

Universidade Federal de Minas Gerais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica

Monitoração e Controle de Processos Térmicos em Edificações por meio de um Sistema Distribuído

Ana Paula Batista

Belo Horizonte, 10 de Julho de 2006

Universidade Federal de Minas Gerais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica

Monitoração e Controle de Processos Térmicos em Edificações por meio de um Sistema Distribuído

por

Ana Paula Batista

Dissertação de mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador:

Prof. Fábio Gonçalves Jota, Ph.D - DELT/UFMG

Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

Monitoração e Controle de Processos Térmicos em Edificações por meio de um Sistema Distribuído

Ana Paula Batista

Dissertação de mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada por:

Prof. Fábio Gonçalves Jota, Ph.D - DELT/UFMG
Orientador

Prof. Manuel Losada y Gonzalez, Dr. - DEE/UFMG
Examinador

Prof. Maria Auxiliadora Muanis Persechini, Dr. - DELT/UFMG
Examinador

Prof. Márcio Fantini Miranda, Dr. - COLTEC/UFMG
Examinador

Belo Horizonte, 10 de Julho de 2006

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Fábio Gonçalves Jota, pelo apoio, pela disponibilidade e presença constante durante a realização deste trabalho. Que com sua competência técnica me direcionou para o melhor caminho.

Sou muito grata também, aos amigos do projeto “Centro de Monitoramento de Usos Finais”, o sucesso deste trabalho contou com a colaboração de todos. Meu agradecimento especial ao Professor Euler Cunha Martins e à Professora Maria Eugênia de Almeida Freitas, que muitas vezes me orientaram, participando ativamente no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à Professora Patrícia Romeiro da Silva Jota, por todo apoio e orientação durante a implantação do sistema no Centro de Pesquisa em Energia Inteligente, e pelos recursos disponibilizados pelo Projeto Abordagem Integrada da Eficiência Energética e Energia Renováveis financiado pela CEMIG.

Meus sinceros agradecimentos ao Professor Anísio Rogério Braga e à Professora Carmela Maria Polito Braga, grandes exemplos de profissionalismo. Obrigada pelos conselhos.

Agradeço ao Eng^o Eduardo Carvalhaes Nobre, coordenador do projeto CMUF na CEMIG, que acreditou no potencial deste trabalho e permitiu que este fosse realizado.

Agradeço a FINEP e a CEMIG, pelo apoio financeiro.

E, finalmente, agradeço à minha família pela colaboração, em especial aos meus irmãos Ronaldo e Adriana, pelo exemplo e incentivo, e ao Amauri pelo carinho e compreensão.

Resumo

Apresenta-se neste trabalho um sistema distribuído de baixo custo para fins de monitoramento e controle de usos finais em edificações. Para tanto, foi implementado um sistema de monitoramento contínuo das variáveis elétricas e ambientais no Centro de Pesquisa em Energia Inteligente (CPEI/CEFET-MG). Os dados coletados são armazenados em um banco de dados, e são disponibilizados via Internet, em tempo real, viabilizando o estudo mais realístico da matriz energética da edificação e das condições ambientais. O acompanhamento sistemático permite uma avaliação detalhada para identificação dos pontos críticos, para que se possa atuar de forma pontual. É apresentada neste trabalho, uma estratégia de controle para um sistema de condicionamento de ar, feita a partir do monitoramento de variáveis ambientais e do sistema. No caso do uso final ar condicionado (que é, em geral, a carga mais crítica em termos de consumo, tornando-se um ponto crucial no processo de efficientização), qualquer melhoria em seu controle pode representar melhoria nas condições ambientais e redução no consumo de energia. Um estudo de caso foi realizado em uma unidade de condicionamento de ar de pequeno porte, utilizando técnicas de controle convencionais. Entretanto, a plataforma implementada suporta a utilização de técnicas de controle avançadas (que seriam as que têm grande potencial de obtenção de ganhos energéticos ainda mais significativos). O sistema de controle ora proposto pode ser estendido a outros processos e sistemas de naturezas diversas. Os aspectos relacionados a implementação prática do sistema de monitoramento e controle são descritos nesta Dissertação. Ela compreende as fases de descrição da plataforma, descrição do processo, modelagem matemática, definição da estratégia de controle, projeto do controlador, implementação prática do sistema de controle e avaliação dos resultados obtidos no sistema real.

Abstract

In this work, it is presented a low cost system for monitoring and control purposes in buildings. To accomplish this tasks, a continuous monitoring systems, capable of logging electric and ambient variables, was implemented in the Research Centre for Intelligent Energy (CPEI/CEFET-MG). The gathered data is stored in a data base and becomes available via the Internet, in real time, making it possible to make more realistic studies of the energy matrix, as well as, of the actual ambient conditions of the building. The systematic assessment allows a detailed evaluation and identification of the critical points, so that more precise measures can be taken . In this work, it is proposed a control strategy for an air conditioning system based on the monitoring of the ambient conditions and other system variables. In the case of the air conditioning system (which is, in general, one of the heaviest and critical load, as far as, energy consumption is concerned, thus becoming an important point in the efficiency of the process), any change in its control can represent improvement in the ambient conditions and reduction in the energy consumption. As a case study, a real air conditioning unit (of small size) has been considered, in which conventional control techniques has been applied. Since the implemented platform supports the use of more sophisticated control techniques, more significant energy profits could be expected. The considered control system, also, can be extended to other processes and systems of diverse natures. The practical aspects related to the implementation of the monitoring and control system has are described in this Dissertation. It includes the phases of the platform description, process description, mathematical modeling, definition of the control strategy, design of the controllers, practical implementation of the control system and evaluation of the results obtained in the real system.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	1
1.2	Motivação	1
1.3	Eficiência Energética	3
1.4	Controle de Sistemas de Condicionamento de Ar	5
1.5	Controle Distribuído	7
1.6	Controle via Rede	9
1.6.1	Controle via Internet	12
1.7	Organização da Dissertação	13
2	Descrição do Sistema do CMUF	14
2.1	Introdução	14
2.1.1	O Estado da Arte	17
2.2	A Arquitetura do Sistema do CMUF	19
2.2.1	O Barramento CAN	21
2.2.2	A Comunicação na Rede CAN	23
2.2.3	A Estação Microcontrolada CAN-PIC	27
2.2.4	As Funcionalidades da Estação CAN-PIC	29
2.2.5	A Comunicação via Internet	37
2.2.6	O Armazenamento e a Visualização dos Dados	39
3	Descrição do Sistema de Condicionamento de Ar	44
3.1	Introdução	44

3.2	Sistemas de Condicionamento de Ar	44
3.3	Características do Sistema de Condicionamento de Ar Utilizado	46
3.3.1	Modos de Operação e Controle	50
3.4	Instrumentação Incorporada ao Sistema	51
3.4.1	Variáveis Monitoradas	51
3.4.2	Sensores e Atuadores	54
3.5	Análises Provenientes do Monitoramento das Variáveis Ambientais e do Sistema	56
3.6	Definição das Variáveis a serem Controladas e Manipuladas	58
4	Modelagem Matemática e Definição da Estratégia de Controle	59
4.1	Introdução	59
4.2	Determinação dos Modelos	60
4.2.1	Considerações sobre os Ensaio Realizados	61
4.2.2	Método de Identificação	62
4.2.3	Modelos Obtidos	64
4.2.4	Validação do Modelo	65
4.3	Projeto do Controlador	66
4.3.1	Definição da Estratégia de Controle	66
4.3.2	Determinação dos Parâmetros do Controlador	67
4.4	Implementação Prática do Controlador	69
4.5	Avaliação de Desempenho do Controlador	70
5	Análise dos Resultados	73
5.1	Considerações Iniciais	73
5.2	Resultados Obtidos	74
5.3	Considerações Finais	85
6	Conclusões	86
6.1	Comentários sobre os Resultados Obtidos	86
6.2	Conclusões Finais	92
6.3	Propostas Futuras	93

<i>SUMÁRIO</i>	vi
6.3.1 Melhorias no Controle	93
6.3.2 Melhorias na plataforma do CMUF	93
Referências Bibliográficas	95
A Layout da Rede CAN no CPEI	100
B Diagramas Elétricos AC	101
C Diagrama de Instrumentação (P&I)	105
D Controle em Cascata	107

Lista de Figuras

1.1	Diagrama de blocos do sistema de controle.	11
2.1	Arquitetura geral do sistema do CMUF.	15
2.2	Arquitetura do sistema CMUF com as estações Nós e Gateway.	20
2.3	Arquitetura do sistema do CMUF com várias edificações.	20
2.4	Diagrama de blocos da estação CAN-PIC.	27
2.5	Fluxograma do programa nó de medição de valor de pico.	30
2.6	Declarações e Configurações Padrões.	31
2.7	Fluxograma do programa do nó de medição de valor eficaz.	32
2.8	Cálculo do valor eficaz.	33
2.9	Fluxograma do programa do nó de atuação digital e medição de valor de pico.	34
2.10	Fluxograma do programa nó de atuação e controle.	35
2.11	Fluxograma do programa gateway.	37
2.12	Comunicação via Internet no sistema do CMUF.	39
2.13	Tela de controle de acesso ao sistema do CMUF.	41
2.14	Tela do sistema de monitoramento do CMUF com os dados dispo- nibilizados em tempo real.	42
2.15	Tela do sistema de monitoramento do CMUF com dados em uma base temporal de 15 minutos.	42
2.16	Tela de controle da unidade de condicionamento de ar do CPEI.	43
3.1	Unidade externa do condicionador de ar.	47
3.2	Unidade interna do condicionador de ar.	48

3.3	Insuflamento do ar já condicionado no ambiente.	48
3.4	Ciclo frigorífico (resfriamento).	49
3.5	Localização dos sensores de temperatura (T301 a T307) no sistema de condicionamento de ar.	52
3.6	Variáveis ambientais monitoradas no CPEI.	54
4.1	Resposta ao degrau, nas frequências de 30Hz, 45Hz e 60Hz, degrau aplicado no tempo 150 segundos.	62
4.2	Sistema de primeira ordem (a) resposta ao degrau (b) resposta complementar.	63
4.3	Sistema de segunda ordem (a) resposta ao degrau (b) resposta complementar e assíntota.	63
4.4	(a) resposta ao degrau (b) resposta complementar e assíntota (para a frequência de 60Hz).	64
4.5	(- -)Modelo de primeira ordem - 60Hz (-) temperatura interna (em 09/01/2006)	65
4.6	(- -)Modelo de primeira ordem - 60Hz (-) temperatura Interna 23/01/2006.	66
4.7	Malha de controle com realimentação.	67
4.8	Resposta ao degrau em malha fechada (simulação).	69
5.1	Temperatura interna (azul) e corrente no condicionador de ar (vermelho) com controlador On/Off para SP=18°C.	75
5.2	Resposta do avaliador de desempenho, para o controlador On/Off, com setpoint fixo em 18°C: (a) Temperatura interna (azul), Corrente no condicionador de ar (verde), Referência (vermelho); (b) Índice de avaliação do gerente MPA (verde), do engenheiro EPA (azul) e do usuário UPA (vermelho).	75
5.3	Temperatura interna (azul) e corrente elétrica no condicionador de ar (vermelho) com controlador PI para SP=18°C.	76

5.4	Resposta do avaliador de desempenho, para o controlador PI, set-point fixo em 18°C: (a) Temperatura interna (azul), Corrente no condicionador de ar (verde), Referência (vermelho); (b) Índice de avaliação do gerente MPA (verde), do engenheiro EPA (azul) e do usuário UPA (vermelho).	77
5.5	Temperatura interna (azul) e corrente no condicionador de ar (vermelho) com controlador On-Off para SP= 22°C, 20°C e 18°C. . .	78
5.6	Resposta do avaliador de desempenho, para o controlador On/Off, para resposta a degraus negativos: (a) Temperatura interna (azul), Corrente no condicionador de ar (verde), Referência (vermelho); (b) Índice de avaliação do gerente MPA (verde), do engenheiro EPA (azul) e do usuário UPA (vermelho).	78
5.7	Temperatura interna (azul) e corrente no condicionador de ar (vermelho) com controlador PI para SP= 22°C, 20°C e 18°C.	79
5.8	Resposta do avaliador de desempenho, para o controlador PI, para resposta a degraus negativos: (a) Temperatura interna (azul), Corrente no condicionador de ar (verde), Referência (vermelho); (b) Índice de avaliação do gerente MPA (verde), do engenheiro EPA (azul) e do usuário UPA (vermelho).	80
5.9	Resposta a degrau positivo, temperatura interna (azul) e corrente no condicionador de ar (vermelho) com controlador PI, com SP= 18°C e 20°C.	81
5.10	Resposta do avaliador de desempenho, para o controlador PI, para resposta a degrau positivo: (a) Temperatura interna (azul), Corrente no condicionador de ar (verde), Referência (vermelho); (b) Índice de avaliação do gerente MPA (verde), do engenheiro EPA (azul) e do usuário UPA (vermelho).	82
5.11	Temperatura interna (azul) e corrente no condicionador de ar (vermelho) com controlador PI, com variação na carga térmica.	83

5.12	Resposta do avaliador de desempenho, para o controlador PI, com variação de carga térmica: (a) Temperatura interna (azul), Corrente no condicionador de ar (verde), Referência (vermelho); (b) Índice de avaliação do gerente MPA (verde), do engenheiro EPA (azul) e do usuário UPA (vermelho).	84
6.1	Temperatura externa dias 09/01/2006 (vermelho) e 23/03/2006 (azul).	87
6.2	Temperaturas externa (vermelho), interna real (azul) e do modelo (verde), dia 09/01/2006.	90
6.3	Temperaturas externa (vermelho), interna real (azul) e do modelo (verde), dia 23/03/2006 (manhã).	90
6.4	Temperaturas externa (vermelho), interna real (azul) e do modelo (verde), dias 23/03/2006 (noite) e 24/04/2006 (manhã).	91
D.1	Estrutura do controle em cascata.	108
D.2	Validação do modelo Gp1	109
D.3	Validação do modelo Gp2	109
D.4	Simulação - resposta ao degrau cascata e single loop	110
D.5	Simulação - sinal de controle loop externo	111
D.6	Simulação - sinal de controle loop interno	111
D.7	Resposta do sistema real com controlador em cascata: temperatura interna (azul), temperatura do ar de saída do evaporador (verde), corrente no condicionador de ar (roxo).	112

Lista de Tabelas

2.1	Formato de mensagens proposto por Jota [Jota, 1987]	23
2.2	Formato de mensagens padrão CAN X formato de mensagens CMUF	25
2.3	Mensagens CMUF	25
3.1	Variáveis térmicas monitoradas no sistema de condicionamento de ar do CPEI	53
3.2	Variáveis elétricas monitoradas no sistema de condicionamento de ar do CPEI	53
3.3	Variáveis ambientais internas monitoradas no ambiente condicionado	53
3.4	Variáveis ambientais externas monitoradas no CPEI	53
3.5	Custo médio dos sensores utilizados	54
4.1	Parâmetros do controlador PI para $\tau_c=30s$	68
4.2	Algoritmo do controlador PI implementado no microcontrolador [Jota and Pena, 1994]	70
4.3	Pesos utilizados neste trabalho	72
5.1	Notas obtidas com o avaliador de desempenho para os controladores On/Off e PI, com setpoint igual a 18°C	77
5.2	Notas obtidas com o avaliador de desempenho para os controladores On/Off e PI, com setpoint igual a 22°C, 20°C e 18°C	80
5.3	Notas obtidas com o avaliador de desempenho para o controlador PI, para resposta a degrau positivo, setpoint igual a 18°C e 20°C .	82

5.4	Notas obtidas com o avaliador de desempenho para o controlador PI, com variação de carga térmica, setpoint igual a 18°C	84
-----	--	----

Nomenclatura

A/D	Analógico/Digital
BD	Banco de Dados
c(kT)	Saída no k-ésimo Instante de Amostragem
C1	Controlador Externo
C2	Controlador Interno
CAN	Controler Area Network
CAN-PIC	Estação Microcontrolada
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CMUF	Centro de Monitoramento de Usos Finais
CPEI	Centro de Pesquisa em Energia Inteligente
EPA	Índice de Avaliação de Desempenho do Engenheiro de Controle
e(kT)	Erro no k-ésimo Instante de Amostragem
Gc	Função de Transferência do Controlador
Gp	Função de Transferência do Modelo da Planta
Gp1	Função de Transferência do Modelo Externo
Gp2	Função de Transferência do Modelo Interno
GPI	Índice Global de Desempenho
IAU	Índice de Atividade da Variável Manipulada
IAY	Índice de Atividade da Variável Controlada
IEA	Integral do Erro Absoluto Ponderada
IEQ	Integral do Erro ao Quadrado Ponderada
IEAT, IEQT	Integrais do Erro Multiplicada pelo Tempo Ponderadas
IEM	Índice da Média do Erro
IUQ	Integral da Variável Manipulada ao Quadrado Ponderada
I²C	Inter-Integrated Circuit
K	Ganho Proporcional do Modelo da Planta
Kc	Ganho Proporcional do PI
MPA	Índice de Avaliação de Desempenho do Gerente do Sistema
m(kT)	Sinal de Controle no k-ésimo Instante de Amostragem
PHP	Hypertext PreProcessor (Linguagem para Desenvolvidos Web)
PI	Proporcional e Integral

PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PWM	Pulse Width Modulation
r(kT)	Referência no k-ésimo Instante de Amostragem
SPI	Serial Peripheral Interface
T	Período de Amostragem
Ti	Tempo Integral do PI
UPA	Índice de Avaliação de Desempenho do Usuário do Sistema
USB	Universal Serial Bus
τ	Constante de Tempo do Modelo da Planta
τ_c	Contante de Tempo Desejada em Malha Fechada

Capítulo 1

Introdução

1.1 Objetivos

O presente trabalho objetiva a implementação de um sistema distribuído, para monitoração e controle de sistemas de condicionamento de ar com disponibilização dos dados via Internet, visando a eficientização energética e o conforto térmico nas edificações.

Apresenta-se, nesta Dissertação, uma alternativa para o controle de um sistema de condicionamento de ar de zona única, a partir do monitoramento contínuo das variáveis térmicas e elétricas desse sistema e de variáveis ambientais. Com a análise dos dados adquiridos no monitoramento, o comportamento dinâmico das variáveis é determinado e as características dominantes do sistema são utilizadas no projeto do controlador.

1.2 Motivação

Para que o gerenciamento da energia de uma edificação possa ser feito de forma adequada, é necessário que o gerente de energia da edificação conheça o histórico do consumo de forma detalhada e setorial. Desta forma, o gerente poderá identificar variações no consumo e relacioná-las mais facilmente com o aumento na produção, mudanças de hábito ou mau uso da energia [Jota et al., 2000].

A maior dificuldade enfrentada pelos gerentes de energia com a implementação de estratégias de efficientização é a efetiva quantização dos ganhos reais obtidos. O custo elevado de um monitoramento contínuo convencional, em geral, inviabiliza o acompanhamento sistemático. Para uma análise precisa dos resultados alcançados, um acompanhamento contínuo e setorizado é requerido, já que uma análise feita por meio da conta de energia elétrica ou por estimativas de consumo pode ser facilmente mascarada pelo consumo total da edificação [Jota et al., 2002] e [Jota et al., 2005].

O trabalho desenvolvido nesta Dissertação é parte integrante do projeto denominado CMUF (“Centro de Monitoramento de Usos Finais”), financiado com recursos da FINEP (CTEnerg) e da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). O CMUF é ferramenta, de baixo custo, para suporte ao gerenciamento de energia, visando suprir as dificuldades de um acompanhamento contínuo e setorizado do desempenho energético e termo-luminoso das edificações. Assim, torna viável um gerenciamento mais efetivo da energia.

Uma maneira utilizada para implementar técnicas de uso racional de energia é a criação de centros de custo. O centro de custo tem por objetivo identificar o consumo de energia de forma setorizada como, por exemplo, condicionador de ar, iluminação, processamento de dados, etc, tornando possível a análise do Custo Específico (p.ex: Custo com Ar Condicionado / pessoa) [Jota et al., 2000].

No sistema do CMUF, os dados de cada centro de custo são disponibilizados via Internet continuamente e em tempo real, viabilizando o estudo da matriz energética da edificação e das condições ambientais. A integração das informações permite a implementação de estratégias de atuação e controle, visando à eliminação de gastos excessivos.

A importância do desenvolvimento desse projeto reside no fato de ser possível uma avaliação detalhada para identificação dos pontos críticos, permitindo que se possa atuar de forma pontual. Uma característica importante da utilização do sistema do CMUF é a integração de tecnologias de captação, armazenamento, processamento e transmissão de dados, como também ferramentas computacio-

nais para análises estatísticas.

No caso da carga de ar condicionado (que, em geral, é um dos “usos finais” mais críticos em termos de consumo de energia elétrica, tornando-se um ponto crucial no processo de eficientização), qualquer melhoria em seu controle pode representar melhoria nas condições ambientais e redução no consumo de energia.

Neste trabalho é apresentado um sistema de monitoramento não só das condições ambientais internas e externas de uma edificação e do consumo de sua energia elétrica, mas também de variáveis do sistema de condicionamento de ar, possibilitando a utilização de diferentes estratégias de controle. Um sistema de controle foi implantado em uma unidade de condicionamento de ar de pequeno porte, utilizando técnicas de controle convencionais; entretanto, a plataforma do CMUF suporta a implementação de controladores digitais utilizando tanto técnicas de controle convencionais como técnicas de controle avançadas (que seriam as que têm grande potencial de obtenção de ganhos energéticos ainda mais significativos). O sistema de controle ora proposto pode ser estendido a outros processos e sistemas de naturezas diversas.

1.3 Eficiência Energética

O tema eficientização energética é de grande importância nos tempos atuais. Devido a recentes crises no setor elétrico, o país tem concentrado esforços para conservação da energia. A falta de recursos para investimentos em usinas de geração e o grande impacto ambiental e social inerente a construção de novas usinas geradoras são fatores que atribuem tal importância a eficientização do uso da energia.

O combate ao desperdício de energia elétrica e a eficientização dos produtos e processos vem sendo amplamente discutidos no país e medidas vêm sendo adotadas neste sentido. Em 1985, foi criado o PROCEL (“Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica”) com o objetivo de promover a racionalização da produção e do consumo de energia elétrica, para que se reduzam os desperdícios.

Em 2000, foi aprovada a lei federal 9.991/00 que estabelece, a obrigatoriedade das concessionárias de energia elétrica de investirem em projetos de pesquisa e desenvolvimento em eficiência energética [PROCEL, 2006]. Foi criado também o fundo setorial de energia CTEneg; os recursos do CTEneg são destinados a financiar programas e projetos com ênfase na área de eficiência energética no uso final.

Entretanto, mesmo com a adoção de tais medidas, em 2001, o país passou por uma crise energética, que o obrigou a tomar medidas emergenciais de racionamento energético. Tais medidas resolveram o problema naquele momento; no entanto, o ocorrido reforçou a importância da conscientização da sociedade para questões relativas ao tema.

Neste contexto, ações que minimizem o desperdício de energia assume um papel de suma importância. Estas ações podem ser abordadas em duas vertentes [Guimarães et al., 2005]: a primeira delas, de caráter educativo, parte da conscientização e educação dos consumidores, de tal forma que reflita em mudanças de hábito; a segunda abrange os aspectos tecnológicos, de forma que a eficiência energética é alcançada através da otimização dos equipamentos, dos processos e das edificações.

No Balanço Energético Nacional o consumo de energia elétrica no Brasil é dividido pelos seguintes setores [BEN, 2005]: residencial (21,3%), comercial (13,9%), público (8,4%), setor energético (3,6%), transportes (0,3%), agropecuário (4,1%) e industrial (47,9%), e segundo fontes do PROCEL as edificações são responsáveis por cerca de 48% do consumo de energia elétrica total [PROCEL, 2006]. Grande parte dessa energia é consumida na geração do conforto ambiental aos usuários. As estatísticas mostram que o potencial de conservação em prédios já construídos pode ser de até 30%, e a 50% em prédios novos [PROCEL, 2006]. Face a este grande potencial de conservação, busca-se a efficientização das edificações tanto do ponto de vista arquitetônico quanto dos equipamentos e processos.

A conservação de energia não implica em privação do conforto ambiental e sim em utilização de melhores estratégias de controle das condições ambientais, de tal

forma que repercute em redução no consumo. Neste sentido, é apresentada nesta Dissertação uma alternativa de controle para um sistema de condicionamento de ar, visando o conforto térmico e a redução no consumo de energia.

1.4 Controle de Sistemas de Condicionamento de Ar

Uma unidade de tratamento de ar deve ser analisada a partir de uma abordagem sistêmica. As variáveis externas e climatológicas, as características da edificação, seus materiais e localização, a ocupação do ambiente, a iluminação e os equipamentos em uso, o equipamento de tratamento de ar e de sua distribuição, a operação do sistema, a circulação do ar e as suas propriedades interagem formando um grande sistema complexo. O sistema de controle deve atuar objetivando o fornecimento do ar tratado em condições de conforto térmico e de salubridade adequadas ao uso [Batista et al., 2006].

Uma unidade de condicionamento de ar deve manter o ambiente dentro das especificações adequadas ao uso do local. Sua função é fornecer ar nas condições adequadas de temperatura, umidade, vazão e velocidade, visando o conforto térmico e a sua qualidade. O sistema de controle, além de garantir o estado das variáveis desejadas de operação e a segurança da instalação, objetiva o uso eficiente da energia [Batista et al., 2006].

O controle de uma planta de condicionamento de ar é um problema complexo. As dificuldades de controle da planta provêm da forte interação existente entre as variáveis controladas temperatura e umidade relativa do ar, e da grande não linearidade característica do processo [Dexter and Jota, 1985].

Desde 1980, técnicas de controladores digitais vêm sendo aplicadas para controle de processos térmicos em edificações. O algoritmo de controle PI (Proporcional e Integral) se adequa bem ao controle de sistemas de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar. No entanto, algoritmos auto-sintonizáveis são muito atrativos para este tipo de processo, visto que os parâmetros do processo mudam

em função da carga, do clima e da ocupação [Nesler, 1986].

Sistemas de condicionamento de ar são projetados para operarem por longos períodos de tempo e em diferentes estações do ano, onde os controladores com parâmetros fixos sintonizados para uma determinada estação não apresentam desempenho satisfatório em diferentes épocas do ano.

Controladores adaptativos apresentam grandes vantagens, devido à capacidade de se adaptarem as mudanças ocorridas no sistema ao longo do tempo. O projeto de controladores auto-sintonizáveis é baseado em linearização local do comportamento do processo, no qual os coeficientes do modelo matemático que representa o sistema são estimados “on-line”. O uso de controladores auto-sintonizáveis se justifica pela redução do custo e do tempo gasto para encontrar as referências para os controladores e pela automática ressintonia no caso de mudanças nos parâmetros do processo [Jota, 1987]. Em 1986, Nesler apresentou resultados satisfatórios com a utilização de controlador PI auto-sintonizável em uma planta de condicionamento de ar [Nesler, 1986]. Em 1987, aplicações de controladores adaptativos de Variância Mínima Generalizado (GMV) e Controlador Preditivo Generalizado (GPC) em uma planta de condicionamento de ar é apresentada em [Jota, 1987].

Nos últimos anos, além de técnicas de controle adaptativo, outras metodologias de controle avançadas derivadas de inteligência artificial vêm sendo propostas para aplicações em sistemas de condicionamento de ar, tais como redes neurais, algoritmos genéticos e fuzzy. Em 2004, experimentos foram realizados em uma planta piloto de condicionamento de ar, para comparar o desempenho de um controlador PI convencional com parâmetros fixos, com um controlador preditivo baseado em fuzzy em duas condições de operação da planta, para alta e baixa vazão de ar. Para ambas as condições o controlador baseado em fuzzy apresentou menor atividade do sinal de controle e um desempenho satisfatório [Thompson and Dexter, 2004].

Os estudos de técnicas de controle avançadas vêm sendo aplicados em condicionadores de ar de maior porte, com multi-zonas. Atualmente, nos condicionadores

de pequeno porte, de expansão direta e instalados em uma única zona, o controle liga/desliga (On/Off) é o mais utilizado. Os pressostatos e termostatos atuam no compressor e no ventilador do condensador, regulados para uma determinada temperatura ambiente, e também para manter seguras as condições de operação.

1.5 Controle Distribuído

Em um sistema de controle distribuído, o processamento dos dados é realizado por estações de uma rede, localizadas próximas às unidades a serem monitoradas ou controladas. A possibilidade de controlar processos e sistemas no lugar onde eles se encontram é uma característica favorável para sistemas que são inerentemente distribuídos, como é o caso de uma edificação, onde as cargas se encontram fisicamente distribuídas [Chapman, 1990].

A utilização de topologias de controle distribuído foi viabilizada pela popularização dos microcontroladores, devido ao baixo custo dos mesmos, a divisão do processamento por unidades se torna viável. Pequenos, de baixo custo, mas poderosos, os microcontroladores agregam CPU, memória, relógio (“clock”) e entradas e saídas digitais [Stolen, 1999]. Alguns microcontroladores possuem periféricos incorporados como “timer”, conversores A/D, saídas PWM e interfaces para comunicação, suportando protocolos como RS-232, SPI, I^2C , USB e CAN [Silva, 2004].

Na topologia de controle distribuído cada unidade distribuída contém um microcontrolador para aquisição e controle [Stolen, 1999]. As unidades são interligadas por uma rede para troca de informações e o processamento é dividido por unidades independentes.

Um sistema de controle distribuído agrega muitas vantagens se comparado a um sistema centralizado, dentre elas [Jota, 1987]:

- economia nas instalações devido à redução de custos de cabeamento (os dados caminham em um sistema compartilhado);

- menor sujeição a ruído (os links físicos entre os loops de controle são pequenos);
- maior flexibilidade na inserção e retirada de elementos (a expansibilidade do sistema se torna mais fácil e mais econômica devido à característica modular);
- descentralização do controle (maior tolerância à falhas, a falha de uma única estação não provocará necessariamente a falha de todo o sistema de controle).

Em um sistema de controle distribuído, o projeto de um algoritmo de controle pode ser simplificado pela decomposição do mesmo em problemas menores, de solução mais simples [Mourão, 1995].

Além disso, sistemas de controle distribuído tendem a ter maior confiabilidade que sistemas de controle centralizados, uma vez que um sistema de controle distribuído pode ser estruturado de tal forma que, se uma unidade da rede falhar outra pode assumir o trabalho [Mourão, 1995]. Neste contexto, unidades ativas na rede trabalham como uma reserva para as outras, de forma que as informações de um determinado processo não fiquem contidas em uma única estação. Preferencialmente as informações devem ser enviadas para mais de uma unidade da rede [Stolen, 1999]. Apesar da redundância implicar em multiplicação de recursos, para o processo de controle a confiabilidade provida pela mesma é importante, uma vez que ela garante a continuidade do processo de controle no caso de falha.

O uso de sistemas de controle distribuído demanda alta confiabilidade, adequado comportamento para aplicações em tempo real e sistemas cada vez mais econômicos. A última demanda requer o uso de componentes padrões e de baixo custo, tanto quanto possível. O requerimento de comportamento em tempo real é caracterizado por curtos tempos de resposta, acessos aleatórios (comunicação assíncrona) aos dados do processo em um tempo muito pequeno, rápido reconhecimento de falhas e reconfiguração no caso de falha [Dieterle et al., 1995].

Algumas limitações devem ser analisadas na implementação de um sistema de controle distribuído, dentre elas:

- compartilhamento da rede: a utilização de um meio compartilhado implica em uma dependência do meio e uma concorrência pelos recursos. Esta concorrência pelos recursos pode causar congestionamento na rede, prejudicando assim os processos concorrentes com maior comprometimento das aplicações em tempo real;
- multiplicação de recursos: a multiplicação dos recursos implica em aumento de custo, entretanto, provê maior confiabilidade ao sistema. Com a popularização dos microcontroladores o custo das estações microcontroladas se torna cada vez mais baixos, e a multiplicação dos recursos não se torna tão onerosa se comparado ao benefício provida pela mesma. Entretanto, a relação custo/benefício deve ser analisada em cada aplicação.

Para o sistema de monitoramento e controle proposto nesta Dissertação adotou-se uma topologia distribuída. Tal escolha se justifica pelo sistema ser inerentemente distribuído, e os requerimentos de alta confiabilidade e aplicações em tempo real estarem presentes.

1.6 Controle via Rede

Em um sistema de controle via rede (NCS - Networked Control Systems), a malha de controle é fechada sob uma rede de comunicação de dados, onde os elementos sensor, atuador e controlador trocam informações por meio da passagem de mensagens pela rede [Halevi and Ray, 1988].

Se uma malha de controle é fechada sob um computador, o algoritmo de controle opera de forma isolada e sem concorrência pelos recursos computacionais. O tempo de execução do algoritmo de controle pode ser determinado com mais facilidade, visto que, todos os recursos estarão sempre disponíveis. Entretanto, quando há concorrência pelos recursos, como é o caso do controle via redes, os algoritmos de controle podem experimentar atrasos e variações de atrasos [Santos, 2004b] e [Tipsuwan and Chow, 2003].

Uma comunicação em uma rede compartilhada introduz atrasos na transmissão das mensagens, que diretamente induz atrasos na amostragem, atuação ou execução das malhas de controle. Existem classes de malhas de controle que são sensíveis aos atrasos e variações de atrasos, comprometendo assim o desempenho e a estabilidade do sistema [Santos, 2004b]. Sistemas de controle de processos térmicos, geralmente são menos sensíveis aos atrasos provenientes da rede, devido às longas constantes de tempo características dos processos térmicos [Martins, 2006].

Em um sistema de controle via rede, a comunicação entre os “processos” em cada unidade da rede pode ser inicializada por meio de interrupções ou por passagem de bastão. Duas fontes de interrupções podem ser implementadas, interrupções disparadas por tempo (“Time-Driven”) ou interrupções disparadas por eventos (“Event-Driven”). As interrupções por tempo são baseadas em atividades periódicas e contínuas. As interrupções por eventos são baseadas em atividades discretas e não periódicas, no qual eventos concorrentes ocorrem assincronamente [Martins, 2006] e [Chen and Wang, 2002].

No sistema implementado nesta Dissertação, a comunicação entre os elementos da malha de controle é iniciada por meio de interrupções por tempo. Entretanto, o controlador também responde a interrupções por evento, uma vez que este responde a eventos externos para modificação dos parâmetros. Estes eventos são gerados remotamente via Internet conforme apresentado na Figura 1.1.

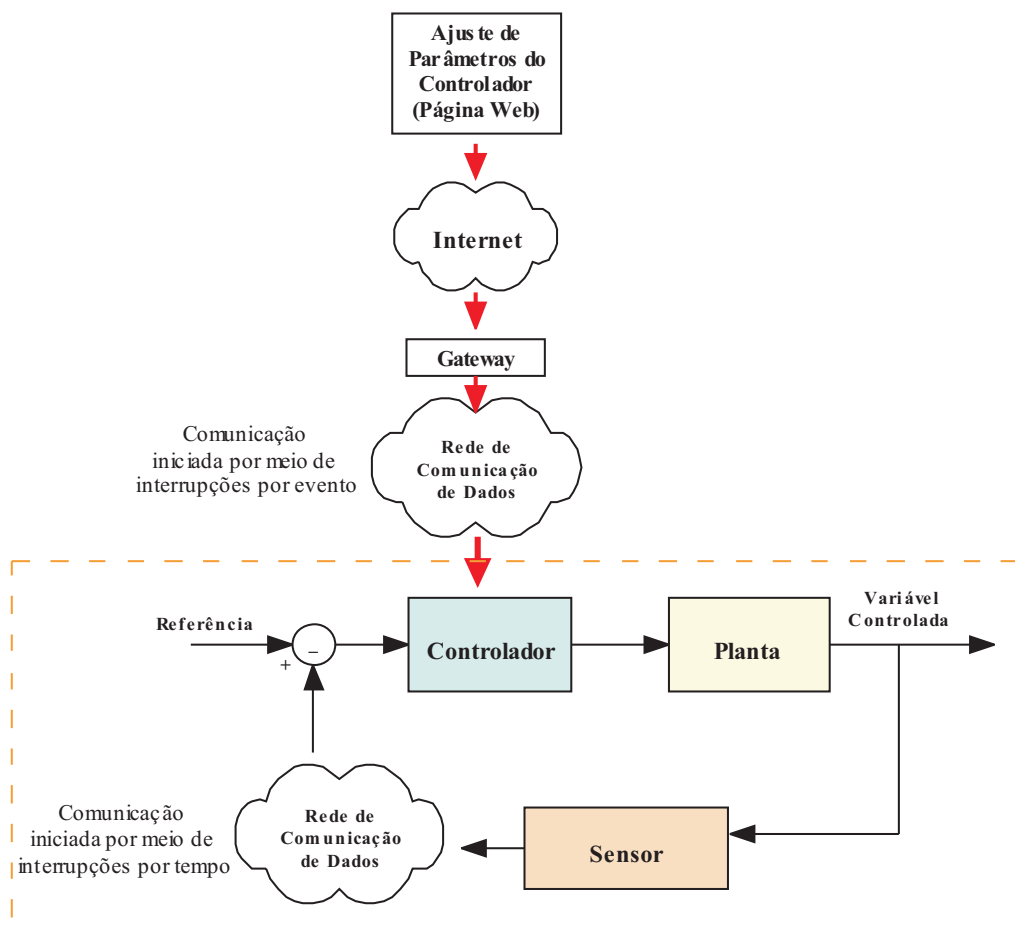


Figura 1.1: Diagrama de blocos do sistema de controle.

1.6.1 Controle via Internet

O uso da Internet para interações em tempo real de controle e monitoramento remoto de processos é aplicado não só na área predial, como também industrial e de educação (com o foco no desenvolvimento de laboratórios de controle virtuais para propostas de ensino à distância) [Warnier et al., 2003]. Embora este contexto seja promissor, algumas questões devem ser analisadas quando vamos projetar um sistema de monitoração e controle via Internet. Além do problema clássico de atraso devido à transmissão irregular proveniente de sistemas de controle via redes, a segurança é outro problema crítico.

Devido às incertezas associadas ao atraso de tráfego, é necessário minimizar a carga de comunicação entre o nível de Internet e o nível de controle existente e evitar tarefas que requerem regime de sintonia determinística [Warnier et al., 2003].

No aspecto de segurança, altos níveis de segurança são requeridos, para tanto algumas medidas devem ser adotadas no projeto [Warnier et al., 2003]:

- estabelecer níveis suficientes de restrições de acesso aos controladores e atuadores da rede de controle;
- estabelecer níveis suficientes de restrições de acesso aos terminais de operação (páginas);
- registrar todos os acessos;
- usar informações criptografadas.

Em um sistema de controle via Internet não deve existir competitividade entre os usuários para a operação de controle. A autorização para acesso ao controle de um determinado processo deve ser única, diferentes operadores não podem acessar o controlador ao mesmo tempo. A exclusividade do acesso é necessária para manter a estabilidade do sistema de controle [Kato et al., 2001].

1.7 Organização da Dissertação

Esta Dissertação descreve as etapas do projeto de um sistema de controle aplicado a uma unidade de condicionamento de ar de pequeno porte. Ela está organizada em 5 capítulos nos quais estão descritos a plataforma utilizada nos aspectos de hardware e software, as etapas de instrumentação do sistema, modelagem da planta, definição da estratégia de controle, projeto do controlador, a implementação prática do sistema de controle remotamente e a avaliação dos resultados obtidos.

No Capítulo 2, é realizada uma descrição do sistema do CMUF, sendo apresentada uma visão geral do projeto, o estado da arte, a estrutura de hardware e de software do sistema. O objetivo deste capítulo é fornecer o conhecimento necessário sobre a plataforma e os recursos disponibilizados pela mesma.

No Capítulo 3, são apresentados alguns tipos de sistemas de condicionamento de ar, características do sistema de condicionamento de ar utilizado nesta aplicação, e a nova instrumentação introduzida ao sistema para monitoramento de variáveis ambientais e do sistema. O objetivo deste capítulo é apresentar o sistema de condicionamento de ar e prover uma discussão sobre as possíveis análises e modelos que poderão ser obtidos a partir do monitoramento de variáveis ambientais e do sistema.

O Capítulo 4 apresenta a técnica empregada na modelagem matemática do sistema de condicionamento de ar, os ensaios realizados para prover os modelos, a estratégia de controle adotada, bem como as etapas de projeto do controlador. A validação e a análise de desempenho do controlador também é discutida neste capítulo.

No Capítulo 5, é feita uma análise dos resultados obtidos com a implementação prática do sistema de controle.

No Capítulo 6, são apresentados alguns comentários sobre os resultados obtidos, as conclusões, e propostas de melhorias e de trabalhos futuros identificados durante o desenvolvimento desta dissertação são discutidos.

Capítulo 2

Descrição do Sistema do CMUF

2.1 Introdução

A plataforma do CMUF foi desenvolvida de forma a atender aos requisitos de baixo custo do projeto. Sistemas de monitoramento contínuo foram projetados, desenvolvidos e instalados em algumas edificações selecionadas. As edificações selecionadas, em sua maioria, foram beneficiadas no projeto “Prédios Eficientes” da CEMIG-ANEEL. A definição do número e tipos de cargas a serem monitoradas é feita em conjunto com os gerentes de energia de cada edificação, sendo que inicialmente o sistema prevê cerca de uma centena de medições para cada edificação. O CMUF está sendo instalado em quinze edificações em Minas Gerais, no estágio atual do projeto sete edificações já estão sendo monitoradas continuamente com aquisição das medições a cada minuto. Na edificação onde está instalado o sistema de controle do condicionador de ar (objeto de estudo desta Dissertação) a taxa de amostragem do monitoramento é de quinze segundos. O “Centro de Monitoramento de Usos Finais” (CMUF) se encontra, assim distribuído por todas as edificações e laboratórios envolvidos sendo composto pela associação de todas essas edificações interligadas via Internet.

Na plataforma do CMUF, as estações (de medição, atuação e/ou controle) são interligadas por uma rede de comunicação dedicada (CAN), como pode ser visto na Figura 2.1. Para conexão à Internet, é utilizado um micro servidor Web

(“webservice”). O webservice desempenha o papel de “mestre” fazendo requisições às estações de medição, aos quais estão acoplados os sensores (Te: “Temperatura externa”, Ti: “Temperatura interna”, I: “Corrente”, V: “Tensão”, RH: “Umidade”, C: “Claridade”, etc). Os dados coletados são enviados, via Internet, para o banco de dados do CMUF. Depois de armazenadas no banco de dados, as informações ficam disponibilizadas aos usuários cadastrados por acesso remoto (via Internet). Este acesso é realizado através de uma página Web.

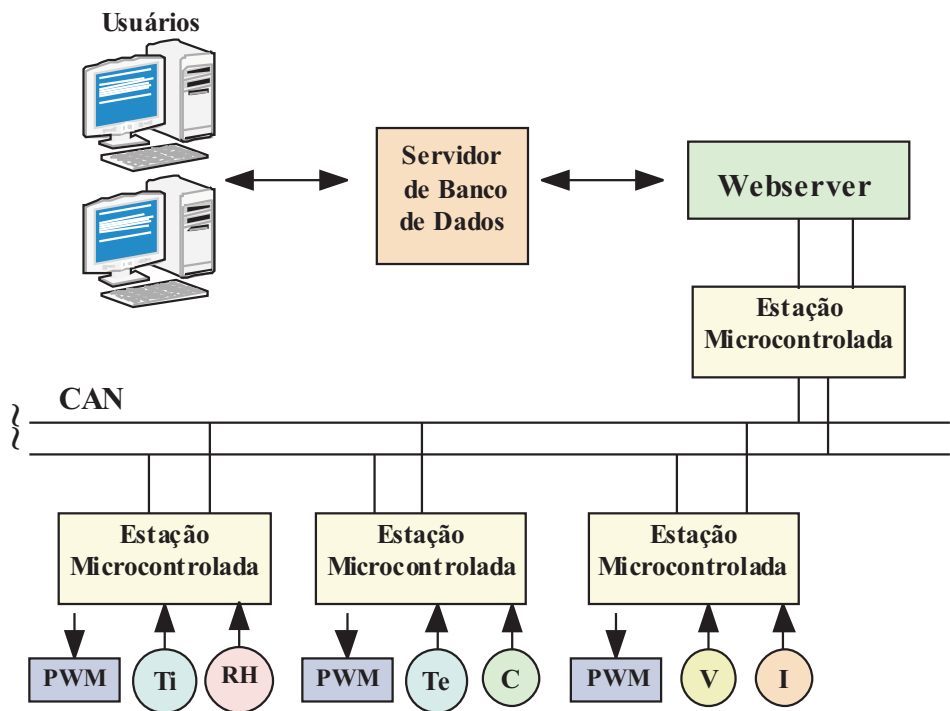


Figura 2.1: Arquitetura geral do sistema do CMUF.

O projeto CMUF é uma parceria CEMIG, CEFET-MG e UFMG, sob coordenação do Eng. Eduardo Carvalhaes Nobre (CEMIG), professora Patrícia Romeiro da Silva Jota (CEFET-MG) e professor Fábio Gonçalves Jota (UFMG). No desenvolvimento do projeto cabe à equipe da UFMG a implementação e instalação do “Centro de Monitoramento de usos Finais” e, à equipe do CEFET-MG, o desenvolvimento da metodologia de análise e desenvolvimento de ferramentas computacionais para o tratamento dos dados.

O “Centro de Monitoramento de Usos Finais” vem abrir novas possibilida-

des de acompanhamento do desempenho das edificações, tanto do ponto de vista energético quanto térmico e luminoso, de uma forma setorizada, com a disponibilização dos dados “online” [Jota et al., 2002]. Os dados coletados são armazenados em um banco de dados, processados e disponibilizados via Internet, em tempo real, tal monitoramento contínuo e setorizado viabiliza o estudo da matriz energética real da edificação e possibilita que se implemente estratégias de atuação e controle para cada uso final buscando a efficientização da edificação.

O projeto CMUF visa fornecer, de forma clara e objetiva, as informações relevantes para a gestão da energia, uma vez que a disponibilização pura e simples dos dados aos gerentes de energia pode não reverter necessariamente em ações, devido à dificuldade de análise técnica destes dados. Assim, será desenvolvida uma metodologia de tratamento destes dados para que estes se transformem em informações relevantes para as CICE’s “Comissão Interna de Conservação de Energia” das edificações, bem como para a própria concessionária. A metodologia desenvolvida servirá de base para o desenvolvimento de um software de apoio ao gerenciamento que disponibilizará, às equipes interessadas, análises tais como carregamento de fases, rateio de energia, rateio de demanda, frequência de ocorrência, influência da temperatura e previsão de carga [Jota et al., 2005].

Uma grande quantidade de medições (corrente, tensão, temperatura, umidade, etc) estão sendo armazenadas no banco de dados do CMUF e a sua análise é essencial para a gestão do conhecimento nele contido. O software de gerenciamento permitirá verificar o comportamento global da carga da edificação e a sua relação com cada carga individualmente. Dessa forma, será possível determinar (a qualquer instante do dia) o impacto de cada carga na curva de carga e na energia total consumida. Com esta informação, é possível traçar planos de gestão da energia visando à redução de custos da energia [Batista et al., 2006].

Estratégias de atuação e controle devem ser consideradas para a implementação efetiva de ações que minimizem o consumo energético. O desenvolvimento de técnicas de controle utilizando a plataforma do CMUF é um contexto muito promissor, pois a plataforma pode disponibilizar uma variada gama de informa-

ções e recursos, tais como: relatório em tempo real de eventos e status (diagnose de falhas); identificação “online” dos parâmetros dos modelos do sistema de condicionamento do ambiente; utilização de intertravamentos (como por exemplo, abertura de janelas no controle de condições ambientais); e, para qualquer grande alteração percebida nas condições do ambiente pelo sistema de controle, pode-se utilizar as informações do banco de dados para análise das condições ambientais nas proximidades da edificação, e efetuar comparações com medições de outros prédios na mesma região.

2.1.1 O Estado da Arte

O projeto CMUF surgiu da necessidade da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) de um sistema de baixo custo para monitoramento e controle de cargas elétricas, com características expressas para atender demandas especiais. Com base em experiências do Grupo de Controle de Processos Industriais (da UFMG) em sistemas distribuídos de baixo custo e da equipe do CPEI/CEFET-MG em eficiência energética, o projeto foi proposto à empresa.

Comparando-se os custos de hardware por ponto de medição entre a plataforma do CMUF e um sistema com CLP (“Controlador Lógico Programável”) convencional, para o sistema do CMUF em fase de construção em laboratório (sem industrialização) o custo de medição por ponto é em torno de U\$\$4,50, e para um sistema com CLP convencional (pesquisa feita incluindo CLP e cartão analógico de entrada de 12 bits com 16 pontos) o custo por ponto de medição de entrada analógica é em torno de U\$\$150,00. Se agregar os custos de sistemas supervisórios, webserve’s, custos com a rede, com softwares, para compor um sistema convencional similar ao sistema do CMUF estes custos aumentam consideravelmente, tornando inviável economicamente. Com a industrialização do sistema do CMUF estima-se que este será cerca de cem vezes mais barato que um sistema convencional. Além dos custos, outro aspecto importante é conhecimento agregado pela equipe do projeto CMUF e o domínio de toda tecnologia utilizada, visto que toda a plataforma é desenvolvida pela equipe.

Na fase inicial do projeto CMUF, foram desenvolvidos dois Projetos de Fim de Curso [Rapp, 2002] e [Kazmaier, 2003]. Nestes trabalhos foram tomadas decisões importantes tais como, a rede utilizada para transferência de dados e o protocolo de comunicação a ser adotado.

Em [Kazmaier, 2003] alguns protocolos foram analisados, sendo eles Interbus-S, Profibus, LON, EIB, ARCNET, Ethernet e CAN. Definiu-se pela utilização do protocolo CAN, uma vez que ele apresenta robustez, taxa de transferência dos dados e custos compatíveis com os objetivos do projeto.

Em [Kazmaier, 2003], também definiu-se o layout dos módulos (CAN-PIC) da rede, com o microcontrolador (PIC16F876) e o controlador de rede CAN (MCP2515) [Campos, 2004]. E para envio de dados para o microcomputador, foi considerada inicialmente a utilização da interface serial RS232 disponibilizada pelo hardware.

Em 2004, dois outros trabalhos foram desenvolvidos, o Projeto de Fim de Curso de Daniel Augusto Santos e Santos [Santos, 2004a] e a Dissertação de Mestrado de Gabriel Peixoto Guimarães Ubirajara e Silva [Silva, 2004]. Em [Silva, 2004], uma primeira versão de um sistema de controle com atuação On/Off foi implementada para uma planta de temperatura e vazão do Laboratório de Controle de Processos Industriais (LCPI) da UFMG.

Em [Santos, 2004a], um sistema de monitoramento remoto foi implementado, utilizando um webservice (DK40-Beck). Neste sistema, a linguagem utilizada para a programação do microcontrolador foi a Assembly.

Em 2005, no Projeto de Fim de Curso de Leandro Soares da Veiga [Veiga, 2005], o sistema de monitoramento remoto foi implementado em duas edificações reais: o edifício sede da CEMIG e o edifício do DER em Belo Horizonte. Nesta fase do projeto, foi feita uma mudança importante no sistema com a troca do webservice DK40-Beck pelo o Axis-83, com maior capacidade de memória e o sistema operacional Linux.

O enfoque principal desta Dissertação dentro do projeto CMUF é a implantação de um sistema de monitoramento de variáveis ambientais e de controle para

uma unidade de condicionamento de ar. E, as atividades desenvolvidas neste trabalho dentro do projeto CMUF se concentram mais na programação das estações microcontroladas.

Para a realização do trabalho proposto nesta Dissertação, devido à necessidade de implementação de outras funcionalidades requeridas pelo sistema de controle (com conseqüente aumento da complexidade dos programas), definiu-se pela utilização de uma linguagem de mais alto nível para a programação dos microcontroladores, a linguagem C.

A partir de então, todos os programas foram convertidos para a linguagem C e outras funcionalidades (medição de valor eficaz e reset via broadcast) acrescentadas, assim como as funções de atuação e controle. Atualmente, o sistema está implementado e monitorando, com os dados disponibilizados via Internet as seguintes edificações: Hemominas, DER, CEMIG sede, CPEI (CEFET), LCPI (UFMG), SERPRO e o Tribunal de Justiça, e está controlando a temperatura de um auditório do CPEI/CEFET-MG, Campus II. O layout da rede de instalada no CPEI é apresentado no Apêndice A.

2.2 A Arquitetura do Sistema do CMUF

Na plataforma do CMUF, a comunicação entre as estações é estabelecida por meio de uma rede CAN (Controller Area Network). Cada estação pode funcionar como unidade de medição, atuação e/ou controle, sendo que a estação que exerce uma destas funcionalidades, denominou-se de estação Nó. Na arquitetura do CMUF, como pode ser visto na Figura 2.2, uma das estações (denominada Gateway) exerce uma função especial, esta faz o papel de roteador da rede CAN. Toda a comunicação entre as estações Nós da rede CAN e o webserver é estabelecida através do Gateway. O webserver se comunica com a estação Gateway por meio de porta serial (RS232).

No sistema do CMUF cada edificação possui um webserver, no entanto, o servidor de banco de dados é único para todas as edificações, este servidor de

banco de dados é replicado para um segundo servidor para garantia da integridade dos dados, como é apresentado na Figura 2.3. Na plataforma do CMUF é prevista a comunicação entre as edificações, entretanto, na versão atual, esta ainda não está implementada.

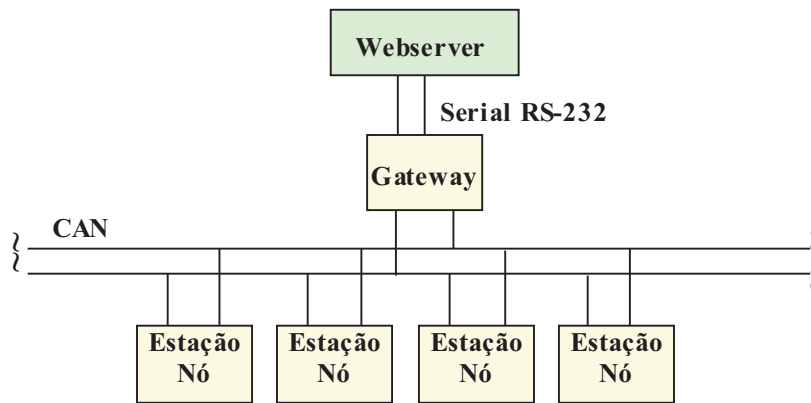


Figura 2.2: Arquitetura do sistema CMUF com as estações Nôs e Gateway.

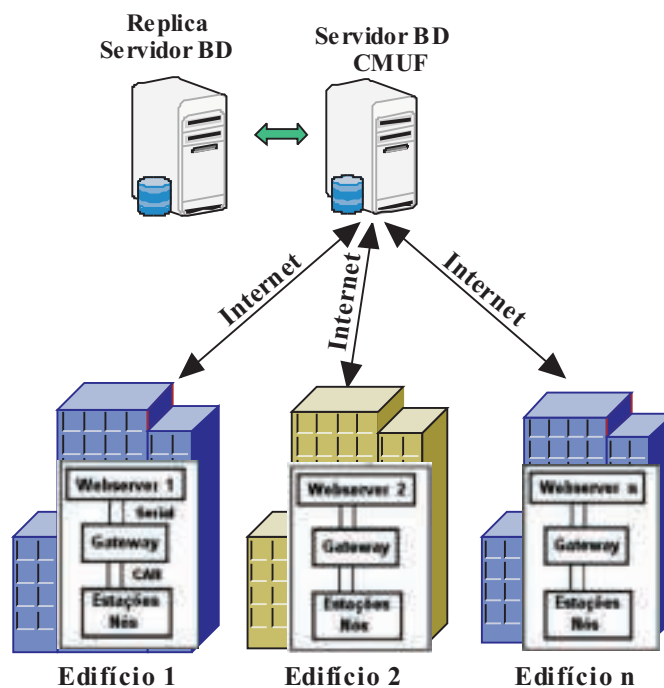


Figura 2.3: Arquitetura do sistema do CMUF com várias edificações.

2.2.1 O Barramento CAN

O barramento CAN é um barramento de comunicação de dados serial que foi desenvolvido originalmente para automóveis, entretanto, seu uso em aplicações industriais tem crescido consideravelmente [Motoki, 2002]. Na plataforma do CMUF, a utilização do barramento CAN se estende também a aplicações prediais. Para a aplicação na plataforma do CMUF, o barramento CAN atende aos principais requisitos: baixo custo, alta velocidade de transmissão (até 1M bits/s) e possibilidade de operação em ambiente hostil (baixa susceptibilidade a interferências do meio, devido a utilização de uma transmissão diferencial) [Kazmaier, 2003].

A especificação CAN implementa as duas camadas inferiores estabelecidas no padrão ISO/OSI (Open Systems Interconnection), a camada física e a de enlace, sendo que as camadas restantes ficam a cargo do desenvolvedor da aplicação. A mídia de transmissão (parte da camada física) não está inclusa na especificação CAN para permitir maior flexibilidade aos desenvolvedores na adoção do meio mais apropriado: par trançado, coaxial, fibra ótica, rádio frequência, dentre outros [Motoki, 2002]. Na plataforma do CMUF a mídia de transmissão que está sendo utilizada é o par trançado.

No protocolo CAN, cada estação da rede monitora o barramento por um certo período de tempo e só inicia uma transmissão se, durante este período de tempo, não houver nenhuma atividade no barramento. Após esse período de inatividade, todas as estações têm iguais chances de iniciar a transmissão. Caso duas ou mais estações tentem transmitir ao mesmo tempo, ocorre uma colisão, que é detectada e tratada pelos dispositivos de controle da rede CAN. A prioridade de transmissão das mensagens é avaliada para definir qual das estações terá o direito de manter e continuar transmitindo, e as demais estações perderão a arbitrariedade.

O CAN utiliza um esquema de arbitragem não destrutiva, quando uma colisão é detectada, a estação de menor prioridade interromperá sua transmissão sem prejudicar a mensagem enviada pela estação de maior prioridade. Isto se deve ao fato de que as estações da rede CAN sempre “escutam” o barramento, assim durante uma transmissão elas verificam se o que elas estão “escutando” é

realmente o que elas estão transmitindo. Caso uma estação transmita um “1” que é recessivo e “escuta” um “0” que é dominante, ela detecta que perdeu a prioridade e interrompe a transmissão. Quando o barramento voltar a ficar livre esta estação tentará transmitir a mensagem para rede novamente.

No protocolo CAN, as mensagens podem ser transmitidas no formato padrão ou estendido. Sendo que o formato padrão disponibiliza 11 bits para endereçamento, ou seja, pode chegar até 2.048 endereços. Caso seja necessário endereçar um número maior de estações na rede, é necessário utilizar o formato estendido, que disponibiliza 29 bits para endereçamento. Na plataforma do CMUF está sendo utilizado o formato padrão, uma vez que este atende aos requisitos do projeto.

O quadro de mensagens no formato padrão é composto por um bit de início de quadro “Start of Frame” (SOF), seguido por 11 bits de identificação e um bit de requerimento de transmissão de mensagens “Remote Transmission Request” (RTR). O próximo campo do quadro é um bit que define a extensão do identificador “IDentifier Extension” (IDE), que, no caso do quadro padrão, é igual a zero. Este campo é seguido do “Data Length Code” (DLC), onde é definido o número de bytes de dados que serão enviados no campo de dados (que pode variar entre zero e oito bytes). Seguido do campo de dados, tem-se o campo de CRC “Cyclic Redundant Check” que é utilizado para verificar a integridade da transmissão. A seguir tem-se o campo de Ack “Acknowledge” que é utilizado para efetuar a confirmação do recebimento, quando uma estação recebe uma mensagem corretamente ela coloca no barramento um bit dominante durante o tempo de Ack. E, para finalizar o quadro, tem-se o “End of Frame” que é constituído por sete bits dominantes, e o campo de espaço IFS “Intermission Frame Space” [Silva, 2004].

Fica a cargo do protocolo CAN o endereçamento, o envio e o recebimento de mensagens, assim como a verificação de sua consistência. Entretanto, este não oferece garantia de recebimento da informação, se uma mensagem é destinada a mais de uma estação e apenas uma recebê-la, já é satisfeita a condição de recebimento do protocolo CAN. Portanto, para que haja confirmação de recebimento por todos os destinatários, deve-se implementar com “Hand-Shake” na camada

de aplicação.

Maiores informações sobre o barramento CAN e sobre os quadros de mensagens do protocolo CAN podem ser encontradas em [Bosch, 1991], [Motoki, 2002], [Kazmaier, 2003], [Santos, 2004a], [Silva, 2004], [Campos, 2004].

2.2.2 A Comunicação na Rede CAN

O protocolo de comunicação na camada de aplicação da rede CAN foi desenvolvido tomando como base o formato de mensagem proposto em [Jota, 1987], que pode ser visto na Tabela 2.1. Neste formato, são definidas mensagens de requisição e mensagens de resposta. Sendo que as mensagens de resposta devem ser prioritárias em relação às mensagens de requisição e, geralmente, são mensagens mais curtas. Quanto às mensagens de requisição, estas podem ser de três tipos: função, procedimento ou dado. As mensagens do tipo função são utilizadas quando algum valor de retorno é requerido e as do tipo procedimento são utilizadas para solicitação de alguma tarefa.

Tabela 2.1: Formato de mensagens proposto por Jota [Jota, 1987]

Mensagens de Requisição	Mensagens de Resposta
Bit de Partida	Bit de Partida
Endereço do Destinatário	Endereço do Destinatário
Endereço do Remetente	Endereço do Remetente
Número Serial	Número Serial
Tipo de Requisição (Dado, Fun., Proc.)	Tipo de Requisição (Resp.)
Identificador	-
Número de Requisições	-
Tamanho dos Parâmetros	Tamanho dos Dados
Parâmetros	Dados
Verificador de Paridade	Verificador de Paridade
Bit de Parada	Bit de Parada

As mensagens têm formatos padrões (Quadros) que variam de acordo com o tipo e a aplicação, o quadro de uma mensagem é formado por vários campos. No formato de mensagens proposto por Jota, o primeiro campo se refere ao endereço de destino, que corresponde ao endereço da estação que receberá a mensagem. O

segundo campo é o endereço do remente, este é importante para que a confirmação de recebimento da mensagem seja possível. Para a confirmação do recebimento são utilizadas as mensagens de reconhecimento (“ack”). Caso uma mensagem de reconhecimento não seja recebida dentro de um intervalo pré determinado após o envio da requisição, a mensagem de requisição é retransmitida. Para diferenciar as mensagens retransmitidas de mensagens novas é utilizado o número serial, que corresponde a uma “identidade” da mensagem. Cada par de mensagens requisição/resposta deve ter um único número serial. O quarto campo do quadro se refere ao tipo de mensagem (resposta, função, procedimento ou dado).

As mensagens de requisição, possuem os campos identificador e número de requisições. Entretanto, nas mensagens de resposta, estes não estão presentes. O campo identificador indica qual o procedimento ou função é requerida. O campo número de requisições refere-se ao número de mensagens necessárias para a execução do procedimento ou função requeridos, este campo é necessário quando a informação a ser transmitida é maior que a capacidade do campo de dados da mensagem, ou seja, a informação não pode ser transmitida com uma só mensagem. No formato de mensagens proposto para a plataforma do CMUF, o campo número de requisições não está previsto, visto que, a proposta é de se transmitir dados menores que a capacidade do campo de dados.

A seguir tem-se o campo tamanho dos parâmetros (no caso de mensagens de requisição) ou dos dados (no caso de mensagens de resposta), que indica o número de bytes que serão enviados no campo dos parâmetros ou dos dados, este campo é seguido pelos parâmetros ou dados propriamente dito.

Todas as mensagens são finalizadas com um campo de verificação de paridade seguidas de um bit de parada. A verificação de paridade consiste na soma de todos os bytes da mensagem, para análise de consistência na mensagem.

A Tabela 2.2 apresenta o formato de mensagens padrão do protocolo CAN e o formato proposto para a plataforma do CMUF. No formato padrão do protocolo CAN, os campos tipo de requisição, identificador, número serial e endereço da estação remetente não são implementados. Na plataforma do CMUF, estes

campos serão implementados no campo de dados do formato padrão CAN.

Tabela 2.2: Formato de mensagens padrão CAN X formato de mensagens CMUF

Formato CAN	Formato CMUF
Bit de Partida	Bit de Partida
Endereço do Destinatário	Endereço do Destinatário
-	Tipo de Requisição
-	Identificador
-	Número Serial
-	Endereço do Remetente
Tamanho dos Parâmetros (ou dados)	Tamanho dos Parâmetros (ou dados)
Parâmetros (ou dados)	Parâmetros (ou dados)
Verificador de Paridade	Verificador de Paridade
Bit de Parada	Bit de Parada

O protocolo implementado na versão atual da plataforma do CMUF é uma simplificação do protocolo proposto, visto que o campo número serial ainda não foi implementado e o campo tipo está embutido no campo identificador. A comunicação na rede CAN no sistema de monitoramento e controle implementado foi estabelecida com a utilização de seis diferentes mensagens, sendo elas uma função, dois procedimentos e três mensagens de respostas, como pode ser visto na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Mensagens CMUF

Funções	Procedimentos	Respostas
- Requisição da Medição	- Atuação Digital - Alteração de Parâmetros	- Retorno da Medição - Reconhecimento - Confirmação de alteração de Parâmetros

Na mensagem de requisição da medição tem-se os campos endereço da estação destinatária, identificador da mensagem, tamanho dos parâmetros, endereço da estação remetente e o canal a ser lido.

Para as mensagens de retorno de dados estão inclusos o endereço da placa destinatária, identificador, tamanho dos dados, o endereço da estação remetente, o endereço da edificação remetente, o canal lido e o valor da medição. Quando as

mensagens de retorno de dados são destinadas ao servidor de banco de dados, a estação gateway ao receber a mensagem omite o endereço da placa destinatária, o identificador e o tamanho dos dados, enviando ao servidor apenas três bytes com as informações necessárias para que a mensagem seja inserida corretamente no banco de dados (endereço da estação remetente, endereço da edificação remetente, canal lido e valor da medição).

O quadro de uma mensagem de atuação digital é composto pelo endereço da estação destinatária, identificador da mensagem, tamanho dos dados, endereço da estação remetente e o canal a ser acionado.

O quadro de uma mensagem de alteração de parâmetros é composto pelos seguintes campos: endereço da estação destinatária, identificador da mensagem, tamanho dos dados, parâmetro a ser alterado e o valor do parâmetro.

O quadro de uma mensagem de confirmação de alteração de parâmetros é composto pelos seguintes campos: endereço da estação destinatária, identificador da mensagem, tamanho dos dados, parâmetro alterado, novo valor do parâmetro.

E por fim, a mensagem de reconhecimento, é composta pelo endereço da estação de destino, o identificador da mensagem, tamanho dos dados e o endereço da estação remetente. Devido ao campo número serial ainda não ter sido implementado, a verificação do ack para retransmissão das mensagens ainda não está sendo realizada, visto que, sem o número serial não é possível diferenciar uma mensagem nova de uma mensagem de retransmissão. Entretanto, as mensagens de reconhecimento estão sendo utilizadas para depuração (piscando um LED da estação microcontrolada).

A comunicação entre as edificações está prevista na plataforma do CMUF, entretanto, na versão atual, ainda não está implementada. No protocolo proposto para a plataforma do CMUF, o endereçamento das edificações remetentes e destinatárias (prédio, região, macro-região), não será implementado na camada de aplicação da rede CAN, uma vez que, o tráfego destas informações não são necessárias no nível da rede CAN. Estas informações podem ser introduzidas e tratadas pelos webservers de cada edificação.

2.2.3 A Estação Microcontrolada CAN-PIC

Os elementos de hardware que compõe a estação (CAN-PIC) são basicamente um microcontrolador, um controlador de rede CAN, um transceptor e um multiplexador conectado a uma das portas do microcontrolador, como pode ser visto no diagrama de blocos da figura 2.4. O transceptor tem a função de ajustar os níveis de tensão do barramento. A função de montagem e gerenciamento das mensagens na rede CAN fica a cargo do controlador de rede CAN (o MCP2515 [Microchip, 2003]), que implementa as especificações CAN versão 2.0B [Bosch, 1991].

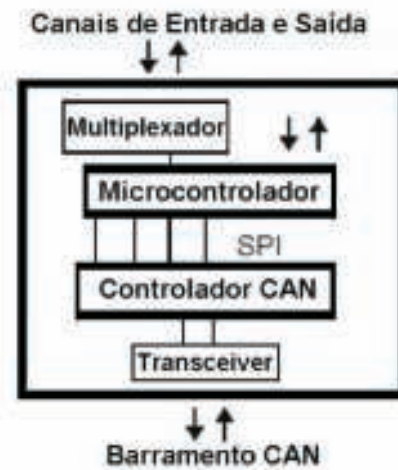


Figura 2.4: Diagrama de blocos da estação CAN-PIC.

O controlador MCP2515 possui três buffers de transmissão de mensagens. Este controlador tem a capacidade de atribuir prioridades para a transmissão de mensagens. Tal prioridade não tem relação nenhuma com a priorização do protocolo CAN quando ocorre arbitragem. Esta priorização é feita de acordo com o registrador de transmissão. Antes de enviar a mensagem, o controlador verifica qual dos três buffers de transmissão tem maior prioridade, a mensagem que se encontra no buffer prioritário será enviada primeiro. Esta função é de grande utilidade quando se implementa algoritmos de controle, pois em geral uma mensagem de realimentação para o controle deve ter prioridade maior do que uma mensagem de envio de dados para fins de monitoramento.

Para a recepção de mensagens, o MCP2515 possui dois buffers, com seis filtros de aceitação e duas máscaras, responsáveis por definir quais são as mensagens que serão tratadas por aquela estação. Tal controlador disponibiliza também a opção de utilização de uma função de “Rollover” para os buffers de recepção de mensagens. Com esta função habilitada, caso uma mensagem seja aceita pelos filtros do primeiro buffer de recebimento e este se encontrar ocupado, a mensagem é armazenada no segundo buffer de recebimento.

Quando uma mensagem válida é aceita em algum dos buffers de recebimento, um flag referente ao buffer é acionado gerando um evento que será tratado pelo microcontrolador. A comunicação entre o MCP2515 e o microcontrolador é feita por meio de uma interface serial, uma SPI (Serial Peripheral Interface). A configuração do controlador de rede CAN é feita pelo microcontrolador sempre que este é energizado, uma vez que o controlador de rede CAN não possui memória não volátil.

A estação CAN-PIC foi desenvolvida com o PIC16F876 [Microchip, 2001], que é um microcontrolador de 8 bits, com memória de programa FLASH (8K x 14 palavras), memória de dados RAM (368 bytes) e EEPROM (256 bytes). Este microcontrolador possui um conjunto de 30 instruções que podem ser executadas em apenas um ciclo de máquina e 5 instruções que podem ser realizadas em dois ciclos de máquina; a velocidade de processamento pode alcançar até 20MHz. Disponibiliza um módulo para comunicação serial síncrona SPI ou I^2C (“Inter-Integrated Circuit”) e um módulo USART (“Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter”) para comunicação serial síncrona ou assíncrona. Possui um conversor analógico-digital incorporado e três temporizadores internos. Possui ainda portas configuráveis como entradas ou saídas digitais, entradas analógicas e saídas PWM (“Pulse Width Modulation”).

As funcionalidades agregadas à estação CAN-PIC serão descritas a seguir.

2.2.4 As Funcionalidades da Estação CAN-PIC

A estação CAN-PIC pode funcionar como unidade de medição, atuação e/ou controle, ou ainda como roteador na rede CAN. Cada estação CAN-PIC possui sete canais configuráveis como entrada ou saída digital, entrada analógica ou saída PWM (apenas dois dos sete canais podem ser configurados como saídas PWM). A estação CAN-PIC possui também uma porta para comunicação serial padrão RS232.

Estações de Medição

O nó de medição é responsável por fazer a leitura dos canais (aos quais estão acoplados os sensores), e por enviar o valor das medições quando requisitadas. O nó de medição pode disponibilizar o valor de pico ou valor eficaz da grandeza, de acordo com a programação implementada no microcontrolador. A Figura 2.5 mostra o fluxograma do programa do nó de medição, com a implementação apenas da leitura do valor de pico.

Quando o programa nó é iniciado, as declarações e configurações padrões (Figura 2.6) são executadas e o programa entra no ciclo principal, quando fica aguardando o recebimento de mensagens. Quando uma mensagem é recebida e validada pelos filtros do controlador de rede CAN, este gera uma interrupção externa ao microcontrolador. Ao receber a interrupção, o microcontrolador lê a mensagem e a armazena em registradores internos, liberando o registrador de recebimento do controlador de rede CAN para receber novas mensagens. Em seguida, o microcontrolador verifica qual procedimento foi requerido. Caso seja uma requisição da leitura de um canal, ele executa a rotina de conversão A/D, e retorna uma mensagem com o valor da medição para a unidade que a requisitou.

Na Figura 2.7, é apresentado o fluxograma do nó de medição de rotina de leitura do valor eficaz. Neste programa nó, assim como no programa nó de valor de pico, as configurações padrões são executadas e o programa entra no ciclo principal, quando fica aguardando o recebimento de mensagens. Quando uma mensagem de requisição de leitura é recebida, o programa fica aguardando o

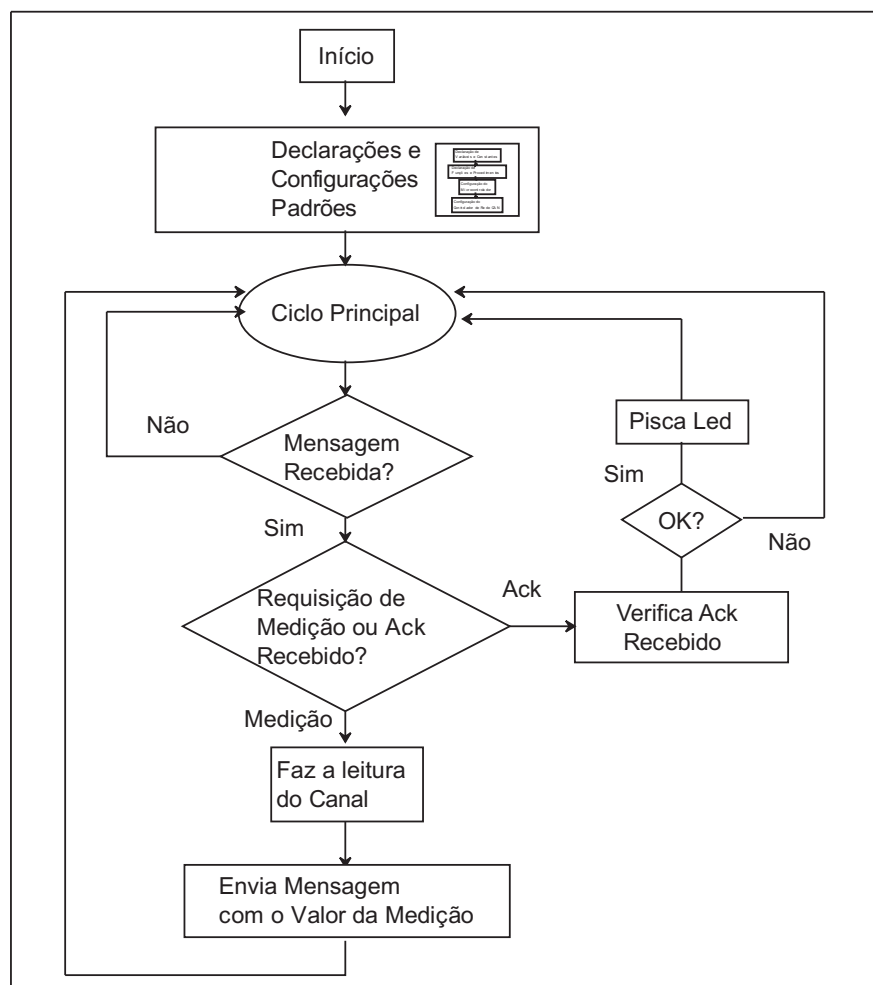


Figura 2.5: Fluxograma do programa nó de medição de valor de pico.

início de um ciclo da senóide do sinal de entrada para iniciar a leitura. O início do ciclo é identificado através de uma interrupção por mudança de estado em uma das portas do microcontrolador. Esta interrupção é gerada pelo Módulo de Amplificação e Retificação de Sinais (MARS), utilizado no condicionamento dos sinais provenientes dos sensores. O módulo MARS possui um detector de zero que gera um pulso quando o sinal de entrada (uma senóide) assume o valor nulo, este pulso gera a interrupção no microcontrolador.

Uma vez detectado o início de um ciclo da senóide, o programa inicia a leitura do sinal de entrada do canal. A cada 1ms uma leitura é realizada (Figura 2.8), no fim de cada leitura é calculado o quadrado do valor lido e este é armazenado. As leituras, com uma amostragem de 1ms, são realizadas até que o fim do ciclo da

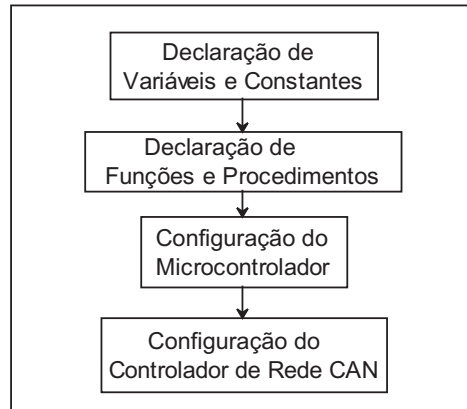


Figura 2.6: Declarações e Configurações Padrões.

senóide seja detectado. A detecção do fim do ciclo também é identificada através de uma interrupção gerada pelo módulo MARS. Quando o fim do ciclo é detectado, o valor eficaz é calculado, dividindo-se o somatório dos valores quadráticos pelo número de amostras lidas e extraí-se a raiz quadrada. Uma vez obtido o valor eficaz, uma mensagem com o valor da medição é enviada para a unidade que a requisitou.

Estações de Atuação

Uma outra funcionalidade da estação CAN-PIC é a atuação digital. Tal funcionalidade foi implementada como um procedimento agregado ao nó de medição de valor pico, sendo que três canais ligados diretamente ao microcontrolador são configurados como saídas digitais e quatro canais ligados ao multiplexador são configurados como entradas analógicas. Existe grande flexibilidade para a definição da configuração (entrada ou saída) dos canais das estações CAN-PIC, entretanto, decidiu-se por utilizar configurações pré-definidas por motivos de segurança, uma vez que os elementos sensores e atuadores estarão fisicamente conectados aos canais. A Figura 2.9 apresenta o fluxograma do programa do nó com atuação digital.

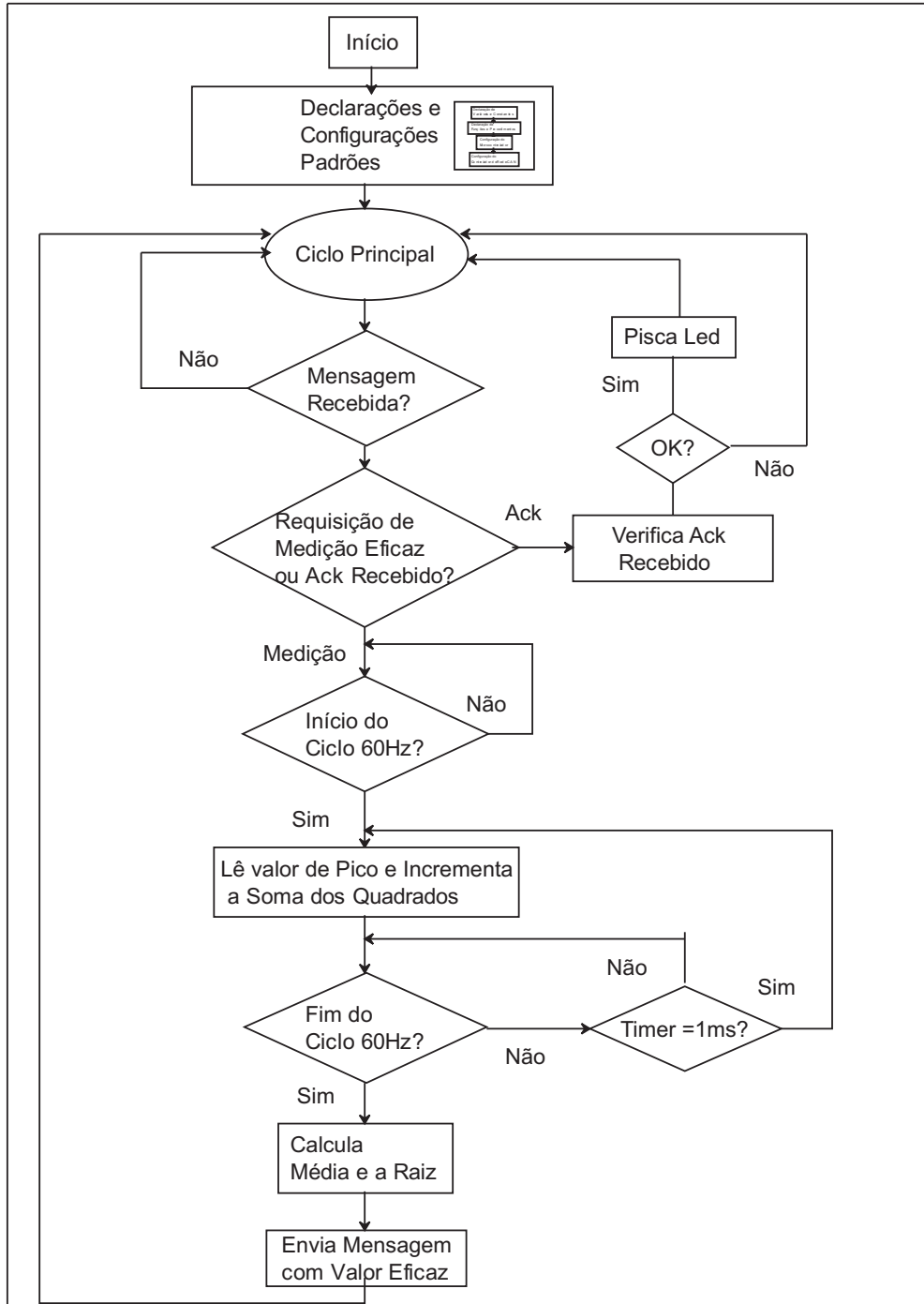


Figura 2.7: Fluxograma do programa do nó de medição de valor eficaz.

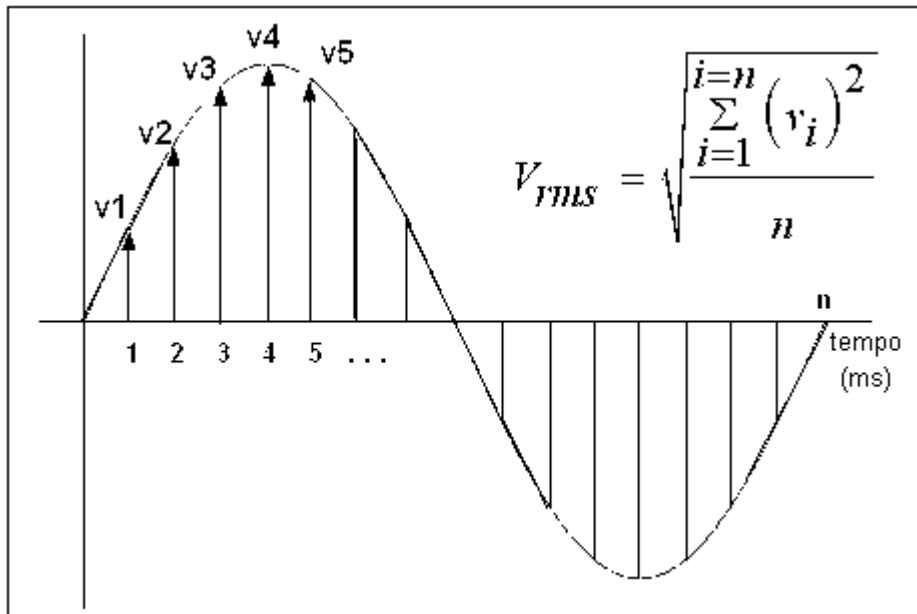


Figura 2.8: Cálculo do valor eficaz.

Estações de Controle e Atuação

As estações de medição ou atuação são também denominadas de “monitores” e as estações de controle de “processos”. Os “processos” são denominados unidades ativas, pois eles podem começar a comunicação entre duas unidades, e os “monitores” unidades passivas, visto que estes se limitam a responder aos processos quando requisitados [Mourão, 1995]. Entretanto, é importante ressaltar que todas as estações da rede (“processos” ou “monitores”) têm capacidade de processamento.

No sistema de controle proposto, o “processo” requisita os valores das variáveis desejadas às unidades de medição, processa o algoritmo de controle e envia o sinal de controle para o atuador. Uma mesma unidade pode agregar as funções de processo, medição e atuação, se desejado.

No programa de controle e atuação, cujo fluxograma é apresentado na Figura 2.10, agregou-se o atuador e o controlador em uma mesma estação, disponibilizando duas saídas de atuação analógicas PWM e saídas de atuação digitais. A estação de controle e atuação estabelece uma comunicação assíncrona com as outras estações da rede.

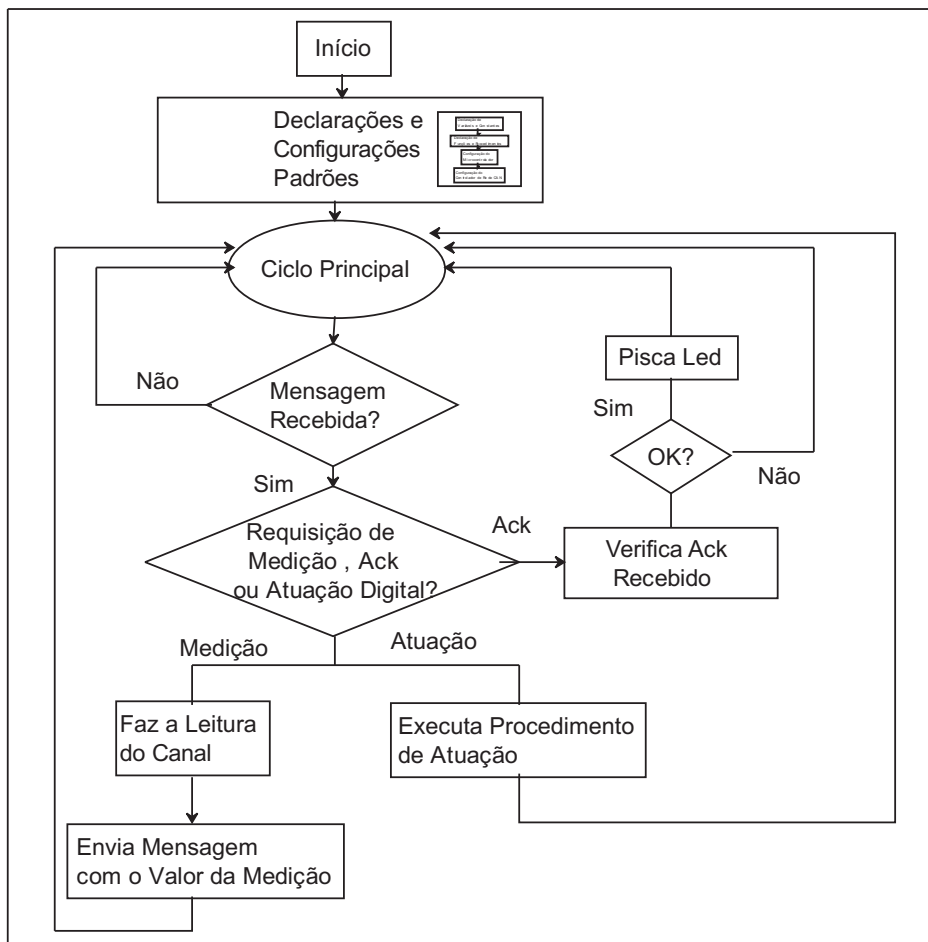


Figura 2.9: Fluxograma do programa do nó de atuação digital e medição de valor de pico.

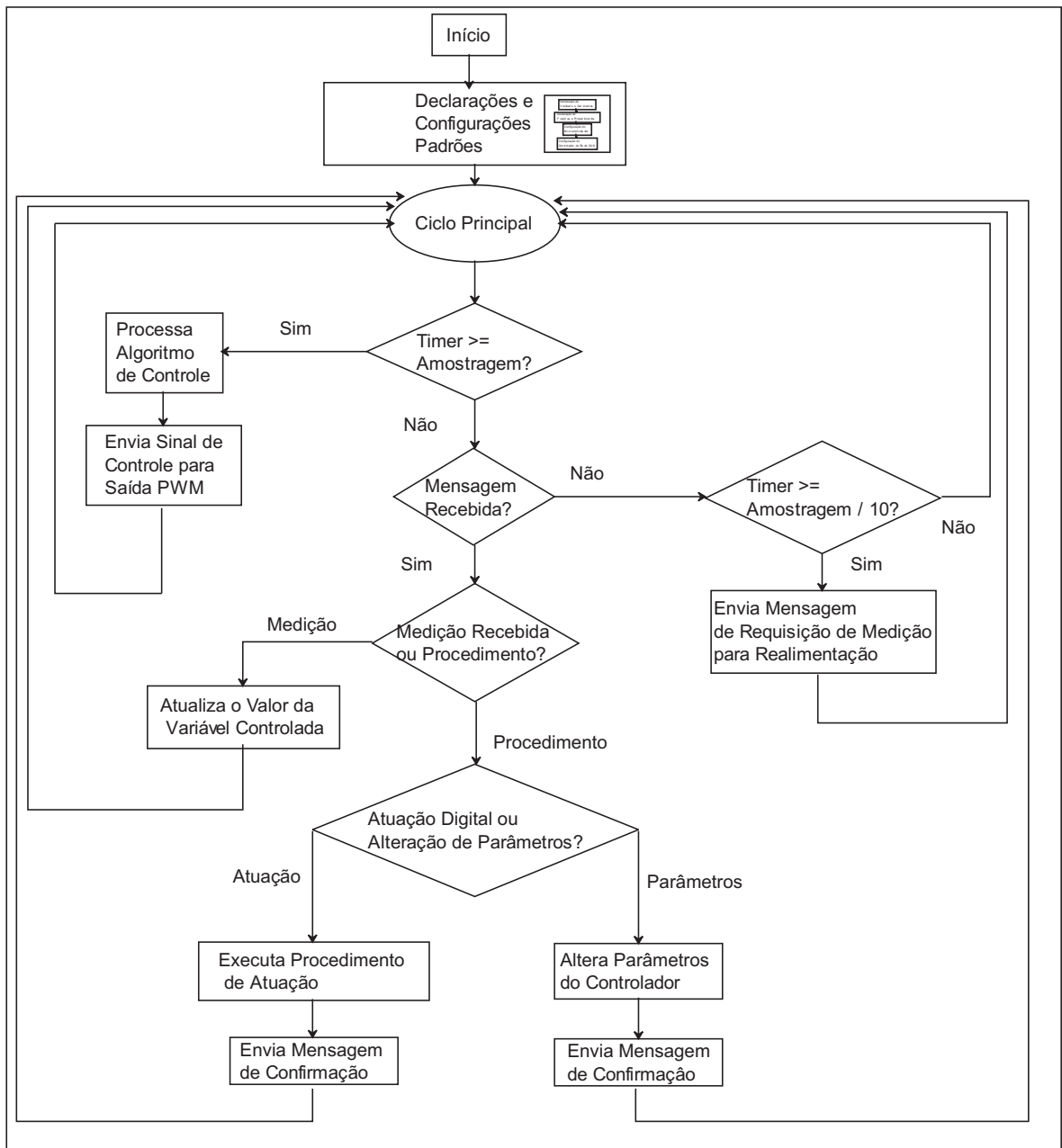


Figura 2.10: Fluxograma do programa nó de atuação e controle.

A estação de controle e atuação faz requisição de medição da variável controlada com uma amostragem dez vezes menor do que amostragem do controlador. Esta estratégia de superamostrar a atualização da variável controlada, foi adotada pois a rede se encontra livre a maior parte do tempo. A idéia de superamostrar as requisições para a realimentação se deve ao fato de que se uma mensagem com o valor de medição for perdida, o controlador irá realimentar com uma medição com um décimo de amostragem de atraso e não com uma amostragem de atraso. O controlador implementado não leva em conta os atrasos provenientes da rede, entretanto para processos térmicos, como é o caso da aplicação apresentada nesta Dissertação, estes atrasos são desprezíveis se comparados as longas constantes de tempo do processo.

A cada período de amostragem, o algoritmo de controle é processado e o sinal de controle é enviado para a saída analógica PWM. Quando uma mensagem é recebida pelo microcontrolador, este verifica se a mensagem é uma resposta à requisição com o valor da medição para realimentação do controle, ou se é uma mensagem de requisição de alteração de algum parâmetro do controlador, ou ainda se é uma mensagem para realização de um procedimento de acionar alguma porta de saída digital. Se a mensagem é resposta com o valor de medição para realimentação do controle, o buffer que armazena o valor da variável controlada é atualizado. Se a mensagem é uma requisição para realização de um procedimento de alteração de parâmetros ou alteração do estado de alguma saída, tal procedimento é realizado e uma mensagem de confirmação é enviada para o webserver para certificar que o procedimento foi realizado com sucesso.

Estação Gateway

A troca de mensagens entre o webserver (WS) e as estações da rede CAN é estabelecida por meio da estação gateway. A estação gateway estabelece uma comunicação serial com o webserver, as mensagens provenientes do webserver são recebidas pelo gateway via porta serial e encaminhadas às estações da rede via CAN. Do mesmo modo, as mensagens provenientes de qualquer estação da rede

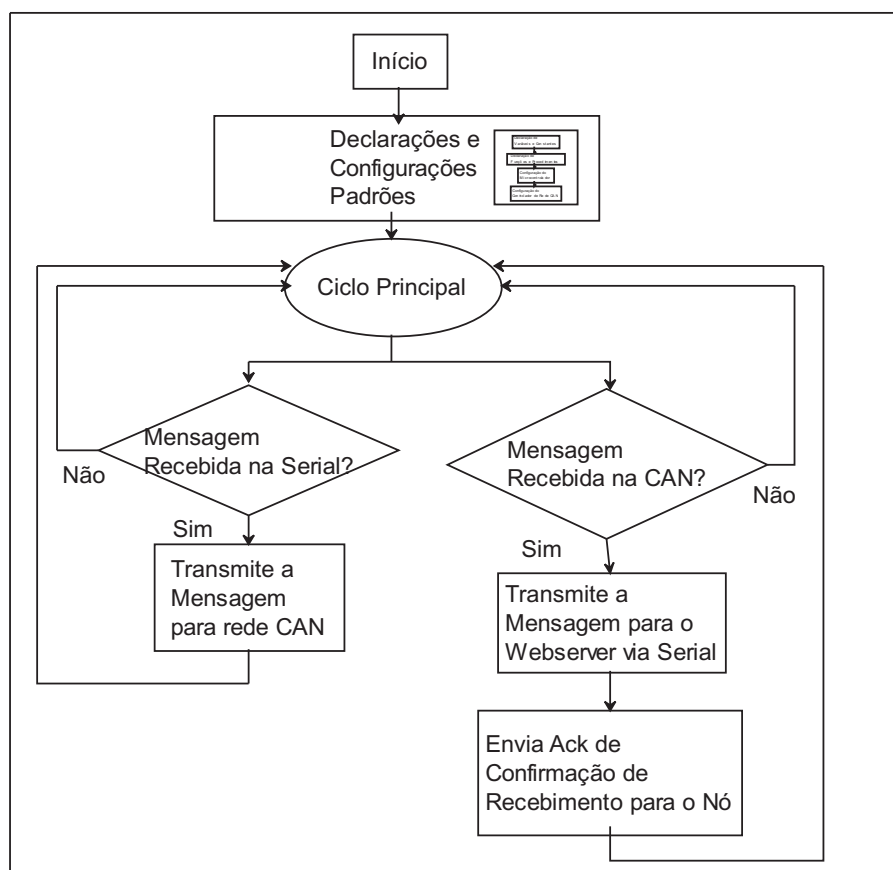


Figura 2.11: Fluxograma do programa gateway.

CAN destinadas ao webserver são recebidas pelo gateway, que as retransmite ao webserver via porta serial. A estação gateway recebe mensagens provenientes tanto do webserver quanto das estações da rede CAN e as retransmite adequadamente. A Figura 2.11 apresenta o fluxograma do programa gateway.

2.2.5 A Comunicação via Internet

A comunicação entre as estações da rede CAN e a Internet é realizada por meio do microwebserver Axis-83, que se comunica com a estação Gateway por meio de uma porta serial RS232. O Axis-83 possui duas portas de comunicação serial (RS-232), uma porta USB, duas portas Ethernet e uma porta serial RS-485. O Axis-83 é equipado com uma CPU de 32 bits, com velocidade de processamento de 100 MHz, 16 Mbytes de memória RAM, 6 Mbytes de memória Flash e opera com sistema Linux 2.4. Uma característica importante que levou à utilização de

microservidores Web no projeto CMUF é seu o baixo consumo de energia, em torno de 3W.

No sistema de monitoramento, o microwebserver é responsável pelo envio de requisições das medições aos nós da rede, pela recepção das medições, montagem do quadro de mensagens e envio dos dados para o servidor de banco de dados (BD). A comunicação entre o webserver e o servidor BD é feita por meio de sockets, utilizando o protocolo TCP/IP. Tal comunicação é realizada utilizando uma estrutura cliente/servidor, na estrutura cliente/servidor a comunicação entre o cliente e o servidor é iniciada pelo cliente, e o servidor se limita a responder as solicitações feitas pelo cliente [Jacques, 2006].

O webserver que, na aplicação de monitoramento, funciona como “cliente”, envia uma mensagem para o servidor BD pedindo a abertura de uma conexão. Uma vez estabelecida a conexão, o webserver monta o quadro de mensagem com os dados adquiridos das estações de medição e envia para o servidor BD. Um módulo de conexão desenvolvido em Delphi e instalado no computador servidor é utilizado para interligar o banco de dados ao webserver (ver Figura 2.12). O Módulo de Conexão verifica a consistência dos dados e os insere no banco de dados. A utilização deste módulo confere maior segurança e integridade às informações por não permitir, assim, acesso (externo) direto ao banco de dados [Jacques, 2006].

No caso da aplicação de controle, o Módulo de Conexão funciona como “cliente” e o webserver como “servidor”. Quando alguma alteração dos parâmetros do Controlador é realizada por um usuário cadastrado, via Internet, esta alteração é inserida no banco de dados. O Módulo de Conexão verifica que a alteração ocorreu no banco de dados e estabelece uma segunda conexão (por outra porta distinta). Uma vez estabelecida a nova conexão, o Módulo de Conexão envia a mensagem com o pedido de alteração dos parâmetros para o webserver, e fica aguardando a resposta com a confirmação de alteração. Quando o Módulo de Conexão recebe a confirmação de que os parâmetros foram alterados com sucesso, a segunda conexão é fechada. Visto que, as alterações nos parâmetros de controle não ocorrerão com muita frequência, decidiu-se por utilizar uma se-

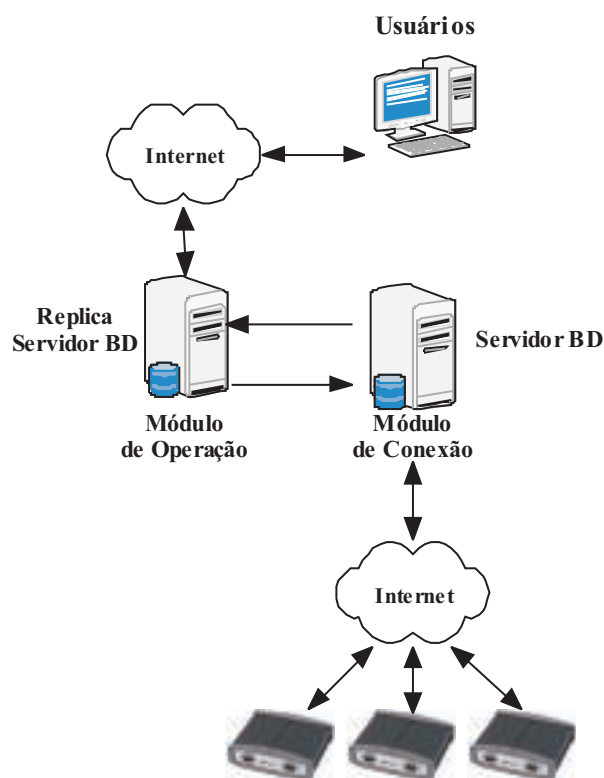


Figura 2.12: Comunicação via Internet no sistema do CMUF.

gunda conexão para este fim, evitando assim a necessidade de implementação de rotinas para comunicação assíncrona entre o webserver e o Módulo de Conexão [Jacques, 2006].

2.2.6 O Armazenamento e a Visualização dos Dados

O processo de geração de informações para uma gestão mais adequada da energia, parte dos dados coletados. Para tanto, o armazenamento e a consulta a estes dados devem ser feitas de forma segura e eficiente. O sistema de banco de dados (que, no caso do sistema do CMUF, é o MySQL) armazena os dados recebidos em tabelas apropriadas, levando em conta tanto a identificação da carga (edificação, estação e canal), quanto a data e a hora que a medição foi realizada. Para a garantia da integridade dos dados, uma replica do banco de dados é realizada em um segundo servidor.

As informações relevantes aos gerentes de energia, ficam disponibilizadas por

acesso remoto (via Internet) através de uma página Web disponibilizada por um Módulo de Operação desenvolvido em linguagem PHP. O Módulo de Operação disponibiliza as informações por meio de gráficos e em forma de tabela de dados. Os dados podem ser visualizados em diferentes bases de tempo, podendo ser em tempo real, de 15 em 15 minutos, de hora em hora, semanalmente ou mensalmente, existindo uma flexibilidade na escolha da base temporal e esta pode ser definida dependendo das características do processo a ser monitorado. O Módulo de Operação oferece a possibilidade de exportação dos dados em formato de tabelas.

O Módulo de Operação disponibiliza também uma página Web utilizada para aplicação de controle, onde nesta página o usuário cadastrado poderá alterar remotamente parâmetros de controle. No estágio atual, o processo disponibilizado na página do sistema do CMUF para alteração de parâmetros de controle, é uma unidade de condicionamento de ar do CPEI, onde a variável que está sendo controlada é a temperatura interna de um auditório. Entretanto, as ferramentas desenvolvidas podem ser estendidas para o controle de mais variáveis e de outros processos. Nesta página Web, são disponibilizadas as opções de ligar e desligar o sistema de condicionamento de ar, de alteração do modo de controle do sistema de condicionamento de ar para manual ou automático, de alteração do setpoint da temperatura interna do auditório e de alteração de parâmetros do controlador (ganho, tempo integral e período de amostragem).

Tanto os acessos às informações do monitoramento quanto as permissões para realizar alterações nos parâmetros de controle remotamente são restritos aos usuários autorizados, visando a garantia da segurança do sistema. O Módulo de Operação tem uma página de controle de acesso e todos os acessos são registrados.

A título de ilustração, nas figuras 2.13, 2.14, 2.15 e 2.16 são apresentadas algumas telas do Módulo de Operação. Seus dados são relativos ao monitoramento do prédio do CPEI/CEFET-MG. Na Figura 2.13 é apresentado a tela de controle de acesso ao sistema do CMUF. A Figura 2.14 apresenta a tela com os valores da umidade externa em tempo real do dia 18 de julho de 2006. A Figura 2.15

mostra a tela de dados da temperatura externa em uma base temporal de 15 minutos no dia 16 de julho de 2006. Na Figura 2.16 é apresentada a tela de controle da unidade de condicionamento de ar, onde são disponibilizadas as opções de: escolha entre duas estratégias de controle (cascata ou single loop); ajuste de setpoint para a temperatura interna do ambiente condicionado; ligar ou desligar o equipamento de condicionamento de ar; seleção do modo de operação manual ou automático; e ajuste dos parâmetros ganho proporcional ($Kc1$ e $Kc2$), tempo integral ($Ti1$ e $Ti2$) e período de amostragem ($T1$ e $T2$) dos controladores.



Figura 2.13: Tela de controle de acesso ao sistema do CMUF.

No Capítulo à seguir, será apresentada uma descrição detalhada da unidade de condicionamento de ar utilizada como objeto de estudo deste trabalho.

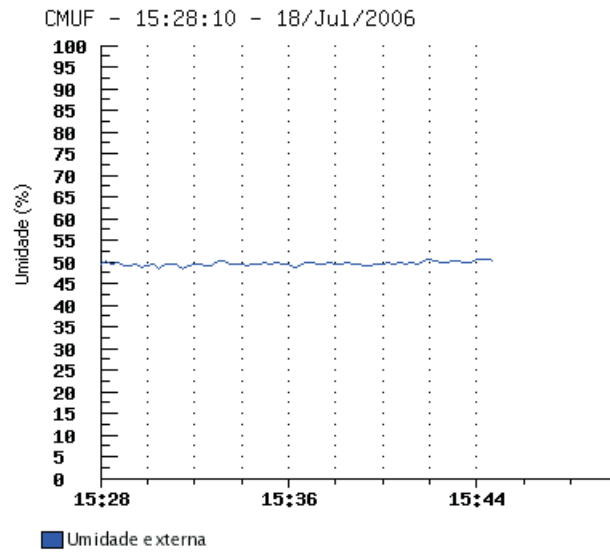


Figura 2.14: Tela do sistema de monitoramento do CMUF com os dados disponibilizados em tempo real.

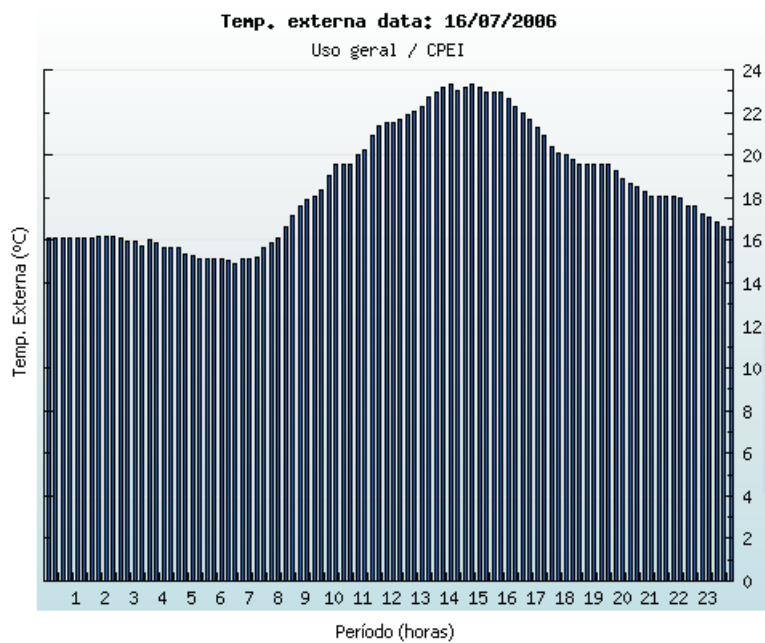


Figura 2.15: Tela do sistema de monitoramento do CMUF com dados em uma base temporal de 15 minutos.

Controle do Sistema de Ar Condicionado do CPEI/CEFET-MG

Ultima atualizacao: 2006-07-18 as 14:07:13

Cascata/Single loop	<input type="text" value="0"/>	(1 cascata, 0 single loop)
Set Point	<input type="text" value="19"/>	(0 a 255)
Liga/Desliga	<input type="text" value="1"/>	(1 liga, 0 desliga)
Manual/Automático	<input type="text" value="1"/>	(0 Manual, 1 Automático)
Kc1	<input type="text" value="158"/>	(0 a 255) (Kc1*10) (Single loop ou loop externo)
Ti1	<input type="text" value="30"/>	(0 a 255) (Ti1/10)
T1	<input type="text" value="30"/>	(0 a 255)
Kc2	<input type="text" value="6"/>	(0 a 255) (Kc2*10) (Loop interno)
Ti2	<input type="text" value="65"/>	(0 a 255) (Ti2)
T2	<input type="text" value="65"/>	(0 a 255) (T2*10)

Parametros de retorno: 0-18-1-1-158-30-30-6-65-65

[Retorno](#)

Figura 2.16: Tela de controle da unidade de condicionamento de ar do CPEI.

Capítulo 3

Descrição do Sistema de Condicionamento de Ar

3.1 Introdução

Devido ao crescimento urbano e industrial, as pessoas têm permanecido cada vez mais tempo inseridas em ambientes climatizados artificialmente. Uma vez que, a produtividade de um indivíduo está associada às condições de conforto, esta pode ser otimizada com um melhor controle das condições do ambiente.

As principais funções de um sistema de condicionamento de ar são resfriar, aquecer, umidificar, desumidificar, purificar e distribuir o ar condicionado no ambiente [Villani, 2000], sejam para garantir conforto e salubridade para os usuários do ambiente, sejam para a conservação de produtos ou para o controle de um processo produtivo.

3.2 Sistemas de Condicionamento de Ar

Os sistemas de condicionamento de ar podem ser de expansão direta ou indireta. Em um sistema de expansão ou evaporação direta, a expansão ocorre no ambiente a ser resfriado, o condicionador recebe, diretamente do recinto ou por meio de dutos, a carga de ar frio ou quente [Creder, 1990]. Este sistema de condi-

cionamento utiliza o ciclo de refrigeração por compressão de vapor, que consiste de uma série de processos executados sobre um fluido de trabalho, denominado refrigerante.

Em um sistema de expansão indireta o condicionador utiliza um fluido secundário para retirar a carga térmica que é transmitida pelo ar frio ou quente [Creder, 1990], ou seja, o fluido de transferência não é o mesmo utilizado no ciclo. Normalmente se utiliza como fluido de transferência água, etilenoglicol ou salmoura, sendo a salmoura menos usual nos dias atuais devido ao seu alto poder corrosivo.

Dentre os sistemas condicionadores de ar de expansão direta, os mais comuns são os do tipo janela, split e self-contained. A aplicação destes sistemas se limita ao condicionamento de ambientes de baixa carga térmica, exceto o self-contained que é utilizado também em aplicações de médio porte. Os componentes básicos destes equipamentos são compressor, condensador, evaporador, e sistemas de expansão (válvula ou tubo capilar).

O compressor eleva a pressão do fluido refrigerante para permitir a sua condensação. O condensador é um trocador de calor. Nele o calor retirado do ambiente condicionado é rejeitado para o ambiente externo, condensando o fluido refrigerante. O sistema de expansão reduz a pressão do fluido refrigerante, para que este possa ser evaporado. O evaporador, também é um trocador de calor, onde a evaporação do fluido refrigerante a baixa pressão permite que o calor seja retirado do ambiente condicionado.

Nos sistemas de condicionamento de ar tipo janela e self contained, as unidades condensadoras e evaporadoras são acopladas em um único equipamento. Nos condicionadores de ar tipo split a unidade evaporadora se encontra no ambiente a ser condicionado e a unidade condensadora no ambiente externo.

Normalmente, os sistemas de condicionamento de ar de expansão indireta utilizam resfriadores (“Chillers”) ou aquecedores (“Boilers”) de líquido, “Fan-Coils” e registros ou dampers, que regulam a vazão do ar, para propiciar o condicionamento de ar em ambientes com várias zonas condicionadas (multi-zonas).

Nesta Dissertação, o trabalho se concentra no controle de um sistema de condicionamento de ar de expansão direta tipo split, de uma única zona, cujas características serão descritas na sessão a seguir.

3.3 Características do Sistema de Condicionamento de Ar Utilizado

A edificação, onde está instalado o sistema de condicionamento de ar, é o Centro de Pesquisa em Energia Inteligente, CPEI, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais CEFET-MG. Localiza-se em Belo Horizonte a 20° de latitude sul e foi construído com elementos de arquitetura bioclimática, objetivando diminuir o ganho de calor do ambiente condicionado, aumentando assim seus desempenhos térmico e luminoso. Assim, são utilizados: brise-soleil, persianas verticais, lajes de blocos de concreto alveolar, telha galvanizada trapezoidal dupla com núcleo de poliestireno, paredes de blocos de SICAL e revestimento com placas de marmorite no piso [Bracarense et al., 2005].

O uso dos materiais de construção e de acabamento, com baixa capacidade térmica, tem por objetivo diminuir o acúmulo de energia da edificação, reduzindo também o atraso existente entre o ganho de calor e a carga de refrigeração [Batista et al., 2006].

O auditório foi escolhido como a zona condicionada e possui capacidade máxima de cerca de 42 pessoas. Localiza-se no último pavimento do prédio, com as quatro fachadas em contato com o ambiente externo, sendo que a porta, comunicando com o interior do edifício, situa-se em uma quina entre as paredes leste e sul. Suas janelas encontram-se voltadas para o norte (quatro) e para o sul (três). Para atender o uso da sala, estão disponíveis um microcomputador, um equipamento de multimídia, um vídeo cassete, uma televisão e um retro-projetor. A iluminação da sala faz-se por meio de um conjunto de 12 luminárias de 58 W cada [Batista et al., 2006].

O condicionador de ar é um sistema de expansão direta, tipo split, linha

cassete, marca Hitachi, modelo Utopia.

O sistema é composto por uma unidade condensadora externa (Figura 3.1), de 17,4KW (60.000Btu/h - 5TR). O compressor é do tipo Scroll, modelo 503-DH, Hitachi, com motor trifásico de 4,4KW, tensão nominal de 220V e frequência nominal de 60Hz. O fluido refrigerante utilizado é o R-22.



Figura 3.1: Unidade externa do condicionador de ar.

A unidade condensadora é interligada à unidade evaporadora interna, de teto tipo cassete, (Figura 3.2), que está instalada no centro da sala de conferências. A distribuição do ar já condicionado é realizada através de quatro dampers de insuflamento (Figura 3.3). A vazão de ar é de $0,57 \text{ m}^3/\text{s}$. A grelha de ar de retorno se encontra no centro da unidade interna. A distribuição do ar no interior do auditório não é realizada de maneira eficiente, a proximidade entre as saídas de insuflamento de ar e a grelha de ar de retorno provoca um “curto-circuito” da vazão de ar, assim, parte do ar já condicionado retorna para unidade sem a devida circulação no interior do auditório. A má distribuição do ar é um problema a ser analisado em futuros trabalhos.



Figura 3.2: Unidade interna do condicionador de ar.

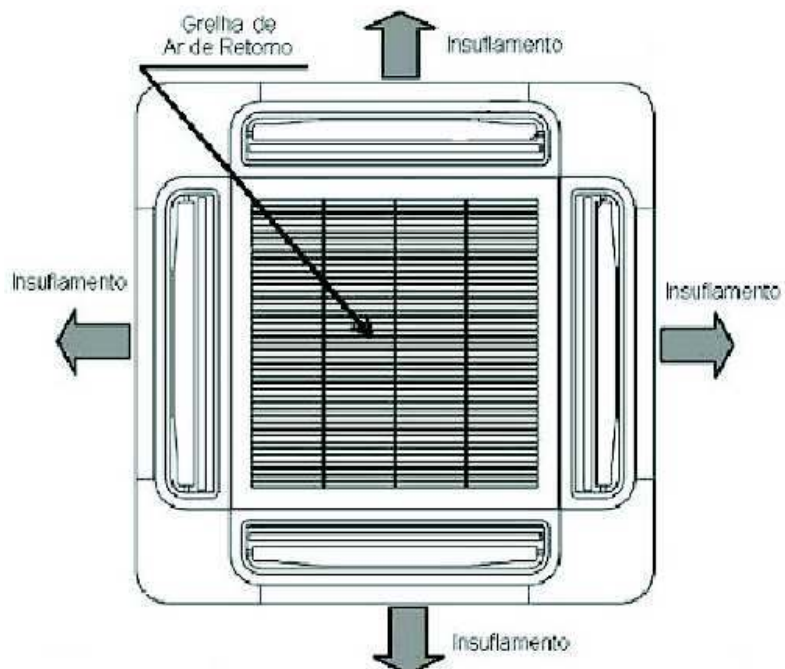


Figura 3.3: Insuflamento do ar já condicionado no ambiente.

A unidade interna possui também uma entrada para renovação de ar, sendo que o duto para tomada de ar externo foi instalado na posição sul do auditório. A vazão de entrada do ar externo é controlada por meio da abertura e fechamento de um damper. O posicionamento do damper de ar de retorno pode ser ajustado via potenciômetro.

A unidade de condicionamento de ar possui ciclo reverso, quente/frio, entretanto, na aplicação de controle apresentada nesta Dissertação analisou-se apenas ciclo de resfriamento. A Figura 3.4 apresenta o ciclo de refrigeração da unidade de condicionamento de ar utilizada, com a indicação do sentido de fluxo do refrigerante apenas no ciclo de resfriamento.

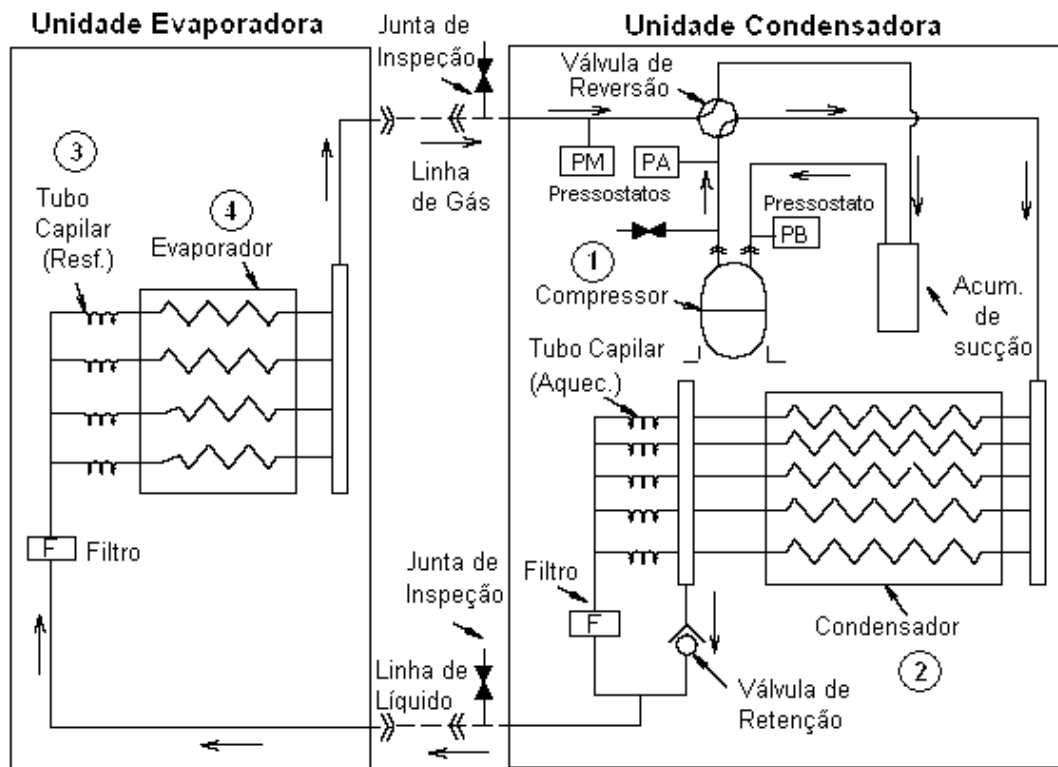


Figura 3.4: Ciclo frigorífico (resfriamento).

O ciclo de refrigeração é constituído pelos seguintes processos: compressão do fluido refrigerante (1); condensação do fluido (2); expansão do fluido condensado (3) e evaporação do fluido (4).

Como pode ser visto na Figura 3.4, o início do ciclo de refrigeração ocorre no compressor (1), onde é realizado o processo de compressão do fluido refrigerante.

O fluido, em alta pressão, circula do compressor para o condensador (2). O condensador é um trocador de calor, onde o fluido aquecido (em alta pressão) troca calor com o ambiente. Para auxiliar esta troca de calor, a unidade condensadora é equipada com dois ventiladores. Após a condensação o fluido passa pelo processo de expansão no tubo capilar da unidade evaporadora (3), e evapora-se no evaporador (4). O evaporador é um trocador de calor, onde o ar que circula no ambiente é resfriado, movimentado pela ação do ventilador. O fluido que sai do evaporador, antes de ser comprimido, passa pelo acumulador de sucção, o acumulador de sucção impede a entrada de líquido no compressor e também armazena o restante do fluido que não está em circulação.

Dentre os elementos acessórios que compõem o sistema, tem-se os filtros, as juntas de inspeção, a válvula de retenção. Têm-se também os pressostatos. No duto de saída do compressor está instalado um pressostato de alta e no duto de entrada um pressostato de baixa, para a garantia da segurança de operação do sistema. O pressostato também atua sobre o motor do ventilador do condensador, para que a temperatura de condensação não se torne muito baixa.

3.3.1 Modos de Operação e Controle

O controle incorporado nesta unidade de condicionamento de ar impõe ciclos On/Off no compressor (trabalhando a uma frequência nominal). Os pressostatos e um termostato (instalado no interior da unidade interna, próximo da grelha de ar de retorno) atuam no compressor e no ventilador do condensador para manter a temperatura do ambiente condicionado no nível estabelecido (entre 18°C e 30°C) e manter seguras as condições de operação do sistema.

Neste sistema de condicionamento de ar, pode-se também variar a vazão do ar condicionado que entra no interior do auditório, através da velocidade do ventilador do evaporador e do posicionamento dos dampers de insuflamento. O motor do ventilador do evaporador pode operar em três velocidades (alta/média/baixa) para o insuflamento do ar condicionado no ambiente, entretanto, a alteração entre estas 3 velocidades provoca uma pequena alteração na carga de refrigeração.

Os dampers de insuflamento de ar podem operar em posições fixas ou operar em varredura contínua.

Este sistema de condicionamento de ar é equipado com um controle remoto sem fio de pequeno alcance (3 metros aproximadamente), onde a unidade receptora se encontra instalada na unidade interna. As funções de ajuste do set-point de temperatura, ajuste da velocidade do motor do evaporador, da varredura (“sweep”) do damper de insuflamento, e ajuste do modo de operação (ventilação, resfriamento ou aquecimento) podem ser acionadas via controle remoto.

3.4 Instrumentação Incorporada ao Sistema

Para se analisar um sistema de condicionamento de ar é importante que variáveis do sistema sejam monitoradas, além das grandezas elétricas e ambientais. Para tanto, novos instrumentos de medição e atuação foram incorporados ao sistema. Sensores e atuadores foram especificados e instalados na unidade de condicionamento de ar.

3.4.1 Variáveis Monitoradas

Uma unidade de condicionamento de ar deve manter o ambiente dentro das especificações inerentes ao uso do local. Sua função é fornecer ar nas condições adequadas de temperatura, umidade, vazão e velocidade, visando o conforto térmico e a sua qualidade. O sistema de controle, além de garantir as variáveis desejadas de operação, também deve visar o uso eficiente da energia. A escolha das variáveis monitoradas foi realizada para atender esses objetivos. Para o sistema em questão, na versão atual, são monitoradas temperaturas, umidades, correntes elétricas e claridade. Medidas de pressão e de velocidade do ar poderão ser acrescentadas ao sistema.

No sistema de condicionamento de ar, são monitoradas variáveis térmicas e elétricas. Quanto às variáveis térmicas, foram escolhidos pontos importantes para prover o balanço energético do sistema, sendo os sensores de temperatura

instalados conforme apresentado na Figura 3.5, cujas variáveis estão descritas na Tabela 3.1. As variáveis elétricas estão descritas na Tabela 3.2.

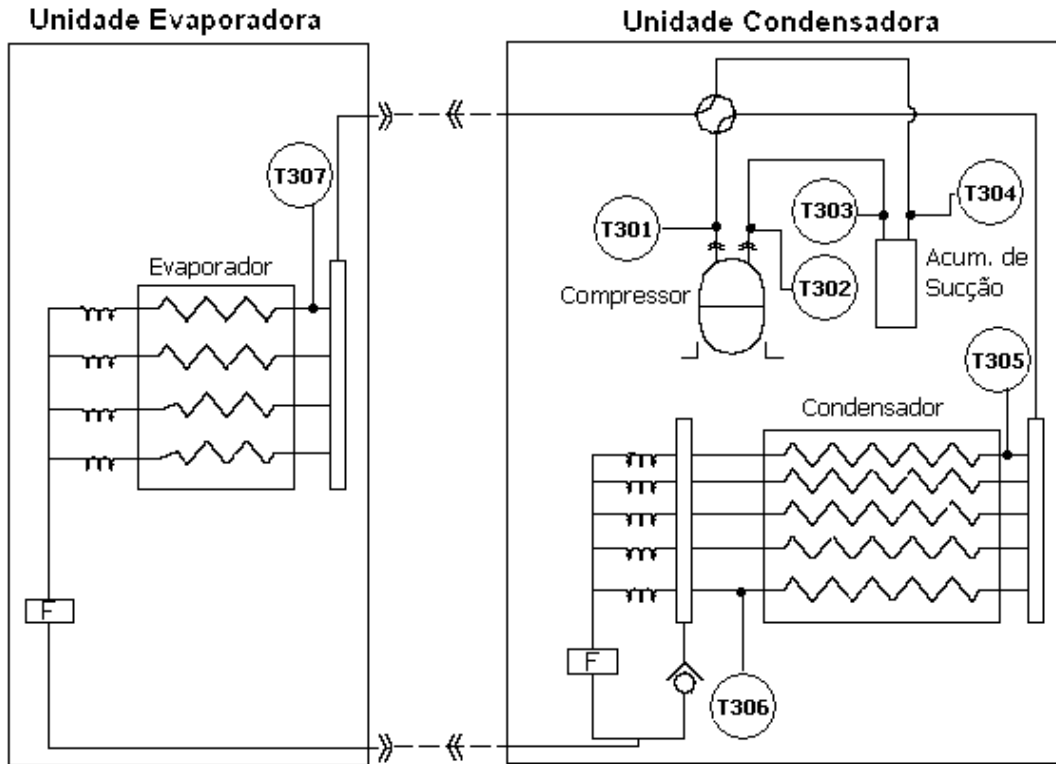


Figura 3.5: Localização dos sensores de temperatura (T301 a T307) no sistema de condicionamento de ar.

No ambiente, são monitoradas temperatura e umidade do ar (internas e externas ao ambiente condicionado), e claridade. Como pode ser visto na Figura 3.6, sensores de temperatura e umidade foram instalados em diversos pontos, e um sensor de claridade foi instalado no ambiente externo. A Tabela 3.3 apresenta a relação das variáveis ambientais internas e a Tabela 3.4 as variáveis ambientais externas que estão sendo monitoradas. O diagrama P&I do sistema é apresentado no Apêndice C.

Tabela 3.1: Variáveis térmicas monitoradas no sistema de condicionamento de ar do CPEI

Sensor	Variável Monitorada
T301	Temperatura na saída do compressor
T302	Temperatura na entrada do compressor
T303	Temperatura na saída do acumulador de sucção
T304	Temperatura na entrada do acumulador de sucção
T305	Temperatura na entrada do condensador
T306	Temperatura na saída do condensador
T307	Temperatura na saída do evaporador

Tabela 3.2: Variáveis elétricas monitoradas no sistema de condicionamento de ar do CPEI

Sensor	Variável Monitorada
I301	Corrente total do sistema do sistema de condicionamento de ar
I302	Corrente do ventilador do evaporador

Tabela 3.3: Variáveis ambientais internas monitoradas no ambiente condicionado

Sensor	Variável Monitorada
T101	Temperatura do ar de retorno
T102	Temperatura do ar na saída do evaporador
T103	Temperatura do ar parede sul
T104	Temperatura do ar parede leste
T105	Temperatura do ar parede norte
T106	Temperatura do ar parede oeste
T107	Temperatura do piso
T108	Temperatura do teto
U101	Umidade Interna

Tabela 3.4: Variáveis ambientais externas monitoradas no CPEI

Sensor	Variável Monitorada
T201	Temperatura do ar externo (sul)
U201	Umidade Externa
C201	Claridade Externa

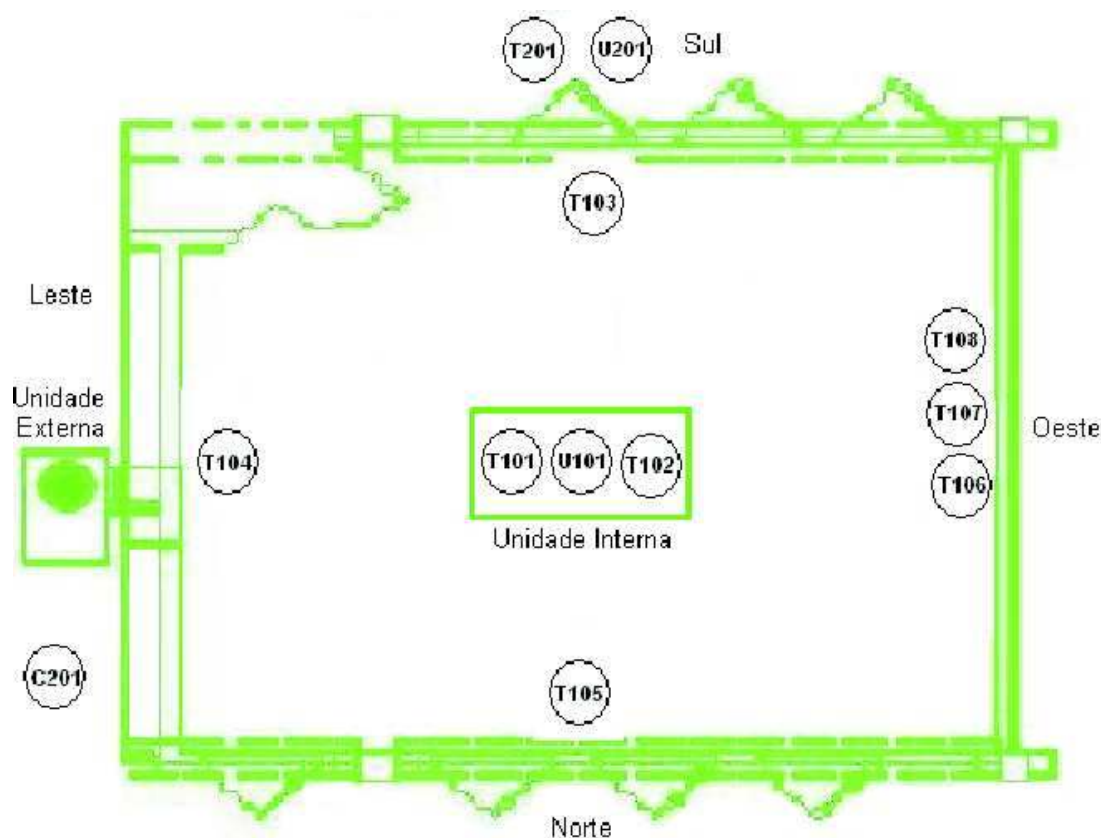


Figura 3.6: Variáveis ambientais monitoradas no CPEI.

3.4.2 Sensores e Atuadores

Os sensores foram selecionados levando em conta a robustez, a incorporação de circuito de condicionamento e o custo. O custo médio dos sensores utilizados é apresentado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Custo médio dos sensores utilizados

Sensor	Custo
Temperatura	U\$\$ 5,00
Umidade	U\$\$ 40,00
Corrente	U\$\$ 3,00
Claridade	U\$\$ 1,00

Como sensor de temperatura utilizou-se um transmissor, tipo termistor, o LM35 da National Semiconductor [National, 2000], o qual a faixa de temperatura (-55°C a 150°C) atende todas as medições necessárias. O LM35 possui saída em

tensão linear ($10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$), com uma resolução de $0,5^{\circ}\text{C}$. O sinal de saída do sensor foi amplificado utilizando um módulo de amplificação de sinais, este módulo foi projetado com um circuito amplificador de diferenças, e disponibiliza também ajuste de offset na entrada e um filtro capacitivo.

Como sensor de umidade do ar utilizou-se o HIH3610 [Honeywell, 2005], cujo elemento sensor é um polímero capacitivo com um circuito de condicionamento de sinal integrado, sendo a saída linear em tensão, proporcional a umidade relativa (0,8 a 3,9V para 0 a 100% de umidade relativa), a resolução do sensor é de 2% de umidade relativa.

O elemento sensor de corrente escolhido foi um toróide com circuito de condicionamento externo. O toróide utilizado tem capacidade de corrente de até 100 Amperes. O módulo de amplificação e retificação de sinais (MARS), foi utilizado para o condicionamento.

Como elemento primário de sensor de claridade utilizou-se um LDR (“Light Dependent Resistor”) em um divisor resistivo. Os LDRs são células fotocondutivas, cuja resistência da célula diminui com o aumento da intensidade luminosa. O divisor resistivo foi projetado para fornecer uma saída em tensão de 0 a 2,5V para 0 a 100% de claridade. A grandeza claridade foi definida, uma vez que, o objetivo deste sensor não é fornecer o valor da luminosidade em Lux, e sim fornecer uma idéia da claridade do ambiente, definida em termos percentuais. Entretanto, este elemento sensor foi calibrado com luxímetro padrão.

Para o sistema de atuação em questão decidiu-se pela incorporação de um inversor de frequência, possibilitando um controle mais eficiente. No sistema de controle original do equipamento de condicionamento de ar (On/Off), devido ao tempo entre o liga/desliga do compressor uma grande variação de temperatura ocorre no ambiente condicionado. Este tempo mínimo do compressor desligado (em Off) é necessário para evitar partidas consecutivas do compressor. Uma melhor eficiência (em termos energéticos e da qualidade do controle) pode ser obtida variando a velocidade do compressor scroll, de tal forma a controlar a capacidade de refrigeração.

O inversor de frequência utilizado foi o CFW-09 da WEG versão 2.4x, que permite uma variação de frequência de 0 a 204Hz (para rede de 60Hz), com controle de velocidade em modo escalar ou vetorial, e controle de torque vetorial, programável. O CFW-09 possui entradas e saídas analógicas, entradas digitais, e saídas a relés programáveis, e uma porta para comunicação serial padrão RS232. O CFW-09 é equipado com uma interface homem máquina para comando e supervisão, e opcionalmente com módulos de expansão para comunicação em rede (Modbus RTU, FieldBus, ProfiBus DP, DeviceNet) [WEG, 2003].

Para habilitar e desabilitar o inversor de frequência utilizou-se um relé auxiliar JXC2RA4 da Metaltex [Metaltex, 2006], acoplado na saída do contator do motor do compressor do condicionador de ar, de tal forma que as proteções originais do equipamento de condicionamento de ar fossem mantidas, ver diagrama no Apêndice B.

Para atuação On/Off foi utilizado o micro relé reed SH1NAC-5V da Metaltex [Metaltex, 2005], com um contato normalmente aberto, acionado pelas saídas digitais da estação CAN-PIC.

É importante ressaltar que, com a estrutura instalada no CPEI, a ampliação do sistema de medição e atuação é de fácil implementação e de baixo custo. Novas medições e novos dispositivos de atuação poderão ser agregados ao sistema.

3.5 Análises Provenientes do Monitoramento das Variáveis Ambientais e do Sistema

Com o sistema de monitoramento implementado no CPEI, uma avaliação criteriosa do desempenho da edificação pode ser elaborada e fornecidos os subsídios para o gerenciamento de energia, integrando as condições climáticas ao sistema de condicionamento de ar, à edificação e ao seu uso. Com a aquisição dos dados, é possível se conhecer o comportamento dinâmico das variáveis e as possíveis correlações existentes entre elas. As características dominantes do sistema são utilizadas na escolha de estratégias de controle e nos projetos de controladores.

O monitoramento contínuo das variáveis ambientais, térmicas e elétricas do sistema de condicionamento de ar, propicia uma variada gama de análises, tanto do ponto de vista da edificação quanto do sistema de condicionamento de ar, dentre as quais pode-se citar:

- avaliação do desempenho energético da edificação, do ponto de vista térmico, elétrico e luminoso;
- avaliação das correlações existentes entre as variáveis ambientais, tais como, por exemplo, entre temperatura interna e externa, entre a temperatura interna e a “claridade” externa;
- avaliação do conforto térmico;
- avaliação da qualidade do ar e de sua distribuição no ambiente;
- avaliação da influência térmica das pessoas no ambiente (cálculo da carga de ocupação);
- análise de falhas do sistema de condicionamento de ar;
- análise das taxas de transferência de calor e das potências envolvidas no sistema de condicionamento de ar;
- avaliação do coeficiente de desempenho do ciclo de compressão de vapor do sistema de condicionamento de ar, e muitas outras.

A partir das análises provenientes do monitoramento deste grande número de variáveis ambientais e do sistema, e com o novo sistema de atuação incorporado, medidas corretivas e estratégias de controle poderão ser adotadas para uma melhor eficiência da edificação, alcançando tanto ganhos energéticos quanto de conforto.

3.6 Definição das Variáveis a serem Controladas e Manipuladas

O objetivo do sistema de controle implementado neste trabalho, é o conforto térmico no interior do ambiente e a redução no consumo de energia. Para tanto, o sistema de controle deve manter a temperatura no interior do ambiente no nível estabelecido e otimizar o consumo de energia, garantindo a segurança de operação do sistema.

A variável controlada neste primeiro estudo é a temperatura interna da sala no ponto central (temperatura do ar de retorno T101 ver Figura 3.6) e a variável manipulada é a velocidade no motor do compressor. A atuação será realizada via inversor de frequência trabalhando em uma faixa de 30Hz a 60Hz, o que corresponde à velocidade no motor de 1800rpm a 3600rpm, com controle escalar V/F constante. O valor de referência de frequência (setpoint) gerado pelo controlador é disponibilizado para o inversor via uma saída PWM do microcontrolador. O esquema elétrico do sistema de condicionamento de ar com a incorporação do inversor de frequência é apresentado no Apêndice B.

Capítulo 4

Modelagem Matemática e Definição da Estratégia de Controle

4.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se algumas considerações iniciais sobre os modelos matemáticos e a metodologia utilizada para obtenção dos mesmos. Os modelos obtidos serão utilizados no projeto do controlador.

Um modelo pode ser entendido como uma forma eficaz de compactação de conhecimento. Um modelo é uma representação mental (abstrata), ou física (concreta), ou gráfica ou matemática de observações feitas no mundo real de acordo com um certo padrão [Ljung, 1987].

Os modelos matemáticos descrevem relações entre variáveis em termos de expressões matemáticas ou equações. Eles são ferramentas poderosas no projeto, análise e otimização de sistemas de controle de processos industriais. Na realidade, grande parte do trabalho no campo da engenharia lida com o problema de fazer bons projetos baseados em modelos matemáticos [Ljung, 1987].

Os modelos matemáticos podem ser classificados de várias maneiras: estáticos e dinâmicos, discretos e contínuos, lineares e não lineares, determinísticos e estocásticos, monovariáveis e multivariáveis, paramétricos e não paramétricos, entre outros [Ljung, 1987].

A modelagem matemática é a área do conhecimento que estuda maneiras de desenvolver modelos matemáticos de sistemas reais [Aguirre, 2000]. Um modelo matemático de um sistema real é uma representação matemática das características observadas em tal sistema. O uso pretendido determina o grau de formalismo matemático.

Os modelos matemáticos de um sistema real podem ser obtidos com base nos princípios da física do processo ou baseados em dados experimentais. A modelagem fenomenológica, pela física do processo, é também conhecida como modelagem caixa branca. A modelagem empírica, baseada nos dados de entrada e saída obtidos diretamente do processo, é conhecida como modelagem caixa preta. Existe também a modelagem caixa cinza, na qual utiliza-se informações adicionais do processo, que não se encontram nos dados utilizados para a identificação.

Um mesmo modelo matemático pode ser representado de várias maneiras, entre elas: funções de transferência, equações de estado, equações discretas, resposta em frequência. No desenvolvimento desta Dissertação, optou-se pela representação dos modelos matemáticos por meio de funções de transferência.

No presente trabalho, devido à dificuldade de obtenção de um modelo físico e da complexidade do modelo resultante, como um primeiro estudo decidiu-se por fazer a identificação do modelo baseado em dados experimentais.

4.2 Determinação dos Modelos

Na construção de modelos empíricos, que visam os projetos de sistemas de controle, procuram-se estruturas simplificadas e conhecidas que se aproximem o máximo possível das características verificadas no sistema real, onde estruturas de primeira ou segunda ordem, geralmente atendem estas condições.

A malha de temperatura interna do auditório foi escolhida como objeto de estudo, para tanto objetiva-se a obtenção de um modelo simplificado que represente a relação entre a temperatura interna do auditório e o valor de referência de frequência para o inversor.

4.2.1 Considerações sobre os Ensaios Realizados

O conjunto de dados para a determinação dos modelos empíricos foram obtidos a partir de ensaios de resposta ao degrau. Os modelos obtidos por este método têm a precisão necessária para o sistema de controle proposto neste trabalho. Os ensaios foram realizados aplicando variações de frequência (na forma de degrau) no inversor.

Para a aquisição dos dados foi utilizada a plataforma do CMUF, com um intervalo de amostragem de 15 segundos. Os dados dos ensaios foram coletados pelo sistema de monitoramento e armazenados no banco de dados.

Os modelos matemáticos obtidos a partir dos ensaios de resposta ao degrau realizados representam o sistema em uma certa condição de operação. Os modelos foram obtidos para o auditório vazio, com todas as lâmpadas acessas, as cortinas fechadas, em um dia de verão ensolarado, com o sistema de condicionamento de ar operando no modo de resfriamento, o ventilador do evaporador operando em velocidade alta, com os dampers de insuflamento de ar totalmente abertos, e o damper para a tomada de ar externo fechado.

Foram aplicados para a geração de três conjuntos de dados, degraus de 30Hz, 45Hz e 60Hz. As respostas do sistema operando nas condições descritas acima, nos degraus de 30Hz, 45Hz e 60Hz são apresentadas na figura 4.1.

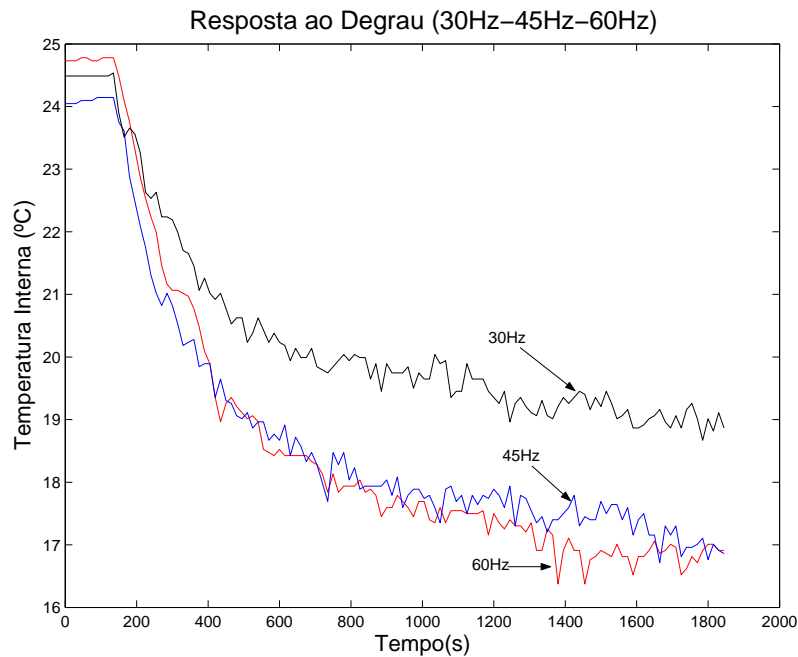


Figura 4.1: Resposta ao degrau, nas frequências de 30Hz, 45Hz e 60Hz, degrau aplicado no tempo 150 segundos.

4.2.2 Método de Identificação

O método utilizado para identificação do modelo foi o “Método da Resposta Complementar” [Doebelin, 1990]. Este método consiste em obter o logaritmo da resposta complementar, $\ln(1-q_0/(k.q_i))$, em função do tempo, onde q_0 corresponde à saída do sistema, k o ganho, e q_i a entrada do sistema (já descontado o tempo morto). Uma vez obtida esta curva, deve-se obter a melhor função linear correspondente a assíntota da curva logarítmica para valores elevados de t [Rodrigues et al., 1998].

Se a curva obtida puder ser aproximada por uma reta conforme apresentado na Figura 4.2 (b), o sistema poderá ser representado por um modelo de primeira ordem. Se a curva for do tipo da Figura 4.3 (b), o modelo será de segunda ordem.

A partir destas curvas, obtêm-se os parâmetros do modelo, $(k \text{ e } \tau)$ no caso de modelos de primeira ordem, e $(k, \tau_1 \text{ e } \tau_2)$ no caso de sistemas de segunda ordem [Doebelin, 1990].

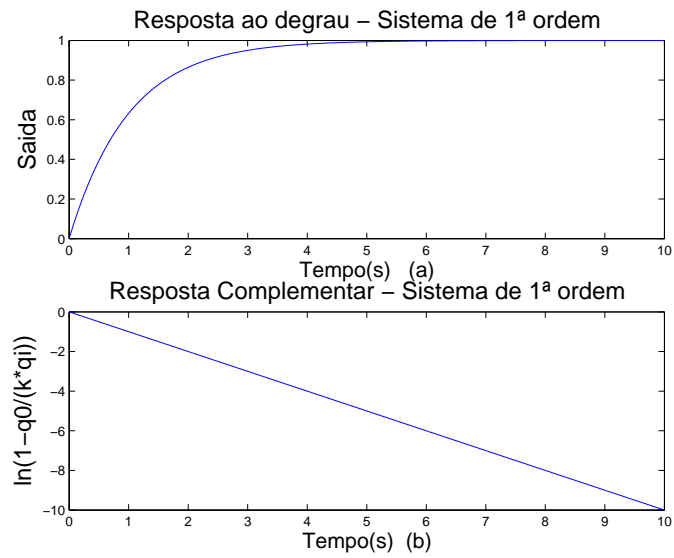


Figura 4.2: Sistema de primeira ordem (a) resposta ao degrau (b) resposta complementar.

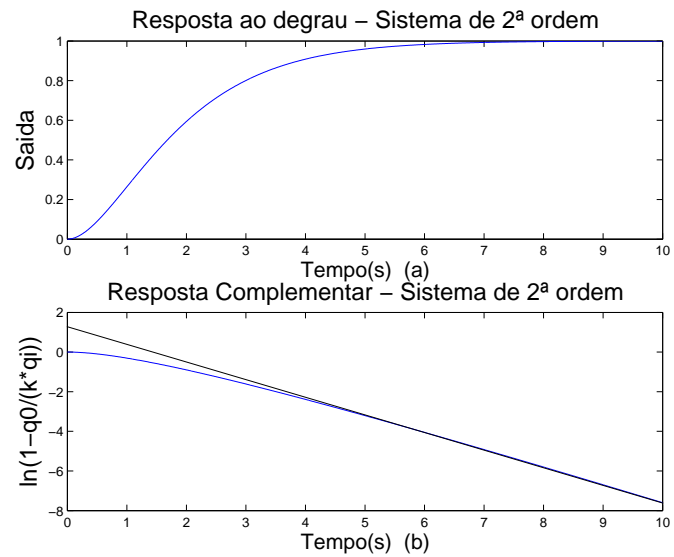


Figura 4.3: Sistema de segunda ordem (a) resposta ao degrau (b) resposta complementar e assíntota.

4.2.3 Modelos Obtidos

Aplicando-se o “Método da Resposta Complementar”, obteve-se a curva apresentada na Figura 4.4, apesar da resposta aproximar-se de um sistema de segunda ordem, preferiu-se a representação simplificada utilizando-se um modelo de primeira ordem. Os modelos identificados foram de primeira ordem sem atraso puro de tempo. Foram identificados os modelos para as frequências de 30Hz, 45Hz e 60Hz, entretanto, como primeiro estudo decidiu-se por utilizar o modelo identificado para a frequência de 60Hz. Os demais modelos poderiam ser analisados e técnicas de controle chaveado [Pena, 2002], por exemplo, poderiam ser utilizadas na implementação das estratégias de controle, entretanto, este não era o enfoque desta Dissertação e limitou-se à utilização de um único modelo para representar o processo.

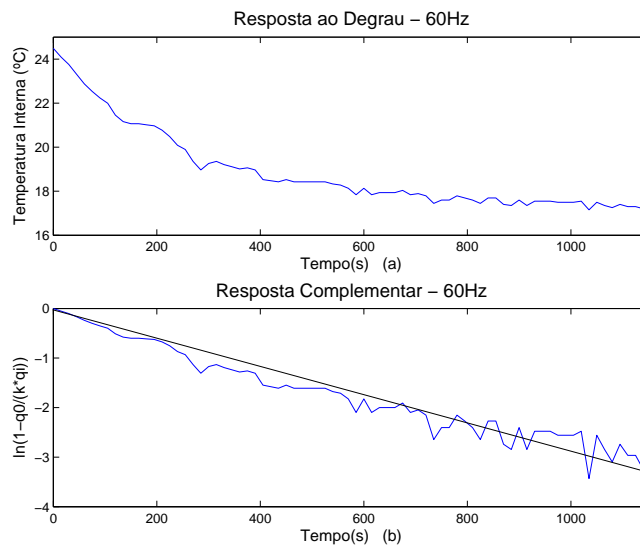


Figura 4.4: (a) resposta ao degrau (b) resposta complementar e assíntota (para a frequência de 60Hz).

O modelo obtido para a malha de temperatura interna, a uma frequência de 60Hz, é apresentado em (4.1).

$$Gp(s) = \frac{-0,634}{300s + 1} \quad (4.1)$$

A Figura 4.5 apresenta a resposta ao degrau do modelo simulada, sobreposta

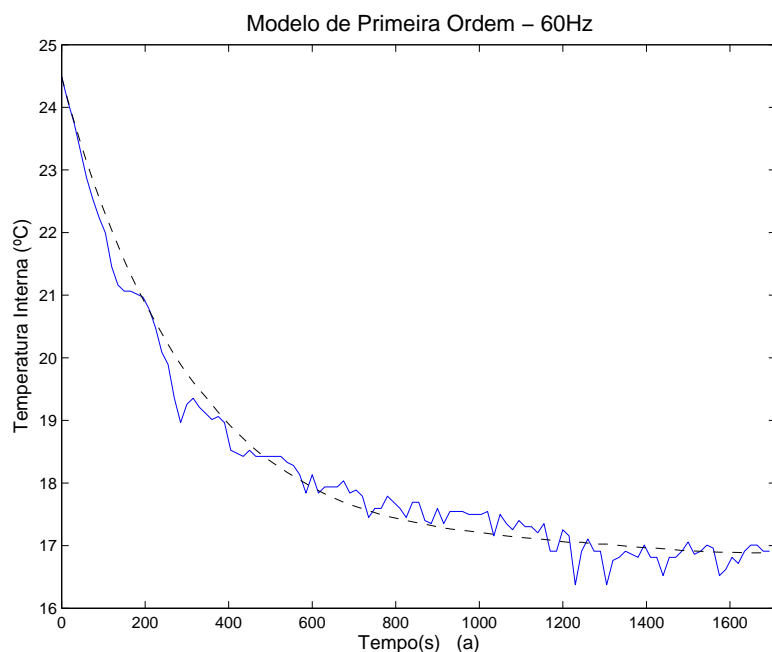


Figura 4.5: (- -)Modelo de primeira ordem - 60Hz (-) temperatura interna (em 09/01/2006)

à resposta do sistema real.

4.2.4 Validação do Modelo

A validação é uma etapa importantíssima no processo de modelagem. Para que seja comprovada a qualidade de um modelo obtido é necessário que este seja validado. Objetiva-se avaliar se o modelo é “suficientemente bom” para o uso pretendido [Ljung, 1987].

Uma técnica usual para a validação de modelos matemáticos, consiste na comparação da resposta transitória do modelo em relação à resposta obtida na planta, para a mesma excitação de entrada (uma entrada degrau, por exemplo). O conjunto de dados utilizados para obter o modelo não deve ser usado para a validação do mesmo.

Para prover a validação do modelo, os dados de entrada coletados em um ensaio realizado no sistema foram utilizados como entrada para a simulação do modelo. A resposta do sistema real e do modelo, para o setpoint da temperatura interna do auditório em 23°C, é apresentada na Figura 4.6.

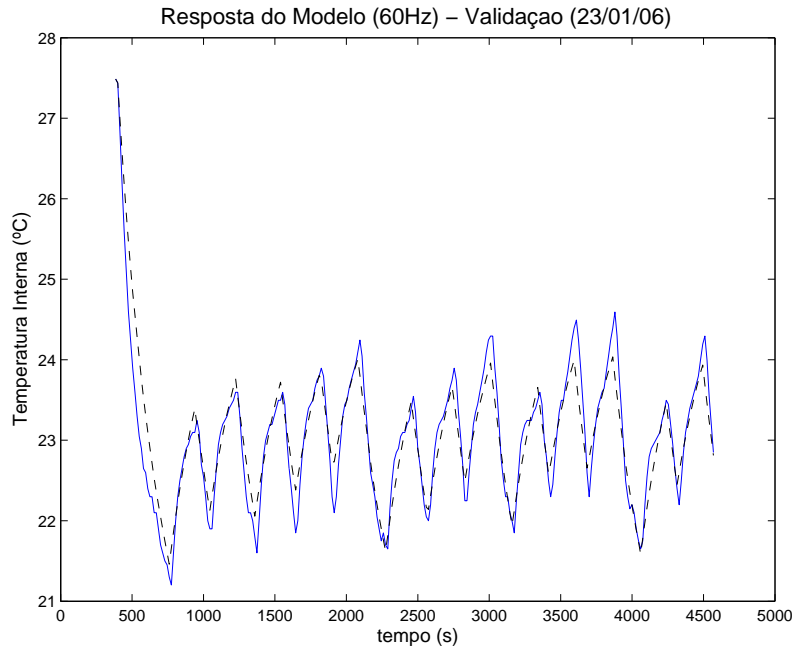


Figura 4.6: (- -)Modelo de primeira ordem - 60Hz (-) temperatura Interna 23/01/2006.

Para a condição de operação ao qual o modelo foi proposto, a validação do mesmo é bastante satisfatória. O resultado obtido revela a validade do modelo dentro das condições abrangidas neste trabalho.

4.3 Projeto do Controlador

4.3.1 Definição da Estratégia de Controle

Tendo em vista que algoritmo de controle PI (Proporcional e Integral) se adequa bem ao controle de sistemas de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar [Nesler, 1986], este foi o escolhido para a implementação neste trabalho.

A equação clássica de um controlador PI ideal tem a forma:

$$m(t) = Kc \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int e(t) dt \right)$$

sendo $m(t)$ o sinal de saída do controlador, Kc e T_i os parâmetros ganho proporcional e tempo integral do controlador e $e(t)$ o erro. Em termos da transformada

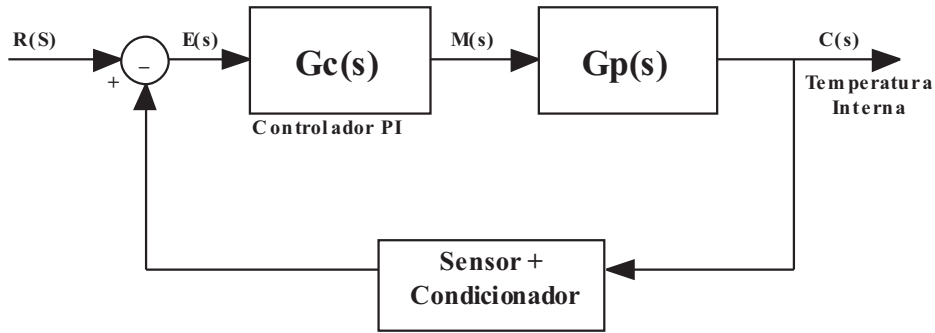


Figura 4.7: Malha de controle com realimentação.

de Laplace, tem-se:

$$M(s) = Kc \cdot \left(1 + \frac{1}{sT_i}\right) \cdot E(s)$$

logo,

$$Gc(s) = Kc \cdot \left(1 + \frac{1}{sT_i}\right)$$

O projeto de controladores PI consiste em determinar os parâmetros Kc (ganho proporcional) e Ti (tempo integral) baseado em algum método para projeto e sintonia, onde o método utilizado neste trabalho foi o da Síntese Direta [Seborg et al., 1989] que será descrito no item a seguir.

Na Figura 4.7 é apresentado o diagrama de blocos de uma malha de controle com realimentação típica, cuja estrutura será utilizada neste projeto.

4.3.2 Determinação dos Parâmetros do Controlador

O projeto de controladores a partir do modelo matemático do processo e uma especificação da resposta desejada em malha fechada é conhecido como Método da Síntese Direta [Seborg et al., 1989]. A importância do método direto reside no fato de se estabelecer uma relação direta entre o processo e o controlador resultante [Jota, 1998].

A aplicação do método direto consiste na especificação da resposta em malha fechada desejada $(C/R)_d$. Para funções de transferência em malha fechada

especificadas de primeira ordem:

$$\left(\frac{C}{R}\right)_d = \frac{e^{-\theta_c s}}{\tau_c s + 1} = \frac{G_c G}{1 + G_c G}$$

com

$$G(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1}$$

e $\theta_c=0$, obtém-se:

$$G_c(s) = \frac{\tau s + 1}{K(\tau_c + \theta)s} = \frac{\tau}{K(\tau_c + \theta)} \left(1 + \frac{1}{\tau s}\right)$$

que tem a estrutura de PI com

$$K_c = \frac{\tau}{K(\tau_c + \theta)} \quad e \quad T_i = \tau$$

onde o parâmetro K corresponde ao ganho, τ à constante de tempo e θ ao tempo morto (em segundos) do modelo da planta, e τ_c a constante de tempo desejada para malha fechada.

Os parâmetros do controlador obtidos, para a constante de tempo em malha fechada igual a um décimo da constante de tempo em malha aberta ($\tau_c = 0,1 \tau = 30s$), são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Parâmetros do controlador PI para $\tau_c=30s$

Parâmetros	K_c	T_i
	-15,8	300

A Figura 4.8 apresenta a resposta ao degrau da malha de controle, simulada. Observa-se que a resposta atende aos requisitos de projeto, sendo de primeira ordem com τ de 30 segundos.

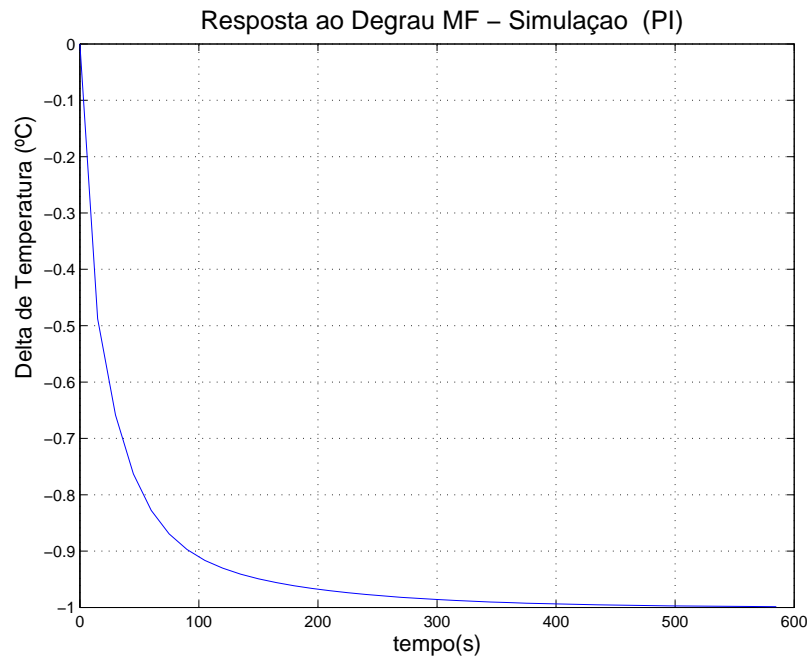


Figura 4.8: Resposta ao degrau em malha fechada (simulação).

4.4 Implementação Prática do Controlador

Uma vez definida a estrutura e os parâmetros dos controladores, para a implementação prática dos mesmos nos microcontroladores, que utilizam sistemas de tempo discreto, é necessário fazer a transposição dos parâmetros em “s” (tempo contínuo) para “z” (tempo discreto).

A equação de diferenças foi obtida com a discretização do controlador, utilizando o método da aproximação retangular, onde o operador s é aproximado pela seguinte expressão:

$$s \simeq \frac{1 - z^{-1}}{T}$$

onde T é o período de amostragem. Escolheu-se o período de amostragem, igual a um décimo da constante de tempo do modelo da planta ($T = 0,1\tau = 30$ segundos).

O algoritmo do controlador PI discreto implementado no microcontrolador é apresentado na tabela 4.2 [Jota and Pena, 1994].

Um problema que deve ser levado em conta na implementação do controlador é o efeito da saturação dos atuadores, que constitui uma das maiores fontes de li-

Tabela 4.2: Algoritmo do controlador PI implementado no microcontrolador [Jota and Pena, 1994]

Passos	Controlador PI Realimentado
1	se modo manual, $m(kT)=MAX$, vá para (9)
2	medição e condicionamento de $c(kT)$
3	tome o valor de referência $r(kT)$
4	$e(kT) = r(kT) - c(kT)$
5	$m(kT) = m(kT-1) + [Kc*e(kT)] + [(Kc/Ti) - Kc]*(1-T/Ti)*e(kT-1)$
6	Se $m(kT) \leq MIN - \delta$ e $c(kt) < r(kt)$, [Desliga AC]
7	Se $m(kT) \geq MIN$ e AC Desligado, [Liga AC]
8	Se $m(kT) \geq MAX$, $m(kT)=MAX$
9	envie sinal de controle

mitação de desempenho do sistema . Para contornar este problema, o controlador PI foi implementado com um compensador “anti-windup”. A função da estrutura “anti-windup” é garantir que os estados internos do controlador estejam consistentes com o sinal de controle aplicado no sistema [Tyan and Bernstein, 1994] e [Shin, 1998]. O compensador foi implementado com uma histerese (δ) em torno do valor mínimo, para evitar o chaveamento constante do compressor, sendo que os passos (6),(7) e (8) do algoritmo apresentado na Tabela 4.2, descrevem a estrutura “anti-windup”.

4.5 Avaliação de Desempenho do Controlador

O sucesso na escolha da melhor estratégia de controle ou tipo de controlador para uma dada aplicação é a avaliação de seu desempenho em condições reais [Braga and Jota, 1994]. A análise do desempenho não deve ser realizada baseada apenas em critérios subjetivos, pois é pouco provável que o avaliador consiga estabelecer os mesmos critérios para todos os casos. Torna-se então relevante a noção de índice global de desempenho baseado em métodos numéricos.

A avaliação de desempenho dos controladores foi realizada utilizando a ferramenta desenvolvida por Jota e Braga [Braga and Jota, 1994], onde tal ferramenta é capaz de quantificar continuamente (“online”) ou “off-line” o desempenho de controladores e gerar uma nota (na faixa de 0 a 100), baseada em avaliação

de múltiplos critérios. A avaliação é realizada baseada em índices convencionais, como Integral do Erro Absoluto (IEA), Integral do Erro Quadrático (IEQ), Integral do Erro Absoluto vezes o Tempo (IEAT), etc [Braga, 1994], que foram modificados para atender algumas propriedades necessárias para que os índices tenham utilidade prática. Na avaliação são considerados também índices para a atividade do sinal de controle (UA), o esforço de controle (UQ) e flutuações no sinal de saída (AY). Todos os sinais utilizados para a composição dos índices são normalizados, de forma a se obter valores numéricos comparáveis para as várias condições de operação.

Neste método, a avaliação de desempenho é realizada sob o ponto de vista de três diferentes grupos de interesse, o usuário, o gerente e o engenheiro de controle. Os índices propostos para quantificar os critérios de desempenho práticos são utilizados por cada grupo de interesse, obtendo-se assim um índice único para cada um dos três grupos.

Os objetivos de cada grupo se diferem. O gerente, por exemplo, tem como principal interesse os custos (de implantação do sistema de controle, do consumo de energia, de manutenção, etc) e a satisfação dos usuários. Outra consideração feita pelo gerente é o esforço e o tempo gasto na sintonia dos controladores. Os custos com manutenção estão relacionados com os desgastes e falhas do sistema, que por sua vez se relacionam com as variações (frequência e amplitude) do sinal de controle.

O usuário tem uma visão mais subjetiva do desempenho do sistema de controle, sendo seu principal interesse geralmente o conforto. O sistema de controle deve ser rápido, para tanto pondera-se a velocidade da resposta do controlador. Outra preocupação do usuário é a confiabilidade, de tal forma que não resulte em mau funcionamento ou interrupções do sistema.

O engenheiro de controle tem uma visão mais objetiva, prevalecendo os critérios baseado na capacidade do controlador de rejeitar perturbações, seguir o sinal de referência, estabilidade do sistema, insensibilidade a ruídos, etc. Outras características relevantes ao engenheiro de controle são: a atividade do sinal de

controle, a energia consumida, o tempo de resposta, e sobre elevação do sinal de referência.

Tabela 4.3: Pesos utilizados neste trabalho

Índice	Engenheiro	Gerente	Usuário
IEQ	1,00	0,25	0,50
IEA	1,00	0,25	0,50
IEQT	1,00	0,25	1,00
IEAT	1,00	0,25	1,00
IEM	1,00	0,25	1,00
IAY	1,00	0,50	1,00
IAU	1,00	1,00	0,05
IUQ	1,00	1,00	0,05

Para a determinação da nota de cada avaliador (gerente, usuário e engenheiro), os índices propostos são ponderados, de acordo com o julgamento de cada um. O conjunto de pesos proposto em [Braga and Jota, 1994], apresentado na Tabela 4.3, foi utilizado neste trabalho, onde a avaliação de desempenho foi realizada “off-line”.

O índice global de desempenho (GPI) é calculado pela média aritmética dos índices obtidos para o gerente (MPA), o usuário (UPA) e o engenheiro de controle (EPA).

No Capítulo a seguir serão apresentados os resultados obtidos com a implementação do controlador PI.

Capítulo 5

Análise dos Resultados

5.1 Considerações Iniciais

A grande maioria dos equipamentos de condicionamento de ar de expansão direta controla a temperatura impondo ciclos On/Off no compressor. As grandes oscilações de temperaturas que ocorrem entre os ciclos On/Off comprometem a condição de conforto térmico do usuário.

No estudo de caso realizado, um grande problema identificado no equipamento de condicionamento de ar é a má distribuição do ar no interior do ambiente, devido a limitações do equipamento. No ambiente em estudo, com baixa carga térmica (auditório vazio), observam-se variações de aproximadamente 4°C entre pontos distintos no interior do auditório, o que compromete a condição de conforto térmico e dificulta a definição da melhor estratégia de controle.

A implementação de sistemas de controle pode possibilitar redução expressiva no consumo de energia e, sobretudo, proporcionar o conforto.

Na secção a seguir são apresentados alguns resultados obtidos com a implementação do sistema de controle na planta real.

5.2 Resultados Obtidos

Para prover a análise dos resultados obtidos com a implementação do controlador PI, alguns ensaios foram realizados na planta. Os ensaios foram realizados com o sistema operando nas mesmas condições de operação descritas nos ensaios utilizados para modelagem (com o auditório vazio, todas as lâmpadas acessas, as cortinas fechadas, com o sistema de condicionamento de ar operando no modo de resfriamento, o ventilador do evaporador operando em velocidade alta, com os dampers de insuflamento de ar em uma posição fixa, e o damper para a tomada de ar externo fechado).

O primeiro ensaio realizado foi a resposta ao degrau, no qual o setpoint foi ajustado para 18°C. O referido ensaio foi realizado na planta com o controlador On/Off e com o controlador PI, para prover uma análise comparativa entre o desempenho dos dois controladores.

O gráfico da Figura 5.1 apresenta a resposta da temperatura interna e a corrente elétrica no condicionador de ar, para o sistema operando com controlador On/Off, e a Figura 5.2 a resposta do avaliador de desempenho. Observa-se que o sistema mantém uma variação na saída de 3,52°C em torno do setpoint, o que implica em grande desconforto térmico aos usuários, refletindo diretamente na avaliação do usuário. Do ponto de vista do gerente, o sistema de controle é melhor avaliado, visto que a frequência do sinal de controle não é muito elevada.

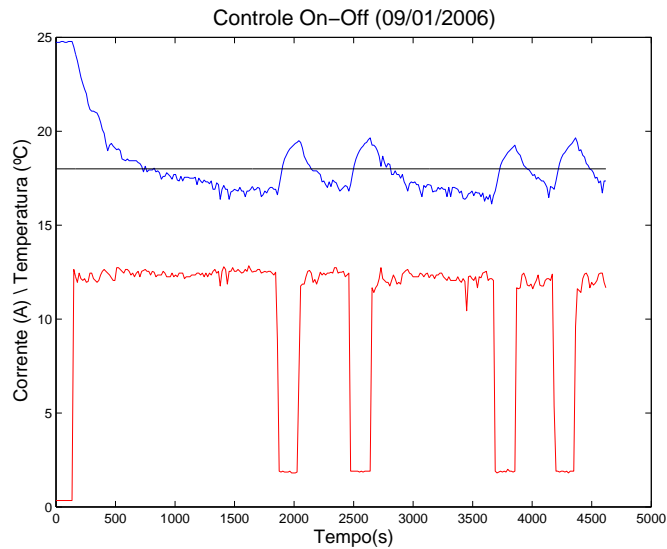


Figura 5.1: Temperatura interna (azul) e corrente no condicionador de ar (vermelho) com controlador On/Off para $SP=18^{\circ}\text{C}$.

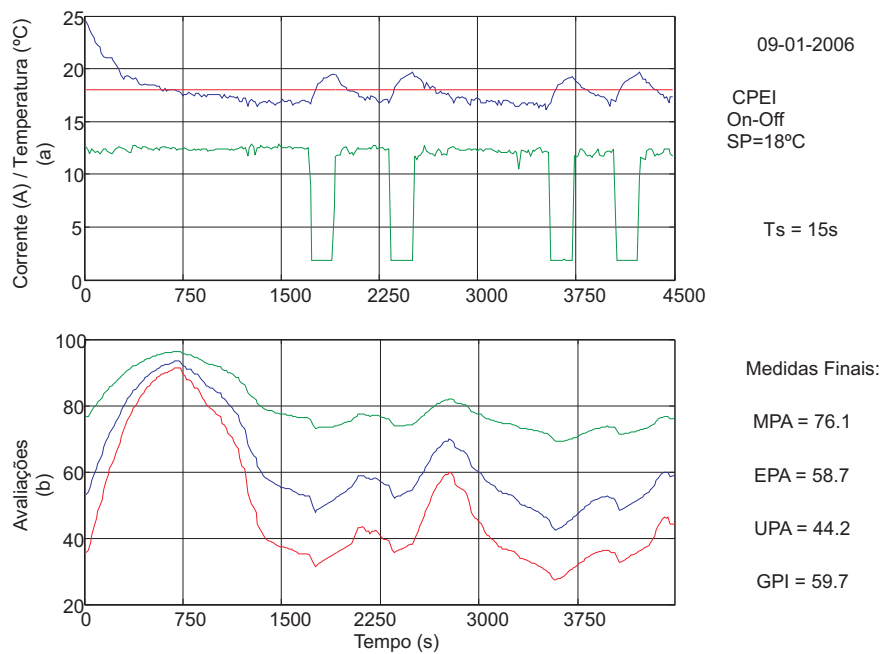


Figura 5.2: Resposta do avaliador de desempenho, para o controlador On/Off, com setpoint fixo em 18°C : (a) Temperatura interna (azul), Corrente no condicionador de ar (verde), Referência (vermelho); (b) Índice de avaliação do gerente MPA (verde), do engenheiro EPA (azul) e do usuário UPA (vermelho).

A resposta do sistema com o Controlador PI é apresentada na Figura 5.3. A temperatura interna apresentou variações de $0,93^{\circ}\text{C}$ em torno do setpoint. A corrente no condicionador de ar mantém um valor médio de $8,59$ Ampere, sem chaveamento do compressor. Como pode ser observado na Figura 5.4, as notas dos três avaliadores convergem para valores próximos, apesar de cada avaliador utilizar diferentes critérios de análise, existe uma convergência na interpretação dos resultados.

Na Figura 5.4 (a), em torno de 1.800 segundos, ocorre uma redução do sinal de saída de $0,65^{\circ}\text{C}$, sendo fortemente penalizada na avaliação do engenheiro de controle e do usuário, como pode ser verificado na Figura 5.4 (b). Uma variável considerada na avaliação do engenheiro é o esforço de controle, neste caso, por exemplo, o controlador poderia ter reduzido o sinal de controle para evitar a redução na temperatura interna, entretanto, não o fez, e portanto, foi penalizado, refletindo em uma redução na nota do engenheiro. Quanto ao usuário, este penaliza a variação da temperatura.

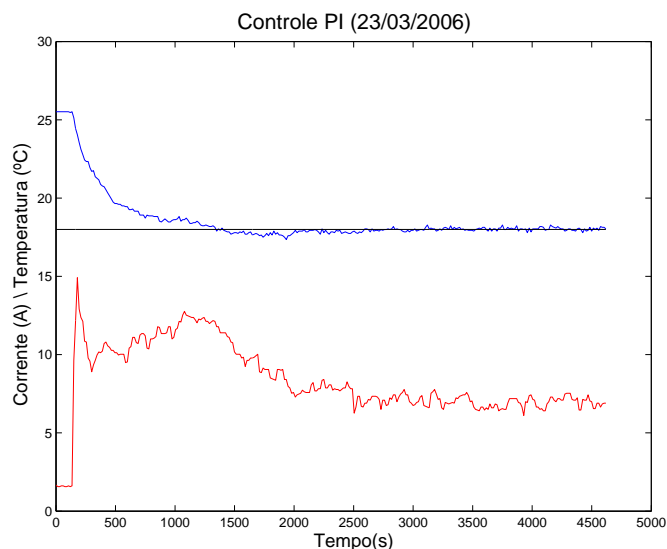


Figura 5.3: Temperatura interna (azul) e corrente elétrica no condicionador de ar (vermelho) com controlador PI para $SP=18^{\circ}\text{C}$.

O desempenho do sistema com a utilização do controlador PI é marcadamente superior ao sistema com controlador On/Off, o que é indicado por todos os avaliadores (gerente, engenheiro e usuário) e pelo índice global (GPI), apresentado

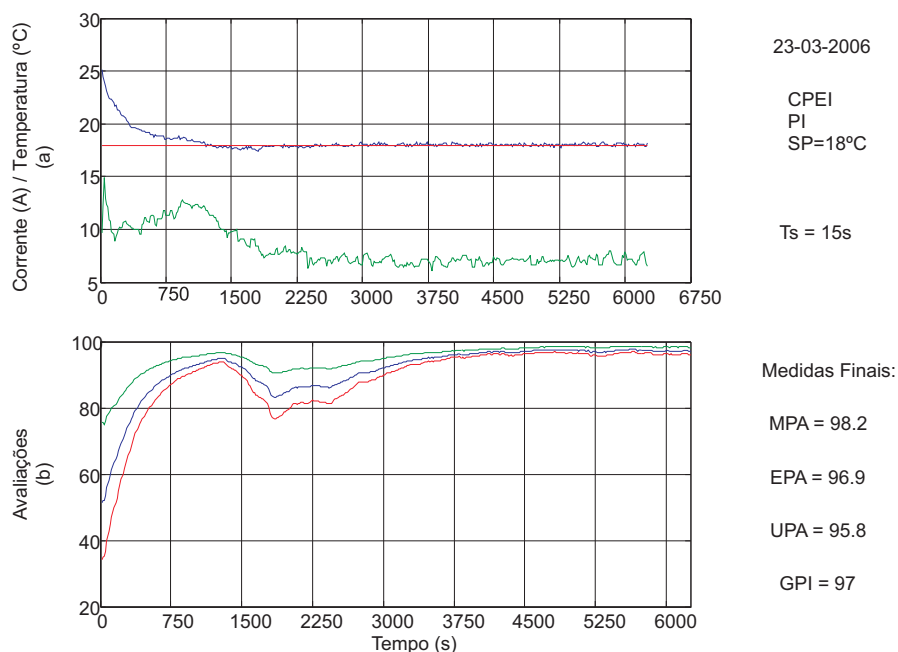


Figura 5.4: Resposta do avaliador de desempenho, para o controlador PI, setpoint fixo em 18°C: (a) Temperatura interna (azul), Corrente no condicionador de ar (verde), Referência (vermelho); (b) Índice de avaliação do gerente MPA (verde), do engenheiro EPA (azul) e do usuário UPA (vermelho).

na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Notas obtidas com o avaliador de desempenho para os controladores On/Off e PI, com setpoint igual a 18°C

Avaliador	Nota On/Off	Nota PI
Gerente	76,1	98,2
Engenheiro	58,7	96,9
Usuário	44,2	95,8
GPI	59,7	97

O segundo ensaio realizado foi resposta a degraus (negativos), com variação de setpoint (22°C, 20°C e 18°C), cuja resposta é apresentada na Figura 5.5. Na primeira faixa do ensaio (setpoint igual a 22°C), devido à baixa carga térmica observa-se uma alta frequência de atuação no compressor, e a amplitude do sinal de saída manteve uma variação de 1,61°C em torno do setpoint.

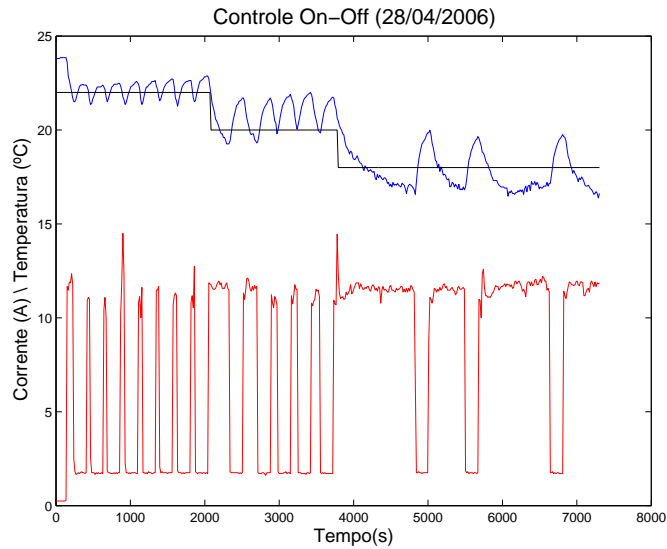


Figura 5.5: Temperatura interna (azul) e corrente no condicionador de ar (vermelho) com controlador On-Off para SP= 22°C, 20°C e 18°C.

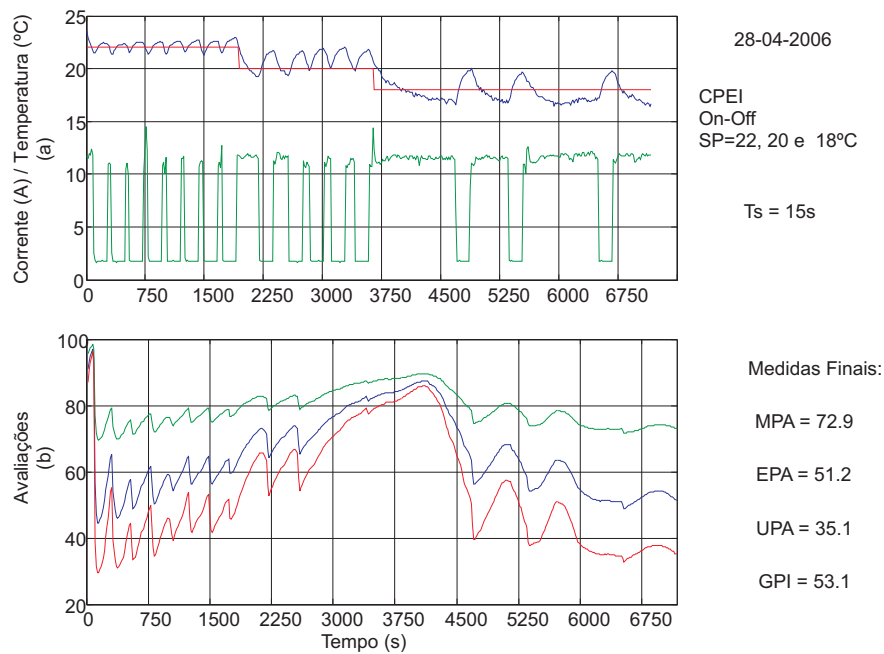


Figura 5.6: Resposta do avaliador de desempenho, para o controlador On/Off, para resposta a degraus negativos: (a) Temperatura interna (azul), Corrente no condicionador de ar (verde), Referência (vermelho); (b) Índice de avaliação do gerente MPA (verde), do engenheiro EPA (azul) e do usuário UPA (vermelho).

Na segunda faixa do ensaio (setpoint igual a 20°C), a variação da amplitude na saída foi de 2,68°C, e observa-se um offset de 0,8°C no sinal de saída. Entretanto, este fato não foi muito penalizado pelos avaliadores, sobretudo pelo usuário 5.6, o qual se esperaria uma redução considerável na avaliação, visto que o usuário penaliza muito os desvios de setpoint.

A Figura 5.7 apresenta a resposta do sistema, com o controlador PI, a variações no setpoint. Para os setpoints iguais a 22°C e 20°C, o controlador sai da faixa controlável, limitada para frequências entre 30Hz (corrente igual a 7A) e 60Hz (corrente igual a 12,41A), e impõem ciclos On/Off no compressor. Entretanto, para o setpoint igual a 20°C, a amplitude da variação na saída é consideravelmente menor, se comparado ao sistema com controlador On/Off. O controlador mantém a saída no valor de referência, até que o sinal de controle atinja o limite inferior, quando então o compressor é desligado.

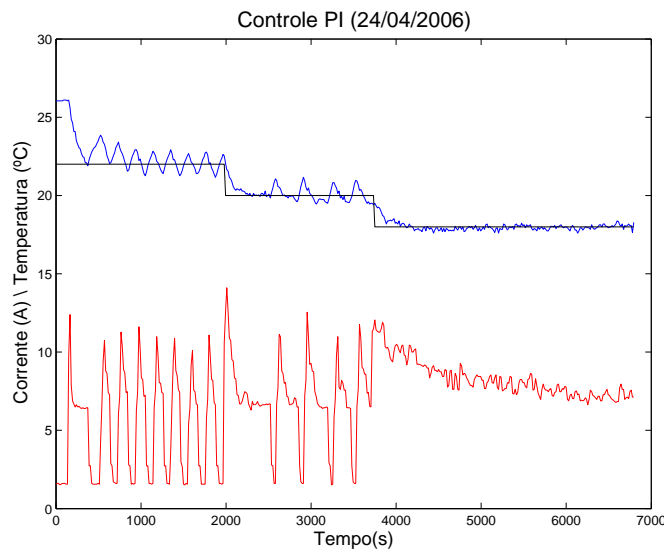


Figura 5.7: Temperatura interna (azul) e corrente no condicionador de ar (vermelho) com controlador PI para SP= 22°C, 20°C e 18°C.

Os índices de desempenho apresentados na Figura 5.8, traduzem de forma clara e significativa a qualidade e o desempenho do sistema de controle. Ocorre um aumento gradativo das “notas” dos três avaliadores, refletindo aquilo que se observa e que se avalia através dos gráficos. Observa-se uma redução gradual da frequência do sinal de controle e da variação da amplitude do sinal de saída, que

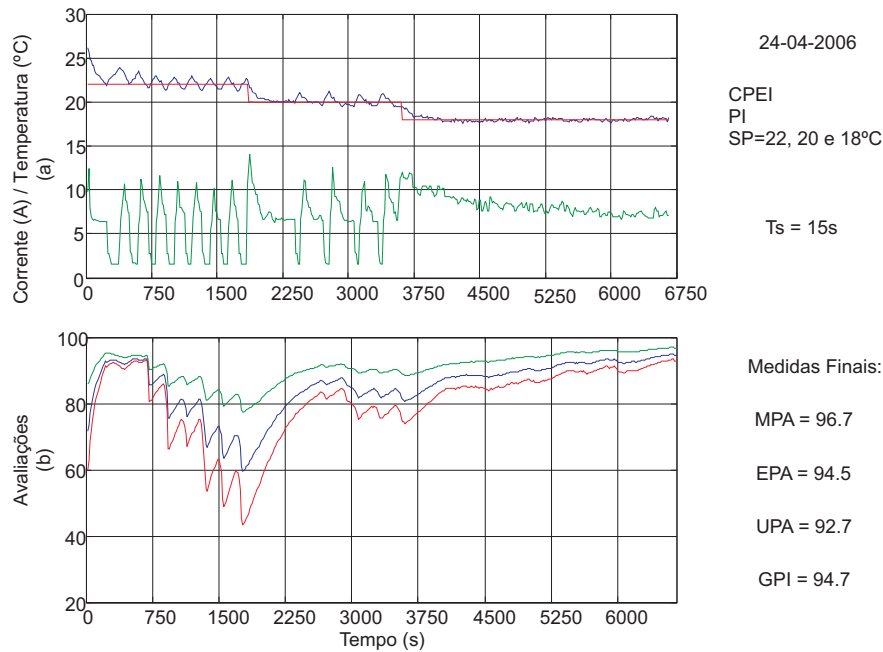


Figura 5.8: Resposta do avaliador de desempenho, para o controlador PI, para resposta a degraus negativos: (a) Temperatura interna (azul), Corrente no condicionador de ar (verde), Referência (vermelho); (b) Índice de avaliação do gerente MPA (verde), do engenheiro EPA (azul) e do usuário UPA (vermelho).

implica em melhoria do desempenho.

A Tabela 5.2 apresenta as notas fornecidas pelos avaliadores e pelo índice global, nos ensaios realizados com variação no setpoint. As notas fornecidas para o controlador On/Off refletem seu baixo desempenho, em particular a avaliação do usuário (nota 35,1), que se justifica pelo sistema apresentar elevadas oscilações no sinal de saída.

Tabela 5.2: Notas obtidas com o avaliador de desempenho para os controladores On/Off e PI, com setpoint igual a 22°C, 20°C e 18°C

Avaliador	Nota On/Off	Nota PI
Gerente	72,9	96,7
Engenheiro	51,2	94,5
Usuário	35,1	92,7
GPI	53,1	94,7

A resposta do sistema, com controlador PI, a um degrau positivo é apresentada na Figura 5.9. O controlador tem uma resposta rápida, entretanto, novamente, este sai da faixa controlável, implicando em grande deterioração na qualidade do controle, como pode ser observado na resposta dos avaliadores (Figura 5.10).

As notas da tabela 5.3, refletem um controlador muito penalizado por não seguir a referência adequadamente. O gerente, por sua vez, não foi tão severo em sua avaliação, refletindo as diferenças de interesse de cada grupo.

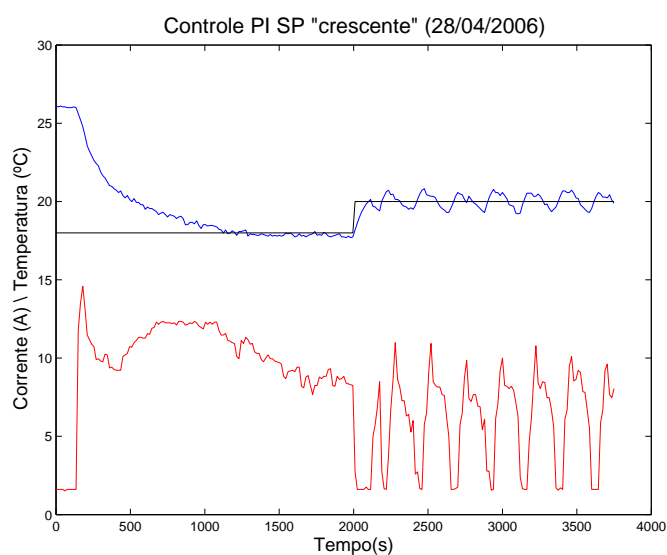


Figura 5.9: Resposta a degrau positivo, temperatura interna (azul) e corrente no condicionador de ar (vermelho) com controlador PI, com SP= 18°C e 20°C.

Para avaliar a resposta do sistema com controlador PI, submetido à variações de carga térmica, foi realizado um ensaio, cuja variação de carga térmica foi alcançada com a abertura da porta e de duas janelas (uma na parede sul e uma na parede norte) do auditório, no tempo igual a 1.830 segundos. Esta condição foi mantida por aproximadamente 17 minutos e em seguida, no tempo igual a 2.835 segundos, foram retornadas às condições normais de ensaio, sendo a resposta do sistema apresentada na Figura 5.11.

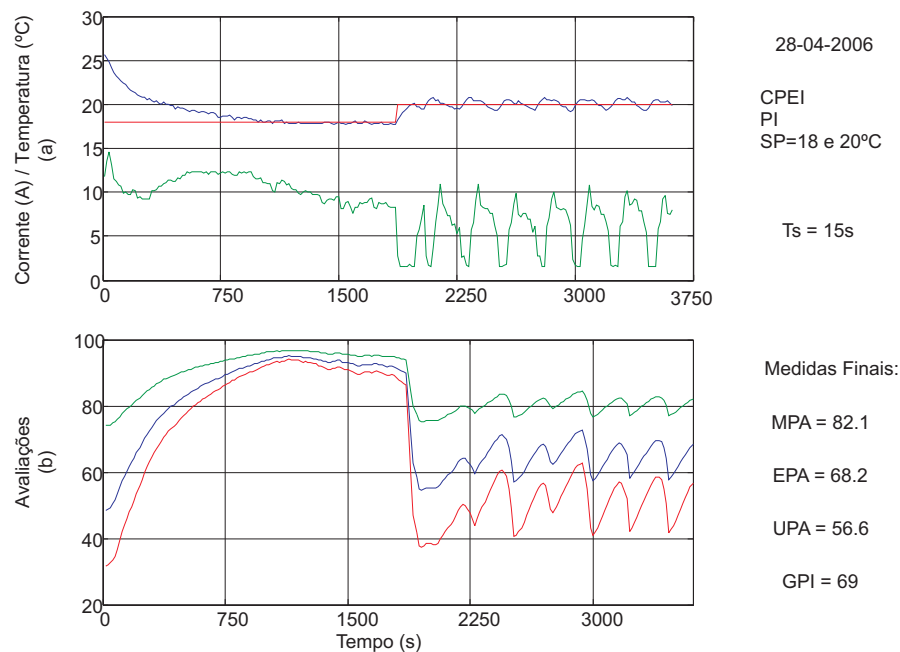


Figura 5.10: Resposta do avaliador de desempenho, para o controlador PI, para resposta a degrau positivo: (a) Temperatura interna (azul), Corrente no condicionador de ar (verde), Referência (vermelho); (b) Índice de avaliação do gerente MPA (verde), do engenheiro EPA (azul) e do usuário UPA (vermelho).

Tabela 5.3: Notas obtidas com o avaliador de desempenho para o controlador PI, para resposta a degrau positivo, setpoint igual a 18°C e 20°C

Avaliador	Nota PI
Gerente	82,1
Engenheiro	68,2
Usuário	56,6
GPI	69

Durante a variação na carga térmica, o controlador aumenta o sinal de controle para tentar manter a variável controlada na referência, entretanto, observa-se um offset médio em torno de 0,68°C. A ação integral atua tentando eliminar o offset, mas esta foi um pouco lenta, em torno de 2.400 segundos a corrente no condicionador de ar atinge o seu valor máximo (12,41A para frequência de 60Hz). O fato da saída ter apresentado offset em relação à referência, durante a variação de carga térmica, não foi muito penalizado pelos avaliadores, conforme mostrado na Figura 5.12. No ponto de vista do engenheiro e do gerente, isto se explica devido ao esforço de controle. Entretanto, o usuário não pôde ser tão severo em

sua avaliação, uma vez que, o sinal de controle chegou a atingir seu valor máximo.

Como mostram os índices da Tabela 5.4, mesmo sob variação da carga térmica, o controlador apresentou um desempenho satisfatório, com índice global acima de 80.

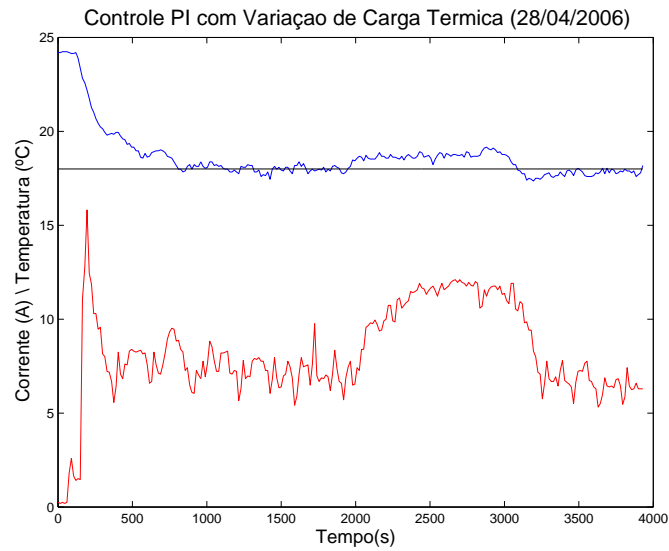


Figura 5.11: Temperatura interna (azul) e corrente no condicionador de ar (vermelho) com controlador PI, com variação na carga térmica.

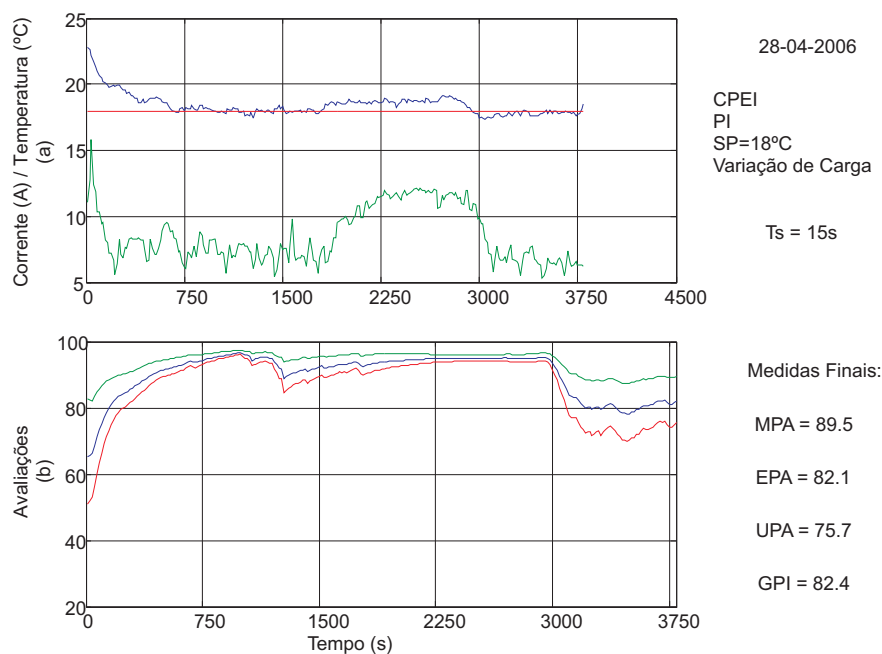


Figura 5.12: Resposta do avaliador de desempenho, para o controlador PI, com variação de carga térmica: (a) Temperatura interna (azul), Corrente no condicionador de ar (verde), Referência (vermelho); (b) Índice de avaliação do gerente MPA (verde), do engenheiro EPA (azul) e do usuário UPA (vermelho).

Tabela 5.4: Notas obtidas com o avaliador de desempenho para o controlador PI, com variação de carga térmica, setpoint igual a 18°C

Avaliador	Nota PI
Gerente	89,5
Engenheiro	82,4
Usuário	75,7
GPI	82,4

No que diz respeito ao conforto térmico, as menores flutuações de temperatura obtidas com a implementação do controlador PI refletem uma melhor satisfação do usuário, que também é percebida pelos os índices apresentados pelo avaliador de desempenho.

No Capítulo a seguir alguns comentários sobre os resultados obtidos serão abordados sob o ponto de vista de eficiência energética. As conclusões e propostas para trabalhos futuros serão apresentadas.

5.3 Considerações Finais

Tendo em vista que as estratégias de controle avançadas têm grande potencial de obtenção de ganhos energéticos mais significativos, uma segunda estratégia de controle foi analisada, sendo que esta leva em conta não só as variáveis ambientais como também a temperatura do ar de saída do evaporador. A proposta é de se utilizar um controle em cascata. O resultado obtido com a implementação do controle em cascata é apresentado no Apêndice D.

Capítulo 6

Conclusões

6.1 Comentários sobre os Resultados Obtidos

Quando se deseja comparar duas estratégias de controle, mesmo que se repita as mesmas condições de ensaio, é improvável que se consiga as mesmas condições climáticas.

Para se quantizar a economia efetiva de energia obtida com a implementação da nova estratégia de controle, é necessário quantizar a carga térmica envolvida. Visto que, as condições climáticas externas afetam diretamente a carga térmica no interior do auditório, a quantização da mesma não é uma tarefa simples. Deve-se construir modelos que reflitam a influência das variáveis externas na temperatura interna. Estudos como estes, estão sendo realizados no edifício do CPEI, e modelos estão sendo identificados, como por exemplo, modelos que representem a influência da claridade externa na temperatura interna e da temperatura externa na temperatura interna [Freitas, 2006].

Sabe-se que a temperatura externa é a variável de grande influência na carga térmica interna, e que esta não afeta instantaneamente a temperatura interna, devido às longas constantes de tempo. Para o auditório em estudo, cujo edifício é construído com uma arquitetura bioclimática, estima-se que uma dada alteração na condição de temperatura externa só será refletida na temperatura interna cerca de 94 minutos depois [Freitas, 2006]. Analisando as variáveis monitoradas

é possível perceber que pequenas variações na temperatura média externa podem provocar grandes variações na carga térmica interna.

A Figura 6.1 apresenta o perfil das temperaturas externas no CPEI, nos dias 09 de janeiro de 2006 e 23 de março de 2006, os quais foram realizados os ensaios com controlador On/Off e com controlador PI, respectivamente, ambos com o setpoint para temperatura interna igual a 18°C. Os ensaios foram realizados no final da tarde, por volta das 17:00 horas, horário este em que a temperatura externa está reduzindo substancialmente, e a influência da defasagem entre as temperaturas externa e interna é consideravelmente maior.

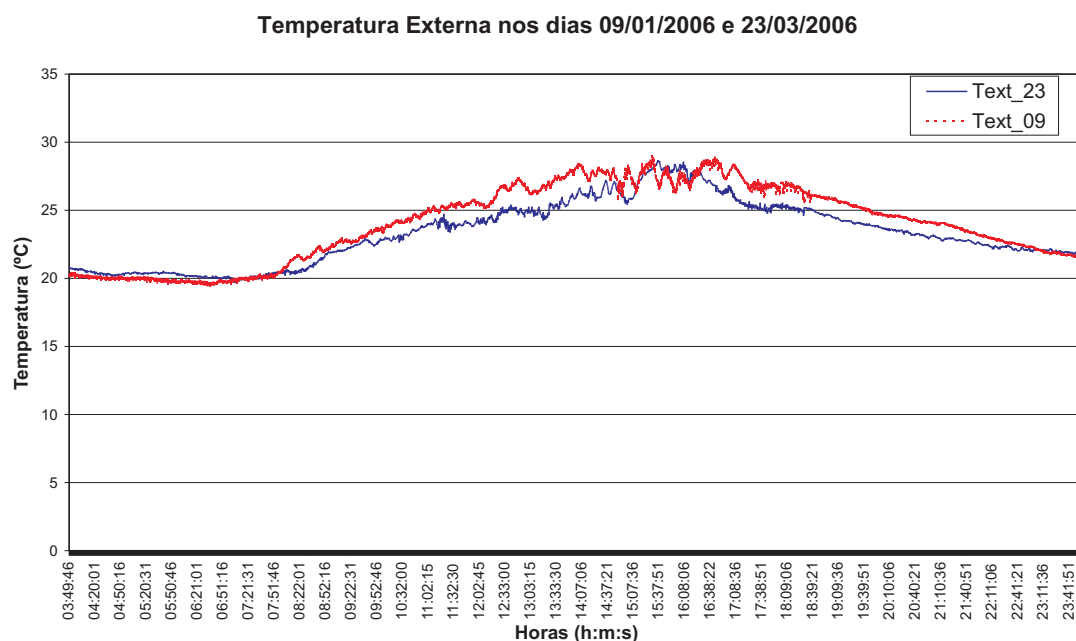


Figura 6.1: Temperatura externa dias 09/01/2006 (vermelho) e 23/03/2006 (azul).

É sabido que, para efetuar o cálculo da carga térmica, deve ser considerada a defasagem entre as temperaturas externa e interna. Entretanto, para expressar o potencial de economia energética alcançada com a implementação da nova estratégia de controle, preferiu-se apresentar primeiro os resultados sem a defasagem, neste caso, se atendo em um limite inferior, e posteriormente os resultados com a defasagem, baseado em um modelo proposto em [Freitas, 2006]. Procura-se mostrar com a apresentação destes dois resultados a importância de uma avaliação

efetiva e realística das variáveis ambientais e do sistema para prover uma análise dos ganhos alcançados.

Para prover uma relação da potência elétrica envolvida ($P = \int v.i.\cos\phi.dt$), calculou-se a carga elétrica acumulada, integrando-se a corrente elétrica no tempo, corrente esta que está sendo medida em uma única fase (no barramento de entrada de alimentação do equipamento de condicionamento de ar). Considerando que, a tensão entregue pela concessionária (v) e o fator de potência ($\cos\phi$) é o mesmo para ambas as condições de ensaio, e que o cálculo foi realizado em um mesmo período de tempo (com o mesmo número de amostras), a integral da corrente elétrica pode ser utilizada para expressar a relação da potência elétrica envolvida.

Quanto ao cálculo da carga térmica a ser processada pelo condicionador de ar, uma vez que $Q = (dm/dt).c.\Delta T$, considerando a vazão (dm/dt) e o calor específico (c) do ar constantes nas duas condições de ensaio. A diferença de temperatura externa e interna pode indicar a relação da potência térmica envolvida.

E para proceder ao cálculo do potencial de economia, foi definido um fator que representa a relação entre a quantidade de energia elétrica consumida e a quantidade de calor retirado do ambiente, para as duas condições de ensaio.

Para o sistema operando com o controlador On/Off sem a defasagem, obteve-se

$$Fator1 = \frac{\int i(t).dt}{\int (Text(t) - Tin(t)).dt} = 1,2195$$

onde Text é a temperatura externa, Tin temperatura interna e i a corrente no condicionador de ar.

E, para o sistema operando com o controlador PI

$$Fator2 = \frac{\int i2(t).dt}{\int (Text2(t) - Tin2(t)).dt} = 1,1852$$

resultando em uma relação percentual

$$Percentual = \frac{Fator1}{Fator2} = 1,0289 \Rightarrow 2,89\%$$

Esta é uma economia significativa, entretanto, esta não é uma avaliação realística destes ganhos, visto que, para tanto, os modelos que representem a influência das variáveis externas deverão ser levantados e validados.

Nesta segunda análise, é utilizada uma defasagem de 377 amostras (94 minutos e quinze segundos) entre a temperatura externa e interna, identificada no modelo auto-regressivo proposto em [Freitas, 2006], apresentado na equação a seguir

$$y(k) = \alpha * y(k - 1) + \beta * u(k - 377)$$

onde $y(k)$ é a temperatura interna no k -ésimo instante de amostragem, $u(k-377)$ é a temperatura externa defasada de 377 amostragens, $\alpha = 0,98$ e $\beta = 0,005$.

Devido a se ter poucos dados nos dias em que foram feitos os experimentos com condicionador de ar, a etapa de validação dos modelos ficou um pouco comprometida. Entretanto, como pode ser visto na Figura 6.2, o modelo da temperatura interna no dia 09 de janeiro de 2006 (dia no qual foi realizado o ensaio com controlador On/Off), acompanha a temperatura real com erro máximo inferior a $0,5^{\circ}\text{C}$ que é a precisão do sensor de temperatura utilizado. A faixa de maior erro, entre 2.800 e 4.500 segundos, ocorre quando o dia está amanhecendo, este desvio é influenciado pelo efeito da “claridade” externa. Estudos sobre estas correlações estão sendo desenvolvidos [Freitas, 2006]. Entretanto, os ensaios foram realizados na parte da tarde, e estes efeitos não foram considerados nesta análise.

A Figura 6.3 apresenta a resposta do modelo no dia 23 de março de 2006 (data de realização do ensaio com controlador PI), neste dia o condicionador de ar foi ligado na parte da manhã, o que limitou a faixa de dados para a validação. Entretanto, verifica-se que o erro máximo se limitou a $0,5^{\circ}\text{C}$. Para prover a validação do modelo, utilizou-se os dados do fim da tarde do dia 23 (após a realização dos ensaios) e parte do dia 24 de março, que é apresentada na Figura 6.4. Como pode ser observado, o modelo explica bem o comportamento da temperatura interna.

Uma vez validada a defasagem a ser utilizada, procede-se aos cálculos dos fatores descritos anteriormente. Para o sistema operando com o controlador On/Off,

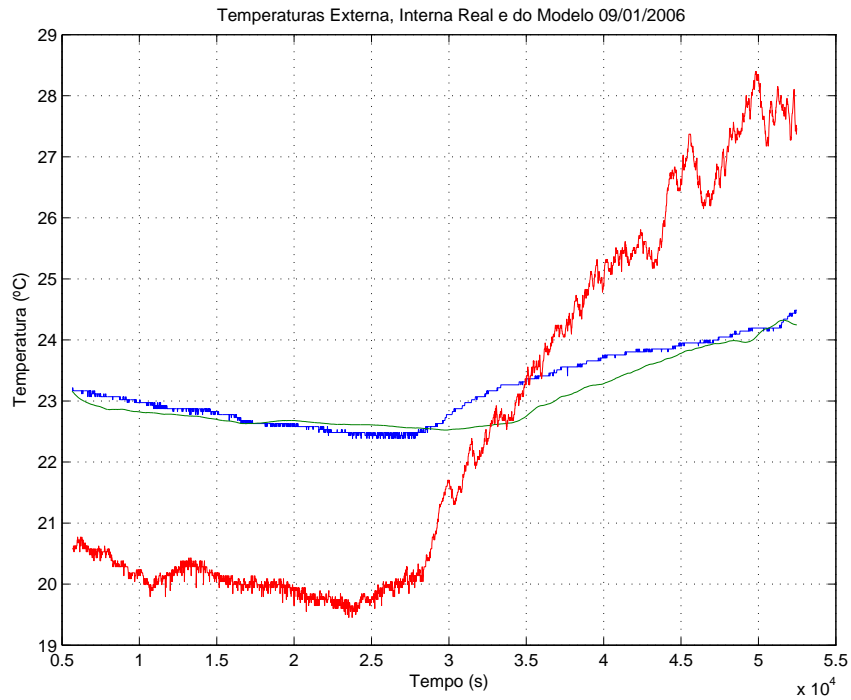


Figura 6.2: Temperaturas externa (vermelho), interna real (azul) e do modelo (verde), dia 09/01/2006.

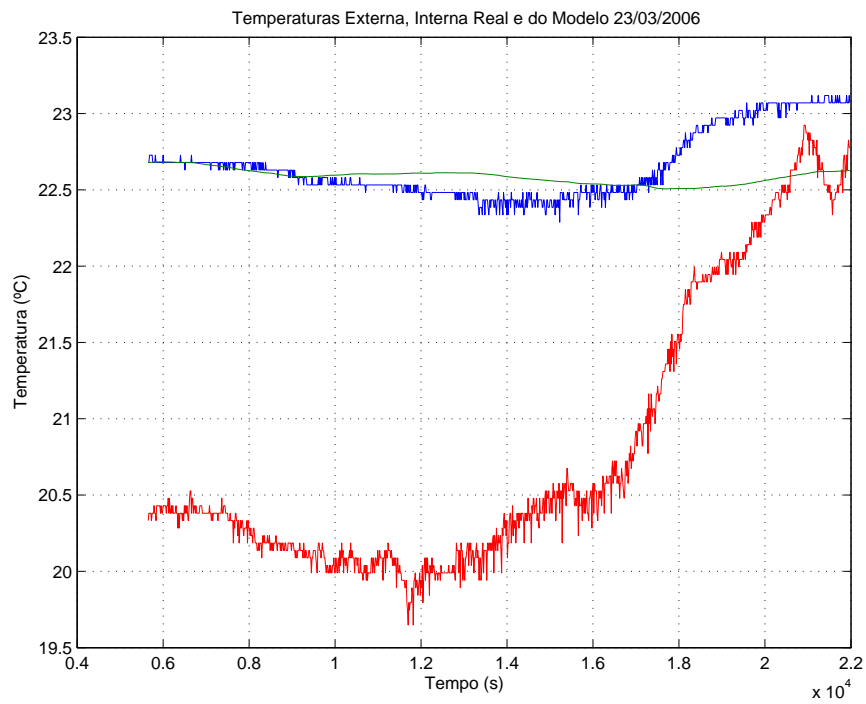


Figura 6.3: Temperaturas externa (vermelho), interna real (azul) e do modelo (verde), dia 23/03/2006 (manhã).

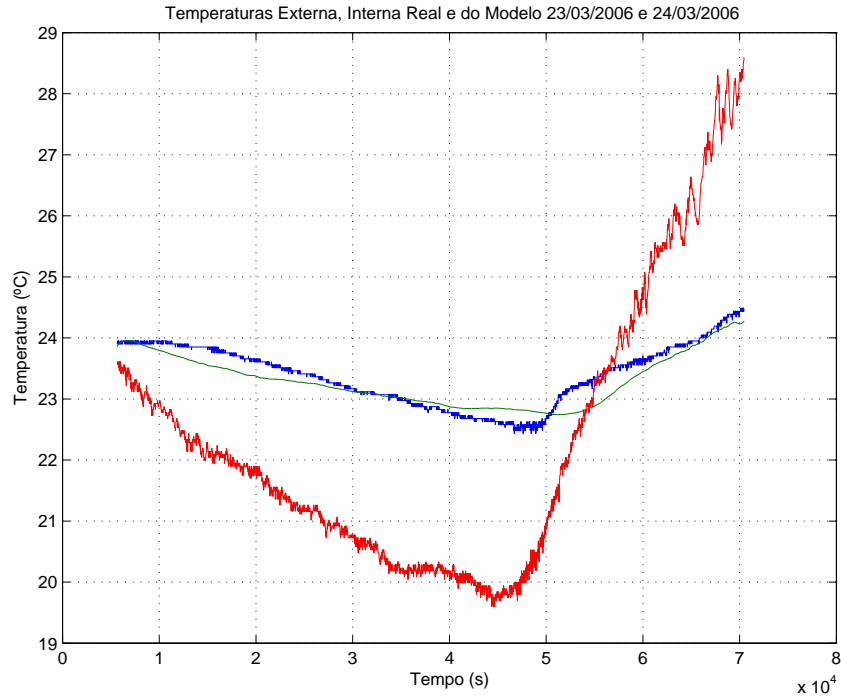


Figura 6.4: Temperaturas externa (vermelho), interna real (azul) e do modelo (verde), dias 23/03/2006 (noite) e 24/04/2006 (manhã).

considerando a defasagem de 377 amostras, obteve-se

$$Fator1 = \frac{\int i(t).dt}{\int (Text_Defasada(t) - Tin(t)).dt} = 1,0866$$

E, para o sistema operando com o controlador PI

$$Fator2 = \frac{\int i2(t).dt}{\int (Text2_Defasada(t) - Tin2(t)).dt} = 0,9043$$

resultando em uma relação percentual

$$Percentual = \frac{Fator1}{Fator2} = 1,2016 \Rightarrow 20,16\%$$

Esta é uma economia substancial do ponto de vista energético. Procurou-se ressaltar com apresentação destes dois resultados (com e sem a defasagem) a importância de um monitoramento contínuo e de uma análise criteriosa das variáveis envolvidas no sistema de condicionamento de ar.

6.2 Conclusões Finais

O sistema do CMUF é uma ferramenta poderosa de análise e suporte ao gerenciamento, pois disponibiliza ao gerente de energia um diagnóstico detalhado com o histórico do consumo energético da edificação, o que possibilita a ação pontual, utilizando estratégias de controle adequadas.

A plataforma do CMUF suporta algoritmos de controle avançados. Análises mais detalhadas do sistema de condicionamento de ar possibilitarão a utilização de outras estratégias de atuação e controle ainda mais eficientes do ponto de vista energético e de conforto.

Podemos afirmar que, a partir dos dados armazenados no sistema do CMUF (meses de acompanhamento do comportamento da edificação e vários testes realizados com o sistema de condicionamento de ar), foi possível perceber que não há consumo eficiente de energia e não há bom condicionamento do ambiente com a utilização de controladores On/Off. Grandes variações de temperatura no interior do auditório ocorreram devido ao liga/desliga do compressor e a má distribuição do ar. A implementação do controle PI reduziu a variação de temperatura no interior do auditório, possibilitando um melhor condicionamento do ambiente. Somente a partir de um acompanhamento contínuo e sistemático de tantas variáveis, é possível se fazer, com segurança, uma avaliação como esta.

Os objetivos desta dissertação foram alcançados. A aplicação de técnicas de modelagem e controle clássicas representou melhorias significativas no sistema de condicionamento de ar.

A estrutura de monitoramento implementada é um grande centro de estudo. Análises diversas poderão ser realizadas e modelos “realísticos” poderão ser obtidos para os sistemas do edifício.

O sistema de condicionamento de ar, em particular, é um “processo” com potencial para melhoria de desempenho energético.

No futuro, os ganhos efetivos (energéticos e de conforto) poderão ser medidos e comparados, utilizando outras estratégias de controle.

6.3 Propostas Futuras

6.3.1 Melhorias no Controle

A plataforma do CMUF oferece inúmeras possibilidades para implementação de técnicas de controle avançadas. Para o sistema de controle do condicionador de ar, em questão, como primeira sugestão de trabalho futuro, sugere-se uma análise mais detalhada do controle em cascata e uma resintonia. Estudando também a possibilidade de operação do motor do compressor em uma faixa de velocidade mais ampla, visto que neste estudo limitou-se a faixa frequência entre 30Hz e 60Hz.

Uma segunda proposta é a implementação de estratégias de controle auto-sintonizáveis, visto que, os parâmetros do processo em questão, mudam ao longo do tempo, sofrendo grande influência das condições climáticas.

Tendo em vista que o processo analisado possui longa constante de tempo e os problemas de atrasos na rede são minimizados, sugere-se, como continuação de estudo, a implementação do algoritmo do controlador remotamente (via Internet).

6.3.2 Melhorias na plataforma do CMUF

Algumas melhorias poderão ser realizadas no sistema para prover maior robustez. Entre as quais pode-se citar:

- a necessidade de implementação de um buffer de mensagens no microcontrolador, para evitar que mensagens sejam eventualmente perdidas;
- a implementação de um gerador de número serial para as mensagens, para um gerenciamento mais adequado das mesmas;
- a implementação do relógio (“tick-stamp”) no microcontrolador e a sincronização entre as estações da rede;
- a utilização de uma interface paralela entre o webserver e a estação gateway, visto que, a comunicação serial apresenta limitações nas taxas de transferências;

- estratégias de redundância para as estações “vitais” ao controle do processo, devem ser analisadas. No sistema de controle, a redundância é de grande importância para prover alta confiabilidade.

Referências Bibliográficas

- [Aguirre, 2000] Aguirre, L. A. (2000). *Introdução à Identificação de Sistemas*. Editora UFMG.
- [Batista et al., 2006] Batista, A. P., Freitas, M. E., Martins, E. C., Jota, P. R. S., and Jota, F. G. (2006). *Sistema para Monitoramento e Controle de Usos Finais*. submetido à publicação no VII SINCONEE. p. 1-10.
- [BEN, 2005] BEN (2005). *Balanço Energético Nacional 2005 - Ano Base 2004*. Home page MME, <http://www.mme.gov.br>, acessado em 18/07/2006.
- [Bosch, 1991] Bosch (1991). *Specification CAN Version 2.0B*.
- [Bracarense et al., 2005] Bracarense, M., Papa, R., and e Jota, P. (2005). *Bioclimatic architecture concepts applied to CEFET's building*. 1^a International Conference Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment. p. 591-596.
- [Braga, 1994] Braga, A. R. (1994). *Implementação de Estratégias de Controle Multimodal e Multivariável*. Dissertação de Mestrado, Engenharia Elétrica, Universidade Federal Minas Gerais.
- [Braga and Jota, 1994] Braga, A. R. and Jota, F. G. (1994). *Crítérios Múltiplos para a Avaliação "On Line" de Desempenho de Controladores Industriais*. SBA, 10^o Congresso Brasileiro de Automática / 6^o Congresso Latino Americano de Controle Automático. p. 112-114.
- [Campos, 2004] Campos, M. V. (2004). *Desenvolvimento de Plataforma (Software) para Teste e Depuração de Rede CAN Aplicada a Sistemas de Automação Predial*. Projeto Final de Curso, Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal Minas Gerais.
- [Chapman, 1990] Chapman, C. (1990). *Distributed Control for Distributed Systems*. Control and Building Energy Management Systems, IEE Colloquium on. p. 1-5.
- [Chen and Wang, 2002] Chen, L. and Wang, Y. (2002). *Desing and Implementation of Web-based Distributed Control System*. IEEE, Conferences on Electrical & Computer Engineering. p. 681-686.
- [Creder, 1990] Creder, H. (1990). *Instalações de Ar Condicionado*. LTC.

- [Dexter and Jota, 1985] Dexter, A. and Jota, F. G. (1985). *Multi-Loop Self-tuning Control of an Air-Conditional Plant*. International Symposium of Recent Advances in the Control and Operation of Buildings HVAC Systems. p. 113-123.
- [Dieterle et al., 1995] Dieterle, W., Kochs, H. D., and Dittmar, E. (1995). *Communication Arquitetures for Distributed Computer Control System*. Control Eng. Pratices. p. 1171-1176.
- [Doebelin, 1990] Doebelin, E. O. (1990). *Measurement Systems*. McGraw Hill International.
- [Freitas, 2006] Freitas, M. E. A. (2006). *Gerenciamento de Energia em uma Unidade de Condicionamento de Ar de Expansão Direta - Modelagem, Simulação e Controle, Texto em Preparação*. Monografia de Exame de Qualificação, Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais.
- [Guimarães et al., 2005] Guimarães, R., Jr, J. A. V., Firmo, D. L., elo, B. R. F. B., Neto, O. M., and Nepuceno, E. G. (2005). *Eficientização Energética em Instituições de Ensino*. CBEE Congresso Brasileiro de Eficiência Energética. p. 109-113.
- [Halevi and Ray, 1988] Halevi, Y. and Ray, A. (1988). *Integrated Communication and Control Systems: Part I- Analysis*. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. p. 367-373.
- [Honeywell, 2005] Honeywell (2005). *Series HIH3610, Humidity Sensors*. Datasheet, <http://www.honeywell.com>, acessado em 20/07/2005.
- [Jacques, 2006] Jacques, T. (2006). *Comunicação Remota com Garantia de Segurança e Continuidade entre Redes de Monitoramento e um Servidor de Dados*. Projeto Final de Curso, Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal Minas Gerais.
- [Jota, 1987] Jota, F. G. (1987). *The Application of Self-tuning Control Techiniques to a Multivariable Process*. PhD Thesis, University of Oxford.
- [Jota, 1998] Jota, F. G. (1998). *Notas de Aula de Técnicas de Controle de Processos Industriais*. Universidade Federal de Minas Gerais.
- [Jota et al., 2002] Jota, F. G., Jota, P. R. S., and Nobre, E. C. (2002). *Centro de Monitoramento de Usos Finais*. Projeto FNDCT/CT-ENERG e CEMIG.
- [Jota et al., 2005] Jota, F. G., Jota, P. R. S., Nobre, E. C., and Costa, H. F. F. (2005). *Centro de Monitoramento de Usos Finais*. Congresso Brasileiro de Eficiência Energética. p. 125-130.

- [Jota and Pena, 1994] Jota, F. G. and Pena, R. T. (1994). *Implementação de Controladores PID em Computadores Digitais*. Curso de Extensão em Automação Industrial Petrobrás / REGAP, Universidade Federal de Minas Gerais. p. 111-141.
- [Jota et al., 2000] Jota, P. R. S., Freitas, M. E., Santos, T. A., and Nobre, E. C. (2000). *Formação de Gerentes de Energia para Prédios Públicos*. XIV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. p. 1-14.
- [Kato et al., 2001] Kato, H., Furuya, M., Tamano-Mori, M., Kaneko, S., and Nakano, T. (2001). *Risk Analysis and Secure Protocol Design for WWW-Based Remote Control with Operation-Privilege Management*. IEEE. p. 1107-1112.
- [Kazmaier, 2003] Kazmaier, U. (2003). *Sistema Distribuído de Aquisição de Dados*. Projeto Final de Curso (Diplomarbeit), Fachhochschule Karlsruhe, University of Applied Sciences.
- [Ljung, 1987] Ljung, L. (1987). *System Identification - Theory for the User*. Prentice Hall International.
- [Marlin, 2000] Marlin, T. E. (2000). *Process Control*. McGraw Hill International.
- [Martins, 2006] Martins, E. C. (2006). *Texto em Preparação*. Monografia de Exame de Qualificação, Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais.
- [Metaltex, 2005] Metaltex (2005). *SH1NAC-5V Micro Relé Reed SH*. Datasheet, <http://www.metaltex.com.br>, acessado em 17/11/2005.
- [Metaltex, 2006] Metaltex (2006). *JXC2RA4 Relé Miniatura de Potência JXC*. Datasheet, <http://www.metaltex.com.br>, acessado em 13/01/2006.
- [Microchip, 2001] Microchip (2001). *PIC16F876 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers*. Datasheet.
- [Microchip, 2003] Microchip (2003). *MCP2515 Stand Alone CAN Controller with SPI Interface*. Datasheet.
- [Motoki, 2002] Motoki, F. Y. S. (2002). *Barramento CAN: uma implementação utilizando o PIC16F876 e o MCP2510*. Monografia de Projeto de Graduação, Universidade Federal do Espírito Santo.
- [Mourão, 1995] Mourão, R. T. L. (1995). *Um Sistema Distribuído de Microcomputadores para o Controle de Processos Industriais*. Dissertação de Mestrado, Engenharia Elétrica, Universidade Federal Minas Gerais.
- [National, 2000] National (2000). *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors*. Datasheet.

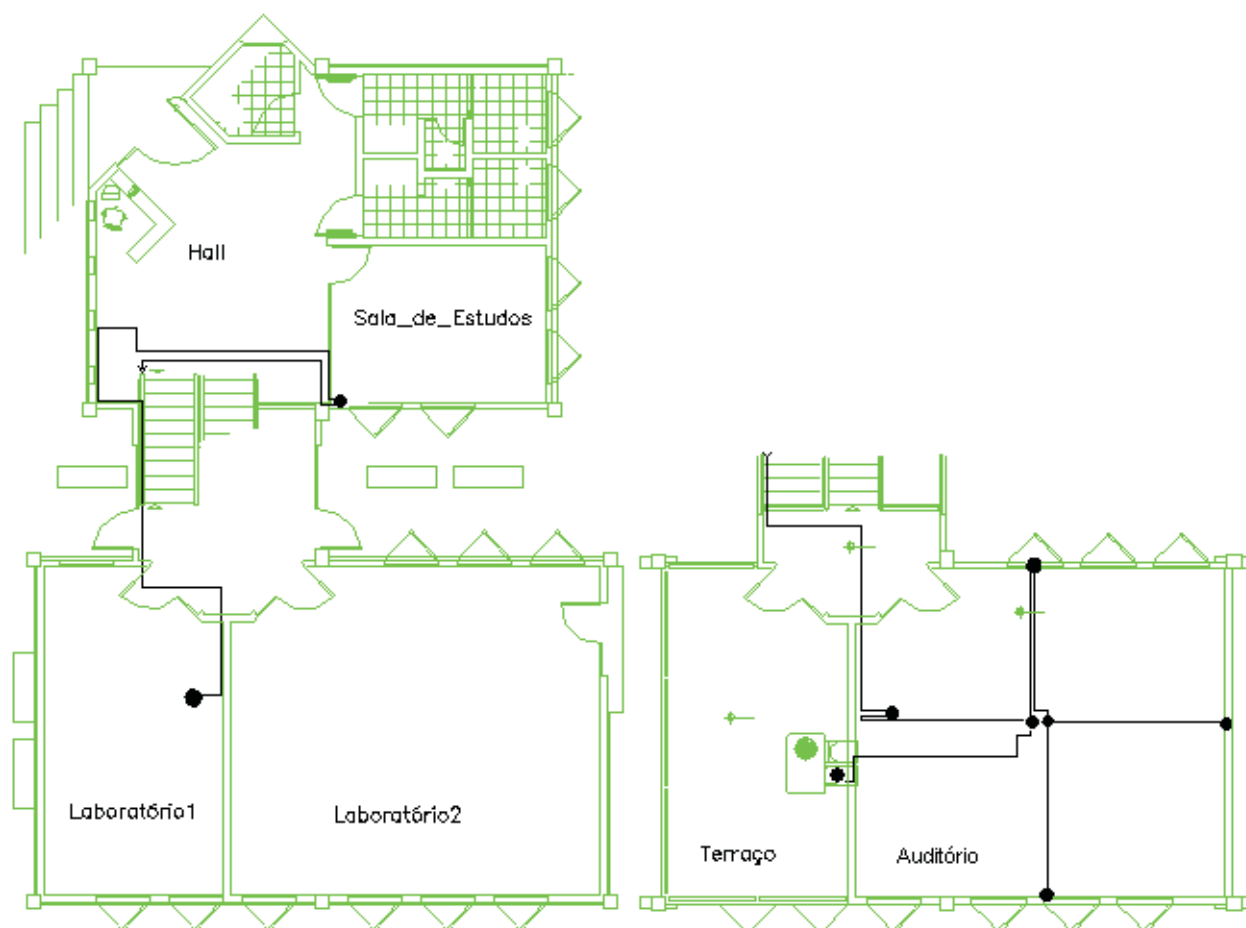
- [Nesler, 1986] Nesler, C. G. (1986). *Adaptative Control of Thermal Processes in Buildings*. American Control Conference. p. 9-13.
- [Pena, 2002] Pena, P. N. (2002). *Aplicação de Técnicas de Controle Chaveado a uma Planta Piloto: Simulação e Implementação*. Dissertação de Mestrado, Engenharia Elétrica, Universidade Federal Minas Gerais.
- [PROCEL, 2006] PROCEL (2006). *Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica*. Home page Eletrobrás, <http://www.eletrobras.gov.br/procel>, acessado em 05/05/2006.
- [Rapp, 2002] Rapp, T. (2002). *Remote Load Control via Powerline and Embedded Webserver*. Projeto Final de Curso (Diplomarbeit), Fachhochschule Karlsruhe, University of Applied Sciences.
- [Rodrigues et al., 1998] Rodrigues, D. D., Behrinf, H. S., Oliveira, J. C., and Jota, F. (1998). *Uma Metodologia Prática e Simples para Análise e Projeto de Controladores PID*. Anais do Congresso Mineiro de Automação / V Simpósio Regional de Instrumentação. p. 251-259.
- [Santos, 2004a] Santos, D. A. S. (2004a). *Implementação e Análise de Sistema de Monitoramento Remoto*. Projeto Final de Curso, Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal Minas Gerais.
- [Santos, 2004b] Santos, M. M. D. (2004b). *Metodologias de Projetos para Sistemas de Controle via Redes*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [Seborg et al., 1989] Seborg, D., Edgar, T., and Mellichamp, D. (1989). *Process Dynamics and Control*. John Wiley and Sons.
- [Shin, 1998] Shin, H.-B. (1998). *New Antiwindup PI Controller for Variable-Speed Motor Drives*. IEEE Transactions on Industrial Electronics. p. 445-450.
- [Silva, 2004] Silva, G. P. (2004). *Desenvolvimento de um Sistema para Monitoração e Controle de Processos em Ambiente Distribuído*. Dissertação de Mestrado, Engenharia Elétrica, Universidade Federal Minas Gerais.
- [Stolen, 1999] Stolen, L. (1999). *Distributed Control System*. IEEE The 21st International Telecommunications Energy Conference. p. 1-4.
- [Thompson and Dexter, 2004] Thompson, R. and Dexter, A. (2004). *A Fuzzy Decision-Making Approach to Temperature Control in Air-Conditional Systems*. Science, Control Engineering Practice. p. 689-698.
- [Tipsuwan and Chow, 2003] Tipsuwan, Y. and Chow, M.-Y. (2003). *Control Methodologies in Networked Control Systems*. Control Engineering Practice, Science. p. 1099-1111.

- [Tyan and Bernstein, 1994] Tyan, F. and Bernstein, D. S. (1994). *Antiwindup Compensator Synthesis for Systems with Saturating Actuators*. Proceedings of the 33rd Conference on Decision and Control. p. 150-155.
- [Veiga, 2005] Veiga, L. S. (2005). *Implementação de Sistemas de Monitoramento Remoto*. Projeto Final de Curso, Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal Minas Gerais.
- [Villani, 2000] Villani, E. (2000). *Abordagem Híbrida para Modelagem de Sistemas de Ar Condicionado em Edifícios Inteligentes*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.
- [Warnier et al., 2003] Warnier, E., Yliniemi, L., and Joensuu, P. (2003). *Web Based Monitoring and Control of Industrial Process*. Control Engineering Laboratory. p. 1-15.
- [WEG, 2003] WEG (2003). *Inversores de Frequência CFW-09*. Datasheet.

Apêndice A

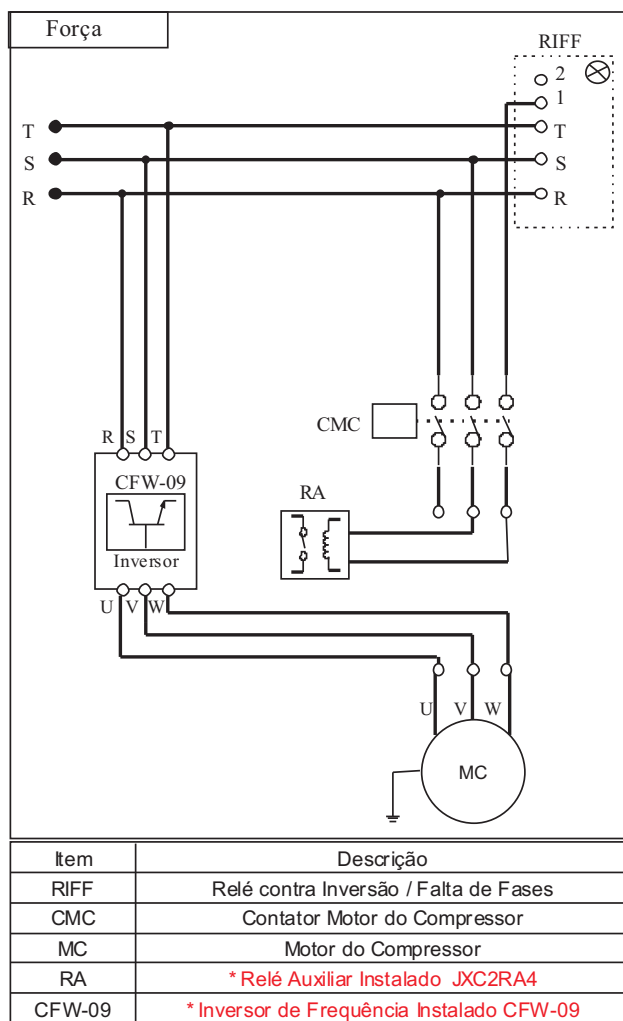
Layout da Rede CAN no CPEI

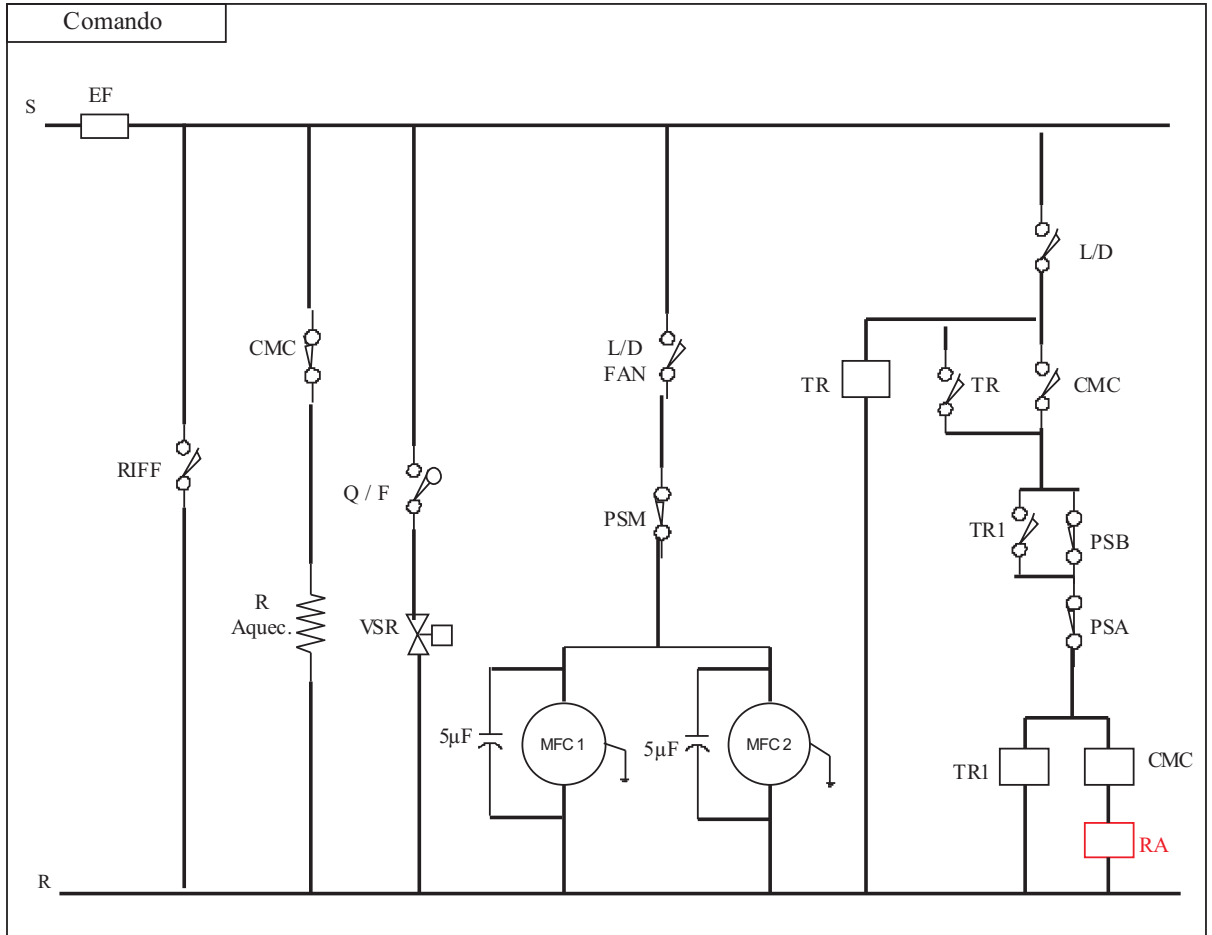
(80 metros de rede - Cabo UTP/CAT5E - Taxa Transmissão CAN 500Kbps)



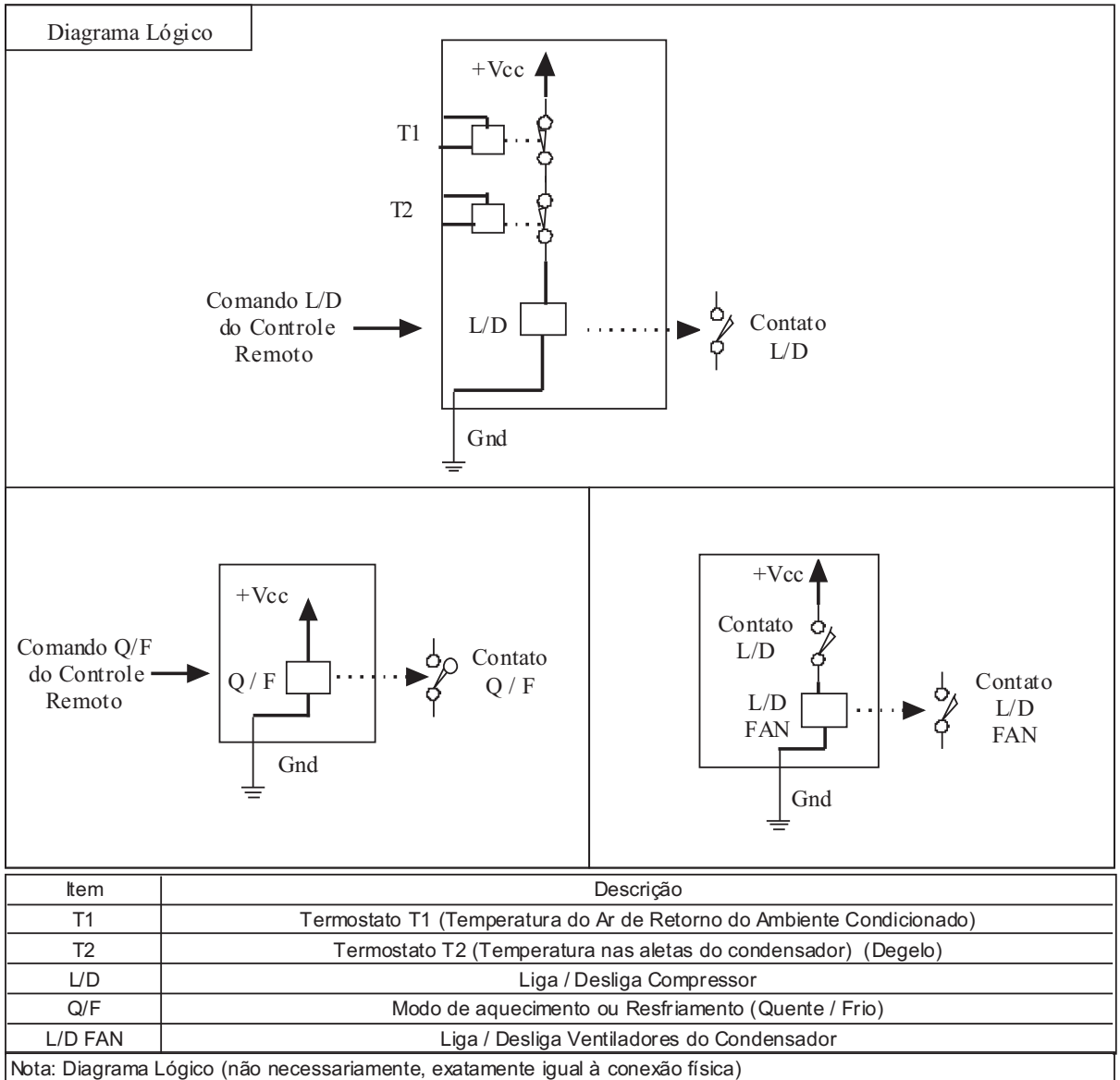
Apêndice B

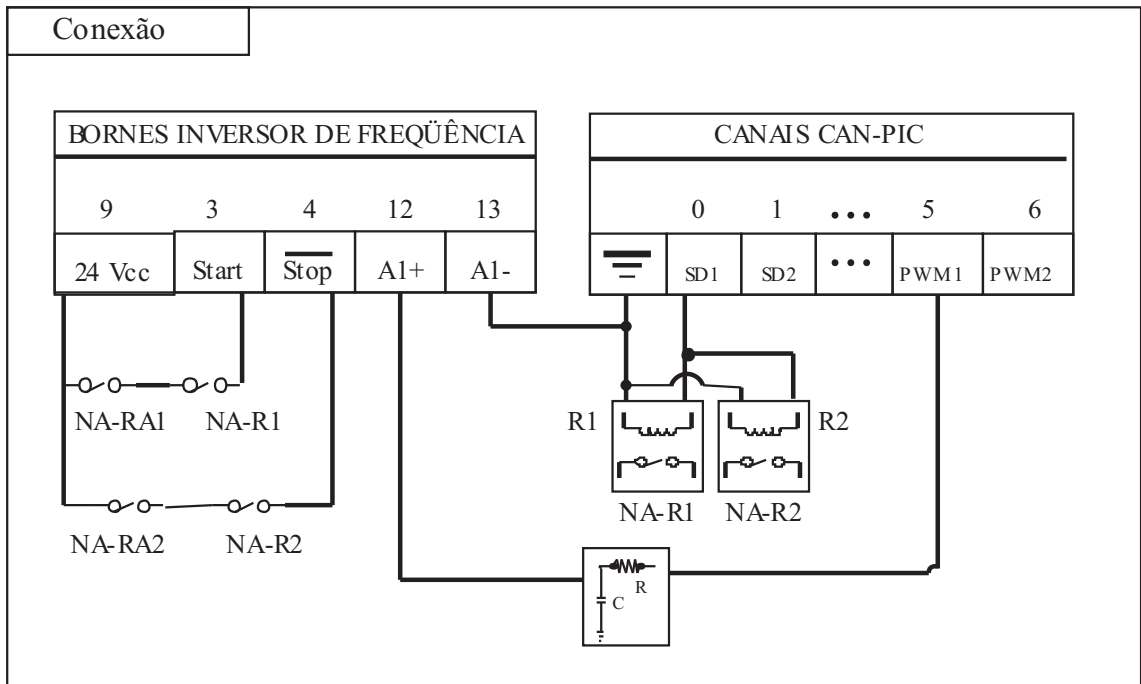
Diagramas Elétricos AC





Item	Descrição
EF	Elemento Fusível
CMC	Contator do Motor do Compressor
R Aquec.	Resistência de Aquecimento de Óleo
Q / F	Modo de Aquecimento ou Resfriamento (Quente / Frio)
VSR	Válvula de Reversão (Quente / Frio)
MFC	Motor do Ventilador do Condensador
PSM	Pressostato
L/D FAN	Contato liga/ desliga ventilador do condensador
PSB	Pressostato de Baixa
PSA	Pressostato de Alta
TR	Temporizador
TR1	Temporizador
L/D	Contato liga/ desliga Compressor (intertravado com os termostatos ver diagrama lógico)
RA	* Bobina do Relé Auxiliar Instalado JXC2RA4

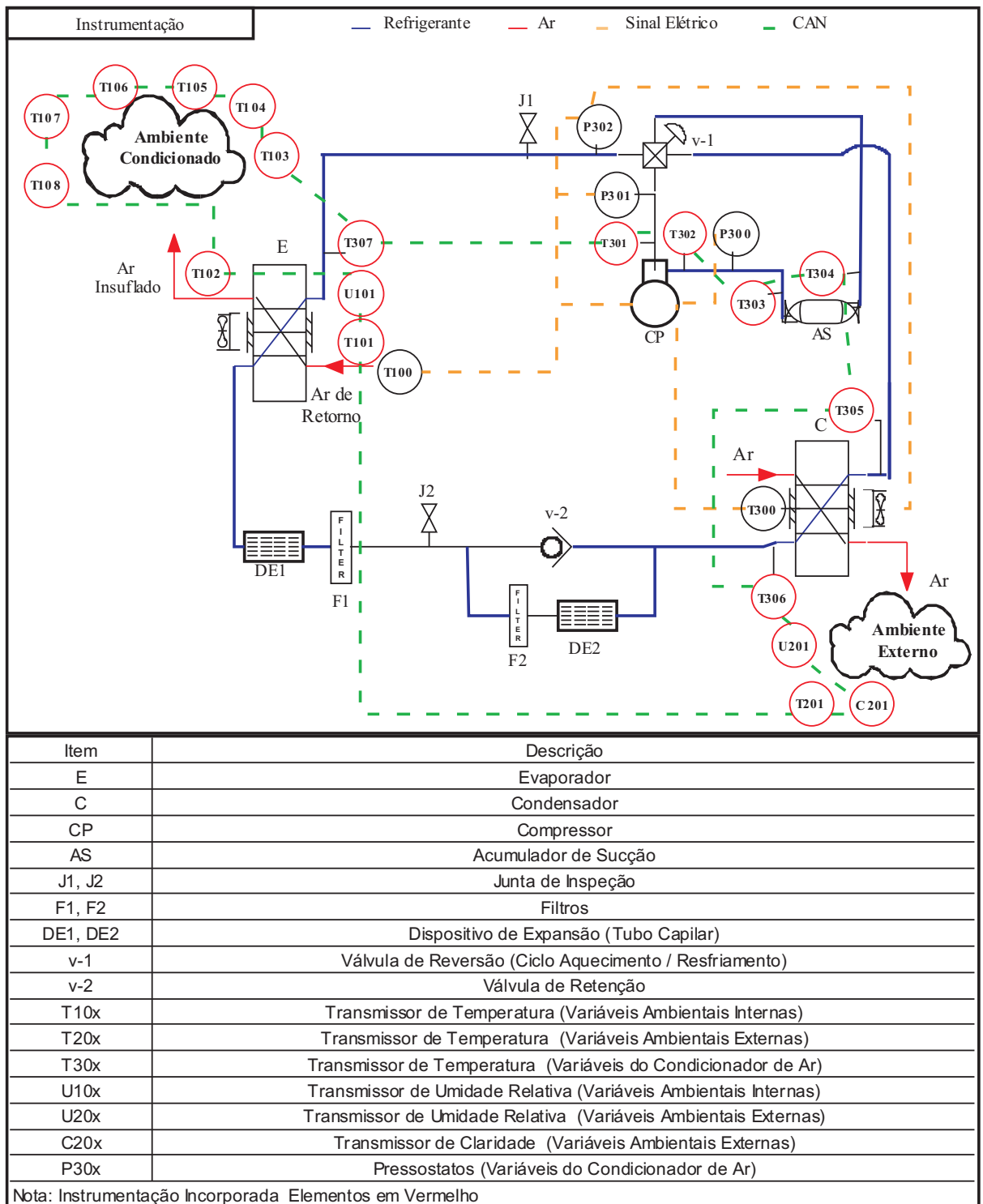




Item	Descrição
R1	Relé Reed Instalado (SH1NAC2)
R2	Relé Reed Instalado (SH1NAC2)
NA-C1	Contato Normalmente Aberto do Relé Reed R1
NA-C2	Contato Normalmente Aberto do Relé Reed R2
NA-RA1	Contato 1 Normalmente Aberto do Relé Auxiliar Instalado
NA-RA2	Contato 2 Normalmente Aberto do Relé Auxiliar Instalado
SD1	Saída Digital 1 da Estação CAN-PIC
PWM1	Saída PWM1 da Estação CAN-PIC

Apêndice C

Diagrama de Instrumentação (P&I)



Apêndice D

Controle em Cascata

O controle em cascata utiliza pelo menos duas variáveis controladas para atuar sobre uma única variável manipulada, e consiste de duas ou mais malhas de controle integradas. A malha interna contém o controlador chamado “escravo”. A malha externa abrange o outro controlador, denominado “mestre”, cuja saída fornece o setpoint para o controlador “escravo”. O controle em cascata é eficaz em situações onde existem perturbações a serem eliminadas. Os controladores devem ser projetados de tal forma que a malha de controle interna tenha uma resposta mais rápida que a malha de controle externa [Marlin, 2000].

A proposta é projetar um controle em cascata de tal forma que o controlador interno regulasse a temperatura do ar de saída do evaporador tendo como setpoint a saída do controlador externo (da malha de temperatura da sala), como apresentado no diagrama de blocos da Figura D.1. O que resultaria em uma resposta mais rápida e o efeito da variação da carga térmica no interior da sala seria atenuado.

Na estrutura da rede implementada, uma estação da rede exerce as funções de controle e atuação. As medidas para realimentação (temperatura interna e temperatura do evaporador) estão concentradas na mesma estação. A estação de controle e atuação requisita à estação de medição, as medidas da temperatura interna e da temperatura do evaporador para a realimentação. Assim como no controle PI, estas requisições são superamostradas. Quando a estação de controle

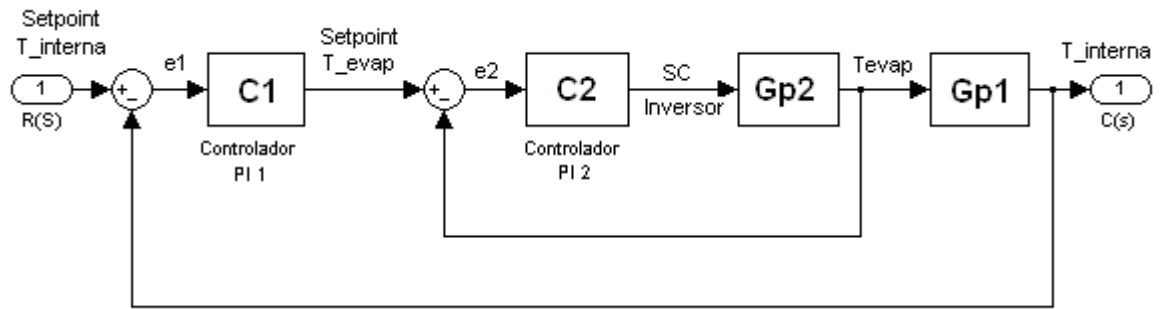


Figura D.1: Estrutura do controle em cascata.

recebe o retorno com os valores das medidas, esta atualiza os buffers das variáveis correspondentes.

A cada período de amostragem do loop interno, o algoritmo do controlador PI interno é processado e o sinal de controle enviado para o inversor de frequência, via saída analógica PWM da estação de atuação e controle. Da mesma forma, a cada período de amostragem do loop externo, o algoritmo de controle do loop externo é processado, e o valor do sinal de controle é armazenado na variável de referência de setpoint do controlador interno.

A partir de ensaios de resposta ao degrau, foram obtidos os modelos para GP1 e GP2, e projetado C1 e C2, utilizando a estrutura PI.

- Modelos Obtidos

$$Gp1(s) = \frac{0.3523}{130s + 1}$$

$$Gp2(s) = \frac{-1.69}{65s + 1}$$

- Validação dos Modelos Obtidos

Os modelos obtidos foram validados, e estes são satisfatórios para a aplicação pretendida, como apresentados nas Figuras D.2 e D.3.

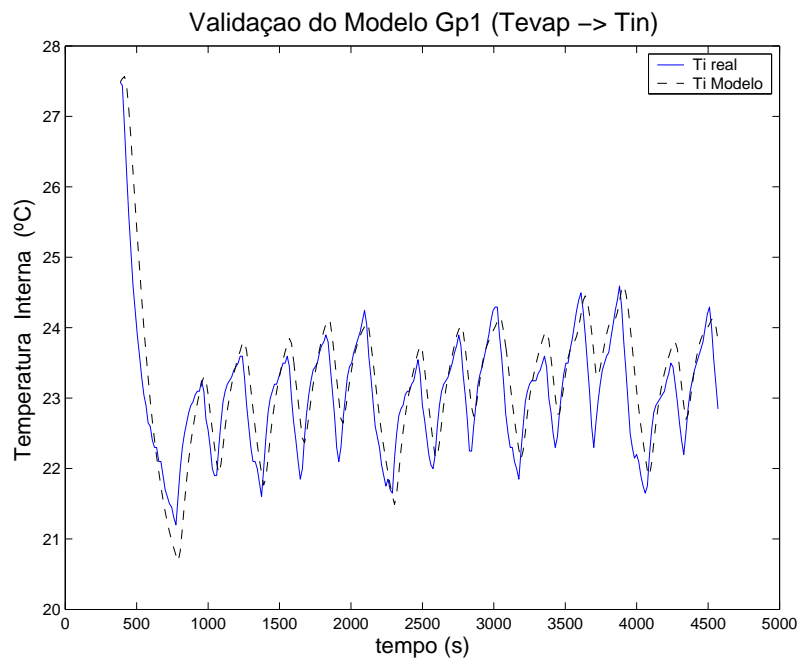


Figura D.2: Validação do modelo Gp1

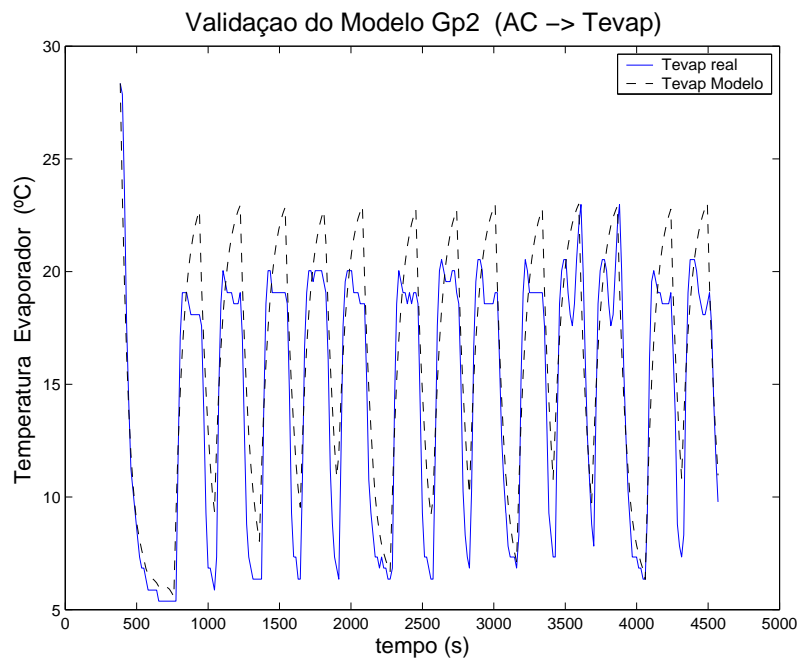


Figura D.3: Validação do modelo Gp2

Os controladores foram simulados e implementados no sistema real, na simulação uma melhoria no controle foi alcançada, como pode ser visto na Figura D.4. As Figuras D.5 e D.6 apresentam os sinais de controle obtidos na simulação. Entretanto no sistema real, não se obteve resultados satisfatórios, uma vez que a temperatura do evaporador não foi controlada, como pode ser visto na Figura D.7.

- Simulação do Controlador em Cascata (MatLab)

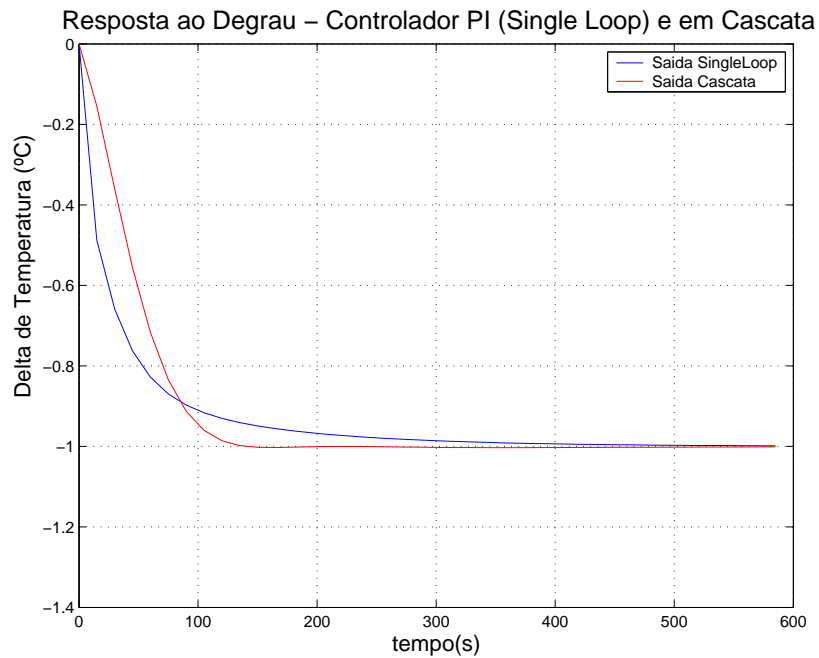


Figura D.4: Simulação - resposta ao degrau cascata e single loop

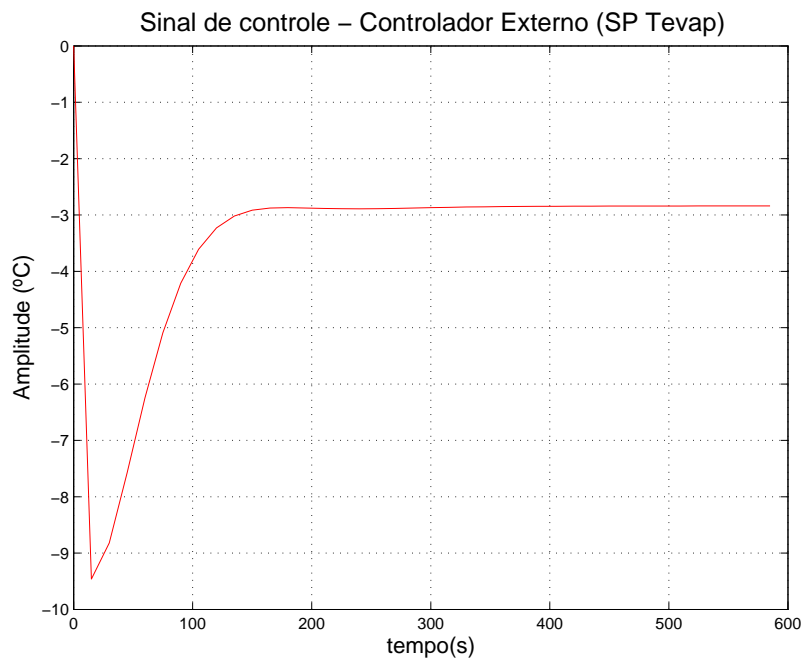


Figura D.5: Simulação - sinal de controle loop externo

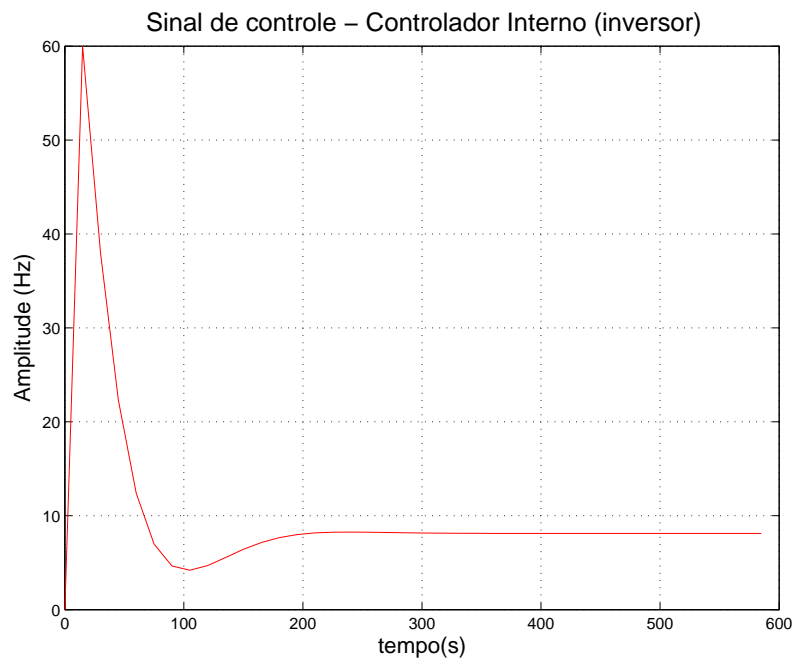


Figura D.6: Simulação - sinal de controle loop interno

- Resposta da Planta Real com Controlador em Cascata

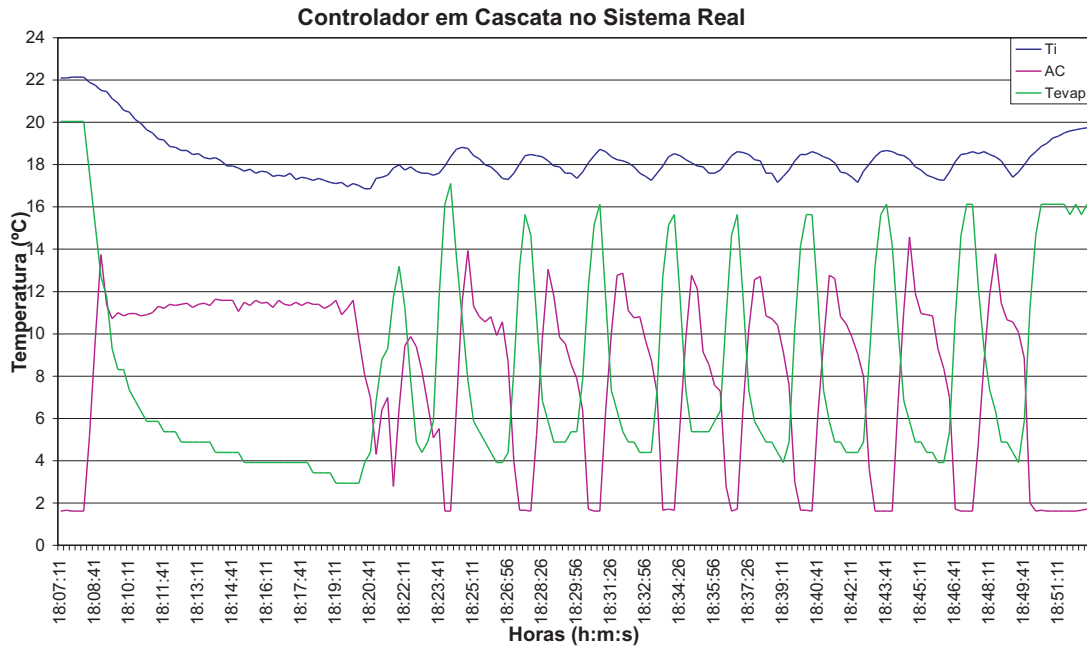


Figura D.7: Resposta do sistema real com controlador em cascata: temperatura interna (azul), temperatura do ar de saída do evaporador (verde), corrente no condicionador de ar (roxo).

Uma nova sintonia dos controladores é requerida, para tanto uma análise mais detalhada do problema deve ser realizada. O algoritmo implementado no microcontrolador permite o chaveamento entre o controlador em cascata e o controlador single-loop, e a resintonia dos parâmetros dos controladores remotamente (via Internet).