

## **TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

# **Índice de Conforto Térmico ISO7730 em Automação Predial**

**Eduardo Augusto Gallo  
Fernando Nascimento Ribeiro**

**Brasília, dezembro de 2007**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

## TRABALHO DE GRADUAÇÃO

# Índice de Conforto Térmico ISO7730 em Automação Predial

**Eduardo Augusto Gallo**  
**Fernando Nascimento Ribeiro**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro de Controle e Automação.

### **Banca Examinadora**

Prof. Adolfo Bauchspiess, UnB/ENE (Orientador) \_\_\_\_\_

Prof. Marco Antônio F. do Egito Coelho, UnB/ENE \_\_\_\_\_

Prof. Geovany Araújo Borges, UnB/ENE \_\_\_\_\_

Brasília, Dezembro de 2007

## FICHA CATALOGRÁFICA

EDUARDO, GALLO  
FERNANDO, RIBEIRO

Índice de Conforto Térmico ISO7730 em Automação Predial, [Distrito Federal] 2007.

xiv, 98p., (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2007). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

1. Conforto Térmico  
3. Racionalização de Energia  
5. Controle de Processos

2. Índice PMV  
4. Sistema Supervisório

I. Mecatrônica/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GALLO, E. A., RIBEIRO, F. N., (2007). Índice de Conforto Térmico ISO7730 em Automação Predial. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº , Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 98p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTORES: Eduardo Augusto Gallo, Fernando Nascimento Ribeiro.

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Índice de Conforto Térmico ISO7730 em Automação Predial.

GRAU: Engenheiro

ANO: 2007

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito dos autores.

---

Eduardo Augusto Gallo  
SHCGN 704 Bloco I ap 503 – Asa Norte.  
70730-739 Brasília – DF – Brasil.

---

Fernando Nascimento Ribeiro  
SQN 405 Bloco N ap 201 – Asa Norte.  
CEP Brasília – DF – Brasil.

## **RESUMO**

Grande parte dos gastos com energia elétrica em edifícios comerciais é destinada aos equipamentos de condicionamento de ar, principalmente nos prédios antigos não dotados de um projeto arquitetônico adequado. Em um contexto global de preocupações ecológicas em evidência, a economia de energia elétrica é extremamente importante, e os sistemas de automação predial modernos oferecem ferramentas de racionalização integradas. Inserido em um contexto maior que visa reduzir o consumo energético de equipamentos de ar condicionado em ambientes prediais sem prejuízo ao conforto térmico, o presente projeto tem por objetivo desenvolver as ferramentas necessárias nesse sentido, integrando sensores e atuadores em um sistema supervisorio, calculando o índice de conforto térmico do ambiente e implementando estratégias de controle sobre o índice PMV.

Palavras Chave: Conforto Térmico, Índice PMV, Racionalização de Energia, Sistema Supervisorio, Controle de Processos.

## **ABSTRACT**

Great part of the expenses with electrical energy in commercial buildings is due to air conditioning equipment, mainly in old buildings that don't have an appropriate architectural design. In a global context of ecological concerns in evidence, the reduction of the electrical energy consumption is extremely important, and modern building automation systems include efficient rationalization tools. Inserted in a wider context that aims to reduce the air conditioning equipment energy consumption in buildings with no prejudice to the thermal comfort, the present project has as objective to develop the necessary tools in this direction, integrating sensors and actuators in a supervisory system, calculating the thermal comfort index in a room and implementing PMV based control strategies.

Keywords: Thermal Comfort, PMV Index, Energy Rationalization, Supervisory System, Process Control.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	RACIONALIZAÇÃO DE ENERGIA EM AMBIENTES PREDIAIS .....	1
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	2
<b>2</b>	<b>NORMAS DE CONFORTO TÉRMICO .....</b>	<b>3</b>
2.1	CONCEITO DE CONFORTO TÉRMICO .....	3
2.2	PRINCIPAIS NORMAS .....	3
2.2.1	ASHRAE 55 (Condições térmicas do ambiente para ocupação humana) .....	3
2.2.2	ISO 7726 (Ergonomia do ambiente térmico – instrumentos de medida de grandezas físicas) .....	4
2.2.3	ISO 7730 (Ambientes térmicos moderados – determinação dos índices PMV e PPD e especificação das condições de conforto térmico).....	4
2.2.4	ISO 7993 (Ambientes quentes – determinação analítica e interpretação do stress térmico utilizando cálculo da taxa de suor desejado).....	5
2.2.5	Outras normas .....	5
<b>3</b>	<b>ÍNDICE PMV.....</b>	<b>6</b>
3.1	INTRODUÇÃO.....	6
3.2	ÍNDICE PMV .....	6
3.2.1	Descrição do índice PMV .....	6
3.2.2	Cálculo do índice PMV .....	7
3.2.3	Medição do índice PMV .....	8
<b>4</b>	<b>SISTEMAS SUPERVISÓRIOS.....</b>	<b>9</b>
4.1	VISÃO GERAL.....	9
4.2	TELAS .....	9
4.2.1	Telas de visão geral .....	10
4.2.2	Telas de grupo .....	10
4.2.3	Telas de tendência.....	10
4.2.4	Telas de relatórios de manutenção .....	10
4.3	PLANEJAMENTO DE UM SISTEMA DE SUPERVISÃO .....	10
4.3.1	Entendimento do processo.....	11
4.3.2	Planejamento da tomada de dados.....	11
4.3.3	Planejamento do banco de dados .....	11
4.3.4	Planejamento dos alarmes.....	11

4.3.5	Planejamento de hierarquia de navegação entre telas .....	12
4.3.6	Desenho da telas .....	12
4.3.7	Gráficos de tendências .....	13
4.3.8	Segurança.....	13
4.3.9	Padrão industrial de desenvolvimento.....	14
<b>5</b>	<b><i>ACTIONVIEW</i></b> .....	<b>15</b>
5.1	DESCRIÇÃO GERAL.....	15
5.2	MÓDULO DE MANUTENÇÃO AVSTUDIO.....	15
5.3	MÓDULO RUN-TIME .....	17
5.3.1	Servidor de comunicação e BDTR .....	17
5.3.2	Servidor de dados históricos .....	17
5.3.3	Interface homem-máquina .....	17
5.3.4	Servidor web .....	17
5.4	PRINCIPAIS TELAS DO AVIEWER .....	17
5.4.1	Telas de processo.....	18
5.4.2	Telas de medidas.....	18
5.4.3	Telas sumário de eventos .....	18
5.4.4	Telas de alarmes correntes.....	18
5.4.5	Telas de consulta a eventos históricos.....	19
5.4.6	Telas de tendência histórica de variáveis.....	19
5.4.7	Telas de tendência em tempo real .....	20
5.4.8	Telas de árvore do sistema .....	20
5.5	MÓDULOS DE COMUNICAÇÃO .....	20
5.6	PLANEJAMENTO PARA UTILIZAÇÃO DO ACTIONVIEW.....	20
5.6.1	Entendimento do processo.....	21
5.6.2	Planejamento da tomada de dados .....	22
5.6.3	Planejamento do banco de dados .....	23
5.6.4	Planejamento dos alarmes.....	24
5.6.5	Planejamento de hierarquia de navegação entre telas.....	24
5.6.6	Desenho da telas .....	24
5.6.7	Gráficos de tendências .....	27
5.6.8	Segurança.....	28
5.6.9	Padrão industrial de desenvolvimento.....	28
<b>6</b>	<b>CONTROLE DO PMV .....</b>	<b>29</b>
6.1	INTRODUÇÃO.....	29
6.2	CONTROLE LIGA-DESLIGA.....	29

6.3	CONTROLADOR PID .....	30
6.4	LUGAR DAS RAÍZES DISCRETO.....	31
6.4.1	Especificações no plano z.....	31
6.4.2	Procedimentos para o projeto do controlador.....	33
6.4.3	Adequação do controlador para a rede KMC .....	36
<b>7</b>	<b>VISÃO GERAL DO PROJETO.....</b>	<b>38</b>
7.1	CONTEXTO DO PROJETO .....	38
7.1.1	Paradigma “Ambient Intelligence” .....	38
7.1.2	Racionalização de energia .....	38
7.1.3	Sensores Wireless .....	39
7.1.4	Experimento de racionalização de energia.....	39
7.2	DESCRIÇÃO DO PROJETO .....	40
7.2.1	Introdução.....	40
7.2.2	Planejamento do sistema supervisório .....	40
7.2.3	Instalações físicas.....	41
7.2.4	Cálculo do PMV .....	41
7.2.5	Controle do PMV.....	42
<b>8</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>43</b>
8.1	INTRODUÇÃO.....	43
8.2	OBTENÇÃO DO PMV .....	43
8.2.1	Cálculo do valor do índice PMV .....	43
8.2.2	Medição das variáveis.....	43
8.2.3	Influência das variáveis envolvidas sobre o valor do PMV .....	45
8.3	MONITORAMENTO DO CONSUMO DE ENERGIA .....	50
8.4	CONFIGURAÇÃO DO SOFTWARE SUPERVISÓRIO .....	52
8.4.1	Configuração das variáveis .....	52
8.4.2	Cálculo do PMV .....	53
8.4.3	Configuração da IHM .....	53
8.5	CONTROLE DO PMV .....	54
8.5.1	Controlador liga-desliga .....	55
8.5.2	Controlador PID projetado por meio do LGR discreto .....	57
8.5.3	Comparação entre os controladores .....	64
<b>9</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>66</b>
9.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	66
9.2	SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	67

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>68</b>
<b>ANEXO I .....</b>	<b>71</b>
AI.1    CÁLCULO DA TAXA METABÓLICA $M$ .....	71
AI.2    CÁLCULO DO CALOR PERDIDO POR DIFUSÃO $E_{DIF}$ .....	71
AI.2.1    Cálculo da pressão de vapor $p_a$ .....	72
AI.2.2    Cálculo da pressão de saturação $p_{sat}$ .....	72
AI.3    CÁLCULO DO CALOR PERDIDO POR TRANSPIRAÇÃO $E_{TRANS}$ .....	72
AI.4    CÁLCULO DO CALOR PERDIDO POR RESPIRAÇÃO LATENTE $E_{RL}$ .....	72
AI.5    CÁLCULO DO CALOR PERDIDO POR RESPIRAÇÃO SENSÍVEL $E_{RS}$ .....	72
AI.6    CÁLCULO DO CALOR PERDIDO POR RADIAÇÃO $R$ .....	72
AI.6.1    Cálculo do fator de vestuário $f_{vest}$ .....	73
AI.6.2    Cálculo da resistência térmica da vestimenta $I_{vest}$ .....	73
AI.6.3    Cálculo da temperatura da vestimenta $T_{vest}$ .....	73
AI.6.4    Cálculo da temperatura radiante média $T_{rad}$ .....	74
AI.7    CÁLCULO DO CALOR PERDIDO POR CONVECÇÃO $C$ .....	77
AI.8    ANÁLISE DE RECURSIVIDADE .....	78
<b>ANEXO II .....</b>	<b>79</b>
AII.1    FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DISCRETA.....	79
<b>ANEXO III .....</b>	<b>80</b>
AIII.1    VARIÁVEIS UTILIZADAS.....	80
AIII.2    ENDEREÇOS DAS VARIÁVEIS.....	82
AIII.3    SCRIPTS UTILIZADOS.....	82
<b>ANEXO IV .....</b>	<b>93</b>
AIV.1    CLP.....	93
AIV.2    REDES DE COMUNICAÇÃO RS485 E RS232.....	94
AIV.3    PROGRAMAÇÃO DAS CONTROLADORAS .....	94
AIV.3.1    PRBS .....	94
AIV.3.2    Controlador liga-desliga .....	95
AIV.3.3    Controlador PID .....	96
<b>ANEXO V .....</b>	<b>97</b>
AV.1    SINAL PRBS.....	97
AV.2    IMPORTAÇÃO DE DADOS.....	97
AV.3    FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DA PLANTA .....	97

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Escala de sensação térmica usada pelo índice PMV.....	6
Figura 3.2 – Relação entre o PMV e o PPD.....	8
Figura 4.1 - Detalhe da barra de navegação em tela de sistema supervisório.....	12
Figura 4.2 - Padronização no projeto de uma tela. ....	13
Figura 4.3 - Tabela de permissão/restrição ao acesso. ....	13
Figura 5.1 – <i>AVStudio</i> . ....	16
Figura 5.2 – Tela com scripts associados à aplicação. ....	16
Figura 5.3 – Tela de processo típica. ....	18
Figura 5.4 – Tela sumário de eventos.....	19
Figura 5.5 – Tela de tendência histórica de variáveis.....	19
Figura 5.6 – Tela de tendência em tempo real.....	20
Figura 5.7 – Instalações da SPIN Engenharia.....	21
Figura 5.8 – Redes RS485 de controladoras e medidores LG ZMD-128.....	23
Figura 5.9 – Grupos de variáveis utilizados.....	23
Figura 5.10 – Tela de configuração de parâmetros.....	24
Figura 5.11 – Tela de consumo de energia.....	25
Figura 5.12 – Tela de parâmetros do controlador.....	25
Figura 5.13 – Tela do índice PMV.....	26
Figura 5.14 – Tela de temperatura.....	26
Figura 5.15 – Tela de umidade relativa do ar.....	27
Figura 5.16 – Tela de velocidade do vento.....	27
Figura 6.1 – Sistema em malha fechada com controlador liga-desliga.....	29
Figura 6.2 – Histerese do controlador liga-desliga.....	30
Figura 6.3 – Linhas de freqüência natural e amortecimento constantes.....	32
Figura 6.4 – Exemplo de sinal PRBS.....	33
Figura 6.5 – Tela para a escolha dos parâmetros da função de transferência resultante.	34
Figura 6.6 – Percentuais de aproximação diferentes para escolhas de parâmetros distintas.....	34
Figura 6.7 – Exemplo de LGR do sistema e resposta transitória obtidos com o SISOTOOL.....	35
Figura 6.8 – Tela com os parâmetros do controlador projetado através do SISOTOOL...	36
Figura 7.1 – Disposição dos equipamentos na planta piloto.....	40
Figura 7.2 – Equipamentos instalados na SPIN Engenharia.....	41
Figura 8.1 – Dependência do PMV com a temperatura.....	46
Figura 8.2 – Dependência do PMV com a temperatura, em detalhe o PMV.....	46
Figura 8.3 – Dependência do PMV com a velocidade do vento.....	47
Figura 8.4 – Dependência do PMV com a umidade relativa do ar.....	47
Figura 8.5 – Dependência do PMV com a temperatura média radiante.....	48
Figura 8.6 – Dependência do PMV com a temperatura média radiante, em detalhe o PMV.....	48
Figura 8.7 – Dependência do PMV com a resistência térmica do vestuário.....	49
Figura 8.8 – Dependência do PMV com a taxa de metabolismo.....	49
Figura 8.9 – Dependência do PMV com a taxa de metabolismo, em detalhe o PMV.....	50
Figura 8.10 – Evolução do consumo de energia.....	51
Figura 8.11 – Canais de comunicação.....	52
Figura 8.12 – Programas armazenados na memória das KMC's.....	54
Figura 8.13 – Resposta do PMV com o controlador liga-desliga.....	56

Figura 8.14 – Comportamento da temperatura e do PMV quando da atuação do liga-desliga.....	57
Figura 8.15 – Sinal PRBS de acionamento de resposta do PMV.....	58
Figura 8.16 – Combinações para verificação da aproximação com o sinal real.....	58
Figura 8.17 – Modelos distintos e sua aproximação com o sinal real.....	59
Figura 8.18 – Parâmetros do modelo matemático da planta do sistema.....	60
Figura 8.19 – LGR discreto e resposta da planta com realimentação unitária.....	60
Figura 8.20 – LGR discreto e resposta da planta com controle PID.....	61
Figura 8.21 – Parâmetros do controlador PID.....	61
Figura 8.22 – Resposta do PMV com o controlador PID.....	63
Figura 8.23 – Comportamento da temperatura e do PMV quando da atuação do PID.....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela AI.1 – Taxas metabólicas segundo a norma ISSO 7730.....	71
Tabela AI.2 – Resistência térmica da vestimenta.....	73
Tabela AI.3 – Áreas e temperaturas dos objetos da sala de reuniões.....	74
Tabela AI.4 – Áreas e temperaturas dos objetos da sala da diretoria.....	75
Tabela AI.5 – Áreas e temperaturas dos objetos da sala de desenvolvimento.....	76
Tabela AI.6 – Valores de referência de temperatura e área para pessoas e computadores.....	77
Tabela AIII.1 – Variáveis utilizadas.....	80
Tabela AIII.2 – Endereços das variáveis.....	82

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$A_{Du}$	Área de Dubois	[m <sup>2</sup> ]
$A_n$	Área da superfície exposta de um determinado objeto ou pessoa	[m <sup>2</sup> ]
$C$	Calor perdido por convecção a partir da superfície externa de um corpo vestido	[W/m <sup>2</sup> ]
$E_{dif}$	Calor perdido por difusão de vapor de água através da pele	[W/m <sup>2</sup> ]
$E_{rl}$	Calor perdido por respiração latente	[W/m <sup>2</sup> ]
$E_{rs}$	Calor perdido por respiração sensível	[W/m <sup>2</sup> ]
$E_{trans}$	Calor perdido por transpiração	[W/m <sup>2</sup> ]
$f_{vest}$	Fator de vestuário	[m <sup>2</sup> K/W]
$I_{vest}$	Resistência térmica da vestimenta	[m <sup>2</sup> K/W]
$L$	Carga térmica	[W/m <sup>2</sup> ]
$M$	Taxa metabólica (dada pela atividade física realizada pelo indivíduo)	[W/m <sup>2</sup> ]
$p_a$	Pressão de vapor	[kPa]
$p_{sat}$	Pressão de saturação	[kPa]
$R$	Calor perdido por radiação a partir da superfície externa para um corpo vestido	[W/m <sup>2</sup> ]
$T$	Taxa de amostragem	[s]
$T_{ar}$	Temperatura do ar	[°C]
$T_{ar1}$	Temperatura do ar da sala de reuniões	[°C]
$T_{ar2}$	Temperatura do ar da sala da diretoria	[°C]
$T_{ar3}$	Temperatura do ar da sala de desenvolvimento	[°C]
$T_n$	Temperatura de um determinado objeto ou pessoa	[°C]
$T_{rad}$	Temperatura radiante média	[°C]
$T_{rad1}$	Temperatura radiante média da sala de reuniões	[°C]
$T_{rad2}$	Temperatura radiante média da sala da diretoria	[°C]
$T_{rad3}$	Temperatura radiante média da sala de desenvolvimento	[°C]
$T_{vest}$	Temperatura da vestimenta	[°C]
$V$	Velocidade do vento	[m/s]

## Símbolos Gregos

$\theta$	Ângulo do pólo em coordenadas polares	[rad]
$\zeta$	Coeficiente de amortecimento	[-]
$\omega_n$	Frequência natural	[rad/s]

## Grupos Adimensionais

$E_1$	Limite inferior do sinal de erro para o controlador liga-desliga
$E_2$	Limite superior do sinal de erro para o controlador liga-desliga
$K_C$	Ganho do controlador discreto
$p_C$	Pólo do controlador discreto
$PMV$	Índice de conforto térmico
$U_{MAX}$	Saída máxima do controlador liga-desliga
$U_{MIN}$	Saída mínima do controlador liga-desliga
$UR$	Umidade relativa do ar
$z_{C1}$	Zero do controlador discreto
$z_{C2}$	Zero do controlador discreto

## Siglas

ASHRAE	<i>America Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BDTR	Base de Dados em Tempo Real
CLP	Controlador Lógico Programável
CPU	Unidade Central de Processamento
DEI	Dispositivo Eletrônico Inteligente
DLL	<i>Dynamic Library Link</i>
IHM	Interface Homem-Máquina
ISA	<i>International Standardizing Association</i>
ISO	<i>International Standard Organization</i>
LARA	Laboratório de Robótica e Automação
LAVSI	Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes
LGR	Lugar Geométrico das Raízes
NBR	Norma Brasileira
PID	Controlador proporcional-integral-derivativo
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>
PRBS	<i>Pseudorandom Binary Sequence</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SFC	<i>Sequential Flow Chart</i>

TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
UCL	Unidade de Controle Local
UnB	Universidade de Brasília
UTR	Unidade Terminal Remota

# 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a motivação do projeto, seu contexto, definição e algumas referências importantes para sua realização.

## 1.1 RACIONALIZAÇÃO DE ENERGIA EM AMBIENTES PREDIAIS

A preocupação ecológica vem crescendo em âmbito mundial. Confrontamo-nos diariamente com diversos problemas ambientais, entre os quais podemos citar o aquecimento global como sendo um dos piores. Dessa forma, diversas estratégias que buscam a preservação ambiental têm sido adotadas, e a racionalização de energia é uma delas.

Em prédios comerciais, verifica-se que os maiores gastos energéticos devem-se à utilização de ar condicionado. Num primeiro momento, um projeto arquitetônico racional (com materiais adequados, canais de ventilação e outros procedimentos) promove economia de energia em prédios. De forma complementar, procedimentos operacionais (como redução do uso de aparelhos que consomem muita energia) promovem economia adicional.

A principal motivação em se automatizar um edifício é a redução de seus custos operacionais, e a automação predial possui ferramentas adequadas para a implementação de mecanismos eficientes no que diz respeito à racionalização de energia. Esses mecanismos normalmente se baseiam em um sistema de controle em malha fechada, constituído de sensores e atuadores integrados por um sistema supervisor.

Neste contexto, o Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília está conduzindo um amplo projeto de automação predial, dividido em subprojetos, que visa a instalação de uma planta piloto para desenvolver uma ferramenta eficiente de racionalização de energia sem prejuízo ao conforto térmico do ambiente.

O presente projeto é importante para a efetivação dessa ferramenta, uma vez que propõe calcular o índice de conforto térmico utilizando um *software* supervisor capaz de integrar futuramente os sensores provenientes de outros subprojetos, implementar diferentes estratégias de controle simples para manter o conforto térmico em um ambiente piloto, comparando-as, e preparar os dados obtidos para a futura implementação de um controle mais abrangente, atuando também sobre a racionalização de energia.

## 1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As áreas de estudo essenciais para a realização deste projeto são as normas de conforto térmico, a utilização de *software* supervisorio para a integração de sistemas em automação predial e a implementação de estratégias de controle sobre o índice PMV.

Na área de conforto térmico, os estudos [1] e [2] apresentam um bom embasamento teórico sobre o assunto. O trabalho [3] tece um comparativo geral entre as diferentes normas de conforto térmico, enquanto as referências [4] e [5] demonstram equações matemáticas para o cálculo do índice de conforto térmico. Por fim, a pesquisa [6] faz um apanhado geral de todos os estudos realizados nesta área no Brasil.

No que tange à utilização de sistemas supervisorios, um bom exemplo prático específico para o controle de gastos energéticos pode ser encontrado em [7]. Em uma abordagem mais teórica, os trabalhos [8] e [9] apresentam bons estudos sobre a definição e o planejamento de sistemas supervisorios, respectivamente.

Sobre o projeto de estratégias de controle do conforto térmico, as referências [10] e [11] apresentam a teoria geral de controle de processos e a [12] mostra a teoria de controle digital, fundamental no projeto de uma das estratégias de controle utilizadas.

## **2 NORMAS DE CONFORTO TÉRMICO**

Este capítulo apresenta a definição de conforto térmico utilizada neste trabalho, bem como uma breve descrição das outras normas que tratam deste conceito.

### **2.1 CONCEITO DE CONFORTO TÉRMICO**

Segundo a norma ISO 7730, “conforto térmico é o estado de alma que expressa satisfação com o ambiente térmico”.

O conceito de conforto térmico não tem uma definição única. Isto significa dizer que a sensação de conforto térmico não está associada a uma temperatura específica. Tal conforto depende de fatores mensuráveis (como temperatura do ar, velocidade do vento, umidade do ar, entre outros) e de fatores não-mensuráveis (como estado mental, hábitos, educação, entre outros). Sendo assim, a sensação de conforto térmico pode variar bastante de uma pessoa para outra, mesmo que elas estejam sob as mesmas condições térmicas [13].

A sensação de conforto térmico também é influenciada por fatores como o nível de atividade metabólica e pelo tipo de roupa utilizado pelas pessoas [1]. Uma pessoa realizando uma atividade física intensa (como dançar, por exemplo) tende a sentir-se mais confortável a uma temperatura mais baixa do que uma outra que se encontra em repouso. Da mesma maneira, alguém vestindo roupas leves sente-se mais confortável com uma temperatura mais alta do que uma pessoa usando terno e gravata.

O conforto térmico pode ser influenciado, ainda, pela geometria do ambiente em estudo. Isto acontece devido ao fato de o processo térmico ser de natureza distribuída. Aparelhos de ar condicionado geram fortes correntes de ar em suas proximidades, causando desconforto local. O mesmo ocorre próximo de janelas com incidência solar. Sendo assim, o aspecto geométrico do ambiente pode gerar nichos de desconforto [14].

Para que o conforto térmico seja atingido em ambientes internos, o uso de normas se faz estritamente necessário [1].

### **2.2 PRINCIPAIS NORMAS**

#### **2.2.1 ASHRAE 55 (Condições térmicas do ambiente para ocupação humana)**

A norma ASHRAE 55 visa especificar as características de ambientes internos que, associadas a fatores pessoais, geram condições térmicas aceitáveis para no mínimo 80% dos ocupantes do local [3].

Os fatores físicos do ambiente em estudo que são considerados por esta norma são: temperatura, radiação térmica, umidade e velocidade do vento. Fatores pessoais também são levados em conta. São eles: nível de atividade e tipo de roupa dos ocupantes do ambiente.

De acordo com esta norma, as variáveis não devem ser analisadas isoladamente, visto que o conforto térmico é complexo e responde à interação entre todos os fatores de interesse. Esta norma não se aplica a locais contaminados que possam afetar o conforto ou, até mesmo, a saúde humana [3].

### **2.2.2 ISO 7726 (Ergonomia do ambiente térmico – instrumentos de medida de grandezas físicas)**

A norma ISO 7726 tem como objetivo definir os requisitos mínimos que os instrumentos usados para a medição de grandezas físicas que caracterizam um ambiente devem possuir [3]. Os métodos de medição também são definidos.

As especificações e métodos presentes na norma são divididos em duas classes: a classe C define especificações e métodos relacionados a medições em ambientes moderados (norma de conforto); a classe S define especificações e métodos relacionados a medições em ambientes submetidos a um grande *stress* térmico (norma de *stress* térmico) [3].

### **2.2.3 ISO 7730 (Ambientes térmicos moderados – determinação dos índices PMV e PPD e especificação das condições de conforto térmico)**

A norma ISO 7730 apresenta um método para previsão da sensação térmica e do grau de desconforto de pessoas expostas a ambientes de temperatura moderada. Além disso, especifica as condições térmicas aceitáveis para o conforto [3].

A sensação térmica humana está relacionada ao equilíbrio térmico corporal. Este equilíbrio é influenciado pelo nível de atividade física da pessoa e pelo tipo de roupa que a mesma utiliza, bem como por parâmetros físicos como temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade do vento e umidade do ar. Caso todos esses fatores possam ser medidos ou estimados, a sensação térmica corporal pode ser prevista através do cálculo do índice PMV (*Predicted Mean Vote*) [3], que representa a porcentagem esperada de pessoas satisfeitas para diferentes condições térmicas do ambiente. O PMV permite estimar a quantidade de pessoas não satisfeitas, sendo este valor dado pelo índice PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*).

Esta norma é bastante difundida mundialmente e tem grande aceitação acadêmica [3]. Isto acontece devido a sua base física [15]. Dentre todas as normas pesquisadas, esta é a que melhor aproxima as condições de conforto com as quais trabalhamos. Sendo assim, a

norma ISO 7730 será utilizada neste trabalho como referência para o cálculo do conforto térmico.

Para que haja um maior entendimento sobre esta norma, um capítulo posterior será dedicado à descrição da mesma, bem como do índice PMV.

#### **2.2.4 ISO 7993 (Ambientes quentes – determinação analítica e interpretação do *stress* térmico utilizando cálculo da taxa de suor desejado)**

A norma ISO 7993 demonstra um método para avaliação e interpretação do *stress* térmico experimentado por um ser humano em um ambiente quente. Descreve um cálculo do equilíbrio térmico corporal baseado na taxa de suor que o corpo humano deve produzir para manter tal equilíbrio. Esta norma possibilita a determinação de quais parâmetros do ambiente devem ser modificados e de quanto deve ser esta modificação para que haja redução dos riscos à saúde de um ocupante do local [3].

#### **2.2.5 Outras normas**

Existem outras normas que não possuem relação direta com o conforto térmico, mas que dizem respeito às características térmicas de ambientes internos.

A norma ISO 7243 é complementar a ISO 7730. Enquanto esta última define o nível de conforto térmico de um ambiente, a primeira especifica o nível de desconforto térmico. É utilizada quando a norma ISO 7730 não pode ser aplicada.

O projeto do ambiente é essencial para o seu desempenho térmico. Algumas das normas que regulamentam esta área são: ASHRAE 62, que define a ventilação necessária para a qualidade do ar em ambientes internos; e ASHRAE 113, a qual apresenta um método de teste da difusão do ar em ambientes internos [3].

O cálculo do conforto térmico é influenciado por fatores pessoais relativos aos ocupantes do ambiente em estudo. A norma ISO 8996 é utilizada para determinação da produção metabólica de calor. A norma ISO 9920 especifica a estimativa do isolamento térmico e da resistência evaporativa de diferentes tipos de roupa [3].

## 3 ÍNDICE PMV

Este capítulo apresenta o índice de conforto térmico PMV, trazendo uma breve descrição sobre o mesmo, o seu cálculo e alguns métodos de medição.

### 3.1 INTRODUÇÃO

Existem diversas normas que definem a idéia de conforto térmico. O capítulo anterior apresentou uma breve descrição de apenas uma pequena parte delas. Na verdade, mais de trinta medidas diferentes de conforto térmico já foram propostas [14].

Uma das normas de conforto térmico mais aceitas mundialmente é a ISO 7730, a qual utiliza o índice PMV proposto por Fanger em 1970 [14].

### 3.2 ÍNDICE PMV

#### 3.2.1 Descrição do índice PMV

O cálculo do índice PMV leva em consideração quatro variáveis físicas (temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade do vento e umidade do ar) e duas variáveis pessoais (nível de atividade física realizado pelos ocupantes do ambiente e tipo de roupa utilizado pelos mesmos) [7].

O índice PMV utiliza uma escala de sensação térmica proposta por Fanger [7], a qual pode ser vista na Fig. 3.1:

PMV	-	Nível de Conforto
3		Muito Quente
2		Quente
1		Morno
0		Confortável
- 1		Levemente frio
- 2		Frio
- 3		Muito Frio

Figura 3.1 – Escala de sensação térmica usada pelo índice PMV, [14].

Observando a Fig. 3.1, podemos perceber que o PMV nulo representa o estado térmico confortável. De acordo com a norma ISO 7730, alguns exemplos de situações que representam esse estado térmico confortável (PMV = 0) são: uma pessoa usando roupas leves e realizando uma atividade física pouco intensa sente-se confortável a uma temperatura de 23°C; caso esta mesma pessoa passe a vestir roupas de inverno e a exercer atividade física mais intensa, sua temperatura de conforto cairá para 12°C [14].

### 3.2.2 Cálculo do índice PMV

Para obtermos uma expressão para o índice PMV, devemos, antes de mais nada, entender o mecanismo de regulação térmica do corpo humano.

O corpo humano necessita de calor para exercer suas atividades. Na verdade, nosso corpo é uma fonte de calor. Esse calor é oriundo do metabolismo dos alimentos que ingerimos [5].

O corpo dos seres humanos é homeotérmico. Isto acontece porque temos mecanismos que promovem trocas de calor com o meio ambiente, dissipando a energia gerada através das atividades físicas que exercemos [5].

Nosso organismo dissipa calor basicamente de duas maneiras: através da pele e da respiração. A dissipação de calor através da pele, por sua vez, pode ser dividida em perda de calor por convecção ( $C$ ), por radiação ( $R$ ), por difusão de vapor de água ( $E_{dif}$ ) e por transpiração ( $E_{trans}$ ). Já a dissipação de calor através da respiração divide-se em perda de calor por respiração sensível ( $E_{rs}$ ) e por respiração latente ( $E_{rl}$ ) [5].

Pode-se assumir que, em reação às condições ambientais, a produção de calor pelo corpo humano (dada pela taxa metabólica  $M$ ) será igual à dissipação, fazendo com que não haja armazenamento significativo de calor por parte do mesmo. Nestas condições, o equilíbrio térmico corporal é dado por [4]:

$$M - E_{dif} - E_{trans} - E_{rl} - E_{rs} = R + C \quad (1)$$

Assume-se que a sensação térmica para um dado nível de atividade é função da produção de calor interno. Além disso, supõe-se que o calor perdido para o ambiente em estudo é aquele que ocorreria para um homem hipoteticamente mantido sob valores confortáveis de temperatura média da pele e taxa de suor para o nível de atividade em questão [4].

De acordo com essa definição, a carga térmica  $L$  (a qual é dada por unidade de área de superfície corporal) pode ser escrita como sendo:

$$L = M - E_{dif} - E_{trans} - E_{rl} - E_{rs} - R - C \quad (2)$$

Dependendo da carga térmica à qual um corpo é submetido, este irá alterar sua temperatura média da pele e a taxa de suor para manter sua temperatura interna. Isto faz com que a sensação térmica se modifique. Sendo assim, podemos concluir que existe uma relação entre a sensação térmica demonstrada por uma pessoa e a carga térmica à qual está submetida. A carga térmica, por sua vez, é influenciada pela produção de calor corporal interna. Logo, podemos dizer que a sensação térmica tem relação estreita com a produção de calor corporal interna [4].

Fanger conduziu experimentos nos quais avaliava a relação entre a carga térmica e a opinião das pessoas sobre a sensação térmica. Observando os resultados, ele chegou ao índice de conforto térmico PMV, dado por:

$$PMV = (0,303 e^{-0,036M} + 0,028)(M - E_{dif} - E_{trans} - E_{rl} - E_{rs} - R - C) \quad (3)$$

O cálculo dos termos individuais da equação do *PMV* pode ser encontrado no Anexo I.

A relação do índice *PMV* com o percentual de pessoas não satisfeitas (*PPD*) é representada graficamente pela Fig. 3.2:

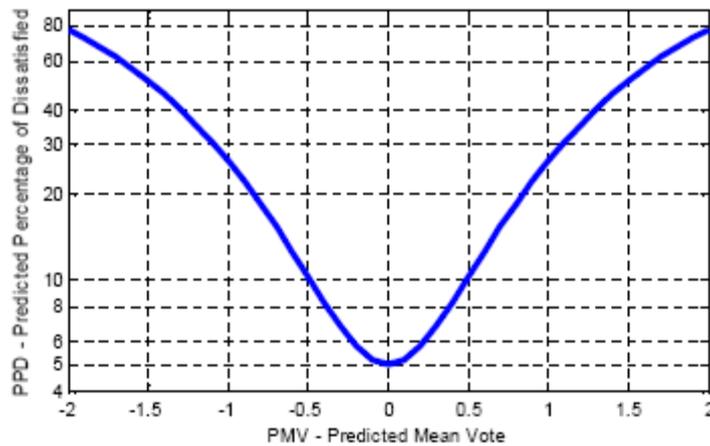


Figura 3.2 – Relação entre o *PMV* e o *PPD*, [14].

Observando a Fig. 3.2, podemos perceber que, mesmo para a situação de conforto térmico ( $PMV = 0$ ), ainda existem pessoas que não se sentem confortáveis. A porcentagem de pessoas não satisfeitas com a condição de conforto é conhecida como *PPD* e acontece devido à influência de um fator não-mensurável (bastante pessoal) no conceito de sensação térmica: existem pessoas que preferem ambientes mais quentes, enquanto que outras preferem aqueles mais frios.

### 3.2.3 Medição do índice *PMV*

O índice *PMV* pode ser determinado de três maneiras diferentes. São elas [4]:

- Uso direto da Eq. 3;
- Consulta a tabelas contendo valores do *PMV* para diversas combinações entre o nível de atividade, a temperatura do ambiente e a velocidade do vento;
- Através da medição direta dos parâmetros de interesse com o auxílio de sensores integrados, para então utilizar a Eq. 3.

Neste projeto, busca-se a obtenção do índice *PMV* através do terceiro método de determinação citado anteriormente.

## 4 SISTEMAS SUPERVISÓRIOS

Este capítulo apresenta uma breve introdução aos sistemas supervisórios em geral, bem como ao meio em que surgiram e as mais importantes ferramentas sistemas de automação.

### 4.1 VISÃO GERAL

Os sistemas supervisórios surgiram com o intuito de aperfeiçoar o monitoramento do funcionamento dos diversos circuitos em sistemas de automação. Desta forma, os *softwares* SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) são responsáveis pela aquisição dos dados de funcionamento dos circuitos para o computador, pela sua organização, utilização e gerenciamento, mostrando ao operador do sistema o estado dos circuitos em tempo real [8].

Suponha uma planta com dois mil circuitos (chamados pontos controlados ou automatizados). Os dados de funcionamento de cada circuito são enviados sequencialmente a uma determinada taxa de varredura. Os dados adquiridos devem ser condicionados, convertidos em unidades de engenharia adequadas e armazenados em um banco de dados operacional, além de serem expostos através de uma interface clara para os operadores do sistema [9].

Se o *software* identifica uma situação de funcionamento incorreta em algum ponto do sistema, um alarme pode ser configurado em níveis de importância diferentes, advertindo a equipe de monitoramento e informando a região da possível falha.

O *software* SCADA deve permitir ainda que estratégias de controle possam ser desenvolvidas a partir dos dados coletados, alterando *set-points* de CLP's, por exemplo [8].

A solução completa de *softwares* supervisórios normalmente abrange ferramentas distintas para configurações gerais do programa, desde a criação de telas, até a manipulação de variáveis e para a execução em tempo real (basicamente coleta e tratamento dos dados, de acordo com a configuração inicial).

Desta forma, o *software* supervisório é visto como o conjunto de programas gerado e configurado no *software* básico de supervisão, que atua em comunicação com os CLP's da planta automatizada.

### 4.2 TELAS

As variáveis do processo devem ser claramente apresentadas ao operador por meio de telas específicas que podem ser visualizadas durante a navegação no módulo de tempo real. O conjunto de telas do *software* de supervisão deve permitir aos operadores controlar e supervisionar completamente toda a planta [8]. As telas deverão ser organizadas em

estrutura hierárquica do tipo árvore, permitindo um acesso seqüencial e rápido [9]. A seguir, são descritas as principais telas que um aplicativo SCADA normalmente contém:

#### **4.2.1 Telas de visão geral**

São telas que apresentam ao operador uma visão global de um processo. Nestas telas são apresentados os dados mais significantes à operação e objetos que representam o processo. Os dados devem procurar resumir de forma significativa os principais parâmetros a serem controlados (ou monitorados) do processo específico [8].

#### **4.2.2 Telas de grupo**

São telas representativas de cada processo ou unidade, apresentando objetos e dados de uma determinada área de modo a relacionar funções estanques dos processos. As telas de grupo também devem possibilitar ao operador, acionar os equipamentos da área através de comandos do tipo abrir/fechar ou ligar/desligar. Além disso, o operador poderá alterar os parâmetros de controle ou supervisão, tais como *set-point's*, limites de alarmes, modos de controle, etc. [8].

#### **4.2.3 Telas de tendência**

São telas normalmente padrão do *software* básico de supervisão. Estas telas apresentam uma ou várias variáveis simultaneamente, de forma gráfica, com valores coletados em tempo real (*on-line*), na forma de tendência real e na forma histórica *off-line* - valores de arquivos pré-armazenados em disco. Estas tendências podem ser apresentadas em forma de gráficos ou em forma tabular, com os últimos valores coletados para cada variável [8].

#### **4.2.4 Telas de relatórios de manutenção**

São compostas por informações de problemas, alarmes, defeitos e dados de manutenção das diversas áreas referentes ao processo e equipamentos destes, incluindo o próprio sistema de controle. As informações são do tipo histórico de falhas, programa de manutenção dos equipamentos (corretiva e preventiva), e informações gerais dos equipamentos (comerciais, assistências técnicas, etc.) [8]. Os relatórios de falhas apresentados podem ser de grande utilidade para usos estatísticos de confiabilidade de determinados equipamentos.

### **4.3 PLANEJAMENTO DE UM SISTEMA DE SUPERVISÃO**

Nove etapas são recomendadas quando se planeja um sistema de supervisão para determinada planta [9]:

### **4.3.1 Entendimento do processo**

Consiste no levantamento completo e detalhado de informações sobre o que deve ser feito, conversando com os operadores da planta ou com especialistas e com o corpo administrativo, para entender o processo e registrar as informações que devem estar disponíveis.

O processo deve ainda ser quebrado em etapas e devem ser determinadas as variáveis de cada etapa que devem ser monitoradas. Deve ser adotado um sistema de nomes para as etapas e para as variáveis de forma padronizada e levando em conta o seu significado físico [9].

### **4.3.2 Planejamento da tomada de dados**

Para que o sistema se torne conciso, é interessante ter um limite superior para o número de dados, escolhendo apenas as variáveis essenciais, o que evita também o excesso de tráfego na rede.

Devem ser determinados o protocolo de comunicação e a classe de varredura (*scan*), isto é, a velocidade de leitura das variáveis [9].

### **4.3.3 Planejamento do banco de dados**

Normalmente os bancos de dados são elaborados em programas comerciais disponíveis, como o *Microsoft® Access*, por exemplo. O banco de dados deve conter informações sobre fluxos de processo ou diagramas de instrumentação da planta, lista de endereços das variáveis ou endereços dos registradores nos CLP's e lista de alarmes.

As variáveis devem ser organizadas em pastas de arquivos, que facilitam o manuseio das *tags*, organizando-as em grupos. Os agrupamentos devem possuir significados, podendo incluir os equipamentos similares ou de uma mesma área dentro de uma planta, por exemplo [9].

### **4.3.4 Planejamento dos alarmes**

Os alarmes têm a função de chamar a atenção dos operadores para alguma modificação do estado do processo. As alterações podem ser configuradas para diferentes níveis de prioridade. Por exemplo, para os níveis de um a cinco, etapas fundamentais para o processo receberiam alarmes de prioridade cinco, enquanto etapas menos importantes receberiam alarmes com prioridades menores. Desta forma, o *software* indica aos operadores os problemas críticos que, se ocorrerem, devem ser solucionados com urgência, antes dos demais.

Devem ser planejadas as condições de acionamento dos alarmes, a forma de notificação dos operadores, o envio de mensagens e as providências a serem tomadas [9].

### 4.3.5 Planejamento de hierarquia de navegação entre telas

A hierarquia de navegação consiste em uma série de telas que fornecem progressivamente detalhes das plantas e seus constituintes à medida que se navega através do aplicativo.

A boa organização da navegação torna o sistema claro e condizente com a realidade, guiando o serviço dos operadores.

Geralmente, as telas apresentam barras de navegação, com botões que dão uma idéia do conteúdo da tela a ser chamada [9], como na Fig. 4.1.

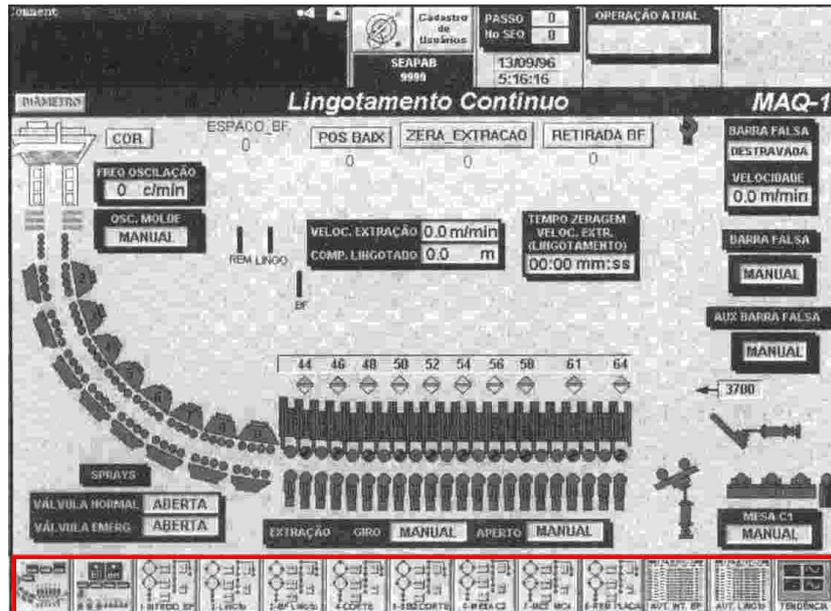


Figura 4.1 - Detalhe da barra de navegação em tela de sistema supervisorio [9].

### 4.3.6 Desenho da telas

Organizar de forma clara as partes constituintes das telas aumenta a eficiência do sistema supervisorio, ajudando o trabalho dos operadores. Desta forma, símbolos, cores e nomes de botões devem ser usados com consistência e deve-se tomar cuidado especial quando for feito o chaveamento entre telas, colocando-se os mesmos tipos de botões nas mesmas posições.

Para tornar a visualização e interpretação do processo clara, as telas não devem conter excesso de informações e deve-se evitar abreviações de difícil compreensão [9].

Devem ser utilizados símbolos de fácil reconhecimento e, de preferência, padronizados, como por exemplo, os símbolos da ISA convencionados para tanques e válvulas. Observe na Fig. 4.2 a seguir a padronização da posição dos botões e dos campos informativos das variáveis.

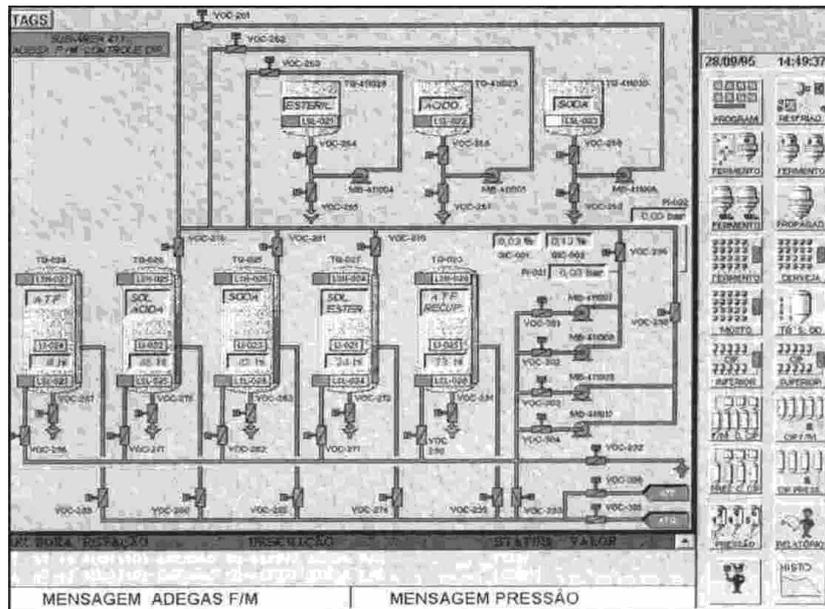


Figura 4.2 - Padronização no projeto de uma tela [9].

### 4.3.7 Gráficos de tendências

O próximo passo é a elaboração dos gráficos de tendências, que mostram como determinadas variáveis de processo mudam com o passar do tempo e poderão ser exibidos durante a navegação pelo processo em tempo real. Os gráficos podem apresentar mais de uma variável e devem ser elaborados com várias cores, para tornar a visualização e interpretação mais clara [9].

### 4.3.8 Segurança

Deve-se planejar a restrição do acesso das pessoas ao sistema, para garantir sua segurança. Cada operador deve ter acesso a uma determinada área, dependendo de sua função dentro da planta, diferenciando, por exemplo, o acesso dos técnicos em manutenção ao corpo administrativo; cada um terá acesso a informações diferentes. O acesso de cada usuário é protegido por senha [9]. A restrição de acesso aos diferentes operadores é feita por intermédio de uma tabela semelhante à da Fig. 4.3, a seguir, em que as linhas representam os usuários e as colunas representam as telas que podem ou não ser acessadas [8].

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	X	W	Y	Z
ADMIN	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
USER 1	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
USER 2	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
USER 3	Y	Y	Y	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
USER 4	Y	N	N	N	N	N	Y	Y	Y	N	N	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y

Figura 4.3 - Tabela de permissão/restrrição ao acesso.

#### **4.3.9 Padrão industrial de desenvolvimento**

Finalmente, o sistema supervisor deve ser desenvolvido de acordo com um padrão comercial, como o *Windows*, da *Microsoft®*, por exemplo, reduzindo o tempo de aprendizagem no caso de o operador já estiver familiarizado com sua interface [9].

## 5 *ActionView*

O *ActionView* é um *software* do tipo SCADA genérico para a aplicação em sistemas de supervisão e controle de processos desenvolvido pela SPIN Engenharia de Automação Ltda. e executado em ambiente *Windows*. Neste capítulo, apresentaremos seus módulos componentes e suas principais funcionalidades, bem como seu planejamento para ser utilizado no cálculo e monitoramento do índice de conforto térmico.

### 5.1 DESCRIÇÃO GERAL

O *ActionView* é disponibilizado com os seguintes módulos principais:

**Módulo de Manutenção *AVStudio*:** módulo de desenvolvimento de aplicativos, responsável pela geração da base de dados de tempo real e das telas. Um módulo pode desenvolver um número ilimitado de aplicações, independentemente do número de *tags* [16].

**Módulo *Run-time*:** responsável pela coleta, tratamento e apresentação dos dados em tempo real e execução das tarefas de controle programadas.

**Módulos de Comunicação:** compatíveis com os protocolos dos principais fabricantes de UCL's (Unidades de Controle Local), UTR's (Unidades Terminais Remotas), CLP's (Controladores Lógicos Programáveis), relés e outros DEI's (Dispositivos Eletrônicos Inteligentes) [17].

Vamos fazer uma breve descrição sobre os principais módulos componentes do *ActionView* a seguir.

### 5.2 MÓDULO DE MANUTENÇÃO *AVStudio*

Esse módulo corresponde a um ambiente de desenvolvimento *off-line* de telas, *scripts*, rotinas de condicionamento de alarmes, etc., a serem utilizados posteriormente em um ambiente em tempo real [16].

A Figura 5.1 a seguir mostra uma tela exemplo do *AVStudio*, em que no topo existem menus com as funções disponibilizadas e barras de ferramentas com atalhos para as principais funções. Na esquerda é apresentada a árvore do projeto onde o usuário pode definir estações de trabalho, canais de comunicação, usuários, perfis de acesso, base de dados de tempo real, telas de processo, telas de medidas e bibliotecas de objetos de visualização.

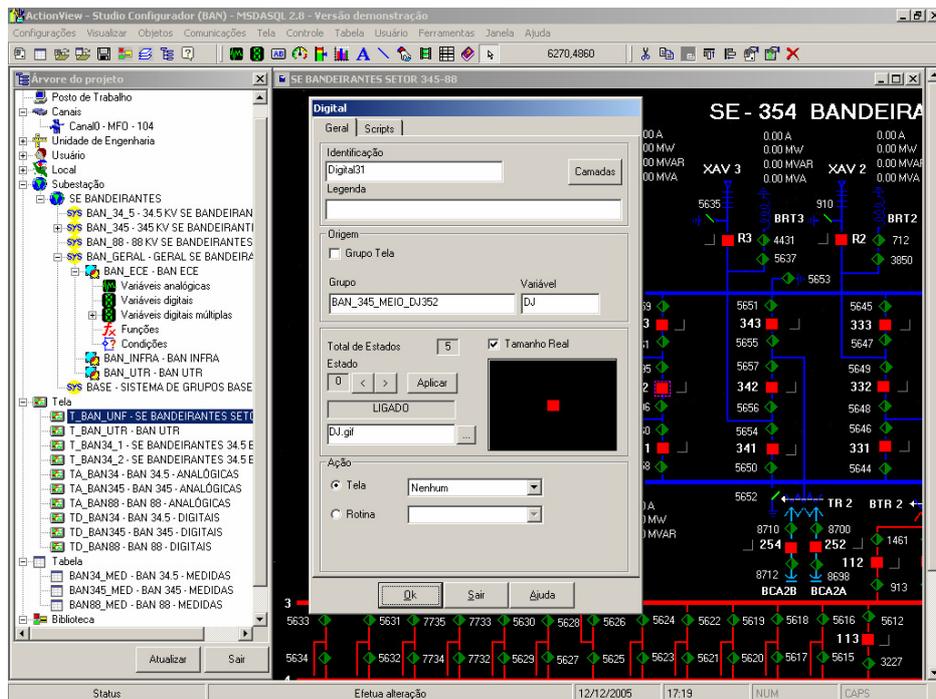


Figura 5.1 – AVStudio.

Outra importante funcionalidade do *ActionView* é a possibilidade de programação interna dos objetos através de *scripts*. Com esta programação é possível alterar-se o comportamento normal da visualização e monitoração dos pontos, através da escrita de procedimentos que serão executados na ocorrência de determinados eventos [16].

Os *scripts* são programas agregados à aplicação como um todo, às variáveis da aplicação, às telas e aos objetos de visualização das telas. Sua execução está associada com eventos determinados pelo usuário durante a programação. Um *script* do tipo *OnTimer*, por exemplo, é executado em intervalos programados ou sempre que ocorrer algum evento de relógio, assim como um *script OnStart* é executado no início da aplicação [16]. Na Figura 5.2 a seguir, é mostrada uma tela com *scripts* associados a uma aplicação.

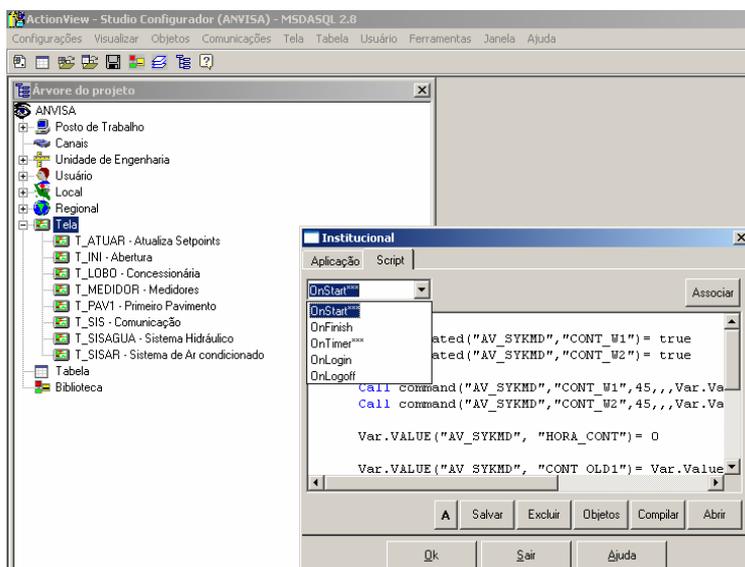


Figura 5.2 – Tela com *scripts* associados a uma aplicação.

### **5.3 MÓDULO *RUN-TIME***

O módulo *Run-time* é executado durante o monitoramento da planta, sendo responsável pela coleta (*scan*), tratamento, armazenamento e apresentação dos dados para o operador.

Desta forma, o módulo *Run-time* é composto pelos seguintes processos: *AVServer* (servidor de comunicação e BDTR), *AVHistory* (servidor de dados históricos), *AViewer* (servidor de IHM) e *AVWeb* (servidor de *web*) [16].

#### **5.3.1 Servidor de comunicação e BDTR**

O *AVServer* permanece constantemente lendo dados e atualizando os valores das variáveis. Sempre que o estado dos equipamentos do processo controlado é modificado o *AVServer* executa as tarefas necessárias ao controle supervisório do processo, atualizando as informações mostradas aos operadores através do *AViewer* [16].

#### **5.3.2 Servidor de dados históricos**

O “*run-time*” sempre disponibiliza um módulo servidor de dados históricos com capacidade de suportar algumas semanas. Se nada for declarado, esse módulo ficará residente na mesma máquina do *AVServer*, e será implementado usando um arquivo do tipo *MS Access* [16].

#### **5.3.3 Interface homem-máquina**

Todos os recursos do *AViewer*, referentes à supervisão, comando e controle dos processos, estão disponíveis através de uma interface amigável em que telas de processo, alarmes, eventos, consultas a dados históricos, etc., são gerenciadas por processos independentes. Assim, se um usuário fizer uma consulta a grande volume de dados históricos, poderá em paralelo visualizar outras telas [16].

#### **5.3.4 Servidor *web***

O *AVWeb* disponibiliza as telas do módulo *run-time* na *web*. Dessa forma, além das telas de tempo real os usuários têm acesso à base de dados histórica [16].

### **5.4 PRINCIPAIS TELAS DO *AViewer***

Os principais pontos da base de dados referentes à supervisão, comando e controle do processo, estão disponíveis através das seguintes telas e janelas principais:

### 5.4.1 Telas de processo

São telas que contêm diagramas gerais do sistema, animados através dos objetos de visualização que serão modificados em tempo real [16]. A Figura 5.3 a seguir mostra um exemplo de tela de processo.

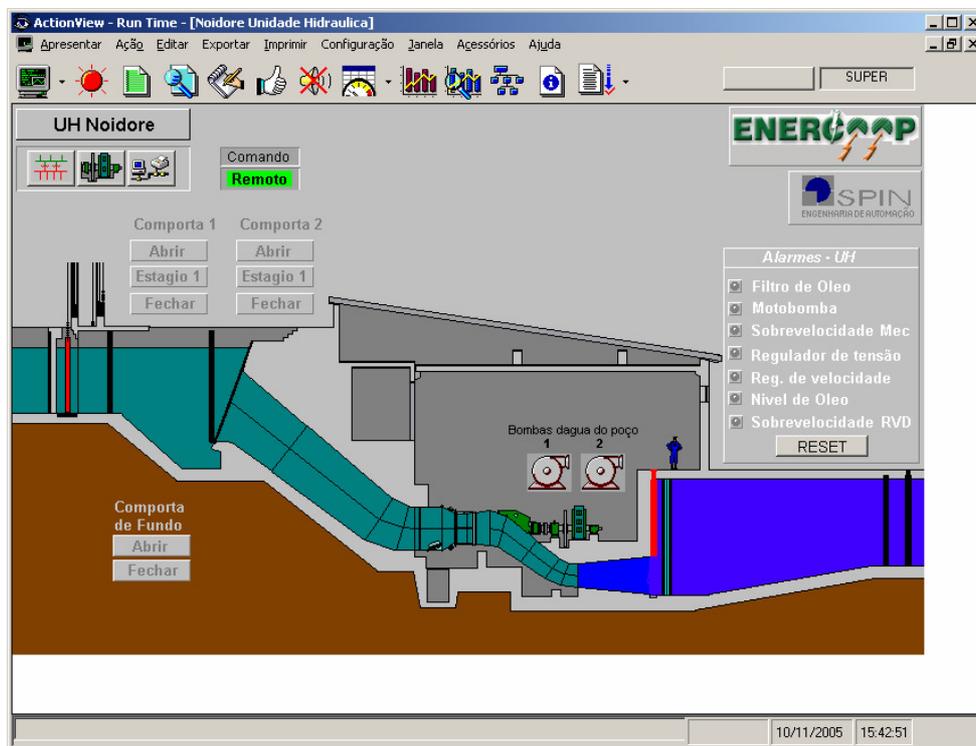


Figura 5.3 – Tela de processo típica.

### 5.4.2 Telas de medidas

São planilhas eletrônicas cujas células são medidas analógicas, textos constantes, botões de navegação entre telas ou fórmulas associadas a outras células. Telas de medidas podem também apresentar dados históricos e permitem fórmulas que identificam o máximo e o mínimo de uma variável em determinado dia, por exemplo [16].

### 5.4.3 Telas sumário de eventos

São telas que apresentam a lista dos últimos eventos. Observa-se que um evento é qualquer mudança de estado de um equipamento, diferentemente de um alarme que é uma mudança indesejável [16]. A Figura 5.4 abaixo apresenta um exemplo de tela sumário de eventos.

### 5.4.4 Telas de alarmes correntes

São telas que apresentam as mensagens referentes a alarmes correntes (não normalizados), reconhecidos ou não, conforme Fig. 5.4 [16].

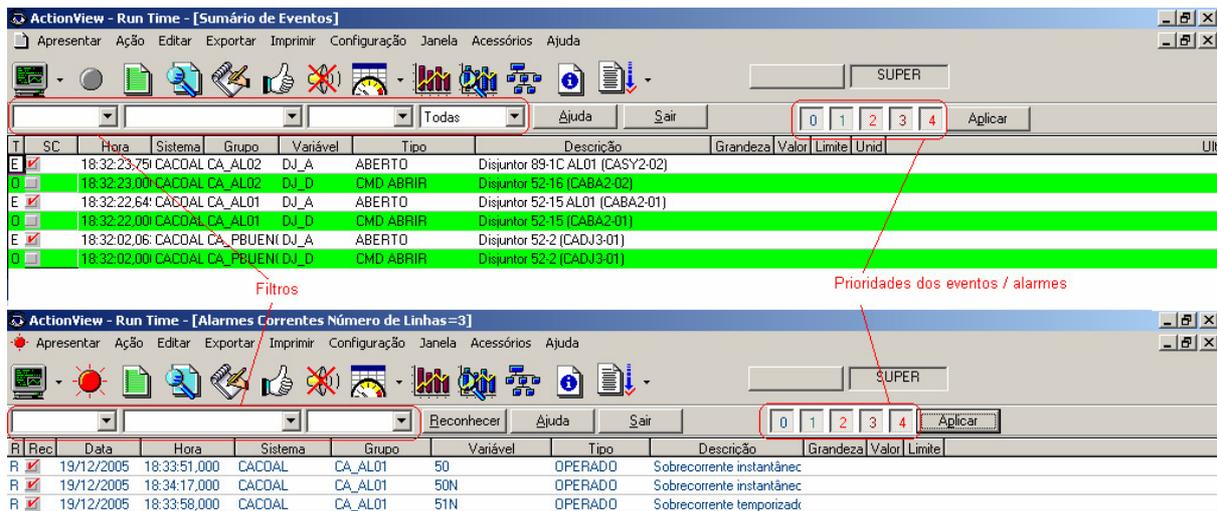


Figura 5.4 – Tela sumário de eventos.

### 5.4.5 Telas de consulta a eventos históricos

Telas que permitem a consulta a eventos históricos, filtrados por agrupamento de variáveis, data e hora de ocorrência do evento, tipificação do evento (alarmes, eventos, operador, texto associado à falha, prioridade de alarme, equipamentos, etc.) e ordem de classificação do resultado [16].

### 5.4.6 Telas de tendência histórica de variáveis

São telas que mostram gráficos ou tabelas com o comportamento de variáveis analógicas, a partir de arquivos históricos, em que as informações são apresentadas em gráficos e tabelas [16]. A Figura 5.5 mostra um exemplo de tela de tendência histórica de variáveis.

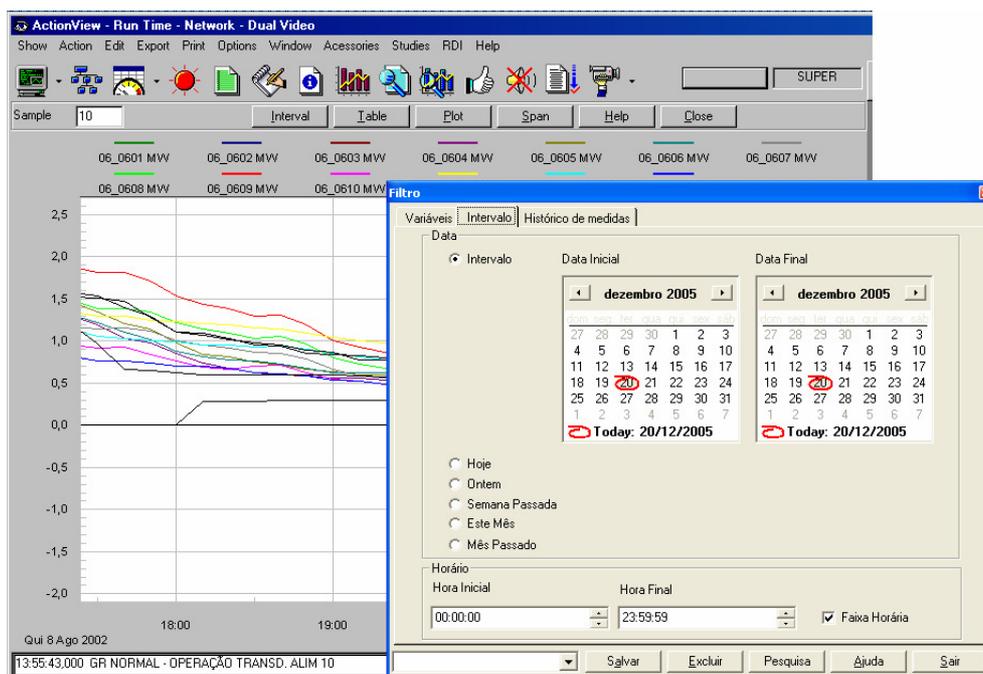


Figura 5.5 – Tela de tendência histórica de variáveis.

### 5.4.7 Telas de tendência em tempo real

São telas que mostram gráficos de tendência de variáveis analógicas selecionadas pelo usuário, em tempo real. Possuem as mesmas características do gráfico de tendência histórica [16]. A Figura 5.6 a seguir mostra um exemplo de tela de tendência em tempo real.

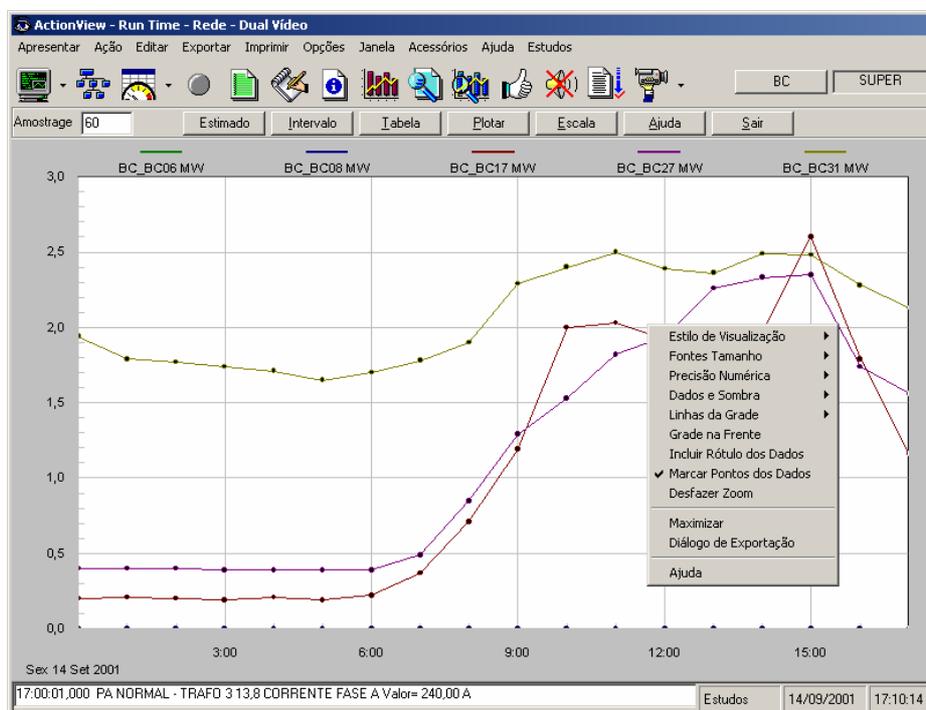


Figura 5.6 – Tela de tendência em tempo real.

### 5.4.8 Telas de árvore do sistema

Apresentam o sistema em forma de árvore e, ao atingir-se o nível de folha, um duplo clique mostra a janela de parâmetros da variável selecionada [16].

## 5.5 MÓDULOS DE COMUNICAÇÃO

O *AVServer* pode se comunicar com diferentes equipamentos, em protocolo ponto-a-ponto ou multiponto. A comunicação é implementada através de uma biblioteca de sub-rotinas residente em memória (DLL), existindo uma para cada protocolo implementado [16].

O *AVServer* é multiprotocolo permitindo ao usuário associar diferentes protocolos para diferentes pontos ou mesmo diferentes protocolos para um mesmo ponto [16].

## 5.6 PLANEJAMENTO PARA UTILIZAÇÃO DO ACTIONVIEW

Para ser utilizado neste projeto, o *ActionView* foi configurado segundo as etapas de planejamento descritas no capítulo 4. A seguir apresentaremos as particularidades desse planejamento.

### 5.6.1 Entendimento do processo

O *software* supervisor será utilizado nas instalações da SPIN Engenharia, mostradas na Fig. 5.7 a seguir. Serão monitorados o consumo de energia dos três aparelhos de ar condicionado de janela, as temperaturas internas e externas dos quatro ambientes, a umidade relativa do ar, as velocidades do vento e a temperatura média radiante em cada ambiente, exceto na área de circulação. Tendo todos os dados necessários, será calculado o índice de conforto térmico PMV em cada ambiente, que será utilizado para a implementação de diferentes tipos de controladores.

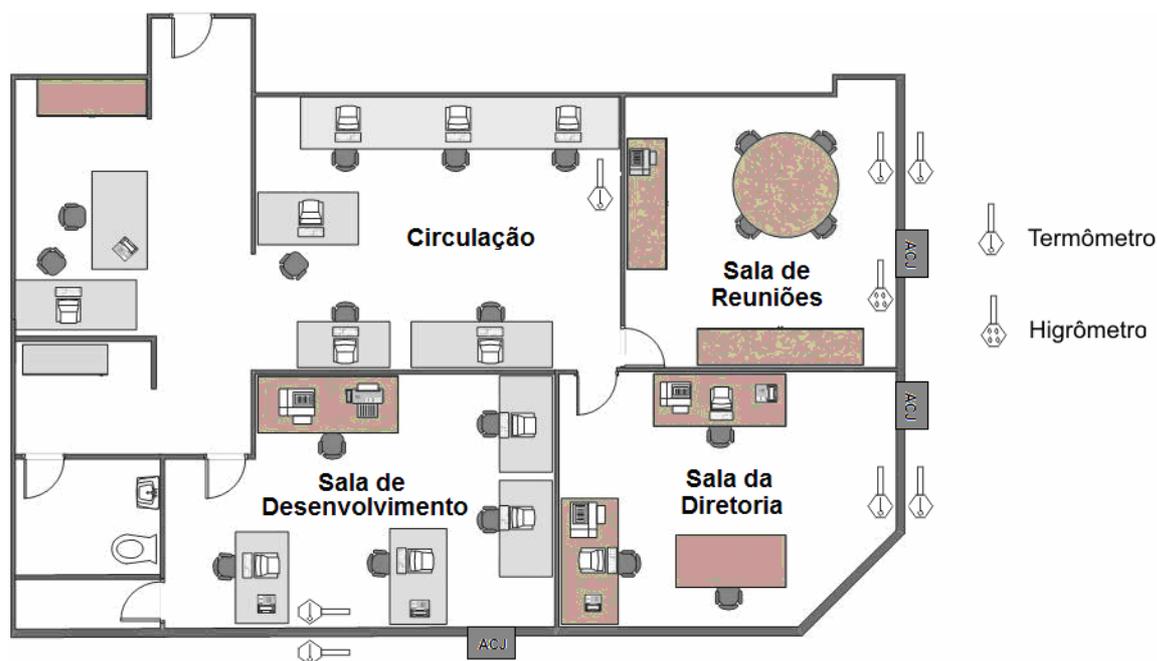


Figura 5.7 – Instalações da SPIN Engenharia.

O consumo de energia dos aparelhos de ar condicionado será obtido através de três medidores Landis&Gyr modelo ZMD-128, e os dados serão armazenados em três variáveis, uma para cada ambiente, alocadas em um grupo específico para o consumo de energia. Serão instalados conforme a Fig. 5.8 a seguir.

As variáveis de temperatura também serão alocadas em um grupo específico. Serão utilizados sete termistores para obtermos os valores das temperaturas internas e externas, distribuídos conforme a Fig. 5.7, e criaremos uma variável para cada ponto monitorado.

A umidade relativa do ambiente pode ser monitorada facilmente utilizando-se um higrômetro interligado ao sistema supervisor, e esta era a idéia proposta inicialmente, na concepção do projeto. Por problemas na aquisição dos sensores, entretanto, utilizaremos um termo-higrômetro simples e sem comunicação com o *ActionView*, exigindo, portanto, que o valor da umidade seja atualizado manualmente, conforme necessário.

Devido ao mesmo problema, não serão utilizados anemômetros em cada ambiente, como havia sido proposto inicialmente. Em vez disso, utilizaremos um valor fixo estimado para

esta grandeza. No Anexo I (que descreve o cálculo dos termos do PMV), explicaremos como os valores utilizados foram estimados. Assim como para as outras grandezas, foi criado um grupo para dispor das variáveis de velocidade do vento.

Para a temperatura média radiante, devido à dificuldade em se encontrar sensores, além do alto custo, desde o início foi proposto o seu cálculo a partir das temperaturas individuais de cada superfície dos ambientes considerados, além das influências de pessoas e equipamentos (computadores) nesses ambientes. Desta forma, por não serem medidas, sendo transparentes ao usuário, as variáveis de temperatura média radiante serão alocadas em um grupo de apoio, juntamente com outras variáveis de apoio eventualmente necessárias para o cálculo do índice PMV.

### **5.6.2 Planejamento da tomada de dados**

Os medidores LG ZMD-128 estarão em uma rede RS485, que poderá ser acessada pelo supervisor em qualquer ponto por um conversor RS485/RS232, sendo possível a leitura dos dados dos três medidores. O canal de comunicação com o *ActionView* será especificado em seu arquivo de inicialização, e será utilizado um protocolo já desenvolvido anteriormente definido no arquivo "avlgzmd.dll". Esse protocolo não exerce controle sobre a taxa de varredura, isto é, a velocidade de leitura dos dados, sendo que a comunicação ocorre sempre que o canal encontra-se disponível. A princípio esse protocolo pode parecer ineficiente, mas por se tratar de uma aplicação em uma rede pequena, com apenas três equipamentos, e como geralmente não é exigida uma frequência de atualização de valores rápida ou constante, concluímos que ele atende aos requisitos desta aplicação.

O valor do consumo energético enviado pelo medidor ZMD é cumulativo, ou seja, sempre crescente. Dessa forma, para tratamento desses dados, diariamente e mensalmente os respectivos valores acumulados do consumo de energia serão atualizados, de forma a sempre termos acesso ao valor de consumo do presente dia ou mês. Maiores detalhes de como esse procedimento foi realizado poderão ser visualizados no *script* no Anexo III.

Existirá outra rede RS485 com três controladoras KMC 4x4 modelo 7301, alocadas conforme a Fig. 5.8. Cada controladora instalada possui quatro entradas e quatro saídas, analógicas ou digitais, nas quais serão conectados os sensores necessários. Da mesma forma que os medidores de consumo, as controladoras podem ser acessadas em qualquer ponto de sua rede através de um conversor RS485/RS232. Para a comunicação com as controladoras, utilizaremos um protocolo já incorporado pelo *ActionView* (veja mais detalhes no Anexo IV).

Os termistores utilizados, assim como os outros sensores que futuramente poderão ser adquiridos, estarão conectados nas controladoras, as quais realizarão a conversão analógico-digital dos valores lidos e os disponibilizarão para leitura na rede.

O valor calculado do índice PMV da sala de reuniões será enviado para a respectiva controladora para ser utilizado nos controles implementados, que rodarão apenas neste ambiente.

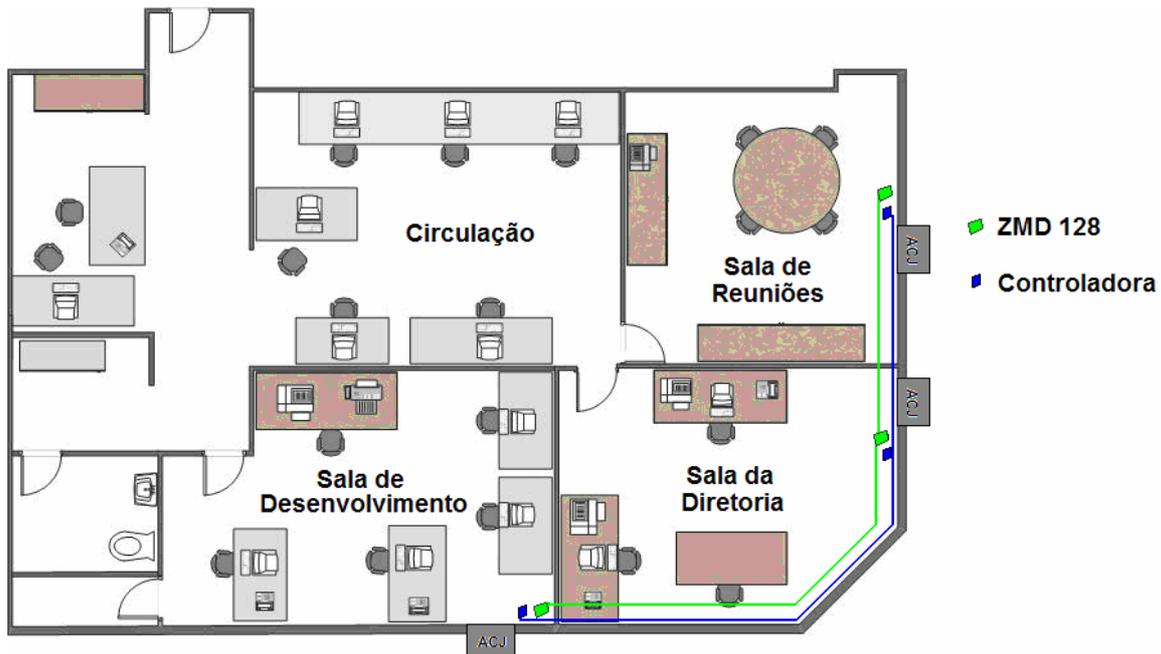


Figura 5.8 – Redes RS485 de controladoras e medidores LG ZMD-128.

### 5.6.3 Planejamento do banco de dados

O *ActionView* utiliza o *Microsoft® Access* para criar e acessar seu banco de dados. Ele conterá informações como listas de endereços das variáveis, dos CLP's, os protocolos disponíveis para comunicação, etc. Conterá as informações necessárias para que a aplicação seja executada.

As variáveis serão organizadas em grupos, correspondendo à finalidade de sua criação, facilitando a compreensão da aplicação. A Figura 5.9, a seguir, ilustra a organização de algumas das variáveis no *ActionView*. A lista completa e detalhada das variáveis a serem utilizadas encontra-se no Anexo III deste trabalho.

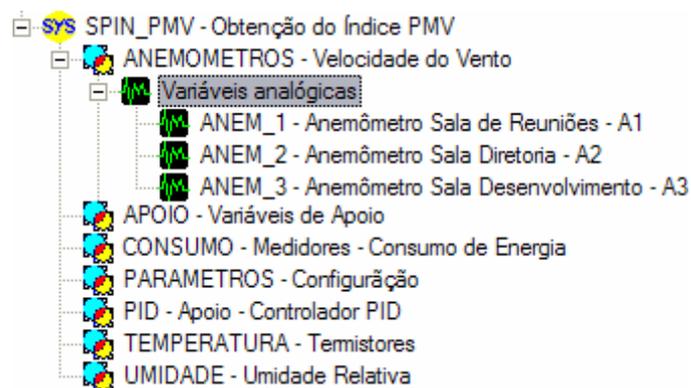


Figura 5.9 – Grupos de variáveis utilizados.

#### 5.6.4 Planejamento dos alarmes

Uma vez que se trata de uma aplicação simples de monitoramento das condições de conforto térmico e elaboração de estratégias simples de controle sobre a resposta do índice PMV, nenhum alarme será utilizado.

#### 5.6.5 Planejamento de hierarquia de navegação entre telas

Foram criadas as seguintes telas: configuração de parâmetros, consumo de energia, parâmetros do controlador, índice PMV, temperatura ambiente das salas, umidade relativa do ambiente, velocidade do vento e posição dos sensores. A tela inicial do módulo *RunTime* será a tela do índice PMV, e de qualquer tela poderemos acessar às outras ou voltar para a tela inicial.

#### 5.6.6 Desenho da telas

A tela de configuração de parâmetros é mostrada na Fig. 5.10 a seguir, e apresenta os campos para entrada dos dados sobre o tipo de vestimenta utilizado, o nível de atividade realizada e o número de pessoas e de computadores no ambiente.

Computadores		Pessoas	
Sala de Reuniões - A1	<input type="text" value="0"/>	Sala de Reuniões - A1	<input type="text" value="2"/>
Sala da Diretoria - A2	<input type="text" value="2"/>	Sala da Diretoria - A2	<input type="text" value="2"/>
Desenvolvimento - A3	<input type="text" value="6"/>	Desenvolvimento - A3	<input type="text" value="3"/>

Figura 5.10 – Tela de configuração de parâmetros.

A tela de consumo de energia mostra os valores cumulativos, mensal e diários em kWh das salas. É mostrada na Fig. 5.11 a seguir.

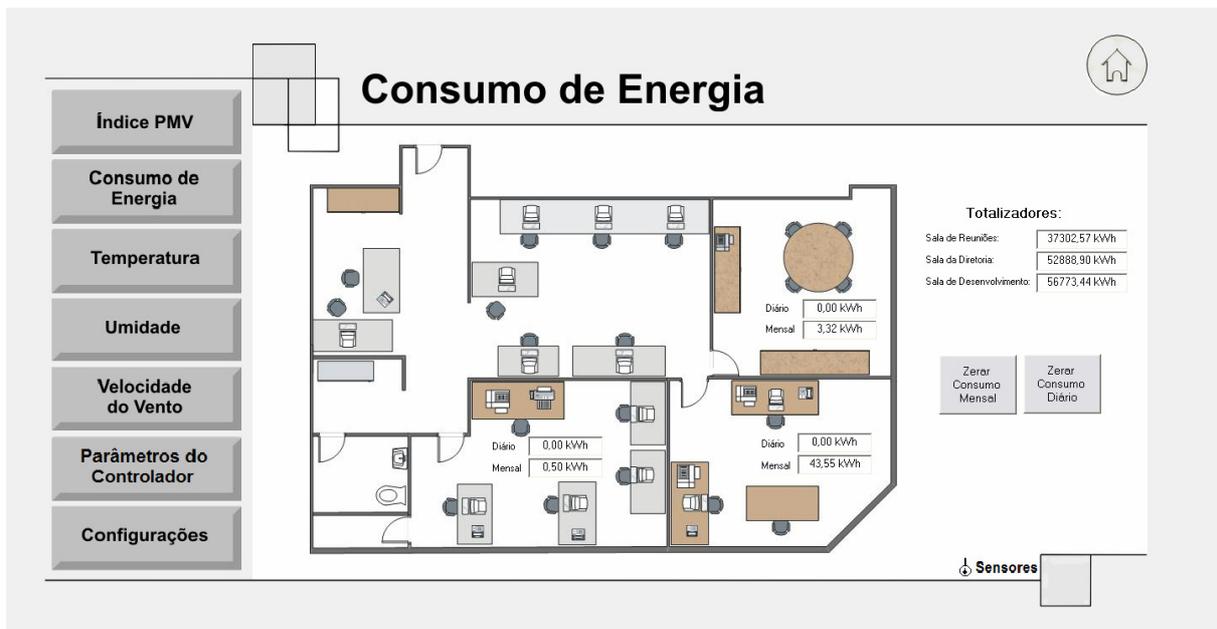


Figura 5.11 – Tela de consumo de energia.

A tela sobre o controle mostra basicamente o parâmetro de saída da planta e o ciclo de trabalho do ar condicionado. A Figura 5.12 a seguir mostra essa tela.

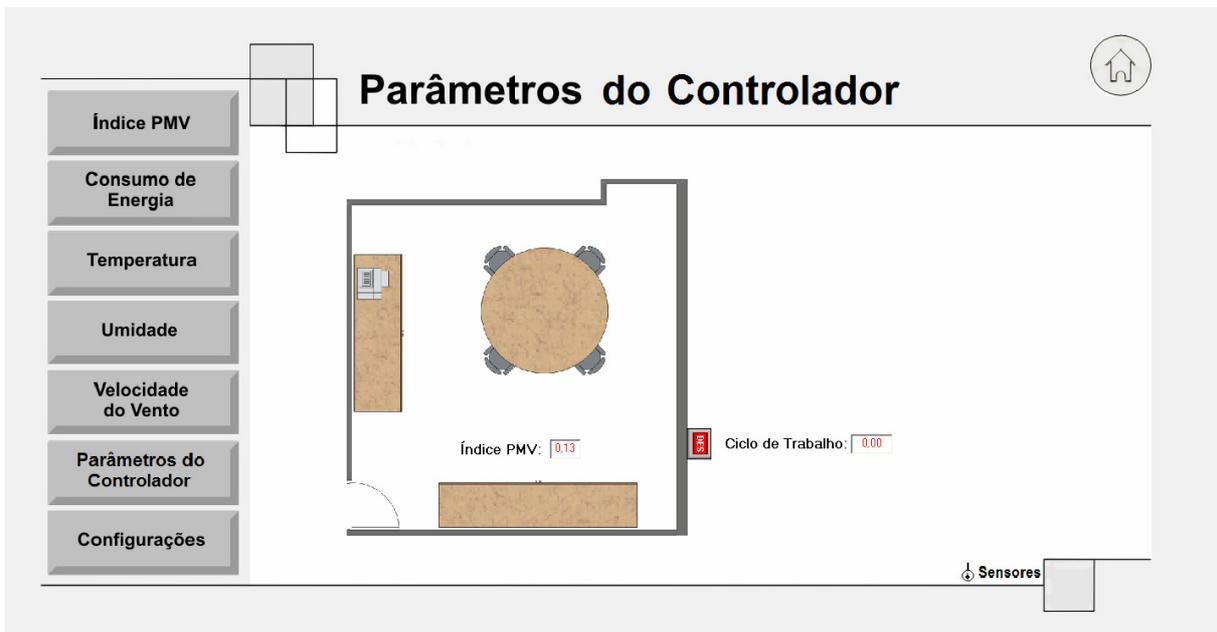


Figura 5.12 – Tela de parâmetros do controlador.

A tela do índice PMV será aberta na inicialização do módulo *RunTime* do *ActionView* e mostra os valores calculados para os ambientes. A Figura 5.13 a seguir mostra essa tela.

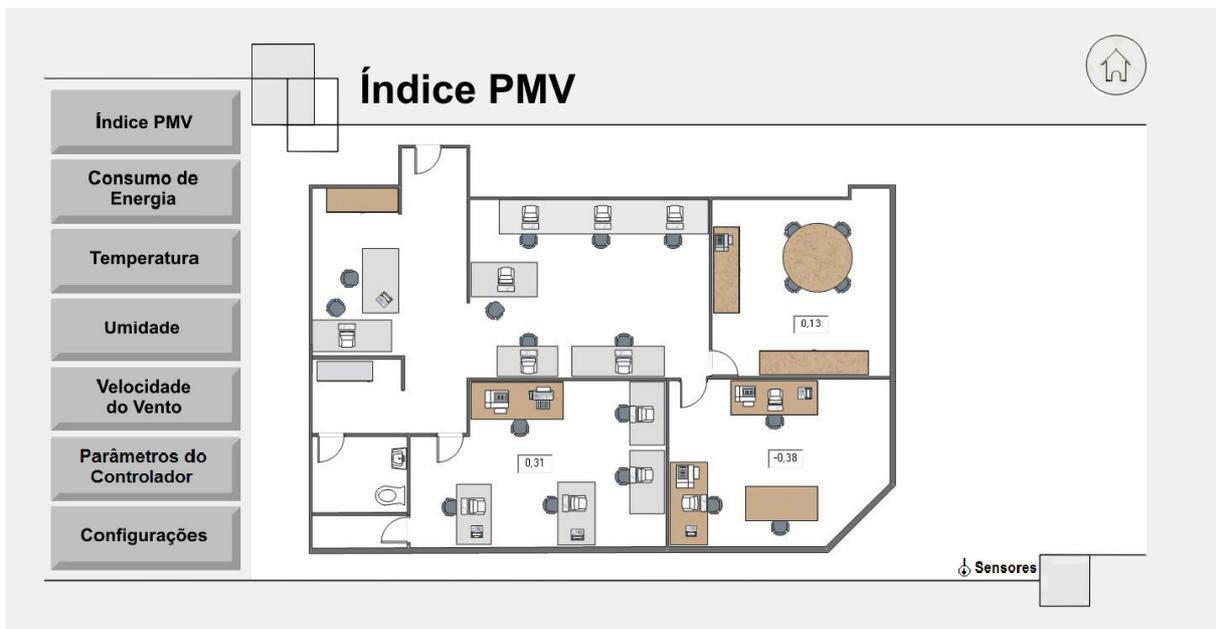


Figura 5.13 – Tela do índice PMV.

A tela de temperatura é mostrada na Fig. 5.14 a seguir, e exibe os valores das temperaturas internas e externas dos ambientes, incluindo o de Circulação.

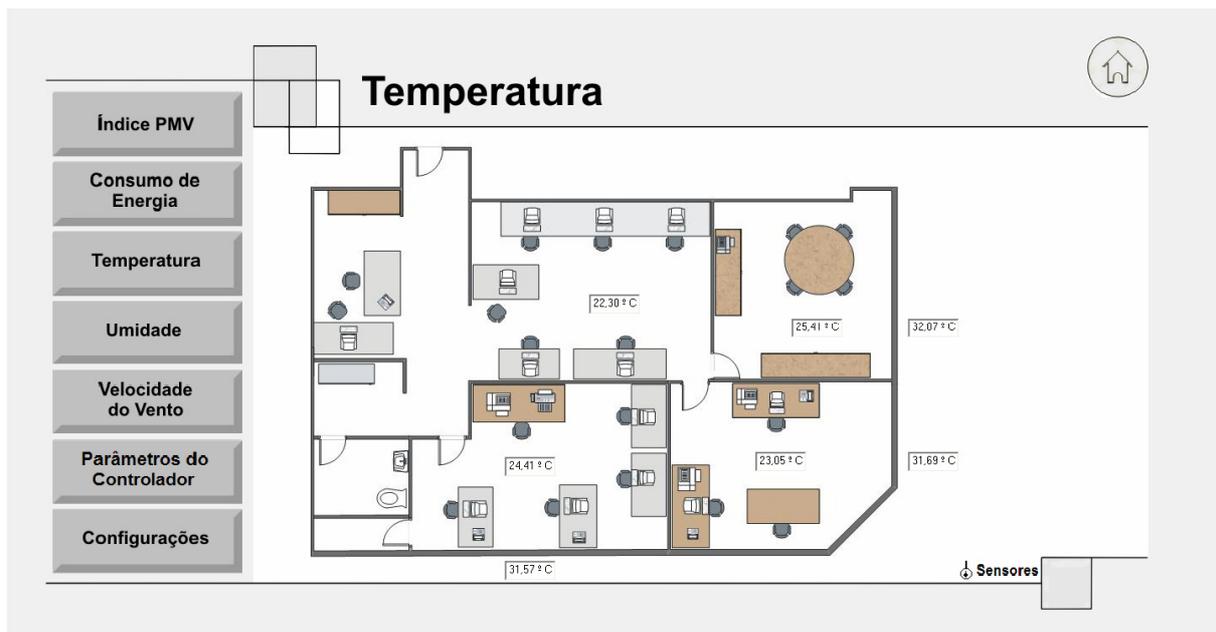


Figura 5.14 – Tela de temperatura.

A tela de umidade relativa contém os campos que mostram a umidade nos ambientes. Uma vez que esses valores devem ser atualizados manualmente, entretanto, esses campos permitem que o usuário, por um duplo - clique, entre com os novos valores. A Figura 5.15 a seguir mostra essa tela.

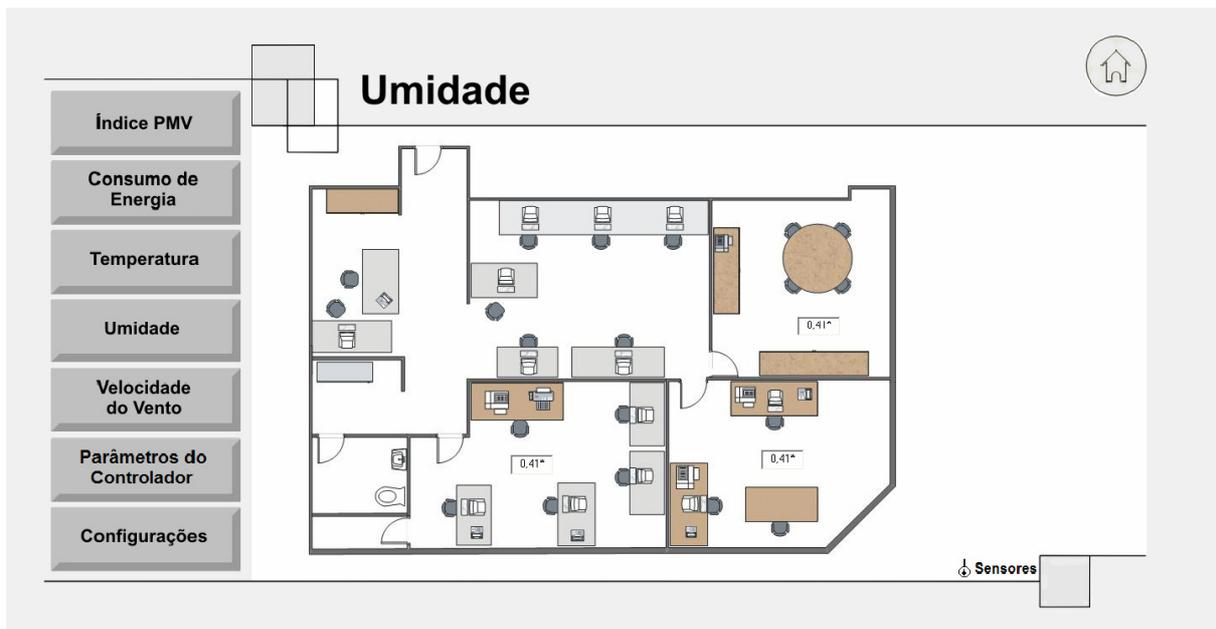


Figura 5.15 – Tela de umidade relativa do ar.

A Figura 5.16 a seguir mostra a tela de velocidade do vento, que mostra os valores simulados dessas variáveis.



Figura 5.16 – Tela de velocidade do vento.

A partir de todas as telas podemos visualizar o posicionamento dos sensores, a partir de uma tela simples que será aberta, idêntica à Fig. 5.7.

### 5.6.7 Gráficos de tendências

Os gráficos de tendências, que mostram como determinadas variáveis de processo mudam com o passar do tempo, poderão ser exibidos durante a navegação pelo processo em tempo real [9]. Os gráficos mais utilizados nesta aplicação serão de comportamento do índice PMV dos ambientes e de consumo de energia. Estes gráficos poderão ser facilmente visualizados

em tempo real através de filtros memorizados com as variáveis desejadas, não sendo necessária a criação de atalhos para que sejam acessados.

### **5.6.8 Segurança**

Como não se trata de uma aplicação comercial, não é necessário planejar restrições de acesso ou cadastrar usuários específicos.

### **5.6.9 Padrão industrial de desenvolvimento**

Não há comentários adicionais, uma vez que o *ActionView* já atende aos padrões necessários.

## 6 CONTROLE DO PMV

Este capítulo apresenta uma breve introdução sobre o controle de processos e dois métodos para o projeto de um controlador para o índice PMV.

### 6.1 INTRODUÇÃO

O controle de um determinado processo é usado para garantir que uma variável física desse processo permaneça em um valor estabelecido. Isto pode ser feito de duas maneiras: usando como entrada do controlador o ponto de operação desejado (controle em malha aberta); ou utilizando um sinal de erro, caracterizado pela diferença entre a saída do sistema e o ponto de operação desejado (controle em malha fechada). No último caso, o controlador atua de modo a minimizar o erro em sua entrada [11].

Neste projeto, iremos utilizar dois métodos para a implementação de controladores para o índice PMV, com o intuito de comparar seus desempenhos. São eles: controle liga-desliga e controlador PID obtido através do lugar das raízes discreto.

### 6.2 CONTROLE LIGA-DESLIGA

O controle liga-desliga é bastante simples, o que faz com que seja utilizado em larga escala nas indústrias. Também é conhecido como controle de duas posições [11].

A idéia do controle liga-desliga é a de acionar o atuador que age sobre o processo a ser controlado com sua potência máxima quando a variável controlada atingir um limite superior e desligá-lo quando a mesma chega a limite inferior. Quanto menor a diferença entre os limites máximo e mínimo da variável controlada, menor será a oscilação do sistema e, conseqüentemente, a precisão do controlador será maior. Porém, é usual que tal diferença tenha um valor mínimo considerável, a fim de evitar que danos ao controlador e ao atuador sejam causados por excessos de chaveamentos [11].

A Figura 6.1 a seguir apresenta um sistema em malha fechada com um controlador liga-desliga no percurso direto:

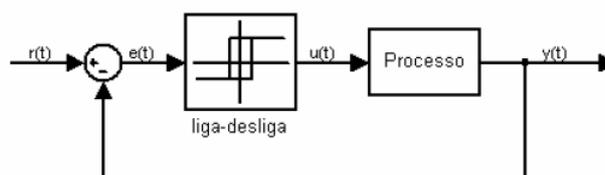


Figura 6.1 – Sistema em malha fechada com controlador liga-desliga [11].

Na Figura 6.1,  $r(t)$  é o sinal de entrada que representa o ponto de operação desejado,  $y(t)$  é o sinal de saída do sistema,  $e(t)$  é o erro do sistema dado pela diferença entre a entrada e a saída e  $u(t)$  é o sinal de saída do controlador liga-desliga. Observando o bloco que representa o controlador liga-desliga, podemos perceber que o mesmo é utilizado com uma histerese [11]. Tal característica pode ser vista com mais detalhes na Fig. 6.2 a seguir:

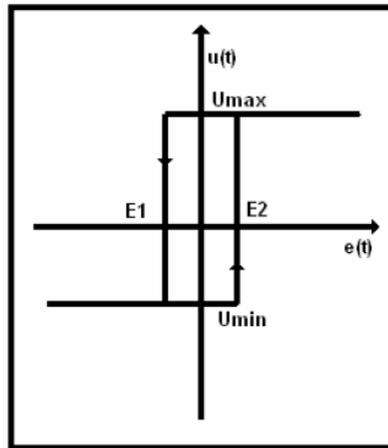


Figura 6.2 – Histerese do controlador liga-desliga [11].

Analisando a Fig. 6.2, vemos que a saída do controlador vai para  $U_{MAX}$  quando o erro do sistema atinge um valor máximo  $E_2$ . Esta saída permanece nesse valor até que o erro atinja um nível mínimo, dado pelo valor  $E_1$ . Quando isto ocorre, a saída do controlador vai para  $U_{MIN}$ . Este processo caracteriza uma histerese, a qual é usada, como já mencionamos anteriormente, para evitar chaveamentos excessivos do controlador e do atuador [11].

Como já dissemos, o controlador liga-desliga é bastante utilizado devido a sua simplicidade. Porém, não apresenta uma boa precisão, pois faz com que o sistema oscile continuamente, nunca entrando em regime permanente [11].

### 6.3 CONTROLADOR PID

Um controlador proporcional-integral-derivativo (PID) possui três ações: a ação proporcional, ação integral e a ação derivativa.

A ação proporcional é realizada através da introdução de um ganho proporcional (isto é, um ganho independente da frequência complexa  $s$ ) no percurso direto do processo a ser controlado. Visa uma melhora tanto do erro em estado estacionário quanto da resposta transitória do sistema, porém sem que haja um ajuste muito preciso desses parâmetros [10].

A ação integral é realizada através da introdução de uma integração no percurso direto. Esta atitude gera uma melhora significativa no erro de estado estacionário. Na verdade, caso seja introduzida uma integração pura no percurso direto, este erro é reduzido a zero [10].

O erro em estado estacionário é melhorado através do posicionamento de um pólo a malha aberta na origem, porque isto aumenta o tipo do sistema em uma unidade. Por exemplo, um sistema do tipo 0 respondendo a uma entrada em degrau com um erro finito passará a responder com erro nulo se o tipo do sistema for aumentado de uma unidade [10].

A ação derivativa é realizada através da introdução de uma derivação no percurso direto do processo a ser controlado, visando melhorar o tempo de resposta do sistema. Porém, esta melhora vem acompanhada de um aumento da ultrapassagem percentual do sistema, o que em muitos casos pode ser indesejável. Portanto, deve-se fazer uma escolha entre o tempo de resposta de um sistema e o seu amortecimento (que é diretamente relacionado com a ultrapassagem percentual).

## 6.4 LUGAR DAS RAÍZES DISCRETO

O lugar das raízes (LGR) é baseado em regras gráficas para a plotagem das raízes de um polinômio enquanto um parâmetro é variado. O lugar das raízes mais comum é um gráfico da alocação das raízes da equação característica de um sistema em malha fechada (ou seja, de seus pólos e zeros) no plano  $s$  de acordo com a variação do ganho proporcional do sistema de zero a infinito [12].

Nos sistemas lineares discretos, o desempenho dinâmico também é determinado pelas raízes da equação característica do sistema em malha fechada. Porém, neste caso, o polinômio encontra-se no plano  $z$ , sendo  $z$  a variável discreta análoga à frequência complexa contínua  $s$ . No plano  $z$ , o sistema é estável quando todas suas raízes estão inseridas no círculo unitário [12].

Podemos projetar um controlador digital diretamente através do lugar das raízes discreto (ao invés de projetarmos um controlador contínuo e só então discretizá-lo). Para tanto, o desenho do lugar das raízes deve ser feito de maneira similar ao do lugar das raízes contínuo. Para realizar tal desenho, podemos usar o *software* MatLab, que possui comandos para a plotagem do lugar das raízes a partir de uma função de transferência. A diferença entre o lugar das raízes contínuo e o discreto consiste na maneira de se obter as especificações da resposta do sistema a partir do gráfico.

### 6.4.1 Especificações no plano $z$

Zeros e pólos no plano  $s$  são mapeados para o plano  $z$  através da seguinte equação:

$$z = e^{sT} \quad (4)$$

Na Equação 4,  $z$  representa o pólo ou zero no domínio discreto,  $s$  representa o pólo ou zero no domínio contínuo e  $T$  é a taxa de amostragem. Utilizando esta equação, podemos mapear as especificações do sistema no plano  $s$  para especificações no plano  $z$  [12].

Para um sistema contínuo de segunda ordem, a frequência natural  $\omega_n$  (a qual é inversamente proporcional ao tempo de subida da resposta transitória do sistema) é dada pelo módulo dos pólos complexos conjugados dominantes. Mapeando para o plano  $z$ , a frequência natural é dada pelo ângulo do pólo em coordenadas polares (ou seja, o ângulo entre a reta que liga o pólo à origem e o eixo das abscissas), através da seguinte equação [12]:

$$\theta = T \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \cdot \omega_n \quad (5)$$

Na Equação 5,  $\theta$  é o ângulo do pólo em coordenadas polares (o qual pode ser visto com mais detalhes na Fig. 6.3) e  $\zeta$  é o coeficiente de amortecimento do sistema.

O coeficiente de amortecimento  $\zeta$  de um sistema no plano  $s$  é dado pelo co-seno do ângulo entre a reta que representa o módulo dos pólos complexos conjugados dominantes e o eixo real. Mapeando para o plano  $z$ , obtemos espirais logarítmicas ao longo das quais  $\zeta$  é constante [12].

De posse dessas informações, podemos construir um gráfico com linhas-guia de valores constantes para a frequência natural e para o coeficiente de amortecimento. Tais linhas facilitam a construção do lugar das raízes discreto do sistema, além de facilitar a escolha da localização dos zeros e pólos do controlador de modo que as especificações de desempenho requeridas sejam atendidas.

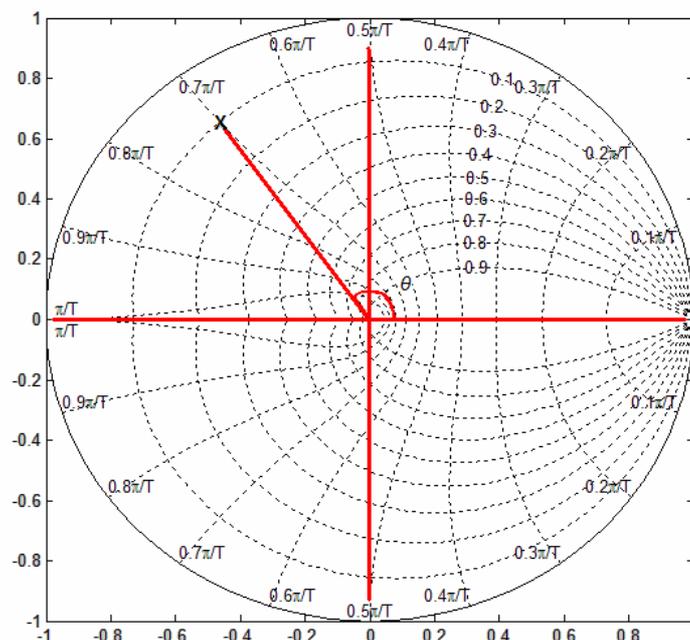


Figura 6.3 – Linhas de frequência natural e amortecimento constantes.

Na Figura 6.3, o ponto marcado com um X representa a localização de um pólo genérico e seu correspondente ângulo em coordenadas polares  $\theta$ .

### 6.4.2 Procedimentos para o projeto do controlador

Para projetarmos o controlador PID através do lugar das raízes discreto, devemos conhecer a função de transferência discreta do processo a ser controlado. Neste projeto, o processo a ser controlado é a resposta do índice PMV ao acionamento do ar condicionado em sua potência máxima. Como não sabemos qual é a função de transferência deste processo, devemos, antes de mais nada, identifica-la.

Para identificarmos o processo a ser controlado, utilizamos o comando IDENT do MatLab. Inserindo a entrada do processo e sua resposta em malha aberta, esse comando nos retorna a função de transferência do processo.

É interessante que usemos uma seqüência de “pulsos” de largura variável (e não apenas um degrau unitário) como entrada do sistema, a fim de que a resposta transitória percorra diversas faixas de freqüência, e não oculte nenhum comportamento anormal do sistema. Para gerar tal seqüência de “pulsos”, podemos utilizar um outro comando do MatLab: o PRBS (*Pseudorandom Binary Sequence*), que gera uma seqüência binária aparentemente aleatória, porém, capaz de englobar diversas faixas de freqüência, aproximando-se bastante de um ruído branco [11].

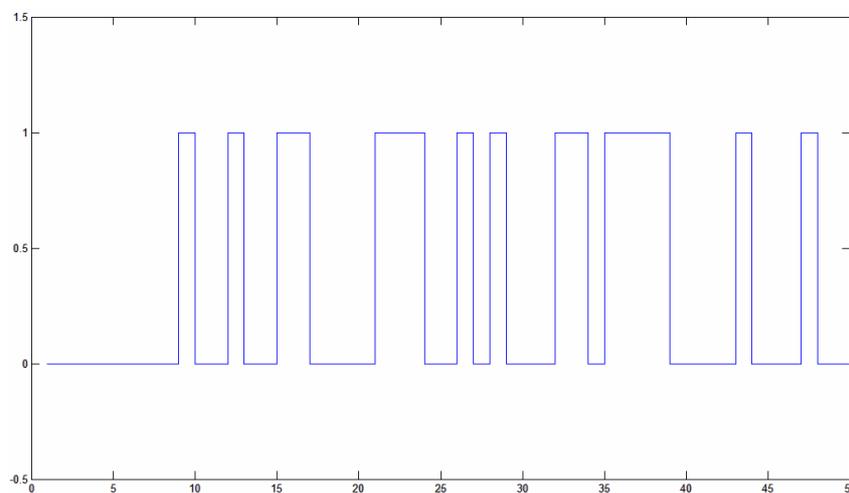


Figura 6.4 – Exemplo de sinal PRBS.

Na janela do comando IDENT, podemos escolher quantos zeros e pólos a função de transferência resultante deve possuir. Podemos ainda dizer se a mesma possui ou não atraso de transporte.

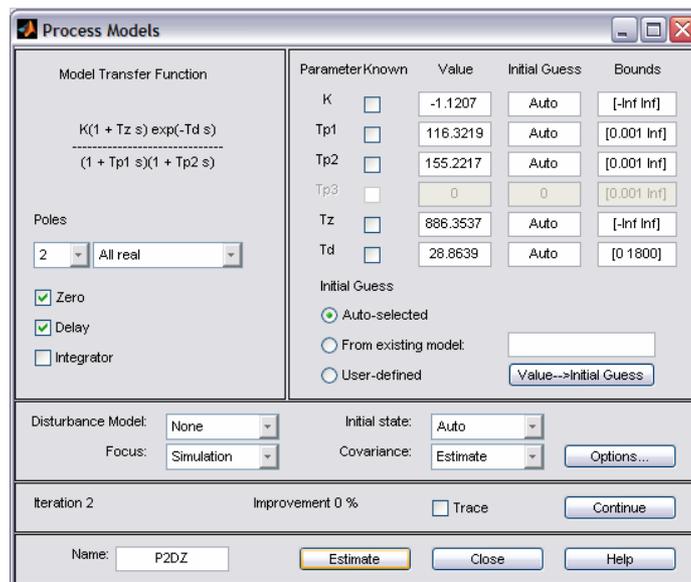


Figura 6.5 – Tela para a escolha dos parâmetros da função de transferência resultante.

Escolhendo diferentes parâmetros, obtemos respostas diferentes, com maior ou menor percentual de aproximação com o sinal real. Sendo assim, a função de transferência do processo a ser controlado deve ser aquela que mais se aproxima do sinal real, ou seja, cujo percentual de aproximação seja o maior.

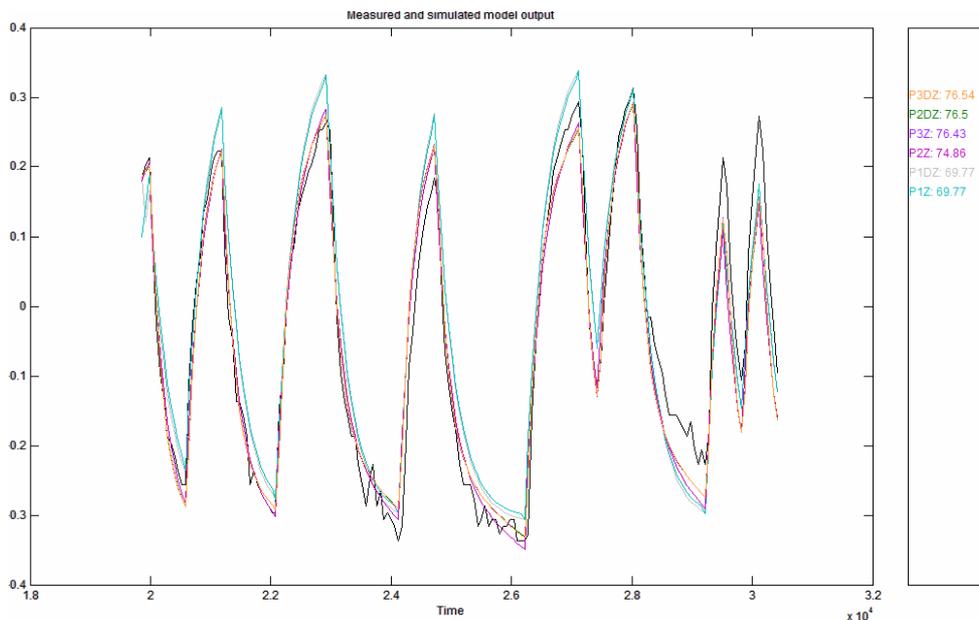


Figura 6.6 – Percentuais de aproximação diferentes para escolhas de parâmetros distintas.

Com a função de transferência do processo a ser controlado em mãos, podemos partir para o projeto do controlador. No entanto, o comando IDENT nos retorna uma função de transferência contínua. Sendo assim, antes do projeto propriamente dito, devemos converter a função de transferência contínua para sua equivalente discreta. Isto também pode ser feito usando o MatLab (os comandos e rotinas usados no MatLab podem ser encontrados no Anexo V).

De posse da função de transferência discreta do processo a ser controlado, estamos aptos a projetar o controlador. Para tanto, usamos o comando SISOTOOL do MatLab.

O SISOTOOL é um comando bastante versátil. Para usá-lo, importamos uma função de transferência qualquer (contínua ou discreta) para representar a planta do sistema. A partir daí, o SISOTOOL nos gera diversos gráficos da planta, dentre eles o lugar das raízes, diagramas de Bode de amplitude e fase, e diagramas de Nyquist. O usuário define qual método irá utilizar em seu projeto.

No nosso caso, será projetado um controlador PID baseado no lugar das raízes discreto do sistema. Para tanto, devemos adicionar dois zeros e dois pólos ao lugar das raízes da planta. No SISOTOOL, isto é feito facilmente, já que a interface com o usuário é amigável e tais adições podem ser realizadas graficamente, direto no LGR.

Ao mesmo tempo em que adicionamos os zeros e pólos, podemos observar a resposta transitória do sistema em malha fechada. Isto é bastante útil pois podemos ajustar a localização dos pólos e zeros do controlador de acordo com o que esperamos da resposta do sistema.

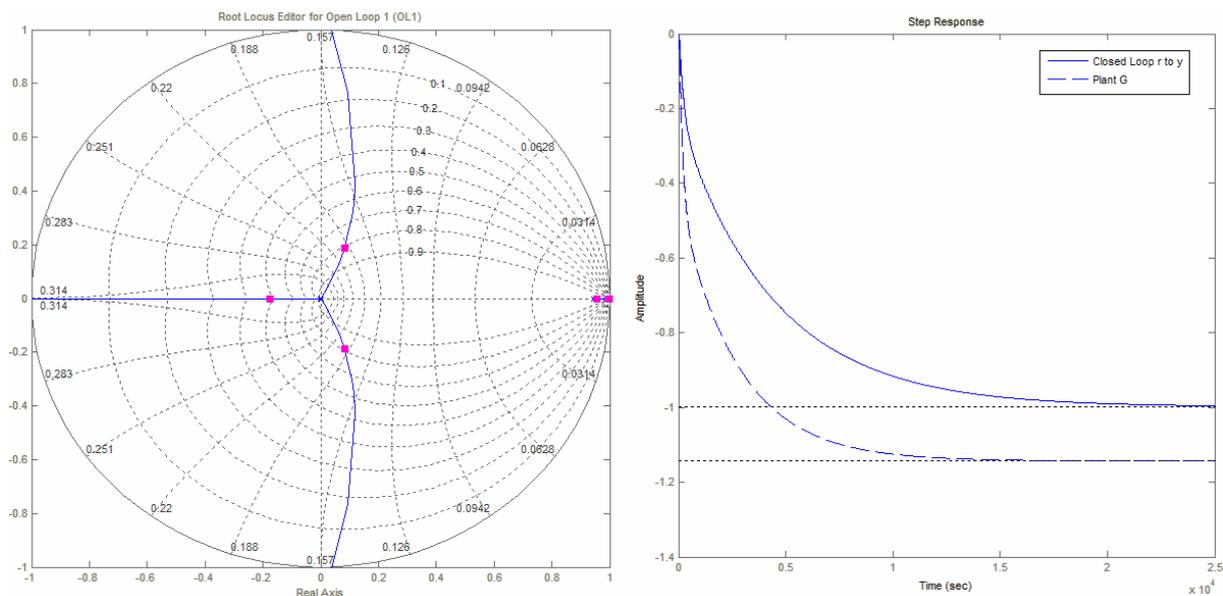


Figura 6.7 – Exemplo de LGR do sistema e resposta transitória obtidos com o SISOTOOL.

Após a adição dos pólos e zeros do controlador, ajuste de sua localização, bem como do ganho do sistema para que sua resposta satisfaça as especificações requeridas, basta conferirmos a função de transferência resultante do nosso controlador. Uma outra janela nos mostra os parâmetros do controlador necessários para que a resposta seja aquela que esperamos.

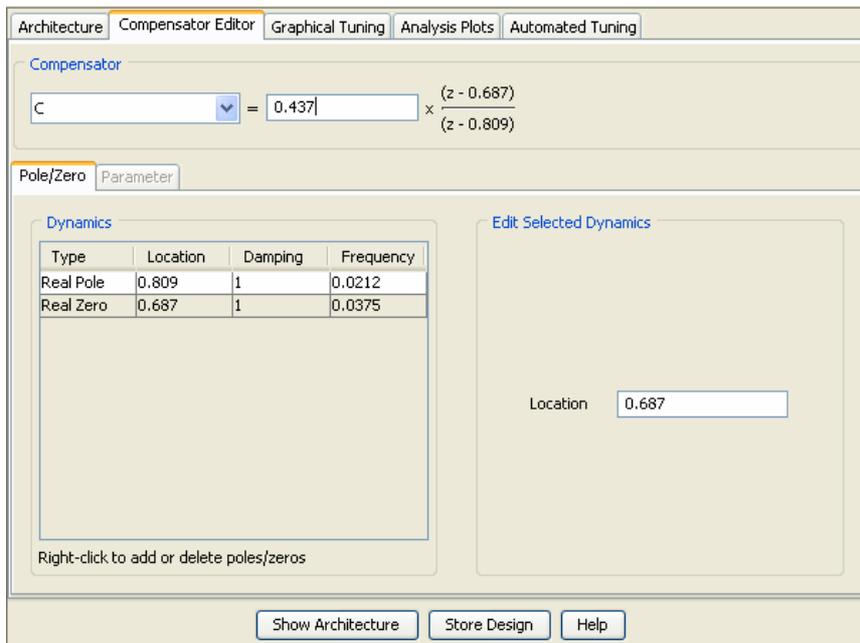


Figura 6.8 – Tela com os parâmetros do controlador projetado através do SISOTOOL.

Agindo de acordo com o procedimento descrito anteriormente, obtemos uma função de transferência discreta para nosso controlador. Para implementarmos este controle na rede de controladoras KMC (ver mais sobre este tipo de controladora no Anexo IV), devemos escrevê-lo em termos de sua equação de diferenças.

### 6.4.3 Adequação do controlador para a rede KMC

O termo  $z^{-1}$  representa um atraso no tempo. Multiplicando uma função de transferência contínua por esse termo, fazemos com que o sistema representado por tal função adquira um atraso de transporte de um segundo. Caso a função de transferência multiplicada esteja no domínio  $z$ , o sistema sofrerá um atraso igual a um período de amostragem.

Suponha que o termo  $X(z)$  seja a transformada  $z$  (operação discreta análoga a transformada de Laplace contínua) de um sinal discreto  $x(k)$ . Isto quer dizer que se aplicarmos a transformada  $z$  inversa sobre  $X(z)$ , obtemos  $x(k)$ . Porém, se multiplicarmos  $X(z)$  por  $z^{-1}$ , a transformada  $z$  inversa resultará em  $x(k-1)$ , ou seja, o valor de  $x$  no instante de amostragem anterior.

Sabendo disso, podemos escrever uma função de transferência no domínio  $z$  em termos de equações de diferenças, ou seja, equações cujos termos são sinais discretos no tempo, como  $x(k)$ , por exemplo. Para tanto, devemos ter em mente a função de transferência discreta típica de um controlador PID,  $C(z)$ , a qual é dada por:

$$C(z) = \frac{K_C(z - z_{c1})(z - z_{c2})}{z(z - p_c)} \quad \therefore \quad \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{K_C(z - z_{c1})(z - z_{c2})}{z(z - p_c)} \quad (6)$$

Na Equação 6,  $U(z)$  é a transformada z do sinal discreto de saída do controlador  $u(k)$ ,  $E(z)$  é a transformada z do sinal discreto de erro do sistema  $e(k)$ ,  $K_C$  é o ganho do controlador discreto,  $z_{C1}$  e  $z_{C2}$  são os zeros do controlador e  $p_C$  é o pólo do controlador (nota-se que o controlador tem um pólo na origem).

Aplicando a idéia de que o termo  $z^{-1}$  equivale um atraso no tempo, obtemos a seguinte equação de diferenças representante do controlador dado pela Eq. 6:

$$u(k) = p_C \cdot u(k-1) + K_C \cdot e(k) - K_C \cdot (z_{C1} + z_{C2}) \cdot e(k-1) + K_C \cdot z_{C1} \cdot z_{C2} \cdot e(k-2) \quad (7)$$

Na Equação 7,  $u(k)$  é o valor do sinal discreto  $u$  no instante  $k$ ,  $u(k-1)$  é o valor do sinal discreto  $u$  no instante  $k-1$ ,  $e(k)$  é o valor do sinal discreto  $e$  no instante  $k$ ,  $e(k-1)$  é o valor do sinal discreto  $e$  no instante  $k-1$  e  $e(k-2)$  é o valor do sinal discreto  $e$  no instante  $k-2$ .

O detalhamento da adequação para a rede KMC do controlador PID obtido através do LGR discreto pode ser encontrado no Anexo II.

## 7 VISÃO GERAL DO PROJETO

Neste capítulo, iremos apresentar o contexto do projeto, bem como seus objetivos, descrevendo os aspectos mais importantes.

### 7.1 CONTEXTO DO PROJETO

O projeto “Índice de Conforto Térmico ISO7730 em Automação Predial” está inserido em um projeto maior denominado “Rede de automação predial distribuída para racionalização de energia segundo o paradigma ‘*Ambient Intelligence*’” [14].

#### 7.1.1 Paradigma “*Ambient Intelligence*”

Este paradigma prevê a criação de redes massivas de sensores, módulos sem-fio e unidades de processamento para melhorar a qualidade de vida no dia-a-dia, [18], [19]. Sua base tecnológica é um circuito praticamente invisível de nós de processamento que coletam informações por meio de vários sensores, processam as informações e agem sobre o ambiente através de atuadores [20].

Os primeiros exemplos de aplicação são as casas inteligentes, onde dispositivos eletroeletrônicos podem ser controlados de qualquer lugar através de computadores e podem se adaptar às necessidades particulares de seus habitantes, de forma eficiente utilizando a infra-estrutura de rede disponível. A visão positiva é que provendo capacidade de comunicação e alguma forma de inteligência a praticamente cada eletro-eletrônico a vida pode se tornar mais simples e que um ambiente inteligente pode prover necessidades naturalmente [14].

#### 7.1.2 Racionalização de energia

Atualmente, em decorrência dos problemas ambientais, a racionalização de energia tornou-se uma questão importante. Nesse contexto, o projeto arquitetônico dos edifícios modernos propicia uma economia de recursos energéticos maior do que seu próprio sistema de automação. Em edifícios antigos, porém, uma automação corretamente planejada é economicamente mais viável a um reprojeto arquitetônico, promovendo um consumo eficiente de energia.

O contexto geral em que este projeto se insere prevê a utilização do paradigma “*Ambient Intelligence*” para a racionalização de energia, sem restrição à manutenção de um índice satisfatório de conforto térmico.

### **7.1.3 Sensores *Wireless***

Com o contínuo avanço da tecnologia tornou-se premente a integração de novas técnicas na automação predial e residencial [14]. Devido à baixa confiabilidade de sistemas supervisórios centralizados, uma vez que falhas podem paralisar todo o processo, sistemas de processamento distribuído estão se tornando cada vez mais interessantes e utilizados. Para tanto, a tendência é que progressivamente mais sensores e atuadores inteligentes sejam desenvolvidos e utilizados em automação predial [14].

Alguns dos sensores utilizados no contexto deste projeto se comunicarão com a unidade de processamento seguindo o padrão *wireless* ZigBee. A proposta desse padrão, em oposição a outros padrões de comunicação sem fio, é atender aplicações embarcadas que requeiram baixas taxas de dados e baixo consumo energético, sendo, portanto, o padrão a ser utilizado neste projeto [21]. Outra justificativa do desenvolvimento destes sensores é o fato de eles conferirem praticidade e mobilidade à instalação de um sistema de automação em um novo ambiente.

### **7.1.4 Experimento de racionalização de energia**

Para a validação dos conceitos de automação predial propostos no escopo do projeto, será implementada uma planta piloto de racionalização de energia nos laboratórios LAVSI e LARA no bloco SG11 da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, conforme pode ser visto na Fig. 7.1 a seguir [14].

Todos os aparelhos de ar condicionado, medidores de energia, sensores de presença, sensores de temperatura etc., formarão uma rede ZigBee gerenciada por um computador coordenador, rodando um *software* supervisório [14]. Os dados dos sensores serão atualizados periodicamente e enviados, também por intermédio de uma rede ZigBee, para os atuadores.

Como exemplo de estratégia de controle a ser utilizada para a racionalização de energia, suponhamos a situação em que haja mais de um aparelho de ar condicionado em um ambiente e incidência solar em certa parede externa. Neste caso, os aparelhos devem ser controlados de modo que os que captem ar externo à sombra tenham sua potência maximizada [14].

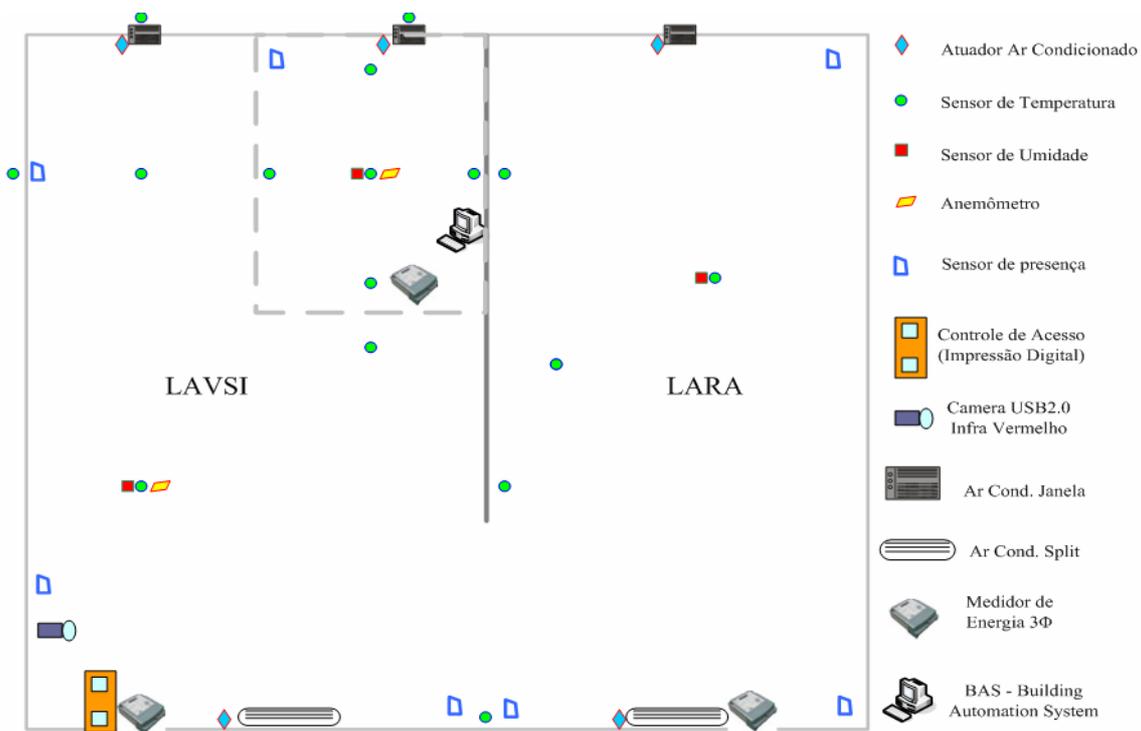


Figura 7.1 – Disposição dos equipamentos na planta piloto [22].

## 7.2 DESCRIÇÃO DO PROJETO

### 7.2.1 Introdução

Este projeto consiste na obtenção do índice de conforto térmico PMV e sua utilização como parâmetro para a implementação de diferentes estratégias de controle atuando sobre equipamentos de ar condicionado, bem com no monitoramento do consumo de energia desses aparelhos.

### 7.2.2 Planejamento do sistema supervisório

Será utilizado o *software ActionView*, da SPIN Engenharia, para interligar as ferramentas necessárias para o desenvolvimento do projeto. Deve-se, então, proceder um planejamento da utilização desse *software* conforme descrito no Capítulo 5, com a finalidade de obtermos um resultado confiável e de fácil compreensão.

Resumidamente, será necessário compreender o processo a ser controlado, planejar a criação e a organização das variáveis, definir como ocorrerá a comunicação entre o supervisório e os periféricos para a coleta de dados, desenhar e organizar as telas do sistema e pensar nos gráficos de tendência histórica das variáveis importantes.

### 7.2.3 Instalações físicas

O projeto mais amplo propõe a instalação dos equipamentos em uma planta-piloto nos laboratórios LAVSI e LARA, conforme mencionado anteriormente. Neste projeto, entretanto, devido a restrições no orçamento e principalmente no tempo de execução, serão utilizadas as instalações da SPIN Engenharia como planta de testes, uma vez que já contamos com os equipamentos básicos necessários instalados no local, formando 3 kits compostos por medidor de consumo elétrico Landis&Gyr ZMD-128, controladora KMC modelo 7301, além de termistores, conforme a Fig. 7.2 a seguir.

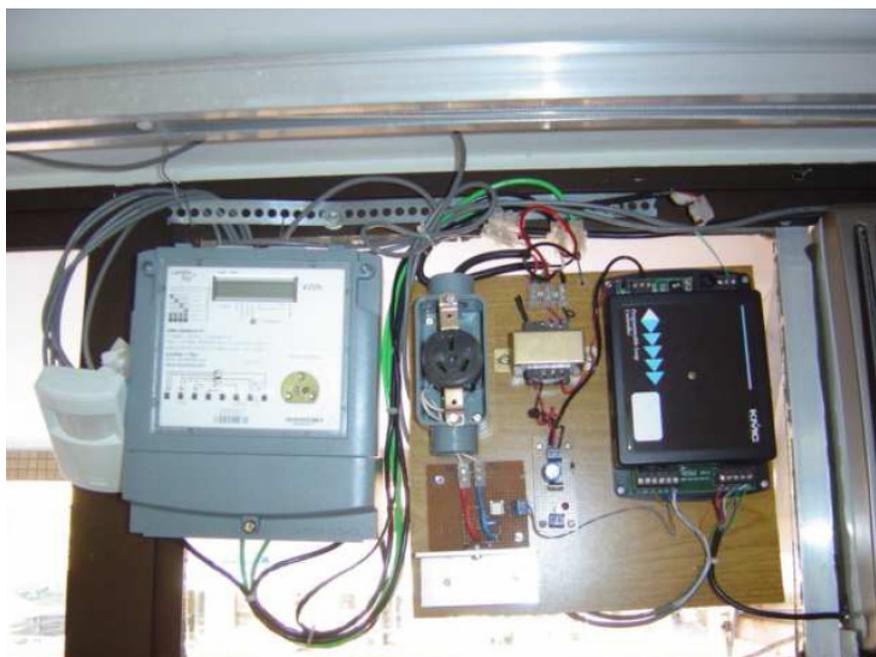


Figura 7.2 – Equipamentos instalados na SPIN Engenharia [7].

Além dos equipamentos mostrados, serão necessários para o cálculo do índice PMV anemômetros de fio quente (precisos para baixas velocidades do vento) e higrômetros em cada ambiente, completando o kit para cada aparelho de ar condicionado.

As ferramentas para o cálculo e utilização do PMV para a implementação de controladores elaboradas neste projeto serão testadas nas instalações da SPIN Engenharia, mas estarão disponíveis para a utilização na planta-piloto nos laboratórios da UnB, assim que esta for implementada.

### 7.2.4 Cálculo do PMV

Além das variáveis físicas (temperatura, umidade relativa e velocidade do vento) obtidas através dos sensores citados anteriormente, são necessárias para o cálculo do índice PMV variáveis não-físicas, como o metabolismo (determinado pelo nível de atividade) e a resistência térmica da vestimenta, que deverão ser parametrizadas.

Há ainda a temperatura média radiante, que poderia ser obtida através de um sensor de radiação, mas, como este sensor é muito caro, será calculada com base, entre outros fatores, no número de pessoas e computadores no ambiente (ver detalhe do cálculo no Anexo I).

A ferramenta a ser elaborada deve, então, permitir ao usuário configurar alguns parâmetros para a determinação do valor dessas variáveis.

Após o tratamento dos dados das variáveis, o índice PMV será calculado periodicamente através de um *script* interpretado pelo *ActionView*.

### **7.2.5 Controle do PMV**

A partir do PMV, implementaremos dois tipos de controladores: controlador liga-desliga e controlador PID projetado por meio do LGR discreto. O intuito da implementação de estratégias de controle distintas é a comparação de desempenho entre elas, permitindo, assim, a validação do controle do PMV.

## 8 RESULTADOS

Neste capítulo expomos os resultados alcançados no desenvolvimento do projeto, bem como os procedimentos realizados para que os objetivos fossem atingidos.

### 8.1 INTRODUÇÃO

Dos objetivos inicialmente propostos, a idéia de montar uma planta piloto nos laboratórios LAVSI e LARA foi descartada devido a restrições orçamentárias e de tempo. Utilizamos, então, como comentado anteriormente, as instalações da SPIN Engenharia, que já contam com *kits* contendo o instrumental necessário.

Seguindo as etapas programadas, obtivemos os seguintes resultados para os objetivos propostos.

### 8.2 OBTENÇÃO DO PMV

#### 8.2.1 Cálculo do valor do índice PMV

Decidimos por realizar o cálculo do PMV utilizando alguma ferramenta do *ActionView*, uma vez que a utilização de um programa externo demandaria maior tempo para o estabelecimento da comunicação e acarretaria maior probabilidade de falhas.

Primeiramente criamos variáveis para os termos individuais da equação do PMV e associamos fórmulas às mesmas. Este procedimento não foi bem sucedido porque o *ActionView* não proporciona nenhuma forma de controlar a ordem com que as funções das variáveis são calculadas e a equação do PMV apresenta recursividade, o que exige que seus termos sejam calculados em uma determinada seqüência.

Solucionamos este problema utilizando a ferramenta de *scripts* do *ActionView*. Como os comandos nos *scripts* são executados na ordem em que são escritos no programa, podemos garantir que os termos da equação do PMV sejam calculados na seqüência que quisermos, assegurando o correto processamento da recursividade.

Os *scripts* do *ActionView* são programados na linguagem *VBscript*. O cálculo do PMV é efetuado por um *script* do tipo *OnTimer*, o qual é executado periodicamente com uma freqüência configurável sempre que o módulo *RunTime* estiver ativo. O *script* utilizado para o cálculo do PMV encontra-se no Anexo III.

#### 8.2.2 Medição das variáveis

A medição das variáveis físicas não ocorreu exatamente conforme o planejado. Por problemas no orçamento do projeto, e também pela dificuldade em se encontrar

instrumentos adequados com preços acessíveis no Brasil, não foi possível adquirir os anemômetros e higrômetros necessários.

Alguns procedimentos foram tomados para contornar este problema. Para a velocidade do vento, tentamos utilizar um anemômetro de micro-hélice, mas como sua precisão é inferior comparada com a de um anemômetro a fio quente, nenhuma velocidade foi detectada no ponto de medição. Sendo assim, tivemos que utilizar um valor constante para a velocidade do vento. Como a resolução do anemômetro de micro-hélice era de  $0,1 \text{ m/s}$  e o equipamento não registrou nenhuma medição, o valor escolhido foi de  $0,05 \text{ m/s}$ .

Quanto à medição da umidade relativa do ar, adquirimos um higrômetro simples, sem nenhum tipo de saída para comunicação, exigindo que os valores medidos sejam atualizados “manualmente” no supervisório sempre que haja alguma mudança. Obviamente, isto é prejudicial para a precisão do cálculo do PMV, pois a evolução da umidade não será atualizada em tempo real.

Para a medição das temperaturas internas e externas, foram utilizados os termistores já instalados na SPIN Engenharia, apesar de apresentarem baixa precisão ( $0,5^\circ\text{C}$ ), uma vez que as restrições orçamentárias do projeto nos impediu de procurarmos outros sensores melhores. Os termistores são conectados às controladoras, que se comunicam entre si através de uma rede no padrão físico RS485. O *software* supervisório, por sua vez, se comunica com as controladoras em qualquer ponto da rede através de um conversor RS485/RS232 (ver mais sobre esses tipos de rede no Anexo IV).

A temperatura média radiante foi estimada sem o uso dos sensores de radiação térmica devidos, utilizando-se apenas um termômetro a laser para obtermos as temperaturas das superfícies que mais poderiam influenciar no valor em questão. Medimos, então, as áreas dessas superfícies e utilizamos a fórmula a seguir:

$$T_{rad} = \frac{A_1 \cdot T_1 + A_2 \cdot T_2 + A_3 \cdot T_3 + \dots + A_n \cdot T_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} \quad (8)$$

Além disso, vinculamos a temperatura média radiante estimada com a temperatura ambiente, anotando esse valor no dia da medição, para podermos aproximar a estimativa para dias mais frios ou quentes. Consideramos, ainda, a influência do número de pessoas ou computadores sobre o valor da temperatura média radiante, permitindo que o usuário configure esses dados. Veremos mais detalhes sobre a configuração do *ActionView* mais adiante. Maiores informações sobre as medições e como foi calculada essa variável podem ser encontradas no Anexo I, enquanto detalhes sobre a implementação dos cálculos no supervisório podem ser encontrados no Anexo III.

Por fim, as variáveis pessoais também foram calculadas através de parâmetros configurados pelo usuário no *ActionView*, associados a tabelas de referência para valores padrão destas variáveis encontradas no trabalho [2].

Assim, para o cálculo da taxa de metabolismo ( $M$ ), é necessário que o usuário informe o tipo de atividade realizada no ambiente, em que um valor é associado a  $M$  para cada opção disponível. Assim, também para o cálculo da resistência térmica do vestuário ( $I_{vest}$ ), deve-se informar para o supervisor o tipo de vestimenta utilizado. Mais detalhes de como esta programação foi realizada podem ser encontrados mais adiante neste capítulo e no Anexo III. Maiores informações sobre o cálculo destas variáveis podem ser vistas no Anexo I.

### **8.2.3 Influência das variáveis envolvidas sobre o valor do PMV**

A título de exemplificar o cálculo do valor do índice PMV, alteramos os valores de algumas variáveis para visualizarmos sua influência, compararmos com a teoria e comprovarmos o funcionamento da ferramenta utilizada para o cálculo.

As Figuras 8.1 a 8.9 a seguir mostram a dependência do PMV com os valores da temperatura, velocidade do vento, umidade relativa do ar, temperatura média radiante, resistência térmica do vestuário e taxa de metabolismo.

Nesses gráficos, apenas o valor da variável a ser analisada foi alterado, ficando os demais parâmetros fixos. A temperatura foi mantida a  $25,41^{\circ}\text{C}$ , a umidade em  $40\%$ , a velocidade do vento em  $0,05\text{ m/s}$ , o nível de atividade em “atividade leve”, o tipo de vestimenta em “vestimenta de trabalho” e a temperatura média radiante foi configurada considerando-se duas pessoas e nenhum computador no ambiente em estudo.

Para visualizarmos o comportamento do índice PMV com a variação do valor da temperatura, observamos as Figuras 8.1 e 8.2 a seguir, sendo a segunda apenas a visualização da oscilação do PMV em detalhe. A temperatura inicia-se em  $25^{\circ}\text{C}$ , variando para  $20^{\circ}\text{C}$ , para  $15^{\circ}\text{C}$  e posteriormente retornando ao valor inicial. Observa-se que o valor do PMV chegou a ultrapassar  $-3$  quando a temperatura assumiu seu valor mais baixo, ou seja, há uma grande dependência do PMV com a temperatura.

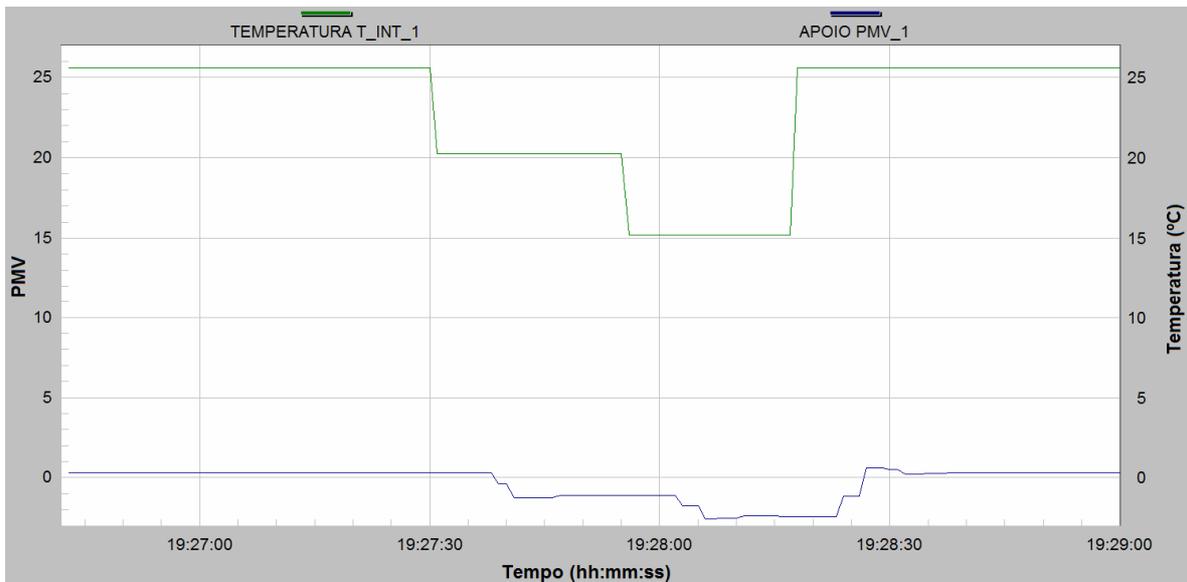


Figura 8.1 – Dependência do PMV com a temperatura.

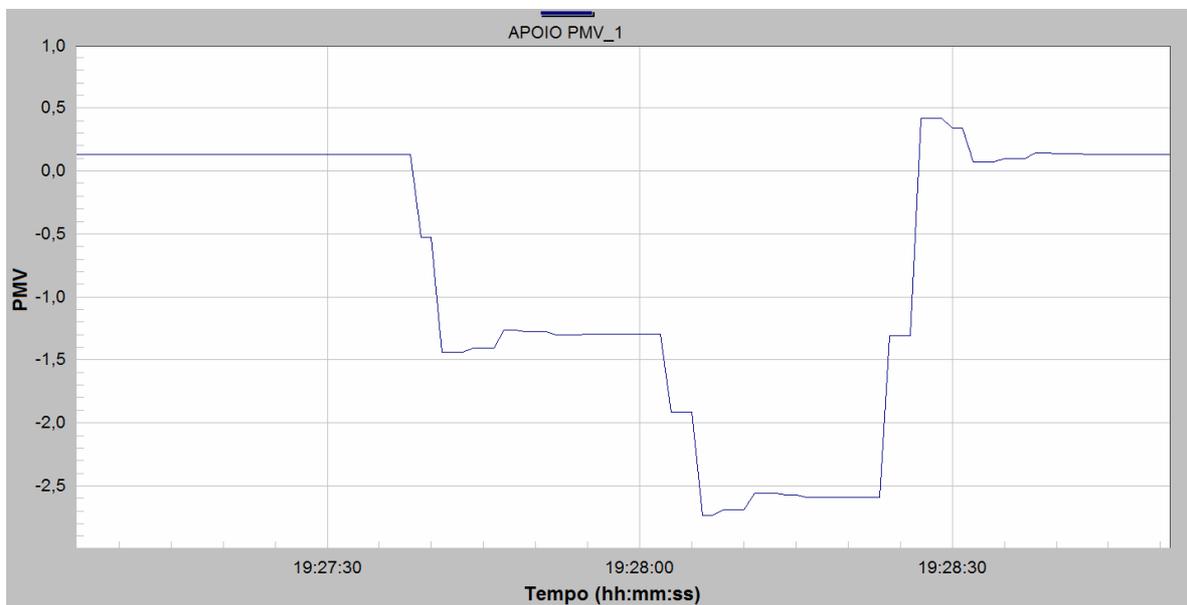


Figura 8.2 – Dependência do PMV com a temperatura, em detalhe o PMV.

A dependência do PMV com a velocidade do vento pode ser observada na Fig. 8.3 a seguir, em que a velocidade varia de  $0,05 \text{ m/s}$  inicialmente, para  $0 \text{ m/s}$ , para  $0,6 \text{ m/s}$ , e finalmente retornando ao valor inicial. Percebemos que a dependência do PMV com esta variável também é elevada.

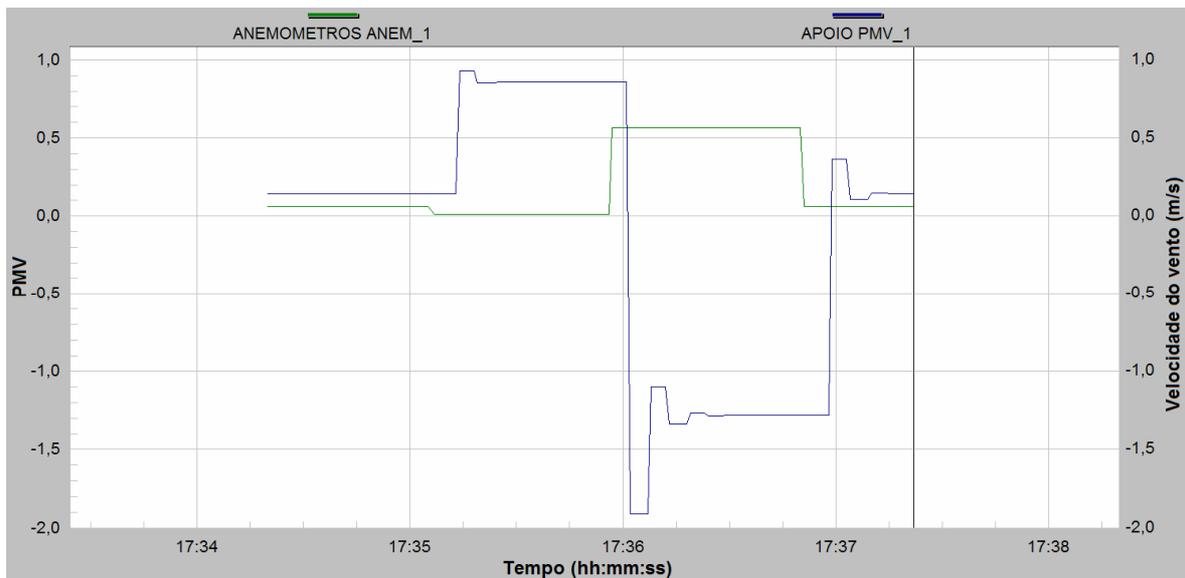


Figura 8.3 – Dependência do PMV com a velocidade do vento.

Para a umidade relativa do ar, observamos a Fig. 8.4 a seguir, em que variamos a umidade de 40% para 85% e depois novamente para 40%. Vemos que a influência da umidade relativa sobre o PMV é menor que a das outras variáveis apresentadas até então.



Figura 8.4 – Dependência do PMV com a umidade relativa do ar.

Para a temperatura média radiante, observamos as Figuras 8.5 e 8.6 a seguir, sendo que a segunda apenas mostra o PMV em detalhe para percebermos mais facilmente sua oscilação. Já explicamos que o valor da temperatura média radiante é obtido utilizando o número de pessoas e computadores do ambiente como parâmetros. Iniciamos, então, com duas pessoas e nenhum computador, para cinco pessoas e cinco computadores, nenhuma pessoa e nenhum computador, duas pessoas e dois computadores e finalmente retornamos ao estado inicial. Como cada parâmetro é ajustado de forma independente, há um estágio intermediário entre as mudanças. Observamos que a dependência do PMV não foi tão elevada quanto à observada nos casos da temperatura e velocidade do vento.

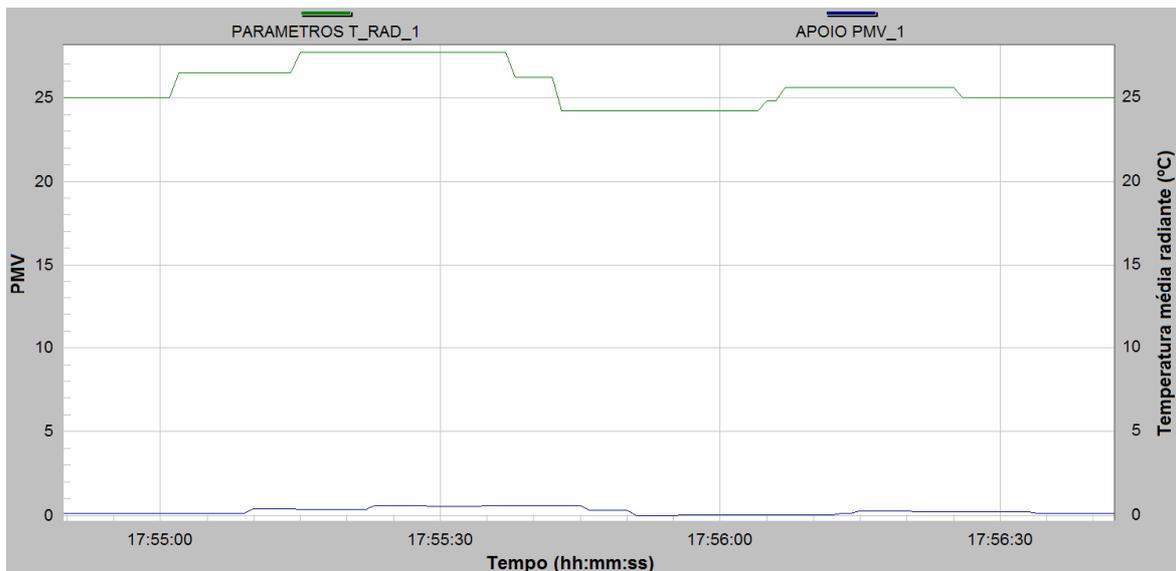


Figura 8.5 – Dependência do PMV com a temperatura média radiante.

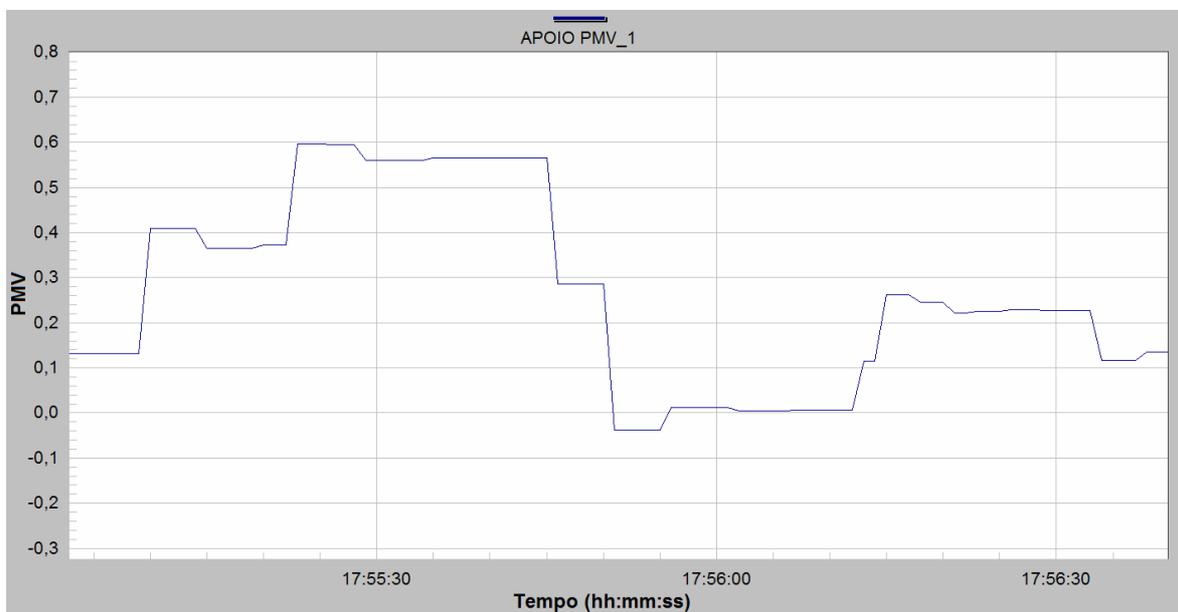


Figura 8.6 – Dependência do PMV com a temperatura média radiante, em detalhe o PMV.

Na Figura 8.7 a seguir observamos a variação do PMV com o tipo de vestimenta, iniciando com vestimenta de trabalho, para vestimenta completa de inverno, passando a vestimenta leve de verão e retornando ao estado inicial. Vemos novamente que o PMV não apresentou oscilações tão consideráveis como para os dois primeiros casos (temperatura e velocidade do vento).



Figura 8.7 – Dependência do PMV com a resistência térmica do vestuário.

Para a dependência do PMV com o nível de atividade, observamos as Figuras 8.8 e 8.9 a seguir, em que a segunda representa apenas a oscilação do PMV em detalhe. Iniciamos com atividade leve, passando a atividade sedentária, grande atividade e retornando ao estado inicial. Percebemos que esta variável apresenta grande influência sobre o valor do PMV, que oscilou entre  $-0,7$  e  $1,8$ .

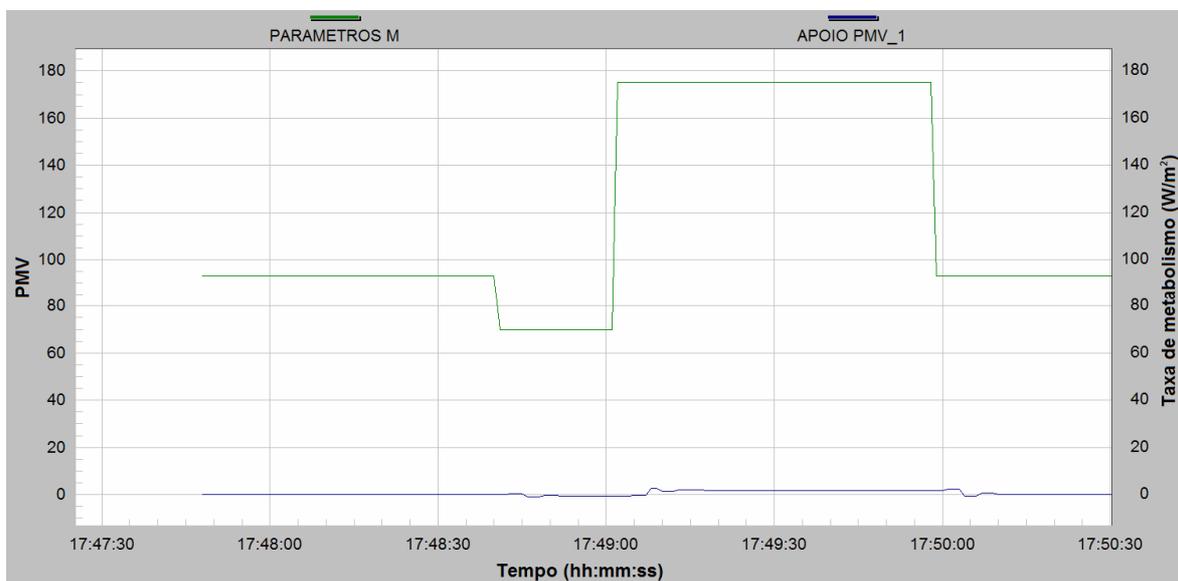


Figura 8.8 – Dependência do PMV com a taxa de metabolismo.

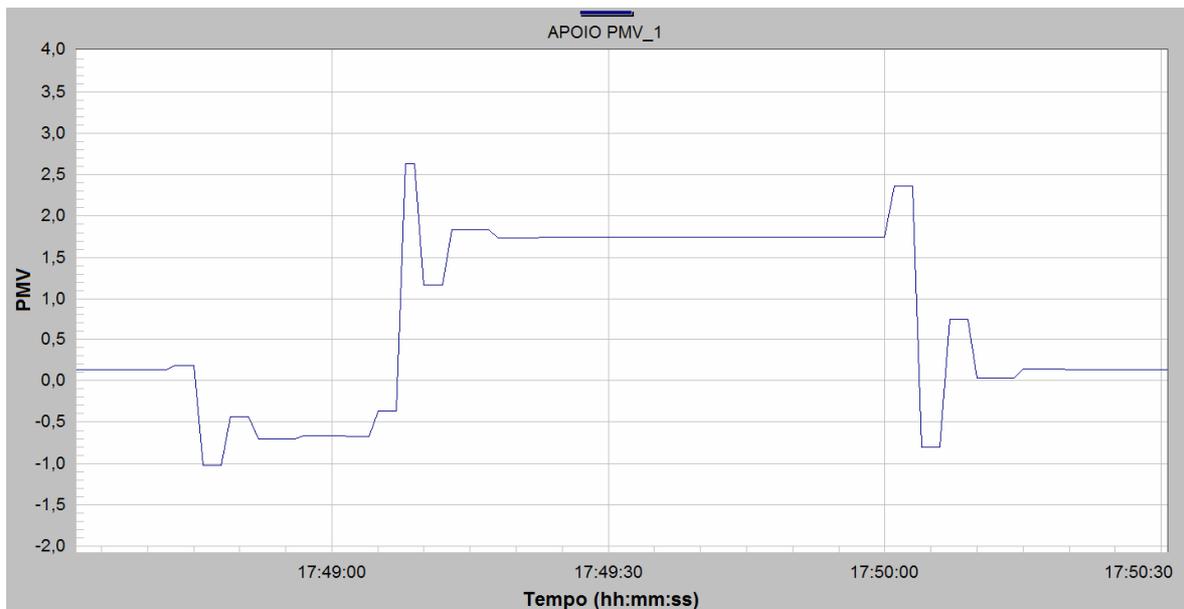


Figura 8.9 – Dependência do PMV com a taxa de metabolismo, em detalhe o PMV.

Após os testes com o cálculo, concluímos que as variáveis físicas que mais influenciam o valor do PMV são a temperatura e a velocidade do vento, e a variável pessoal  $M$ , que representa o nível de atividade também exerce influência significativa sobre o conforto térmico.

Uma vez que as oscilações ocorreram de acordo com a teoria para o cálculo do PMV, concluímos que a ferramenta implementada no *ActionView* funciona corretamente, apresentando apenas um pequeno atraso na atualização do valor do PMV em função das alterações dos valores das variáveis, justificado pelo tempo de execução do *script* utilizado.

### 8.3 MONITORAMENTO DO CONSUMO DE ENERGIA

O monitoramento do consumo de energia pelos aparelhos de ar condicionado realizou-se através de medidores Landis&Gyr modelo ZMD-128, que já estavam instalados na SPIN Engenharia e para os quais já havia um protocolo de comunicação com o *ActionView* desenvolvido.

A comunicação com os três medidores ocorre através de uma rede de RS485 independente da rede das controladoras, sendo necessária a utilização de um conversor RS485/RS232 através do qual pode-se acessar a rede em qualquer ponto.

Através do protocolo de comunicação, os medidores enviam constantemente valores acumulados do consumo de energia, sendo necessário apenas o tratamento desses valores para termos acesso aos consumos mensal e diário. A lógica programada em *VBscript* pode ser conferida detalhadamente no Anexo III.

Para a comunicação do supervisor com as controladoras e com os medidores de consumo dispusemos apenas de um conversor RS485/RS232. Desta forma não foi possível realizar medições conjuntas entre o consumo de energia e o estado (ligado ou desligado) do ar condicionado, por exemplo.

Como as demais etapas do projeto (cálculo do PMV e projeto dos controladores) exigiram muito tempo, realizamos apenas uma medição da evolução do consumo de energia por um tempo muito curto. Na realidade, como o valor enviado pelos medidores ZMD são incrementais, mostrando apenas a evolução do totalizador de consumo, julgamos necessário testar apenas a lógica do tratamento desse valor lido.

O *ActionView* na realidade apenas armazenará dois acumuladores para cada variável de consumo, um atualizado diariamente e outro mensalmente. Desta forma, podemos ter acesso aos consumos mensal e diário através da diferença entre o acumulador do ZMD e os acumuladores do supervisor.

A Figura 8.10 a seguir mostra a evolução dos consumos diário (cor verde) e mensal (cor azul) do ar condicionado da sala de reuniões da SPIN durante uma mudança de data. Observamos que, uma vez que a medição iniciou-se no mesmo dia, os consumos mensal e diário seguem juntos até a mudança do dia, quando o respectivo acumulador é atualizado e a variável de consumo diário começa a evoluir novamente a partir de zero. Já a variável mensal continua sua evolução normalmente. A lógica de tratamento dos dados de consumo, portanto, funciona perfeitamente.

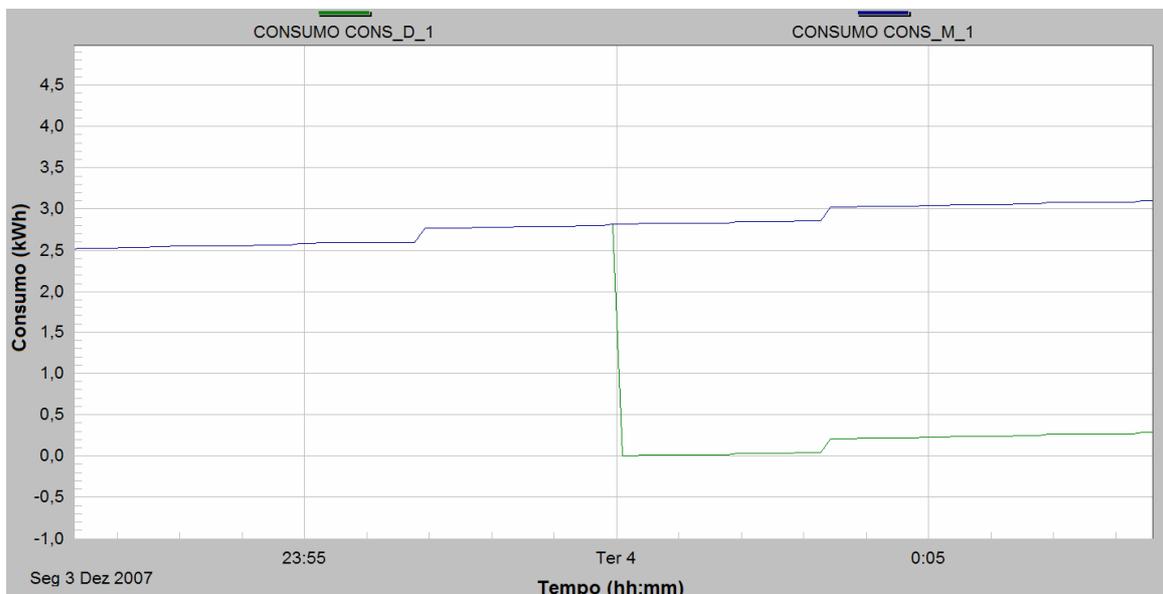


Figura 8.10 – Evolução do consumo de energia.

## 8.4 CONFIGURAÇÃO DO SOFTWARE SUPERVISÓRIO

A configuração do *ActionView* ocorreu conforme o planejamento descrito no Capítulo 5. Aqui mostraremos como cada etapa foi implementada no supervisor.

### 8.4.1 Configuração das variáveis

O passo inicial, segundo o planejamento, é o entendimento detalhado do processo, que é importante para a criação das variáveis necessárias de forma padronizada e organizada. No caso deste projeto, são necessárias variáveis para as grandezas medidas (temperatura, velocidade do vento, umidade e consumo de energia), organizadas em grupos distintos, além de variáveis de apoio para o cálculo do índice PMV, variáveis de parâmetros (para a temperatura média radiante, taxa de metabolismo e resistência térmica do vestuário) e variáveis para o controlador. A lista completa das variáveis utilizadas pode ser vista no Anexo III.

Após a sua criação (evidentemente nem todas as variáveis foram planejadas desde o início, sendo criadas segundo exigências posteriores), conhecendo os meios de comunicação com os periféricos para coleta dos dados, pode-se endereçar as variáveis corretamente. Para que o *ActionView* se comunique com as controladoras e os ZMD's precisamos também especificar canais de comunicação, conforme a Fig. 8.11 a seguir. Estes canais conterão informações como velocidade de leitura, tempo de espera, endereços e protocolos de comunicação, dentre outras.

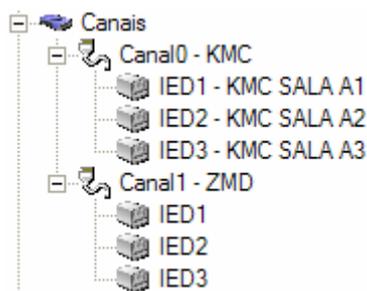


Figura 8.11 – Canais de comunicação.

Algumas variáveis podem ser configuradas pelo usuário, como é o caso do tipo de vestimenta, nível de atividade, número de pessoas e computadores no ambiente. Para isso, também foi necessária a utilização de *scripts*. Basicamente utilizou-se um *script* para cada botão de opção, executado com um clique do *mouse* que troca os valores de variáveis digitais contendo a informação da opção feita pelo usuário. Outro *script* (o mesmo que calcula o PMV) verifica estas opções e atualiza os valores das variáveis em questão segundo tabelas de referência encontradas em [2]. A lógica detalhada pode ser visualizada no Anexo III.

Algumas variáveis deveriam ser obtidas por meio de sensores, mas acabaram tendo que ser estimadas por diversos problemas, conforme explicado anteriormente. As variáveis de temperatura média radiante, por possuírem um cálculo um pouco mais complexo, foram estimadas por meio de um *script*, conforme pode ser visto no Anexo IV. As variáveis de umidade relativa e velocidade do vento, entretanto, podem ser atualizadas em suas telas correspondentes, uma vez que são exibidas em campos associados à rotina TROCA, que permite que o usuário entre com um novo valor mediante um duplo clique com o *mouse*.

#### **8.4.2 Cálculo do PMV**

O próximo passo foi elaborar a ferramenta para o cálculo do índice PMV.

Como explicado anteriormente, nossa primeira idéia de associar fórmulas a cada variável utilizada no cálculo não deu certo devido à recursividade. Elaboramos, então, um *script* do tipo *OnTimer*, que realiza o cálculo do PMV e é executado periodicamente, atualizando seu valor. O *script* utilizado encontra-se detalhado no Anexo III.

Para o cálculo do PMV, o *script* segue os seguintes procedimentos: calcula os valores de temperatura média radiante, de acordo com as configurações feitas pelo usuário, atualiza os valores de resistência térmica do vestuário e da taxa de metabolismo, também conforme escolhas do usuário, calcula a pressão de saturação, a pressão de vapor, a difusão de vapor, a transpiração, a respiração latente, a respiração sensível, o fator de vestuário, a radiação, a convecção, a temperatura de vestimenta, a acumulação de calor e finalmente o índice PMV. Os cálculos são realizados conforme descrito no Capítulo 3 e no Anexo I.

Anteriormente já mostramos a forma como verificamos o funcionamento correto dessa ferramenta alterando o valor das variáveis e observando o comportamento do PMV calculado.

#### **8.4.3 Configuração da IHM**

A interface gráfica com o usuário foi elaborada da forma mais simples e clara possível. Como foi dito no planejamento do Capítulo 5, cada tela possui o mesmo menu lateral que permite o acesso a todas as outras, as informações estão expostas de forma clara e espaçadamente. Foram criadas telas para exibir individualmente velocidade do vento, umidade relativa, temperaturas, consumo de energia, índice PMV, parâmetros do controlador e opções de configurações.

Os gráficos de tendência histórica e em tempo real podem ser obtidos facilmente no módulo *RunTime*. Desta forma não vimos a necessidade de implementar atalhos nas telas diretamente para os gráficos, sendo mais prático apenas a criação de filtros pré-programados de variáveis para termos acesso rápido aos gráficos que serão visualizados com mais frequência.

## 8.5 CONTROLE DO PMV

Nesta etapa do projeto, implementamos duas estratégias de controle sobre o comportamento do índice de conforto térmico PMV quando do acionamento do ar condicionado: controle liga-desliga e controle PID projetado através do LGR discreto.

Todas as estratégias de controle foram realizadas em âmbito digital. Os códigos representantes de cada controlador foram inseridos na rede de controladoras KMC instalada na SPIN Engenharia, através do *software* proprietário *WinControl*. Até cinco programas podem ser armazenados e executados simultaneamente.

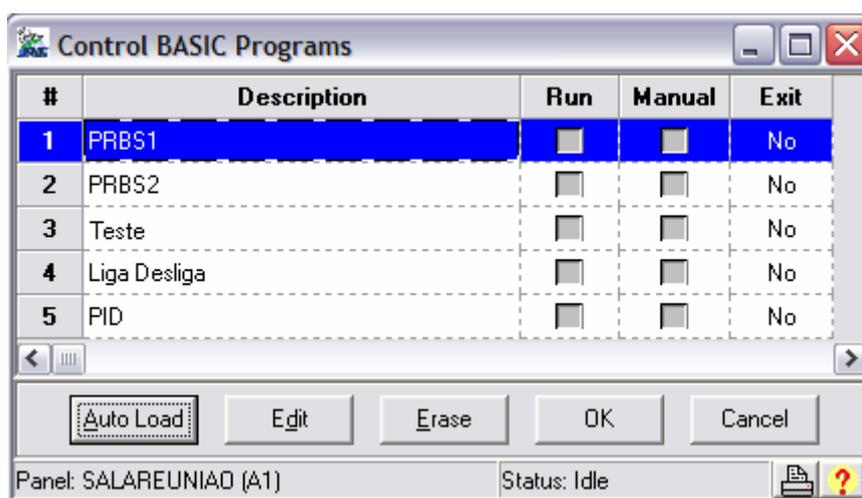


Figura 8.12 – Programas armazenados na memória das KMC's.

Pelo *software WinControl*, temos acesso às variáveis que estão conectadas às entradas ou saídas físicas das KMC's, às variáveis internas dos programas e às variáveis lidas a partir de outros *softwares*, como o *ActionView* por exemplo. Além disso, todas essas variáveis são disponibilizadas para leitura por outros *softwares*.

O *WinControl* comunica-se com o *ActionView* através do correto endereçamento de variáveis comuns aos dois ambientes. Para a implementação dos controladores, o índice PMV calculado pelo *ActionView* teve que ser repassado para o *WinControl*, para que os programas pudessem manipular este valor como sendo a saída do processo a ser controlado.

Neste momento do projeto, tivemos um problema. Apesar de o acesso às variáveis que se encontram conectadas às entradas ou saídas físicas das KMC's e às variáveis internas do *WinControl* ser bastante simples, o mesmo não ocorre com o acesso às variáveis lidas a partir do *ActionView*.

Apenas o endereçamento correto das variáveis comuns entre os dois ambientes (no nosso caso, o PMV) não é suficiente para garantir um envio bem-sucedido das mesmas para o *WinControl*. Na verdade, um comando mais complexo denominado *CallCommand* (o qual pode ser observado em um dos *scripts* apresentados no Anexo III) é necessário para que tal

envio ocorra de maneira correta. Este comando, porém, é comumente utilizado nas aplicações envolvendo o *ActionView* para o envio esporádico de comandos manuais, como por exemplo ligar ou desligar um circuito de iluminação. Pelo fato de não ter sido criado para ser usado de forma periódica, quando esse comando é executado, o *ActionView* não realiza nenhum controle para evitar colisões de dados. Quando esses erros de transmissão ocorrem, entretanto, a comunicação do supervisor com os periféricos é interrompida.

Como em nosso projeto necessitamos de atualizações freqüentes do valor do PMV utilizado nas controladoras, as conseqüências deste problema são maximizadas, aumentando drasticamente a possibilidade de perda da comunicação.

Esse problema nos prejudicou bastante quando da realização das verificações do comportamento do PMV e do acionamento do ar condicionado para validação dos controladores. Seu efeito era tão grave, que se tentássemos atualizar o valor do PMV nas KMC's à mesma velocidade da taxa de amostragem do controlador (dez segundos), a comunicação se perdia após menos de três minutos do início da varredura.

Para tentarmos contornar esse problema, abrimos mão da precisão do cálculo do sinal de controle, aumentando o intervalo de envio do valor do PMV para as controladoras para cerca de vinte segundos. Esta atitude não resolveu o problema, porém, nos possibilitou intervalos de medições maiores.

A perda de comunicação continuou ocorrendo sem um padrão definido, acontecendo desde cinco minutos após o início da varredura, até pouco mais de quarenta minutos. Mesmo assim, após inúmeras tentativas, conseguimos realizar as medições necessárias para a validação dos controladores.

### **8.5.1 Controlador liga-desliga**

O controlador foi implementado de maneira bastante simples, não havendo necessidade de nenhum projeto anterior à geração do código KMC que o representou.

Definimos o limite máximo do valor do PMV no qual o ar condicionado deveria ser acionado como sendo  $0,3$ . O limite mínimo, ou seja, o valor no qual o ar condicionado deveria ser desligado, foi escolhido como sendo  $-0,3$ .

O código KMC do controlador liga-desliga verifica qual é o valor atual do PMV e liga o ar condicionado caso esteja acima de  $0,3$  e o desliga caso encontre-se abaixo de  $-0,3$ . Além disso, possui uma proteção para evitar chaveamentos em excesso do ar condicionado, garantido que o equipamento permaneça em um mesmo estado por no mínimo um minuto e meio. O código KMC em questão pode ser encontrado no Anexo IV.

O comportamento do PMV quando da atuação do controle liga-desliga pode ser observado através do gráfico a seguir.

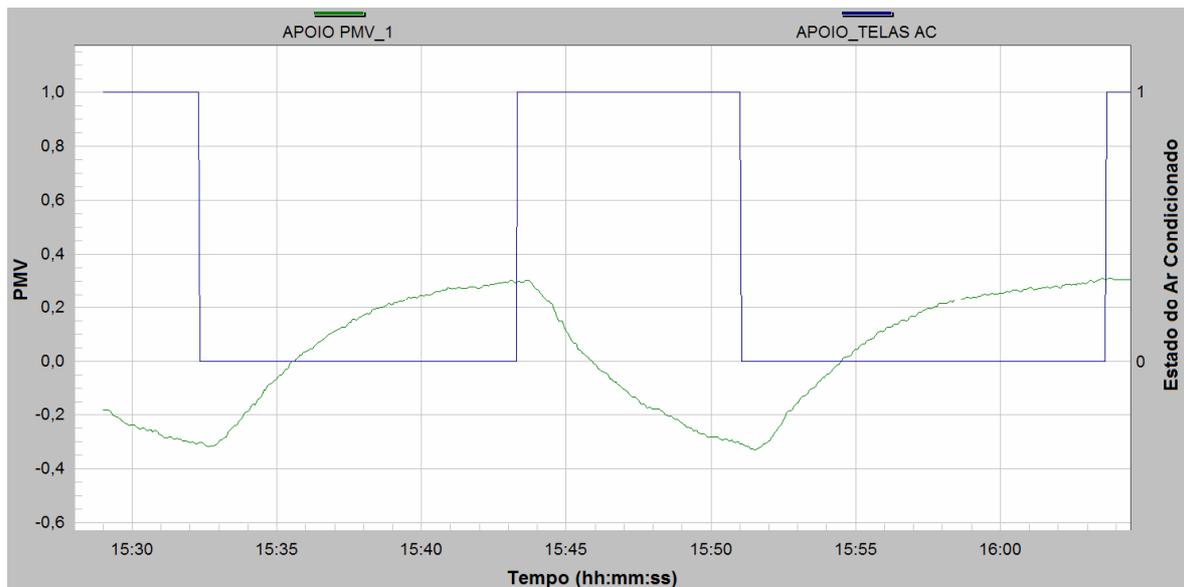


Figura 8.13 – Resposta do PMV com o controlador liga-desliga.

Analisando a Fig. 8.13, podemos perceber que o índice PMV se manteve dentro da faixa de valores aceitáveis especificada quando do projeto do controlador liga-desliga (entre 0,3 e -0,3). Podemos ver ainda que o ar condicionado não ficou ligado durante todo o tempo, como acontece quando não há o controle, gerando assim uma economia de energia. Além disso, o índice PMV foi mantido em uma faixa mais confortável do que ocorre quando não há o controle (quando o PMV se estabiliza por volta de -0,5 com o ar condicionado acionado em sua potência máxima).

Com o intuito de verificarmos a evolução da temperatura do ar conforme a variação do PMV, temos na Fig. 8.14 seguir um gráfico demonstrando o comportamento dessas duas variáveis simultaneamente.

Podemos perceber que a Fig. 8.14 apresenta uma taxa de amostragem baixa, o que faz com que o comportamento apresentado não se aproxime muito da tendência em tempo real das variáveis. Isto ocorre pois esse gráfico foi obtido através da plotagem dos valores históricos armazenados das variáveis em questão, sendo que o *ActionView* não permite intervalos de armazenamento menores que um minuto.

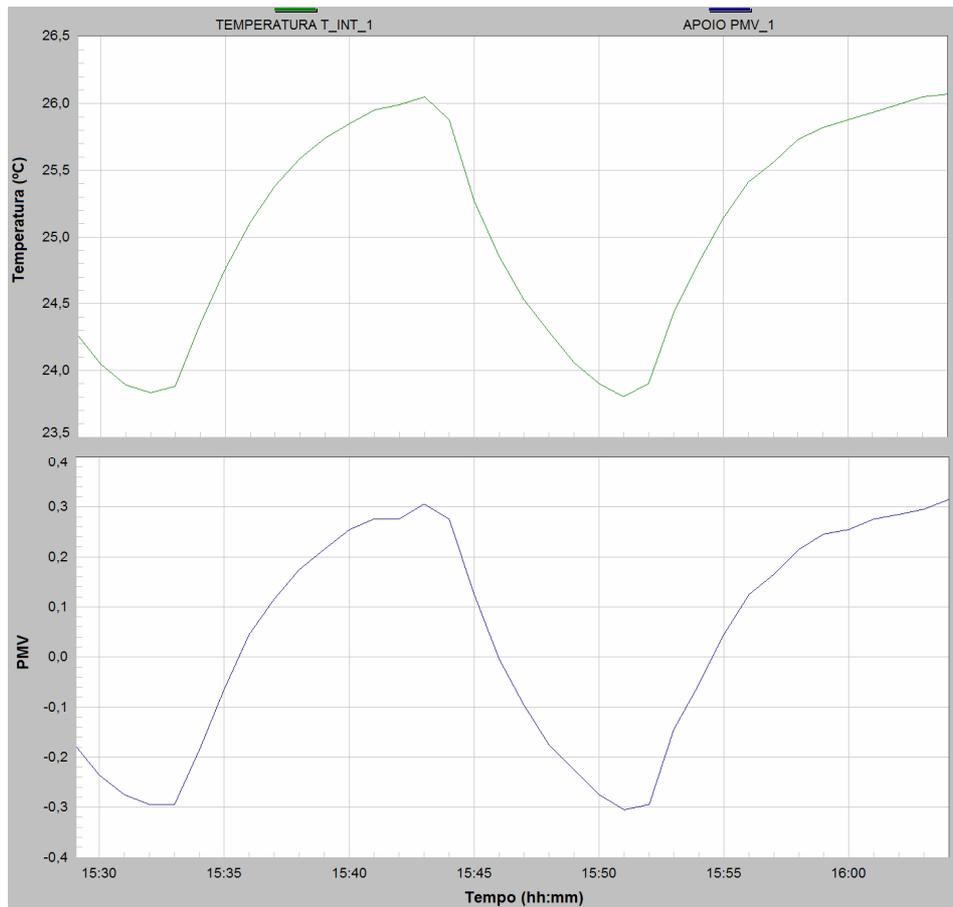


Figura 8.14 – Comportamento da temperatura e do PMV quando da atuação do liga-desliga.

### 8.5.2 Controlador PID projetado por meio do LGR discreto

Conforme descrito no Capítulo 6, o projeto do controlador PID através do LGR discreto é iniciado através da identificação do modelo matemático da resposta do PMV ao acionamento do ar condicionado em sua potência máxima.

Para identificarmos o processo, precisamos de respostas do PMV em diversas faixas de frequência, o que pode ser feito aplicando-se um sinal PRBS em sua entrada. Geramos um sinal PRBS com 255 pontos através do MatLab, sendo que o comando completo pode ser encontrado no Anexo V. O sinal PRBS de acionamento bem como a resposta do PMV ao mesmo podem ser vistos na figura a seguir.

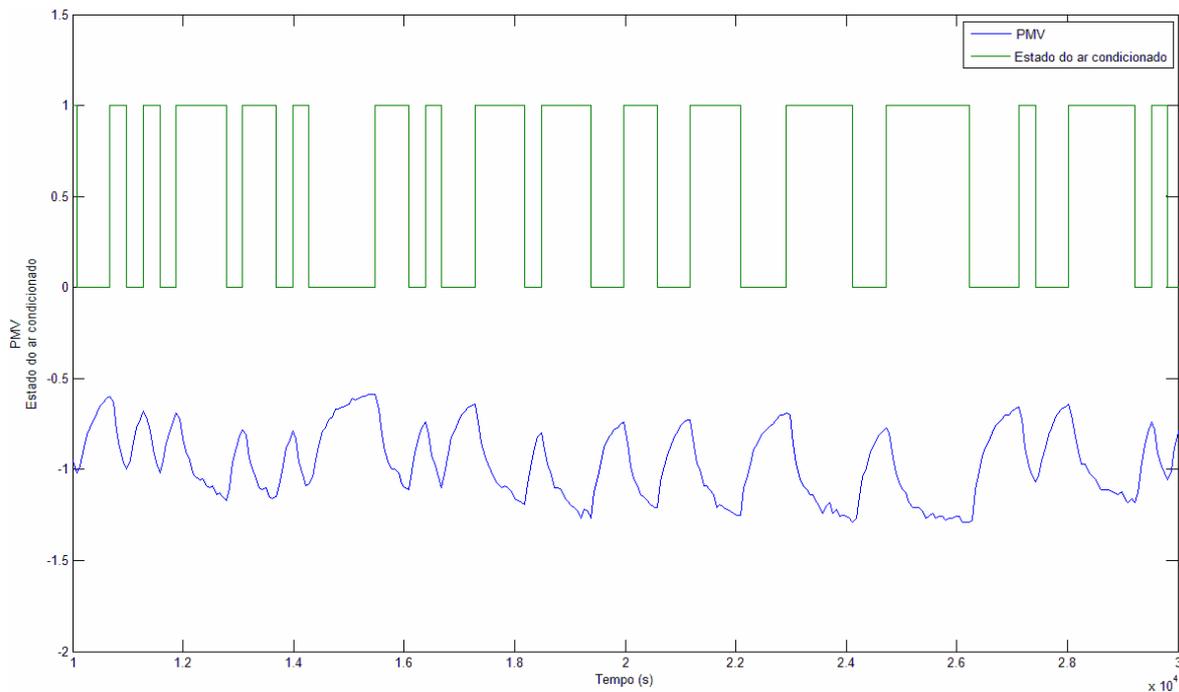


Figura 8.15 – Sinal PRBS de acionamento e resposta do PMV.

Além de gerar gráficos de tendência de variáveis como o que pode ser observado na Fig. 8.15, o *ActionView* também armazena os valores das mesmas em planilhas. Para utilizar o comando IDENT do MatLab, importamos os dados referentes ao sinal PRBS e à resposta do PMV gravados em uma planilha. O comando que realiza tal importação de dados pode ser encontrado no Anexo V.

Após a importação dos dados, os mesmos foram tratados na janela do IDENT, na qual foram retiradas a média do sinal e faixas de valores inconsistentes. Posteriormente, escolhemos diferentes combinações entre número de zeros e pólos, e presença ou não de atraso de transporte para verificarmos qual modelo se aproximava mais do sinal real.

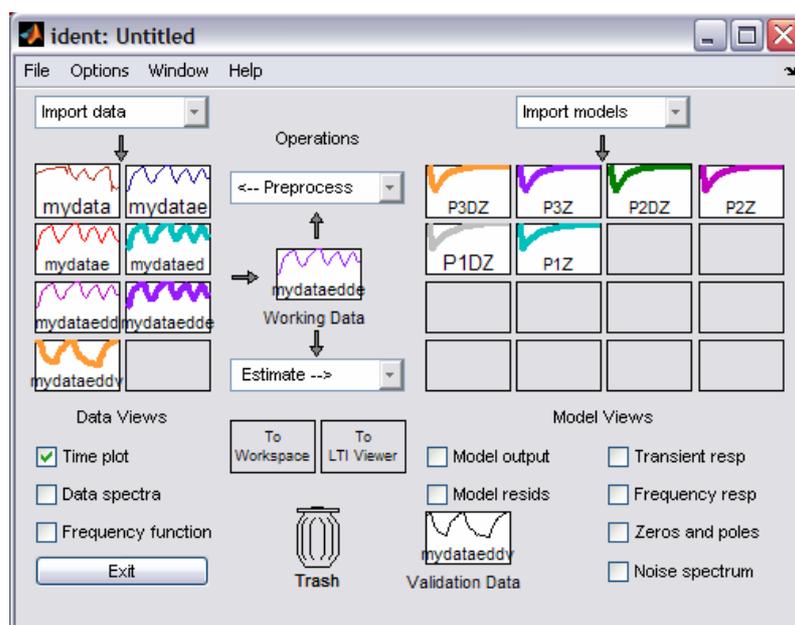


Figura 8.16 – Combinações para verificação da aproximação com o sinal real.

Observando a Fig. 8.16, vemos que as combinações testadas foram: três pólos, um zero e com atraso de transporte (P3DZ); três pólos e um zero (P3Z); dois pólos, um zero e com atraso de transporte (P2DZ); dois pólos e um zero (P2Z); um pólo, um zero e com atraso de transporte (P1DZ); e um pólo e um zero (P1Z).

Plotamos todas as combinações descritas anteriormente a fim de verificarmos qual era a mais próxima do sinal real. O resultado obtido foi:

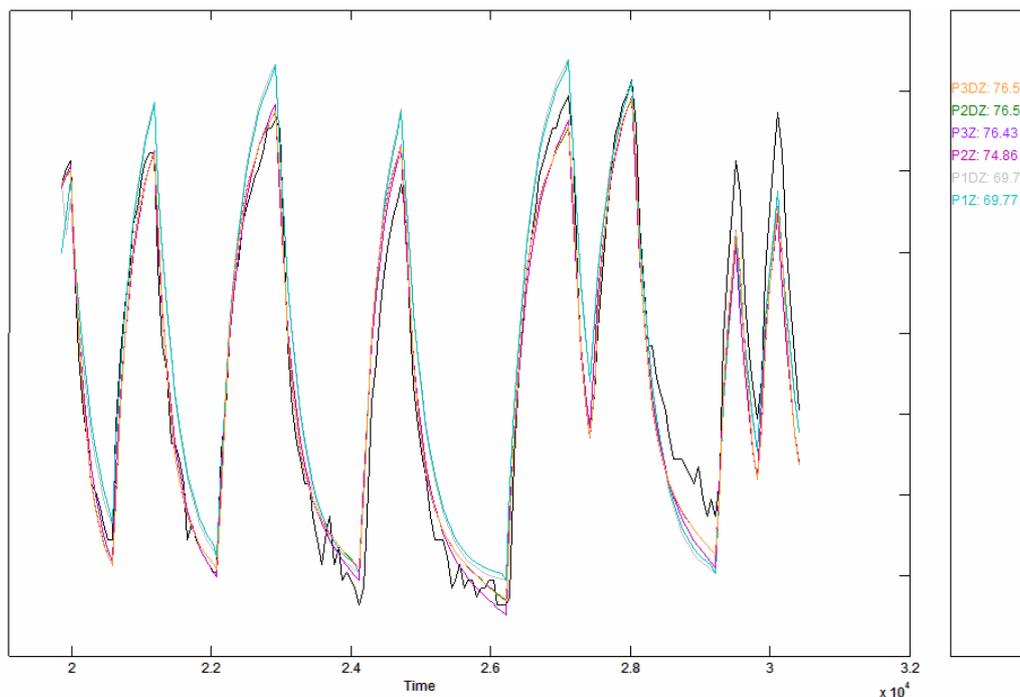


Figura 8.17 – Modelos distintos e sua aproximação com o sinal real.

A Figura 8.17 nos mostra que o modelo com três pólos, um zero e atraso de transporte foi o que mais se aproximou do sinal real, com 76,54% de acerto. Porém, este modelo forneceu um pólo muito distante dos outros dois, o que fez com que a influência do mesmo pudesse ser desconsiderada. Por isto, e devido ao fato de o percentual de acerto do modelo com dois pólos, um zero e atraso de transporte não ser muito menor que o do primeiro, decidimos por usar o modelo P2DZ.

Os parâmetros obtidos do modelo matemático P2DZ, bem como a própria função de transferência representante da planta são apresentados na Fig. 8.18 a seguir. Denominando tal função como  $G(s)$ , podemos escrever:

$$G(s) = \frac{1,1433 \cdot (1 + 1198,7 \cdot s) \cdot e^{-25,882 \cdot s}}{(1 + 2758 \cdot s)(1 + 173,24 \cdot s)} \quad (9)$$

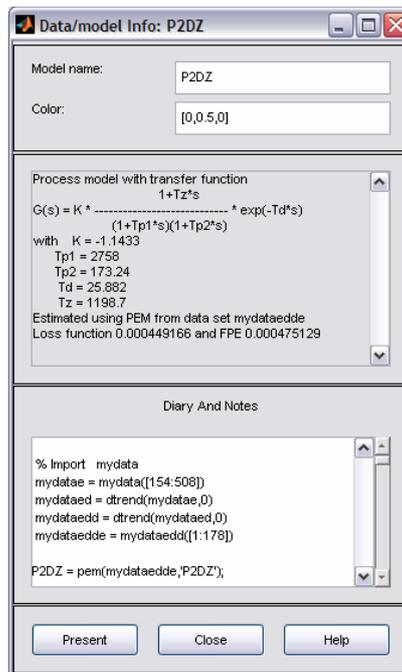


Figura 8.18 – Parâmetros do modelo matemático da planta do sistema.

De posse da função de transferência do processo a ser controlado, partimos para sua discretização. Para tanto, primeiro inserimos a função contínua no MatLab, para só então passá-la para o domínio z através do comando c2d (o comando completo pode ser visto no Anexo V). Agindo desta maneira, obtivemos:

$$G(z) = \frac{-0,01168 \cdot z^2 - 0,004666 \cdot z + 0,01612}{z^3 \cdot (z^2 - 1,94 \cdot z + 0,9405)} \quad (10)$$

Após a obtenção da função de transferência no domínio z, iniciamos o projeto do controlador propriamente dito utilizando o comando SISOTOOL do MatLab. Importamos a função de transferência discreta e obtivemos seu LGR discreto e sua resposta em malha fechada ao degrau com um controlador unitário.

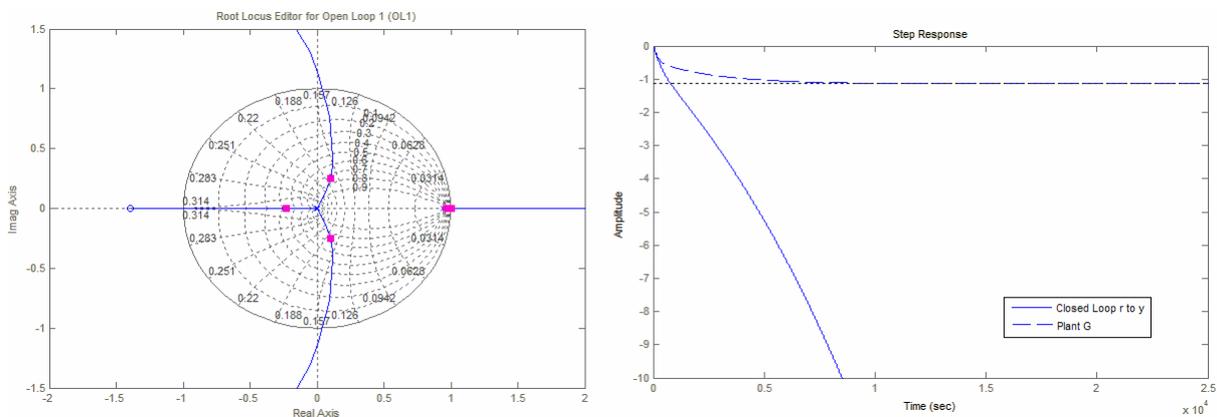


Figura 8.19 – LGR discreto e resposta da planta com realimentação unitária.

Observando a figura acima, vemos que o simples fechamento da malha do processo faz com que o sistema como um todo torne-se instável.

Adicionando os dois zeros e dois pólos do controlador PID no LGR e variando o ganho de modo que as raízes ficassem situadas dentro do círculo unitário (garantindo, assim, a estabilidade do sistema), chegamos ao seguinte resultado:

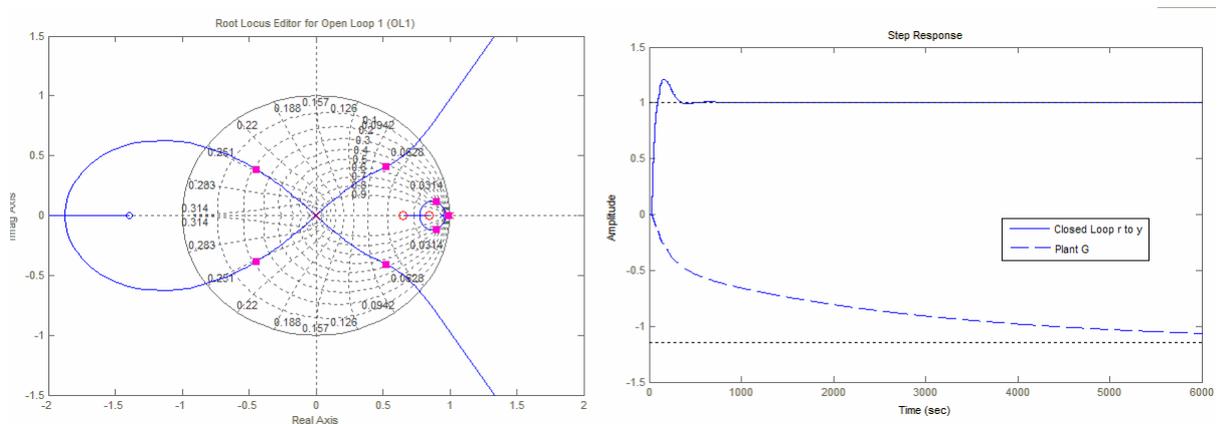


Figura 8.20 – LGR discreto e resposta da planta com controle PID.

A análise da figura acima revela que a resposta da planta ao degrau foi consideravelmente melhorada. O erro em regime permanente do sistema agora é nulo. O tempo de subida é baixo e sua ultrapassagem percentual é menor o que 20%. A localização dos zeros e pólos do controlador, bem como seu ganho que resultaram na resposta mostrada na Fig. 8.20 são apresentados a seguir.

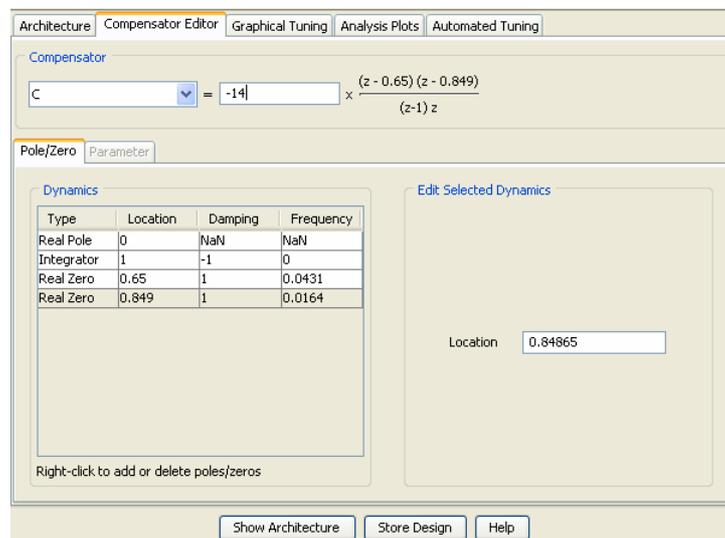


Figura 8.21 – Parâmetros do controlador PID.

Substituindo os parâmetros acima na Eq. 6, obtemos a seguinte função de transferência discreta para o controlador PID:

$$C(z) = \frac{K_C(z - z_{c1})(z - z_{c2})}{z(z - p_C)} \quad \therefore \quad C(z) = \frac{14(z - 0,65)(z - 0,84865)}{z(z - 1)} \quad (11)$$

Representando o controlador através de uma equação de diferenças, obtemos:

$$u(k) = u(k-1) + 14 \cdot e(k) - 20,9811 \cdot e(k-1) + 7,72268 \cdot e(k-2) \quad (12)$$

De posse da Eq. 12, escrevemos o código KMC representante do controlador PID. Neste código, o sinal de erro é calculado como sendo a diferença entre zero e o valor do PMV atual. O sinal de controle é calculado de acordo com a Eq. 12.

A excursão do sinal de controle é limitada, a fim de que o efeito *windup* não aconteça. Este efeito é caracterizado por um crescimento sem limites do sinal de controle devido ao aumento do sinal de erro e sua conseqüente integração.

Devido à característica da equação de diferenças do controlador, o sinal de controle  $u(k)$  tem seu valor máximo quando a diferença entre o erro atual  $e(k)$  e o erro passado  $e(k-1)$  é máxima. Sendo assim, para o cálculo dos limites máximo e mínimo da excursão do sinal de controle, consideramos uma variação do PMV de 0,5 a cada 10 segundos, uma variação muito alta para os padrões do projeto, para assegurar o enquadramento dos casos extremos em tal excursão. Agindo desta maneira, obtivemos limite máximo de zero e mínimo por volta de -28.

Após garantir a excursão máxima do sinal de controle, devemos associá-lo ao ciclo de trabalho do ar condicionado. Quanto mais próximo do limite mínimo está o sinal de controle, maior será o valor do PMV. Sendo assim, neste momento o ar condicionado deverá estar com ciclo de trabalho máximo, ou seja, 100%.

O acionamento do ar condicionado ocorre por meio de um sinal PWM de período constante e igual a cinco minutos. Quanto maior o ciclo de trabalho do aparelho, maior será o tempo no qual o mesmo encontra-se ligado. Caso o ciclo de trabalho seja de 100%, o ar condicionado ficará ligado por cinco minutos. Caso seja nulo, o equipamento ficará desligado por todo o período do PWM.

Neste código também há uma proteção contra chaveamentos muito rápidos do ar condicionado. Isto foi realizado fazendo com que ciclos de trabalho acima de 80% fossem arredondados para ciclos de 100%. Da mesma forma, ciclos abaixo de 20% foram levados a zero.

Por fim, o código disponibiliza a informação do valor do ciclo de trabalho atual, possibilitando sua leitura por parte do *ActionView* e conseqüente visualização do usuário. O código KMC do controlador PID pode ser encontrado no Anexo IV.

O comportamento do PMV ao ser executado o controle PID projetado através do LGR discreto é apresentado na seqüência.

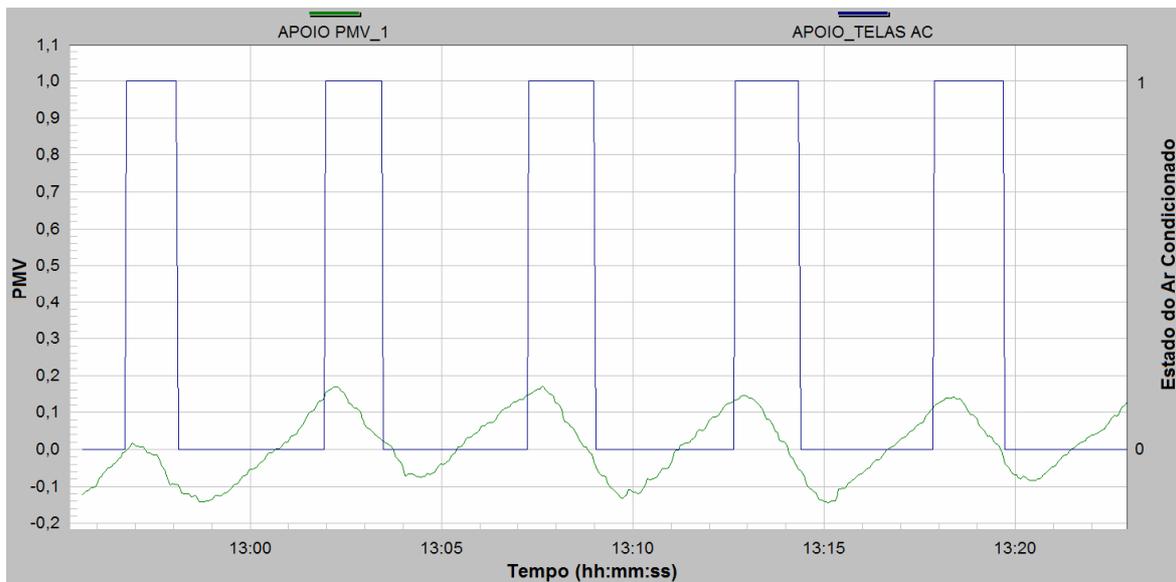


Figura 8.22 – Resposta do PMV com o controlador PID.

Assim como foi observado para o controlador liga-desliga, a análise da resposta do PMV com o controlador PID nos permite afirmar que a excursão do índice de conforto térmico ocorreu por uma faixa de valores que representam um ambiente mais confortável do que aconteceria caso não houvesse o controle. Para este controlador, a faixa de excursão ficou entre  $-0,2$  e  $0,2$ .

Observando a relação entre o PMV e o percentual de pessoas não satisfeitas dado pela Fig. 3.2, vemos que essa excursão representa um PPD de 6%. Este é um resultado muito bom, visto que, na condição de conforto ótima ( $PMV=0$ ) o valor do PPD é de 5%.

Quando da atuação do controlador PID, a temperatura comportou-se de acordo com o gráfico da Fig. 8.23. Mais uma vez, devemos dizer que esse gráfico não se aproxima do comportamento real das variáveis em estudo devido a limitação do *ActionView* no que diz respeito ao armazenamento de dados históricos.

O controlador PID também foi projetado para que o erro em regime permanente fosse nulo. Na verdade, caso tivéssemos acesso a um atuador ideal, no qual chaveamentos excessivos não caracterizem um problema, poderíamos implementar o controle sem proteção e o erro do sistema seria igual a zero.

Tal qual o controlador liga-desliga, o fato de o ar condicionado não estar ligado durante todo o tempo caracteriza uma economia de energia.

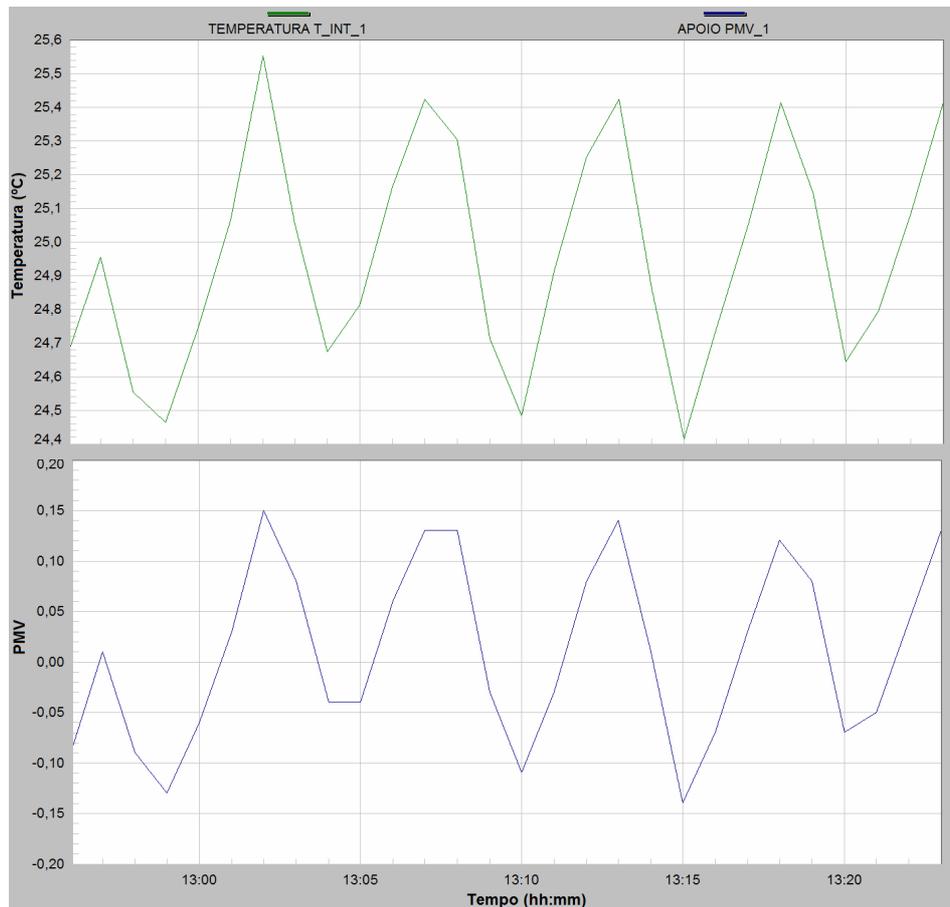


Figura 8.23 – Comportamento da temperatura e do PMV quando da atuação do PID.

### 8.5.3 Comparação entre os controladores

Controladores são empregados em determinados processos com o intuito de melhorar especificações de tempo de resposta e de erro de estado estacionário.

Para analisarmos melhorias na velocidade de resposta do processo controlado, devemos pensar no PWM como o valor médio de uma forma de onda “liga-desliga” em que a velocidade de resposta consiste na taxa de mudança do índice PMV em função da variação do valor médio do PWM.

Caso a potência do ar condicionado seja maior que a carga térmica, há margem de manobra para se escolher a velocidade de resposta do PID. Entretanto, para que se obtenha melhorias significativas na velocidade de resposta, o período do acionamento PWM deve ser suficientemente menor do que a constante de tempo do processo a ser controlado.

No caso deste projeto, porém, o intuito do alto período do PWM (de cinco minutos) é assegurar o cumprimento das restrições de tempo de chaveamento sugeridas pelo fabricante dos equipamentos de ar condicionado. Caso fosse possível diminuirmos o período do PWM para 20 segundos (muito mais rápido que a constante de tempo da planta, que é de 180 segundos), por exemplo, não verificaríamos as oscilações que foram obtidas experimentalmente.

Sendo assim, a diferença entre um controlador liga-desliga e um PID com acionamento PWM lento reside no fato de que o primeiro respeita a restrição de tempo de chaveamento apenas quando sua histerese é suficientemente grande, enquanto o segundo sempre satisfaz tal restrição.

A análise do erro resultante dos controladores demonstra que o controlador PID mostrou-se mais eficiente que o liga-desliga, pois fez com que a faixa de excursão do PMV fosse menor mesmo tendo acionado o ar condicionado por menos tempo, em média. Vale ressaltar que o controlador liga-desliga foi implementado apenas para servir como base e que seu pior desempenho já era esperado.

Para uma análise mais precisa do consumo de energia quando da atuação de cada controlador, deveríamos monitorar a medição realizada pelos ZMD's simultaneamente ao acompanhamento da evolução da resposta do PMV. Porém, isto não foi possível pois a rede das controladoras KMC e a dos medidores de energia ZMD são distintas, havendo a necessidade de termos mais um conversor RS485/RS232.

Apesar desse problema, podemos ter uma idéia do consumo de energia dos aparelhos de ar condicionado observando o tempo em que os mesmos estão sendo acionados. Devido ao simples fato de que em um ambiente sem controle o ar condicionado fica ligado durante todo o tempo, podemos concluir que todas as estratégias de controle promoveram uma economia de energia em relação a um ambiente sem controle, já que em todas o ar condicionado permanece desligado por alguns intervalos de tempo.

Comparando os controladores entre si, vemos que o controlador PID possui um período de acionamento do ar condicionado menor em média que o liga-desliga. Sendo assim, podemos dizer que o PID tem uma tendência a ser mais econômico. Porém, não somos capazes de garantir isto já que a diferença entre os períodos de acionamento do ar condicionado entre os controladores é bem pequena. Apenas uma monitoração simultânea do consumo de energia poderia revelar o grau exato de economia de cada controlador.

## 9 CONCLUSÃO

Neste capítulo, serão apresentadas algumas considerações finais acerca deste projeto, bem como sugestões para trabalhos futuros.

### 9.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este projeto teve como objetivos a aplicação de um *software* supervisor para calcular o índice de conforto térmico e a elaboração de estratégias simples de controle sobre o PMV.

Pelo fato de estar inserido em um projeto mais amplo realizado pelo Departamento de Engenharia Elétrica, pensamos sempre na possibilidade de integração com os futuros subprojetos, tanto de elaboração de sensores *wireless* como de implementação de estratégias eficientes de controle sobre o PMV e visando a racionalização do consumo de energia.

Devido a características do *software* supervisor (variáveis podem ler os dados através de fontes diferentes alterando-se suas configurações e endereços), a ferramenta criada no SCADA *ActionView* pode ser utilizada com sensores diferentes, precisando apenas ter suas variáveis reconfiguradas segundo os novos protocolos de comunicação. Além disso, as variáveis necessárias para futuros projetos de controle podem ser enviadas pelo *ActionView* para os CLP's, visualizadas em tempo real através de gráficos de tendência e armazenadas em uma base de dados histórica para serem consultadas sempre que necessário.

Lembramos, entretanto, que não conseguimos resolver um problema de comunicação no envio do valor do PMV para as controladoras, o que pode requerer futuros trabalhos.

Criamos, então, uma ferramenta bem estruturada e de fácil compreensão – uma vez que realizamos um planejamento prévio completo – que foi testada e validada, e que pode integrar os futuros subprojetos, preocupando-se apenas com a comunicação, sem a necessidade de refazer *scripts* ou criar novas variáveis.

Elaboramos também diferentes estratégias simples de controle sobre o PMV, sendo um controlador liga-desliga e um PID projetado pelo LGR discreto. Realizamos medições das respostas para cada controlador e tecemos comparações, concluindo que, em termos do comportamento do PMV, o controlador PID apresentou os resultados mais satisfatórios. Lembramos aqui que não tiramos nenhuma conclusão definitiva sobre a eficiência energética das estratégias testadas porque não tivemos condições de medir simultaneamente o consumo de energia e a evolução do conforto térmico sob ação dos diferentes controladores.

Julgamos, desta forma, termos alcançado as metas propostas quanto ao cálculo e utilização do PMV, bem como na possibilidade de utilização da ferramenta criada para integrar futuros trabalhos.

## **9.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

Futuramente, podem-se desenvolver sensores de temperatura mais eficientes, ao invés de utilizar termistores, que apresentam baixa precisão. Deve-se adquirir os equipamentos que faltaram para este trabalho, com a finalidade de verificar com mais precisão a funcionalidade das ferramentas criadas neste projeto, como anemômetros a fio quente, higrômetros e sensores de temperatura radiante média, todos com saídas de dados para se comunicarem com as controladoras.

Além disso, pode-se integrar os sensores e atuadores através de comunicação *wireless* ZigBee utilizando-se o *ActionView* já com as ferramentas para cálculo e armazenamento histórico das variáveis criadas. Além disso, é possível a elaboração de estratégias de controle mais abrangentes, visando não apenas manter o conforto térmico do ambiente, mas também reduzir o consumo energético, uma vez que também foi criada no supervisório uma ferramenta que dá acesso ao consumo diário e mensal de energia do ar condicionado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SILVA, P. C. P. da. Análise do comportamento térmico de construções não convencionais através de simulação em VisualDOE. 2006. 228 p. Tese de mestrado. Universidade do Minho, Portugal.
- [2] ÁGUAS, M. P. N. Conforto térmico: módulo da disciplina de mestrado “Métodos instrumentais em energia e ambiente”. Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2000/2001. 25 p.
- [3] MARKOV, D. *Standards in thermal comfort*. In: ANNUAL INTERNATIONAL COURSE: VENTILATION AND INDOOR CLIMATE, Sofia, 2002. P. Stankov (Ed). p. 147 – 157.
- [4] INDRIA, Y. *Design of an individual mobile measurement of thermal comfort*. 2006. 51 p. Tese de mestrado. Universidade de Kaiserslautern, Alemanha.
- [5] LAMBERTS, R.; XAVIER, A. A. de P. Conforto térmico e *stress* térmico. 111 p. Florianópolis, 2002.
- [6] MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; CUNHA NETO, J. A. B. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. *Ambiente Construído*. Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47 – 68, 2005.
- [7] URZÊDA, C. C. de. *Software SCADA como plataforma para racionalização inteligente de energia elétrica em automação predial*. 2006. 91 p. Tese de mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- [8] EJM Engenharia, Construções e Comércio Ltda. Noções Básicas sobre Automação Industrial. Disponível em <http://www.ejm.com.br/download.htm>> Acesso em 23 de junho de 2007.
- [9] CASTRUCCI, P.; MORAES, C. C. de. Engenharia de Automação Industrial. São Paulo/SP: Editora LTC, 2ª Ed. 2007. 291p.
- [10] NISE, N. S. Engenharia de sistemas de controle. Rio de Janeiro, RJ: Editora LTC, 3ª Ed. 2002. 695 p.
- [11] VIEIRA, B. de B. S.; WYANT, R. S. Automação e controle de um ambiente predial multi-salas utilizando o supervisor *ActionView*. 2007. 88 p. Trabalho de graduação em Engenharia Mecatrônica. Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, DF.
- [12] FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; WORKMAN, M. *Digital control of dynamic systems*. Menlo Park/CA: Editora Addison Wesley Longman, 3ª Ed. 1998. 742 p.
- [13] KHEDARI, J.; YAMTRAIPT, N.; PRATINTONG, N.; HIRUNLABH, J. *Thailand ventilation comfort chart*. In: SILVA, P. C. P. da. Análise do comportamento térmico de

construções não convencionais através de simulação em VisualDOE. 2006. 228 p. Tese de mestrado. Universidade do Minho, Portugal.

[14] BAUCHSPIESS, A. Rede de automação predial distribuída para racionalização de energia segundo o paradigma *Ambient Intelligence*. Brasília, 2006.

[15] BAUCHSPIESS, A.; ISHIHARA, J. Y.; FELGNER, F.; LITZ, L. *First-principles structured identification for predictive HVAC control*. In: XII CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CONTROLE AUTOMÁTICO, Salvador, 2006. p. 42 – 47.

[16] SPIN Engenharia de Automação. *ActionView – Especificação Funcional*. Brasília/DF, dezembro de 2005. Disponível em <http://www.spinengenharia.com.br/downloads>> Acesso em 23 de junho de 2007.

[17] SPIN Engenharia de Automação. *ActionView – Introdução*. Brasília/DF, dezembro de 2005. Disponível em <http://www.spinengenharia.com.br/downloads>> Acesso em 23 de junho de 2007.

[18] ACAMPORA, G., LOIA, V., NAPPI, M., RICCIARDI, S.: (2005) *Ambient Intelligence Framework for context aware adaptive applications*, 7th IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON COMPUTER ARCHITECTURE FOR MACHINE PERCEPTION (CAMP'05), pp. 327-332. In: BAUCHSPIESS, A. Rede de automação predial distribuída para racionalização de energia segundo o paradigma *Ambient Intelligence*. Brasília, 2006.

[19] FRIEDEWALD, M., da COSTA, O., PUNIE, Y., ALAHUHTA, P., HEINONEN, S. (2005) *Perspectives of ambient intelligence in the home environment*, *TELEMATICS AND INFORMATICS* 22 (2005) 221-238. In: BAUCHSPIESS, A. Rede de automação predial distribuída para racionalização de energia segundo o paradigma *Ambient Intelligence*. Brasília, 2006.

[20] TU Kaiserslautern. *Research Center Ambient Intelligence*. 2006. Disponível em <http://www.eit.uni-kl.de/ami>> In: BAUCHSPIESS, A. Rede de automação predial distribuída para racionalização de energia segundo o paradigma *Ambient Intelligence*. Brasília, 2006.

[21] GUTIERREZ, J.A. (2004) *On the use of IEEE 802.15.4 to enable wireless sensor networks in building automation*, IEEE, pp.1865-1869. In: BAUCHSPIESS, A. Rede de automação predial distribuída para racionalização de energia segundo o paradigma *Ambient Intelligence*. Brasília, 2006.

[22] BAUCHSPIESS, A. Ambiente predial inteligente *wireless*. In: PROMOVE – LABORATÓRIOS DE INOVAÇÃO, Brasília, 2006.

[23] MARTINS, A. S., BORGES, G. A. Introdução ao padrão físico RS-485 para comunicação serial. 14 p. 2006. Brasília-DF.

# ANEXOS

Anexo I – Cálculo dos termos da equação do *PMV*

Anexo II – Adequação do controlador PID obtido através do LGR discreto para a rede KMC

Anexo III – Lista de variáveis do *ActionView* e *scripts* utilizados

Anexo IV – Especificações e códigos das controladoras KMC

Anexo V – Comandos do MatLab

# ANEXO I

Este anexo apresenta as fórmulas para o cálculo dos termos individuais da equação do índice de conforto térmico *PMV*.

## AI.1 CÁLCULO DA TAXA METABÓLICA *M*

A taxa metabólica *M* é um fator que varia de acordo com o nível de atividade física que um indivíduo realiza. Quanto maior a atividade física, maior será a taxa metabólica. A Tabela AI.1 apresenta alguns valores para a taxa metabólica em função do nível de atividade física realizada:

Tabela AI.1 – Taxas metabólicas segundo a norma ISSO 7730 [2].

ATIVIDADES	TAXAS METABÓLICAS	
	[W/m <sup>2</sup> ]	[met]
Atividade sedentária (escola, residência, escritório, laboratório)	70	1,2
Atividade leve em pé (compras, laboratório, indústria leve)	93	1,6
Atividade média em pé (balconista, trabalho doméstico, trabalho em máquinas)	117	2,0
Atividade intensa	175	3,0

Observando a Tabela AI.1, podemos perceber que a taxa metabólica também pode ser expressa em termos da unidade [met]. Além disso, fazendo a proporção, concluímos que 1 *met* é igual a 58 *W/m<sup>2</sup>*.

## AI.2 CÁLCULO DO CALOR PERDIDO POR DIFUSÃO *E<sub>dif</sub>*

O calor perdido por difusão de vapor de água através da pele *E<sub>dif</sub>* é calculado através da Eq. AI.1 dada a seguir:

$$E_{dif} = 3,05 (5,73 - 0,007 M - p_a) \quad (AI.1)$$

Na Equação AI.1, temos a presença da pressão de vapor *p<sub>a</sub>*, cujo cálculo pode ser encontrado a seguir.

### AI.2.1 Cálculo da pressão de vapor $p_a$

A pressão de vapor  $p_a$  pode ser calculada através da Eq. AI.2 que se encontra a seguir:

$$p_a = UR \cdot p_{sat} \quad (\text{AI.2})$$

Na Equação AI.2,  $UR$  é a umidade relativa do ar, que pode ser medida através de sensores de umidade conhecidos como higrômetros. O termo  $p_{sat}$  pode ser calculado através da fórmula encontrada na seqüência.

### AI.2.2 Cálculo da pressão de saturação $p_{sat}$

A pressão de saturação  $p_{sat}$  deve ser calculada da seguinte maneira:

$$p_{sat} = 0,61078 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot T_{ar}}{237,3 + T_{ar}}} \quad (\text{AI.3})$$

Na Equação AI.3,  $T_{ar}$  é a temperatura do ar dada em [°C], a qual pode ser medida através de diversos tipos de sensores.

### AI.3 CÁLCULO DO CALOR PERDIDO POR TRANSPIRAÇÃO $E_{trans}$

O calor perdido por transpiração  $E_{trans}$  é calculado da seguinte maneira:

$$E_{trans} = 0,42 \cdot (M - 58,15) \quad (\text{AI.4})$$

### AI.4 CÁLCULO DO CALOR PERDIDO POR RESPIRAÇÃO LATENTE $E_{rl}$

O calor perdido por respiração latente  $E_{rl}$  é dado pela Eq. AI.5 a seguir:

$$E_{rl} = 0,0173 \cdot M(5,87 - p_a) \quad (\text{AI.5})$$

### AI.5 CÁLCULO DO CALOR PERDIDO POR RESPIRAÇÃO SENSÍVEL $E_{rs}$

O calor perdido por respiração sensível  $E_{rs}$  pode ser obtido através da seguinte equação:

$$E_{rs} = 0,0014 \cdot M(34 - T_{ar}) \quad (\text{AI.6})$$

### AI.6 CÁLCULO DO CALOR PERDIDO POR RADIAÇÃO $R$

O calor perdido por radiação  $R$  é calculado por meio da Eq. AI.6 dada a seguir:

$$R = 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{vest} \left[ (T_{vest} + 273)^4 - (T_{rad} + 273)^4 \right] \quad (\text{AI.7})$$

Na Equação Al.7,  $f_{vest}$  é o fator de vestuário dado em  $[m^2K/W]$ ,  $T_{vest}$  é a temperatura da vestimenta dada em  $[^\circ C]$  e  $T_{rad}$  é a temperatura radiante média dada em  $[^\circ C]$ . Os cálculos destes termos individualmente podem ser encontrados na seqüência.

### Al.6.1 Cálculo do fator de vestuário $f_{vest}$

O fator de vestuário  $f_{vest}$  é uma função com definições diferentes para dois intervalos distintos de sua variável independente. É calculado como se segue:

$$\begin{aligned} f_{vest} &= 1,00 + 1,29 \cdot I_{vest}, \text{ para } I_{vest} < 0,078 \text{ m}^2 \text{ K/W} \\ f_{vest} &= 1,05 + 0,645 \cdot I_{vest}, \text{ para } I_{vest} \geq 0,078 \text{ m}^2 \text{ K/W} \end{aligned} \quad (\text{Al.8})$$

Na Equação Al.8,  $I_{vest}$  é a resistência térmica da vestimenta dada em  $[m^2K/W]$ . O valor de  $I_{vest}$  pode ser encontrado em tabelas como a que se encontra a seguir.

### Al.6.2 Cálculo da resistência térmica da vestimenta $I_{vest}$

A resistência térmica da vestimenta  $I_{vest}$  varia de acordo com o tipo de roupa que uma pessoa está usando. Quanto mais peças de roupa, maior será a resistência térmica da vestimenta. A Tabela Al.2 apresenta alguns valores de  $I_{vest}$  em função do tipo de vestimenta utilizado.

Tabela Al.2 – Resistência térmica da vestimenta [2].

VESTIMENTA	RESISTÊNCIA TÉRMICA	
	$[m^2K/W]$	$[clo]$
Vestuário tropical	0,047	0,3
Vestuário leve de verão	0,078	0,5
Vestuário de trabalho	0,124	0,7
Vestuário de inverno para ambientes internos	0,155	1,0
Vestuário completo	0,233	1,5

Observando a Tabela Al.2, podemos perceber que a resistência térmica da vestimenta também pode ser expressa em termos da unidade  $[clo]$ . Além disto, vemos que  $1 clo$  é igual a  $0,155 m^2K/W$ .

### Al.6.3 Cálculo da temperatura da vestimenta $T_{vest}$

A temperatura da vestimenta  $T_{vest}$  é calculada através da Eq. Al.9 dada a seguir:

$$T_{vest} = 35,7 - 0,0275 \cdot M - 0,155 \cdot I_{vest} (R + C) \quad (\text{Al.9})$$

#### AI.6.4 Cálculo da temperatura radiante média $T_{rad}$

A temperatura radiante média  $T_{rad}$  pode ser medida através de sensores. Porém, devido à dificuldade de se encontrar tais sensores, utilizaremos uma aproximação para calcular  $T_{rad}$ .

A metodologia para a realização do cálculo em questão é a seguinte:

- (1) Mede-se a temperatura das paredes, piso, teto e daqueles objetos que estão presentes no ambiente que possam influenciar significativamente a temperatura radiante média;
- (2) Mede-se a área da superfície das paredes, piso, teto e dos objetos cuja temperatura foi mensurada;
- (3) De posse desses dados, utiliza-se a seguinte fórmula para o cálculo da temperatura radiante média:

$$T_{rad} = \frac{A_1 \cdot T_1 + A_2 \cdot T_2 + A_3 \cdot T_3 + \dots + A_n \cdot T_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} \quad (\text{AI.10})$$

Na Equação AI.10,  $A_n$  são as áreas das superfícies expostas das paredes, piso, teto e dos objetos que possam influenciar na radiação térmica do ambiente. Os termos  $T_n$  são as temperaturas dos elementos cujas áreas foram medidas.

Neste projeto, realizamos as medidas descritas anteriormente nas salas da SPIN Engenharia. Depois, calculamos a temperatura radiante média de cada sala desconsiderando a influência de pessoas e de computadores presentes na sala.

Os valores de áreas e temperaturas medidos na sala de reuniões da SPIN Engenharia podem ser encontrados na tabela a seguir:

Tabela AI.3 – Áreas e temperaturas dos objetos da sala de reuniões.

SALA DE REUNIÕES		
OBJETO	ÁREA [m <sup>2</sup> ]	TEMPERATURA [°C]
Parede 1 (com vista para a rua)	4,1820	21,00
Vidro da parede 1	5,3710	22,00
Parede 2 (com quadro branco)	7,6657	22,00
Parede 3 (divisória com a sala da diretoria)	6,8502	21,00
Parede 4 (divisória com a sala de circulação)	5,4530	20,00
Vidro da parede 4	4,1000	20,50
Teto	11,3155	20,50
Piso	11,3155	21,50
Armário da parede 3	3,3456	21,00
Armário da parede 4	2,3936	20,75
Mesa redonda	2,2244	22,00
Notebook	0,3393	40,00

Utilizando os valores da Tabela Al.3 e a Eq. Al.10, obtemos o seguinte valor para a temperatura média radiante da sala de reuniões ( $T_{rad1}$ ):

$$T_{rad1} = 21,2108 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (\text{Al.11})$$

Durante a medição das áreas e temperaturas apresentadas na Tabela Al.3, a temperatura do ar era de  $22,26 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Podemos fazer uma aproximação para descobrirmos a temperatura média radiante da sala de reuniões em função de sua temperatura do ar:

$$T_{rad1} = 0,9529 \cdot T_{ar1} \quad (\text{Al.12})$$

Na Equação Al.12,  $T_{ar1}$  é a temperatura do ar da sala de reuniões.

Procedendo da mesma maneira para a sala da diretoria, obtemos os seguintes valores:

Tabela Al.4 – Áreas e temperaturas dos objetos da sala da diretoria.

SALA DA DIRETORIA		
OBJETO	ÁREA [m <sup>2</sup> ]	TEMPERATURA [°C]
Parede 1 (divisória com a sala de reuniões)	9,0870	24,5
Parede 2 (com vista para a rua)	4,7066	25,5
Parede 3 (inclinada)	5,2192	25,0
Parede 4 (com vista para o bloco vizinho)	5,4755	25,0
Parede 5 (divisória com a sala de desenvolvimento)	8,2016	25,0
Teto	12,5655	25,0
Piso	12,5655	25,0
Pilastra	3,1222	25,0
Mesa 1 (branca)	0,9840	25,0
Mesa 2 (madeira)	1,9720	25,0
Mesa 3 (madeira)	1,9720	25,0
Armário pequeno	1,7122	24,5
Notebook	0,3393	40,0

Utilizando os valores da Tabela Al.4 e a Eq. Al.10, chegamos ao valor de temperatura média radiante da sala da diretoria ( $T_{rad2}$ ) que se encontra na seqüência:

$$T_{rad2} = 25,0301 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (\text{Al.13})$$

Durante as medições das áreas e temperaturas da sala da diretoria, a temperatura do ar era de  $26,02 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Fazendo a aproximação para descobrirmos a temperatura média radiante em função da temperatura do ar, temos:

$$T_{rad2} = 0,9620 \cdot T_{ar2} \quad (\text{Al.14})$$

Na Equação Al.14,  $T_{ar2}$  é a temperatura do ar da sala da diretoria.

Também realizamos medições de áreas e temperaturas na sala de desenvolvimento. Os valores obtidos foram:

Tabela AI.5 – Áreas e temperaturas dos objetos da sala de desenvolvimento.

<b>SALA DE DESENVOLVIMENTO</b>		
<b>OBJETO</b>	<b>ÁREA [m<sup>2</sup>]</b>	<b>TEMPERATURA [°C]</b>
Parede 1 (divisória com a sala de circulação)	7,3356	21,0
Parede 2 (divisória com a sala da diretoria)	6,4726	20,5
Parede 3 (com vista para o bloco vizinho)	9,6550	22,0
Parede 4 (divisória com o banheiro)	3,9300	20,0
Parede 5 (próxima a porta)	2,0998	21,0
Teto	11,8206	21,0
Piso	11,8206	20,5
Mesa 1 (branca)	0,9840	22,0
Mesa 2 (branca)	0,9840	21,0
Mesa 3 (branca)	0,9840	20,0
Mesa 4 (branca)	0,9840	21,0
Mesa 5 (madeira)	1,9720	20,5

Utilizando os valores da Tabela AI.5 e a Eq. AI.10, obtemos o seguinte valor para a temperatura média radiante da sala de desenvolvimento ( $T_{rad3}$ ):

$$T_{rad3} = 20,9253 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{AI.15})$$

Durante a medição das áreas e temperaturas apresentadas na Tabela AI.5, a temperatura do ar era de  $21,97 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Podemos fazer uma aproximação para descobrirmos a temperatura média radiante da sala de desenvolvimento em função de sua temperatura do ar:

$$T_{rad3} = 0,9524 \cdot T_{ar3} \quad (\text{AI.16})$$

Na Equação AI.16,  $T_{ar3}$  é a temperatura do ar da sala de desenvolvimento.

Sabemos que os seres humanos e os computadores são fontes emissoras de calor que podem ter uma influência significativa sobre a temperatura média radiante de um ambiente. Utilizando a Eq. AI.10, obtivemos a influência do número de pessoas e de computadores sobre  $T_{rad}$ . Em média, cada pessoa presente em um ambiente faz com que a temperatura radiante média desse ambiente seja crescida de  $0,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Para computadores, esse número é de  $0,3 \text{ } ^\circ\text{C}$  por computador. Os valores de área de superfície exposta e temperatura utilizados encontram-se na Tabela AI.6.

Tabela AI.6 – Valores de referência de temperatura e área para pessoas e computadores.

FONTES DE CALOR	TEMPERATURA [°C]	ÁREA DA SUPERFÍCIE EXPOSTA [m <sup>2</sup> ]
PESSOAS	36,5	1,8000
MONITOR	44,0	0,5104
CPU	32,0	0,5326
ESTABILIZADOR	46,0	0,0938

O valor utilizado para a temperatura de pessoas (36,5 °C) foi escolhido baseado na temperatura média do corpo humano em condições normais. Já o valor para a área da superfície exposta (1,8 m<sup>2</sup>) é conhecido como área de Dubois ( $A_{Du}$ ) e representa uma média das áreas de superfície corporal dos seres humanos. Sabemos que tal valor é uma aproximação ruim, já que a área de superfície corporal varia bastante de pessoa para pessoa. Porém, para a nossa aplicação, achamos mais simples escolhermos um valor representante da área da superfície exposta humana do que criarmos mais uma variável dependente de cada pessoa situada dentro do ambiente controlado.

Utilizamos o valor calculado pelas Eqs. AI.12, AI.14 e AI.16 para  $T_{rad}$  em cada sala da SPIN Engenharia e somamos 0,4 ou 0,3 °C dependendo do número de pessoas e/ou computadores presentes na sala.

## AI.7 CÁLCULO DO CALOR PERDIDO POR CONVECÇÃO C

O calor perdido por convecção  $C$  deve ser calculado da seguinte maneira:

$$C = f_{vest} \cdot 12,1 \cdot \sqrt{v} \cdot (T_{vest} - T_{ar}) \quad (AI.17)$$

Na Equação AI.17,  $v$  é a velocidade do vento dada em [m/s]. Esta velocidade pode ser medida por sensores conhecido como anemômetros. Como as velocidades a serem medidas durante o projeto são bem baixas (entre 0 e 2 m/s), anemômetros de precisão, que utilizam como método de medida o fio quente, são os mais indicados.

Os anemômetros a fio quente são instrumentos caros e difíceis de serem encontrados no Brasil. Para este projeto, não conseguimos adquirir um anemômetro deste tipo. Utilizando um anemômetro menos preciso (precisão de 0,1 m/s), cujo método de medida é baseado na rotação de uma hélice, observamos que a velocidade do vento máxima (obtida quando o ar condicionado está ligado) não chega a atingir 0,1 m/s. Por causa disso, e por não termos uma idéia clara da evolução da velocidade do vento quando do acionamento do ar condicionado, decidimos fixar tal velocidade em um valor abaixo de 0,1 m/s. O valor escolhido foi de 0,05 m/s.

## AI.8 ANÁLISE DE RECURSIVIDADE

Observando as Eqs AI.7, AI.9 e AI.17, podemos notar que elas possuem recursividade entre si, em termos das variáveis  $T_{vest}$ ,  $R$  e  $C$ . Uma maneira de se contornar este problema (maneira esta que foi usada neste projeto) é definir um valor inicial para uma das variáveis (no nosso caso,  $T_{vest}$ ) e fazer iterações de cálculo das variáveis, sempre atualizando os valores das variáveis ao realizar novas iterações. Agindo assim, a tendência é que, após algumas iterações, as variáveis converjam para um determinado valor.

## ANEXO II

Este anexo apresenta o detalhamento da adequação do controlador PID projetado através do LGR discreto para a rede de controladoras KMC.

### AII.1 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DISCRETA

A função de transferência discreta do controlador a ser adequada, ou seja, a ser escrita em termos de equações de diferenças é dada por:

$$C(z) = \frac{K_C(z - z_{C1})(z - z_{C2})}{z(z - p_C)} \quad \therefore \quad \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{K_C(z - z_{C1})(z - z_{C2})}{z(z - p_C)} \quad (\text{AII.1})$$

Na Equação AII.1,  $C(z)$  é a função de transferência do controlador discreto,  $U(z)$  é a transformada  $z$  do sinal discreto de saída do controlador  $u(k)$ ,  $E(z)$  é a transformada  $z$  do sinal discreto de erro do sistema  $e(k)$ ,  $K_C$  é o ganho do controlador discreto,  $z_{C1}$  e  $z_{C2}$  são os zeros do controlador e  $p_C$  é o pólo do controlador (nota-se que o controlador tem um pólo na origem).

Aplicando a multiplicação cruzada a Eq. AII.1, temos:

$$U(z)(z^2 - p_C \cdot z) = E(z) \cdot K_C(z^2 - z(z_{C1} + z_{C2}) + z_{C1} \cdot z_{C2}) \quad (\text{AII.2})$$

Dividindo ambos os lados da Eq. AII.2 por  $z^2$ , obtemos:

$$U(z)(1 - p_C \cdot z^{-1}) = E(z) \cdot K_C(1 - z^{-1}(z_{C1} + z_{C2}) + z_{C1} \cdot z_{C2} \cdot z^{-2}) \quad (\text{AII.3})$$

Aplicando a transformada  $z$  inversa a Eq. AII.3, temos:

$$u(k) = p_C \cdot u(k-1) + K_C \cdot e(k) - K_C \cdot (z_{C1} + z_{C2}) \cdot e(k-1) + K_C \cdot z_{C1} \cdot z_{C2} \cdot e(k-2) \quad (\text{AII.4})$$

Na Equação AII.4,  $u(k)$  é o valor do sinal discreto  $u$  no instante  $k$ ,  $u(k-1)$  é o valor do sinal discreto  $u$  no instante  $k-1$ ,  $e(k)$  é o valor do sinal discreto  $e$  no instante  $k$ ,  $e(k-1)$  é o valor do sinal discreto  $e$  no instante  $k-1$  e  $e(k-2)$  é o valor do sinal discreto  $e$  no instante  $k-2$ .

## ANEXO III

Este anexo apresenta a lista completa das variáveis utilizadas no *ActionView*, a lista dos endereços das variáveis de entrada ou saída e os *scripts* necessários, bem com uma breve explicação sobre os códigos programados.

### AIII.1 VARIÁVEIS UTILIZADAS

Para esta aplicação, foram utilizadas as seguintes variáveis, sendo que o campo “Tipo” informa se a variável é de entrada (I), saída (O), ou interna (U), e o campo “A/D” informa se a variável é analógica ou digital.

Tabela AIII.1 – Variáveis utilizadas.

Grupo	Variável	Descrição	Tipo	A/D
ANEMOMETROS	ANEM_1	Anemômetro Sala de Reuniões - A1	I	A
ANEMOMETROS	ANEM_2	Anemômetro Sala Diretoria - A2	I	A
ANEMOMETROS	ANEM_3	Anemômetro Sala Desenvolvimento - A3	I	A
APOIO	C_1	Convecção - Reuniões - A1	I	A
APOIO	C_2	Convecção - Diretoria - A2	I	A
APOIO	C_3	Convecção - Desenvolvimento - A3	I	A
APOIO	D_VAP_1	Difusão de Vapor - Reuniões - A1	I	A
APOIO	D_VAP_2	Difusão de Vapor - Diretoria - A2	I	A
APOIO	D_VAP_3	Difusão de Vapor - Desenvolvimento - A3	I	A
APOIO	F_VEST	Fator de Vestuário	I	A
APOIO	L_1	Acumulação de Calor - Reuniões - A1	I	A
APOIO	L_2	Acumulação de Calor - Diretoria - A2	I	A
APOIO	L_3	Acumulação de Calor - Desenvolv. - A3	I	A
APOIO	PA_1	Pressão de Vapor - Reuniões - A1	I	A
APOIO	PA_2	Pressão de Vapor - Diretoria - A2	I	A
APOIO	PA_3	Pressão de Vapor - Desenv. - A3	I	A
APOIO	PMV_1	Índice PMV - Sala de Reuniões - A1	U	A
APOIO	PMV_1S	Índice PMV - Sala de Reuniões - A1 SAIDA	O	A
APOIO	PMV_2	Índice PMV - Sala da Diretoria - A2	I	A
APOIO	PMV_3	Índice PMV - Sala Desenvolvimento - A3	I	A
APOIO	PSAT_1	Pressão de Saturação - Reuniões - A1	I	A
APOIO	PSAT_2	Pressão de Saturação - Diretoria - A2	I	A
APOIO	PSAT_3	Pressão de Saturação - Desenvolv. - A3	I	A
APOIO	RAD_1	Radiação - Reuniões - A1	I	A
APOIO	RAD_2	Radiação - Diretoria - A2	I	A
APOIO	RAD_3	Radiação - Desenvolvimento - A3	I	A
APOIO	RL_1	Respiração Latente - Reuniões - A1	I	A
APOIO	RL_2	Respiração Latente - Diretoria - A2	I	A
APOIO	RL_3	Respiração Latente - Desenvolv. - A3	I	A
APOIO	RS_1	Respiração Sensível - Reuniões - A1	I	A
APOIO	RS_2	Respiração Sensível - Diretoria - A2	I	A
APOIO	RS_3	Respiração Sensível - Desenvolv. - A3	I	A
APOIO	TRANSP	Transpiração	I	A
APOIO	TVEST_1	Temp. Vestimenta - Reuniões - A1	I	A
APOIO	TVEST_2	Temp. Vestimenta - Diretoria - A2	I	A

APOIO	TVEST_3	Temp. Vestimenta - Desenv. - A3	I	A
APOIO	X	Variável de Apoio - Contador	U	A
CONSUMO	ACUM_D_1	Consumo Diário Acumulado - Sala A1	U	A
CONSUMO	ACUM_D_2	Consumo Diário Acumulado - Sala A2	U	A
CONSUMO	ACUM_D_3	Consumo Diário Acumulado - Sala A3	U	A
CONSUMO	ACUM_M_1	Consumo Mensal Acumulado - Sala A1	U	A
CONSUMO	ACUM_M_2	Consumo Mensal Acumulado - Sala A2	U	A
CONSUMO	ACUM_M_3	Consumo Mensal Acumulado - Sala A3	U	A
CONSUMO	CONS_D_1	Consumo Diário - Sala A1	U	A
CONSUMO	CONS_D_2	Consumo Diário - Sala A2	U	A
CONSUMO	CONS_D_3	Consumo Diário - Sala A3	U	A
CONSUMO	CONS_M_1	Consumo Mensal - Sala A1	U	A
CONSUMO	CONS_M_2	Consumo Mensal - Sala A2	U	A
CONSUMO	CONS_M_3	Consumo Mensal - Sala A3	U	A
CONSUMO	DIA	Dia do Sistema	U	A
CONSUMO	DIA_OLD	Variável de Comparação - Ontem	U	A
CONSUMO	MES	Mês do Sistema	U	A
CONSUMO	MES_OLD	Variável de comparação - Mês Anterior	U	A
CONSUMO	ZMD_1	Consumo - Sala de Reuniões - A1	I	A
CONSUMO	ZMD_2	Consumo - Sala Diretoria - A2	I	A
CONSUMO	ZMD_3	Consumo - Sala Desenvolvimento - A3	I	A
PARAMETROS	ACT_1	Atividade Sedentária	U	D
PARAMETROS	ACT_2	Atividade Leve	U	D
PARAMETROS	ACT_3	Atividade Média	U	D
PARAMETROS	ACT_4	Grande Atividade	U	D
PARAMETROS	I_VEST	Resistência Térmica da Vestimenta	U	A
PARAMETROS	M	Metabolismo	U	A
PARAMETROS	T_RAD_1	Temp. Média Radiante - Reuniões - A1	U	A
PARAMETROS	T_RAD_2	Temp. Média Radiante - Diretoria - A2	U	A
PARAMETROS	T_RAD_3	Temp. Média Radiante - Desenvolv. - A3	U	A
PARAMETROS	TR_A1_C	Número de computadores na sala A3	U	A
PARAMETROS	TR_A1_P	Número de pessoas na sala A1	U	A
PARAMETROS	TR_A2_C	Número de computadores na sala A2	U	A
PARAMETROS	TR_A2_P	Número de pessoas na sala A2	U	A
PARAMETROS	TR_A3_C	Número de Computadores na sala A3	U	A
PARAMETROS	TR_A3_P	Número de pessoas na sala A3	U	A
PARAMETROS	VEST_1	Vestimenta Muito Leve	U	D
PARAMETROS	VEST_2	Vestimenta Leve de Verão	U	D
PARAMETROS	VEST_3	Vestimenta de Trabalho	U	D
PARAMETROS	VEST_4	Vestimenta de Inverno - Interior	U	D
PARAMETROS	VEST_5	Vestimenta de Inverno Completa	U	D
PID	AC	Estado do AC	U	A
PID	AC_1	Estado do Ar Condicionado da Sala A1	I	D
PID	CT_1	Ciclo de Trabalho - Sala de Reuniões	I	A
TEMPERATURA	T_EXT_1	Temperatura Externa Sala A1 - Reuniões	I	A
TEMPERATURA	T_EXT_2	Temperatura Externa Sala A2 - Diretoria	I	A
TEMPERATURA	T_EXT_3	Temperatura Externa Sala A3 - Desenv.	I	A
TEMPERATURA	T_INT_1	Temperatura Interna Sala A1 - Reuniões	I	A
TEMPERATURA	T_INT_2	Temperatura Interna Sala A2 - Diretoria	I	A
TEMPERATURA	T_INT_3	Temperatura Interna Sala A3 - Desenvolv.	I	A
TEMPERATURA	T_INT_4	Temperatura Interna Sala A4 - Circulação	I	A
UMIDADE	UMIDADE	Umidade Relativa do Ar	I	A

## AIII.2 ENDEREÇOS DAS VARIÁVEIS

As variáveis de entrada ou saída utilizaram os seguintes endereços:

Tabela AIII.2 – Endereços das variáveis.

Prot.	Grupo	Variável	Tipo	E1	E2	Descrição
KMC	TEMPERATURA	T_EXT_1	IEA	1	2	Temperatura Externa Sala A1 – Reuniões
KMC	TEMPERATURA	T_INT_1	IEA	1	3	Temperatura Interna Sala A1 – Reuniões
KMC	TEMPERATURA	T_EXT_2	IEA	2	2	Temperatura Externa Sala A2 – Diretoria
KMC	TEMPERATURA	T_INT_2	IEA	2	3	Temperatura Interna Sala A2 – Diretoria
KMC	TEMPERATURA	T_EXT_3	IEA	3	2	Temperatura Externa Sala A3 – Desenv.
KMC	TEMPERATURA	T_INT_3	IEA	3	3	Temperatura Interna Sala A3 – Desenvolv.
KMC	TEMPERATURA	T_INT_4	IEA	3	1	Temperatura Interna Sala A4 – Circulação
KMC	PID	AC_1	OED	1	2	Estado do Ar Condicionado da Sala A1
KMC	PID	CT_1	VEA	1	7	Ciclo de Trabalho – Sala de Reuniões
KMC	APOIO	PMV_1S	VSA	1	1	Índice PMV – Sala de Reuniões – A1 SAÍDA
LGZMD	CONSUMO	ZMD_1	EA	9697	0	Consumo – Sala de Reuniões – A1
LGZMD	CONSUMO	ZMD_2	EA	9695	0	Consumo – Sala Diretoria – A2
LGZMD	CONSUMO	ZMD_3	EA	9692	0	Consumo – Sala Desenvolvimento – A3

Em que “Prot.” Representa o protocolo de comunicação utilizado, com as controladoras (KMC) ou com os medidores de consumo de energia (LGZMD), “Tipo” é composto por três campos, em que o primeiro informa o tipo de variável para o CLP (*Input*, *Output* ou *Variabe*), o segundo informa o tipo de variável para o *ActionView* (Entrada ou Saída) e o terceiro informa se a variável é analógica ou digital.

## AIII.3 SCRIPTS UTILIZADOS

Para a implementação das ferramentas foram utilizados no total doze *scripts*, sendo um do tipo *OnTimer*, executado periodicamente e os outros onze do tipo *OnMouseClicked*, associados a botões e executados apenas sob um clique do *mouse*. A programação é realizada na linguagem *VBscript*, mas o *ActionView* não interpreta funções mais avançadas, sendo necessária uma programação mais robusta e menos elaborada.

O *script APP\_OnTimer* possui o código a seguir:

```
'  
-----  
Sub OnTimer()  
'  
-----  
'Utilização de variável analógica apenas para gravação do comportamento histórico da  
variável digital:  
Var.Value("APOIO_TELAS","AC") = Var.Value("APOIO_TELAS","AC_1")  
'  
-----
```

'Atualização dos valores acumulados para o consumo de energia:

Var.Value("CONSUMO","MES") = Month(Date())

Var.Value("CONSUMO","DIA") = Day(Date())

If Var.Value("CONSUMO","DIA") <> Var.Value("CONSUMO","DIA\_OLD") Then  
Var.Value("CONSUMO","ACUM\_D\_1") = Var.Value("CONSUMO","ZMD\_1")

If Var.Value("CONSUMO","DIA") <> Var.Value("CONSUMO","DIA\_OLD") Then  
Var.Value("CONSUMO","ACUM\_D\_2") = Var.Value("CONSUMO","ZMD\_2")

If Var.Value("CONSUMO","DIA") <> Var.Value("CONSUMO","DIA\_OLD") Then  
Var.Value("CONSUMO","ACUM\_D\_3") = Var.Value("CONSUMO","ZMD\_3")

If Var.Value("CONSUMO","DIA") <> Var.Value("CONSUMO","DIA\_OLD") Then  
Var.Value("CONSUMO","DIA\_OLD") = Var.Value("CONSUMO","DIA")

If Var.Value("CONSUMO","MES") <> Var.Value("CONSUMO","MES\_OLD") Then  
Var.Value("CONSUMO","ACUM\_M\_1") = Var.Value("CONSUMO","ZMD\_1")

If Var.Value("CONSUMO","MES") <> Var.Value("CONSUMO","MES\_OLD") Then  
Var.Value("CONSUMO","ACUM\_M\_1") = Var.Value("CONSUMO","ZMD\_2")

If Var.Value("CONSUMO","MES") <> Var.Value("CONSUMO","MES\_OLD") Then  
Var.Value("CONSUMO","ACUM\_M\_1") = Var.Value("CONSUMO","ZMD\_3")

If Var.Value("CONSUMO","MES") <> Var.Value("CONSUMO","MES\_OLD") Then  
Var.Value("CONSUMO","MES\_OLD") = Var.Value("CONSUMO","MES")

Var.Value("CONSUMO","CONS\_D\_1") = Var.Value("CONSUMO","ZMD\_1") -  
Var.Value("CONSUMO","ACUM\_D\_1")

Var.Value("CONSUMO","CONS\_D\_2") = Var.Value("CONSUMO","ZMD\_2") -  
Var.Value("CONSUMO","ACUM\_D\_2")

Var.Value("CONSUMO","CONS\_D\_3") = Var.Value("CONSUMO","ZMD\_3") -  
Var.Value("CONSUMO","ACUM\_D\_3")

Var.Value("CONSUMO","CONS\_M\_1") = Var.Value("CONSUMO","ZMD\_1") -  
Var.Value("CONSUMO","ACUM\_M\_1")

Var.Value("CONSUMO","CONS\_M\_2") = Var.Value("CONSUMO","ZMD\_2") -  
Var.Value("CONSUMO","ACUM\_M\_2")

Var.Value("CONSUMO","CONS\_M\_3") = Var.Value("CONSUMO","ZMD\_3") -  
Var.Value("CONSUMO","ACUM\_M\_3")

,

---

'Calculando os Valores de Temperatura Média Radiante das Salas:

Var.Value("PARAMETROS","T\_RAD\_1") = Var.Value("TEMPERATURA","T\_INT\_1")\*0.9529  
+ Var.Value("PARAMETROS","TR\_A1\_C")\*0.3 +  
Var.Value("PARAMETROS","TR\_A1\_P")\*0.4

Var.Value("PARAMETROS","T\_RAD\_2") = Var.Value("TEMPERATURA","T\_INT\_2")\*0.9620  
+ Var.Value("PARAMETROS","TR\_A2\_C")\*0.3 +  
Var.Value("PARAMETROS","TR\_A2\_P")\*0.4

Var.Value("PARAMETROS","T\_RAD\_3") = Var.Value("TEMPERATURA","T\_INT\_3")\*0.9524  
+ Var.Value("PARAMETROS","TR\_A3\_C")\*0.3 +  
Var.Value("PARAMETROS","TR\_A3\_P")\*0.4

---

'Atualizando Valores I\_VEST e M:

If Var.Value("PARAMETROS","VEST\_1")=1 Then  
Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST")=0.047

If Var.Value("PARAMETROS","VEST\_2")=1 Then  
Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST")=0.078

If Var.Value("PARAMETROS","VEST\_3")=1 Then  
Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST")=0.124

If Var.Value("PARAMETROS","VEST\_4")=1 Then  
Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST")=0.155

If Var.Value("PARAMETROS","VEST\_5")=1 Then  
Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST")=0.233

If Var.Value("PARAMETROS","ACT\_1")=1 Then Var.Value("PARAMETROS","M")=70

If Var.Value("PARAMETROS","ACT\_2")=1 Then Var.Value("PARAMETROS","M")=93

If Var.Value("PARAMETROS","ACT\_3")=1 Then Var.Value("PARAMETROS","M")=117

If Var.Value("PARAMETROS","ACT\_4")=1 Then Var.Value("PARAMETROS","M")=175

---

'PMV\_1:

'Pressão de Saturação:

Var.Value("APOIO","PSAT\_1")=0.61078\*(2.71828^(((17.269\*Var.Value("TEMPERATURA","T\_INT\_1")))/(237.3+Var.Value("TEMPERATURA","T\_INT\_1"))))

'Pressão de Vapor:

Var.Value("APOIO","PA\_1")=Var.Value("UMIDADE","UMIDADE")\*Var.Value("APOIO","PSAT\_1")

'Difusão de Vapor:

Var.Value("APOIO","D\_VAP\_1")=3.05\*(5.73-0.007\*Var.Value("PARAMETROS","M")-  
Var.Value("APOIO","PA\_1"))

'Transpiração:

Var.Value("APOIO","TRANSP")=0.42\*(Var.Value("PARAMETROS","M")-58.15)

'Respiração Latente:

Var.Value("APOIO","RL\_1")=0.0173\*Var.Value("PARAMETROS","M")\*(5.87-  
Var.Value("APOIO","PA\_1"))

'Respiração Sensível:

Var.Value("APOIO","RS\_1")=0.0014\*Var.Value("PARAMETROS","M")\*(34-  
Var.Value("TEMPERATURA","T\_INT\_1"))

'Fator de Vestuário:

If Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST") > 0.078 Then

Var.Value("APOIO","F\_VEST")=1.05+0.645\*Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST")

If Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST") < 0.078 Then

Var.Value("APOIO","F\_VEST")=1.00+1.290\*Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST")

If Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST") = 0.078 Then

Var.Value("APOIO","F\_VEST")=1.05+0.645\*Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST")

'Radiação:

Var.Value("APOIO","RAD\_1")=(3.96/10^(8))\*Var.Value("APOIO","F\_VEST")\*(((Var.Value("A  
POIO","TVEST\_1")+273)^4)-(Var.Value("PARAMETROS","T\_RAD\_1")+273)^4)

'Convecção:

Var.Value("APOIO","C\_1")=Var.Value("APOIO","F\_VEST")\*12.1\*SQR(Var.Value("ANEMOM  
ETROS","ANEM\_1"))\*(Var.Value("APOIO","TVEST\_1")-  
Var.Value("TEMPERATURA","T\_INT\_1"))

'Temperatura de Vestimenta:

Var.Value("APOIO","TVEST\_1")=35.7-0.0275\*Var.Value("PARAMETROS","M")-  
0.155\*Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST")\*(Var.Value("APOIO","RAD\_1")+Var.Value("AP  
OIO","C\_1"))

'Acumulação de Calor:

Var.Value("APOIO","L\_1")=Var.Value("PARAMETROS","M")-  
Var.Value("APOIO","D\_VAP\_1")-Var.Value("APOIO","TRANSP")-  
Var.Value("APOIO","RL\_1")-Var.Value("APOIO","RS\_1")-Var.Value("APOIO","RAD\_1")-  
Var.Value("APOIO","C\_1")

'Índice PMV:

Var.Value("APOIO","PMV\_1")=(0.303/(2.71828^(0.036\*Var.Value("PARAMETROS","M")))+0.  
028)\*Var.Value("APOIO","L\_1")

'

'PMV\_2:

'Pressão de Saturação:

Var.Value("APOIO","PSAT\_2")=0.61078\*(2.71828^((17.269\*Var.Value("TEMPERATURA","T  
\_INT\_2"))/(237.3+Var.Value("TEMPERATURA","T\_INT\_2"))))

'Pressão de Vapor:

Var.Value("APOIO","PA\_2")=Var.Value("UMIDADE","UMIDADE")\*Var.Value("APOIO","PSAT  
\_2")

'Difusão de Vapor:

Var.Value("APOIO","D\_VAP\_2")=3.05\*(5.73-0.007\*Var.Value("PARAMETROS","M")-  
Var.Value("APOIO","PA\_2"))

'Transpiração:

Var.Value("APOIO","TRANSP")=0.42\*(Var.Value("PARAMETROS","M")-58.15)

'Respiração Latente:

Var.Value("APOIO","RL\_2")=0.0173\*Var.Value("PARAMETROS","M")\*(5.87-  
Var.Value("APOIO","PA\_2"))

'Respiração Sensível:

Var.Value("APOIO","RS\_2")=0.0014\*Var.Value("PARAMETROS","M")\*(34-  
Var.Value("TEMPERATURA","T\_INT\_2"))

'Fator de Vestuário:

If Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST") > 0.078 Then

Var.Value("APOIO","F\_VEST")=1.05+0.645\*Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST")

If Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST") < 0.078 Then

Var.Value("APOIO","F\_VEST")=1.00+1.290\*Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST")

If Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST") = 0.078 Then

Var.Value("APOIO","F\_VEST")=1.05+0.645\*Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST")

'Radiação:

Var.Value("APOIO","RAD\_2")=(3.96/10^(8))\*Var.Value("APOIO","F\_VEST")\*(((Var.Value("APOIO","TVEST\_2")+273)^4)-(Var.Value("PARAMETROS","T\_RAD\_2")+273)^4)

'Convecção:

Var.Value("APOIO","C\_2")=Var.Value("APOIO","F\_VEST")\*12.1\*SQR(Var.Value("PARAMETROS","ANEM\_2")\*(Var.Value("APOIO","TVEST\_2")-  
Var.Value("TEMPERATURA","T\_INT\_2"))

'Temperatura de Vestimenta:

Var.Value("APOIO","TVEST\_2")=35.7-0.0275\*Var.Value("PARAMETROS","M")-  
0.155\*Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST")\*(Var.Value("APOIO","RAD\_2")+Var.Value("APOIO","C\_2"))

'Acumulação de Calor:

Var.Value("APOIO","L\_2")=Var.Value("PARAMETROS","M")-  
Var.Value("APOIO","D\_VAP\_2")-Var.Value("APOIO","TRANSP")-  
Var.Value("APOIO","RL\_2")-Var.Value("APOIO","RS\_2")-Var.Value("APOIO","RAD\_2")-  
Var.Value("APOIO","C\_2")

'Índice PMV:

Var.Value("APOIO","PMV\_2")=(0.303/(2.71828^(0.036\*Var.Value("PARAMETROS","M")))+0.028)\*Var.Value("APOIO","L\_2")

,

'PMV\_3:

'Pressão de Saturação:

Var.Value("APOIO","PSAT\_3")=0.61078\*(2.71828^((17.269\*Var.Value("TEMPERATURA","T\_INT\_3"))/(237.3+Var.Value("TEMPERATURA","T\_INT\_3"))))

'Pressão de Vapor:

Var.Value("APOIO","PA\_3")=Var.Value("UMIDADE","UMIDADE")\*Var.Value("APOIO","PSAT\_3")

'Difusão de Vapor:

Var.Value("APOIO","D\_VAP\_3")=3.05\*(5.73-0.007\*Var.Value("PARAMETROS","M")-Var.Value("APOIO","PA\_3"))

'Transpiração:

Var.Value("APOIO","TRANSP")=0.42\*(Var.Value("PARAMETROS","M")-58.15)

'Respiração Latente:

Var.Value("APOIO","RL\_3")=0.0173\*Var.Value("PARAMETROS","M")\*(5.87-Var.Value("APOIO","PA\_3"))

'Respiração Sensível:

Var.Value("APOIO","RS\_3")=0.0014\*Var.Value("PARAMETROS","M")\*(34-Var.Value("TEMPERATURA","T\_INT\_3"))

'Fator de Vestuário:

If Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST") > 0.078 Then  
Var.Value("APOIO","F\_VEST")=1.05+0.645\*Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST")

If Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST") < 0.078 Then  
Var.Value("APOIO","F\_VEST")=1.00+1.290\*Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST")

If Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST") = 0.078 Then  
Var.Value("APOIO","F\_VEST")=1.05+0.645\*Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST")

'Radiação:

Var.Value("APOIO","RAD\_3")=(3.96/10^(8))\*Var.Value("APOIO","F\_VEST")\*(((Var.Value("APOIO","TVEST\_3")+273)^4)-(Var.Value("PARAMETROS","T\_RAD\_3")+273)^4)

'Convecção:

Var.Value("APOIO","C\_3")=Var.Value("APOIO","F\_VEST")\*12.1\*SQR(Var.Value("ANEMOMETROS","ANEM\_3"))\*(Var.Value("APOIO","TVEST\_3")-Var.Value("TEMPERATURA","T\_INT\_1"))

'Temperatura de Vestimenta:

Var.Value("APOIO","TVEST\_3")=35.7-0.0275\*Var.Value("PARAMETROS","M")-0.155\*Var.Value("PARAMETROS","I\_VEST")\*(Var.Value("APOIO","RAD\_3")+Var.Value("APOIO","C\_3"))

'Acumulação de Calor:

Var.Value("APOIO","L\_3")=Var.Value("PARAMETROS","M")-Var.Value("APOIO","D\_VAP\_3")-Var.Value("APOIO","TRANSP")-Var.Value("APOIO","RL\_3")-Var.Value("APOIO","RS\_3")-Var.Value("APOIO","RAD\_3")-Var.Value("APOIO","C\_3")

'Índice PMV:

Var.Value("APOIO","PMV\_3")=(0.303/(2.71828^(0.036\*Var.Value("PARAMETROS","M")))+0.028)\*Var.Value("APOIO","L\_3")

'

---

'Enviando o Valor do PMV\_1 para o PLC:

```

Var.Value("APOIO","PMV_1S")=Var.Value("APOIO","PMV_1")
Var.Value("APOIO","X")=Var.Value("APOIO","X") + 1

If Var.Value("APOIO","X") > 5 Then
    Call Command( "APOIO","PMV_1S",6,, Var.Value("APOIO","PMV_1")
,,FALSE,TRUE)
    Var.Value("APOIO","X") = 0
End If

'


---


End Sub
'


---



```

Esse *script*, conforme indicado nos comentários, primeiramente atualiza o valor de uma variável analógica AC com o valor da variável digital AC\_1 associada ao estado do ar condicionado da sala de reuniões. Esse procedimento foi necessário para que pudéssemos acessar a tendência histórica do estado do ar condicionado, uma vez que somente as variáveis analógicas são registradas corretamente no histórico do *ActionView*.

Depois disso, ele atualiza os valores dos acumuladores de consumo de energia. Basicamente a lógica efetuada é a seguinte: as variáveis ZMD\_X sempre receberão os valores acumulados de consumo de energia enviados pelos medidores; sempre que for detectada mudança de data, os acumuladores diários são atualizados para o valor da variável ZMD correspondente; da mesma forma, sempre que ocorrer mudança de mês, os acumuladores mensais são atualizados; em seguida, atualizamos as variáveis de consumo mensal e diário, que são as variáveis de interesse, com a diferença entre os valores lidos dos medidores e os dos acumuladores.

Em seguida o *script* calcula os valores da temperatura média radiante das salas. Este procedimento é realizado simplesmente considerando a temperatura ambiente e o número de pessoas e de computadores em cada sala. O usuário informa os dados através dos campos específicos na tela de configurações, associados à rotina TROCA, que permite que o usuário entre com o novo valor da variável.

Na seqüência, o *script* atualiza os valores da resistência térmica da vestimenta, I\_VEST, e da taxa de metabolismo, M. A lógica é basicamente a seguinte: as variáveis VEST\_X e ACT\_X representam a escolha feita pelo usuário; o *script* simplesmente verifica qual é a escolha e atualiza o valor da variável em questão, segundo valores das tabelas de referência encontradas em [2]. Os valores de ACT\_X e VEST\_X são atualizados por intermédio de outros *scripts OnMouseClicked*, associados a botões, que serão exibidos mais adiante.

Em seguida, o *script* calcula os valores do PMV nas três salas, seguindo o procedimento descrito no Capítulo 3, como pode ser visualizado pela seqüência dos cálculos realizados.

Finalmente, o *script* envia o valor do PMV<sub>1</sub>, da sala de reuniões, para a respectiva controladora, na qual roda o controle implementado. A rotina envolvida simplesmente faz com que o comando *CallCommand* seja chamado uma vez a cada seis vezes em que o *script* é executado. Como foi explicado anteriormente, esse procedimento foi necessário devido ao erro de comunicação provocado pelo uso periódico desse comando.

Além desse *script OnTimer*, foram utilizados outros *scripts OnMouseClicked*, todos associados a botões. Dois deles são utilizados para zerar as variáveis de consumo diário e mensal (um para cada), procedendo apenas a atualização dos respectivos acumuladores com o valor das variáveis ZMD`s. Os códigos desses *scripts* são os seguintes:

ENERGIA\_Button0\_OnMouseClicked:

```
Sub OnMouseClicked()  
Var.Value("CONSUMO","ACUM_M_1") = Var.Value("CONSUMO","ZMD_1")  
Var.Value("CONSUMO","ACUM_M_2") = Var.Value("CONSUMO","ZMD_2")  
Var.Value("CONSUMO","ACUM_M_3") = Var.Value("CONSUMO","ZMD_3")  
End Sub
```

ENERGIA\_Button1\_OnMouseClicked:

```
Sub OnMouseClicked()  
Var.Value("CONSUMO","ACUM_D_1") = Var.Value("CONSUMO","ZMD_1")  
Var.Value("CONSUMO","ACUM_D_2") = Var.Value("CONSUMO","ZMD_2")  
Var.Value("CONSUMO","ACUM_D_3") = Var.Value("CONSUMO","ZMD_3")  
End Sub
```

Os demais *scripts* são utilizados para atualizar os valores das variáveis digitais ACT<sub>X</sub> e VEST<sub>X</sub>, que representam as escolhas do nível de atividade e do tipo de vestimenta, feitas pelo usuário na tela de configurações. Os códigos desses *scripts* são semelhantes e apresentam a seguinte lógica: um clique em um dos botões faz com que o valor associado à variável seja alterado e apenas uma variável dentre suas semelhantes pode assumir o valor um. Os textos desses *scripts* encontram-se a seguir:

CONFIG\_Digital0\_OnMouseClicked:

```
Sub OnMouseClicked()  
If Var.Value("PARAMETROS","ACT_1")=0 Then Var.Value("PARAMETROS","ACT_1")=1  
If Var.Value("PARAMETROS","ACT_1")=1 Then Var.Value("PARAMETROS","ACT_1")=0  
  
If Var.Value("PARAMETROS","ACT_1")=1 Then Var.Value("PARAMETROS","ACT_2")=0  
If Var.Value("PARAMETROS","ACT_1")=1 Then Var.Value("PARAMETROS","ACT_3")=0  
If Var.Value("PARAMETROS","ACT_1")=1 Then Var.Value("PARAMETROS","ACT_4")=0  
End Sub
```

CONFIG\_Digital1\_OnMouseClicked:

Sub OnMouseClicked()

If Var.Value("PARAMETROS","ACT\_2")=0 Then Var.Value("PARAMETROS","ACT\_2")=1  
If Var.Value("PARAMETROS","ACT\_2")=1 Then Var.Value("PARAMETROS","ACT\_2")=0

If Var.Value("PARAMETROS","ACT\_2")=1 Then Var.Value("PARAMETROS","ACT\_1")=0  
If Var.Value("PARAMETROS","ACT\_2")=1 Then Var.Value("PARAMETROS","ACT\_3")=0  
If Var.Value("PARAMETROS","ACT\_2")=1 Then Var.Value("PARAMETROS","ACT\_4")=0

End Sub

CONFIG\_Digital2\_OnMouseClicked:

Sub OnMouseClicked()

If Var.Value("PARAMETROS","ACT\_3")=0 Then Var.Value("PARAMETROS","ACT\_3")=1  
If Var.Value("PARAMETROS","ACT\_3")=1 Then Var.Value("PARAMETROS","ACT\_3")=0

If Var.Value("PARAMETROS","ACT\_3")=1 Then Var.Value("PARAMETROS","ACT\_1")=0  
If Var.Value("PARAMETROS","ACT\_3")=1 Then Var.Value("PARAMETROS","ACT\_2")=0  
If Var.Value("PARAMETROS","ACT\_3")=1 Then Var.Value("PARAMETROS","ACT\_4")=0

End Sub

CONFIG\_Digital3\_OnMouseClicked:

Sub OnMouseClicked()

If Var.Value("PARAMETROS","ACT\_4")=0 Then Var.Value("PARAMETROS","ACT\_4")=1  
If Var.Value("PARAMETROS","ACT\_4")=1 Then Var.Value("PARAMETROS","ACT\_4")=0

If Var.Value("PARAMETROS","ACT\_4")=1 Then Var.Value("PARAMETROS","ACT\_1")=0  
If Var.Value("PARAMETROS","ACT\_4")=1 Then Var.Value("PARAMETROS","ACT\_2")=0  
If Var.Value("PARAMETROS","ACT\_4")=1 Then Var.Value("PARAMETROS","ACT\_3")=0

End Sub

CONFIG\_Digital4\_OnMouseClicked:

Sub OnMouseClicked()

If Var.Value("PARAMETROS","VEST\_1")=0 Then  
Var.Value("PARAMETROS","VEST\_1")=1  
If Var.Value("PARAMETROS","VEST\_1")=1 Then  
Var.Value("PARAMETROS","VEST\_1")=0

If Var.Value("PARAMETROS","VEST\_1")=1 Then  
Var.Value("PARAMETROS","VEST\_2")=0  
If Var.Value("PARAMETROS","VEST\_1")=1 Then  
Var.Value("PARAMETROS","VEST\_3")=0  
If Var.Value("PARAMETROS","VEST\_1")=1 Then  
Var.Value("PARAMETROS","VEST\_4")=0  
If Var.Value("PARAMETROS","VEST\_1")=1 Then  
Var.Value("PARAMETROS","VEST\_5")=0

End Sub

CONFIG\_Digital5\_OnMouseClicked:

```

Sub OnMouseClicked()
  If Var.Value("PARAMETROS","VEST_2")=0 Then
  Var.Value("PARAMETROS","VEST_2")=1
  If Var.Value("PARAMETROS","VEST_2")=1 Then
  Var.Value("PARAMETROS","VEST_2")=0

  If Var.Value("PARAMETROS","VEST_2")=1 Then
  Var.Value("PARAMETROS","VEST_1")=0
  If Var.Value("PARAMETROS","VEST_2")=1 Then
  Var.Value("PARAMETROS","VEST_3")=0
  If Var.Value("PARAMETROS","VEST_2")=1 Then
  Var.Value("PARAMETROS","VEST_4")=0
  If Var.Value("PARAMETROS","VEST_2")=1 Then
  Var.Value("PARAMETROS","VEST_5")=0
End Sub

```

CONFIG\_Digital6\_OnMouseClicked:

```

Sub OnMouseClicked()
  If Var.Value("PARAMETROS","VEST_3")=0 Then
  Var.Value("PARAMETROS","VEST_3")=1
  If Var.Value("PARAMETROS","VEST_3")=1 Then
  Var.Value("PARAMETROS","VEST_3")=0

  If Var.Value("PARAMETROS","VEST_3")=1 Then
  Var.Value("PARAMETROS","VEST_1")=0
  If Var.Value("PARAMETROS","VEST_3")=1 Then
  Var.Value("PARAMETROS","VEST_2")=0
  If Var.Value("PARAMETROS","VEST_3")=1 Then
  Var.Value("PARAMETROS","VEST_4")=0
  If Var.Value("PARAMETROS","VEST_3")=1 Then
  Var.Value("PARAMETROS","VEST_5")=0
End Sub

```

CONFIG\_Digital7\_OnMouseClicked:

```

Sub OnMouseClicked()
  If Var.Value("PARAMETROS","VEST_4")=0 Then
  Var.Value("PARAMETROS","VEST_4")=1
  If Var.Value("PARAMETROS","VEST_4")=1 Then
  Var.Value("PARAMETROS","VEST_4")=0

  If Var.Value("PARAMETROS","VEST_4")=1 Then
  Var.Value("PARAMETROS","VEST_1")=0
  If Var.Value("PARAMETROS","VEST_4")=1 Then
  Var.Value("PARAMETROS","VEST_2")=0
  If Var.Value("PARAMETROS","VEST_4")=1 Then
  Var.Value("PARAMETROS","VEST_3")=0
  If Var.Value("PARAMETROS","VEST_4")=1 Then
  Var.Value("PARAMETROS","VEST_5")=0
End Sub

```

CONFIG\_Digital8\_OnMouseClicked:

Sub OnMouseClicked()

    If Var.Value("PARAMETROS","VEST\_5")=0 Then  
    ar.Value("PARAMETROS","VEST\_5")=1

    If Var.Value("PARAMETROS","VEST\_5")=1 Then  
    Var.Value("PARAMETROS","VEST\_5")=0

    If Var.Value("PARAMETROS","VEST\_5")=1 Then  
    Var.Value("PARAMETROS","VEST\_1")=0

    If Var.Value("PARAMETROS","VEST\_5")=1 Then  
    Var.Value("PARAMETROS","VEST\_2")=0

    If Var.Value("PARAMETROS","VEST\_5")=1 Then  
    Var.Value("PARAMETROS","VEST\_3")=0

    If Var.Value("PARAMETROS","VEST\_5")=1 Then  
    Var.Value("PARAMETROS","VEST\_4")=0

End Sub

## ANEXO IV

Este anexo apresenta as especificações do modelo de controladora utilizado, além dos códigos implementados na controladora da sala de reuniões para a identificação do processo e para os controladores liga-desliga e PID com base no LGR discreto.

### AIV.1 CLP

Os CLP's surgiram em meados de 1969, com a *General Motors*, para redução de custos, sendo confiáveis, de fácil programação e menores que painéis de relés [7]. Atualmente, controladoras não estão sendo utilizadas apenas na indústria, sendo crescente seu uso em outras formas de automação, como predial ou mesmo residencial.

As controladoras atuais são semelhantes a um computador, fabricadas, entretanto, para aplicações dedicadas, apresentando alta confiabilidade [11]. Seu *hardware* é formado por três unidades: fonte de alimentação, CPU (Unidade Central de Processamento) e módulos de entradas e saídas [7]. As entradas podem ser analógicas ou digitais, e os diferentes modelos de CLP's possuem números diferentes de entradas e saídas. Normalmente, entretanto, os CLP's são flexíveis, aceitando módulos extras de entradas ou saídas, uma outra vantagem destes equipamentos.

Seu processamento constitui três etapas, as quais são: leitura das informações nas entradas, processamento e atualização dos valores das saídas [7]. Para funcionarem, as controladoras devem, então, ser programadas (os programas é que atualizarão os valores da saídas em função dos valores das entradas). A programação pode ser realizada em diversas linguagens diferentes, como *Ladder*, GRAFCET ou SFC (*Sequential Flow Chart*), *Basic*, dentre outras [11].

Neste projeto, utilizamos o CLP KMC modelo 7301, que é 4x4, ou seja, contém quatro entradas e quatro saídas e é programada na linguagem *Basic* através do *software* proprietário *WinControl* [11]. Cada controladora pode armazenar e rodar simultaneamente até cinco programas distintos com tamanho limitado de cerca de setecentos caracteres.

A comunicação entre controladoras e o *ActionView* ocorre através de uma rede RS485, padrão físico utilizado pela KMC, sendo necessário um conversor RS485/RS232 [11].

As controladoras foram utilizadas neste projeto para leitura dos valores das temperaturas, comunicando-se com os termistores através de entradas analógicas, e para acionar os aparelhos de ar condicionado, através de saídas digitais por exigirem apenas dois estados (liga ou desliga) [11].

## AIV.2 REDES DE COMUNICAÇÃO RS485 E RS232

A principal diferença entre RS485 e RS232 reside no fato de que o RS485 é um padrão diferencial, enquanto que o RS232 é referenciado ao comum ( $0\text{ V}$ ) [23].

No RS232, o nível lógico  $1$  é interpretado como sendo qualquer tensão no intervalo  $[-15\text{ V}; 3\text{ V}]$ , enquanto que tensões no intervalo  $[3\text{ V}; 15\text{ V}]$  correspondem ao nível lógico  $0$ . Este tipo de interface é útil em comunicações ponto-a-ponto a baixas velocidades de transmissão. Como desvantagens, apresenta grande faixa de variação dos sinais (elevado *slew rate*) e com o aumento do comprimento do cabo de comunicação, torna-se altamente susceptível a interferências eletromagnéticas [23].

Já o RS485 utiliza um princípio diferente. Um transceptor RS485 traduz um sinal lógico TTL em dois sinais, denominados de A e B. A informação do sinal de entrada está codificada na diferença entre os sinais A e B. Se esta diferença for superior a  $200\text{ mV}$ , então tem-se nível lógico  $1$ . Caso a diferença seja inferior a  $-200\text{ mV}$ , então considera-se nível lógico  $0$  [23].

Desta forma, redes no padrão físico RS485 proporcionam maior robustez a interferências eletromagnéticas e são frequentemente utilizadas em aplicações que exigem taxas elevadas de comunicação a maiores distâncias, permitindo taxas de transferência de até  $10\text{ Mbps}$  a distâncias de até  $1\text{ km}$  [23].

## AIV.3 PROGRAMAÇÃO DAS CONTROLADORAS

Por intermédio do *software* proprietário *WinControl*, realizamos a programação das controladoras primeiramente para a identificação da resposta do PMV ao acionamento do ar condicionado para obtermos a função de transferência do processo e posteriormente com os códigos dos controladores projetados.

### AIV.3.1 PRBS

Para a identificação do processo, utilizou-se o sinal PRBS do Matlab com 255 pontos. Este sinal foi gerado pelo CLP através dos seguintes códigos, que utilizaram as variáveis A, B e a variável de saída digital ARLIGA, responsável pelo acionamento do ar condicionado.

```
1 WAIT 0:05:00
2 A = A + 1
3 B = B + 1
4 IF ARLIGA = 0 THEN GOTO 6
5 IF B = 1 OR B = 10 OR B = 13 OR B = 17 OR B = 24 OR B = 27 OR B = 29 OR B = 34 OR
  B = 39 OR B = 44 OR B = 48 OR B = 53 OR B = 59 OR B = 66 OR B = 68 OR B = 71 OR
  B = 78 OR B = 81 OR B = 87 OR B = 89 OR B = 93 OR B = 96 OR B = 100 OR B = 102
  OR B = 104 OR B = 106 OR B = 109 OR B = 112 OR B = 116 OR B = 118 OR B = 123 OR
  B = 126 THEN GOTO 8
6 IF B = 9 OR B = 12 OR B = 15 OR B = 21 OR B = 26 OR B = 28 OR B = 32 OR B = 35 OR
  B = 43 OR B = 47 OR B = 52 OR B = 54 OR B = 60 OR B = 67 OR B = 70 OR B = 76 OR
```

```

B = 80 OR B = 84 OR B = 88 OR B = 92 OR B = 94 OR B = 98 OR B = 101 OR B = 103
OR B = 105 OR B = 107 OR B = 110 OR B = 113 OR B = 117 OR B = 119 OR B = 124
THEN ARLIGA = 1
7 GOTO 9
8 ARLIGA = 0
9 END

10 IF A < 126 THEN GOTO 16
11 IF ARLIGA = 0 THEN GOTO 13
12 IF A = 129 OR A = 133 OR A = 139 OR A = 141 OR A = 144 OR A = 147 OR A = 149 OR
A = 152 OR A = 165 OR A = 168 OR A = 171 OR A = 173 OR A = 177 OR A = 180 OR A =
182 OR A = 188 OR A = 190 OR A = 195 OR A = 199 OR A = 203 OR A = 208 OR A = 215
OR A = 222 OR A = 226 OR A = 232 OR A = 234 OR A = 236 THEN GOTO 15
13 IF A = 128 OR A = 130 OR A = 138 OR A = 140 OR A = 143 OR A = 145 OR A = 148 OR
A = 150 OR A = 158 OR A = 167 OR A = 170 OR A = 172 OR A = 174 OR A = 178 OR A =
181 OR A = 186 OR A = 189 OR A = 192 OR A = 196 OR A = 201 OR A = 205 OR A = 211
OR A = 217 OR A = 225 OR A = 228 OR A = 233 OR A = 235 THEN ARLIGA = 1
14 GOTO 16
15 ARLIGA = 0
16 END

```

O código precisou ser dividido em dois programas que devem rodar paralelamente, pois excedeu o tamanho máximo suportado pela controladora. A lógica utilizada é extremamente simples, sendo que o código apenas incrementa dois contadores A e B (um para cada programa), que representam o ponto de geração do PRBS, comparando depois com os pontos gerados pelo Matlab para ligar ou desligar o ar condicionado, sendo que os valores comparados nas linhas 5 e 12 são os pontos de final dos degraus do PRBS, enquanto os valores das linhas 6 e 13 são os pontos de início desses degraus.

### **AIV.3.2 Controlador liga-desliga**

O código utilizado para a implementação do controlador liga-desliga é extremamente simples. Como pode ser conferido a seguir, ele apenas compara o valor recebido pela controladora para o PMV com valores de referência, neste caso  $0,3$  e  $-0,3$ , atuando sobre o ar condicionado conforme seja necessário. O único cuidado tomado contra chaveamentos excessivamente rápidos foi fazer com que o ar condicionado permanecesse no mesmo estado por pelo menos um minuto e meio. Foram utilizadas a variável PMV\_out, recebida do *ActionView* e a variável de saída analógica ARLIGA, que aciona o ar condicionado.

```

1 IF TIME-ON( ARLIGA ) > 0:01:30 OR TIME-OFF( ARLIGA ) > 0:01:30 THEN GOTO 3
2 GOTO 5
3 IF PMV_out > 0.3 THEN ARLIGA = 1
4 IF PMV_out < -0.3 THEN ARLIGA = 0
5 WAIT 0:00:10
6 END

```

### AV.3.3 Controlador PID

Foram utilizadas as variáveis PMV\_out, recebida do *ActionView*,  $E(k)$ ,  $E(k-1)$ ,  $E(k-2)$ ,  $U(k)$ ,  $U(k-1)$ , A, CT (ciclo de trabalho) e a variável de saída analógica ARLIGA, que aciona o ar condicionado.

```
1 E(k) = 0 - PMV_out
2 U(k) = U(k-1) + 14 * E(k) - 20.9811 * E(k-1) + 7.72268 * E(k-2)
3 E(k-2) = E(k-1)
4 E(k-1) = E(k)
5 IF U(k) < -28.2552 THEN U(k) = -28.2552
6 IF U(k) > 0 THEN U(k) = 0
7 U(k-1) = U(k)
8 CT = ( 0 - U(k) ) * 3.5392
9 IF ARLIGA = 0 THEN GOTO 11
10 IF TIME-ON( ARLIGA ) < A THEN GOTO 16 ELSE ARLIGA = 0
11 IF TIME-OFF( ARLIGA ) < 300 / 36 - A THEN GOTO 16
12 A = 300 * CT / 3600
13 IF A < 300 * 20 / 3600 THEN ARLIGA = 0 ELSE ARLIGA = 1
14 IF A < 300 * 20 / 3600 THEN A = 0 ELSE GOTO 15
15 IF A > 300 * 80 / 3600 THEN A = 300 * 100 / 3600 ELSE GOTO 16
16 WAIT 0:00:10
17 IF CT < 20 THEN CT = 0
18 IF CT > 80 THEN CT = 100
19 END
```

Esse código, basicamente, calcula o valor do erro como a diferença entre zero e o valor do PMV recebido, calcula o sinal de controle, atualiza o valor do erro no tempo anterior, ajusta os limites do sinal do controlador e o associa à variável de ciclo de trabalho, tratando para que sua excursão esteja entre zero e cem. Então, procede para a geração do PWM nas linhas 8 a 11, evita chaveamentos rápidos e ajusta os valores do ciclo de trabalho, que é disponibilizado para leitura pelo *ActionVilew*.

# ANEXO V

Este anexo apresenta o comandos utilizados no MatLab.

## AV.1 SINAL PRBS

O comando para geração do sinal PRBS utilizado na identificação do modelo matemático da planta do sistema é bem simples:

```
u=idinput(255,'prbs',[0 1],[0 1])
```

Neste caso, a variável  $u$  recebe o sinal PRBS. Para plotarmos esse sinal a título de ilustração, basta fazermos:

```
stairs(u)
```

Com sinal PRBS e a resposta do sistema em mãos, partimos para a identificação do processo propriamente dita. Para tanto, devemos abrir a janela de identificação do MatLab simplesmente digitando “*ident*”.

## AV.2 IMPORTAÇÃO DE DADOS

Para que possamos identificar a planta do sistema, devemos fazer com que os dados do acionamento do ar condicionado e de resposta do PMV sejam passados para o ambiente MatLab. O *ActionView* disponibiliza esses dados em planilhas, as quais podem ser lidas pelo MatLab através do seguinte comando:

```
x=xlsread('Nome_tabela.xls','Nome_aba')
```

No comando acima, a variável  $x$  receberá os valores listados na aba cujo nome é “Nome\_aba” do arquivo “Nome\_tabela.xls”.

## AV.3 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DA PLANTA

O comando IDENT nos fornece o modelo matemático do processo a ser controlado. Após a obtenção dos parâmetros de tal modelo, devemos inserir a função de transferência no MatLab, para que possamos passá-la para o domínio  $z$ .

A inserção da função de transferência contínua no MatLab acontece através do comando:

```
G=tf([-1.1433*1198.7 -1.1433],[2758*173.24 2758+173.24 1],'td',25.882)
```

A discretização da função de transferência pode ser feita da seguinte forma:

```
F=c2d(G,10)
```

Neste caso, a variável  $F$  representa a função de transferência no domínio  $z$  do processo a ser controlado e a discretização ocorreu com uma taxa de amostragem de  $10$  segundos.

De posse do modelo discreto da planta, passamos para o projeto do controlador PID através do comando SISOTOOL. A abertura da janela relativa a esse comando ocorre por meio da digitação da palavra "*sisotool*" no ambiente MatLab.