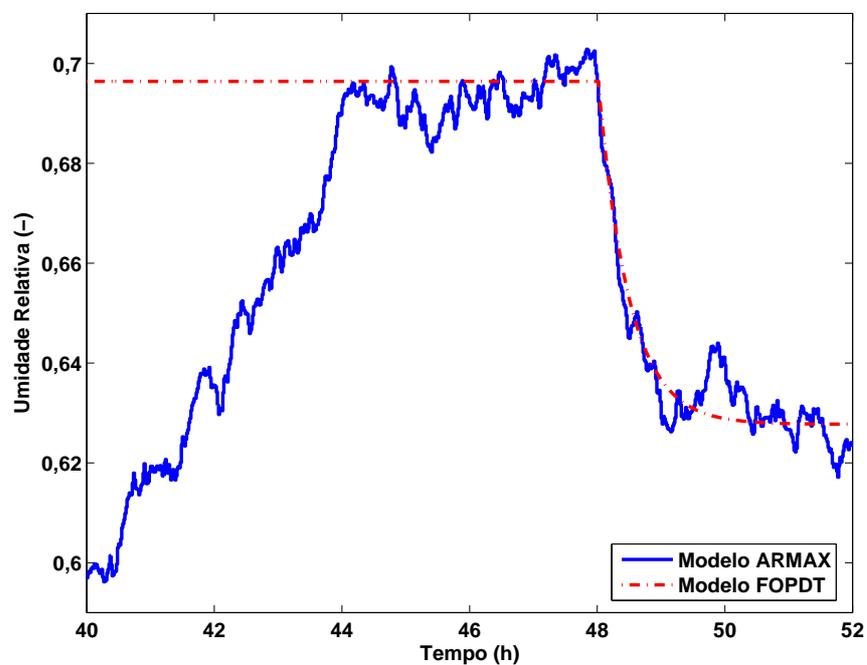


Figura 3.9: Modelos para umidade relativa interna à edificação com aquecedor.

controlador preditivo PMV-CRHPC.

Para os testes, utilizaram-se os seguintes parâmetros do PMV apresentados na Equ-

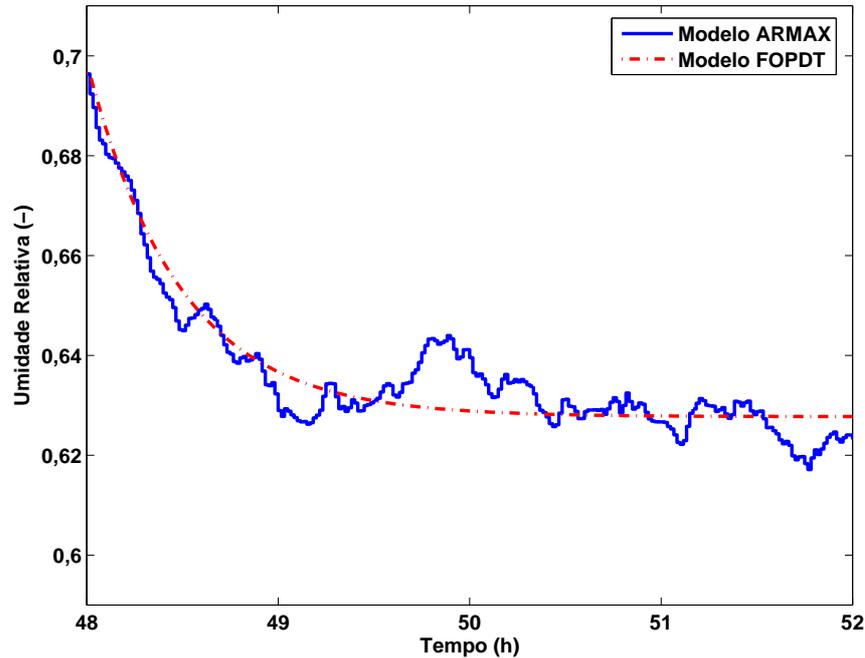


Figura 3.10: Modelos para umidade relativa interna à edificação com aquecedor nas quatro horas de resposta ao degrau.

ção 1.1: o sinal de temperatura radiante média é feito igual ao sinal de temperatura do ar, a velocidade do ar é definida igual a $v = 0,1 \text{ m/s}$ e os fatores individuais de atividade e vestimenta são $M = 69,78 \text{ W/m}^2$ ($M = 1,2 \text{ Met}$) e $I_{cl} = 0,1162 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ ($I_{cl} = 0,75 \text{ Clo}$). Tais parâmetros procuram reproduzir as condições climáticas e pessoais de um ambiente de escritório.

Os parâmetros do controlador PID são definidos através do método de projeto com base na estrutura IMC. Para um sistema de primeira ordem conforme modelo da Equação 3.14 e, assumindo-se $\epsilon = 120$, obtém-se os parâmetros $K_p = 24,1108$, $K_i = 0,0130$ e $K_d = 0$.

Para o controlador preditivo PMV-CRHPC, adotaram-se os parâmetros de projeto como sendo: horizonte de previsão inicial ($N_1 = 1$), horizonte de previsão final ($N_y = 3$), horizonte de controle ($N_u = 1$), horizonte de restrições terminais ($m = 1$), ponderação do sinal de controle ($\lambda = 0$) e ponderação do sinal de erro ($\mu = 1$). As equações de previsão das saídas de temperatura e umidade relativa utilizadas foram as Equações 2.29 e 3.15 e posteriormente calculado o índice PMV para a previsão de saída de PMV, conforme apresentado na Seção 3.4.

Para verificar o desempenho dos controladores do tipo PID e PMV-CRHPC em

condições normais de operação, o período de simulação é de 24 horas, com período de amostragem de 60 segundos. Os controladores são analisados pelo tempo de subida (t_r), MSE, que está descrito na Equação 2.31, e consumo de energia.

O MSE é calculado, em todos os testes nesta subseção, para o erro em regime permanente, ou seja, a partir da quarta hora de testes.

3.5.2.1 Controlador PID

Como pode ser observado na Figura 3.11, o tempo de subida é igual a $t_r = 2,48 h$, o MSE calculado é igual a $2,2389 \cdot 10^{-5}$, e o consumo de energia, apresentado na Figura 3.12, é de $41,7563 kWh$. Observa-se também que, no estado transitório, a taxa de melhora do PMV em relação a zero é de $0,3888 PMV/h$.

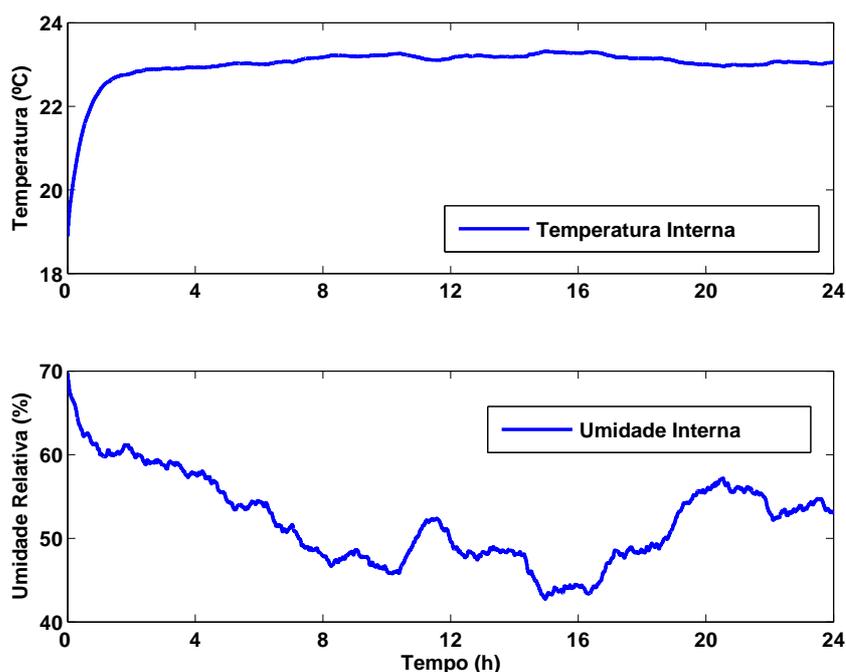


Figura 3.11: Temperatura interna e umidade relativa para a simulação em condições normais de operação com controlador PID.

3.5.2.2 Controlador PMV-CRHPC

Como pode ser observado na Figura 3.13, o tempo de subida é igual a $t_r = 0,50 h$, o MSE calculado é igual a $7,7365 \cdot 10^{-5}$, e o consumo de energia, apresentado na Figura 3.14, é de $42,2039 kWh$. Observa-se também que, no estado transitório, a taxa de melhora do PMV em relação a zero é de $1,9311 PMV/h$.

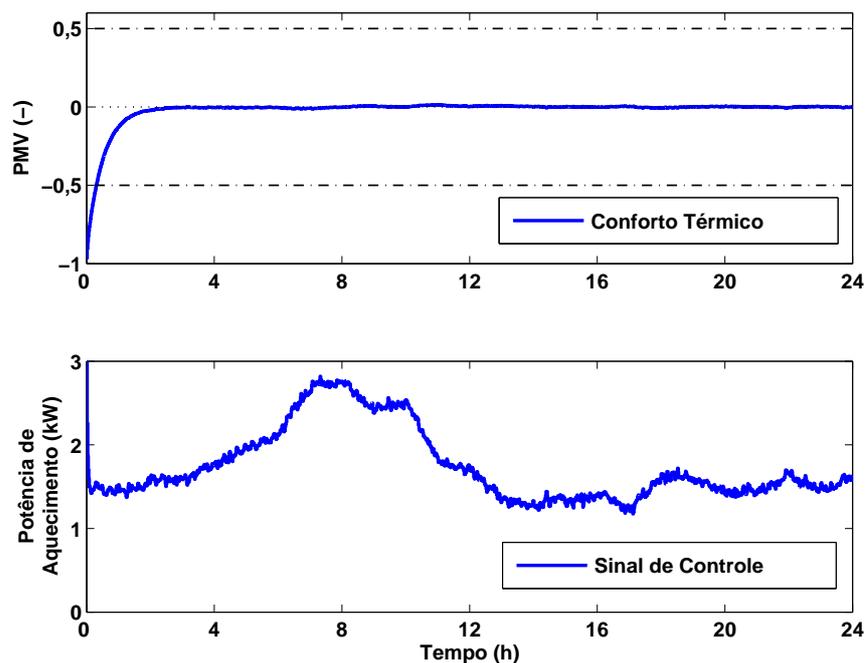


Figura 3.12: Conforto térmico e sinal de controle para a simulação em condições normais de operação com controlador PID.

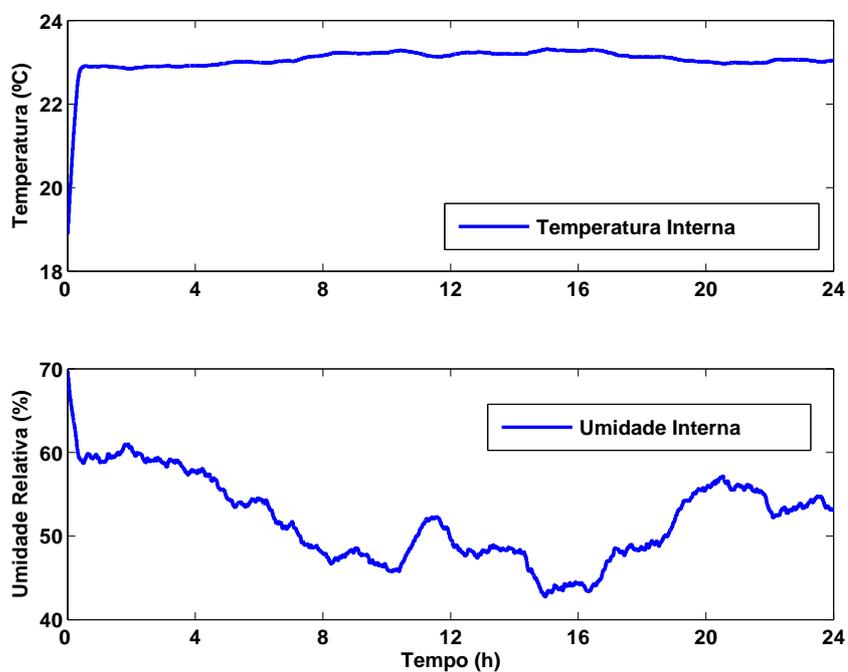


Figura 3.13: Temperatura interna e umidade relativa para a simulação em condições normais de operação com controlador PMV-CRHPC.

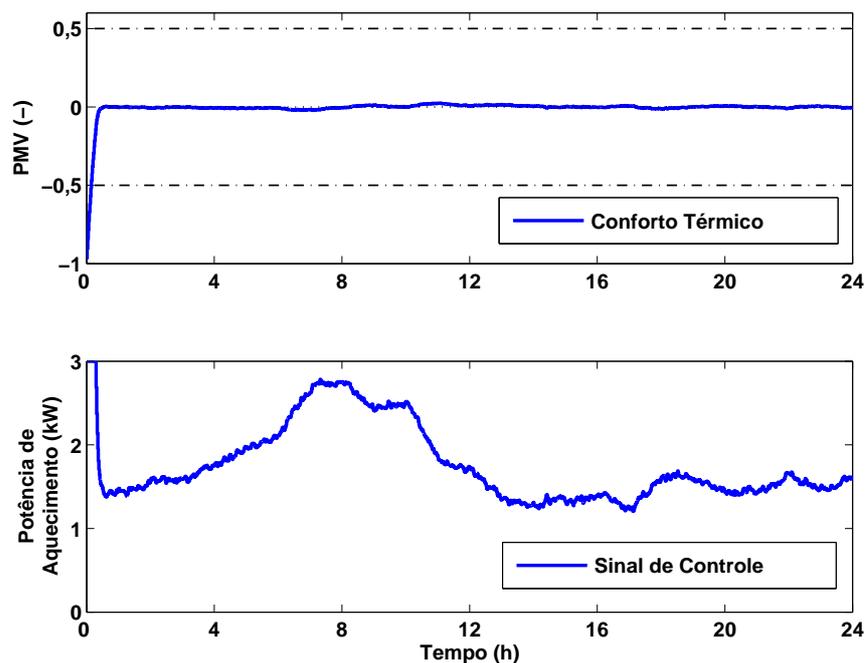


Figura 3.14: Conforto térmico e sinal de controle para a simulação em condições normais de operação com controlador PMV-CRHPC.

3.5.2.3 Resumo

Em resumo, os resultados para os controladores PID e PMV-CRHPC estão apresentados na Tabela 3.1. Pode-se observar que o PMV-CRHPC teve o menor tempo de subida e a maior taxa de melhora do PMV em relação a zero no estado transitório, porém o MSE e o consumo de energia foram menores para o controlador PID. Também na Tabela 3.1, estão apresentados resultados para o PMV-CRHPC com o parâmetro horizonte de previsão final $N_y = 10$.

Através de testes adicionais para o controlador PID variando-se o parâmetro de sintonia ϵ , verificou-se que, à medida que o valor de ϵ diminui, a resposta do sistema em malha fechada tende a ficar mais oscilatória. Aumentando-se o valor de ϵ , diminuem-se as oscilações, porém a resposta do sistema tende a ficar mais lenta, portanto, mas suscetível às condições climáticas externas que influenciam no conforto térmico da edificação.

Outros testes adicionais, para o PMV-CRHPC, foram realizados. Nestes, utilizou-se como modelo de previsão as Equações 2.27 e 2.28 ao invés das Equações 2.29 e 3.15. Uma vez que as Equações 2.27 e 2.28 são também utilizadas para simular a dinâmica do processo, eliminou-se os erros de modelagem entre o sinal de controle e o de saída. Verificou-se que não houveram mudanças significativas no desempenho do controlador,

indicando que os modelos das Equações 2.29 e 3.15 identificados estão adequados.

Tabela 3.1: Resumo da análise para condições normais de operação.

| Controlador | t_r (h) | MSE (-) | Consumo (kWh) | Melhora do PMV (PMV/h) |
|--------------------------|-----------|------------------------|---------------|------------------------|
| PID | 2,48 | $2,2389 \cdot 10^{-5}$ | 41,7563 | 0,3888 |
| PMV-CRHPC ($N_y = 3$) | 0,50 | $7,7365 \cdot 10^{-5}$ | 42,2039 | 1,9311 |
| PMV-CRHPC ($N_y = 10$) | 0,82 | $4,4840 \cdot 10^{-4}$ | 42,1536 | 1,1823 |

3.5.3 Análise para mudanças nas condições de operação

Nesta subseção, testes em simulação são efetuados para a estratégia de inclusão do índice PMV na malha de controle, utilizando o controlador clássico do tipo PID e o controlador preditivo PMV-CRHPC, em condições de operação adversas.

Para os testes, utilizam-se os seguintes parâmetros do PMV apresentados na Equação 1.1: o sinal de temperatura radiante média é feito igual ao sinal de temperatura do ar, a velocidade do ar é definida igual a $v = 0,1$ m/s e os fatores individuais de atividade e vestimenta são apresentados na Figura 3.15. Tais parâmetros procuram reproduzir a mudança nos parâmetros pessoais que podem ocorrer em um ambiente de escritório. Por exemplo, oito horas com $M = 69,78$ W/m² ($M = 1,2$ Met) e $I_{cl} = 0,1162$ m²°C/W ($I_{cl} = 0,75$ Clo), que representam uma pessoa com trajes comuns em escritórios e poucas movimentações pelo ambiente, e oito horas com $M = 63,97$ W/m² ($M = 1,1$ Met) e $I_{cl} = 0,1023$ m²°C/W ($I_{cl} = 0,66$ Clo), que representam uma pessoa sentada com trajes comuns em escritórios, porém mais leves.

Para verificar o desempenho dos controladores do tipo PID e PMV-CRHPC, em condições de operação com mudança nos parâmetros individuais, o período de simulação é de 72 horas, com período de amostragem de 60 segundos. Os controladores são analisados pelos critérios MSE e consumo de energia. O MSE é calculado a partir da quarta hora de testes.

Os parâmetros dos controladores são os mesmos apresentados na Seção 3.5.2. Para o controlador do tipo PID, $K_p = 24,1108$, $K_i = 0,0130$ e $K_d = 0$. Já para o controlador preditivo PMV-CRHPC, $N_1 = 1$, $N_y = 3$, $N_u = 1$, $m = 1$, $\lambda = 0$ e $\mu = 1$.

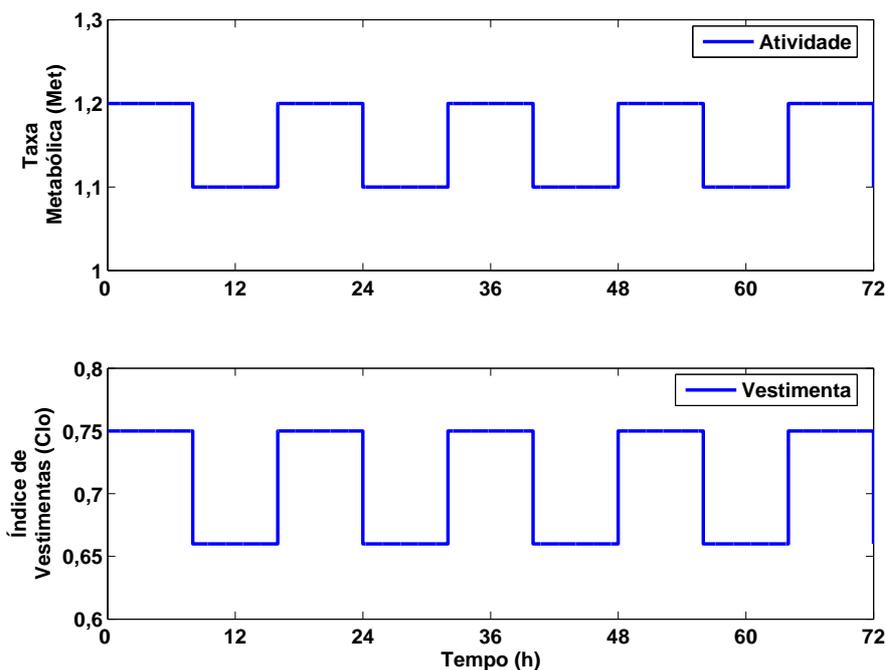


Figura 3.15: Variação nos parâmetros individuais para os testes de mudanças nas condições de operação.

3.5.3.1 Controlador PID

Como pode ser observado na Figura 3.16, o MSE calculado é igual a $3,6877 \cdot 10^{-3}$, e o consumo de energia, apresentado na Figura 3.17, é de $116,3916 \text{ kWh}$.

3.5.3.2 Controlador PMV-CRHPC

Como pode ser observado na Figura 3.18, o MSE calculado é igual a $2,2010 \cdot 10^{-3}$, e o consumo de energia, apresentado na Figura 3.19, é de $116,7496 \text{ kWh}$.

3.5.3.3 Resumo

Em resumo, os resultados para os controladores PID e PMV-CRHPC estão apresentados na Tabela 3.2. Pode-se observar que o PMV-CRHPC teve o menor MSE, porém o consumo de energia foi um pouco menor para o PID. Também na Tabela 3.2, estão apresentados resultados para o PMV-CRHPC com o parâmetro horizonte de previsão final $N_y = 10$.

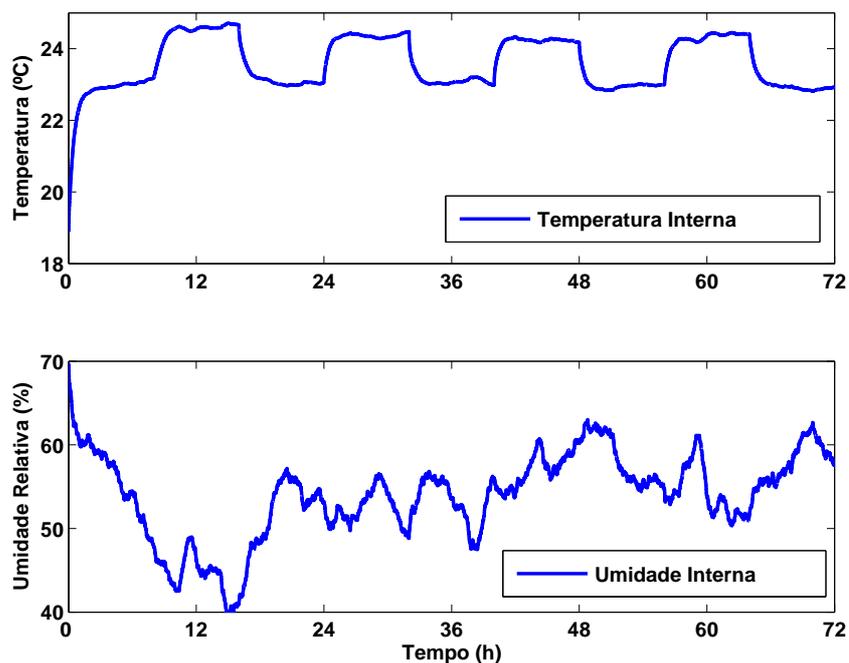


Figura 3.16: Temperatura interna e umidade relativa para a simulação com mudanças nas condições de operação com controlador PID.

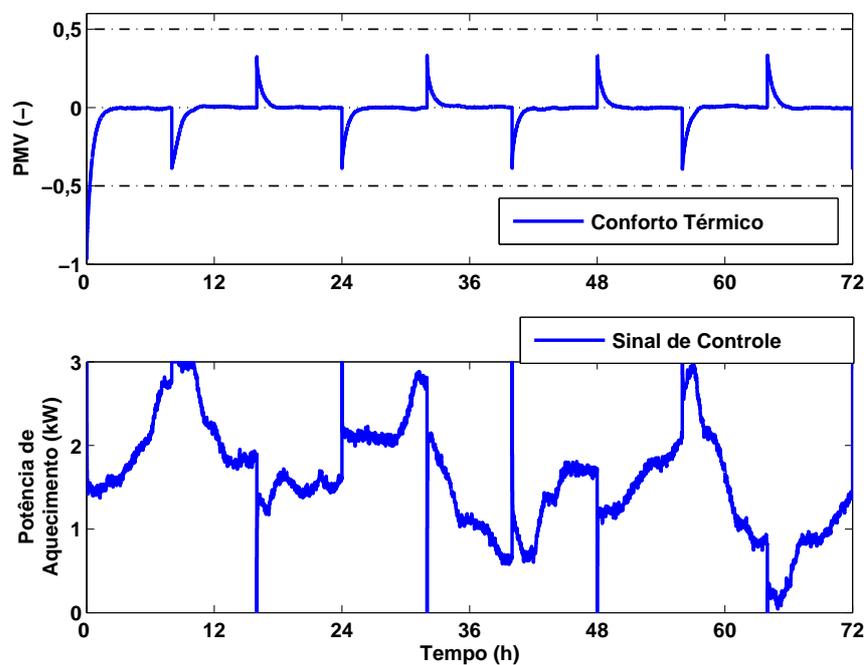


Figura 3.17: Conforto térmico e sinal de controle para a simulação com mudanças nas condições de operação com controlador PID.

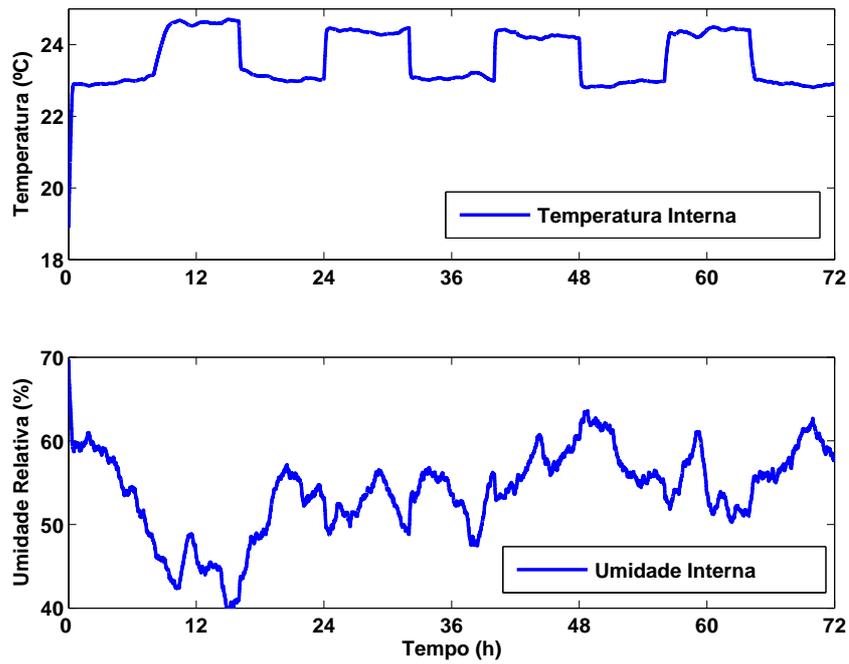


Figura 3.18: Temperatura interna e umidade relativa para a simulação com mudanças nas condições de operação com controlador PMV-CRHPC.

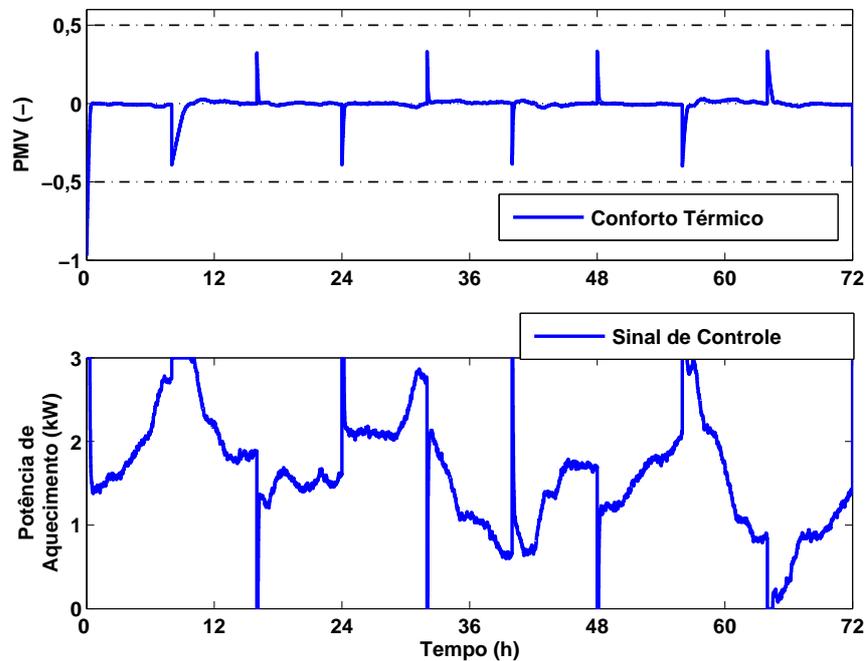


Figura 3.19: Conforto térmico e sinal de controle para a simulação com mudanças nas condições de operação com controlador PMV-CRHPC.

Tabela 3.2: Resumo da análise para mudanças nas condições de operação.

| Controlador | MSE (-) | Consumo (<i>kWh</i>) |
|--------------------------|------------------------|------------------------|
| PID | $3,6877 \cdot 10^{-3}$ | 116,3916 |
| PMV-CRHPC ($N_y = 3$) | $2,2010 \cdot 10^{-3}$ | 116,7496 |
| PMV-CRHPC ($N_y = 10$) | $2,9976 \cdot 10^{-3}$ | 116,7360 |

3.5.4 Análise para adição de perturbação

Nesta subseção, testes em simulação são efetuados para a estratégia de inclusão do índice PMV na malha de controle, utilizando o controlador clássico do tipo PID e o controlador preditivo PMV-CRHPC em condições de operação com adição de uma perturbação.

Para os testes, utilizaram-se os seguintes parâmetros do PMV apresentados na Equação 1.1: o sinal de temperatura radiante média é feito igual ao sinal de temperatura do ar, a velocidade do ar é definida igual a $v = 0,1 \text{ m/s}$ e os fatores individuais de atividade e vestimenta são $M = 69,78 \text{ W/m}^2$ ($M = 1,2 \text{ Met}$) e $I_{cl} = 0,1162 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ ($I_{cl} = 0,75 \text{ Clo}$). Tais parâmetros procuram reproduzir as condições climáticas e pessoais de um ambiente de escritório e uma geração de calor adicional que pode ocorrer por indivíduos presentes na edificação. Este sinal de perturbação é de 600 W e está apresentado na Figura 3.20.

Para verificar o desempenho dos controladores do tipo PID e PMV-CRHPC, em condições de operação com adição de um sinal de perturbação, o período de simulação é de 72 horas, com período de amostragem de 60 segundos. Os controladores são analisados pelos critérios MSE e consumo de energia.

Os parâmetros dos controladores são os mesmos apresentados na Seção 3.5.2. Para o controlador do tipo PID, $K_p = 24,1108$, $K_i = 0,0130$ e $K_d = 0$. Já para o controlador preditivo PMV-CRHPC, $N_1 = 1$, $N_y = 3$, $N_u = 1$, $m = 1$, $\lambda = 0$ e $\mu = 1$.

Como pode ser observado nos gráficos de desempenho das leis de controle desta subseção e nas condições climáticas externas ao ambiente de simulação, apresentadas na Figura 2.8, na hora 42 dos testes de simulação ocorre um aumento na temperatura, desviando o sinal de conforto térmico da sensação de neutralidade. Isso ocorre devido a adição de uma geração de calor não controlada e mesmo desligando a ação de controle aplicada ao aquecedor, não é possível levar a edificação, neste instante de tempo, ao PMV

nulo, entretanto, ela continua dentro da faixa aceitável de conforto térmico.

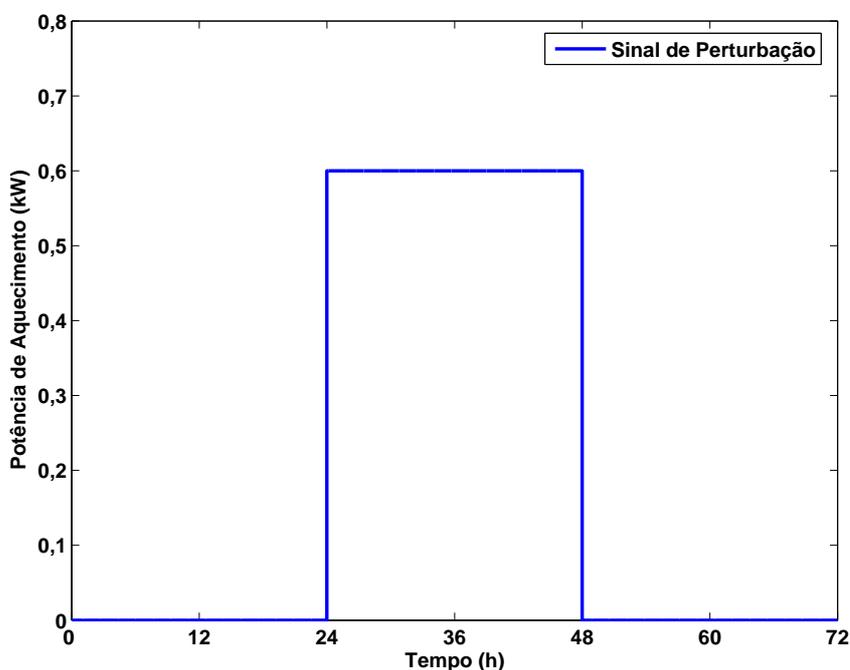


Figura 3.20: Sinal de perturbação para os testes de adição de perturbação.

3.5.4.1 Controlador PID

Como pode ser observado na Figura 3.21, o MSE calculado é igual a $1,2844 \cdot 10^{-3}$, e o consumo de energia, apresentado na Figura 3.22, é de $86,9379 \text{ kWh}$.

3.5.4.2 Controlador PMV-CRHPC

Como pode ser observado na Figura 3.23, o MSE calculado é igual a $1,3218 \cdot 10^{-3}$, e o consumo de energia, apresentado na Figura 3.24, é de $87,3198 \text{ kWh}$.

3.5.4.3 Resumo

Em resumo, os resultados para os controladores PID e PMV-CRHPC estão apresentados na Tabela 3.3. Pode-se observar que os controladores PID e PMV-CRHPC tiveram MSE próximos, porém o consumo de energia foi menor para o PID. Também na Tabela 3.3, estão apresentados resultados para o PMV-CRHPC com o parâmetro horizonte de previsão final $N_y = 10$.

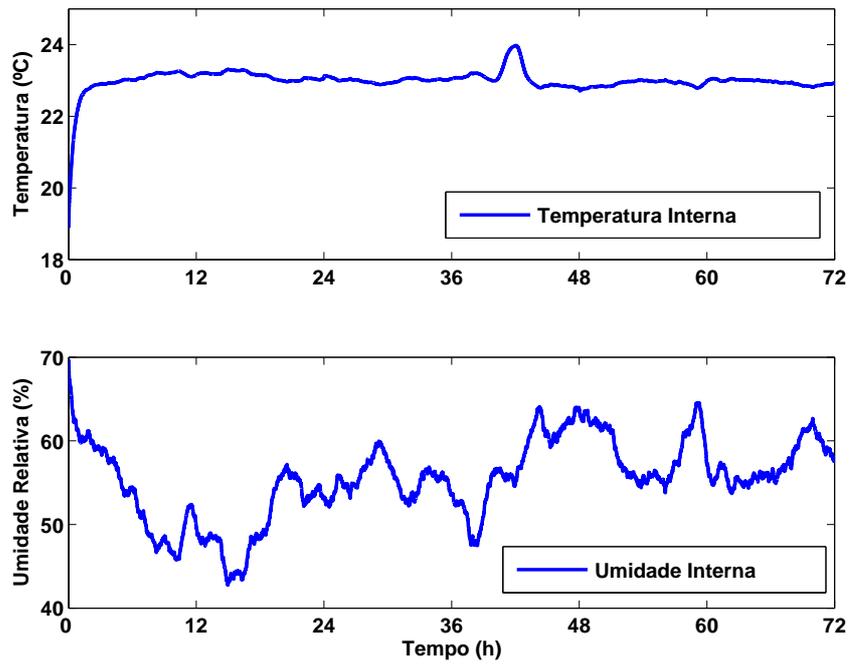


Figura 3.21: Temperatura interna e umidade relativa para a simulação com adição de perturbação para o controlador PID.

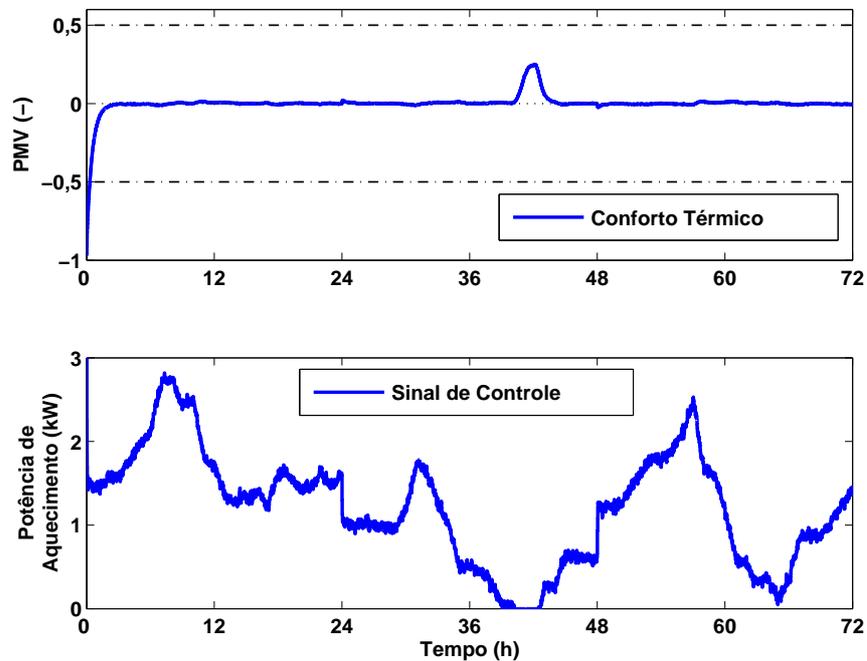


Figura 3.22: Conforto térmico e sinal de controle para a simulação com adição de perturbação para o controlador PID.

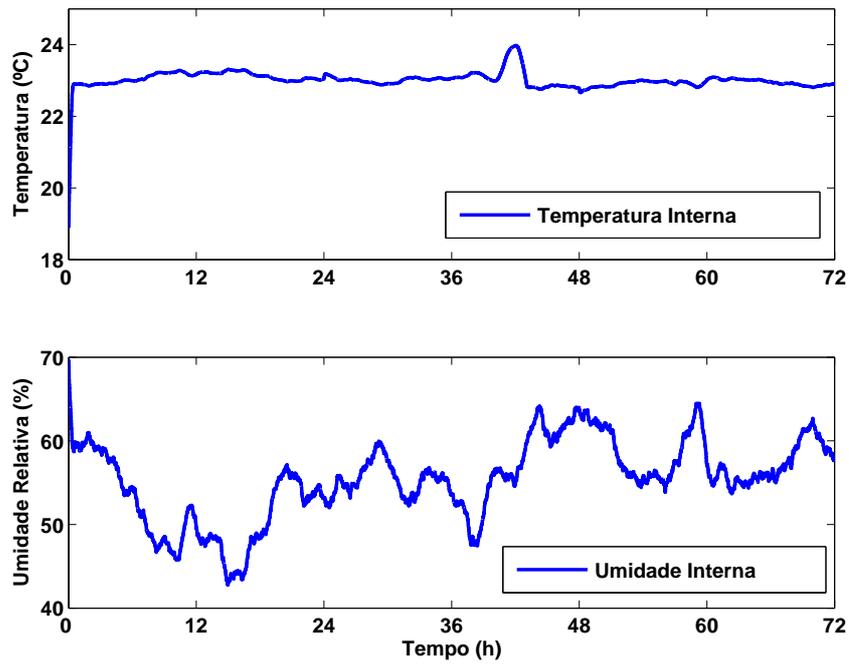


Figura 3.23: Temperatura interna e umidade relativa para a simulação com adição de perturbação para o controlador PMV-CRHPC.

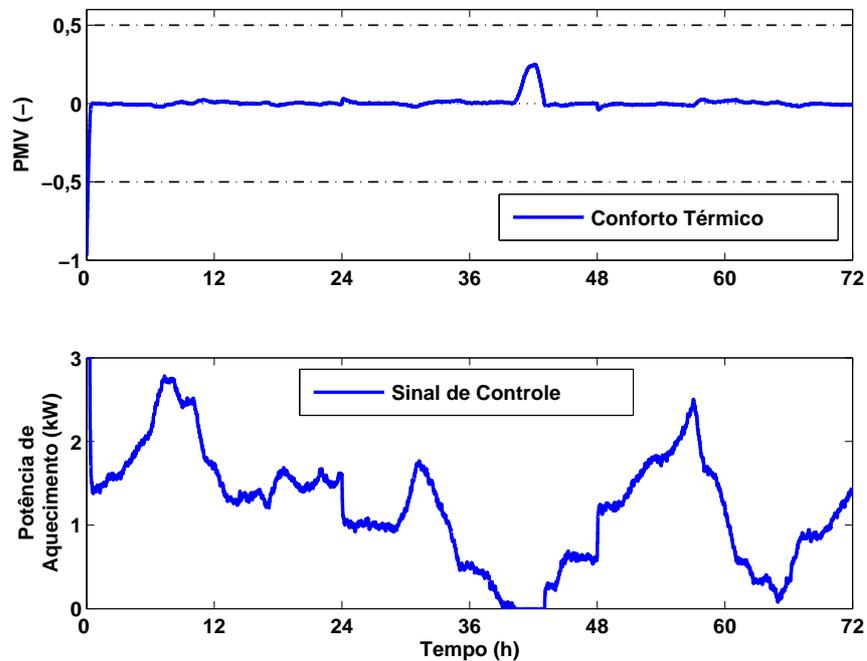


Figura 3.24: Conforto térmico e sinal de controle para a simulação com adição de perturbação para o controlador PMV-CRHPC.

Tabela 3.3: Resumo da análise para adição de perturbação.

| Controlador | MSE (-) | Consumo (kWh) |
|--------------------------|------------------------|---------------|
| PID | $1,2844 \cdot 10^{-3}$ | 86,9379 |
| PMV-CRHPC ($N_y = 3$) | $1,3218 \cdot 10^{-3}$ | 87,3198 |
| PMV-CRHPC ($N_y = 10$) | $1,7650 \cdot 10^{-3}$ | 87,2852 |

3.6 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo, apresentou-se uma estratégia de controle de conforto térmico com inclusão do índice PMV na malha de controle. Essa inclusão pode ser dada pela implementação de um sensor de PMV na malha, ou pela inserção da equação de cálculo do PMV na lei de controle como modelo de previsão.

Testes em simulação mostraram o desempenho das leis de controle revisadas, para controle de conforto térmico por geração de referência ótima, em três situações: *i*) condições normais de operação; *ii*) mudanças nas condições de operação pela alteração de parâmetros individuais; *iii*) adição de uma perturbação.

O desempenho das leis de controle, analisadas pelos critérios MSE, tempo de subida, consumo energético e taxa de melhoramento do conforto térmico, foram bastante próximas, porém, o controlador preditivo PMV-CRHPC se mostrou mais rápido em levar a edificação ao PMV nulo, mesmo tendo um consumo médio de energia um pouco acima dos demais.

Pode ser observado também que nos testes para mudança nos parâmetros individuais, as variações causam uma alteração no valor do PMV, porém continuam dentro da região de conforto térmico. Já para o teste de adição de perturbação, na hora 42 ocorre um leve aumento no índice PMV, devido às condições climáticas externas e da edificação, porém também se encontra dentro da região de conforto térmico.

4 Resultados Experimentais

Neste capítulo, as estratégias de controle estudadas anteriormente (Capítulos 2 e 3) são testadas em tempo real. O teste é feito tanto para os algoritmos do tipo PID quanto para o algoritmo de controle preditivo.

Porém, para poder efetuar o teste em tempo real, é necessária a utilização de equipamentos, como um sistema de climatização, sensores, e controladores. Na Seção 4.1, este aparato experimental será descrito. O ambiente de testes (zona térmica em uma edificação) onde será aplicado os algoritmos de controle está apresentado na Seção 4.2.

Os testes efetuados para as estratégias de controle são analisados em relação a condições normais de operação, modificações nas condições de operação e adição de perturbação, para ambas as estratégias, e estão apresentadas na Seções 4.3, 4.4 e 4.5, respectivamente.

4.1 Aparato Experimental

Nesta seção, são apresentados os equipamentos utilizados para efetuar o controle de um sistema de climatização, neste caso, um aquecedor a óleo, visando atingir, ou manter, o conforto térmico em ambientes internos.

A implementação do processo em tempo real é ilustrada pela Figura 4.1. Pode-se observar, nesta figura, que existe um computador que, através da leitura dos sensores, comanda o aquecedor.

Quatro sensores RHT-DM, fabricados pela empresa Novus estão presentes. Dois são utilizados para fazer as medições de temperatura e umidade relativa do ar internas e outros dois para fazer as medições de temperatura e umidade relativa do ar externas e de ambientes adjacentes. O sensor RHT-DM é apresentado na Figura 4.2. Os valores de umidade relativa e temperatura por ele medidos são convertidos em sinais elétricos do tipo 0 VDC a 10 VDC , linearmente relacionados com suas leituras. Os limites operacionais deste sensor são de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, para a temperatura, e de 0% a 100% , para a umidade

relativa.

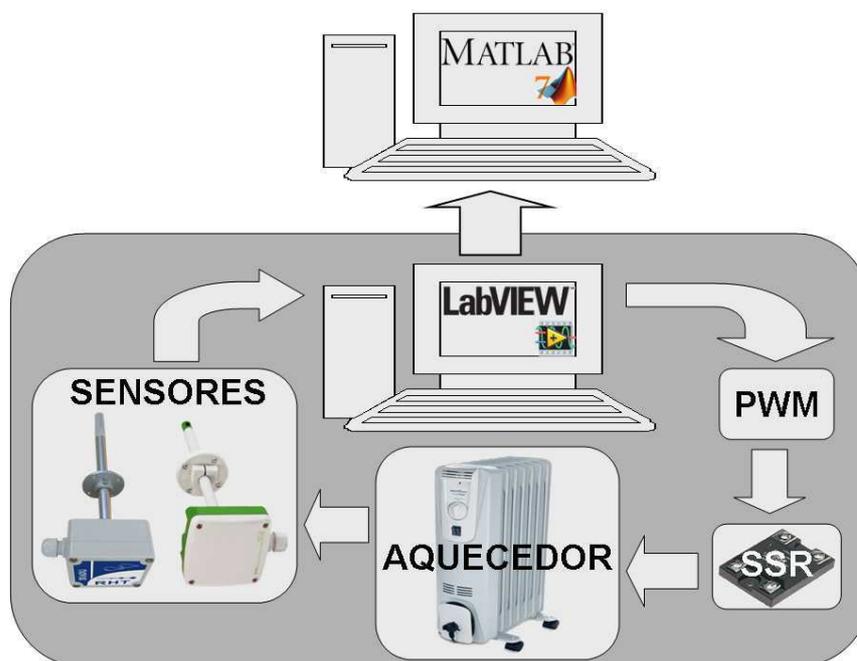


Figura 4.1: Implementação do aparato experimental.

Um sensor EE66, fabricado pela empresa Elektronik, é usado para fazer a medição da velocidade do ar interna. O sensor EE66, apresentado na Figura 4.3, foi desenvolvido para trabalhar com baixas velocidades do ar. O valor de velocidade do ar por ele medido é convertido em sinal elétrico do tipo 0 VDC a 10 VDC . O limite operacional deste sensor é de 0 m/s a 2 m/s .

O *hardware* NI PCI-6251 é utilizado como interface entre os sensores e o computador. O *hardware* NI PCI-6251, apresentado na Figura 4.5, é responsável pela aquisição dos dados enviados pelos sensores ao computador, em tempo real. Ele possui 16 entradas e 2 saídas analógicas, com faixa de operação entre 0 VDC e 10 VDC .

Um *software* em tempo real, desenvolvido em LabView (de acordo com o período de amostragem selecionado), realiza os cálculos do PMV, com base nas informações dos parâmetros individuais (taxa metabólica e índice de vestimentas) fornecidos pelo usuário, gera a lei de controle e envia o sinal de controle para a porta de comunicação RS-232 do computador. Um circuito de Modulação por Largura de Pulsos (PWM), desenvolvido em laboratório, recebe o sinal de controle, gera o trem de pulsos necessário para representar o sinal de controle recebido e aciona um Relé de Estado Sólido (SSR). O dispositivo SSR N225AC8, fabricado pela empresa Novus, é apresentado na Figura 4.4. Ele é o responsável pela alta velocidade de chaveamento da tensão para o acionamento do aquecedor, sem ruído elétrico, faíscamento ou desgaste mecânico. O acionamento é feito por um sinal

PWM de 5 VDC e as faixas de operação deste dispositivo são de 0 A a 25 A e 0 VCA a 250 VCA.

O SSR recebe o sinal PWM e aciona, proporcionalmente ao sinal de controle, dois aquecedores a óleo de 1500 W, apresentados na Figura 4.6. Um terceiro aquecedor a óleo, de 600 W, também está presente e é usado em testes de rejeição de perturbação.



Figura 4.2: Sensor RHT-DM.



Figura 4.3: Sensor EE66.



Figura 4.4: SSR N225AC8.



Figura 4.5: Hardware NI PCI-6251.

4.2 Definição do Ambiente de Testes

Para execução dos testes em tempo real para as duas estratégias de controle estudadas anteriormente (Capítulos 2 e 3), é necessária a utilização de um ambiente interno. Nesta seção, este ambiente é descrito.

O ambiente de testes é uma zona térmica representando um ambiente de escritório e está localizado dentro do Laboratório de Sistemas Térmicos (LST) da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR). As dimensões físicas desta zona térmica estão apresentadas na Figura 4.7.



Figura 4.6: Aquecedor a óleo.

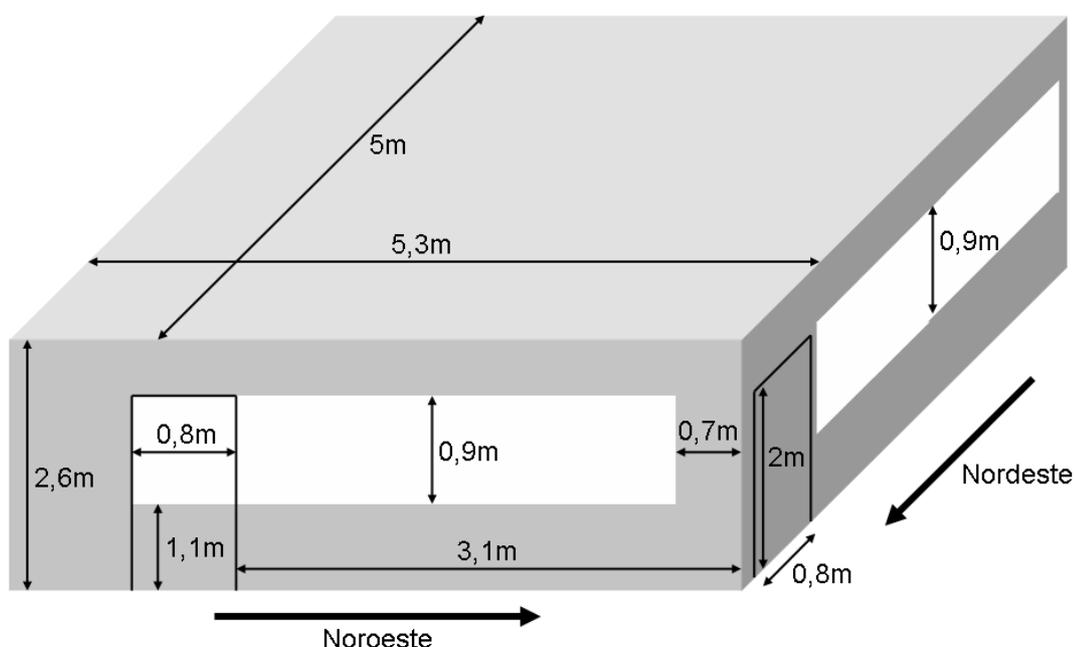


Figura 4.7: Dimensões da edificação para testes em tempo real.

Na Figura 4.8, é apresentada a planta baixa do ambiente estudado, representado pela sala 1. Nesta figura, pode-se observar também a disposição física do aparato experimental utilizado. Dos equipamentos apresentados nesta figura, os que são utilizados para os testes de controle de conforto térmico, para ambas as estratégias estudadas, são o computador pessoal PC1, os três aquecedores AQ, o sensor de velocidade do ar VAR1 e os sensores de temperatura e umidade relativa do ar RHT1, RHT2, RHT3 e RHT4. Também na Figura 4.8, pode-se observar outros equipamentos que não estão sendo utilizados neste trabalho, como o computador pessoal PC2, os sensores de temperatura e umidade relativa do ar RHT5, RHT6 e RHT7 e os condicionadores de ar do tipo *split*, janela e portátil,

respectivamente, CA1, CA2 e CA3.

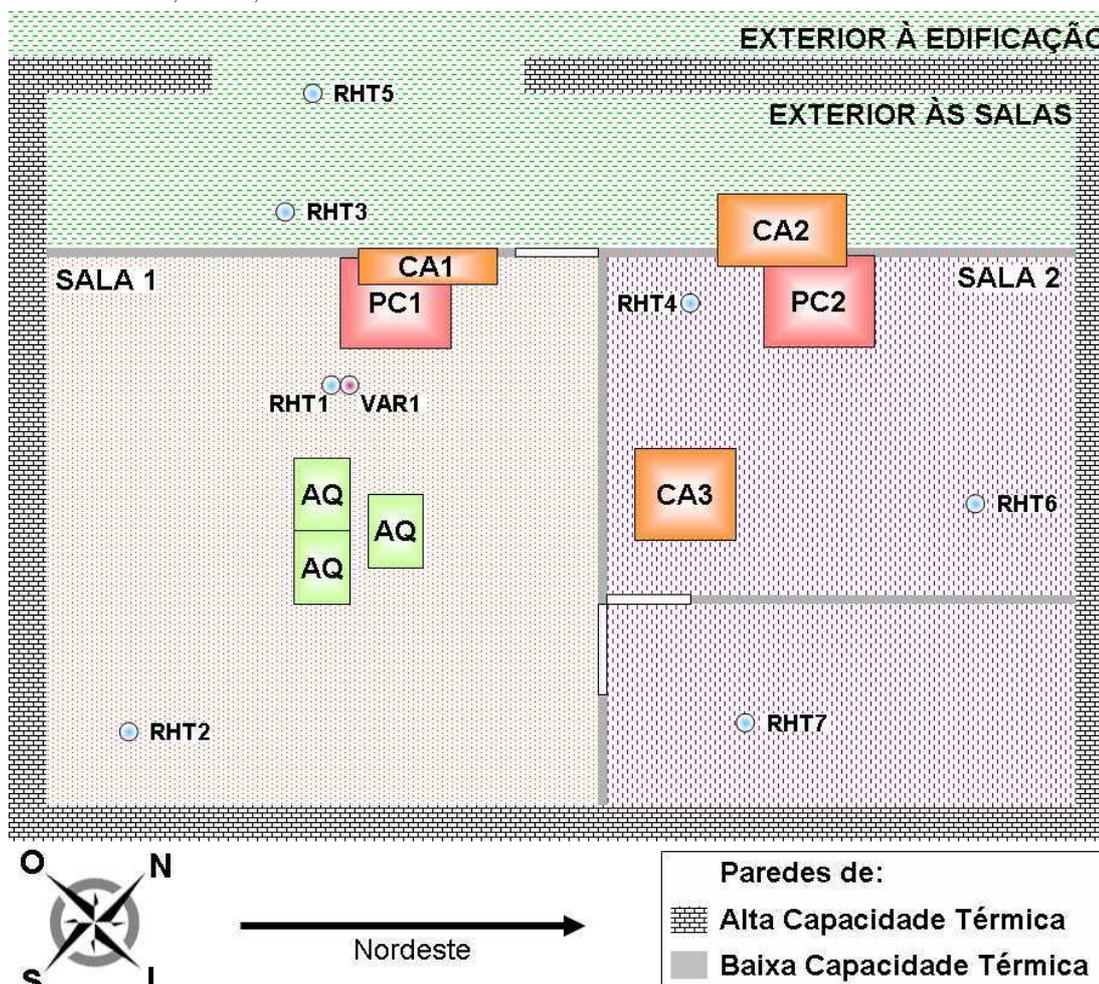


Figura 4.8: Posicionamento do aparato experimental.

Nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11, são apresentadas fotos da edificação e do aparato experimental implementado. Na Figura 4.9, pode-se observar o aparato experimental implementado com os aquecedores no centro da figura, o computador pessoal na direita, os sensores de temperatura e umidade relativa e de velocidade do ar no Ponto 1 e um sensor de temperatura e umidade relativa no Ponto 2. Ao fundo, na Figura 4.9, pode-se observar uma parede de alta capacidade térmica e atrás do computador pessoal PC1 uma parede, com vidros, de baixa capacidade térmica. A mesma parede de baixa capacidade térmica pode ser observada nas Figuras 4.10 e 4.11.

Porém, para fins de controle, é necessário descrever a edificação em modelos matemáticos. Para tanto, um processo de identificação por resposta ao degrau foi realizado. O degrau aplicado ao sistema foi de 3000 W em um período de 12 horas e a identificação foi realizada por aproximação a um sistema de primeira ordem com atraso de transporte (FOPDT). Para a realimentação das malhas de controle, utilizou-se os sensores que re-

presentam um indivíduo presente no Ponto 1, ou seja, RHT1 e VAR1.

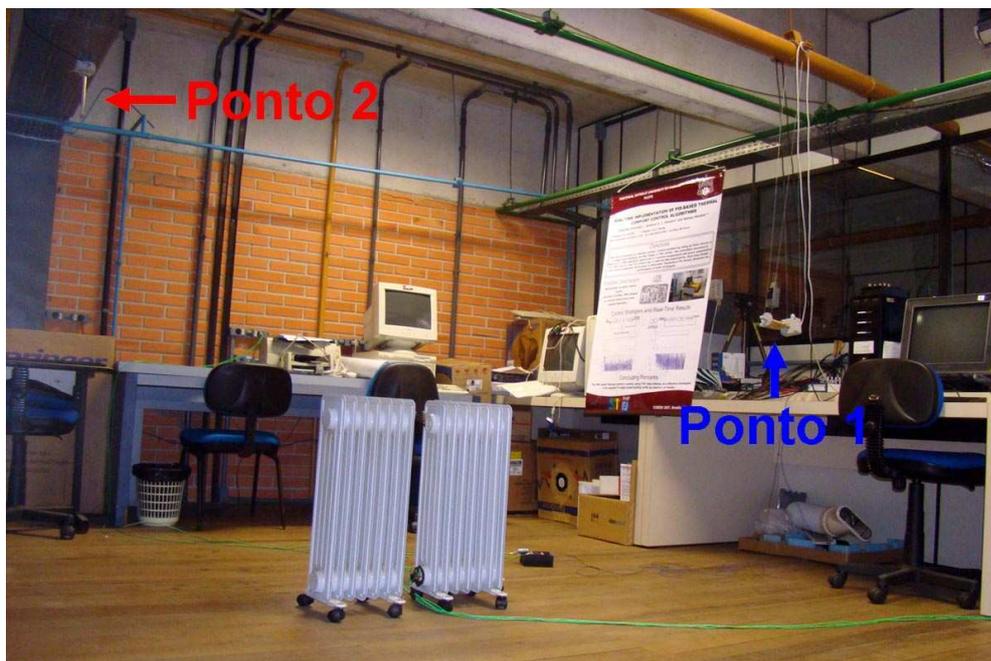


Figura 4.9: Pontos 1 e 2 de sensoriamento na edificação.



Figura 4.10: Edificação para testes em tempo real, vista noroeste.

Três testes foram realizados para encontrar o mais adequado modelo que representa a edificação com o sistema de climatização, no caso, um sistema de aquecimento. Estes testes estão apresentados nas Figuras 4.12 e 4.13. Entretanto, a resposta ao degrau

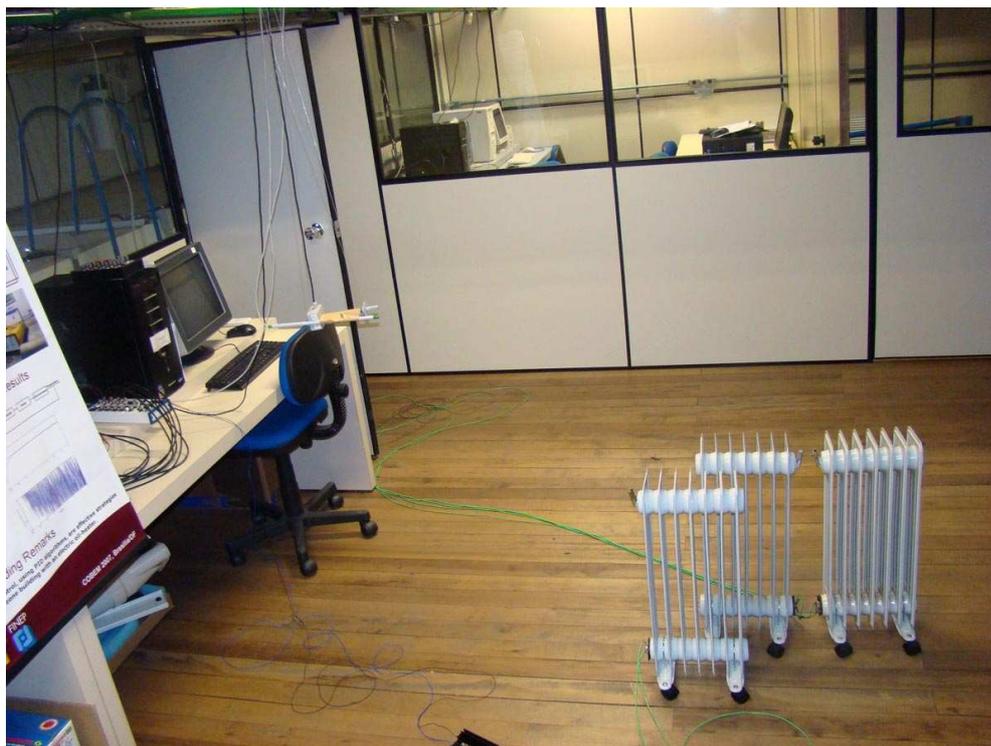


Figura 4.11: Edificação para testes em tempo real, vista nordeste.

escolhida para representar o conjunto de edificação e sistema de climatização foi o Teste 3. Esta escolha se deve ao fato que, neste teste, a temperatura externa estava mais baixa, representando uma condição de operação mais provável. As temperaturas externas para os três testes estão apresentadas na Figura 4.14.

Os modelos a serem utilizados nas leis de controle para encontrar os parâmetros dos controladores, portanto, são apresentados a seguir:

$$F_{\text{Temp}}(s) = \frac{5,8533}{6880s + 1} e^{-280s} \quad (4.1)$$

$$F_{\text{PMV}}(s) = \frac{1,4481}{6720s + 1} e^{-280s} \quad (4.2)$$

onde F_{Temp} ($^{\circ}\text{C}$) é o modelo FOPDT para temperatura interna e F_{PMV} ($-$) é o modelo FOPDT para PMV interno. Para a identificação do modelo de PMV, utilizou-se parâmetros de taxa metabólica e índice de vestimentas iguais a $M = 1,2 \text{ Met}$ e $I_{cl} = 0,75 \text{ Clo}$, respectivamente. A velocidade do ar utilizada foi a medida pelo sensor, cujo valor estava em $0,03 \text{ m/s}$ e se manteve constante.

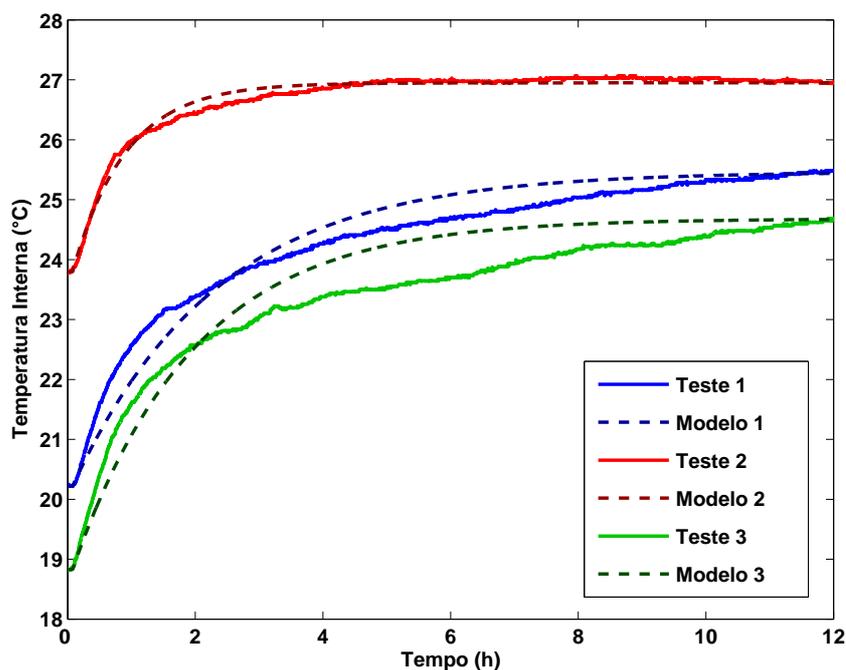


Figura 4.12: Modelos para temperatura interna à edificação com aquecedor.

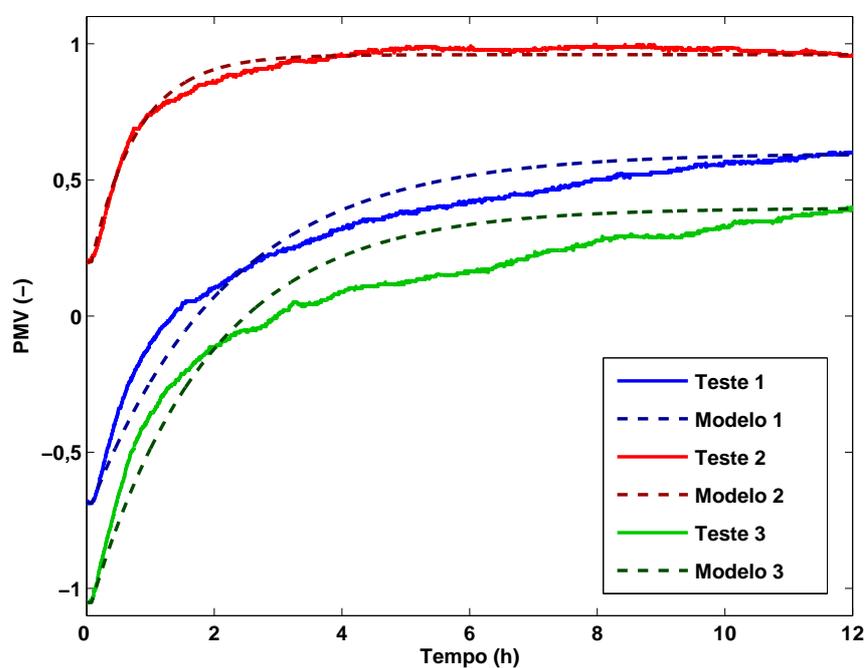


Figura 4.13: Modelos para índice PMV interno à edificação com aquecedor.

4.3 Análise para condições normais de operação

Nesta subseção, testes em tempo real são efetuados para as estratégias de geração dinâmica de referência de temperatura, utilizando controladores PID, com e sem preditor

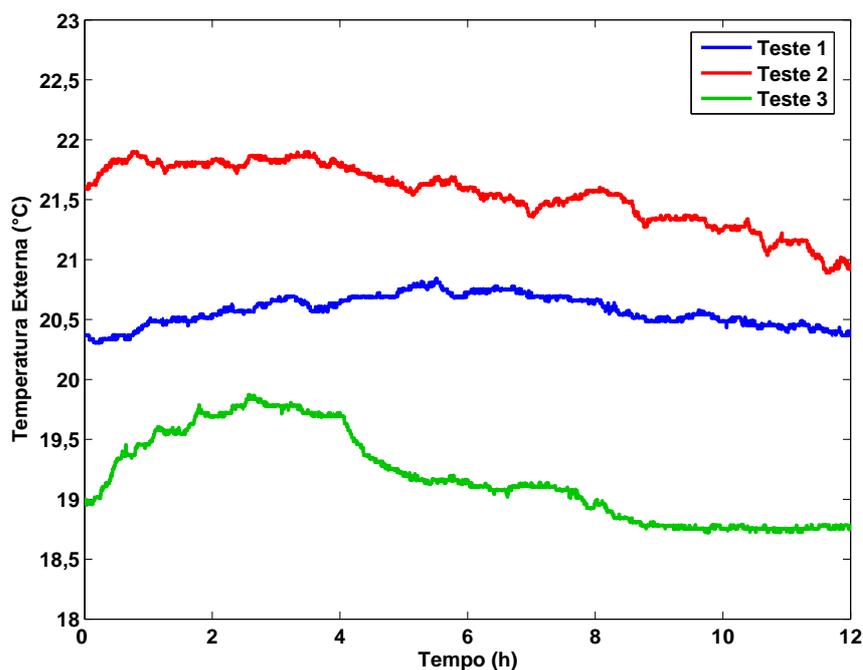


Figura 4.14: Temperatura externa nos testes de identificação.

de Smith, e o controlador preditivo, e de inclusão do índice PMV na malha de controle, utilizando controladores PID, também com e sem preditor de Smith. Para os controladores PID com preditor de Smith, também é utilizada uma ação *Antiwindup* quando ocorre saturação no sinal de controle.

Para os testes, utilizaram-se os seguintes parâmetros do PMV (Equação 1.1): os sinais de temperatura interna e de umidade relativa interna, medidos em tempo real, e em dois pontos distintos (Ponto 1 é o ponto de medição do sensor RHT1 e Ponto 2 é o ponto de medição do sensor RHT2), visando simular a presença de dois indivíduos na zona térmica; o sinal de temperatura radiante média é feito igual ao sinal de temperatura do ar; a velocidade do ar, medida em testes de identificação, é definida igual a $v = 0,03 \text{ m/s}$; os fatores individuais de atividade e vestimenta são $M = 69,78 \text{ W/m}^2$ ($M = 1,2 \text{ Met}$) e $I_{cl} = 0,1162 \text{ m}^2\text{°C/W}$ ($I_{cl} = 0,75 \text{ Clo}$), para o Ponto 1, e $M = 58,15 \text{ W/m}^2$ ($M = 1,0 \text{ Met}$) e $I_{cl} = 0,1023 \text{ m}^2\text{°C/W}$ ($I_{cl} = 0,66 \text{ Clo}$), para o Ponto 2. Tais parâmetros procuram reproduzir as condições pessoais de um ambiente de escritório. Os Pontos 1 e 2 estão em uma altura de 1 m e 2 m , respectivamente, e praticamente equidistantes da fonte de calor, isto é, $1,4 \text{ m}$ e $1,6 \text{ m}$, respectivamente.

Ainda são medidas as temperaturas e umidades relativas dos ambientes externo e adjacente, respectivamente medidos pelos sensores RHT3 e RHT4. Estes dados não são

utilizados nas estratégias de controle, mas são úteis para verificar as condições climáticas durante o período de testes.

A seleção dos parâmetros dos controladores do tipo PID para a estratégia de geração de referência ótima utilizam informações do modelo FOPDT apresentado na Equação 4.1. O projeto dos ganhos dos controladores é feito utilizando o método com base em estrutura IMC. Portanto, utilizando-se $\epsilon = 220$, obtém-se: $K_p = 2,3508$, $K_i = 0,00034$ e $K_d = 0$.

Para o controlador preditivo com estratégia de geração de referência ótima, utilizando informações do modelo FOPDT apresentada na Equação 4.1, adotaram-se os parâmetros de projeto como sendo: horizonte de previsão inicial ($N_1 = 1$), horizonte de previsão final ($N_y = 28$), horizonte de controle ($N_u = 1$), horizonte de restrições terminais ($m = 1$), ponderação do sinal de controle ($\lambda = 0$) e ponderação do sinal de erro ($\mu = 1$). O horizonte de previsão inicial poderia ser escolhido igual ao atraso de transporte para reduzir o custo computacional, porém, como este pode variar, decidiu-se mantê-lo em $N_u = 1$.

A seleção dos parâmetros dos controladores do tipo PID para a estratégia de controle de conforto via inclusão do índice PMV na malha de controle utilizam informações do modelo FOPDT apresentado na Equação 4.2. O projeto dos ganhos dos controladores também é feito utilizando o método com base em estrutura IMC. Portanto, utilizando-se $\epsilon = 220$, obtém-se os parâmetros: $K_p = 9,2811$, $K_i = 0,00138$ e $K_d = 0$.

Para verificar o desempenho dos controladores, PID e preditivo, para as duas estratégias de controle apresentadas (Capítulos 2 e 3), em condições normais de operação, o período de testes em tempo real é de 24 horas, com período de amostragem de 20 segundos. Este período de amostragem é escolhido devido às propriedades do sensor EE66. Os controladores são analisados pelo tempo de subida (t_r), MSE (Equação 2.31) e consumo de energia. Porém, a comparação entre as leis e estratégias de controle não é trivial, pois como são efetuados testes em tempo real, existe a influência das condições climáticas externas que não são as mesmas em todos os ensaios. O MSE é calculado para o erro em regime permanente, ou seja, a partir da décima segunda hora de testes.

4.3.1 Controlador PID com geração de referência ótima

Como pode ser observado na Figura 4.15, o tempo de subida é igual a $t_r = 7,66 h$, o MSE é igual a $5,8989 \cdot 10^{-5}$ e o consumo de energia, apresentado na Figura 4.16, é de $30,0552 kWh$. Observa-se também que no estado transitório, a taxa de melhora do PMV em relação a zero é de $0,0452 PMV/h$. Nota-se, pela Figura 4.15, que o Pon-

to 2 está aproximadamente 1°C mais quente que o Ponto 1. Isto pode ser creditado ao fato que o Ponto 2 está localizado em uma posição mais elevada e sabe-se que o calor tende a subir. Outro aspecto é que o Ponto 2 está mais distante do clima externo e mais próximo de paredes com alta capacidade térmica. Apesar destes aspectos, um ocupante hipotético localizado próximo ao Ponto 2 estaria com uma sensação térmica de mais frio que um ocupante hipotético próximo ao Ponto 1. Isto se deve ao fato que este ocupante está vestido com roupas mais leves e com menos atividade física. Também através da Figura 4.15, nota-se que a referência de temperatura é praticamente constante, visto que os outros fatores que influenciam no cálculo do PMV estão praticamente constantes.

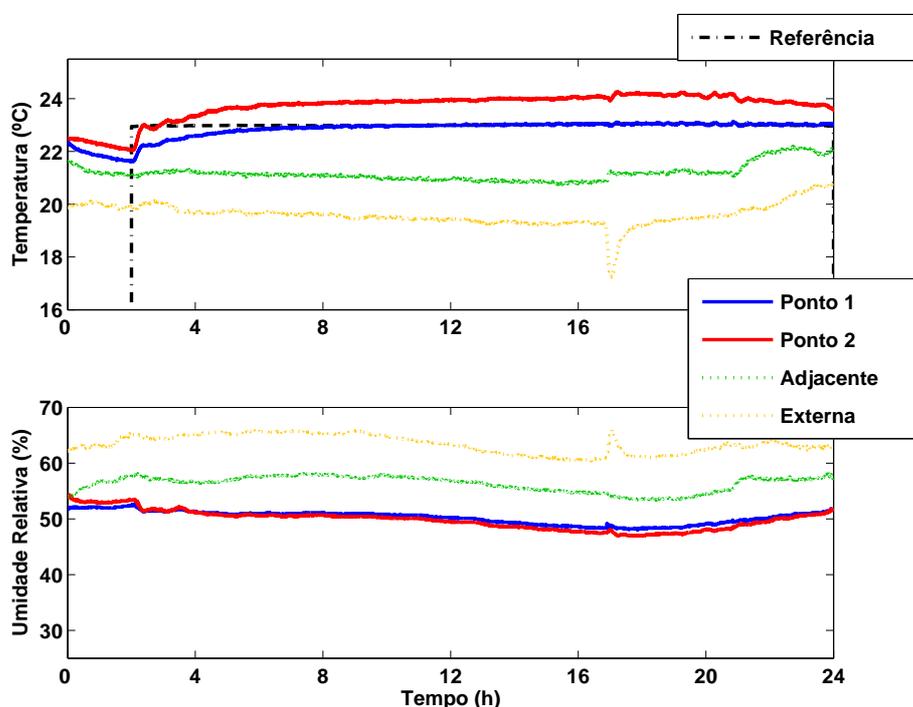


Figura 4.15: Sinais de temperatura e umidade relativa para o teste em condições normais de operação utilizando o controlador PID com geração de referência ótima.

Para o controlador PID com SP e geração de referência ótima, como pode ser observado na Figura 4.17, o tempo de subida é igual a $t_r = 6,96 h$, o MSE é igual a $8,5557 \cdot 10^{-5}$ e o consumo de energia, apresentado na Figura 4.18, é de $49,2943 kWh$. Observa-se também que no estado transitório, a taxa de melhora do PMV em relação a zero é de $0,0933 PMV/h$. A utilização do preditor de Smith fez com que o sistema se torne um pouco mais rápido, porém com uma pequena piora na sensibilidade às perturbações.

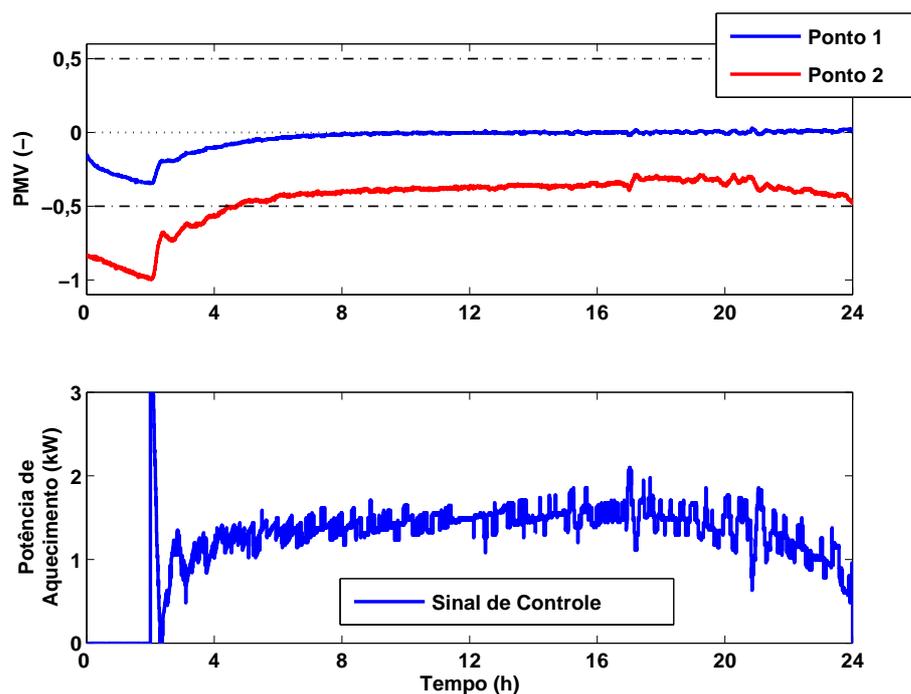


Figura 4.16: Conforto térmico e sinal de controle para o teste em condições normais de operação utilizando o controlador PID com geração de referência ótima.

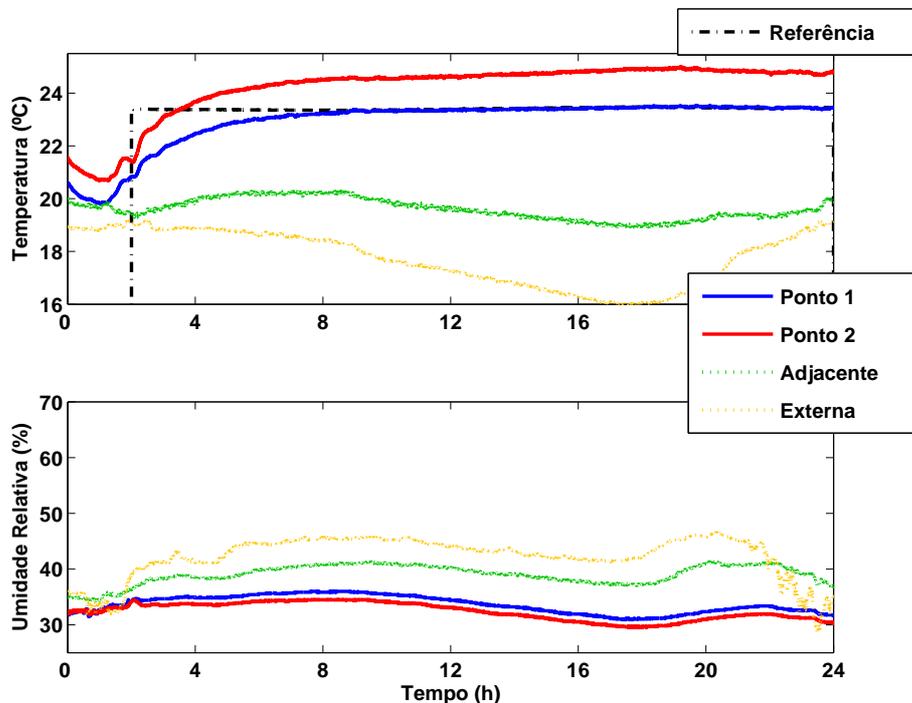


Figura 4.17: Sinais de temperatura e umidade relativa para o teste em condições normais de operação utilizando o controlador PID com SP e geração de referência ótima.

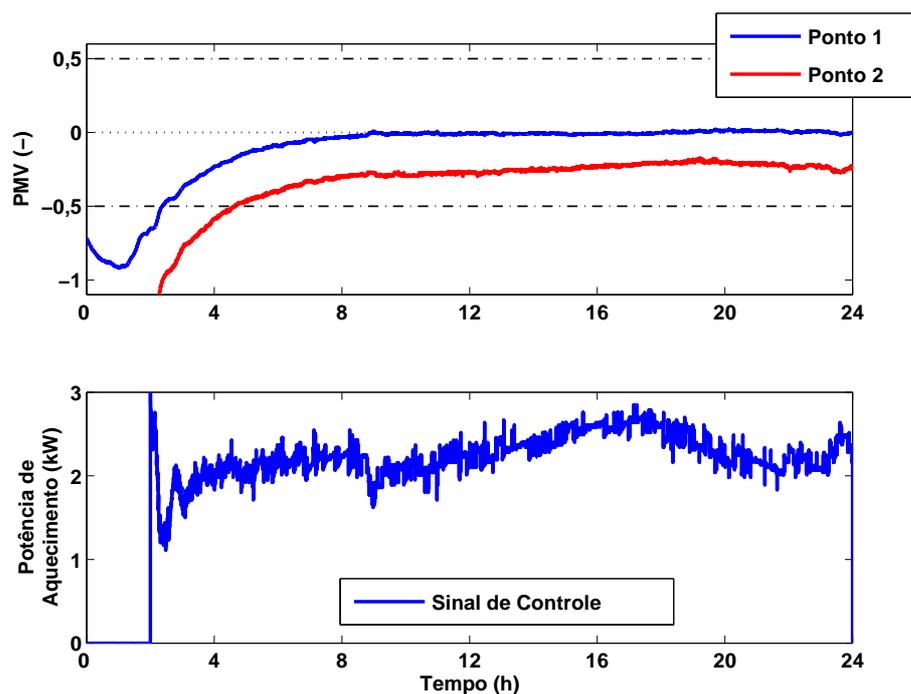


Figura 4.18: Conforto térmico e sinal de controle para o teste em condições normais de operação utilizando o controlador PID com SP e geração de referência ótima.

4.3.2 Controlador PID com inclusão do índice PMV na malha

Como pode ser observado na Figura 4.19, o tempo de subida é igual a $t_r = 8,79 h$, o MSE é igual a $6,5980 \cdot 10^{-5}$ e o consumo de energia, apresentado na Figura 4.20, é de $33,6252 kWh$. Observa-se também que no estado transitório, a taxa de melhora do PMV em relação a zero é de $0,1111 PMV/h$. Isto indica que este controlador responde mais rapidamente que o controlador da Seção 4.3.1. O tempo de subida é maior porque, devido às condições iniciais (temperatura ambiente estar mais baixa), é necessário maior tempo para chegar ao estado de conforto térmico. Neste teste, o padrão de temperatura do Ponto 2 permanece igual, isto é, maior que o Ponto 1. Por volta da hora 18, a temperatura do Ponto 2 cai. Devido ao padrão de vestimenta e atividade física, um eventual ocupante no Ponto 2 sairia da região de conforto. Nota-se, na Figura 4.20, que devido a um aumento da temperatura na sala adjacente, o esforço de controle para manter o PMV tende a diminuir.

Para o controlador PID com SP e inclusão do índice PMV na malha, como pode ser observado na Figura 4.21, o tempo de subida é igual a $t_r = 9,88 h$, o MSE é igual a $7,2328 \cdot 10^{-5}$ e o consumo de energia, apresentado na Figura 4.22, é de $58,9247 kWh$. Observa-se também que no estado transitório, a taxa de melhora do PMV em relação

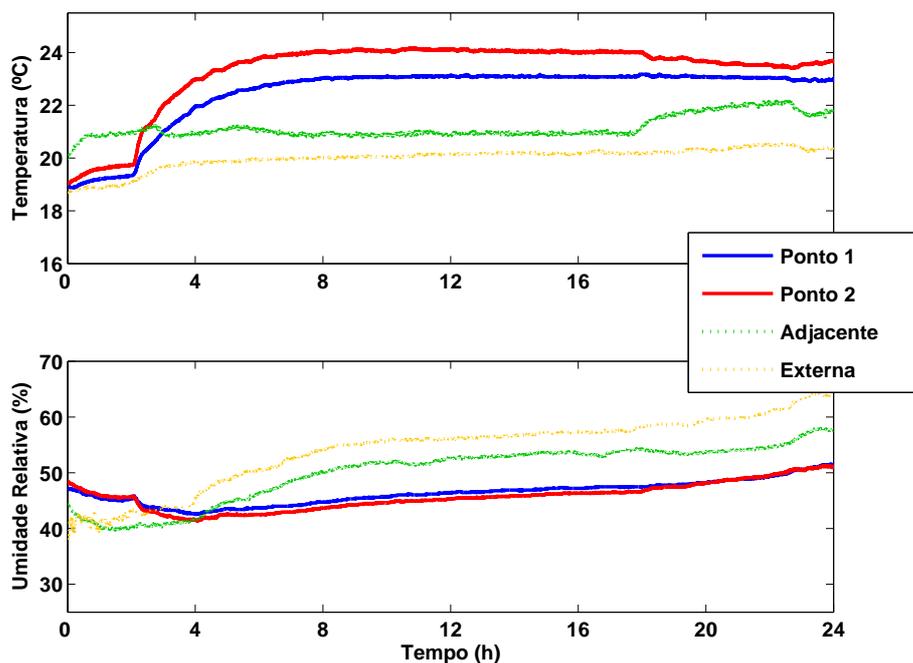


Figura 4.19: Sinais de temperatura e umidade relativa para o teste em condições normais de operação utilizando o controlador PID com inclusão do índice PMV na malha de controle.

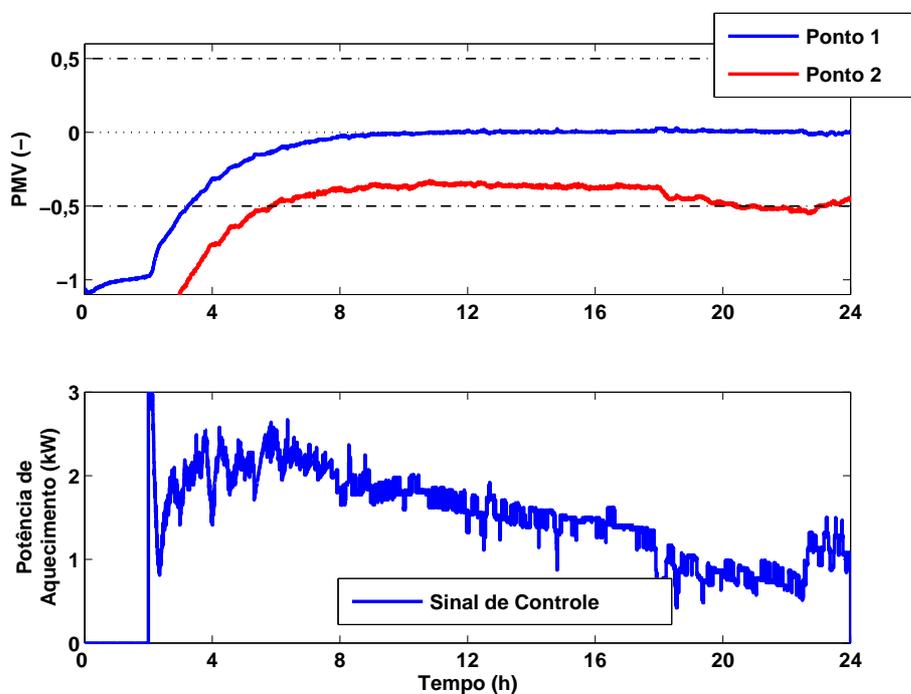


Figura 4.20: Conforto térmico e sinal de controle para o teste em condições normais de operação utilizando o controlador PID com inclusão do índice PMV na malha de controle.

a zero é de $0,1368 \text{ PMV}/h$. Através deste experimento, pode-se observar que o padrão tende a se repetir, isto é, o PID com realimentação de PMV tende a ser mais rápido que o com geração de referência e utilização do preditor de Smith aumenta esta característica.

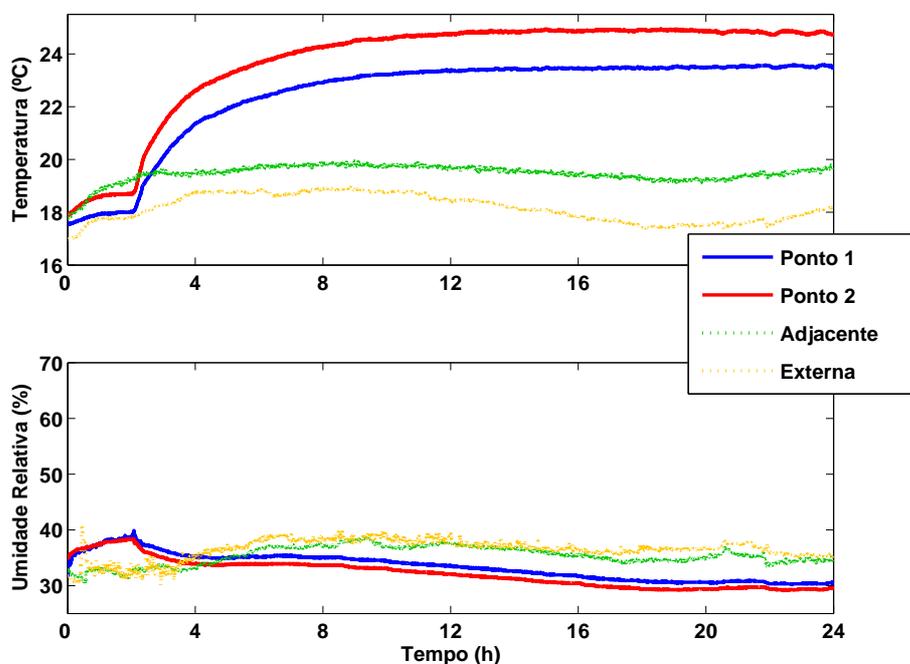


Figura 4.21: Sinais de temperatura e umidade relativa para o teste em condições normais de operação utilizando o controlador PID com SP e inclusão do índice PMV na malha de controle.

4.3.3 Controlador CRHPC com geração de referência ótima

Como pode ser observado na Figura 4.23, o tempo de subida é igual a $t_r = 6,51 \text{ h}$, o MSE é igual a $4,4965 \cdot 10^{-5}$ e o consumo de energia, apresentado na Figura 4.24, é de $25,0580 \text{ kWh}$. Observa-se também que no estado transitório, a taxa de melhora do PMV em relação a zero é de $0,0972 \text{ PMV}/h$. Este valor é semelhante ao controlador PID com preditor de Smith e geração de referência e superior ao PID convencional. Novamente, o padrão do Ponto 2 se mantém, isto é, com uma temperatura acima do Ponto 1. Apesar disso, devido à vestimenta e atividade física atribuídas ao hipotético ocupante do Ponto 2, este estaria com uma sensação de frio, mas mesmo assim, dentro da faixa de conforto estipulada pela ASHRAE (1993), enquanto que o ocupante do Ponto 1 estaria em situação de conforto ótimo, sob a ótica do índice PMV.

Através da Figura 4.24, nota-se também que a variância do sinal de controle para o controlador preditivo é superior ao PID. Porém, devido à característica passa baixa do

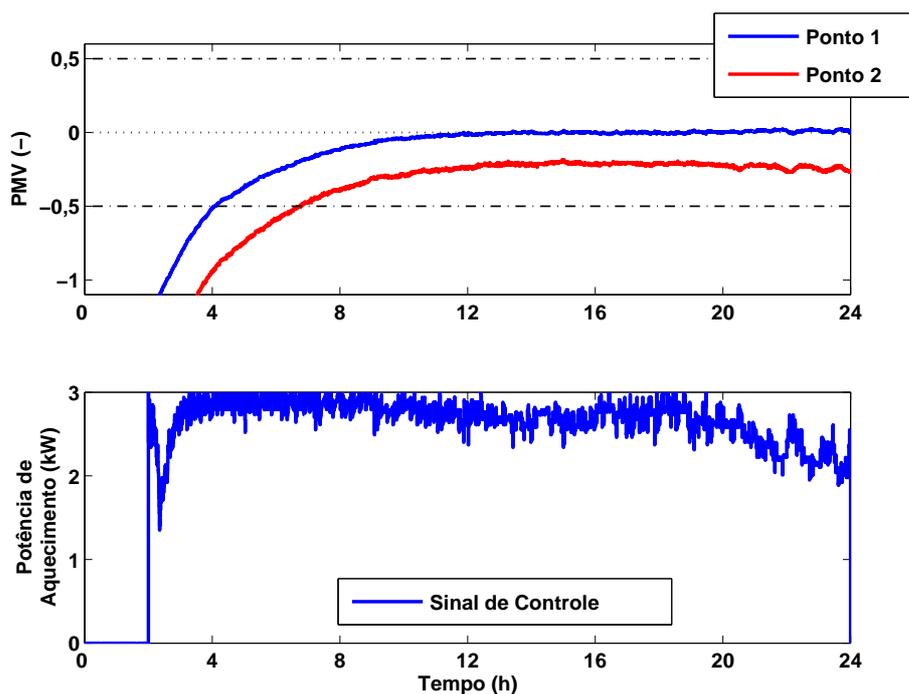


Figura 4.22: Conforto térmico e sinal de controle para o teste em condições normais de operação utilizando o controlador PID com SP e inclusão do índice PMV na malha de controle.

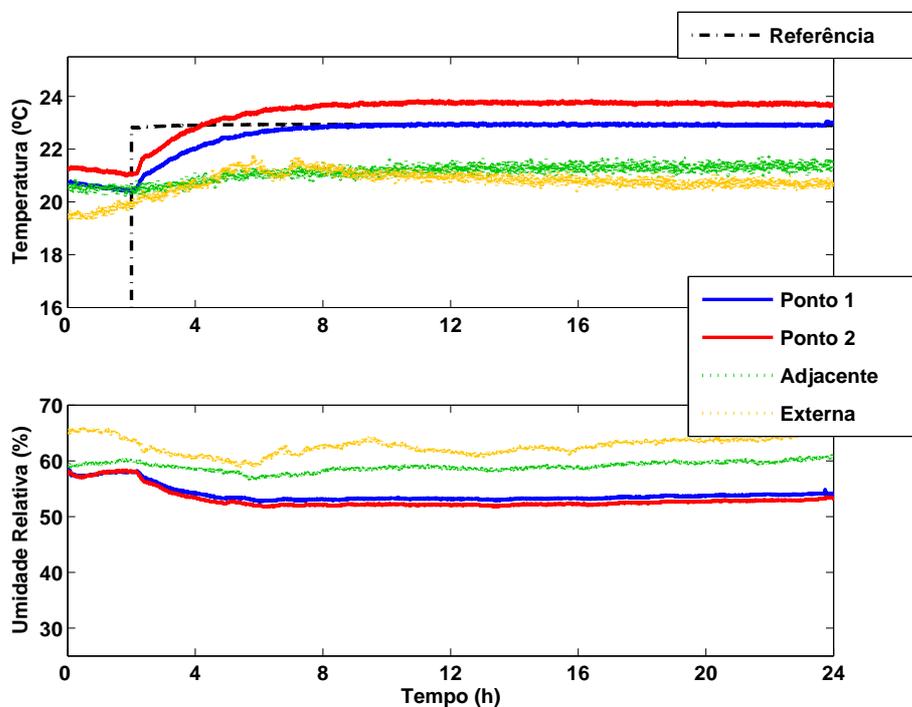


Figura 4.23: Sinais de temperatura e umidade relativa para o teste em condições normais de operação utilizando o controlador CRHPC com geração de referência ótima.

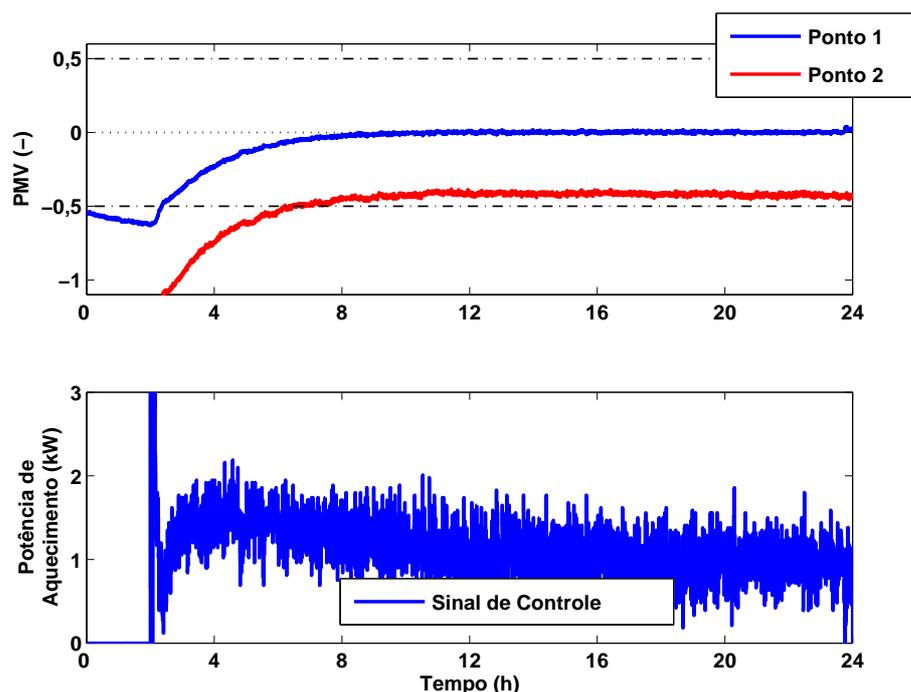


Figura 4.24: Conforto térmico e sinal de controle para o teste em condições normais de operação utilizando o controlador CRHPC com geração de referência ótima.

aquecedor este fato possui pouca influência na temperatura interna do ambiente Sala 1.

4.4 Análise para mudanças nas condições de operação

Nesta subseção, testes em tempo real são efetuados para as estratégias de geração dinâmica de referência de temperatura, utilizando o controlador preditivo CRHPC, e inclusão do índice PMV na malha de controle, utilizando os controladores clássicos do tipo PID. Para o controlador PID com preditor de Smith, também é utilizada uma ação *Antiwindup* quando ocorre saturação no sinal de controle.

Para os testes, continuam-se utilizando os mesmos parâmetros do PMV da seção anterior. Entretanto, os parâmetros individuais de atividade e vestimenta mudam e são apresentados na Figura 4.25 para os dois pontos de medição. Tais parâmetros procuram reproduzir a mudança nos parâmetros pessoais que podem ocorrer em um ambiente de escritório.

Os parâmetros dos controladores para a estratégia de controle de conforto via inclusão do índice PMV na malha de controle, com base em algoritmos do tipo PID são os mesmos da seção anterior. O mesmo se dá para o controlador preditivo com estratégia de geração

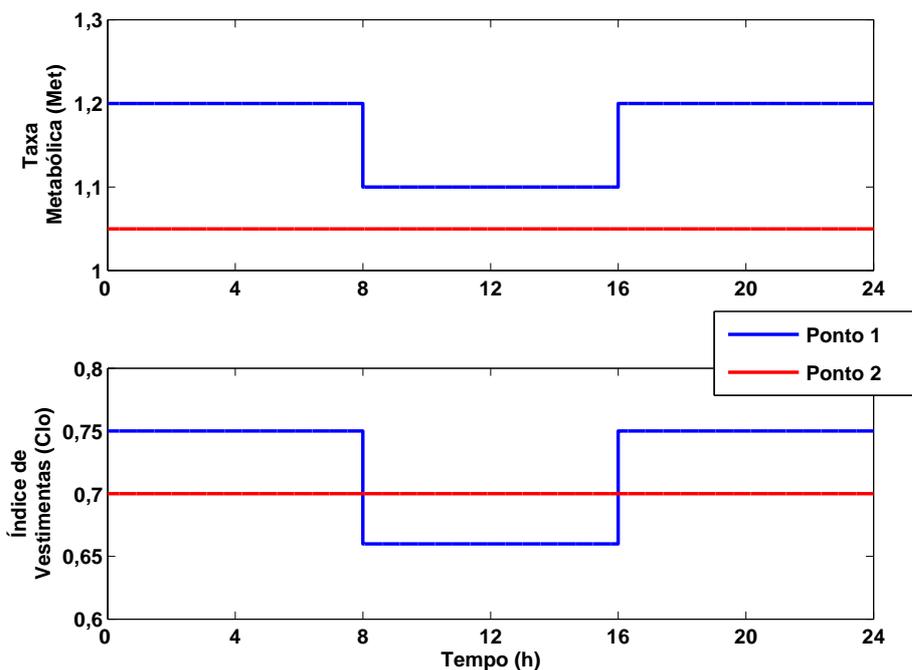


Figura 4.25: Variação nos parâmetros individuais para os testes de mudanças nas condições de operação.

de referência ótima, cujos parâmetros de projeto são mantidos constantes.

Para verificar o desempenho dos controladores, do tipo PID e preditivo, para as duas estratégias de controle apresentadas (Capítulos 2 e 3) em condições de operação com mudança nos parâmetros individuais, o período de testes em tempo real é de 24 horas, com período de amostragem de 20 segundos. Os controladores são analisados pelo MSE (Equação 2.31) e consumo de energia. O MSE é calculado para o erro a partir da sexta hora de teste.

4.4.1 Controlador PID com inclusão do índice PMV na malha

Como pode ser observado na Figura 4.26, o MSE é igual a $1,3405 \cdot 10^{-2}$ e o consumo de energia, apresentado na Figura 4.27, é de $45,8733 \text{ kWh}$. Através da Figura 4.27, nota-se que, quando há mudança no padrão de vestimenta e atividade física, o PMV varia e a tendência é o controlador se ajustar a esta variação retornando o sistema a condição ótima de operação, isto é, PMV nulo. É importante ressaltar que, ao variar os parâmetros individuais, muda-se o modelo para o qual o controlador PID foi projetado, porém o sistema em malha fechada é robusto a esta variação. Novamente, o padrão do Ponto 2 se repete. A diferença neste ensaio é que, ao aumentar a temperatura em um

ponto próximo ao Ponto 1 para se ajustar à mudança no comportamento de um hipotético ocupante neste ponto, o ocupante do Ponto 2 passaria da sensação de frio leve para de calor leve, mantendo os limites de conforto térmico da ASHRAE (1993).

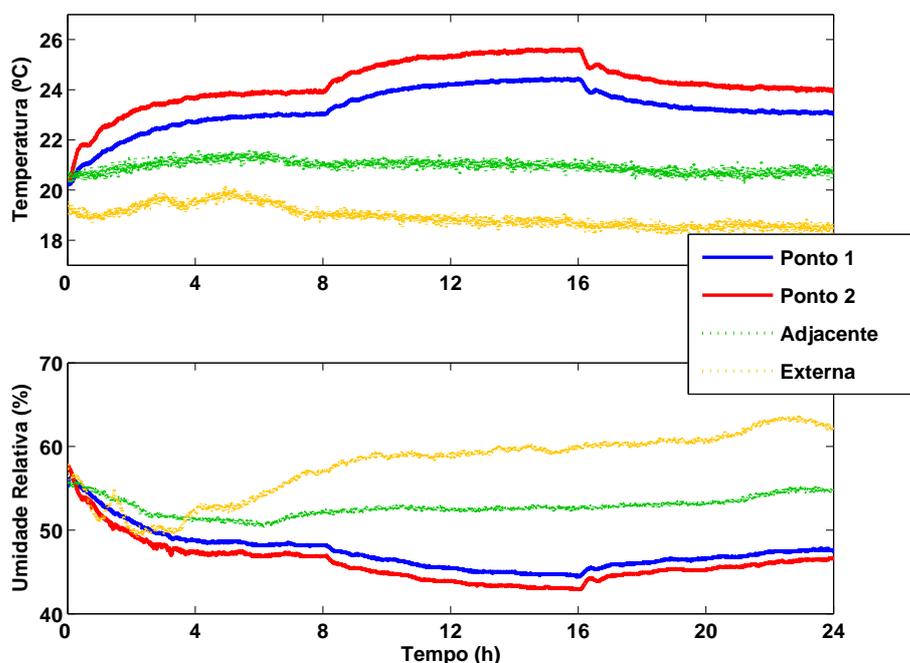


Figura 4.26: Sinais de temperatura e umidade relativa para o teste com mudanças nas condições de operação utilizando o controlador PID com inclusão do índice PMV na malha de controle.

Para o controlador PID com SP e inclusão do índice PMV na malha, como pode ser observado na Figura 4.28, o MSE é igual a $0,997010^{-2}$ e o consumo de energia, apresentado na Figura 4.29, é de $30,4065 \text{ kWh}$.

4.4.2 Controlador CRHPC com geração de referência ótima

Como pode ser observado na Figura 4.30, o MSE é igual a $1,722710^{-2}$ e o consumo de energia, apresentado na Figura 4.31, é de $27,4727 \text{ kWh}$. Neste caso, pode-se observar que, devido à mudança no padrão de comportamento do hipotético ocupante do Ponto 1, o sistema adaptou a geração de referência fazendo com que o ponto de operação variasse e a condição de conforto ótimo sob o ponto de vista de PMV seja restaurada (ver Figura 4.31).

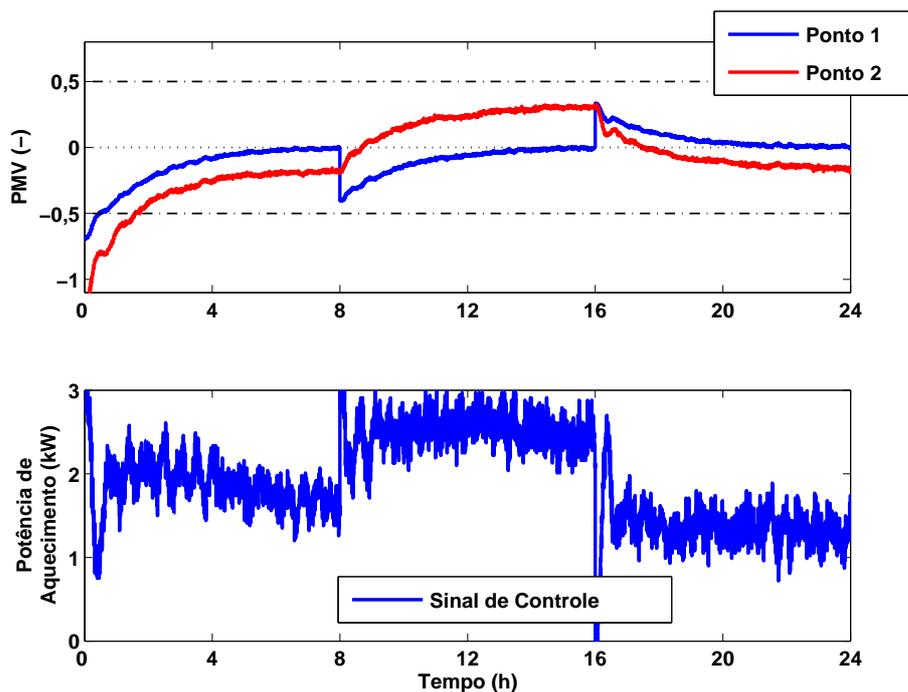


Figura 4.27: Conforto térmico e sinal de controle para o teste com mudanças nas condições de operação utilizando o controlador PID com inclusão do índice PMV na malha de controle.

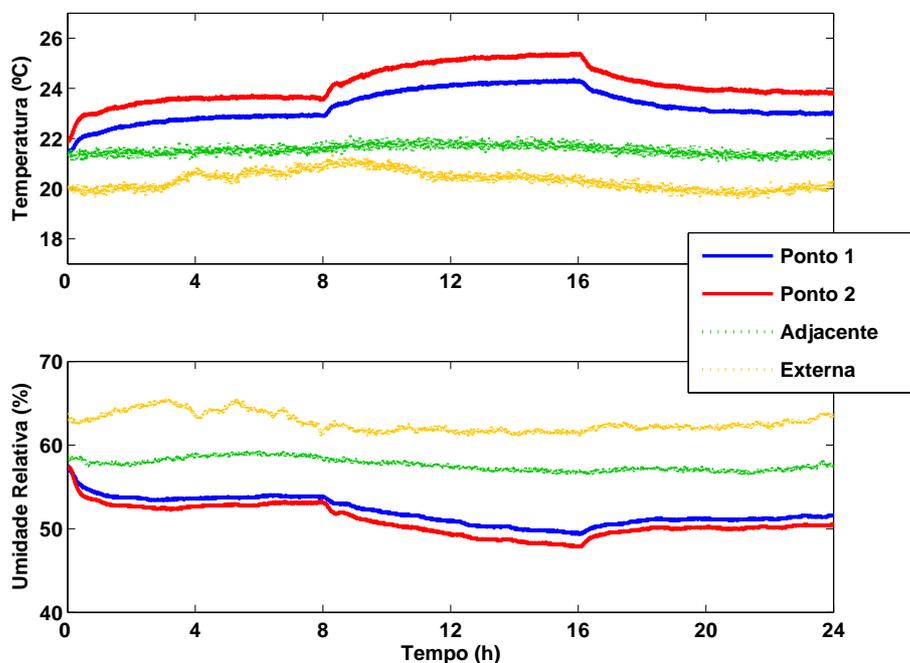


Figura 4.28: Sinais de temperatura e umidade relativa para o teste com mudanças nas condições de operação utilizando o controlador PID com SP e inclusão do índice PMV na malha de controle.

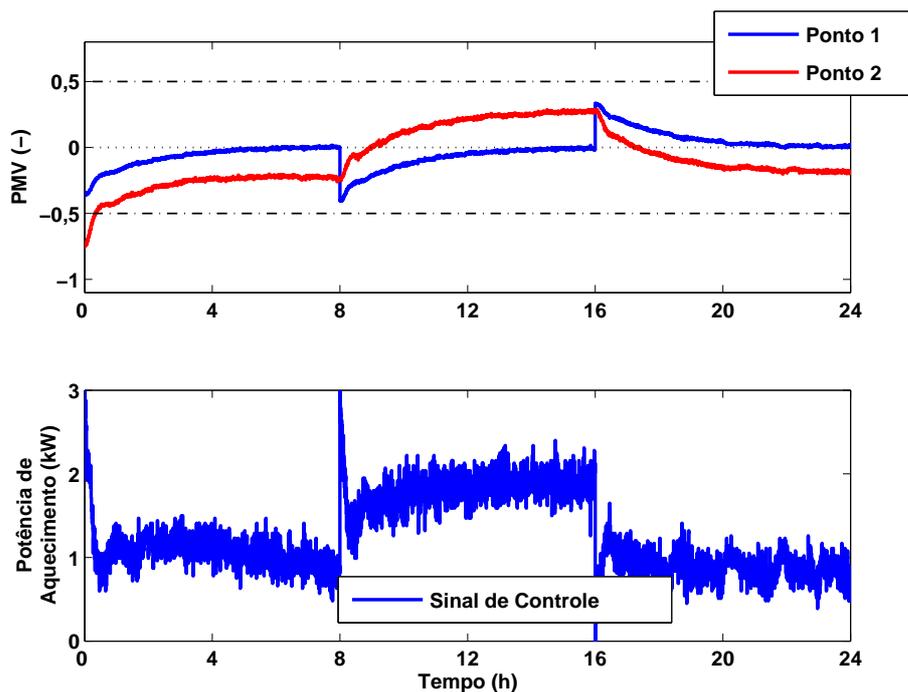


Figura 4.29: Conforto térmico e sinal de controle para o teste com mudanças nas condições de operação utilizando o controlador PID com SP e inclusão do índice PMV na malha de controle.

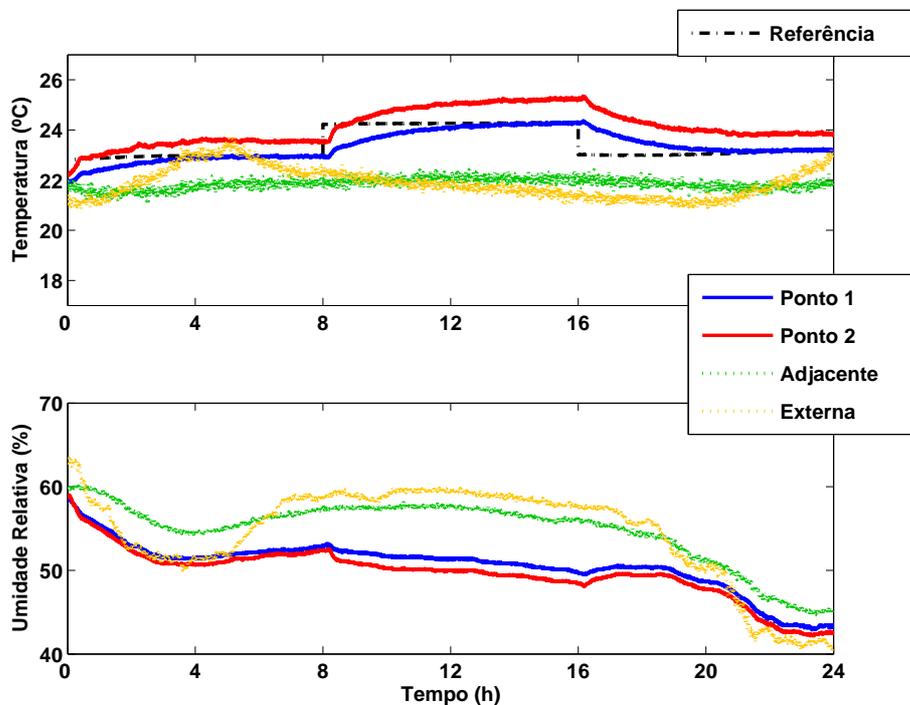


Figura 4.30: Sinais de temperatura e umidade relativa para o teste com mudanças nas condições de operação utilizando o controlador CRHPC com geração de referência ótima.

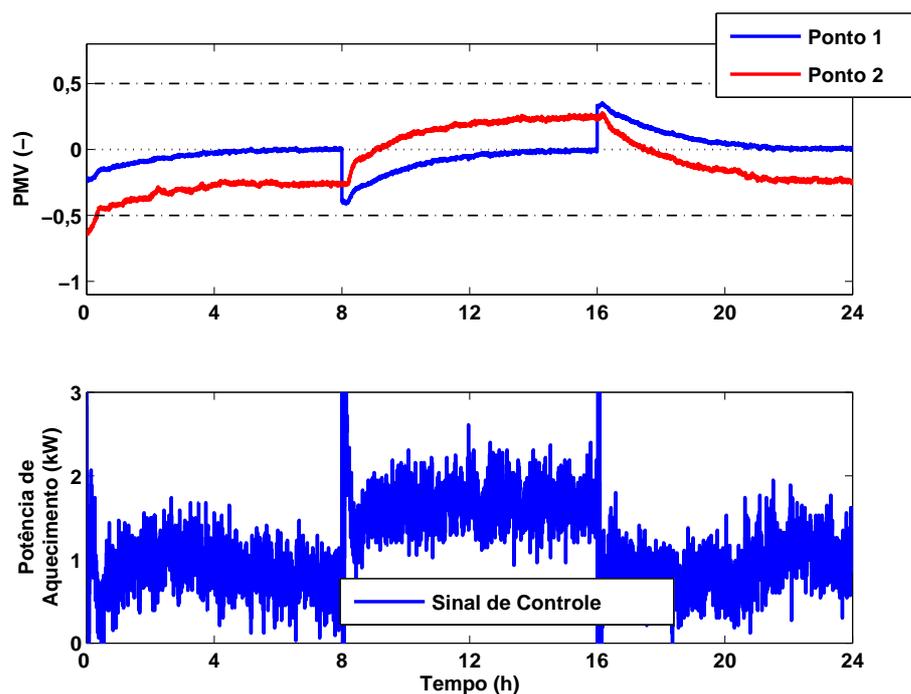


Figura 4.31: Conforto térmico e sinal de controle para o teste com mudanças nas condições de operação utilizando o controlador CRHPC com geração de referência ótima.

4.5 Análise para adição de perturbação

Nesta subseção, testes em tempo real são efetuados para a estratégia de inclusão do índice PMV na malha de controle, utilizando os controladores do tipo PID. Para o controlador PID com preditor de Smith, também é utilizada uma ação *Antiwindup* quando ocorre saturação no sinal de controle.

Para os testes, utilizaram-se os mesmos parâmetros do PMV da Seção 4.3. A diferença é que nesta seção inclui-se uma geração de calor adicional, possivelmente gerada por indivíduos ou equipamentos presentes na edificação. Este sinal de perturbação é de 600 W e está apresentado na Figura 4.32.

Os parâmetros dos controladores do tipo PID se mantiveram inalterados.

Para a estratégia de controle de conforto via inclusão do índice PMV na malha de controle com base em algoritmos clássicos do tipo PID, são utilizadas informações da equação FOPDT apresentada na Equação 4.2. O projeto dos ganhos dos controladores também é feito utilizando o método com base em estrutura IMC. Portanto, utilizando-se $\epsilon = 220$, obtém-se os parâmetros dos controladores com base em algoritmos clássicos do tipo PID: $K_p = 9,2811$, $K_i = 0,00138$ e $K_d = 0$.

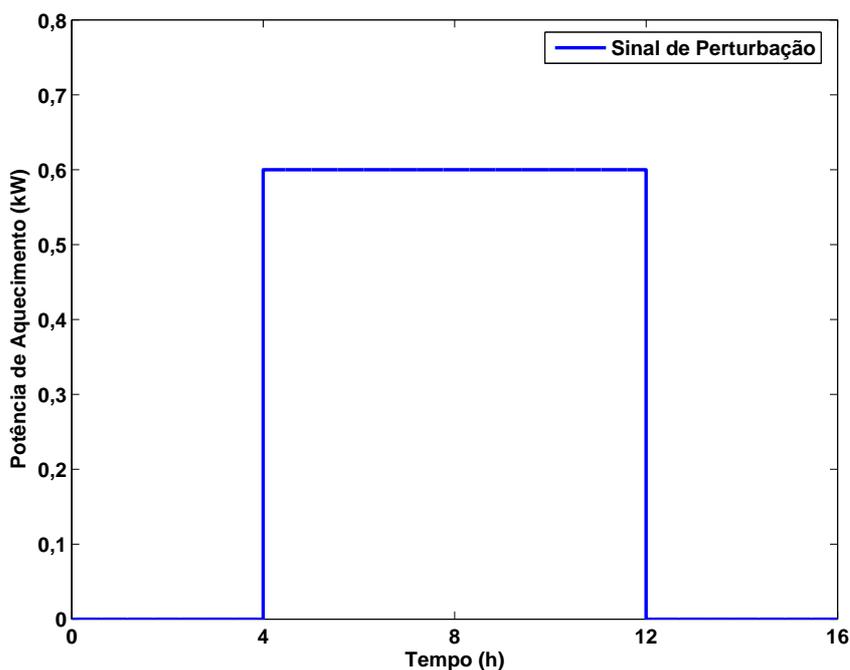


Figura 4.32: Sinal de perturbação para os testes de adição de perturbação.

Para verificar o desempenho dos controladores do tipo PID para a estratégia de controle de conforto via inclusão do índice PMV na malha de controle (Capítulo 3) O período de testes em tempo real é de 24 horas, com período de amostragem, de 20 segundos. Os controladores são analisados pelo MSE (Equação 2.31) e consumo de energia. O MSE é calculado para o erro a partir do início dos testes.

4.5.1 Controlador PID com inclusão do índice PMV na malha

Como pode ser observado na Figura 4.33, o MSE é igual a $1,1295 \cdot 10^{-4}$ e o consumo de energia, apresentado na Figura 4.34, é de $19,7952 \text{ kWh}$.

Para o controlador PID com SP e com inclusão do índice PMV na malha, como pode ser observado na Figura 4.35, o MSE é igual a $5,7495 \cdot 10^{-4}$ e o consumo de energia, apresentado na Figura 4.36, é de $11,2078 \text{ kWh}$.

Nota-se que os dois controladores PID foram capazes de rejeitar a perturbação introduzida no ambiente. O tempo de restabelecimento é curto nos dois casos.

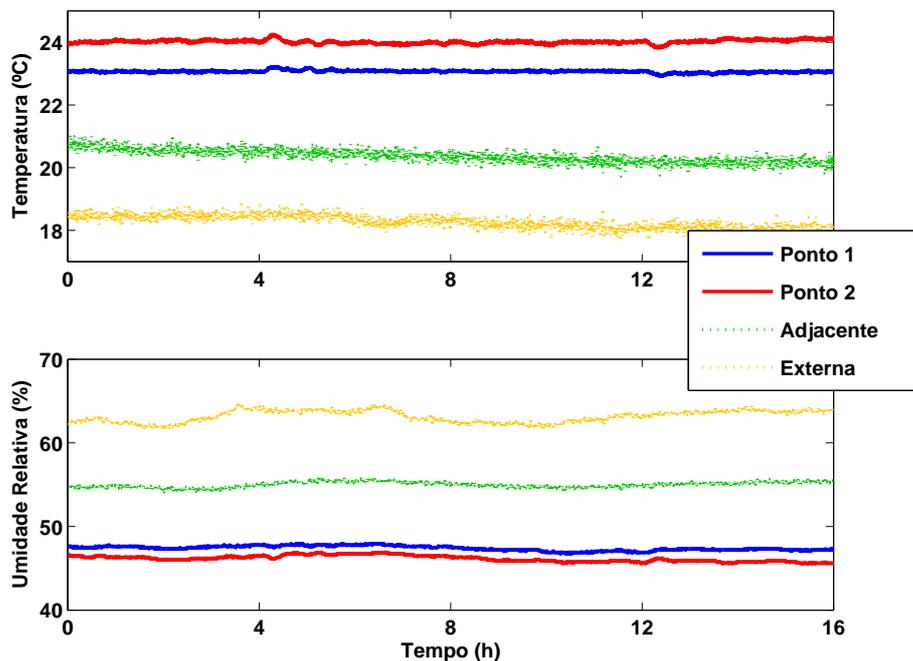


Figura 4.33: Sinais de temperatura e umidade relativa para o teste com mudanças nas condições de operação utilizando o controlador PID com inclusão do índice PMV na malha de controle.

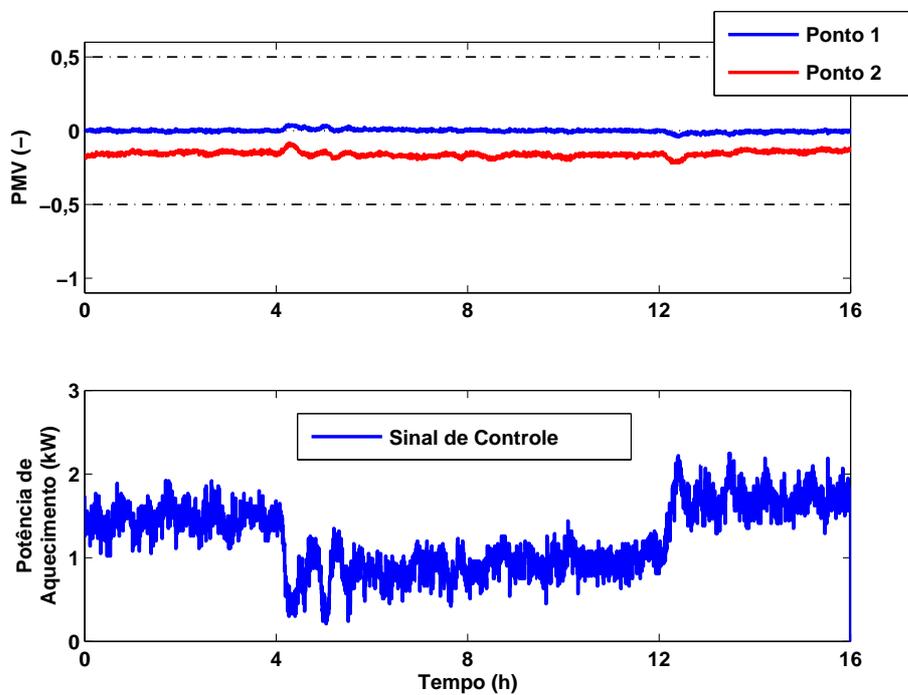


Figura 4.34: Conforto térmico e sinal de controle para o teste com mudanças nas condições de operação utilizando o controlador PID com inclusão do índice PMV na malha de controle.

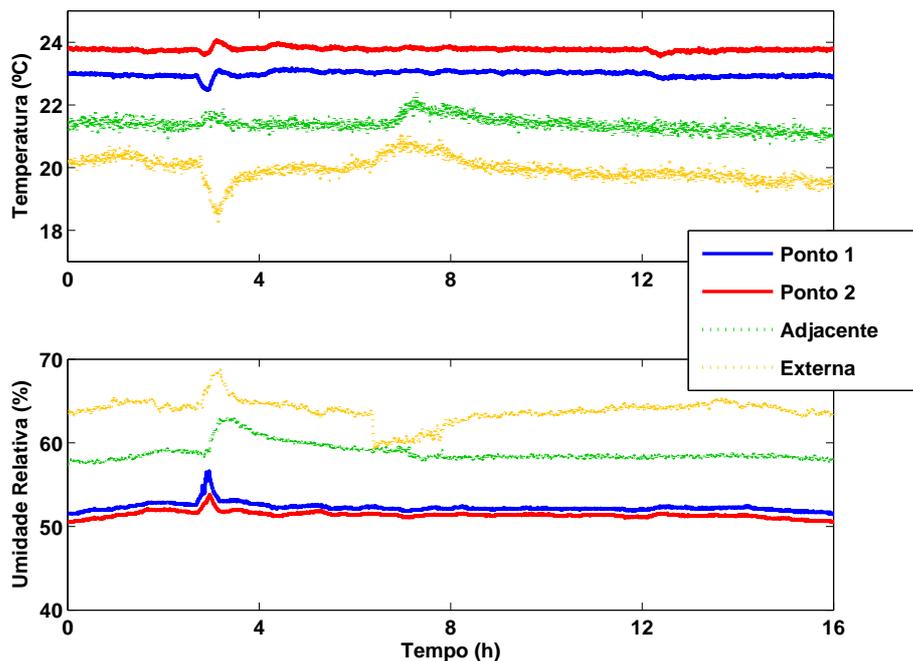


Figura 4.35: Sinais de temperatura e umidade relativa para o teste com mudanças nas condições de operação utilizando o controlador PID com SP e inclusão do índice PMV na malha de controle.

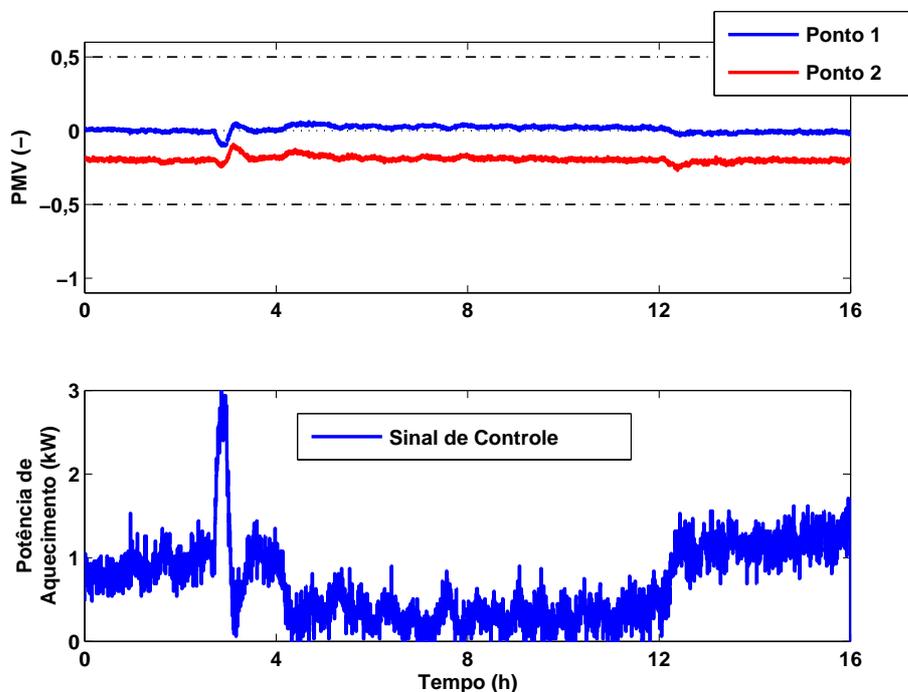


Figura 4.36: Conforto térmico e sinal de controle para o teste com mudanças nas condições de operação utilizando o controlador PID com SP e inclusão do índice PMV na malha de controle.

4.6 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo, as estratégias de controle de conforto térmico, com base em geração de referência ótima e via inclusão do índice PMV na malha de controle, foram implementadas em tempo real e aplicadas a uma edificação. O aparato experimental foi descrito, usando-se sensores de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, aquecedores a óleo e equipamentos para aquisição e supervisão da malha de controle. A edificação na qual foram implementadas as estratégias de controle também foi descrita.

Testes de resposta ao degrau foram realizados e com a aquisição dos sinais, dois modelos foram identificados para representar a edificação com o sistema de climatização, um de temperatura, para a estratégia de geração de referência ótima, e outro de PMV, para a estratégia de inclusão do índice PMV na malha de controle. Imagens ilustram a edificação e o aparato experimental.

Testes em tempo real para as leis de controle clássicas PID e PID com modificações e a lei de controle preditivo CRHPC, foram apresentados. O desempenho das leis de controle implementadas, para as duas estratégias de controle de conforto térmico, foram analisadas em três situações: *i)* condições normais de operação; *ii)* mudanças nas condições de operação pela alteração de parâmetros individuais; *iii)* adição de uma perturbação.

Com isso mostrou-se que ambas as estratégias de controle estão aptas a promover conforto térmico aos ocupantes de uma edificação. Entretanto, de forma qualitativa, é possível tecer algumas conclusões, como as listadas a seguir.

A estratégia de geração do sinal de referência é mais adequada quando já existe um controlador implementado no sistema de climatização. Nestes casos, é mais simples e obtém-se bons resultados implementar um sistema para gerar referência ótima para o sinal de temperatura que todo um novo sistema de controle. Caso seja necessária a implementação de um novo sistema de controle, ao utilizar um controlador PID com realimentação de PMV, evita-se a resolução de um problema de otimização *on-line*, mesmo sabendo que este problema é computacionalmente pouco custoso. No caso de controladores preditivos, é necessária a resolução de um problema de otimização nas duas estratégias, sendo que a com PMV incorporada ao modelo é mais custosa, pois envolve resolução de um problema de otimização mais complexo que a da geração de referência. Em ambos os casos, é possível provar a estabilidade do sistema em malha fechada. O problema é tratado e otimizado em todos os seus aspectos quando o modelo do PMV é incorporado à malha. Finalmente, nos exemplos apresentados, todos os controladores se mostraram ro-

bustos a mudanças nas condições individuais dos ocupantes, entretanto, deve-se destacar que a geração ótima do sinal de referência faz com que estas mudanças não impliquem na necessidade de mudanças na sintonia dos controladores, pois o modelo do sistema na malha não é alterado.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

O presente trabalho abordou o problema de controle de conforto térmico em edificações, de uma zona térmica, equipadas com um sistema de climatização. O conforto térmico é um conceito de difícil definição, pois depende de vários parâmetros ambientais e pessoais. Assim adotou-se um índice, o PMV, para a sua medição. O PMV é calculado em função de quatro parâmetros ambientais, a temperatura, a umidade relativa, a temperatura radiante média e a velocidade do ar, e de dois parâmetros individuais, a taxa metabólica e o índice de vestimentas.

Duas estratégias foram propostas para o controle de conforto térmico. A primeira é o controle de conforto térmico através da inclusão de uma malha externa de geração de referência de temperatura, com base no índice PMV, para uma malha de controle convencional de temperatura. A segunda é o controle de conforto térmico através da inclusão do índice PMV na malha de controle, seja por um sensor de conforto térmico com base em PMV, seja pela inclusão da equação de cálculo do PMV na lei de controle.

Para a implementação das estratégias de controle de conforto térmico em sistemas de climatização, utilizaram-se leis de controle clássicas do tipo PID e a lei de controle preditivo com restrições terminais (CRHPC).

Um ambiente de simulação foi definido com base nas dimensões físicas do *benchmark* BESTest. Dados climáticos reais para a cidade de Curitiba - Brasil foram apresentados e utilizados nas simulações.

Testes em simulação foram conduzidos para ambas as estratégias de controle de conforto térmico. Resultados numéricos para três situações de operação foram apresentados, sendo o primeiro para condições normais de operação, o segundo para mudança nas condições de operação pela alteração dos parâmetros individuais utilizados no cálculo do PMV e o terceiro para adição de uma perturbação.

Os resultados numéricos apresentaram o desempenho das leis de controle para as duas estratégias de controle de conforto. Observou-se que, através dos critérios de avaliação,

como tempo de subida, MSE e consumo de energia, para a mesma lei de controle e para a mesma condição de operação, ambas as estratégias apresentaram desempenho bastante próximos.

Posteriormente, propôs-se a utilização de tais estratégias em tempo real. Para tanto, descreveu-se a edificação e o aparato experimental necessários para a implementação em tempo real. Utilizaram-se sensores de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar para aquisição dos dados climáticos do ambiente. A temperatura radiante média foi considerada igual à temperatura ambiente e os parâmetros individuais foram tratados como variáveis que devem ser definidas pelos usuários. O sistema de climatização utilizado foi o aquecedor a óleo, devido às condições climáticas típicas de inverno para a cidade de Curitiba - Brasil, onde a zona térmica está localizada.

Testes em tempo real para as estratégias de geração de referência ótima e inclusão do PMV na malha de controle foram realizados através do uso das leis de controle revisadas. Três situações de operação foram realizadas, sendo a primeira para condições normais de operação, a segunda para mudança nas condições de operação pela alteração dos parâmetros individuais utilizados no cálculo do PMV e a terceira para adição de uma perturbação. Foram analisadas as condições de conforto de um ocupante próximo ao local de sensoriamento e um mais afastado.

Os resultados da implementação em tempo real mostraram o desempenho dos controladores, porém, não se pode ter a mesma conclusão que a obtida através dos testes de simulação devido aos diversos fatores climáticos que influenciam os teste. Entretanto, observou-se que todos os testes realizados tiveram o desempenho esperado, ou seja, levaram os supostos ocupantes do ambiente ao conforto térmico.

5.1 **Trabalhos Futuros**

Apesar dos resultados de controle de conforto térmico implementadas para as duas estratégias estudadas terem sido satisfatórios, observou-se no decorrer do trabalho que mais estudos são necessários. Portanto, propondo a continuidade deste projeto, sugerem-se:

1. Visando melhorar o desempenho do controle de conforto térmico utilizando as estratégias propostas neste trabalho, aprofundar o estudo da sintonia das leis de controle revisadas, tanto as do tipo PID, quanto a de controle preditivo.

2. Para verificar o desempenho da lei de controle preditivo não-linear (PMV-CRHPC), utilizando a estratégia de inclusão do modelo de previsão de PMV na lei de controle, implementá-la em tempo real e compará-la com a estratégia de geração de referência ótima.
3. Expandir os conceitos de controle de conforto térmico aplicado a um equipamento de climatização para um sistema de climatização contendo vários equipamentos, como aquecedor, condicionador de ar, ventilador e umidificador. Isto tornará a malha de controle multi-variável, necessitando de uma lei de controle que possa atuar em mais de uma variável, como é o caso do controle preditivo.
4. Implementar em tempo real as duas estratégias de controle de conforto térmico, em uma célula-teste no interior de uma câmara térmica, onde é possível controlar as condições climáticas externas, e comparar o consumo de energia de sistemas de climatização aplicando controle de conforto térmico e o controle de temperatura normalmente utilizados por estes. Os trabalhos Donaisky *et al.* (2008b) e Donaisky *et al.* (2008a) são um passo neste sentido.
5. Incluir aspectos de controle de ventilação para melhorar o PMV e diminuir o consumo de energia.

Referências

- Allgower, F. e A. Zheng (2000). *Nonlinear Model Predictive Control*. Progress in Systems and Control Theory. Birkhauser Verlag, Switzerland.
- Arens, E., H. Zhang e C. Huizenga (2006). Partial- and whole-body thermal sensation and comfort, Part I: Uniform environmental conditions.. *Journal of Thermal Biology* **31**, 53–59.
- ASHRAE (1993). *Handbook of Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Atlanta, GA.
- Astrom, K. J. e T. Hagglund (1995). *PID Controllers: Theory, Design and Tuning*. 2 ed.. ISA Press.
- Astrom, K. J. e T. Hagglund (2006). *Advanced PID Control*. 2 ed.. The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- Astrom, K. J., T. Hagglund e A. Wallenborg (1993). Automatic tuning of digital controllers with applications to HVAC plants. *Automatica* **29**(5), 1333–1343.
- Atmaca, I., O. Kaynakli e A. Yigit (2007). Effects of radiant temperature on thermal comfort. *Building and Environment* **42**(9), 3210–3220.
- Bazaraa, M. S., H. D. Sherali e C. M. Shetty (1993). *Nonlinear Programming: theory and algorithms*. John Wiley & Sons, Inc.
- Braatz, R. D. (1996). *The Control Handbook*. Chap. 10.7. Internal Model Control, pp. 215–224. CRC Press.
- Callender, A., D. R. Hartree e A. Porter (1936). Time-Lag in a Control System. *Royal Society of London Philosophical Transactions Series A* **235**, 415–444.
- Calvino, F., M. Gennusa, G. Rizzo e G. Scaccianoce (2004). The control of indoor thermal comfort conditions: Introducing a fuzzy adaptive controller. *Energy and Buildings* **36**(2), 97–102.
- Camacho, E. F. e C. Bordons (1999). *Model Predictive Control in Process Industry*. 2 ed.. Springer Verlag.
- Camacho, E. F. e C. Bordons (2004). *Model Predictive Control*. 2 ed.. Springer.
- Campello, R. J. G. B. e G. H. C. Oliveira (2007). *Enciclopédia de Automática*. Chap. 4: Modelos Não Lineares. Vol. 3. Edgard Blücher. São Paulo.

- Campello, R. J. G. B., G. H. C. Oliveira e W. C. Amaral (2007). Identificação e controle de processos via desenvolvimentos em séries ortonormais. Parte A: identificação. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica* **18**(3), 301 – 321.
- Chien, K. L., J. A. Hrones e J. B. Reswick (1952). On the automatic control of generalized passive systems. *Trans. of the ASME* **74**, 175–185.
- Chu, C.-M., T.-L. Jong e Y.-W. Huang (2005a). A direct load control of air-conditioning loads with thermal comfort control. In: *Proc. of the IEEE Power Engineering Society General Meeting*. China. pp. 664–669.
- Chu, C.-M., T.-L. Jong e Y.-W. Huang (2005b). A study of thermal comfort control using least enthalpy estimator on HVAC systems.. In: *Proc. of the IEEE American Control Conference*. Portland, OR, USA. pp. 3665–3670.
- Clarke, D. W., C. Mohtadi e P. Tuffs (1987). Generalized predictive control - Part 1 : The basic algorithm - Part 2 : Extensions and interpretations. *Automatica* **23**(2), 149–160.
- Clarke, D. W. e C. Mohtadi (1989). Properties of generalized predictive control. *Automatica* **25**(6), 859–875.
- Clarke, D. W. e R. Scattolini (1991). Constrained receding horizon predictive control. *IEEE Proc. D* **138**(4), 347–354.
- Cline, C. H. O., S. B. Thornton e S. S. Nair (2004). Control of human thermal comfort using digit feedback set point reset. In: *Proc. of the American Control Conference (ACC'04)*. Boston/MA, USA. pp. 2302–2307.
- Cutler, C. R. e B. C. Ramaker (1980). Dynamic matrix control - A computer control algorithm. In: *Proc. of American Control Conference (ACC)*. San Francisco, USA.
- Donaisky, E., B. C. Reginato, G. H. C. Oliveira e N. Mendes (2006). Estratégias para controle de conforto térmico baseadas em algoritmos PI e fuzzy. In: *Proc. of 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT'06)*. Curitiba, Brazil.
- Donaisky, E., G. H. C. Oliveira e N. Mendes (2007a). Real-time implementation of PID-based thermal comfort control algorithms. In: *Proc. of 19th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM'07)*. Brasília, Brazil.
- Donaisky, E., G. H. C. Oliveira e N. Mendes (2008a). Algoritmos PMV-MBPC para conforto térmico em edificações: Aplicação em uma célula-teste. In: *XVII Congresso Brasileiro de Automática (CBA'08)*. Juiz de Fora, Brazil.
- Donaisky, E., G. H. C. Oliveira e N. Mendes (2008b). Análise de desempenho de controlador MBPC baseado em PMV aplicado a sistemas de aquecimento. In: *V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM'08)*. Salvador, Brazil.
- Donaisky, E., G. H. C. Oliveira, R. Z. Freire e N. Mendes (2007b). PMV-based predictive algorithms for controlling thermal comfort in building plants. In: *Proc. of 16th IEEE Conference on Control Applications (CCA'07)*. Suntec City, Singapore.

- Dumur, D., P. Boucher, K. M. Murphy e F. Déqué (1997). Comfort control in residential housing using predictive controllers. In: *Proc. of the IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*. Hartford, CT, USA.
- Elshafei, A., G. A. Dumont e A. Elnaggar (1994). Adaptive GPC based on Laguerre-filters modelling. *Automatica* **30**(12), 1913–1920.
- Erbe, H.-H. (2006). The relevance of energy saving control. In: *Proc. of the IFAC Workshop on Energy Saving Control in Plants and Buildings*. Bansko, Bulgaria.
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal Comfort*. McGraw-Hill Inc.. New York, USA.
- Franklin, G. F., J. D. Powell e A. Emami-Naeini (2005). *Feedback Control of Dynamic Systems*. 5 ed.. Prentice Hall.
- Freire, R. Z., G. H. C. Oliveira e N. Mendes (2005a). Development of single-zone predictive equations using linear regression for advanced controllers synthesis. In: *Proc. of the Nineth Building Simulation Conference (IBPSA'05)*. Vol. 1. Montreal, Canada.
- Freire, R. Z., G. H. C. Oliveira e N. Mendes (2005b). Thermal comfort based predictive controllers for building heating systems. In: *Proc. of the 16th IFAC World Congress (IFAC'05)*. Prague, Czech Republic.
- Freire, R. Z., G. H. C. Oliveira e N. Mendes (2006). Non-linear predictive controllers for thermal comfort optimization and energy saving. In: *Proc. of the IFAC Workshop on Energy Saving Control in Plants and Buildings*. Bansko, Bulgaria.
- Freire, R. Z., G. H. C. Oliveira e N. Mendes (2008). Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings. *Energy and buildings* **40**, 1353–1365.
- Freire, R. Z. (2006). Técnicas avançadas de controle aplicadas a sistemas de climatização visando conforto térmico. Master's thesis. Pontifícia Universidade Católica do Paraná.
- Froisy, J. B. (2006). Model predictive control - building a bridge between theory and practice. *Computers and Chemical Engineering* **30**(10-12), 1426–1435.
- FURNAS, CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. (2006). Anuário estatístico - ano base 2005. Rua Real Grandeza, 219 - Bloco C - sala 1.603.1 - Rio de Janeiro, Brasil.
- Gagge, A. P., A. P. Fobelets e L. G. Berlund (1986). A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Transactions* **92**, 709–731.
- Gagge, A. P., J. A. J. Stolwijk e Y. Nishi (1971). An effective temperature scale based on a simple model of human psychrometric regulatory response. *ASHRAE Transactions* **77**(I), 247–262.
- Garcia, C. E., D. M. Prett e M. Morari (1989). Model predictive control: Theory and practice - A Survey. *Automatica* **25**(3), 335–348.
- Garcia, C. E. e M. Morari (1982). Internal Model Control 1. A unifying review and some new results. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* **21**, 308–323.

- Geng, Guang e G. M. Geary (1993). On performance and tuning of PID controllers in HVAC systems. In: *Proc. of 2nd IEEE Conference on Control Applications*. Vol. 2. pp. 819–824.
- Georgiev, Z. (2006). Benchmarking of HVAC control systems. In: *Proc. of the IFAC Workshop on Energy Saving Control in Plants and Buildings*. Bansko, Bulgaria.
- Gouda, M. M., S. Danaher e C. P. Underwood (2001). Thermal comfort based fuzzy logic controller. *Building Service Engineering Research and Technology* **22**(4), 237–253.
- Grimble, M. J. e A. W. Ordys (2001). Predictive control for industrial applications. *Annual Reviews in Control* **25**, 13–24.
- Hadjiski, M., N. Deliiski e K. Boshnakov (2006). Thermal comfort-based MPC of air handling unit. In: *Proc. of the IFAC Workshop on Energy Saving Control in Plants and Buildings*. Bansko, Bulgaria.
- Halil, T., O. Farhi e Y. Chervenkov (2006). Embedded fuzzy controller for adaptive heating system control. In: *Proc. of the IFAC Workshop on Energy Saving Control in Plants and Buildings*. Bansko, Bulgaria.
- Hamdi, M. e G. Lachiver (1998). A fuzzy control system based on the human sensation of thermal comfort. In: *Proc. of IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. United States. pp. 487–492.
- Houghten, F. C. e C. P. Yaglou (1923). Determining lines of equal comfort. *ASHVE Transaction* **29**(4), 163–176.
- Huang, S. e R. M. Nelson (1991). A PID-law-combining fuzzy controller for HVAC application. *ASHRAE Transactions*.
- Huang, Y. e N. Li (2006). Indoor thermal comfort control research based on adaptive fuzzy strategy. In: *Proc. of the IMACS Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications*. Beijing, China. pp. 1969–1972.
- IEA (2003). International Energy Agency - Annex 43 - Testing and Validation of Building Energy Simulation Tools. Technical report. Golden, Colorado, USA.
- Ingimundarson, A. e T. Hagglund (2000). Robust automatic tuning of an industrial PI controller for dead-time systems. In: *IFAC Workshop on Digital Control - Past, present, and future of PID Control*. Terrassa, Spain.
- INNOVA, AirTech Instruments (2003). Thermal comfort. DK-2750 Ballerup, Denmark. <http://www.innova.dk>.
- ISO, 7730 (1984). *Moderate Thermal Environments - Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort*.
- Kang, J., Y. Kim, H. Kim, J. Jeong e S. Park (1997). Comfort sensing system for indoor environment. In: *Proc. of the International Conference on Solid State Sensors and Actuators*. Chicago, USA.

- Keyser, R. M. e A. R. V. Cuawenberghe (1985). Extended prediction self-adaptive control. In: *IFAC Symp. on Identification and System Parameter Estimation*. pp. 1317–1322.
- Kon, A. (1994). Thermal comfort sensor. In: *Proc. of the 10th Instrumentation and Measurement Technology Conference*. pp. 454–456.
- Kouvaritakis, B. e M. Cannon (2001). *Nonlinear Predictive Control: Theory and Practice*. 1 ed.. Institution Electrical Engineers.
- Levine, W. S. (1996). *The Control Handbook*. CRC Press.
- Liang, J. e R. Du (2005). Thermal comfort control based on neural network for HVAC application. In: *Proc. of the 2005 Conference on Control Applications*. IEEE. Toronto, Canada. pp. 819–824.
- Ljung, L. (1999). *System Identification: Theory for the user*. 2 ed.. Prentice Hall, Inc.
- Mathews, E. H., C. P. Botha, D. C. Arndt e A. Malan (2001). HVAC control strategies to enhance comfort and minimise energy usage. *Energy and Buildings* **33**, 853–863(11).
- Mendes, N., R. C. L. F. Oliveira e G. H. Santos (2005). Energy efficiency and thermal comfort analysis using the powerdomus hygrothermal simulation tool.. Vol. 1. pp. 9–16.
- Morari, M. e E. Zafiriou (1989). *Robust Process Control*. Prentice Hall Inc.
- Morari, M. (1994). Model predictive control : A multivariable control technique of choice in the 1990's ?. In: *Advances in Model Based Predictive Control* (D. W. Clarke, Ed.). pp. 22–37. Oxford University Press.
- Muzi, G., G. Abbritti, M. P. Accattoli e M. dell'Omo (1998). Prevalence of irritative symptoms in a nonproblem air-conditioned office building. *Arch. Occup. Environ. Health* (71), 372–378.
- Nesler, C. G. (1986). Adaptive control of thermal processes in buildings. *IEEE Control Systems Magazine* **4**, 9–13.
- Normey-Rico, J. E. e E. F. Camacho (2007). *Control of Dead-time Processes*. 1 ed.. Springer.
- O'Dwyer, A. (2006). *Handbook of PI And PID Controller Tuning Rules*. 2 ed.. Imperial College Press.
- Oliveira, G. H. C., H. X. Araújo, L. S. Coelho e N. Mendes (2003). Using fuzzy logic in heating control systems. In: *Proc. of the 6-th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*. Vol. 1. Hawaii, USA. pp. 1–6.
- Oliveira, G. H. C., R. J. G. B. Campello e W. C. Amaral (2007). Identificação e controle de processos via desenvolvimentos em séries ortonormais. Parte B: controle preditivo. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica* **18**(3), 322 – 336.
- Oliveira, G. H. C., W. C. Amaral e G. Favier (1999). Adaptive predictive controller using orthonormal series functions. *Applied Mathematics and Computer Science* **9**(1), 175–192.

- Oliveira, G. H. C. (1997). Controle Preditivo para Processos com Incertezas Estruturadas baseado em Séries de Funções Ortonormais. PhD thesis. DCA/FEEC/Unicamp - Brasil.
- Ordys, A. W. e D. W. Clarke (1993). A state-space description for GPC controllers. *Int. J. Systems Science* **24**(9), 1727–1744.
- Qin, S. J. e T. A. Badgwell (2003). A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice* **11**(7), 733–764.
- Raffenel, Y., E. Blanco, J. Virgone, P. Neveux, G. Scorletti e G. Thomas (2008). Reducing the energy consumption of space heating in buildings: design of an optimal controller. In: *Proc. of the 17th IFAC World Congress*. Seoul, Korea. pp. 11098–11105.
- Richalet, J., A. Rault, J. L. Testud e J. Papon (1978). Model predictive heuristic control: Applications to industrial process. *Automatica* **14**(5), 413–428.
- Rivera, D. E., M. Morari e S. Skogestad (1986). Internal Model Control 4. PID controller design. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* **25**, 252–265.
- Rohles, F. H., R. B. Hayter e G. Milliken (1975). Effective temperature (ET*) as a predictor of thermal comfort. *ASHRAE Transactions* **81**(2), 148–156.
- Rossiter, J. A. (2003). *Model-Based Predictive Control: A Practical Approach*. 1 ed.. Crc Press.
- Salsbury, T. I. (2006). Control performance assessment for building automation systems. In: *Proc. of the IFAC Workshop on Energy Saving Control in Plants and Buildings*. Bansko, Bulgaria.
- Scokaert, P. O. M. e D. W. Clarke (1994). Stabilising properties of constrained predictive control. *IEE Proceedings - Control Theory and Applications* **141**(5), 295–304.
- Scokaert, P. O. M. (1994). Constrained Predictive Control. PhD thesis. University of Oxford - England.
- Seem, J. E. (1998). A new pattern recognition adaptive controller with application to HVAC systems. *Automatica* **34**(8), 969–982.
- Sherman, M. (1985). A simplified model of thermal comfort. *Energy and Buildings* **8**, 37–50.
- Smith, O. J. M. (1957). Closed control of loops with dead-time.. In: *Chemical Engineering Progress*. Vol. 53. pp. 217–219.
- Trebien, R., N. Mendes e G. H. C. Oliveira (2006). Análise do modelo de fanger (PMV) para desenvolvimento de sistemas de controle. In: *Proc. of 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT'06)*. Curitiba, Brazil.
- Trebien, R., N. Mendes e G. H. C. Oliveira (2007a). Análise de sensibilidade do índice PMV e regiões de conforto térmico visando o aperfeiçoamento de controladores para sistemas de climatização. *Revista Ambiente Construído*.

- Trebien, R., N. Mendes e G. H. C. Oliveira (2007b). Thermal comfort sensor for HVAC systems control. In: *Proc. of 19th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM'07)*. Brasília, Brazil.
- Túrcio, W. H. L. e A. H. Neto (2003). A PMV control strategy model for aircraft air conditioning system. In: *Proc. of the 17th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM'03)*. ABCM. São Paulo, SP.
- Ydstie, B. E. (1984). Extended horizon adaptive control. In: *Proc. of 9th IFAC World Congress*. Budapest/Hungria.
- Yonezawa, K., F. Yamada, Y. Wada e Y. Hanada (2000). Comfort air-conditioning control for building energy-saving. In: *Proc. of the 26th IEEE Industrial Electronics Society Conference*. Vol. 3. pp. 1737–1742.
- Ziegler, J. G. e N. B. Nichols (1942). Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of the ASME* **12**, 759.

Apêndices

1) **Real-Time Implementation of PID-Based Thermal Comfort Control Algorithms.** Artigo publicado no 19º congresso internacional de engenharia mecânica (COBEM'07).

2) **Algoritmos PMV-MBPC para Conforto Térmico em Edificações: Aplicação em uma Célula-Teste.** Artigo aceito para publicação no 17º congresso brasileiro de automática (CBA'08).

REAL-TIME IMPLEMENTATION OF PID-BASED THERMAL COMFORT CONTROL ALGORITHMS

Emerson Donaisky, alm_eber@yahoo.com.br

Gustavo H. C. Oliveira, gustavo.oliveira@pucpr.br

Industrial and System Engineering Graduate Program (PPGEPS)
Pontifical Catholic University of Paraná (PUCPR)
Rua Imaculada Conceição, 1155 Curitiba - PR, 80.215-901 - Brazil

Nathan Mendes, nathan.mendes@pucpr.br

Mechanical Engineering Graduate Program (PPGEM)
Pontifical Catholic University of Paraná (PUCPR)

Abstract. *The present paper is focused on thermal comfort control for building occupants. Thermal comfort is a concept difficult to define and, here, the PMV index is used for such measurement. Based on such index, two strategies are proposed and compared. The first one includes the PMV model in the feedback loop, acting as a PMV sensor. The second is based on generating a temperature set-point signal that optimizes the building (single zone) internal PMV value. Both control loops analyzed are implemented by using PID control laws. An actual environment set-up and a heater device for testing such strategies are presented and experimental results illustrate the performance of the thermal comfort control strategies.*

Keywords: *Thermal Comfort, PMV Control, HVAC, Optimization, PID Control*

1. INTRODUCTION

Energy efficiency in buildings is nowadays an important issue due to the growth of energy costs, energy consumption and environmental impacts. However, there is a trade-off between energy consumption and indoor thermal comfort, which relevance has progressively attracted the attention of industrial and academical research since early 70's. In fact, people spend most of their lifetime in indoor environments and the lack of indoor comfort has a direct effect on their productivity and satisfaction. Therefore, the aim is to save energy while maintaining the occupants' thermal comfort.

A relevant problem in such context is the case where a single HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning System) device, for instance, an heater or an air conditioning system is present. That is, the case where it is not possible to act independently on two indoor psychometric variables.

On the other hand, thermal comfort in buildings is a concept difficult to define. Over the last decades, a large number of thermal comfort indices have been established for indoor climate analysis and HVAC control system design (Fanger, 1970, Sherman, 1985, Gagge *et al.*, 1986, ASHRAE, 1993). Fanger, in (Fanger, 1970), proposed a criterion that is not only based on temperature and Relative Humidity (RH), but also includes mean radiant temperature, air velocity and individual factors such as metabolism rate and thermal resistance of clothing. An index based on all these variables, the PMV (Predicted Mean Vote), is obtained and the closer to zero is the PMV value, the better will be the occupants' thermal comfort sensation.

A majority of HVAC control systems are still considered as temperature control problems, but there are some solutions proposed in the literature that search to improve the building occupants' thermal comfort. These approaches can be divided into two groups: the ones that deal with temperature signal (eventually, also RH) and those that use the PMV concept.

Some works related to the first approach are recalled in the following. In (Dumur and Boucher, 1994), a strategy to anticipate future changes on the temperature set-point value is proposed in order to keep this signal as close as possible to the set-point. This strategy, first tested in PID's is then proposed in a GPC (Generalized Predictive Control) environment. Usually for the thermal comfort sensation, it might be enough just setting a temperature band value instead of having a temperature regulation control in a precise preset value (Fanger, 1970). By using a fuzzy logic type control law, this characteristic is then used in (Oliveira *et al.*, 2003) by modifying the controller membership functions to include such a band. In (Freire *et al.*, 2005, Freire, 2006), this idea is also explored in the predictive control context.

However, not only temperature has to be controlled, but also the indoor RH and the air velocity to promote thermal comfort. An idea in this context is to assume a PMV sensor, that is, the PMV is a measured controlled variable that is part of an ordinary closed-loop structure (see (Kolokotsa *et al.*, 2001), (Gouda *et al.*, 2001) and (Donaisky *et al.*, 2006), for instance). In (Donaisky *et al.*, 2006), two approaches for dealing with PMV control are present, based on PID and Fuzzy control laws. The first one includes the PMV model in the feedback

loop, acting as a PMV sensor, while the second one is based on generating a temperature set-point signal that optimizes the building internal PMV value.

The present paper expands the concepts found in (Donaisky *et al.*, 2006) by presenting *i)* an actual environment for testing thermal comfort controllers *ii)* experimental results of PMV feedback control and optimal set-point generation for thermal comfort control.

The paper is organized as follows. In the next section, concepts related to thermal comfort are reviewed. In Section 3, the first proposed PID controller is presented. Section 4 shows the methodology for set-point generation for PID controllers. In Section 5, the environmental set-up and the experimental results are presented. These results are conducted in the city of Almirante Tamandaré, Paraná, Brazil. Finally, in Section 6, the conclusions are addressed.

2. THERMAL COMFORT

Definition and control of indoor conditions for reaching thermal comfort in buildings are difficult to be established. Thermal satisfaction depends on many parameters - due to all sensible and latent conductive, advective and radiative heat transfer processes that govern the thermodynamic state of occupants' bodies - so that research works on thermal comfort have been conducted and some comfort indices have been proposed over the last decades.

Among the thermal comfort indices presented in academic researches, the most recognized one is the PMV. This index (PMV), is based on a theoretical model combined with the results from experiments with approximately 1300 individuals (Fanger, 1970), and is given by:

$$\begin{aligned} PMV &= F(T_{bs}, T_{cl}, T_{rm}, h_c, f_{cl}, M, W, p_V) \\ PMV &= (0.303e^{-0.036M} + 0.028)\{(M - W) - 3.05 \times 10^{-3}[5733 - 6.99(M - W) - p_V]\} \\ &\quad - 0.42[(M - W) - 58.15] - [1.7 \times 10^{-5}M(5867 - p_V)] - [0.0014M(34 - T_{bs})] \\ &\quad - \{3.69 \times 10^{-8}f_{cl}[(T_{cl} + 273)^4 - (T_{rm} + 273)^4]\} - [f_{cl}h_c(T_{cl} - T_{bs})] \end{aligned} \quad (1)$$

where T_{bs} is the dry-bulb temperature ($^{\circ}C$) or just indoor air temperature, T_{cl} is the clothing surface temperature ($^{\circ}C$), T_{rm} is the mean radiant temperature ($^{\circ}C$), h_c is the convective heat transfer coefficient (W/m^2K) that is calculated as shown by Eq. (2) when the air velocity $v \leq 2.6 m/s$.

$$h_c = 10.4\sqrt{v}, \text{ for } v < 2.6m/s \quad (2)$$

f_{cl} is the clothing area factor, that is the ratio between the surface area of a clothed body and the surface area of the naked body. f_{cl} is a function of I_{cl} , the clothing index. M is the metabolic rate, the rate of transformation of chemical energy into heat and mechanical work by aerobic and anaerobic activities within the body (W/m^2) and W is the effective mechanical power (W/m^2).

The vapor pressure and humidity ratio are correlated as follows:

$$w = 0.622 \frac{p_V}{p_T - p_V} \quad (3)$$

where p_T is the local barometric pressure. The term p_V can be defined as partial vapor pressure (kPa) and is related to the dry-bulb temperature T_{bs} and RH ϕ (%) as follows:

$$p_V = \phi P_{SAT}(T_{bs}) \quad (4)$$

where the water vapor saturation pressure function P_{SAT} is defined, for instance, in (ASHRAE, 1993). The term T_{cl} can be computed iteratively by using thermal resistance of the clothing (I_{cl}) and the following equation:

$$T_{cl} = 35.7 - 0.032M - 0.18I_{cl}(3.4f_{cl} \times ((T_{cl} + 273)^4 - (T_{rm} + 273)^4) + f_{cl}h_c(T_{cl} - T_{bs})) \quad (5)$$

Therefore, combining Eqs. (1) to (5), the PMV index can be written as a function of four environmental variables (temperature: T_{bs} , RH: ϕ , mean radiant temperature: T_{rm} and air velocity: v) and two individual parameters (metabolic rate: M and clothing index: I_{cl}), as follows:

$$PMV = G(T_{bs}, \phi, T_{rm}, v, M, I_{cl}) \quad (6)$$

Table 1 shows the relationship between PMV and thermal sensation, together with the PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) value. In 1994, the PMV formulae was included in ISO Standard 7730 and a PMV bounds $[-0.5, +0.5]$ has been established as acceptable for thermal comfort in air-conditioned environments.

Table 1. Relationship between PMV, PPD and thermal sensation.

| PMV | Thermal sensation | PPD (%) |
|-----|-------------------|---------|
| +3 | Hot | 100 |
| +2 | Warm | 75 |
| +1 | Slightly warm | 25 |
| 0 | Neutral | 5 |
| -1 | Slightly cool | 25 |
| -2 | Cool | 75 |
| -3 | Cold | 100 |

3. PMV FEEDBACK FOR THERMAL COMFORT CONTROL

The idea of using PMV model in PID control loops is summarized by Fig. 1, which contains the system's block diagram.

In this figure, the control law acts on the PMV error, computed as the difference between the ideal PMV value, i.e. PMV equal to zero and the measured one. As discussed in the previous section, the PMV is computed based on individual and environmental parameters. Therefore, for such calculations, the individual parameters are assumed supplied by the user, depending on the occupants pattern of activity and clothing. Three of the four environmental parameters are measured by temperature, RH and air velocity sensors; and the fourth, i.e., the mean radiant temperature, is set equal to the measured air temperature. The subject of sensing PMV for control purposes is discussed in (Trebien *et al.*, 2006, Trebien *et al.*, 2007).

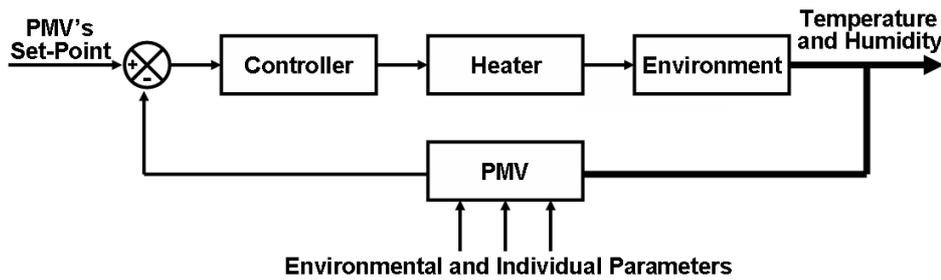


Figure 1. Closed Loop control using PMV feedback.

In the present paper, the control law is based on the well know PID algorithm (Astrom and Hagglund, 1995). The discrete time version of such algorithm, by using backward approximation is given by:

$$U(z) = \frac{c_0 z^2 + c_1 z + c_2}{z(z-1)} E(z) \quad (7)$$

where, c_0 , c_1 and c_2 are given by:

$$\begin{aligned} c_0 &= K_p + K_d/\Delta t, \\ c_1 &= -K_p + K_i \Delta t - 2K_d/\Delta t \text{ and} \\ c_2 &= K_d/\Delta t, \end{aligned}$$

and Δt is the sampling period, K_p the proportional gain, K_i the integral gain and K_d the derivative gain of the continuous PID. The signal $e(k)$, i.e., the inverse Z-transform of $E(z)$, is the PMV error, which is given by:

$$e(k) = -y_{PMV}(k) \quad (8)$$

since the desired PMV value is considered equal to zero; $y_{PMV}(k)$ is the PMV computed at the discrete time instant k .

4. OPTIMAL TEMPERATURE SET-POINT COMPUTATION FOR THERMAL COMFORT CONTROL

The idea of using a temperature control loop, based on PMV optimization by temperature set-point, is summarized by Fig. 2, which contains the system's block diagram.

In Fig. 2, the control law acts on the temperature error, computed as the difference between the set-point temperature value and the measured temperature, as a standard temperature feedback control. The main point

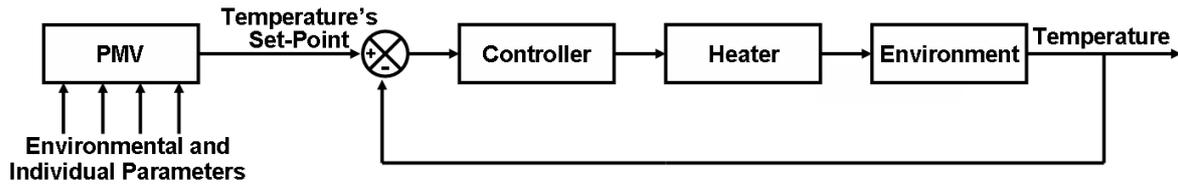


Figure 2. Closed Loop control using optimal set-point generation.

of this approach is that the set-point is not constant, but computed at each sampling time k in order to optimize the PMV environment conditions. This is explained in following. At each instant k , based on the individual parameters supplied by the user and on the temperature, RH and air velocity measurements (as before, the mean radiant temperature is assumed equal to the actual temperature), the optimizer computes the temperature value that would minimize the PMV value for the supplied individual and environmental conditions. Such value is used as temperature set-point. In other words, the following non-linear programming problem is solved at each sampling time:

$$\min_{T_{bs}} G^2(T_{bs}, \phi, T_{bs}, v, M, I_{cl}) \quad (9)$$

where $G(\cdot)$ is given by Eq. 6. This minimization problem is a non-linear unconstrained optimization problem with one variable, which can be solved by an algorithm like the Golden Section Method (Bazaraa and Shetty, 1979).

The control law can be based on the PID algorithm (Astrom and Hagglund, 1995), as presented in the previous section.

5. EXPERIMENTAL EXAMPLES

In this section the performance of the thermal comfort based control systems considered in the previous sections are analyzed. Therefore, the problem of heating an indoor environment to promote the best possible thermal comfort sensation for the occupants is addressed. The environment set-up and the models for internal temperature and RH are described in the next sub-sections, followed by the presentation of some experimental results related to the control law performances.

5.1 Building and environmental set-up

The environment for testing the thermal comfort controller is a single-zone building possessing the physical dimensions presented in Fig. 3. The building is constructed using materials typically found in Brazil. Inside the thermal zone, there is only one actuator HVAC device, in this case, an oil-heater with the maximum power limited to 1500W.

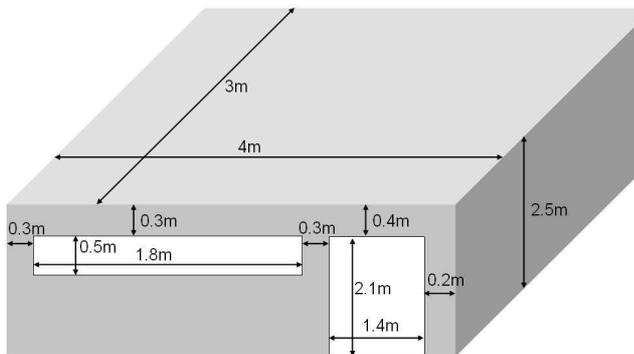


Figure 3. Building dimensions.

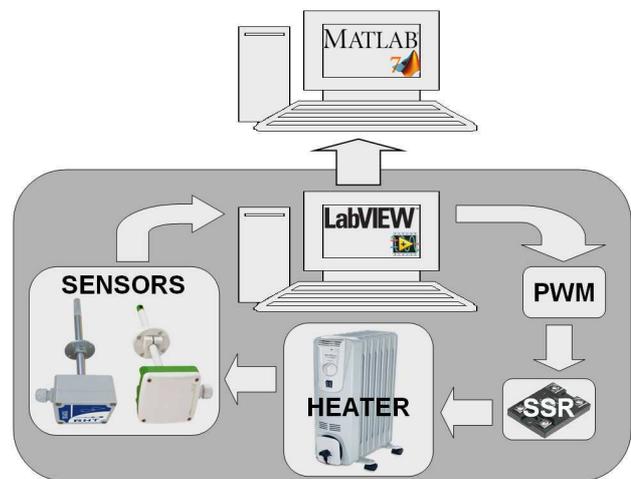


Figure 4. Control loop.

The real-time control implementation is illustrated by Figs 4 and 5. A sensor RHT-DM, made by Novus company, provides measurements for the air temperature and RH, while a sensor EE66, made by Elektronik

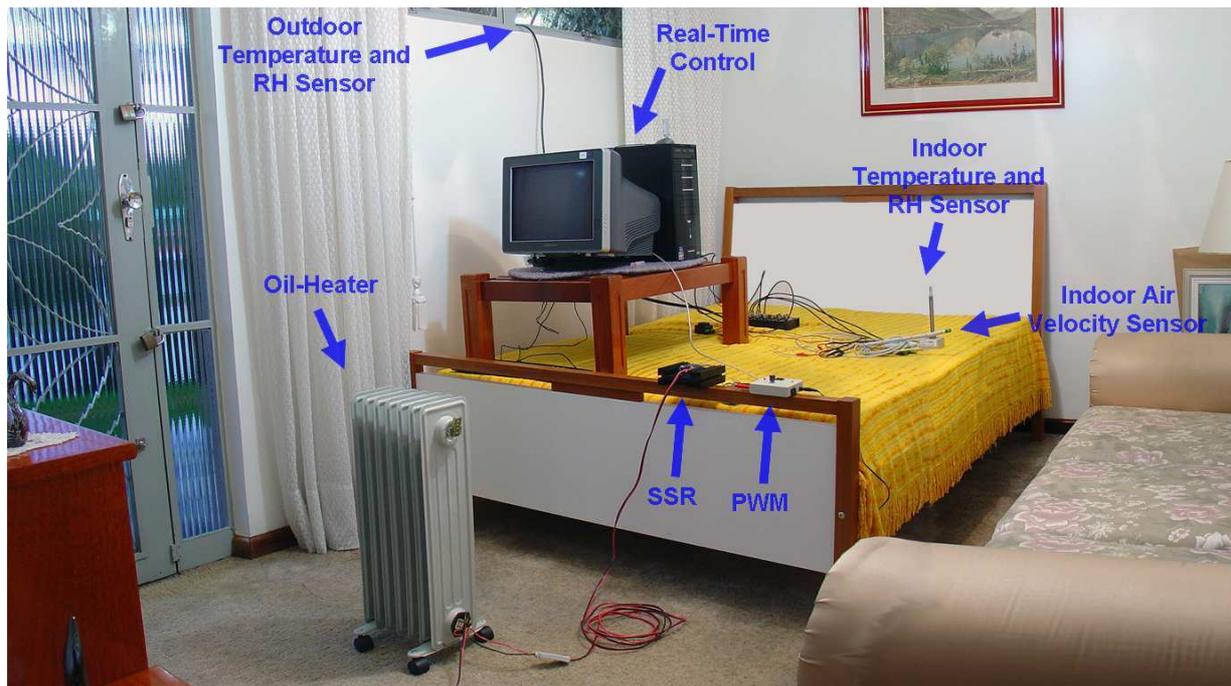


Figure 5. Environmental set-up.

company, measures the air speed. They are used for data acquisition purpose in a LabView's based control loop (NI PCI-6251 hardware). A real-time software, using a sampling time of 20 seconds, makes the PMV calculations based also on the user supplied individual parameters and computes the control law. The computed control signal is modeled by a PWM (Pulse Width Modulation) circuit which acts on a SSR (Solid State Relay) device before reaching the oil heater.

For selecting the PID control parameters, a system identification procedure is performed. By using the system step responses (i.e., by applying a step in the heater power and by measuring the temperature and RH responses) two FOPDT (First-Order Plus Dead-Time) models (Bi *et al.*, 1999) can be obtained. The identified models are given by:

$$H_{Temp}(s) = \frac{5.29e^{140s}}{7820s + 1} \quad (10)$$

$$H_{Humi}(s) = \frac{-0.116e^{160s}}{7700s + 1} \quad (11)$$

where $H_{Temp}(s)$ is the transfer function of the temperature signal in relation to the heater input and $H_{Humi}(s)$ is the transfer function of the RH signal in relation to the heater input. The actual system step response data are presented in the Fig. 6 together with the simulation of the identified models.

Following, the real-time performance of the controllers described in Sections 3 and 4 are present. The experiments were performed in Almirante Tamandaré - Paraná - Brazil during the nights of April 12 and 13, 2007. Figure 7 shows the outdoor temperature and RH values for those two nights.

5.2 Case 1: PMV feedback for thermal comfort PID control

In this section, the case of a PID controller with PMV feedback, presented in Sec. 3, is analyzed.

Here, it is assumed, for the PMV computations, a metabolic rate equal to $M = 58.15 \text{ W/m}^2$ ($M = 1 \text{ Met}$) and the clothing index equal to $I_{CL} = 0.1163 \text{ m}^2\text{K/W}$ ($I_{CL} = 0.75 \text{ Clo}$). This is equivalent to consider a seated or person relaxed with light clothes.

For the PID parameters selection, i.e. K_p , K_i and K_d , the PSO (Particle Swarm Optimization) method (Kennedy and Eberhardt, 1995, Donaisky and Coelho, 2006) is applied, in a similar procedure as the one described in (Donaisky *et al.*, 2006).

The PSO is based on simulating the animals social behavior, as bird flocking and fish schooling seeking food or avoiding predators. Thus the individuals of the PSO look for a better problem solution through an information interchange on the search space of better solutions (see more in (Donaisky and Coelho, 2006)).

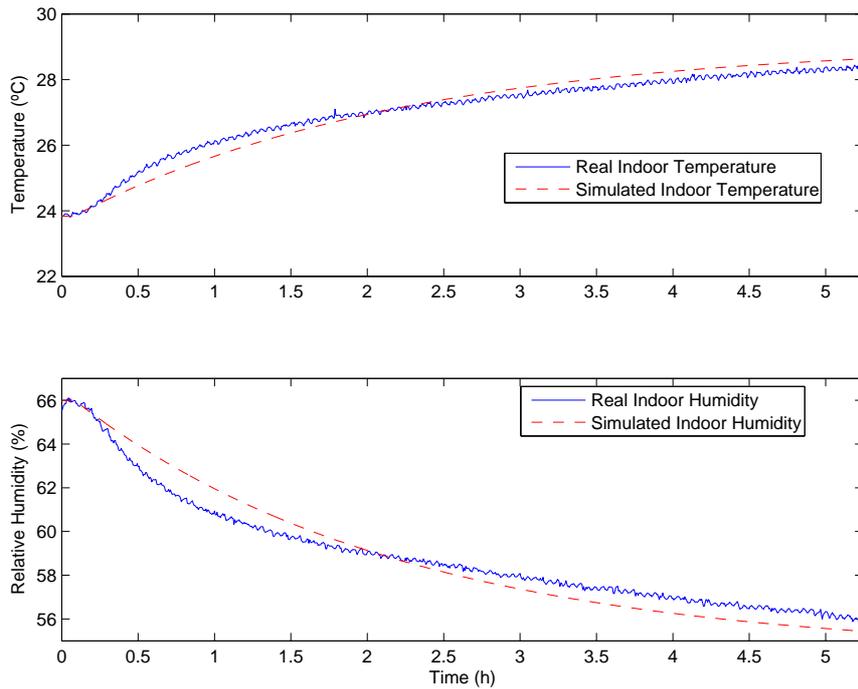


Figure 6. Indoor temperature and RH for identification.

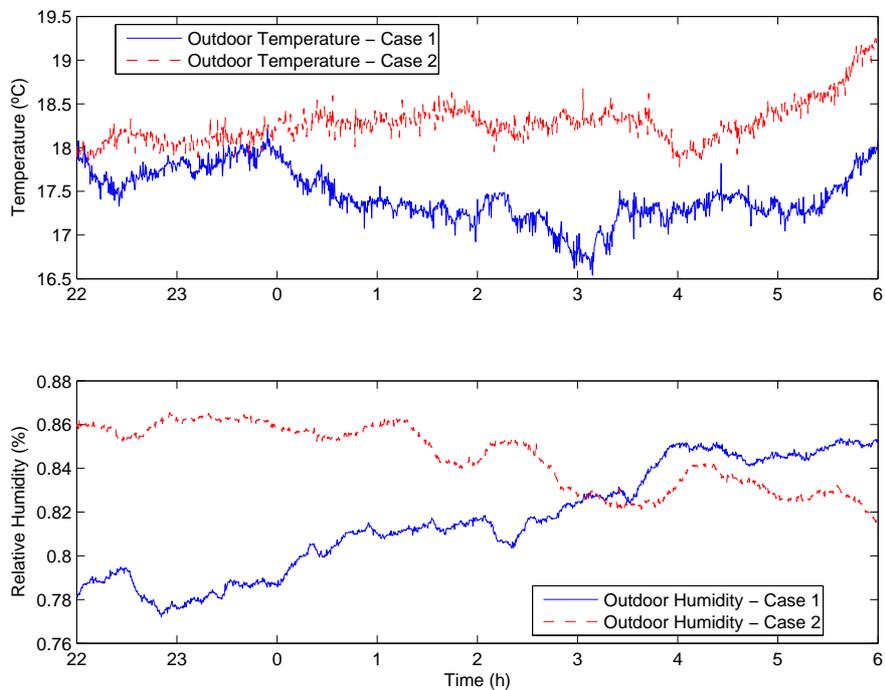


Figure 7. Weather data.

The optimization strategy is based on minimizing, in a simulation environment and for a given PID parameters, the MSE (Mean Square Error) criterion between the output signal (PMV feedback signal) and the set-point signal (equal to zero) by using the identified models. Based on this structure, the PSO iterative algorithm search

the PID parameters that minimizes the system MSE.

The computed parameters K_p , K_i and K_d are 17.9088, 0.0281 and 0, respectively.

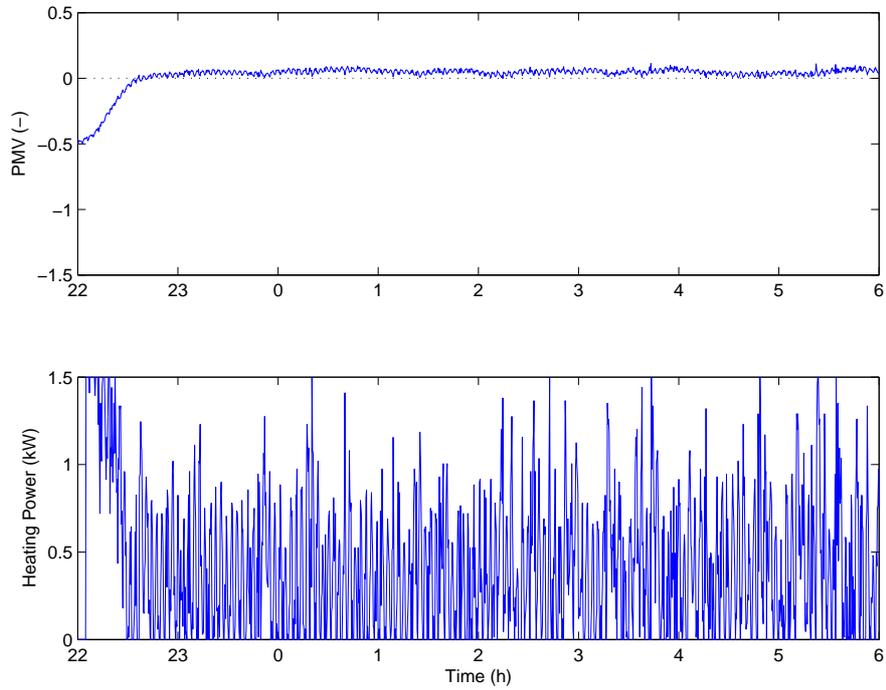


Figure 8. PMV and Control signal for PID controller with PMV feedback.

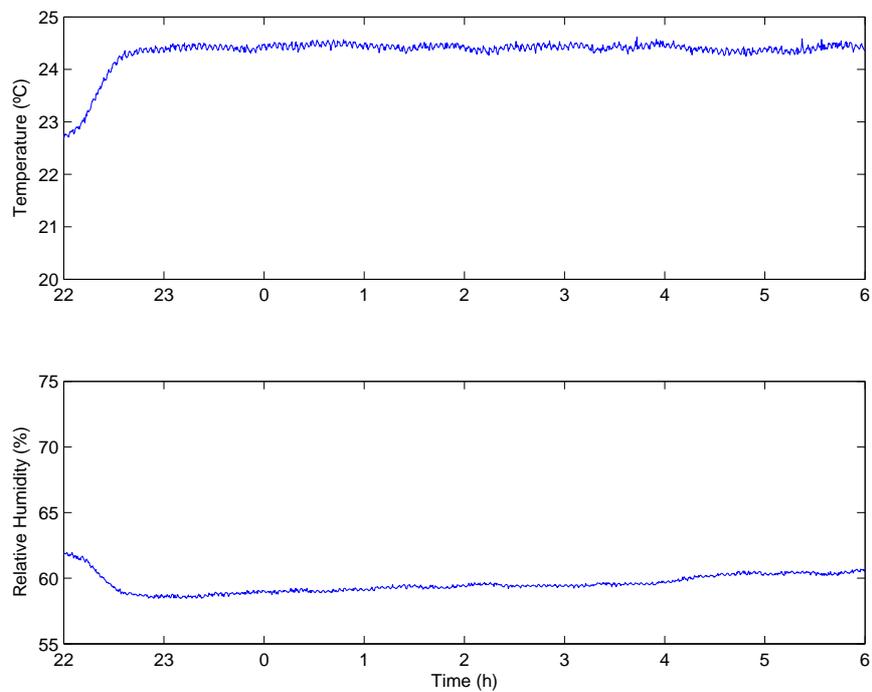


Figure 9. Indoor Temperature and RH for PID controller with PMV feedback.

The real time experiments was conducted during eight hours and the controller was turned on in the first

five minutes of such period. The performance of this PID control system is presented in Figs. 8 and 9.

As it can be seen in Fig. 8, the applied control strategy is successful in maintaining the PMV value close to zero during the experiments, which indicates that the indoor thermal comfort sensation is adequate assuming occupants having the pre-defined behavior. Figure 9 shows the indoor hygrothermal conditions during the experiments. The mean square error between the PMV signal and the desired one, computed between 0 and 6 am, is 0.0028. The total energy consumption was 209.92kWh. During the transient state, the rate of improving the PMV towards to zero is 0.000256 PMV/seconds or close to 1 PMV/hour.

5.3 Case 2: Optimal temperature set-point for thermal comfort PID control

In this section, the case of a PID controller with optimal set-point generation for promoting thermal comfort, presented in Sec. 4, is analyzed.

For the internal loop PID parameters selection, the PSO optimization algorithm is applied. The computed parameters K_p , K_i and K_d are 9.0114, 0.0235 and 0, respectively.

The PMV computations assume that the individual parameters are the same as the ones described in Case 1. Moreover, the golden section method is used for the non-linear optimization. The method proved to be fast enough to find an optimal set-point value at each sampling time, i.e., 20 seconds.

The experiment was conducted during eight hours and the controller is turned on in the first five minutes of such period. The performance of this PID control system is presented in Figs. 10 and 11.

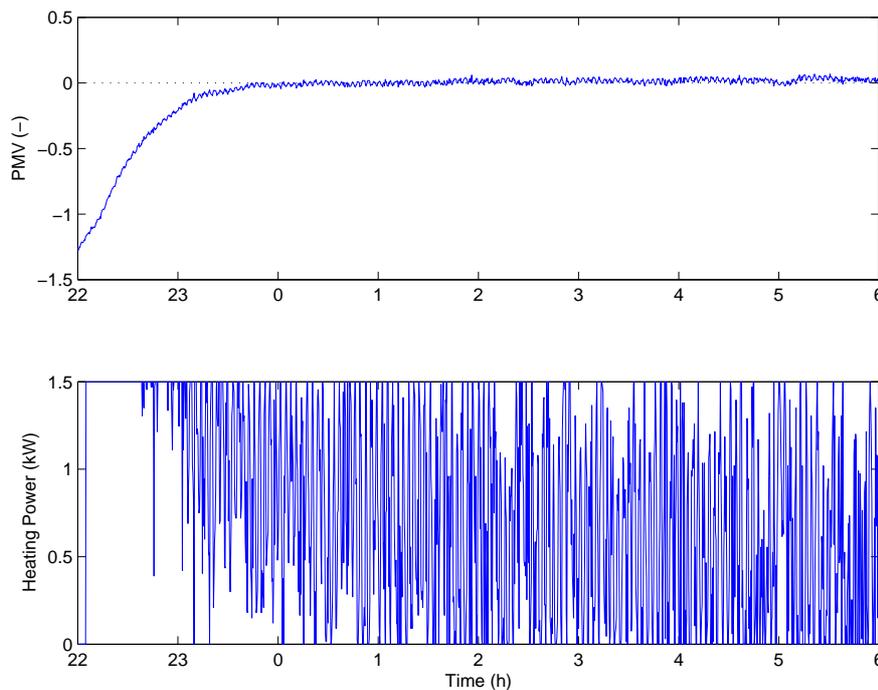


Figure 10. PMV and Control signal for PID controller with Temperature feedback.

As it can be seen in Fig. 10 the applied control strategy is successful in maintaining the PMV value close to zero during the experiments, which indicates that the indoor thermal comfort sensation is adequate assuming occupants having the pre-defined behavior. Figure 11 illustrates the indoor hygrothermal conditions during the experiments. At the top, it can be noticed the set-point generated by the PMV optimizer together with the actual indoor temperature signal. The mean square error between the PMV signal and the desired one, computed between 0 and 6 am, is 0.0005. The total energy consumption was 379.11kWh. During the transient state, the rate of improving the PMV towards to zero is 0.000276 PMV/seconds or close to 1 PMV/hour as in Case 1.

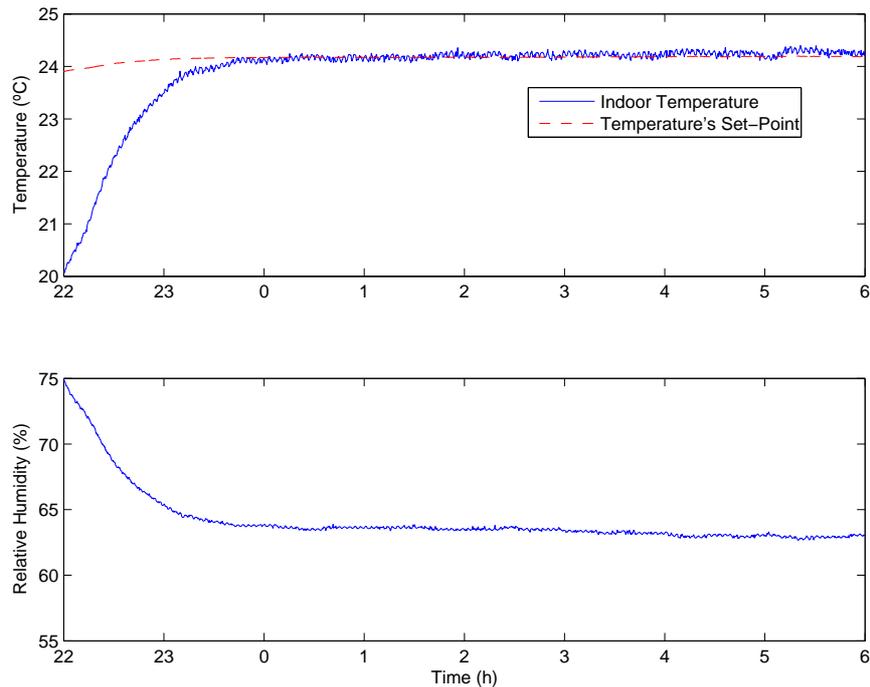


Figure 11. Indoor Temperature and RH for PID controller with Temperature feedback.

6. CONCLUSION

In this paper, the indoor thermal comfort control problem in buildings (single zone) equipped with a single HVAC device has been analyzed. Two control strategies, based on the PID control law, for indoor thermal comfort optimization focused on the PMV index have been presented. Both strategies use explicit PMV computations in the control loop.

In the first case, PMV computation have been made in the feedback of control loop, acting as a PMV sensor. In the second case, PMV model has been used for generating an optimal value for the set-point in an ordinary temperature closed-loop control.

An experimental set-up for thermal comfort real-time controller evaluation was presented. It is based on measuring the environmental relevant variables, a HVAC device and on a hardware for real-time control implementation.

The closed-loop control results, based on PID algorithms optimized by using the PSO method, show that both schemes were able to promote indoor thermal comfort, assuming that the individual parameters supplied by the user were not too far from the reality (see more details in (Trebien *et al.*, 2007)). The numerical results demonstrate that the closed loop performance of the controllers was adequate. By looking at the performance results of both control systems with the 1.5kW oil-heater, the PMV feedback strategy presented a slightly worst regulation performance, but consumed less energy. Both presented a similar set-point tracking performance and can improve the indoor PMV at a rate of 1 PMV per hour.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by FINEP, from Secretary for Science and Technology of Brazil, grant 01.05.1064.00 reference 2460/05.

8. REFERENCES

- ASHRAE, 1993, ASHRAE Fundamentals, Chap. 8, Atlanta, GA.
- Astrom, K. J. and Hagglund, T., 1995, "PID Controllers: Theory, Design and Tuning", ISA Press, 2 edition.
- Bazaraa, M. S. and Shetty, C. M., 1979, "Nonlinear Programming", John Wiley & Sons, Inc.
- Bi, Q., Cai, W., Lee, E., Wang, Q., Hang, C. and Zhang, Y., 1999, Robust Identification of First-Order plus

- Dead-time Model from Step Response, "Control Engineering Practice", Vol. 7, pp. 71–77.
- Donaisky, E. and Coelho, L. S., 2006, Planejamento de Trajetória em Robótica Móvel Baseada em uma Abordagem de Otimização da Inteligência Coletiva, "Proc. of VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais (INDUSCON'06)", Recife, Brazil.
- Donaisky, E., Reginato, B. C., Mendes, N. and Oliveira, G. H. C., 2006, Estratégias Para Controle de Conforto Térmico Baseadas em Algoritmos PI e Fuzzy, "Proc. of 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT'06)", Curitiba, Brazil.
- Dumur, D. and Boucher, P., 1994, Predictive Control Application in the Machine-tool Field, Clarke, D. W., editor, "Advances in Model Based Predictive Control", pp. 498–515. Oxford University Press.
- Fanger, P. O., 1970, "Thermal Comfort", McGraw-Hill Inc., New York, USA.
- Freire, R. Z., Oliveira, G. H. C. and Mendes, N., 2005, Thermal Comfort Based Predictive Controllers for Building Heating Systems, "Proc. of the 16th IFAC World Congress (IFAC'05)", Prague, Czech Republic.
- Freire, R. Z., 2006, Técnicas Avançadas de Controle Aplicadas a Sistemas de Climatização Visando Conforto Térmico, Master's thesis, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.
- Gage, A. P., Fobelets, A. P. and Berlund, L. G., 1986, A standard predictive index of human response to the thermal environment, "ASHRAE Transactions", Vol. 92, pp. 709–731.
- Gouda, M. M., Danaher, S. and Underwood, C. P., 2001, Thermal Comfort Based Fuzzy Logic Controller, "Building Serv. Eng. Res. Technol.", Vol. 22, No. 4, pp. 237–253.
- Kennedy, J. F. and Eberhardt, R. C., 1995, Particle Swarm Optimization, "Proc. of IEEE International Conference on Neural Networks", Perth, Australia.
- Kolokotsa, D., Tsiavos, D., Stavrakakis, G. S., Lalaitzakis, K. and Antonidakis, E., 2001, Advanced fuzzy logic controllers design and evaluation for buildings occupants thermal-visual comfort and indoor air quality satisfaction, "Energy and buildings", Vol. 33, pp. 531–543.
- Oliveira, G. H. C., Araújo, H. X., Coelho, L. S. and Mendes, N., 2003, Using Fuzzy Logic in Heating Control Systems, "Proc. of the 6-th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference", Vol. 1, pp. 1–6, Hawaii, USA.
- Sherman, M., 1985, A simplified model of thermal comfort, "Energy and Buildings", Vol. 8, pp. 37–50.
- Trebién, R., Mendes, N. and Oliveira, G. H. C., 2006, Análise do Modelo de Fanger (PMV) para Desenvolvimento de Sistemas de Controle, "Proc. of 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT'06)", Curitiba, Brazil.
- Trebién, R., Mendes, N. and Oliveira, G. H. C., 2007, Análise de Sensibilidade do Índice PMV e Regiões de Conforto Térmico Visando o Aperfeiçoamento de Controladores para Sistemas de Climatização, "Revista Ambiente Construído (in press)".

9. Responsibility notice

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper

ALGORITMOS PMV-MBPC PARA CONFORTO TÉRMICO EM EDIFICAÇÕES: APLICAÇÃO EM UMA CÉLULA-TESTE

EMERSON DONAISKY*, GUSTAVO H. C. OLIVEIRA*, NATHAN MENDES*

*PUC-PR: Rua Imaculada Conceição, 1155, Curitiba, Paraná, Brasil

Emails: alm_eber@yahoo.com.br, gustavo.oliveira@pucpr.br, nathan.mendes@pucpr.br

Abstract— The present paper is focused on thermal comfort control problem for building occupants. Thermal comfort is a concept difficult to define and, here, the PMV index is used for such measurement. Based on such index, two predictive control strategies, characterized by having terminal constraints are presented, called here PMV-MBPC. The first thermal comfort control is based on generating a temperature set-point signal that optimizes the building (single zone) internal PMV value. The second includes the PMV model in the controller prediction computations, generating a non-linear PMV model having Wiener structure. Simulation results, conducted with actual climate data, illustrate the performance of the thermal comfort control algorithms. Another environment is implemented in real time using an oil-heater and experimental results illustrate the thermal comfort predictive control performance.

Keywords— Thermal Comfort, PMV, Predictive Control, Optimization

Resumo— Este artigo está voltado ao problema de controle de conforto térmico para ocupantes de edificações. Conforto térmico é um conceito de difícil definição e, neste trabalho, utiliza-se o índice PMV para sua avaliação. Através deste índice, duas estratégias de controle preditivo caracterizadas por ter restrições terminais, denominadas aqui de PMV-MBPC, são apresentadas. Na primeira estratégia a gestão do conforto térmico é realizada através da geração de sinais de referência para o controlador que otimiza o valor de PMV dentro de uma zona térmica da edificação. Na segunda o modelo de PMV está incluso nos cálculos de previsão do controlador, gerando um modelo não-linear com estrutura Wiener. Resultados de simulação, conduzidos com dados climáticos reais, ilustram o desempenho dos algoritmos de controle de conforto térmico. Outro ambiente é implementado em tempo real usando um aquecedor a óleo e resultados experimentais ilustram o desempenho do controle preditivo de conforto térmico.

Palavras-chave— Conforto Térmico, PMV, Controle Preditivo, Otimização

1 Introdução

Eficiência energética em edificações é, hoje em dia, um assunto importante devido ao crescimento dos custos da energia, consumo e dos impactos ambientais correlacionados. Entretanto, existe uma relação entre consumo de energia e conforto térmico em edificações. De fato, as pessoas passam uma parte relevante de suas vidas em ambientes climatizados artificialmente e o desconforto térmico tem efeitos diretos na produtividade e na satisfação de cada indivíduo. O objetivo é, portanto, economizar energia enquanto mantém-se o conforto térmico dos ocupantes.

Por outro lado, conforto térmico em edificações é um conceito de difícil definição, portanto, nas últimas décadas, um grande número de índices de conforto térmico foram estabelecidos para análise de edificações e projetos de sistemas de controle para equipamentos de climatização. Fanger, em (Fanger, 1970), propôs um índice, chamado PMV (*Predicted Mean Vote*), que é baseado em fatores ambientais e individuais. O valor do PMV varia de -3 (sensação de muito frio) a +3 (sensação de muito calor) e quanto mais próximo a zero este valor, melhor será a sensação de conforto térmico dos ocupantes.

Algoritmos de controle para conforto térmico em sistemas de climatização são aqueles que consideram explicitamente na estrutura da lei de controle aspectos relacionados com conforto térmico além da simples realimentação de temperatura. Um exemplo é admitir o PMV como um sinal mensurável e controlável, e incluí-lo como parte da realimentação em uma estrutura de malha-fechada. Alguns exemplos são os traba-

lhos (Kolokotsa et al., 2001) e (Gouda et al., 2001), no contexto de algoritmos de controle PID e *Fuzzy*. Por outro lado, o índice PMV pode ser incluído na função custo para gerar uma lei de controle de conforto térmico baseado nos fundamentos do MBPC (*Model Based Predictive Control*) (Freire et al., 2005; Freire et al., 2008).

No presente artigo, duas estratégias de controle de conforto baseadas no índice PMV e no MBPC (denominadas aqui de PMV-MBPC) são propostas e comparadas. Na primeira, tendo como base uma malha de controle com algoritmo CRHPC (*Constrained Receding Horizon Predictive Control*) (Camacho and Bordons, 1999), o índice PMV é utilizado em uma malha de supervisão para geração de um sinal ótimo de referência. Resultados em tempo real em uma célula-teste de $8m^3$ com condições higrotérmicas externas monitoradas, são apresentados. Na segunda, o algoritmo PMV é incorporado no modelo de previsão formando uma estrutura não-linear do tipo Wiener. O algoritmo de controle resultante é não-linear com restrições terminais ou NCRHPC (*Non-linear CRHPC*). Modelos com bases de funções ortonormais, em particular, as funções de Laguerre (Campello et al., 2007), são utilizados na representação do conjunto sistema de climatização e edificação.

O artigo está organizado como se segue. Na próxima seção, questões de modelagem da edificação são apresentadas. A Seção 3 contém os dois algoritmos PMV-MBPC propostos no presente artigo. Na Seção 4, resultados de simulação são apresentados e, na Seção 5, a estratégia de controle de conforto térmico é aplicada em tempo real. Finalizando, na Seção 6, o

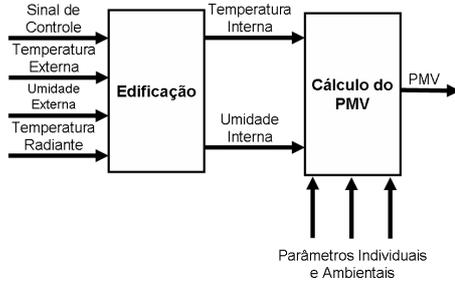


Figura 1: Diagrama de blocos de uma edificação.

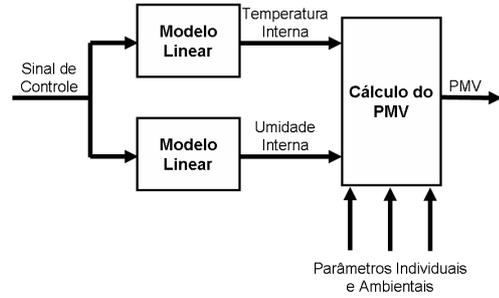


Figura 2: Modelo de PMV não-linear.

artigo é concluído.

2 Detalhes da Edificação e Questões de Modelagem

Uma edificação pode ser vista como um sistema dinâmico multi-variável onde os principais sinais de entrada são o sinal de controle enviado ao equipamento de climatização, a temperatura externa, a umidade relativa externa e a radiação solar total. Os sinais de saída são a temperatura e umidade relativa internas. Embora uma edificação seja um sistema não-linear, principalmente devido à presença da umidade, modelos lineares podem fornecer uma representação adequada. Um sinal de saída relevante, relacionado com este problema, é o sinal de PMV. Esta saída é obtida usando as saídas anteriormente citadas somadas a informações relativas ao ambiente e aos parâmetros individuais, uma vez que o PMV pode ser descrito pelo seguinte mapeamento não linear (Fanger, 1970; Trebien et al., 2007):

$$PMV = G(T, \phi, T_{rm}, V, M, I_{cl}), \quad (1)$$

onde os parâmetros ambientais são a temperatura T , a umidade relativa ϕ , a temperatura radiante média T_{rm} e a velocidade do ar V . Os parâmetros individuais são os índices de atividade física M (Metabolismo) e vestimenta I_{cl} . O diagrama de blocos de todo o sistema é apresentado na Fig. 1. Do ponto de vista da modelagem, dois sistemas são tratados no presente artigo para a síntese da lei de controle em malha-fechada.

O primeiro é um modelo linear relacionando o sinal de controle e o sinal de temperatura interna.

Portanto, uma equação de previsão de temperatura j -passos à frente pode ser construída, e será representada aqui por $y_T(k+j|k)$.

O segundo é um modelo não-linear, estrutura Wiener, relacionando ao sinal de controle e o sinal de PMV, como apresentado na Fig. 2. Quando a velocidade do ar e os parâmetros individuais são assumidos constantes e $T_{rm} = T$, tem-se a equação de previsão:

$$\hat{y}_{PMV}(k+j|k) = G(\hat{y}_T(k+j|k), \hat{y}_\phi(k+j|k), \hat{y}_T(k+j|k), V, M, I_{cl}) \quad (2)$$

Assumir que $T_{rm} = T$ é equivalente dizer que a temperatura média das superfícies das paredes internas são iguais a temperatura interna do ar. Nos dois

modelos, a parte linear é implementada usando funções de Laguerre (ver, por exemplo, (Oliveira et al., 2007; Campello et al., 2007)).

3 Leis de Controle Preditivo para Conforto Térmico

Controladores preditivos baseados em modelo são definidos pelos seguintes passos: *i*) um modelo é usado para computar as previsões de saída do processo; *ii*) uma função custo relacionada com o desempenho do sistema em malha-fechada é definida; *iii*) esta função custo é minimizada em relação ao conjunto de futuros sinais de controle; *iv*) o primeiro destes sinais de controle ótimos é aplicado no processo, *i.e.*, a estratégia horizonte rolante. Neste contexto, uma classe de algoritmos de controle preditivo inclui, na otimização da função custo, restrições nos valores finais da previsão de saída. A principal razão para essas restrições é garantir estabilidade em malha-fechada sem a necessidade de usar horizontes infinitos na função custo.

O presente artigo expande os trabalhos (Freire et al., 2005; Freire et al., 2008), propondo dois algoritmos MBPC para o controle de conforto térmico baseado em PMV (PMV-MBPC). Os algoritmos são caracterizados pelos seguintes pontos: *i*) a entrada do processo é representada por um simples equipamento de climatização (um sinal de controle) e é assumido dois sensores internos, para medir a temperatura e a umidade relativa; *ii*) o índice PMV é considerado para promover conforto térmico aos ocupantes. A principal diferença entre eles é: um método usa um cálculo baseado no PMV para gerar a referência de temperatura para a lei de controle e o outro usa as equações de PMV para obter um modelo não-linear. Estes métodos são apresentados na seqüência.

3.1 MBPC com modelo interno de PMV

Este método é caracterizado por usar um modelo em espaço de estados não linear, com estrutura Wiener, para representar o comportamento do PMV. A função custo deste controlador MBPC é:

$$J_{1,k} = \sum_{j=1}^{N_y} \hat{y}_{PMV}(k+j|k)^2 + \sum_{j=0}^{N_u-1} \lambda \Delta u(k+j|k)^2 \quad (3)$$

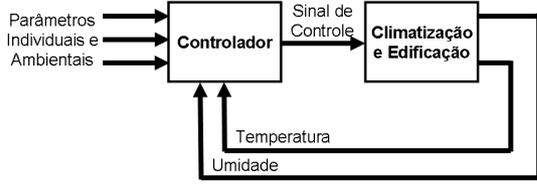


Figura 3: MBPC não-linear com modelo interno de PMV.

onde N_y e N_u definem os horizontes de previsão e de controle, respectivamente; λ é um fator de ponderação no sinal de controle; $\Delta u(k+j|k)$ é o sinal de variação de controle no tempo $k+j$ calculado no tempo k . O sinal de referência é igual a zero visto que, quanto mais próximo de zero estiver o índice PMV, melhor será a sensação térmica. $\hat{y}_{\text{PMV}}(k+j|k)$ é a previsão no instante de tempo $k+j$, usando o modelo Wiener, conforme Eq. 2.

A lei de controle é obtida minimizando a função custo (Eq. 3) em relação a futuras variações no sinal de controle $\Delta u(\cdot)$, sujeito a restrições terminais e do atuador, isto é:

$$\begin{aligned} & \min_{\Delta u(k|k), \Delta u(k+1|k), \dots, \Delta u(k+N_u-1|k)} J_k \\ & \text{sujeito a} \\ & \Delta u(k+j|k) = 0 \quad \forall j = N_u, \dots, N_y \\ & \hat{y}_{\text{PMV}}(k+N_y+j|k) = w \quad \forall j = 1, \dots, m \\ & 0 \leq u(k+j) \leq \bar{u} \quad \forall j = 0, \dots, N_u-1 \end{aligned} \quad (4)$$

com $J_k = J_{1,k}$ e $w = 0$.

Esta função custo define um problema de programação não-linear, com restrições não-lineares. O primeiro conjunto de restrições é relacionado a definição do horizonte de controle, o segundo conjunto implementa as restrições terminais sobre uma janela de restrição m e a terceira assegura a optimalidade da lei de controle na presença de restrições no sinal de entrada, comuns nos equipamentos de climatização (\bar{u} é o valor máximo do sinal de controle). O conjunto ótimo de futuros sinais de controle pode ser obtido usando um algoritmo de Programação Quadrática Sequencial e o sinal de controle ótimo, *i.e.*, $\Delta u(k|k)$, é calculado usando a primeira variação ótima de controle do seguinte modo: $u(k) = u(k-1) + \Delta u(k|k)$. A Fig. 3 ilustra a estratégia.

3.2 MBPC com modelo externo de PMV

Na seqüência, uma estratégia de controle de conforto caracterizada pela presença de uma malha externa que calcula, em tempo real, o valor de temperatura que anulará o índice PMV é apresentada. Este bloco usa informações individuais e ambientais, tais como a umidade relativa medida $y_\phi(k)$, a velocidade do ar V , a taxa metabólica M e o índice de vestimenta I_{cl} para gerar o valor desejado de temperatura, do seguinte modo

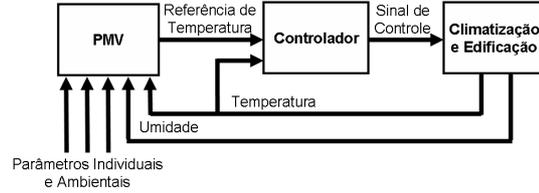


Figura 4: MBPC linear com modelo externo de PMV.

(ver também a Eq. 2):

$$T^*(k) = \arg \min_{T(k)} G(T(k), y_\phi(k), T(k), V, M, I_{\text{cl}})^2$$

sujeito a

$$-3 < G(\cdot) < 3 \quad (5)$$

Este é um problema de otimização não-linear com uma variável e o valor de temperatura interna medida é usado para iniciar o procedimento.

O gerador de referência ótima é usado junto com um algoritmo MBPC linear para controle de temperatura. Isto é, o valor ótimo de temperatura interna calculado pelo uso da Eq. 5 é usado como referência para o controle de temperatura no instante de tempo k . A Fig. 4 ilustra a estratégia completa. Então, a função custo deste controlador MBPC é:

$$J_{2,k} = \sum_{j=1}^{N_y} (\hat{y}_T(k+j|k) - T^*(k))^2 + \sum_{j=0}^{N_u-1} \lambda \Delta u(k+j|k)^2 \quad (6)$$

A lei de controle é obtida minimizando a função custo (Eq. 6), conforme a Eq. 4 e a estratégia do horizonte rolante, sendo $J_k = J_{2,k}$ e $w = T^*(k)$. Tal otimização, sem limitações do atuador, tem solução analítica (ver (Camacho and Bordons, 1999)). No caso com restrições, uma solução numérica pode ser obtida usando um algoritmo de programação quadrática.

4 Resultados de Simulação

Nesta seção, o desempenho do algoritmo de controle de conforto descrito na Seção 3.1 é analisado. O equipamento de climatização é um aquecedor a óleo (5kW).

A edificação (uma zona térmica), de dimensões $6m \times 8m \times 2.7m$, foi simulada usando um software de simulação higratérmica e energética de edificações (Mendes et al., 2005). Portanto, o modelo implementado atua como uma edificação real nos experimentos de identificação, sendo os dados climáticos (temperatura externa T_{EXT} , umidade relativa externa ϕ_{EXT} e radiação solar total S_{EXT}) obtido de um arquivo de dados climáticos reais da cidade de Curitiba, Brasil.

Portanto, por meio de um procedimento de identificação de sistemas, as seguintes funções de transfe-

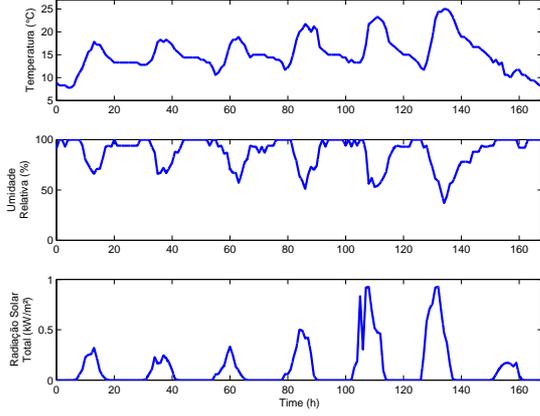


Figura 5: Temperatura externa, umidade relativa e radiação solar total para o período de simulação.

rência são obtidas:

$$(1 - 0,97000q^{-1})y_T(k) = 0,08395q^{-1}u(k) + 0,02527q^{-1}T_{EXT}(k) + 0,20340q^{-1}\phi_{EXT}(k) - 0,07245q^{-1}S_{EXT}(k) + (1 + 0,67670q^{-1})\xi(k) \quad (7)$$

$$(1 - 0,96920q^{-1})y_\phi(k) = -0,002107q^{-1}u(k) + 0,0002751q^{-1}T_{EXT}(k) + 0,01759q^{-1}H_{EXT}(k) + 0,003342q^{-1}S_{EXT}(k) + (1 + 0,72390q^{-1})\xi(k) \quad (8)$$

onde as unidades são: $[^{\circ}C]$ para temperatura e $[KW/m^2]$ para radiação solar. O tempo de amostragem é de 60 segundos. As condições internas da edificação, para calcular o valor do PMV (ver Eq. 2 e Fig. 1), são: velocidade do ar igual a $V = 0,1 \text{ m/s}$ e fatores individuais de atividade e vestimenta são adotados com sendo $M = 1,2 \text{ met}$ e $I_{cl} = 0,66 \text{ clo}$. Estes valores equivalem a atividades de escritório.

Como apresentado na Seção 3, o modelo de previsão para temperatura e umidade relativa são realizados através da utilização de Bases de Laguerre, com pólo em 0,97. São dados por:

$$\begin{cases} l(k+1) &= 0,97l(k) + 0,2431u(k) \\ \begin{bmatrix} \hat{y}_T(k) \\ \hat{y}_\phi(k) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0,3454 \\ -0,0086 \end{bmatrix} l(k) \end{cases} \quad (9)$$

Tal modelo, juntamente com a Eq. 2, são usados para previsão nas estratégias de controle. Os parâmetros da função custo são: $N_y = 3$, $N_u = 1$ e $\lambda = 0$. A janela de restrição é $m = 1$.

As simulações são executadas durante um intervalo de tempo de 7 dias, onde o controlador é ligado na hora zero do terceiro dia, isto é, após 48 horas. Dados climáticos externos, que atuam como perturbações na lei de controle, foram coletados de um arquivo de dados climáticos TRY (*Test Reference Year*) da cidade de Curitiba, Brasil, para a primeira semana de Julho (Inverno) e são apresentados na Fig. 5.

A Fig. 6 apresenta o desempenho da malha fechada do MBPC com modelo interno de PMV. Nela

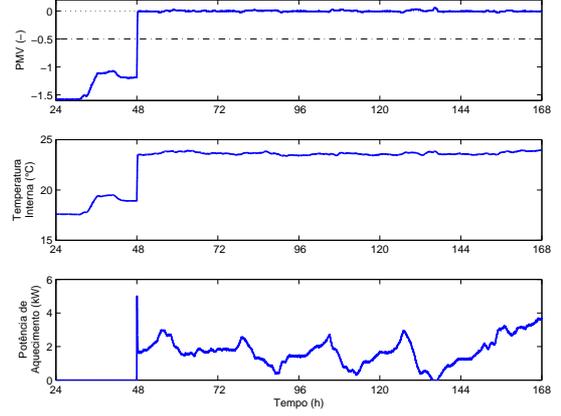


Figura 6: Desempenho do sistema em malha fechada.

apresenta-se o sinal de PMV durante o período de simulação. Pode-se notar que este sinal é bastante próximo ao valor ideal de conforto térmico. O MSE deste sinal de PMV é 0,838895. Através da Fig. 6 pode-se ver também o comportamento da temperatura interna e do sinal de controle. O consumo de energia é de 206,26 kWh.

5 Resultados Experimentais

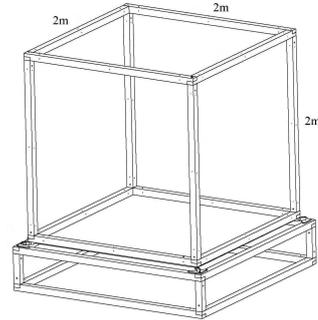


Figura 7: Célula de testes.

Nesta seção, o desempenho do algoritmo de controle baseado no índice PMV com geração ótima do sinal de referência é analisado através de um experimento em tempo real. O método é implementado no controle de conforto de uma célula de testes instalada dentro de uma câmara térmica. A célula possui formato de um cubo de $8m^3$ e está suspensa a $0,5m$ do piso. Para controle de conforto térmico dentro do ambiente, estão presentes dois aquecedores a óleo (potência total de $3000W$), três sensores de temperatura e umidade relativa e um sensor de velocidade do ar. A Fig. 7 apresenta a estrutura da célula e a Fig. 8 mostra o interior da célula, na qual observam-se os aquecedores e os conjuntos de sensores.

A implementação do sistema de controle em tempo real é ilustrada na Fig. 9. Dentre os sensores de temperatura e umidade, um é utilizado na malha de



Figura 8: Visão interna de célula de testes.

controle e outro para adquirir dados higrotérmicos externos à célula (dados de temperatura e umidade dentro da câmara climática na qual a célula está inserida).

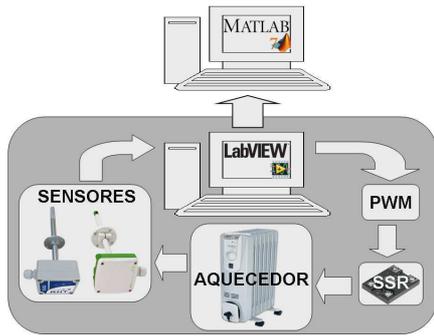


Figura 9: Elementos da malha de controle.

Um *software* desenvolvido em LabVIEW determina *on-line* o valor ótimo de referência e a malha de controle de temperatura, com período de amostragem de 20 segundos.

A especificação do CRHPC é apresentada a seguir. Através de testes de resposta ao degrau, obteve-se uma função transferência de primeira ordem com atraso de transporte para a célula com os aquecedores, como se segue:

$$\begin{cases} x(k+1) &= 0,9920x(k) + u(k-28) \\ y(k) &= 0,1777x(k) \end{cases} \quad (10)$$

Os parâmetros de projeto são $N_y = 40$, $N_u = 1$, $\lambda = 0$ e $m = 1$. Os seguintes parâmetros são assumidos na Eq. 2: $M = 1,2 \text{ met}$ e $I_{cl} = 0,75 \text{ clo}$. A velocidade do ar se manteve em aproximadamente $0,05 \text{ m/s}$ durante todo o experimento. A umidade relativa interna, necessária para a geração da referência de temperatura, está apresentada na Fig. 10.

O desempenho do sistema em malha fechada pode ser observado na Fig. 10. Neste estudo de caso, a temperatura da câmara climática onde a célula está inserida é mantida em torno de 10°C , simulando um dia de clima frio. Pode-se notar que a condição de conforto térmico dentro da célula é alcançada, com valores de PMV bem próximos ao valor ideal (Assume-se, segundo (ASHRAE, 2001), que valores de PMV entre $-0,5$ e $+0,5$ correspondem a uma situação de conforto). Na Fig. 11, tem-se o seguimento de trajetória da temperatura especificada pelo algoritmo de otimização e o sinal de controle.

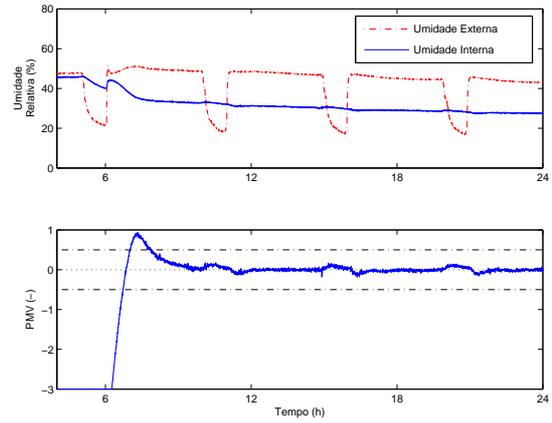


Figura 10: Sinais de umidade relativa e o PMV do ambiente interno.

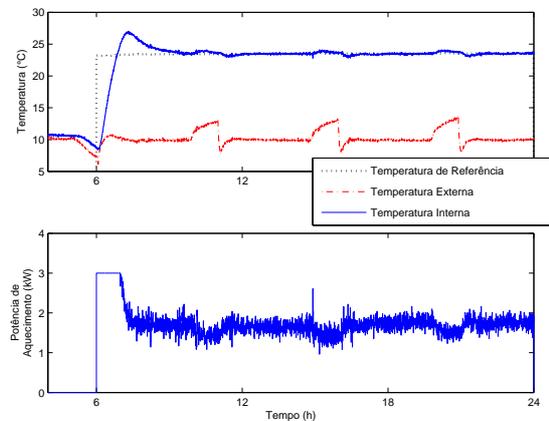


Figura 11: Desempenho do sistema de controle.

Um segundo experimento é descrito a seguir. Neste experimento, assume-se que a taxa metabólica e o índice de vestimenta do indivíduo dentro da zona térmica variam no tempo conforme apresentado na Fig. 12. Isto significa, inicialmente, o indivíduo está em uma condição de atividade sedentária, vestuário de trabalho, passa para uma atividade equivalente à de estar sentado descansando, vestuário leve, retornando a situação anterior após 6 horas. O controlador aplicado neste teste é o mesmo do teste anterior, assim como as condições de velocidade do ar.

O desempenho do sistema em malha fechada pode ser observado também na Fig. 12, juntamente com a umidade relativa do ar interno e externo. Pode-se notar que a condição de conforto térmico dentro da célula também é alcançada. Na Fig. 13, tem-se o seguimento de trajetória da temperatura especificada pelo algoritmo de otimização e o sinal de controle.

6 Conclusões

Neste artigo, o problema de controle de conforto térmico em edificações (uma única zona térmica) equi-

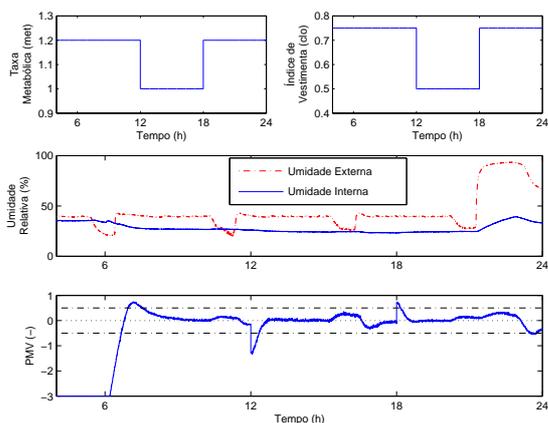


Figura 12: Parâmetros ambientais, individuais e o PMV do ambiente interno.

padas com um sistema de aquecimento foi analisado. Dois métodos baseados no CRHPC, caracterizados pelo uso do índice PMV, para otimização das condições de conforto térmico interno foram apresentados.

No primeiro caso, o índice PMV é usado para compor o modelo não linear de previsão com estrutura Wiener, gerando, portanto, uma estratégia de controle não-linear. No segundo caso proposto, o PMV foi usado para gerar um valor ótimo para o sinal de referência. O modelo é linear e uma lei de controle linear foi definida, onde a estabilidade em malha-fechada é garantida.

Através de resultados em simulação e experimentais apresentados, pode-se observar que as duas estratégias de controle são capazes de gerar condições de conforto térmico para ocupantes de uma zona térmica de uma identificação. Os níveis de PMV obtidos estão, com boa margem, dentro do limite aceitável ($\pm 0,5$) mesmo na presença de perturbações externas.

7 Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da FINEP, através do convênio 01.05.1064.00, CNPq, Eletrobrás e Fundação Araucária.

Referências

- ASHRAE (2001). *Handbook of Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA.
- Camacho, E. F. and Bordons, C. (1999). *Model Predictive Control in Process Industry*, 2 edn, Springer Verlag.
- Campello, R. J. G. B., Oliveira, G. H. C. and Amaral, W. C. (2007). Identificação e controle de processos via desenvolvimentos em séries ortogonais. Parte A: identificação, *Sba: Controle &*

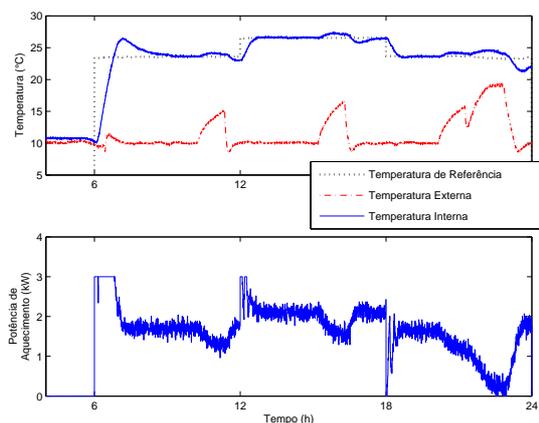


Figura 13: Desempenho do sistema de controle.

Automação Sociedade Brasileira de Automatica **18**(3): 301 – 321.

Fanger, P. O. (1970). *Thermal Comfort*, McGraw-Hill Inc., New York, USA.

Freire, R. Z., Oliveira, G. H. C. and Mendes, N. (2005). Thermal comfort based predictive controllers for building heating systems, *Proc. of the 16th IFAC World Congress (IFAC'05)*, Prague, Czech Republic.

Freire, R. Z., Oliveira, G. H. C. and Mendes, N. (2008). Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings, *Energy and Buildings (in press)*.

Gouda, M. M., Danaher, S. and Underwood, C. P. (2001). Thermal comfort based fuzzy logic controller, *Building Serv. Eng. Res. Technol.* **22**(4): 237–253.

Kolokotsa, D., Tsiavos, D., Stavrakakis, G. S., Lalaitzakis, K. and Antonidakis, E. (2001). Advanced fuzzy logic controllers design and evaluation for buildings occupants thermal-visual comfort and indoor air quality satisfaction, *Energy and buildings* **33**: 531–543.

Mendes, N., Oliveira, R. C. L. F. and Santos, G. H. (2005). Energy efficiency and thermal comfort analysis using the powerdomus hygrothermal simulation tool., Vol. 1, pp. 9–16.

Oliveira, G. H. C., Campello, R. J. G. B. and Amaral, W. C. (2007). Identificação e controle de processos via desenvolvimentos em séries ortogonais. Parte B: controle preditivo, *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica* **18**(3): 322 – 336.

Trebiën, R., Oliveira, G. H. C. and Mendes, N. (2007). Sensibilidade do índice pmv e regiões de conforto visando o aperfeiçoamento de climatizados, *Ambiente Construído*, **7**(2): 71–87.