

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**INSTRUMENTAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE UM  
AMBIENTE PREDIAL VISANDO CONTROLE PREDITIVO  
DO CONFORTO TÉRMICO**

**FLÁVIO AUGUSTO RODRIGUES DE OLIVEIRA**

**ORIENTADOR: PROF. ADOLFO BAUCHSPIESS, ENE/UNB**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PUBLICAÇÃO: PPGENE.DM – 415/10**

**BRASÍLIA/DF: MARÇO – 2010**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**INSTRUMENTAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE UM  
AMBIENTE PREDIAL VISANDO CONTROLE PREDITIVO  
DO CONFORTO TÉRMICO**

**FLÁVIO AUGUSTO RODRIGUES DE OLIVEIRA**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

---

**ADOLFO BAUCHSPIESS, DOUTOR, ENE/UNB  
(Orientador)**

---

**MARCO ANTÔNIO F. DO EGITO COELHO, DOUTOR, ENE/UNB  
(Examinador Interno)**

---

**JOÃO MANOEL DIAS PIMENTA, DOUTOR, ENM/UNB  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, MARÇO DE 2010**

## FICHA CATALOGRÁFICA

RODRIGUES DE OLIVEIRA, FLÁVIO AUGUSTO

Instrumentação e identificação de um ambiente predial visando controle preditivo do conforto térmico. [Distrito Federal] 2010.

xvi, 108 p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Engenharia Elétrica, 2010).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Identificação de sistemas

2. Modelamento *first-principles*

3. Automação predial

4. *Ambient Intelligence*

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RODRIGUES DE OLIVEIRA, F. A. (2010). Instrumentação e identificação de um ambiente predial visando controle preditivo do conforto térmico. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM – 415/10, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 108p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Flávio Augusto Rodrigues de Oliveira

TÍTULO: Instrumentação e identificação de um ambiente predial visando controle preditivo do conforto térmico.

GRAU: Mestre

ANO: 2010

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Flávio Augusto Rodrigues de Oliveira  
Departamento de Eng. Elétrica (ENE) - FT  
Universidade de Brasília (UnB)  
Campus Darcy Ribeiro  
CEP 70919-970 - Brasília - DF – Brasil

À minha mãe, Marize.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Marize Rodrigues do Carmo Oliveira e José Aleixo de Oliveira Filho, pelo apoio incondicional em todos os momentos; à minha namorada, Márcia Rosa, pela paciência e companheirismo; ao professor Adolfo Bauchspiess, pela oportunidade de orientação, total disponibilidade e pelo exemplo de competência e profissionalismo; aos companheiros do laboratório, em especial Paulo Augusto, Helguer Muñoz, Felipe Brandão, Pedro Santana, Breno Saloio e a todos que tornaram a realização deste trabalho possível, meu muito obrigado.

## **RESUMO**

### **INSTRUMENTAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE UM AMBIENTE PREDIAL VISANDO CONTROLE PREDITIVO DO CONFORTO TÉRMICO.**

**Autor: Flávio Augusto Rodrigues de Oliveira**

**Orientador: Prof. Adolfo Bauchspiess, ENE/UnB**

**Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica**

**Brasília, março de 2010**

A base tecnológica do paradigma *Ambient Intelligence* é de uma rede de nós de processamento que coleta informações do ambiente, as processa e age sobre ele por meio de atuadores, provendo uma diversidade de serviços aos seus ocupantes. Inserido neste cenário, o presente trabalho apresenta uma abordagem de identificação estruturada baseada em princípios fundamentais (*first-principles*) para um ambiente predial composto por uma sala de reunião no Laboratório de Automação e Robótica (LARA) da Universidade de Brasília (prédio SG11), objetivando oferecer condições que permitam a obtenção de um modelo matemático que represente seu comportamento térmico, de modo que as informações resultantes possam ser usadas no projeto de controladores adequados para estratégias de controle do conforto térmico (norma ISO7730) com economia de energia, tais como os controladores preditivos HVAC (*Heating, Ventilating and Air-conditioning*). Para tal, os dados são obtidos em uma rede de sensores sem fio utilizando o protocolo de comunicação *ZigBee*/IEEE 802.15.4. O modelo estruturado fornece significado físico aos estados do modelo e facilita o ajuste de parâmetros no caso de mudanças no ambiente sem a necessidade de proceder novamente todo o processo de identificação, como no método de identificação caixa preta. Visto que a aquisição dos parâmetros do modelo estruturado *first-principles* não é trivial, avaliam-se alguns procedimentos de obtenção dos parâmetros deste modelo. Em particular, obtiveram-se bons resultados com o uso de métodos de filtragem estocástica, tal como o filtro de Kalman estendido.

## **ABSTRACT**

### **INSTRUMENTATION AND BUILDING IDENTIFICATION AIMING PREDICTIVE CONTROL OF THERMAL COMFORT.**

**Author: Flávio Augusto Rodrigues de Oliveira**

**Advisor: Prof. Adolfo Bauchspiess, ENE/UnB**

**Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica**

**Brasília, March, 2010**

The technological basis of Ambient Intelligence is a network of processing units that collect sensor information, process them and act on the environment through actuators, providing the occupants a diversity of services. In this scenario, this manuscript presents a first-principles structured identification approach for a thermal environment consisting of a conference room of the Automation and Robotics Laboratory (LARA) located at the University of Brasília (building SG11), aiming an efficient model that can lead to successful controller designs suitable for energy-saving and comfort control strategies (ISO7730), such as predictive HVAC control. The data is obtained in a wireless sensor network using the *ZigBee*/IEEE 802.15.4 protocol. The obtained first-principles model simplifies the parameters identification, associating physical meaning to the internal model states and allowing easier parameters adjusts in case of environment changes, with no need to proceed the entire identification process, as in the black box method. Since the parameters acquisition from first-principles structured model is not trivial, some procedures for obtaining them were evaluated. In particular, good results were achieved using stochastic filtering methods, such as the extended Kalman filter.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.1.1 Sala de conferência do Instituto de Controle Automático TU Kaiserslautern ..	2
1.2 OBJETIVOS .....	3
1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
1.3.1 Conforto térmico .....	3
1.3.2 Modelagem matemática.....	5
1.3.2.1 Modelagem de sistemas HVAC .....	6
1.4 APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO .....	9
<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>11</b>
2.1 SISTEMAS TÉRMICOS .....	11
2.1.1 Condução .....	11
2.1.2 Convecção .....	13
2.1.3 Radiação .....	15
2.1.4 Considerações sobre uma parede plana .....	17
2.1.4.1 Resistência térmica .....	19
2.1.5 Analogia dos modos de transferência e o modelo da sala .....	20
2.2 REDES DE SENSORES SEM FIO .....	25
2.2.1 Protocolo <i>ZigBee</i> .....	25
2.2.1.1 Kit de desenvolvimento <i>Meshbean</i> .....	26
2.2.1.2 Módulo <i>ZigBit</i> .....	27
2.2.1.3 Sistema <i>BitCloud</i> .....	28
2.3 FUNDAMENTOS DE FILTRAGEM ESTOCÁSTICA .....	29
2.3.1 Considerações sobre filtragem estocástica não-linear .....	30
2.3.1.4 O filtro de Kalman estendido .....	30
<b>3. AMBIENTE DE ESTUDO .....</b>	<b>35</b>
3.1 SALA DE REUNIÕES .....	35
3.2 SENSORES UTILIZADOS.....	37
3.2.1 Sensor de temperatura e umidade SHT71 .....	37



3.2.2	Sensor de temperatura radiante média TY7321 .....	40
3.2.3	Anemômetro Dwyer 641 .....	41
3.2.4	Piranômetro Global Water WE300.....	42
3.3	MÓDULO EXTERNO .....	43
3.4	MÓDULO INTERNO .....	43
3.5	MÓDULO ATUADOR .....	43
3.6	MÓDULO COORDENADOR/GRAVADOR .....	44
3.7	MÓDULO MÓVEL E DEMAIS MÓDULOS SENSORES .....	45
3.8	FUNCIONAMENTO DA REDE .....	46
<b>4.</b>	<b>IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA .....</b>	<b>50</b>
4.1	CAPTAÇÃO DOS DADOS .....	50
4.2	METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO .....	53
4.2.1	Abordagem linear MISO .....	56
4.2.2	Identificação estruturada por princípios fundamentais ( <i>first-principles</i> ) .....	59
4.2.3	Abordagem por filtragem estocástica .....	66
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>74</b>
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	75
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>77</b>
	<b>APÊNDICES</b>	
	<b>A – MODELO PMV.....</b>	<b>82</b>
	<b>B – AR-CONDICIONADO HÍBRIDO.....</b>	<b>86</b>
	<b>C – DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS.....</b>	<b>90</b>
	<b>B – CÓDIGOS DO MATLAB USADOS NA IDENTIFICAÇÃO.....</b>	<b>96</b>
	<b>E – VIII INDUSCON (ARTIGO PUBLICADO).....</b>	<b>102</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Lista de comandos do SHT71.....	39
Tabela 3.2 – Dados referentes à temperatura. ....	39
Tabela 3.3 – Dados referentes à umidade relativa.....	40
Tabela 3.4 – Especificações do sensor TY7321.....	41
Tabela 3.5 – Especificações do sensor Dwyer 641. ....	42
Tabela 3.6 – Especificações do sensor de radiação solar WE300.....	42
Tabela 4.1 – Parâmetros de modelo obtidos.....	70
Tabela A.1 – Valores do metabolismo em função do nível de atividade.....	85
Tabela A.2 – Resistência térmica da vestimenta. ....	85

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Sala de conferência (prédio 12 - TU Kaiserslautern), novembro de 2009.....	2
Figura 1.2 – Localização da sala (adaptada de Bauchspiess <i>et al.</i> , 2006).....	2
Figura 1.3 –Dissipação de calor do corpo humano. ....	4
Figura 1.4 – Relação entre PMV e PPD. ....	4
Figura 1.5 – Sistema com entrada conhecida $u$ , saída conhecida $y$ , distúrbio mensurável $w$ e distúrbio não mensurável $v$ . ....	5
Figura 1.6 – Construção do modelo de fluxo de ar ( <i>data-based</i> ) integrado ao modelo concentrado das paredes, incluindo um modelo pessoal de cálculo do PMV .....	8
Figura 2.1 – Transferência unidimensional de calor. ....	12
Figura 2.2 – Troca de calor por convecção (adaptada de Incropera e DeWitt, 2006).....	14
Figura 2.3 – Troca de calor por radiação: (a) na superfície e (b) entre uma superfície e sua redondeza (adaptada de Incropera e DeWitt, 2006). ....	16
Figura 2.4 – Transferência de calor através de uma parede plana e circuito térmico equivalente (adaptada de Incropera e DeWitt, 2006). ....	18
Figura 2.5 – Análogo elétrico da transferência de calor entre salas vizinhas.....	21
Figura 2.6 – Modelo térmico estruturado <i>first-principles</i> simplificado. ....	22
Figura 2.7 – Ramo de realimentação do modelo estruturado <i>first-principles</i> .....	23
Figura 2.8 – Modelo de distúrbio 2R1C.....	24
Figura 2.9 –Placa <i>Meshbean2</i> ( <i>MeshNetics</i> , 2008). ....	27
Figura 2.10 – Módulo <i>ZigBit</i> ( <i>MeshNetics</i> , 2008).....	27
Figura 2.11 – <i>Breakout</i> com <i>ZigBit</i> ( <i>MeshNetics</i> , 2008).....	28
Figura 2.12 – Pilha do <i>BitCloud</i> ( <i>ATMEL</i> , 2009).....	28
Figura 3.1 – Sala de reuniões do LARA e detalhe. ....	35
Figura 3.2 – Split dutável, damper e sistema evaporativo.....	35
Figura 3.3 – Localização da sala de reuniões no laboratório.....	36
Figura 3.4 – Sensor de temperatura e umidade SHT71.....	37

Figura 3.5 – Diagrama de blocos do sensor SHT71 (Sensirion A. G., 2009). .....	38
Figura 3.6 – Seqüência de início de transmissão (Sensirion A. G., 2009). .....	38
Figura 3.7 – Exemplo de seqüência de medição de umidade para o valor 0000’0100’’0011’0001’’ = 35,50 % (Sensirion A. G., 2009). .....	39
Figura 3.8 – Sensor Yamatake TY7321 (Yamatake Co., 2000). .....	40
Figura 3.9 – Anemômetro Dwyer 641. ....	41
Figura 3.10 – Sensor de radiação solar WE300. ....	42
Figura 3.11 – Módulo externo e detalhe. ....	43
Figura 3.12 – Módulo interno. ....	43
Figura 3.13 – Módulo atuador. ....	44
Figura 3.14 – Módulo coordenador/gravador. ....	45
Figura 3.15 – Módulo móvel (ambos lados). ....	45
Figura 3.16 – Módulos sensores. ....	45
Figura 3.17 – Funcionamento do módulo coordenador. ....	46
Figura 3.18 – Funcionamento do módulo atuador. ....	47
Figura 3.19 – Funcionamento dos demais módulos. ....	48
Figura 3.20 – Diagrama de estados do aplicativo embarcado (Queiroz e Azevedo, 2009). ....	48
Figura 3.21 – Posicionamento dos sensores. ....	49
Figura 4.1 – Modelo para captação de dados. ....	51
Figura 4.2 – Modelo da sala. ....	52
Figura 4.3 – Modelo da parede (adaptada de Bauchspiess <i>et al.</i> , 2006). ....	52
Figura 4.4 – Conjunto de identificação típico sem ar-condicionado. ....	54
Figura 4.5 – Dados com o uso do ar-condicionado (pela noite). ....	55
Figura 4.6 – Radiação solar. ....	55
Figura 4.7 – Exemplo de conjunto de temperaturas obtidas. ....	56

Figura 4.8 – Exemplo de conjunto de umidades obtidas.....	56
Figura 4.9 – Dados usados na identificação com o <i>N4SID</i> . .....	57
Figura 4.10 – Resultado da identificação pelo <i>N4SID</i> e detalhe. ....	58
Figura 4.11 – Resultado da identificação pelo <i>N4SID</i> . .....	58
Figura 4.12 – Mapa de pólos e zeros para o sistema MISO com 6 entradas.....	59
Figura 4.13 – Modelo da sala sem ar-condicionado.....	59
Figura 4.14 – Conjunto de dados utilizado.....	62
Figura 4.15 – Saídas dos modelos estimados para $t_e$ .....	62
Figura 4.16 – Exemplo de aplicação de apenas uma entrada ao modelo. ....	64
Figura 4.17 – Temperatura estimada pelo modelo aplicando apenas $t_e$ . ....	65
Figura 4.18 – Saída resultante do ajuste. ....	65
Figura 4.19 – Modelo <i>first-principles</i> simplificado. ....	67
Figura 4.20 – Conjunto de dados usado na implementação do FKE.....	69
Figura 4.21 – Resultado do uso do FKE na estimação.....	69
Figura 4.22 – Erro entre valor real e estimado pelo FKE.....	70
Figura 4.23 – Conjunto de dados para validação.....	71
Figura 4.24 – Resultados de validação e treinamento, respectivamente. ....	71
Figura 4.25 – Parcelas de fluxo de energia finais obtidas na estimação. ....	72
Figura 4.26 – Erro entre o valor real e o estimado na validação. ....	72
Figura 5.1 – Variáveis mensuradas para a otimização .....	75
Figura 5.2 – Estratégia de geração de referência ótima (Donaisky, 2008).....	75
Figura B.1 – Projeto do sistema híbrido (planta baixa).....	86
Figura B.2 – Projeto do sistema híbrido (vista em corte).....	87
Figura B.3 – Projeto do sistema híbrido (diagrama de força). ....	88
Figura B.4 – Projeto do sistema híbrido (diagrama de comando).....	89

Figura C.1 – Esquemático do módulo móvel. ....	90
Figura C.2 – Esquemático do módulo externo. ....	91
Figura C.3 – Esquemático do módulo interno. ....	92
Figura C.4 – Esquemático dos módulos sensores. ....	93
Figura C.5 – Esquemático do módulo atuador. ....	94
Figura C.6 – Esquemático do módulo coordenador/gravador. ....	95

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMECLATURA E ABREVIACÕES

A	Área, m <sup>2</sup>
ACK	<i>Acknowledge</i>
AmI	<i>Ambient Intelligence</i>
APL	<i>Application Layer</i>
APS	<i>Application Support Sublayer</i>
ARMAX	<i>Autoregressive moving average with exogenous input</i>
ARX	<i>Autoregressive with exogenous input</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
AT	<i>Attention (Hayes modem command)</i>
BAS	<i>Building Automation System</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CSMA – CA	<i>Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance</i>
DAAD	<i>Deutscher Akademischer Austausch Dienst</i>
$dT/dx$	Gradiente de temperatura na direção $x$
$E$	Potência emissiva, W/m <sup>2</sup>
EIB	<i>European Installation Bus</i>
FFD	<i>Full-function device</i>
FK	Filtro de Kalman
FKE	Filtro de Kalman estendido
$G$	Irradiação, W/m <sup>2</sup>
$h$	Coeficiente de transferência de calor por convecção, W/m <sup>2</sup> .K
$h_{rad}$	Coeficiente de transferência de calor por radiação, W/m <sup>2</sup> .K
HVAC	<i>Heating, Ventilating, and Air-Conditioning</i>
IAS	<i>Industrial Application Society</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
INDUSCON	Conferência Internacional de Aplicações Industriais
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>

JTAG	<i>Joint Test Action Group</i>
$k$	Constante de condutividade térmica, W/m.K
$L$	Espessura, m
LARA	Laboratório de Automação e Robótica
MAC	<i>Media Access Control</i>
MATLAB	<i>MATrix LABoratory</i>
MBPC	<i>Model-Based Predictive Control</i>
MCU	<i>Microcontroller Unit</i>
MIMO	<i>Multiple-Input and Multiple-Output</i>
MISO	<i>Multiple-Input and Single-Output</i>
N4SID	<i>Numerical algorithms for subspace state space system identification</i>
NWK	<i>Network Layer</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i>
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>
PRBS	<i>Pseudorandom binary sequence</i>
PROBRAL	Projeto de Cooperação Universitária entre Brasil e Alemanha
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
$q$	Transferência de calor, W
$q''$	Fluxo de calor, W/m <sup>2</sup>
$R$	Resistência térmica do material, K/W
RF	Rádio-freqüência
RFD	<i>Reduced-function device</i>
SSR	<i>Solid state relay</i>
$T$	Temperatura, K
TU Kaiserslautern	<i>Technische Universität Kaiserslautern</i>
UKF	<i>Unscented Kalman Filter</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
ZDO	<i>ZigBee Device Object</i>
$\alpha$	Absortividade
$\Delta T$	Diferença de temperatura
$\nabla$	Operador nabla
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Ambientes prediais são responsáveis por uma grande parcela do consumo energético, considerando os setores residenciais e comerciais. Grande parte desse consumo é proveniente do uso de equipamentos condicionadores de ar, de modo que o aumento da demanda energética faz com que cada vez mais se busquem soluções mais eficientes.

Com a proliferação de redes sem fio e o avanço nas pesquisas sobre novos protocolos de redes sem fio, tem-se visto o desenvolvimento de padrões direcionados a aplicações em automação predial, como, por exemplo, para o *retrofitting* de prédios já construídos.

*Ambient Intelligence* (AmI) (Remagnino e Foresti, 2005; Cook *et al.*, 2009) é um paradigma ligado ao uso de redes de sensores sem fio e unidades de processamento que visam melhorar a qualidade de vida no nosso dia-a-dia (Acampora *et al.*, 2005) e está associado à abordagem mais orientada a hardware *Ubiquitous Computing*, assim como com o conceito de *Pervasive Computing*.

Para o *Research Center Ambient Intelligence TU Kaiserslautern*, AmI representa um ambiente que reage de maneira adaptativa à presença de pessoas, de modo a provê-las serviços. Sua base tecnológica é a de uma rede de sensores que coletam informações de modo a processá-las, resultando na ação sobre o ambiente por meio de atuadores.

Inserido neste contexto, o Laboratório de Automação e Robótica (LARA)<sup>1</sup> da Universidade de Brasília está conduzindo um amplo projeto de automação predial que visa a instalação de uma planta piloto para o estudo de soluções que proporcionem conforto térmico com o uso eficiente de energia.

Este trabalho em particular investiga a aquisição de um modelo matemático de predição para sistemas térmicos. Ambientes prediais reais são termicamente complexos e sujeitos a perturbações, dificultando a aquisição de um modelo que o represente.

Como parte de um projeto de cooperação com a universidade de Kaiserslautern (PROBRAL / CAPES-DAAD), busca-se aplicar um tipo de modelamento baseado em princípios físicos, um dos tópicos pesquisados na parceria, para obter tal representação.

<sup>1</sup> O grupo de pesquisa GRAV foi renomeado no CNPq para LARA em 2010.

Como integrante do projeto (PROBRAL, 2007), foi realizada uma missão de trabalho que culminou na visita do Instituto de Controle da universidade de Kaiserslautern, de modo a propiciar um intercâmbio de informações e, em particular, para se conhecer sua sala de conferências (o ambiente de estudo).

### 1.1.1 Sala de conferência do Instituto de Controle Automático TU Kaiserslautern

A sala de conferência, mostrada na figura 1.1 e figura 1.2, é equipada com um sistema de automação predial (BAS), onde reuniões podem ser agendadas. Uma série de sensores e atuadores está conectada a esse sistema através de um barramento EIB.

A sala é equipada com quatro aquecedores (acionamento por PWM) e um equipamento de ar-condicionado do tipo split.



Figura 1.1 – Sala de conferência (prédio 12 - TU Kaiserslautern), novembro de 2009.

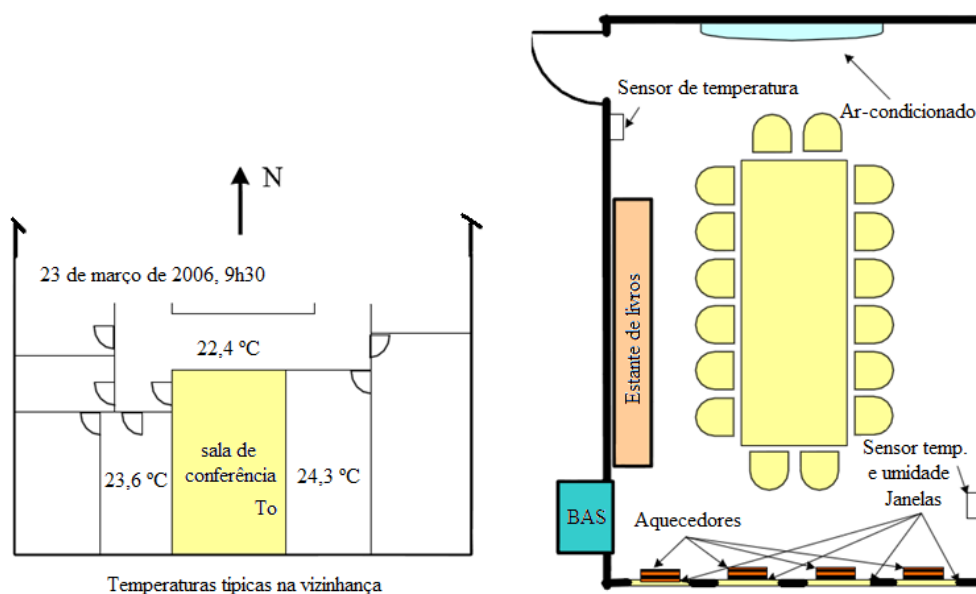


Figura 1.2 – Localização da sala (adaptada de Bauchspiess *et al.*, 2006).

## **1.2 OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é possibilitar um estudo mais aprofundado do problema da aquisição de conforto ambiental com o menor gasto energético possível. Para isso, é necessário que seja feito um estudo acerca das variáveis que influenciam o balanço energético de um ambiente e como essas variáveis se relacionam. Desse modo, a proposta do projeto é permitir a verificação dessas influências a partir da instrumentação do ambiente de estudo, além de mostrar a possibilidade de se levantar um modelo matemático que represente o sistema, de modo que as informações obtidas possam ser usadas no projeto de controladores mais eficientes do ponto de vista de consumo de energia e cujo desempenho atenda as exigências de conforto térmico.

## **1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **1.3.1 Conforto térmico**

A sensação de conforto está relacionada a variáveis pessoais e ambientais, ou seja, pode ser considerada uma sensação subjetiva. Duas pessoas submetidas às mesmas condições físicas podem ter impressões diferentes em relação ao estado térmico do ambiente. Devido a essa subjetividade, avalia-se o estado que agrada o maior número de pessoas possível para quantizar uma situação de conforto térmico.

Diversos estudos foram realizados em ambientes com condições térmicas diversas, chegando a equações e índices que podem caracterizar e quantificar uma situação de conforto térmico. Surgiu, então, a necessidade de padronização desses índices, com a criação de normas técnicas.

A definição presente na norma ISO7730 (1994) e na norma ASHRAE Standard 55 (2004), revisada e adotada em 2005, é uma das mais aceitas no meio acadêmico e utiliza o índice PMV (*Predicted Mean Vote*) (Fanger, 1970). São considerados quatro parâmetros físicos (umidade, temperatura, temperatura radiante média e velocidade do ar) e dois individuais (o nível de atividade da pessoa e o índice de vestimenta, que podem ser obtidos em tabelas de acordo com o tipo de ocupação do ambiente ou ainda ser calculados).

O corpo humano age como uma fonte de calor, oriundo do metabolismo dos alimentos que ingerimos. Existem, assim, mecanismos que promovem a troca de calor com o meio

ambiente, dissipando a energia gerada através das atividades que exercemos. A dissipação desse calor pode ser efetuada, basicamente, através da pele e da respiração (figura 1.3).

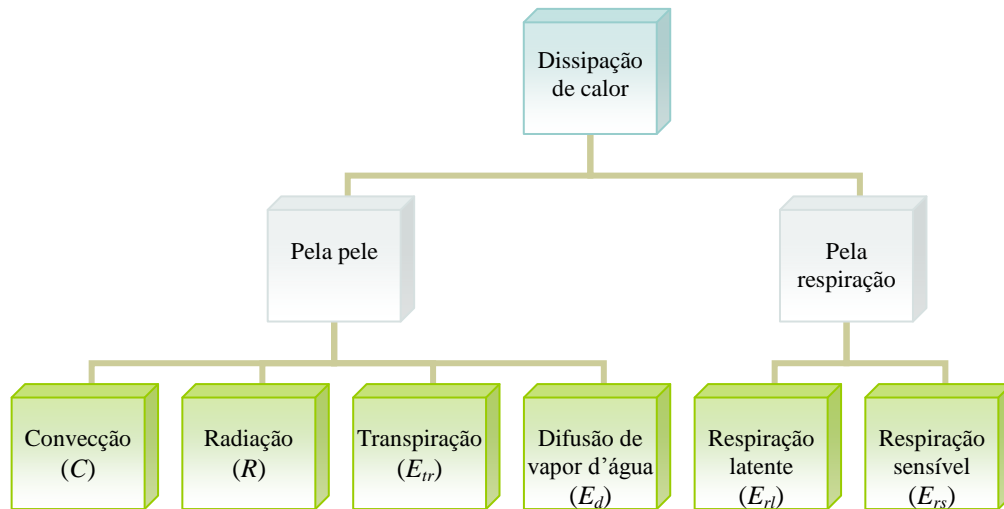


Figura 1.3 –Dissipação de calor do corpo humano.

O índice varia em uma escala de -3 a 3, em que o valor -3 corresponde a um ambiente muito frio, o valor 3 a um ambiente muito quente e o valor 0 à melhor condição de conforto. Associa-se também ao PMV um índice de insatisfação com o ambiente PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*), conforme a figura 1.4. No apêndice A, as formulações matemáticas para o cálculo dos índices PMV e PPD podem ser vistas.

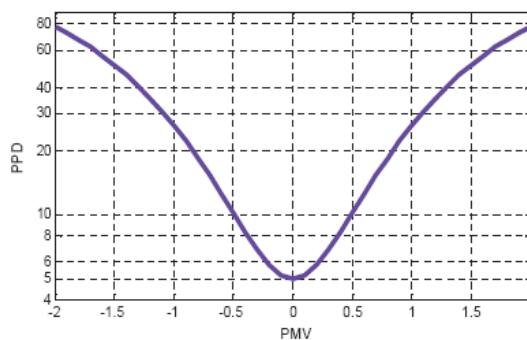


Figura 1.4 – Relação entre PMV e PPD.

A maioria dos controladores projetados para sistemas HVAC (*Heating, Ventilating and Air-Conditioning*), porém, ainda tratam o problema de conforto térmico como se fosse apenas um problema de controle simples de temperatura, quando na verdade há uma série de fatores que influenciam um ambiente. Assim, para desenvolver controladores capazes de manter o conforto térmico e reduzir o consumo de energia, é essencial que se conheçam

bem as características dinâmicas do sistema. Isso requer que seja feita a identificação do sistema levando em consideração muitas das variáveis que o afetam.

### 1.3.2 Modelagem matemática

Modelagem matemática é a área que estuda meios de desenvolver e implementar modelos matemáticos de sistemas reais (Aguirre, 2007).

A obtenção de modelos pode ser feita através de diversas metodologias; pode-se, porém, dividir a classificação de modelos quanto a sua obtenção colocando-se de um lado a abordagem física ou fenomenológica, caixa branca, e de outro lado a abordagem conhecida por identificação de sistemas caixa preta, que estuda técnicas alternativas de modelagem matemática (Ljung, 1999; Aguirre, 2007).

Na abordagem caixa branca, é necessário conhecer as relações matemáticas que descrevem os fenômenos envolvidos, além de estar bem familiarizado com o sistema, tornando-a nem sempre viável. Percebe-se, então, que a modelagem física baseia-se no princípio de separar as propriedades do sistema em sub-sistemas com comportamentos conhecidos. Para sistemas baseados em conhecimentos técnicos, são utilizadas, em geral, as leis da natureza para descrever tais sub-sistemas.

Quando pouco ou nenhum conhecimento prévio do sistema é necessário, utiliza-se a modelagem caixa preta (figura 1.5). De maneira geral, os modelos caixa preta são obtidos com maior facilidade, embora dependam fortemente da qualidade dos dados dinâmicos usados (Virk e Cheung, 1995; Aguirre, 2007).

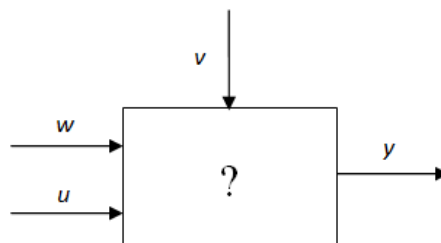


Figura 1.5 – Sistema com entrada conhecida  $u$ , saída conhecida  $y$ , distúrbio mensurável  $w$  e distúrbio não mensurável  $v$ .

Entre estas duas abordagens, existe a modelagem conhecida como caixa cinza ou modelagem semi-física, que apresenta, em algum grau, características das duas citadas inicialmente, ou seja, em muitos casos informação auxiliar está disponível e seu uso na

identificação contribui significativamente para a melhora do modelo obtido. Similarmente, é possível que a informação *a priori* esteja disponível na forma da estrutura do modelo e que seus parâmetros sejam determinados a partir de dados dinâmicos (*apud* Aguirre, 2007). É justamente essa a abordagem utilizada neste trabalho, de modo obter um modelo que suporta um controlador mais eficiente energeticamente.

Em geral, quando se deseja projetar um controlador, é necessária a compreensão da dinâmica do processo a ser controlado, de modo a adotar a estratégia de controle que melhor se adapte a um determinado problema.

Um controlador preditivo (Clarke, 1994) pode potencialmente obter o melhor compromisso entre conforto e economia de energia, mas necessita de um modelo do processo para gerar a seqüência de controle que minimiza o erro de predição. Verifica-se a necessidade de obtenção de um modelo coerente que represente as dinâmicas reais presentes em uma edificação submetida a determinadas condições climáticas e um sistema de climatização.

No que concerne a controle preditivo de sistemas HVAC, há uma literatura vasta e bastante atual abrangendo desde a modelagem até a implementação da estratégia de controle (Freire *et al.*, 2005a, 2005b, 2008; Donaisky *et al.*, 2007; Felgner, 2008, 2009; Kolokotsa *et al.*, 2009; Oldewurtel *et al.*, 2010a, 2010b). A seguir são vistos alguns trabalhos na área de modelagem para sistemas HVAC.

#### 1.3.2.1 Modelagem de sistemas HVAC

No processo de modelagem de sistemas HVAC, devem-se compreender quais são os efeitos que ocorrem em seu interior devido às variações climáticas externas (temperatura, umidade relativa e radiação solar), sem deixar de lado os fatores que também influenciam internamente.

Virk e Cheung (1995) apresentam uma aplicação de modelagem estocástica multivariável para identificação de ambientes prediais para obtenção de um modelo linear MIMO ARMAX da temperatura e umidade relativa do ambiente estudado. Os autores ressaltam a necessidade de um sinal de excitação (abrangendo todas as freqüências) durante longos períodos de tempo (no caso estudado foi utilizado um período de três dias para a aquisição dos dados). A abordagem usada é conhecida como caixa preta, pois nenhuma informação sobre o processo é usada para guiar a identificação, apenas o comportamento dinâmico das entradas e saídas. Assume-se que os sinais de excitação são, em termos espectrais, como

um ruído branco, aproximado por uma seqüência binária pseudo-aleatória (PRBS), tal que nenhuma banda de frequência seja beneficiada pela rotina de identificação.

Em Papst e Lamberts (2001) é apresentada uma análise de desempenho térmico baseado em um modelo de regressão, comparando ainda o desempenho térmico de três projetos de edificações diferentes.

Em Givoni e Krüger (2003) apresenta-se um estudo para verificar não somente os efeitos das variações de temperatura e umidade externas na temperatura do interior de uma edificação, mas a influência da variação dos materiais utilizados na construção, ou seja, o efeito das variações das propriedades termofísicas da construção na temperatura interna de diversos tipos de edificações, percebendo-se assim a influência da própria construção no conforto térmico dos ocupantes.

Ríos-Moreno *et al.* (2007) investigam o uso de modelos auto-regressivos com entrada exógena (ARX) e modelos auto-regressivos com média móvel e entrada exógena (ARMAX) para prever a temperatura do ar no interior de um prédio.

Seguem alguns trabalhos que utilizam conhecimento *a priori* sobre o sistema a ser modelado.

No contexto da lógica *fuzzy*, van Lith *et al.* (2002) apresentam um procedimento estruturado para obter um modelo *fuzzy-first-principles* a partir dos dados do processo.

Spasokukotskiy *et al.* (2003) propõem o uso de um modelo termodinâmico de parâmetros concentrados do ambiente para atingir o índice de conforto PMV. A maior dificuldade prática dessa abordagem de princípios fundamentais (*first-principles*) é a grande quantidade de parâmetros que definem o comportamento térmico dos materiais do prédio e sua interação com o ar na sala e as variáveis climáticas externas, tornando a abordagem bastante complexa para uma aplicação prática em controle preditivo.

Bauchspiess *et al.* (2006) propõem uma identificação estruturada por princípios fundamentais para controle preditivo de sistemas HVAC. A idéia básica dessa abordagem é compor um modelo pela adição das parcelas de fluxo de energia envolvidas na dinâmica térmica do ambiente. Se desejado, diferentes fenômenos físicos podem ser incluídos na modelagem. Essa é a abordagem explorada neste manuscrito e que será mais detalhada posteriormente.

Felgner (2008) apresenta em sua tese um estudo que torna possível estimar o fluxo de ar em diversos pontos do ambiente em tempo real. Durante a visita feita em Kaiserslautern, foi possível conhecer o projeto em questão, visto que um dos objetivos do projeto de cooperação é o projeto de sensores virtuais, modelos dinâmicos que combinados a sensores

reais e um modelo do ambiente estimam grandezas relacionadas ao conforto em diversos pontos do ambiente (PROBRAL, 2007).

A temperatura e a velocidade do ar são calculadas por sensores virtuais em certas posições da sala, de modo que um modelo computacional eficiente do fluxo de ar seja obtido. A idéia é utilizar tal modelo para obter essas variáveis, que apresentam padrões distintos devido ao forte fluxo gerado pelo equipamento de ar-condicionado e que não podem ser obtidas facilmente por sensores convencionais.

Uma nova abordagem (*data-based*) foi considerada em detrimento à modelagem puramente física (*first-principles*) e à baseada em identificação (*black box*). O novo modelo do fluxo de ar acessa um banco de dados com os resultados de vários cenários simulados *offline* em um simulador CFD (*Computational Fluid Dynamics*). As condições de contorno, que são variadas nas simulações, são a base para o que se denomina Espaço de Atuação (figura 1.6).

De modo a reduzir o número de operações realizadas (que demandam dias a semanas em um computador regular), uma sistemática redução no Espaço de Atuação foi desenvolvida. Pela combinação do modelo baseado em dados com um modelo concentrado de balanço energético, o efeito térmico da adição de fluxos de calor (causado por fontes de calor ou temperaturas de parede diferindo das simuladas *offline*) pode ser aproximado.

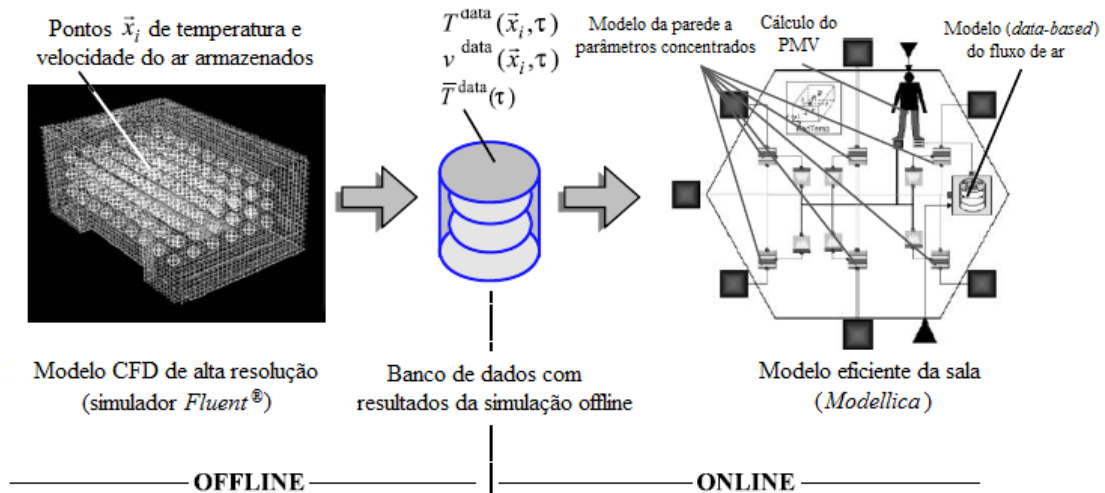


Figura 1.6 – Construção do modelo de fluxo de ar (*data-based*) integrado ao modelo concentrado das paredes, incluindo um modelo pessoal de cálculo do PMV (adaptada de Felgner, 2009).

Este balanço concentrado (Felgner *et al.*, 2006) é a base um mecanismo *online* de sintonia pelo qual o modelo de fluxo de ar foi estendido para sensores virtuais de fluxo de ar. Eles



estimam a temperatura e a velocidade do ar em diversos pontos do ambiente usando poucos sensores de temperatura no mecanismo de sintonia para compensação de distúrbios e um método de interpolação. Tais sensores virtuais foram projetados como um observador de Luenberger modificado pela inclusão do modelo baseado em dados e cuja parametrização é resolvida com um filtro de Kalman-Bucy.

O benefício do uso de sensores virtuais é mostrado pela sua utilização no controle preditivo do índice PMV via sensores virtuais na sala em questão e os resultados são comparados com os de um sistema tradicionalmente usado, baseados em medições dos valores das variáveis em apenas alguns pontos específicos. Mostra-se que o uso de sensores virtuais é válido e pode estabelecer condições de conforto térmico confiáveis. Seu trabalho pode também ser visto em Felgner (2009).

O controle ótimo baseado em modelo de sistemas HVAC também é explorado. Em Komareki *et al.* (2008), um sistema composto por dois trocadores de calor tem seu modelo desenvolvido através do modelamento dinâmico de diferentes componentes do sistema para ser usado no projeto dos controladores.

O uso de algoritmos de identificação MIMO (van Overschee, 1995; Poshtan e Mojallali, 2005) também podem ser utilizados para obter um modelo do processo, mas fornecem, em geral, inconsistências físicas (Bauchspiess *et al.*, 2006), como a obtenção de pólos complexos e zeros de fase não-mínima, não compatíveis com um processo térmico. No entanto, é possível obter um modelo por meio desses métodos, cabendo àquele que conduz a identificação, perceber e tratar essas falhas (Vieira *et al.*, 2008).

#### **1.4 APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO**

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. O capítulo 1 apresenta uma breve introdução, mostrando a motivação do projeto, o contexto no qual ele se encontra, assim como o seu objetivo. É feita também uma revisão bibliográfica sobre o tema.

O capítulo 2 trata de uma série de tópicos teóricos, tais como uma breve explicação do funcionamento de um sistema térmico de acordo com as trocas de calor que o caracterizam e também das redes de sensores sem fio. Além disso, são feitas algumas considerações sobre filtragem estocástica, uma abordagem utilizada para estimação no sistema.

O capítulo 3 apresenta o ambiente de estudo, os sensores utilizados, os módulos de comunicação sem fio e toda a instrumentação utilizada durante o trabalho, assim como o funcionamento da rede.

O capítulo 4 abrange a identificação do sistema. Ele dispõe sobre os tipos de identificação empregados, princípios envolvidos, as metodologias usadas, assim como os resultados.

O capítulo 5 encerra com as conclusões e considerações finais sobre o trabalho realizado. São feitas também recomendações para trabalhos futuros.

Em anexo encontram-se as formulações matemáticas para cálculo do índice PMV/PPD, informações sobre o projeto do atuador utilizado (Olmos, 2009), diagramas esquemáticos dos circuitos (CAD Eagle 5.6.0), parte dos códigos utilizados no processo de identificação dos parâmetros do modelo no MATLAB<sup>®</sup> (demais códigos no CD), além de um artigo publicado sobre o tema.

## **2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Um dos maiores desafios enfrentados pela sociedade são as mudanças climáticas que têm ocorrido nos últimos anos. Inserido num contexto global de preocupações ecológicas em evidência, a economia de energia elétrica é de suma importância.

O fato de ambientes prediais serem responsáveis por uma grande parcela do uso de energia elétrica, seu uso eficiente pode resultar em uma grande contribuição. Deve-se buscar, então, conforto térmico considerando o uso racional de energia e para isso, é importante analisar os fenômenos envolvidos no processo.

### **2.1 SISTEMAS TÉRMICOS**

No estudo da termodinâmica verifica-se que a energia pode ser transferida mediante interações do sistema com o seu redor (transferência de calor). Sempre que existe uma diferença de temperatura em um corpo ou entre corpos, deve haver transferência de calor (Incropera e DeWitt, 2006).

A transferência de calor pode ocorrer basicamente de três modos, por condução, por convecção e por radiação.

#### **2.1.1 Condução**

Quando existe um gradiente de temperatura em um meio estacionário (sólido ou um fluido, por exemplo), a condução se refere à transferência de calor que ocorre através do meio (Incropera e DeWitt, 2006).

Na menção da palavra condução, devemos evocar, de imediato, conceitos de atividade atômica e molecular, pois há processos nesses níveis que sustentam este modo de transferência de calor. A condução é considerada como a transferência de energia das moléculas mais energéticas para as menos energéticas em uma substância devido às interações entre as mesmas.

É possível quantificar os processos de transferência de calor em termos de equações e modelos apropriados, que servem para calcular a quantidade de energia que se transfere por unidade de tempo. Para a condução de calor, tem-se a lei de Fourier.

Para a parede plana unidimensional vista na figura 2.1, em que há uma distribuição de temperatura  $T(x)$ , A equação é dada por

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

O fluxo de calor por unidade de área  $q_x''$  (W/m<sup>2</sup>) é a taxa com que se transfere o calor na direção  $x$  por área unitária perpendicular à direção de transferência e é proporcional ao gradiente de temperatura  $dT/dx$  nessa direção.

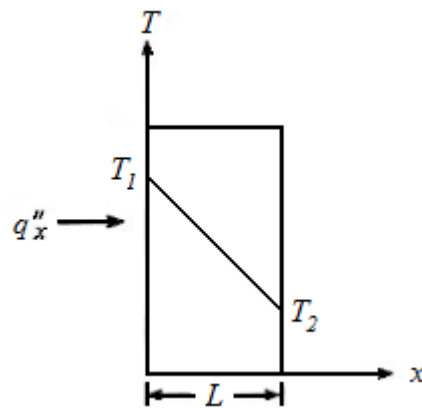


Figura 2.1 – Transferência unidimensional de calor.

A constante de proporcionalidade  $k$  é uma propriedade de transporte conhecida como condutividade térmica (W/m.K) e é uma característica do material da parede. O sinal de menos é uma consequência do fato do calor se transferir na direção da temperatura decrescente. Nas condições estáveis presentes na figura 2.1, onde a distribuição de temperatura é linear, o gradiente de temperatura é dado por

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2)$$

O fluxo de calor nessa situação é dado por

$$q_x'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (3)$$

Observa-se que essa equação proporciona um fluxo de calor por unidade de área. O calor transferido por condução por unidade de tempo através de uma parede plana de área  $A$  é dada pelo produto do fluxo pela área, equação (4).

$$q_x = q_x'' A \quad (4)$$

Se aceitarmos que o fluxo de calor é uma quantidade vetorial, é possível escrever uma equação mais geral da lei de Fourier

$$q'' = -k\nabla T = -k\left(\mathbf{i}\frac{\partial T}{\partial x} + \mathbf{j}\frac{\partial T}{\partial y} + \mathbf{k}\frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad (5)$$

em que  $\nabla$  é o operador nabla tridimensional e  $T(x, y, z)$  é o campo escalar de temperaturas. Está implícito na que o vetor fluxo de calor se encontra em uma direção perpendicular às superfícies isotérmicas.

No estudo do fluxo de calor em um ambiente predial, a condução é um mecanismo de transferência de calor de grande importância, pois o ambiente normalmente é delimitado por paredes e para o calor passar de um ambiente para outro, energia é transferida por condução através da parede.

### 2.1.2 Convecção

O termo convecção se refere à transferência de calor que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento sob diferentes temperaturas (Incropera e DeWitt, 2006).

O modo de transferência por convecção se compõe de dois mecanismos, devido ao movimento molecular aleatório e devido ao movimento global macroscópico do fluido. O movimento do fluido se associa com o fato de que, em qualquer instante, grandes números de moléculas se movem de forma coletiva. Tal movimento, na presença de um gradiente de temperatura, contribui na transferência de calor. Como as moléculas mantêm seu movimento aleatório, a transferência total de calor se deve a uma superposição de transporte de energia pelo movimento aleatório das moléculas e pelo movimento global do fluido.

Considere o fluxo de fluido sobre a superfície aquecida da figura 2.2.

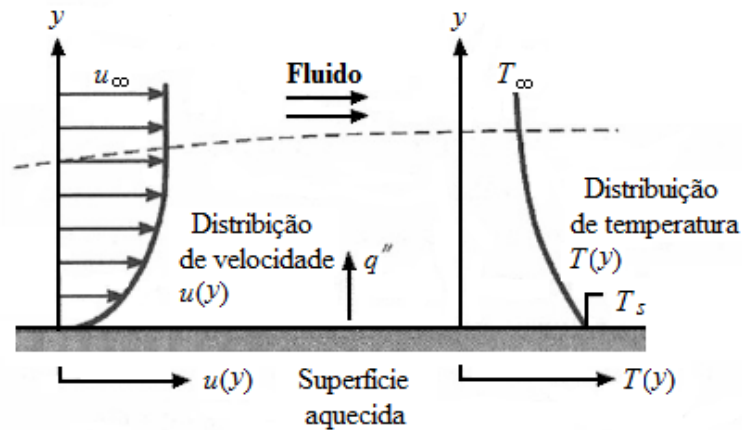


Figura 2.2 – Troca de calor por convecção (adaptada de Incropera e DeWitt, 2006).

Uma consequência da interação entre fluido e superfície é o desenvolvimento de uma região em que a velocidade no fluido varia de zero na superfície a um valor finito  $u_\infty$  associado com o fluxo. Esta região do fluido é conhecida como camada limite hidrodinâmica ou de velocidade. Se as temperaturas da superfície e do fluido diferem, há uma região do fluido através da qual a temperatura varia de  $T_s$  em  $y = 0$  a  $T_\infty$  no fluxo exterior. Esta região é denominada camada limite térmica.

O modo de transferência de calor por convecção ocorre tanto pelo movimento molecular aleatório quanto pelo movimento volumétrico do fluido na camada limite. A contribuição devido ao movimento molecular aleatório domina próximo à superfície, onde a velocidade do fluido é baixa. De fato, na interface entre a superfície e o fluido ( $y = 0$ ), a velocidade do fluido é nula e o calor se transfere apenas por esse mecanismo. A contribuição devido ao movimento volumétrico do fluido se origina do fato de que a camada limite cresce à medida que o fluido avança na direção  $x$ . Como resultado, o calor que se conduz nessa camada é arrastado corrente abaixo e finalmente se transfere ao fluido fora da camada limite.

A equação do fluxo de calor por convecção é dada por

$$q'' = h(T_s - T_\infty), \quad (6)$$

em que  $q''$ , o fluxo de calor por convecção ( $\text{W/m}^2$ ), é proporcional à diferença entre as temperaturas da superfície e do fluido,  $T_s$  e  $T_\infty$ , respectivamente. Esta expressão é conhecida como a lei de resfriamento de Newton e a constante de proporcionalidade  $h$  ( $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ) é denominada coeficiente de transferência de calor por convecção, que depende

das condições na camada limite, da geometria da superfície, da natureza do movimento do fluido e de uma variedade de propriedades termodinâmicas do fluido e de transporte (Incropera e DeWitt, 2006).

Qualquer estudo de convecção se reduz a um estudo dos meios que possibilitam encontrar  $h$ . A transferência de calor muitas vezes aparece como uma condição de fronteira na solução de problemas de condução.

Em um ambiente predial, a convecção é importante para o entendimento do resfriamento por ar-condicionado, que ocorre por meio desse fenômeno. A convecção também deve ser levada em conta quando um ambiente tem contato direto com os ambientes vizinhos, como portas e janelas abertas.

### 2.1.3 Radiação

O terceiro modo de transferência de calor se denomina radiação térmica. Todas as superfícies com temperatura finita emitem energia na forma de ondas eletromagnéticas. Portanto, na ausência de um meio, existe uma transferência de calor por radiação entre superfícies a diferentes temperaturas (Incropera e DeWitt, 2006).

Considere o processo de transferência de radiação para a superfície da figura 2.3a. A radiação que a superfície emite se origina a partir da energia térmica da matéria limitada pela superfície e a taxa com que libera energia por unidade de área ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) se denomina potência emissiva superficial  $E$ . Há um limite superior para a potência emissiva, que é estabelecido pela lei de Stefan-Boltzmann

$$E_b = \sigma T_s^4, \quad (7)$$

em que  $T_s$  é a temperatura absoluta (K) da superfície e  $\sigma$  é a constante de Stefan Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ ). Este corpo denomina-se radiador ideal ou corpo negro. O fluxo de calor emitido por uma superfície real é menor que o de um corpo negro à mesma temperatura é dado por

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4, \quad (8)$$

onde  $\varepsilon$  é uma propriedade radiativa da superfície denominada emissividade. Com valores na faixa  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , esta propriedade proporciona uma medida da eficiência com que uma

superfície emite energia em relação a um corpo negro. Isto depende do material da superfície e do acabamento.

A radiação também pode incidir sobre uma superfície desde seus arredores. A radiação se origina de uma fonte especial, como o sol, ou de outra superfície à qual a superfície de interesse se expõe. Designamos a velocidade a que toda essa radiação incide sobre uma área unitária da superfície como a irradiação  $G$ .

Uma parte da irradiação, ou toda, talvez seja absorvida pela superfície, aumentando a energia térmica do material. A velocidade com que a energia radiante é absorvida por área superficial unitária se avalia a partir do conhecimento de uma propriedade radiativa da superfície, denominada absorptividade  $\alpha$ .

$$G_{abs} = \alpha G, \quad (9)$$

em que  $0 \leq \alpha \leq 1$ . Se  $\alpha < 1$  e a superfície for opaca, partes da irradiação se reflete. Se a superfície for semitransparente, parte da irradiação de transmite. Todavia, enquanto a radiação absorvida e emitida aumenta e diminui, respectivamente, a energia interna da matéria, a radiação refletida e transmitida não têm nenhum efeito sobre essa energia. O valor de  $\alpha$  depende da natureza da irradiação, assim como da própria superfície.

Um caso especial que ocorre com frequência implica na troca de radiação entre uma superfície pequena a  $T_s$  e uma superfície isotérmica muito maior que rodeia por completo a menor (figura 2.3).

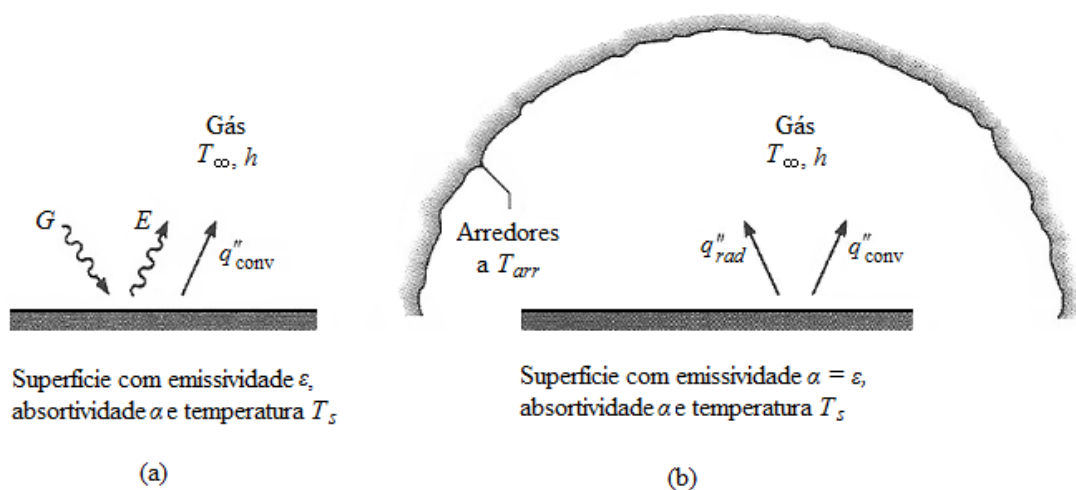


Figura 2.3 – Troca de calor por radiação: (a) na superfície e (b) entre uma superfície e sua redondeza (adaptada de Incropera e DeWitt, 2006).



Os arredores poderiam ser, por exemplo, as paredes de uma sala, cuja temperatura  $T_{arr}$  é diferente da temperatura da superfície da superfície ( $T_{arr} \neq T_s$ ). Para tal condição, a irradiação se aproxima da emissão de um corpo negro a  $T_{arr}$ , caso em que  $G = \sigma T_{arr}^4$ .

Supondo que a superfície é tal que  $\alpha = \varepsilon$  (corpo cinza), a taxa de transferência de calor por radiação desde a superfície, expressa por unidade de área é:

$$q'' = \frac{q}{A} = \varepsilon E_b(T_s) - \alpha G = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{arr}^4) \quad (10)$$

Esta expressão representa a diferença entre a energia térmica que se libera devido à emissão por radiação e a que se ganha devido à absorção de radiação.

Há muitas aplicações em que é conveniente expressar a troca de calor por radiação na seguinte forma:

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{arr}), \quad (11)$$

em que, da equação (10), o coeficiente de transferência de calor por radiação é

$$h_r \equiv \varepsilon \sigma (T_s + T_{arr}) (T_s^2 + T_{arr}^2) \quad (12)$$

Modelamos o modo de radiação de forma similar à convecção. Nesse sentido, linearizamos a equação da velocidade de radiação, tornando-a proporcional a uma diferença de temperaturas no lugar da diferença entre temperaturas à quarta potência. Observe, todavia, que  $h_r$  depende da temperatura, enquanto que a dependência da temperatura do coeficiente de transferência de calor por convecção  $h$  é, em geral, fraca (Incropera e DeWitt, 2006).

#### 2.1.4 Considerações sobre uma parede plana

Para a condução unidimensional em uma parede plana, a temperatura é uma função apenas da coordenada  $x$  e o calor de transfere apenas nessa direção. Na figura 2.4, uma parede plana separa dois fluidos com temperaturas distintas. A transferência de calor ocorre por convecção do fluido aquecido a  $T_{\infty,1}$  para uma superfície da parede a  $T_{s,1}$ , por condução

através da parede e por convecção da outra superfície da parede a  $T_{s,2}$  para o fluido frio a  $T_{\infty,2}$ .

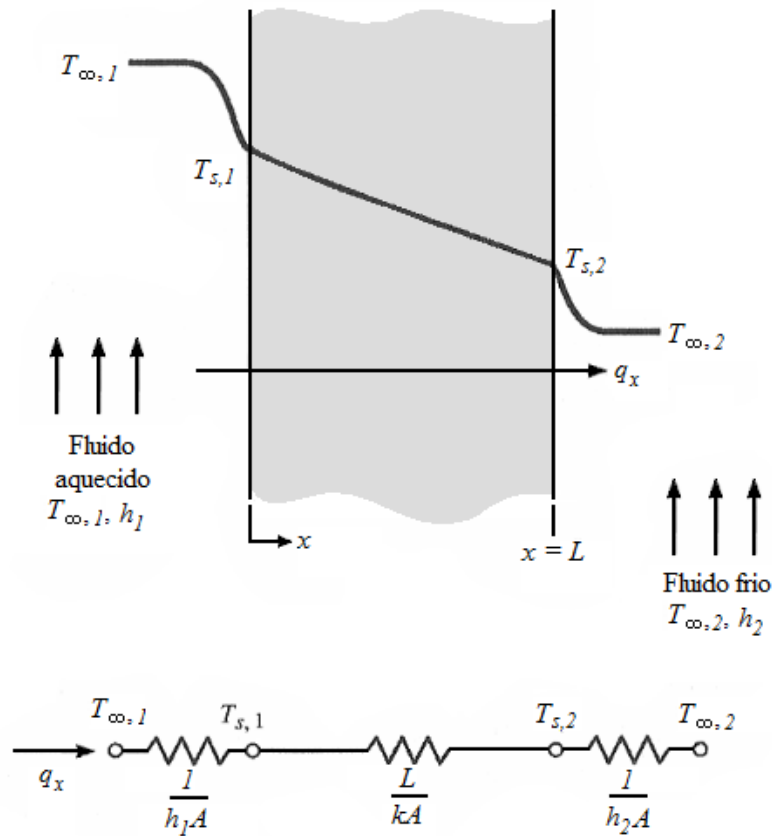


Figura 2.4 – Transferência de calor através de uma parede plana e circuito térmico equivalente (adaptada de Incropera e DeWitt, 2006).

Pela lei de Fourier, a transferência de calor por condução é dada por

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} = \frac{kA}{L} (T_{s,1} - T_{s,2}) \quad (13)$$

e como  $A$ , para a parede plana, é constante e independente de  $x$ , o fluxo de calor é dado por

$$q_x'' = \frac{q_x}{A} = \frac{k}{L} (T_{s,1} - T_{s,2}) \quad (14)$$

As equações (13) e (14) indicam que tanto a transferência  $q_x$  de calor como o fluxo de calor  $q_x''$  são constantes e independentes de  $x$ .

### 2.1.4.1 Resistência térmica

Nota-se que a equação (13) propõe um conceito muito importante. Em particular, existe uma analogia entre a difusão (molecular em movimento aleatório) do calor e a carga elétrica. Da mesma maneira que se associa uma resistência elétrica com a condução de eletricidade, se associa uma resistência térmica com a condução de calor. Ao definir a resistência como a razão de um potencial de transmissão à transferência de calor correspondente, segue que a resistência térmica para a condução é:

$$R_{t,cond} \equiv \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{q_x} = \frac{L}{kA} \quad (15)$$

De maneira similar, para a condução elétrica no mesmo sistema, a lei de Ohm é dada por:

$$R_e \equiv \frac{E_{s,1} - E_{s,2}}{I} = \frac{L}{\sigma A} \quad (16)$$

A analogia entre as equações (15) e (16) é óbvia.

Uma resistência térmica também se associa com a transferência de calor por convecção. Da lei de resfriamento de Newton,

$$q = hA(T_s - T_\infty), \quad (17)$$

a resistência térmica para a convecção é dada por:

$$R_{t,conv} \equiv \frac{T_s - T_\infty}{q} = \frac{1}{hA} \quad (18)$$

As representações por circuitos são bastante úteis para conceitualizar e quantificar problemas de transferência de calor. Há uma série de trabalhos na literatura que utilizam tal analogia no modelamento de ambientes (Gruber *et al.*, 2001; Fraisse *et al.*, 2002; Gwerder, *et al.*, 2005; Bauchspiess *et al.*, 2006; Felgner, 2008, 2009; Oldewurtel *et al.*, 2010a, 2010b).

O circuito térmico equivalente para a parede plana com condições de convecção superficiais é mostrado na figura 2.4. A transferência de calor se determina mediante a

consideração de cada elemento da malha em separado. Como é  $q_x$  constante através da malha, segue que

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{s,1}}{1/h_1 A} = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{L/kA} = \frac{T_{s,2} - T_{\infty,2}}{1/h_2 A} \quad (19)$$

Em termos da diferença total de temperatura,  $T_{\infty,1} - T_{\infty,2}$  e da resistência térmica total  $R_{tot}$ , a transferência de calor também pode ser expressa por

$$q_x = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{tot}} \quad (20)$$

Como as resistências estão em série, pode-se somá-las. Segue

$$R_{tot} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A} \quad (21)$$

É também pertinente outra resistência se uma superfície está separada dos seus arredores por um gás. A troca de radiação entre a superfície e seus arredores, em particular, pode ser importante. A transferência se dá por meio da equação (11) e segue que a resistência térmica para a radiação é dada por

$$R_{t,rad} \equiv \frac{T_s - T_{arr}}{q_{rad}} = \frac{1}{h_r A}, \quad (22)$$

em que a  $h_r$  é determinada pela equação (12). As resistências de condução e convecção atuam em paralelo e se  $T_{\infty} = T_{arr}$ , se combinam para gerar uma só resistência efetiva da superfície.

### 2.1.5 Analogia dos modos de transferência e o modelo da sala

Neste trabalho, é utilizada uma abordagem de identificação estruturada por princípios fundamentais proposta por Bauchspiess *et al.* (2006), embora neste trabalho sejam considerados apenas efeitos de resfriamento (Bauchspiess *et al.* também consideram o

aquecimento do ambiente). Um modelo de parâmetros concentrados, contínuo, linear e invariante no tempo é apresentado. A idéia básica é compor um modelo do ambiente pela adição dos fluxos de energia térmica envolvidas na dinâmica térmica do ambiente, ou seja, os fluxos de calor através das paredes que delimitam a sala de reunião e sua vizinhança, bem como da dinâmica térmica ligada à atuação sobre o ambiente a ser controlado.

Para modelar a transferência de calor devido à vizinhança, a parede deve ser investigada.

Fraisse *et al.* (2002) analisam diferentes modelos de paredes a partir de um análogo elétrico do sistema. No modelo de condução mais simples (2R1C), figura 2.5, considera-se uma capacitância térmica interna da parede  $C_v$  e dois elementos térmicos de condução  $R$ .

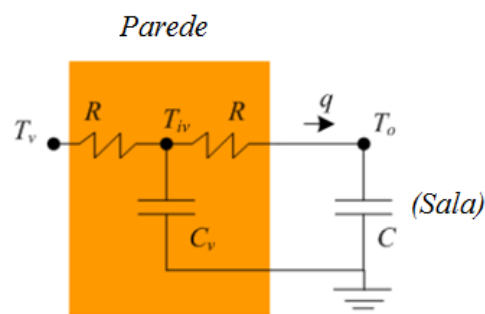


Figura 2.5 – Análogo elétrico da transferência de calor entre salas vizinhas. (adaptada de Bauchspiess *et al.*, 2006).

O fluxo de calor  $q$  entre as salas depende da diferença  $T_o - T_{iv}$ , em que  $T_{iv}$  é a temperatura em um ponto fictício no interior da parede.

A transferência de calor entre salas vizinhas é, assim, representada pela seguinte função de transferência de primeira ordem usada para modelar as paredes do ambiente:

$$\frac{T_o}{T_{iv}} = \frac{1}{sRC_v + 1}, \quad (23)$$

em que  $RC_v = a$  é a constante de tempo. O significado físico dessa estrutura é a representação da forma não imediata da propagação do calor entre salas vizinhas.

O resfriamento promovido pelo ar-condicionado também é modelado como um processo de primeira ordem com ganho unitário, como mostrado na equação (23). A constante de tempo desse processo refere-se ao tempo necessário para que o processo de convecção difunda o ar frio insuflado pelo ar-condicionado e o efeito de resfriamento seja percebido na sala.

Cada sala vizinha tem uma temperatura média distinta e a constituição das paredes pode variar e o teto e o piso possuem características distintas. Assume-se, inicialmente que a dinâmica dominante correspondente à transferência de calor entre a vizinhança possa ser aproximada por um simples modelo 2R1C. A radiação solar produz uma transferência de calor que não depende da temperatura da sala. Há ainda uma última parcela de fluxo de calor a ser considerada, relacionada à inércia térmica do prédio. A inércia térmica de um edifício diz respeito à sua capacidade de se opor às variações de temperatura no seu interior devido ao acúmulo de calor nos seus elementos de construção (incluída também no modelamento da vizinhança).

Desse modo, a sala pode ser representada por um modelo descrevendo a dinâmica entre as variáveis de entrada e saída envolvidas (figura 2.6).

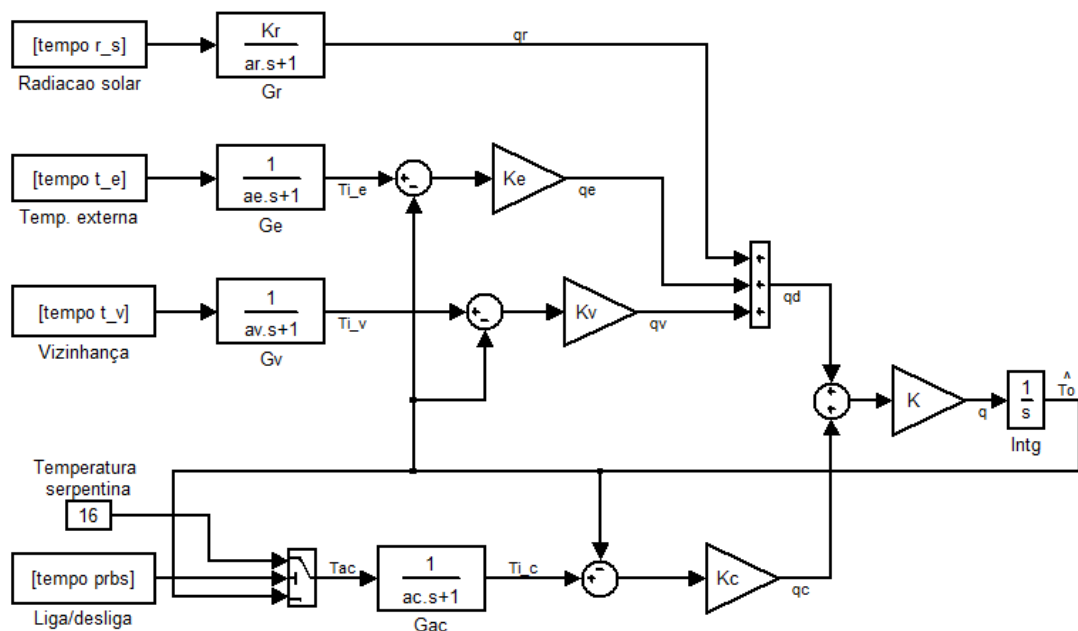


Figura 2.6 – Modelo térmico estruturado *first-principles* simplificado.

A temperatura predita pelo modelo é dada por  $\hat{T}_o$  e o volume de ar da sala é modelado como uma capacitância térmica concentrada  $C$  (figura 2.5 e figura 2.6), com  $K = 1/C$ .

Observando o modelo simplificado, pode-se observar a idéia central do modelamento realizado. Ao se considerar um fenômeno de transporte (transferência de calor), é possível utilizar o princípio da superposição e compor o modelo do ambiente pela adição dos fluxos de energia térmica envolvidos na dinâmica térmica do ambiente ( $q_r$ ,  $q_v$ ,  $q_e$  e  $q_c$ ), permitindo a identificação separada de cada componente do modelo. Um fluxo positivo para  $C$

aumenta a temperatura da sala, enquanto um fluxo negativo reduz a temperatura da sala. A figura 2.7 deixa clara a analogia da idéia do modelo com os modos de transferência de calor revistos neste capítulo.

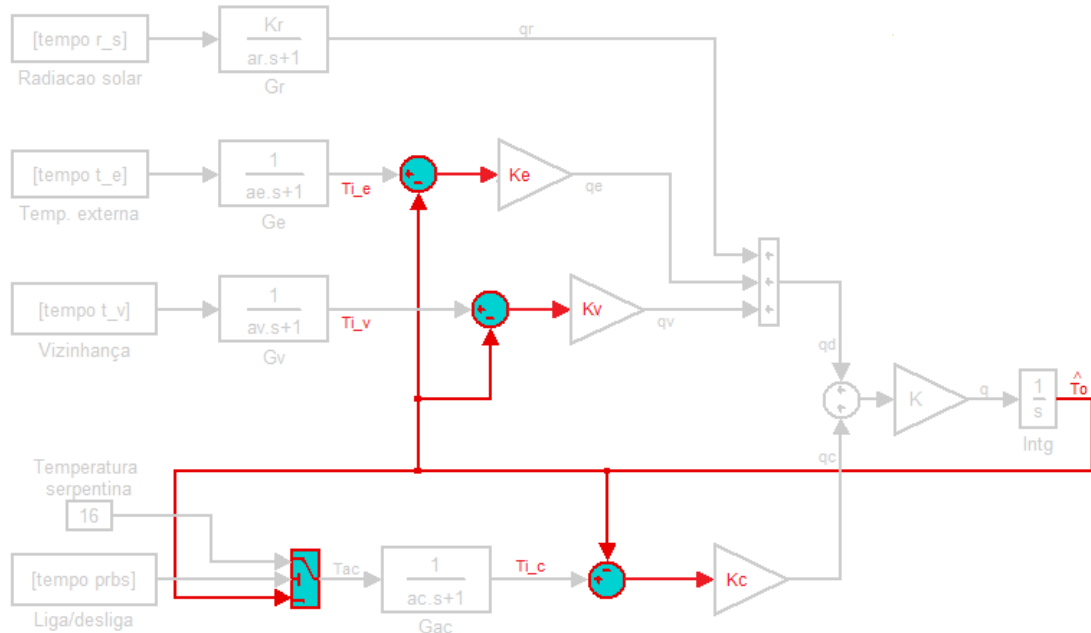


Figura 2.7 – Ramo de realimentação do modelo estruturado *first-principles*.

Os fluxos de cada contribuição são dados por uma constante  $K_j$ ,  $j = e, v, c$ , multiplicada pela diferença das temperaturas  $T_{i_j}$  e  $\hat{T}_o$  (devido à realimentação da saída), ou seja,

$$q = K_j \Delta T = K_j \left( T_{i_j} - \hat{T}_o \right) \quad (24)$$

As equações que representam os fluxos para condução,  $q''_x = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = k \frac{\Delta T}{L}$ , para a convecção,  $q'' = h(T_s - T_\infty)$ , e para a radiação,  $q''_{rad} = h_r(T_s - T_{arr})$ , têm a mesma forma da equação (24), agregando significado físico aos parâmetros do modelo.

Considerando a temperatura externa, a radiação solar e a vizinhança como distúrbios mensuráveis, o fluxo de calor resultante devido a essas entradas é dado por  $q_d$  (figura 2.6).

O fluxo total  $q$  é dado pela soma dos fluxos gerados por essas entradas ( $q_r$ ,  $q_v$  e  $q_e$ ) e pelo fluxo devido ao ar-condicionado,  $q_c$ . A figura 2.8 nos mostra um diagrama do fluxo de sinal do modelo de distúrbio.

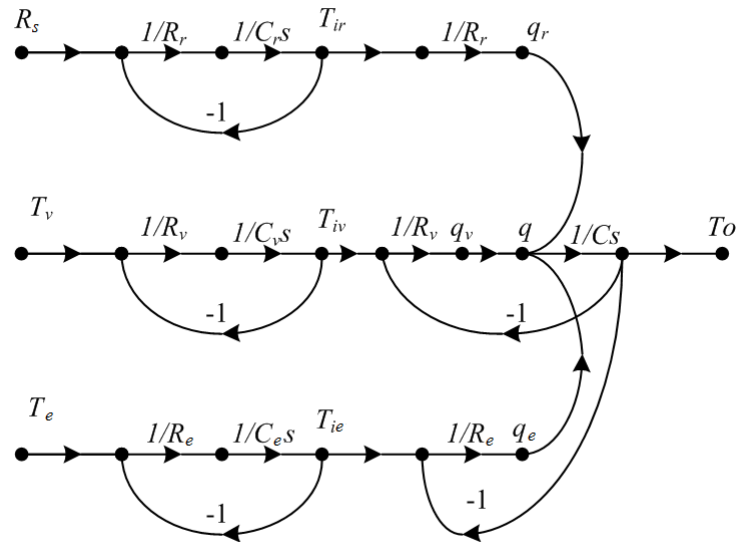


Figura 2.8 – Modelo de distúrbio 2R1C.

Considere que já exista um modelo de distúrbio e se deseja os parâmetros envolvidos no canal de resfriamento. O fluxo total  $q = d(T_o)/dt$  e o fluxo de resfriamento  $q_c = q - q_d$ . Assim,

$$T_c = \int q_c dt, \quad (25)$$

em que  $T_c$  é a variação de temperatura causada pelo resfriamento promovido pelo ar-condicionado, que é utilizada para se identificar os parâmetros correspondentes. No processo de identificação não há como relacionar as temperaturas de entrada com os fluxos, que em princípio são desconhecidos; é possível, no entanto, relacioná-las com a temperatura da sala, o que permite a busca pelos parâmetros.



## 2.2 REDES DE SENSORES SEM FIO

As redes de sensores sem fio têm ganhado uma posição de destaque nos últimos anos graças às suas características intrínsecas, que as tornam atrativas em diversas aplicações, como em automação predial e residencial, monitoramento de ambientes e segurança.

### 2.2.1 Protocolo *ZigBee*

Dentre as diversas tecnologias disponíveis, o padrão *ZigBee* é um padrão global e aberto que tem como base o protocolo IEEE 802.15.4, sendo desenvolvido como solução para redes sem fio com baixo consumo de energia, baixa taxa de transmissão, segurança e confiabilidade, barateando assim os custos com a aquisição, instalação de equipamentos, manutenção e mão-de-obra.

A seguir, encontram-se as características de dispositivos baseados no padrão IEEE 802.15.4:

- Taxas de transmissão de 250 kbps, 40 kbps, e 20 kbps;
- Modos de endereçamento 16-bit *short* e 64-bit IEEE *addressing*;
- Suporte para dispositivos de latência crítica;
- Acesso de canal do tipo CSMA-CA;
- Estabilização automática da rede pelo coordenador;
- Protocolo *handshaked* para transferência segura de dados;
- Gerenciamento de Energia para assegurar baixo consumo;
- 16 canais na banda de 2.4 GHz ISM e 10 canais na banda de 915 MHz e um canal na banda de 868 MHz.

Há basicamente dois tipos de dispositivos definidos no protocolo 802.15.4, o RFD (*reduced-function device*) e o FFD (*full-function device*).

Um RFD pode se comunicar apenas com um FFD e, em geral, requer menos memória, processamento e energia para operação. Normalmente são suficientes para nós sensores e atuadores.

Um FFD é capaz de se comunicar tanto com FFDs quanto com RFDs e requerem um maior poder de processamento e consumo de energia.

O padrão *ZigBee* especifica três tipos de nós que podem fazer parte de uma rede *ZigBee*, o coordenador, o roteador e o *end device*.

O coordenador é o nó mandatório, responsável por atividades de gerenciamento da rede, tais como a admissão de outros nós na rede, atribuição de endereços de rede e inicialização da rede. Apenas dispositivos FFD podem atuar como um nó coordenador na rede.

O roteador é um dispositivo que possui as capacidades de um FFD, mas que não atua como nó coordenador da rede. Devido à sua capacidade de permitir a associação de outros nós na rede, assim como de remeter *frames* de dados para seu destino, roteadores podem ser usados para estender a área de cobertura de uma rede além do alcance de um único dispositivo e para aumentar a confiabilidade da rede ao criar rotas de dados adicionais.

Já um *end device* é um dispositivo que pode comunicar somente com um único roteador ou coordenador. Dentre os tipos de dispositivos, o *end device* é o que consome menos recursos (memória, processamento, energia), correspondendo, assim, a dispositivos RFD.

Para permitir uma troca de dados eficiente em redes de grande escala, o padrão *ZigBee* utiliza as topologias de rede definidas no padrão IEEE 802.15.4 (estrela e *peer-to-peer*), estendendo-as com a especificação de topologias em árvore e em malha. Maiores detalhes podem ser vistos em Farahani (2008).

A pilha do protocolo *ZigBee* é formada por camadas, sendo elas: camada física (PHY) e de acesso ao meio (MAC), estabelecidas pelo padrão IEEE 802.15.4, camada de rede (NWK) e camada de aplicação (APL). Na camada de aplicação (APL) estão incluídas a subcamada de suporte a aplicação (APS), o objeto de dispositivo *ZigBee* (ZDO - *ZigBee Device Object*) e os objetos de aplicação.

Em cada nó da rede de sensores implementado para este trabalho, foram utilizados dispositivos que empregam essa tecnologia e que são vistos a seguir.

#### 2.2.1.1 Kit de desenvolvimento *Meshbean*

O kit de desenvolvimento *Meshbean* (figura 2.9) contém um hardware com diversos periféricos que possibilitam o desenvolvimento de aplicações sem fio com a tecnologia *ZigBee*, carregadas por meio de um *bootloader*. Dentre as funcionalidades disponíveis têm-se botões, DIP *switches*, sensores, conector para JTAG e conectores para o uso de outros recursos do *ZigBit*.

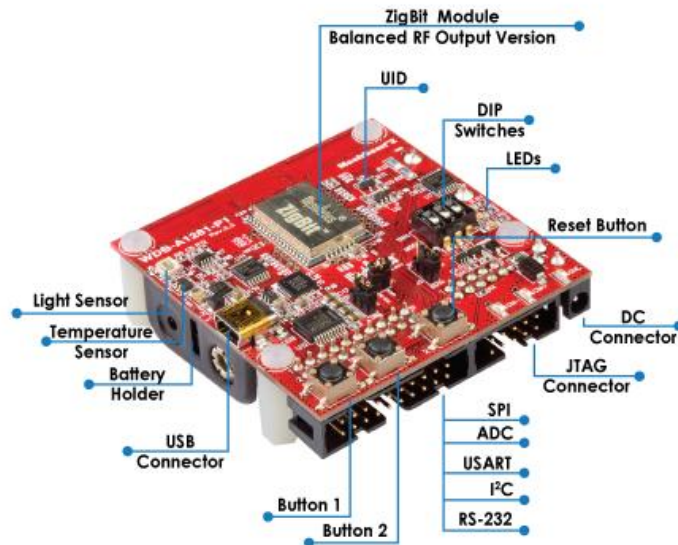


Figura 2.9 –Placa *Meshbean2* (*MeshNetics*, 2008).

Foram usadas duas placas *Meshbean2* no trabalho, uma para atuar como nó coordenador, ligada ao computador pela interface USB/serial e outra como nó sensor para medição da temperatura em uma das vizinhanças.

#### 2.2.1.2 Módulo *ZigBit*

O *ZigBit* é um módulo que contém em um mesmo encapsulamento o MCU ATmega1281 e o *transceiver* de RF AT86RF230 (figura 2.10). Este produto, juntamente com o kit *Meshbean*, originalmente comercializado pela *MeshNetics*<sup>®</sup>, passou a ser comercializado e distribuído pela ATMEL<sup>®</sup>. Foi também utilizado o módulo em um *breakout* (figura 2.11).

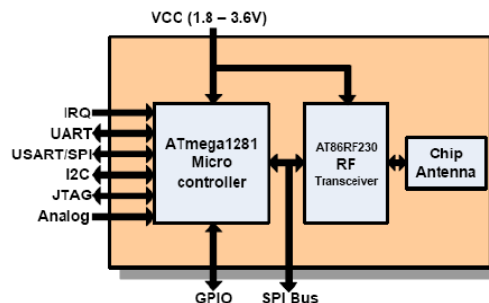


Figura 2.10 – Módulo *ZigBit* (*MeshNetics*, 2008).



Figura 2.11 – Breakout com ZigBit (MeshNetics, 2008).

São disponibilizadas três tipos de configurações da pilha de software embarcada: o *ZigBeeNet*, agora *BitCloud*, o *SerialNet* e o *OpenMAC*. O *BitCloud* é uma plataforma de desenvolvimento de software *ZigBee* PRO certificada para aplicações sem fio de tempo real com agendamento de tarefa. O *SerialNet* permite a manipulação dos módulos por comandos AT via interface serial e o *OpenMAC* é uma implementação de código aberto da camada IEEE802.15.4 MAC.

### 2.2.1.3 Sistema *BitCloud*

O *BitCloud* é um sistema em tempo real cooperativo multitarefa criado para facilitar o desenvolvimento de aplicações de redes sem fio embarcadas no hardware em questão. O *BitCloud* possibilitou a utilização de um único MCU nos módulos sensores, atuadores e coordenador, reduzindo a complexidade do hardware e tornando-o flexível, uma vez que o desenvolvedor pode controlar as funcionalidades do módulo por meio da aplicação.

A arquitetura do *BitCloud* é dividida em camadas (figura 2.12).

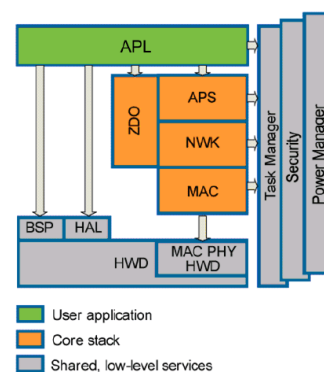


Figura 2.12 – Pilha do *BitCloud* (ATMEL, 2009).

Além do núcleo da pilha, que implementa o protocolo, o *BitCloud* contém camadas adicionais para facilitar o desenvolvimento de aplicações do usuário, dentre elas o *task manager*.

Com a instrumentação implementada, segue-se para a identificação do modelo, um dos objetivos deste trabalho. Dentre as abordagens tratadas, uma utiliza a teoria de processos estocásticos, tratada brevemente na seção a seguir (as demais serão vistas no decorrer do manuscrito).

### 2.3 FUNDAMENTOS DE FILTRAGEM ESTOCÁSTICA

Considere

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, w_k), \quad (26)$$

com  $x_k \in \mathfrak{R}^n$ ,  $w_k \in \mathfrak{R}^n$  sendo uma variável aleatória de distribuição conhecida e  $u_k$  uma variável independente mensurável.

Em filtragem estocástica, a seqüência  $\{x_k\}$  representa os estados do sistema (ou processo) que evolui com o tempo. Estas variáveis são internas ao sistema, mas observadas indiretamente através de medidas  $y_k$ , tais que

$$y_k = h(x_k, v_k), \quad (27)$$

com  $v_k$  sendo ruído associado ao processo de medição. Do ponto de vista sistêmico, um filtro estocástico é um estimador de  $p(x_k)$  ou de estatísticas sobre  $x_k$ , tais como média, variância, moda etc.. Como as medições são usadas para fazer tal estimação, então temos que estas estimativas são condicionais,  $p(x_k | y_1, y_2, \dots, y_l)$ .

Em função de  $l$ , temos as seguintes classificações para o problema:

- Suavização:  $k < l$ ;
- Filtragem:  $k = l$ ;
- Predição:  $k > l$ .

No caso do problema de filtragem, estamos muitas vezes interessados não em  $p(x_k|y_1...y_k)$ , mas em

$$\hat{x}_k = E\{x_k | y_1, y_2, \dots, y_k\} \quad (28)$$

$$P_k = E\{(x_k - \hat{x}_k)(x_k - \hat{x}_k)^T | y_1, y_2, \dots, y_k\} \quad (29)$$

em que a média condicional  $\hat{x}_k$  é a estimativa de mínima variância de  $x_k$ . Desse modo, dado  $p(x_0)$  e um conjunto de observações  $y_k = \{ y_1, \dots, y_k \}$ , a densidade condicional  $p(x_k|y_k)$  é a solução completa do problema de filtragem (Jazwinski, 1970).

### 2.3.1 Considerações sobre filtragem estocástica não-linear

Nesta seção, são apresentadas algumas formulações úteis na busca dos parâmetros do sistema térmico estudado, conforme poderá ser visto mais a frente.

Para sistemas não-lineares, as soluções utilizando o filtro de Kalman (FK) são incapazes de tratar o sistema em sua forma original. Além disso, não há uma solução fechada que abranja todos os sistemas não-lineares e que seja ótima.

Uma das soluções mais utilizadas na estimação em sistemas não-lineares é o filtro de Kalman estendido (FKE) (Aguirre, 2007). O FKE utiliza uma expansão em série de Taylor para gerar uma aproximação de pequenos sinais do modelo do sistema. As equações do FK são, então, utilizadas para o modelo linearizado.

#### 2.3.1.4 O filtro de Kalman estendido

Seja o sistema dinâmico não-linear estocástico em tempo discreto

$$\begin{cases} x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) + w_k \\ y_k = h(x_k) + v_k \end{cases}, \quad (30)$$

com  $w_k \sim N(0, Q_k)$ ,  $v_k \sim N(0, R_k)$ ,  $x_0 \sim N(\hat{x}_0, P_0)$  descorrelacionados, ou seja,

$$E\{w_k v_k^T\} = 0, \quad E\{w_k x_0^T\} = 0, \quad E\{v_k x_0^T\} = 0 \quad (31)$$

Em torno de  $\hat{x}_{k-1}$ , usando expansão em série de Taylor, tem-se

$$f(x_{k-1}, u_{k-1}) \approx f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}) + \frac{\partial f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1})}{\partial \hat{x}_{k-1}} (x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) \quad (32)$$

Assim, o modelo pode ser reescrito na forma

$$x_k \approx f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}) + \frac{\partial f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1})}{\partial \hat{x}_{k-1}} (x_{k-1} - \hat{x}_{k-1}) + w_k \quad (33)$$

Segue que

$$x_k \approx \frac{\partial f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1})}{\partial \hat{x}_{k-1}} x_{k-1} + \left[ f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}) - \frac{\partial f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1})}{\partial \hat{x}_{k-1}} \hat{x}_{k-1} \right] + w_k, \quad (34)$$

$$x_k \approx A_{k-1} x_{k-1} + u'_{k-1} + w_k, \quad (35)$$

com

$$A_{k-1} = \frac{\partial f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1})}{\partial \hat{x}_{k-1}} \quad (36)$$

$$u'_{k-1} = f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}) - A_{k-1} \hat{x}_{k-1} \quad (37)$$

O mesmo pode ser feito com relação ao modelo de medição

$$y_k = h(x_k) + v_k, \quad (38)$$

que em torno da predição  $\hat{x}_{k|k-1}$

$$h(x_k) \approx h(\hat{x}_{k|k-1}) + \frac{\partial h(\hat{x}_{k|k-1})}{\partial \hat{x}_{k|k-1}} (x_k - \hat{x}_{k|k-1}) \quad (39)$$

que se torna

$$y_k = h(\hat{x}_{k|k-1}) + \frac{\partial h(\hat{x}_{k|k-1})}{\partial \hat{x}_{k|k-1}} (x_k - \hat{x}_{k|k-1}) + v_k \quad (40)$$

Segue

$$y_k - h(\hat{x}_{k|k-1}) + \frac{\partial h(\hat{x}_{k|k-1})}{\partial \hat{x}_{k|k-1}} \hat{x}_{k|k-1} = \frac{\partial h(\hat{x}_{k|k-1})}{\partial \hat{x}_{k|k-1}} x_k + v_k, \quad (41)$$

$$y_k = C_k x_k + v_k, \quad (42)$$

com

$$C_k = \frac{\partial h(\hat{x}_{k|k-1})}{\partial \hat{x}_{k|k-1}} \quad (43)$$

$$y'_k = y_k - h(\hat{x}_{k|k-1}) + C_k \hat{x}_{k|k-1} \quad (44)$$

Dessa forma, temos um sistema linear transformado

$$\begin{cases} x_k = A_{k-1} x_{k-1} + u'_{k-1} + w_k, \\ y'_k = C_k x_k + v_k \end{cases}, \quad (45)$$

sobre o qual pode-se aplicar o FK. Na fase de predição,

$$\hat{x}_{k|k-1} = E\{f(x_{k-1}, u_{k-1}) + w_k \mid y_1, y_2, \dots, y_k\} = f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1}) \quad (46)$$

$$P_{k|k-1} = A_{k-1} P_{k-1} A_{k-1}^T + Q_k \quad (47)$$

$$A_{k-1} = \frac{\partial f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1})}{\partial \hat{x}_{k-1}} \quad (48)$$

Na fase de correção (no instante  $t_k$ ), dado a medição  $y_k$  com matriz de covariância  $R_k$ ,

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y'_k - C_k \hat{x}_{k|k-1}) = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - h(\hat{x}_{k|k-1}) + C_k \hat{x}_{k|k-1} - C_k \hat{x}_{k|k-1}) \quad (49)$$



Logo

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - h(\hat{x}_{k|k-1})) \quad (50)$$

$$P_k = (I - K_k C_k) P_{k|k-1} \quad (51)$$

$$K_k = P_{k|k-1} (C_k)^T (C_k P_{k|k-1} (C_k)^T + R_k)^{-1} \quad (52)$$

$$C_k = \frac{\partial h(\hat{x}_{k|k-1})}{\partial \hat{x}_{k|k-1}} \quad (53)$$

O FKE obtido por linearização aproxima  $p(x_k | y_1, y_2, \dots, y_l)$ , pois usa o modelo da equação (45). Além disso, é um estimador sub-ótimo, devido às aproximações.

Na estimação conjunta de estados e parâmetros, considera-se o sistema

$$\begin{cases} x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}, \theta_{k-1}) + w_k \\ y_k = h_k(x_k) + v_k \end{cases}, \quad (54)$$

em que  $\theta$  é um vetor de parâmetros que compõe o modelo de evolução do processo. O problema consiste em estimar simultaneamente  $x_k$  e  $\theta_k$ . Uma solução consiste em aplicar o FKE para o sistema aumentado.

$$\begin{cases} z_k = \begin{pmatrix} x_k \\ \theta_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(x_{k-1}, u_{k-1}, \theta_{k-1}) \\ \theta_{k-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w_k \\ w_{\theta,k} \end{pmatrix} \\ y_k = h(z_k) + v_k \end{cases} \quad (55)$$

em que  $\hat{z}_k$  contém estimativas de ambos  $x_k$  e  $\theta_k$  que se tornaram correlacionadas devido a  $f(x_{k-1}, u_{k-1}, \theta_{k-1})$ .

Para o caso de sistemas com restrições, o filtro de Kalman estendido com medições aumentadas é utilizado, em que a restrição é definida como uma relação conhecida entre os seus estados (*apud* Scandaroli, 2009). Restrições entre os estados podem aparecer naturalmente em diversos sistemas físicos e podem ser derivadas a partir de leis básicas da física, sendo inerentes ao sistema (Haseltine e Rawlings, 2003).

Considere agora uma restrição

$$c = g(z_k) \quad (56)$$

Uma forma de incorporar as restrições no problema consiste em usar um artifício conhecido por pseudo-medição, ou seja, o modelo de medição passaria a ter uma componente fictícia

$$\begin{pmatrix} y_k \\ c_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h(z_k) \\ g(z_k) \end{pmatrix} + v'_k \quad (57)$$

com  $v'_k \sim N(0, R'_k)$  e

$$(R'_k) = \begin{pmatrix} R_k & 0 \\ 0 & S_k \end{pmatrix} \quad (58)$$

Com  $S_k = 0$ , a restrição é satisfeita a cada passo de correção do filtro. Se for desejado relaxar a restrição, basta escolher  $S_k > 0$ , de modo que se tenha uma restrição fraca. Essa formulação permite que a restrição possua uma região de soluções admissíveis, em que a covariância  $S_k$  representa o nível de aderência dos estados à restrição (*apud* Scandaroli, 2009). Como o FKE resulta de um truncamento da série de Taylor da função de medição aumentada, é proposto em Simon e Chia (2002) que a matriz de covariância das pseudo-observações  $S_k$  seja não-nula (restrição fraca), compensando erros provenientes da linearização.

Se a estimativa de estado inicial não for muito boa ou o processo for modelado incorretamente, o filtro pode divergir rapidamente devido à linearização.

### 3. AMBIENTE DE ESTUDO

Este capítulo apresenta o ambiente de estudo, os sensores utilizados, os módulos de comunicação sem fio e toda a instrumentação utilizada durante o trabalho, assim como o funcionamento da rede.

#### 3.1 SALA DE REUNIÕES

O ambiente de estudo, a sala de reuniões do LARA, é mostrado na figura 3.1.



Figura 3.1 – Sala de reuniões do LARA e detalhe.

No ambiente de estudo há um equipamento condicionador de ar híbrido (em detalhe na figura 3.1), formado por um equipamento de climatização evaporativo e por um split dutável, desenvolvido no laboratório visando o uso racional da energia elétrica (Olmos, 2009). A figura 3.2 mostra em detalhes o equipamento (algumas especificações do projeto encontram-se no apêndice B).



Figura 3.2 – Split dutável, damper e sistema evaporativo.

O sistema foi desenvolvido objetivando a obtenção de conforto térmico com menor consumo de energia elétrica proveniente do uso do condicionador evaporativo em detrimento ao uso do condicionador convencional sob certas circunstâncias, visto que o primeiro consome significativamente menos energia (Olmos, 2009).

O princípio de resfriamento evaporativo reside no fato da água retirar do ar o calor para evaporar-se, ou seja, tem-se um processo que consiste na redução da temperatura do ar através da elevação da sua umidade relativa. Este equipamento, no entanto, não foi utilizado neste trabalho. Foi verificado que em períodos chuvosos a umidade no interior da sala não reduz com facilidade (Such, 2009) e devido ao período em que os dados foram coletados ser chuvoso, não foi apropriado o seu uso. Maiores detalhes sobre sua construção e funcionamento podem ser vistos em Olmos (2009).

Saloio e Ávila (2009) elaboraram quatro dos nove módulos utilizados neste trabalho (o módulo interno, o módulo externo, o módulo atuador, além do circuito gravador), usados o monitoramento dos sensores e acionamento dos atuadores do sistema. Foram criadas duas placas de monitoramento contendo apenas sensores e em cada uma delas um módulo *ZigBit* e uma placa de acionamento com um o circuito de acionamento de todos os atuadores. Foi ainda criada uma placa gravadora com o objetivo apenas de alimentar o circuito *ZigBit* para a gravação de programas e testes de portas.

A localização da sala de reuniões no interior do laboratório pode ver verificada na figura 3.3.

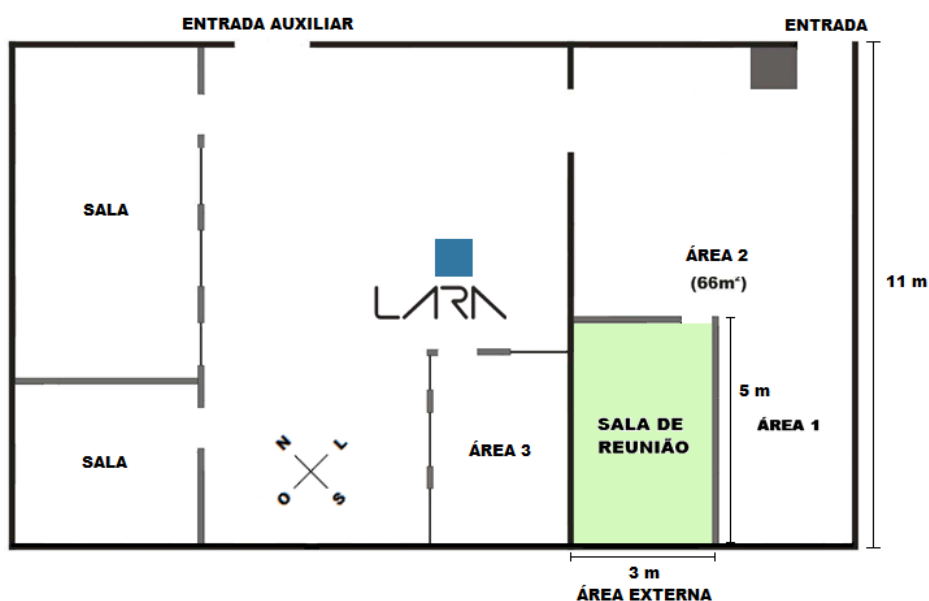


Figura 3.3 – Localização da sala de reuniões no laboratório.

No interior da sala (pé direito  $\approx 2,8$  m) há o módulo coordenador, o módulo móvel para medição da temperatura da sala (e demais variáveis incluídas no índice PMV), o módulo de acionamento, o módulo para medições das variáveis externas, além de um módulo que mede as temperaturas e umidades no equipamento condicionador híbrido (medidas não utilizadas neste trabalho, mas que podem vir a ser úteis).

É importante observar que na sala de reunião há um isolamento térmico no piso, no teto e na parede que separa a sala e a área 3.

## 3.2 SENSORES UTILIZADOS

### 3.2.1 Sensor de temperatura e umidade SHT71

O SHT71 (figura 3.4) é um sensor digital de temperatura e umidade da empresa Sensirion<sup>®</sup> que possui comunicação digital, evitando que o sinal sofra interferência durante o envio das leituras, feita por meio de um protocolo de comunicação proprietário. Possui ainda tensão de alimentação compreendida na faixa de 2,4 V a 5,5 V e já vem calibrado de fábrica.

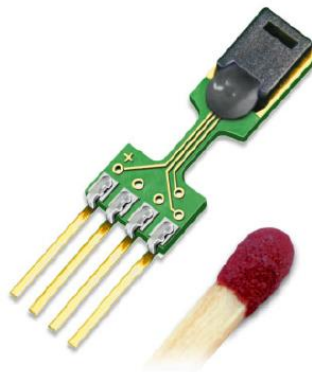


Figura 3.4 – Sensor de temperatura e umidade SHT71.

Possui ainda um conversor A/D de 14 bits (a resolução pode ser configurada) e um circuito de interface serial conforme pode ser observado em seu diagrama de blocos (figura 3.5).

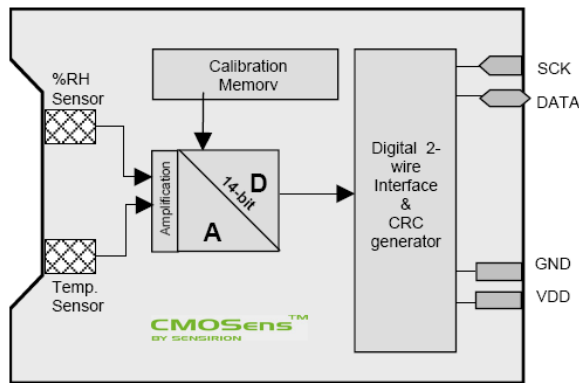


Figura 3.5 – Diagrama de blocos do sensor SHT71 (Sensirion A. G., 2009).

A comunicação é composta por uma série de etapas, em que o sinal em SCK é utilizado para sincronizar a comunicação entre o sensor e o microcontrolador, são elas: início de transmissão (figura 3.6); envio do endereço de três bits “000” (único permitido) e o comando desejado formado por cinco bits (tabela 3.1); recebimento do sinal de *acknowledge* (o SHT muda o estado de DATA para *low* após a oitava borda de descida de SCK e libera a linha após a nona borda de descida de SCK); espera da conversão (o SHT muda o estado de DATA para *low* e fica na espera da leitura por parte do microcontrolador); recebimento da leitura (dois bytes de medida e um de CRC checksum opcional), em que o microcontrolador reconhece cada byte mudando DATA para *low*; e término de comunicação (após o *acknowledge* do byte CRC. Caso não esteja usando o byte de checksum, o microcontrolador termina a comunicação após o byte menos significativo da medida). A figura 3.7 mostra um exemplo de medição de umidade relativa.

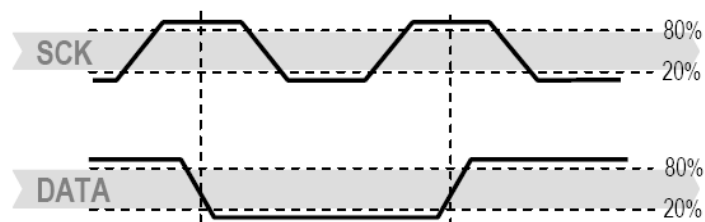


Figura 3.6 – Seqüência de início de transmissão (Sensirion A. G., 2009).

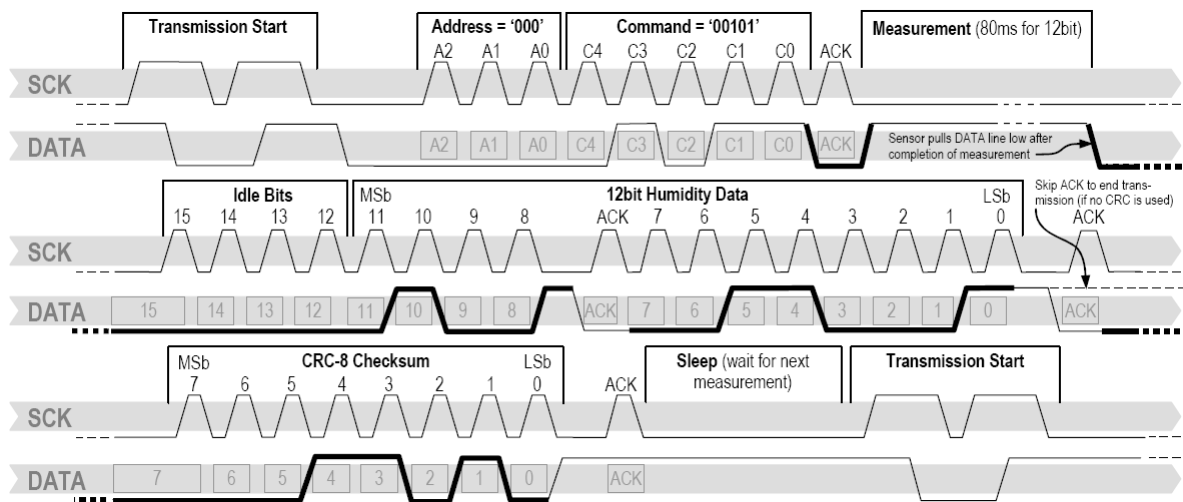


Figura 3.7 – Exemplo de seqüência de medição de umidade para o valor 0000’0100”0011’0001” = 35,50 % (Sensirion A. G., 2009).

Tabela 3.1 – Lista de comandos do SHT71.

<i>Comando</i>	<i>Código</i>
<i>Medir temperatura</i>	00011
<i>Medir umidade</i>	00101
<i>Ler registrador de status</i>	00111
<i>Escrever registrador de status</i>	00110
<i>Soft reset</i>	11110

Seguem alguns dados referentes à temperatura (tabela 3.2) e à umidade relativa para o sensor SHT71 (tabela 3.3).

Tabela 3.2 – Dados referentes à temperatura.

<i>Parâmetro</i>	<i>min</i>	<i>typ</i>	<i>max</i>	<i>Unidades</i>
<i>Resolução</i>	0,04	0,01	0,01	°C
<i>Precisão</i>		±0,4		bit (ADC)
<i>Faixa de operação</i>	-40		123,8	°C

Tabela 3.3 – Dados referentes à umidade relativa.

<i>Parâmetro</i>	<i>min</i>	<i>typ</i>	<i>max</i>	<i>Unidades</i>
<i>Resolução</i>	0,4	0,05	0,05	%
	8	12	12	bit (ADC)
<i>Precisão</i>		±3,0		%
<i>Faixa de operação</i>	0		100	%

Após a recepção do dado, realiza-se a conversão do sinal de saída a partir de um conjunto de fórmulas presentes no *datasheet* (Sensirion A.G., 2009).

### 3.2.2 Sensor de temperatura radiante média TY7321

O sensor de temperatura radiante média TY7321 (figura 3.8) da Yamatake Corporation® mede a radiação infravermelha no ambiente. Informações sobre temperatura infravermelha permitem aprimorar o conforto térmico dos ocupantes de um ambiente.



Figura 3.8 – Sensor Yamatake TY7321 (Yamatake Co., 2000).

Seu princípio de funcionamento reside no fato de todos os objetos irradiarem radiação infravermelha em relação a sua temperatura de superfície. Detectando o volume de energia desses raios permite a medição da temperatura radiante, convertendo a radiação infravermelha em um sinal de saída.

A tabela 3.4 apresenta algumas especificações do sensor TY7321.



Tabela 3.4 – Especificações do sensor TY7321.

<i>Item</i>	<i>Especificação</i>
<i>Alcance da medida</i>	Temperatura radiante: 5 °C a 50 °C
<i>Precisão da medida</i>	Temperatura radiante: $\pm 2$ °C a 25 °C
<i>Tensão de alimentação</i>	24 VAC $\pm 15$ %
<i>Frequência</i>	50/60 Hz $\pm 4$ %
<i>Sinal de saída</i>	1 VDC a 5 VDC

A ligação correta do sensor deve usar um transformador de 24 VAC separado de outros componentes e individualizado para cada sensor para que não venha a ocorrer nenhum dano.

### 3.2.3 Anemômetro Dwyer 641

O sensor de velocidade do ar escolhido foi o Dwyer Series 641 (figura 3.9), que permite medições precisas de velocidade do ar a várias temperaturas.



Figura 3.9 – Anemômetro Dwyer 641.

A conexão elétrica para esse sensor é bastante flexível, podendo ser alimentado com uma fonte de corrente contínua ou alternada. Seu sinal de saída é obtido em um *loop* de corrente (4-20 mA). A tabela a seguir nos mostra algumas de suas especificações.

Tabela 3.5 – Especificações do sensor Dwyer 641.

<i>Item</i>	<i>Especificação</i>
<i>Precisão</i>	3 % FE processo com gases; 0 a 50 °C 4 % FE processo com gases; -40 a 0 °C e 50 a 100 °C
<i>Resolução</i>	0,01 m/s
<i>Alcance (selecionável)</i>	1,25, 2,5, 5, 10, 15, 25, 50, 75 m/s
<i>Filtro de saída</i>	0,5 – 15 s
<i>Consumo de corrente</i>	300 mA max.
<i>Tensão de alimentação</i>	12-35 VDC, 10-16 VAC
<i>Sinal de saída</i>	4-20 mA
<i>Resistência do loop de corrente</i>	600 Ω max.

### 3.2.4 Piranômetro Global Water WE300

O Piranômetro escolhido para medição da radiação solar foi o WE300 (figura 3.10) da Global Water Instrumentation, Inc.



Figura 3.10 – Sensor de radiação solar WE300.

Segue na tabela 3.6 algumas especificações do sensor WE300.

Tabela 3.6 – Especificações do sensor de radiação solar WE300.

<i>Item</i>	<i>Especificação</i>
<i>Saída</i>	4-20 mA
<i>Alcance</i>	0 a 1500 W/m <sup>2</sup>
<i>Precisão</i>	±1 % <i>full scale</i>
<i>Tensão de operação</i>	10-36 VDC

O sensor utiliza um detector fotovoltaico altamente sensível para obter medições precisas, fornecendo um saída de 4-20 mA (*loop* de corrente) em uma configuração *two wire*.

### 3.3 MÓDULO EXTERNO

O módulo externo mensura as variáveis externas ao prédio, ou seja, a temperatura e umidade externas e o valor da radiação solar (figura 3.11).

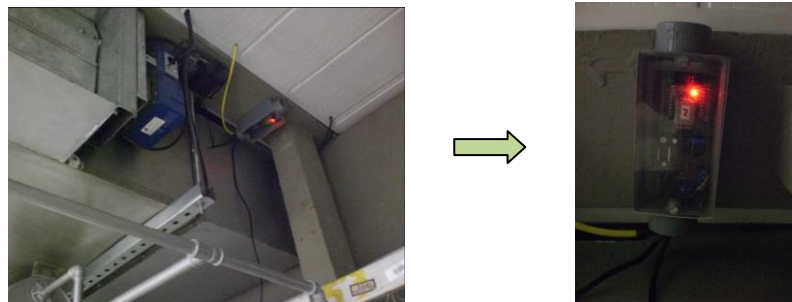


Figura 3.11 – Módulo externo e detalhe.

### 3.4 MÓDULO INTERNO

O módulo interno (figura 3.12) foi desenvolvido para mensurar os valores de temperatura e umidade após o sistema evaporativo e após o sistema convencional (split), além do valor da temperatura radiante média. Embora suas medidas não tenham sido usadas, elas foram coletadas para possibilitar uma posterior análise.



Figura 3.12 – Módulo interno.

### 3.5 MÓDULO ATUADOR

O módulo atuador é mostrado na figura 3.13, localizado ao lado do painel elétrico desenvolvido em Olmos (2009). Ele tem a função de acionamento dos relés de estado

sólido (TELETRONIC T2405Z-M) para ligar ou desligar o compressor e o *damper*, além de enviar ao módulo coordenador o *status* destes equipamentos. Esse SSR pode ser acionado com 3,3 V (tensão de alimentação do módulo *ZigBit*), ligando e desligando cargas alimentadas por 240 V e suportando correntes de até 5 A.



Figura 3.13 – Módulo atuador.

O *damper* é um equipamento que controla o fluxo de ar em entradas de ar externo e a vazão do ar de retorno.

A abertura e o fechamento do *damper* estão eletricamente associados ao ligamento e desligamento do compressor, ou seja, o comando de acionamento do compressor automaticamente liga o motor responsável por abrir o *damper*.

Ainda de acordo com o diagrama elétrico do ar-condicionado híbrido apresentado em Olmos (2009), o acionamento do compressor só é válido se o ventilador também for acionado (especificações no apêndice B).

### 3.6 MÓDULO COORDENADOR/GRAVADOR

O módulo coordenador/gravador (figura 3.14) é o único módulo em que se faz a gravação de programas nos módulos *ZigBit* presentes nos *breakouts* (utilizou-se também uma placa Meshbean2 apenas como nó coordenador).

O módulo coordenador é responsável por receber os valores mensurados dos módulos sensores e do módulo atuador e enviá-los ao MATLAB<sup>®</sup>.

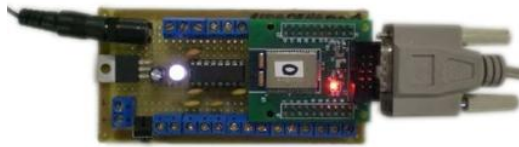


Figura 3.14 – Módulo coordenador/gravador.

Os dados mensurados e enviados pelos outros módulos são atualizados no computador de acordo com a recepção de qualquer novo valor.

### 3.7 MÓDULO MÓVEL E DEMAIS MÓDULOS SENSORES

Este módulo (figura 3.15) simula a posição de onde se mensura o conforto térmico e mensura as variáveis climáticas do índice PMV, criando as condições para a implementação do controle desse índice de conforto térmico.



Figura 3.15 – Módulo móvel (ambos lados).

Já os demais sensores (figura 3.16) medem as temperaturas e umidades na vizinhança, ou seja, na área 1, 2 e 3 da figura 3.3.



Figura 3.16 – Módulos sensores.

### 3.8 FUNCIONAMENTO DA REDE

A rede de sensores é composta pelos módulos coordenador, móvel, externo, interno, atuador e pelos demais módulos sensores.

O módulo coordenador realiza o maior número de tarefas na rede e seu funcionamento pode ser observado na figura 3.17.

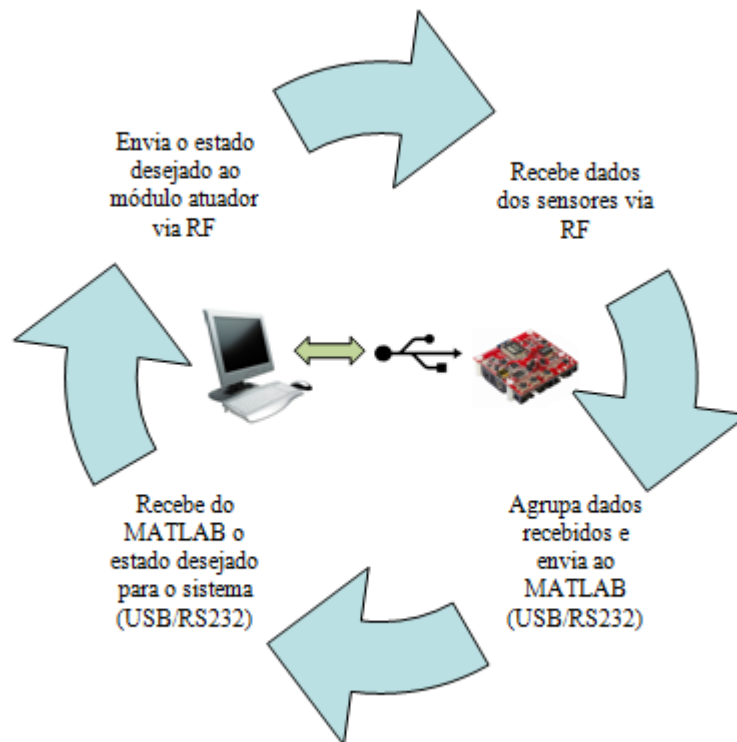


Figura 3.17 – Funcionamento do módulo coordenador.

Além de enviar e receber mensagens dos outros módulos, o módulo atuador também envia e recebe mensagens ao software MATLAB<sup>®</sup> através de comunicação serial (interface USB/RS232).

O MATLAB<sup>®</sup> envia pela interface serial, a cada 10 segundos, um número inteiro referente ao estado desejado para o sistema de atuação. Em muitos casos, esse estado não é modificado por um longo período de tempo, indicando que se deseja mantê-lo fixo. Desse modo, visando não sobrecarregar a rede com mensagens redundantes, o módulo coordenador compara o estado desejado (recebido via interface serial a cada 10 segundos) com o estado atual do módulo atuador (recebido do módulo atuador via RF) e só envia a mensagem ao atuador caso os estados sejam diferentes.

O módulo atuador tem a tarefa de ligar/desligar o sistema desejado, seja ele o ar-condicionado convencional (compressor e ventilador), o sistema evaporativo (ventilador e bomba d'água) ou ambos (sistema híbrido). Para isso, ele recebe uma mensagem do módulo coordenador referente ao estado desejado e em seguida aciona as saídas correspondentes através de três relés de estado sólido (SSR) correspondendo ao acionamento do ventilador, do compressor e da bomba d'água e, atualizadas as saídas, o módulo atuador envia seu estado ao coordenador (figura 3.18).

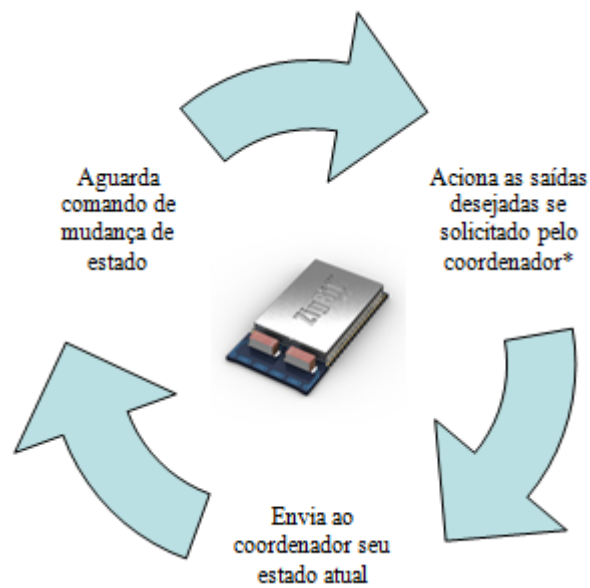


Figura 3.18 – Funcionamento do módulo atuador.

Os módulos sensores, externo e interno lêem, a cada dez segundos, os valores de seus respectivos sensores, envia um pacote de dados com tais medições ao módulo coordenador e entram em modo de *sleep*, visando economizar energia. Terminado o período de *sleep* (10 segundos), o módulo retorna do modo *sleep* e reinicia todo o processo (figura 3.19).

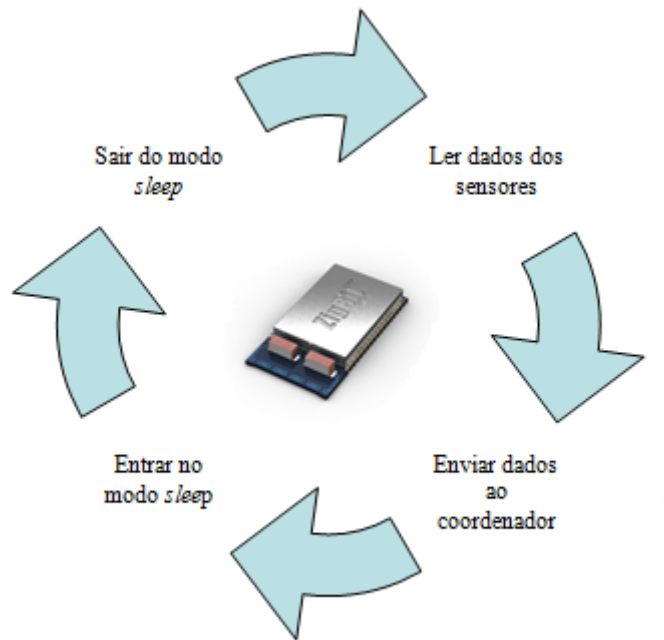


Figura 3.19 – Funcionamento dos demais módulos.

Para a configuração dos módulos, foram utilizados três arquivos principais do sistema *BitClout* (*lowpower.c*, *coordinator.c* e *enddevice.c*), com fluxo de programa orientado por estados.

O arquivo *lowpower.c* é a parte inicial comum para todos os módulos e é responsável por configurar a rede e determinar o funcionamento de cada módulo (figura 3.20).

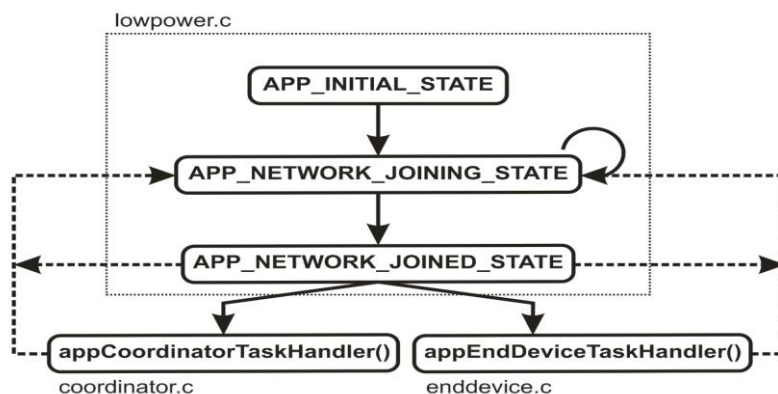


Figura 3.20 – Diagrama de estados do aplicativo embarcado (Queiroz e Azevedo, 2009).

O arquivo *coordinator.c* é a parte do aplicativo específica para o módulo coordenador da rede configurando os parâmetros de comunicação serial com o computador e de mensagens enviadas pela rede *ZigBee*. Já o arquivo *enddevice.c* é a parte do aplicativo específica para os módulos sensores e atuador.



Finalmente, a figura 3.21 nos dá uma idéia do posicionamento dos sensores.

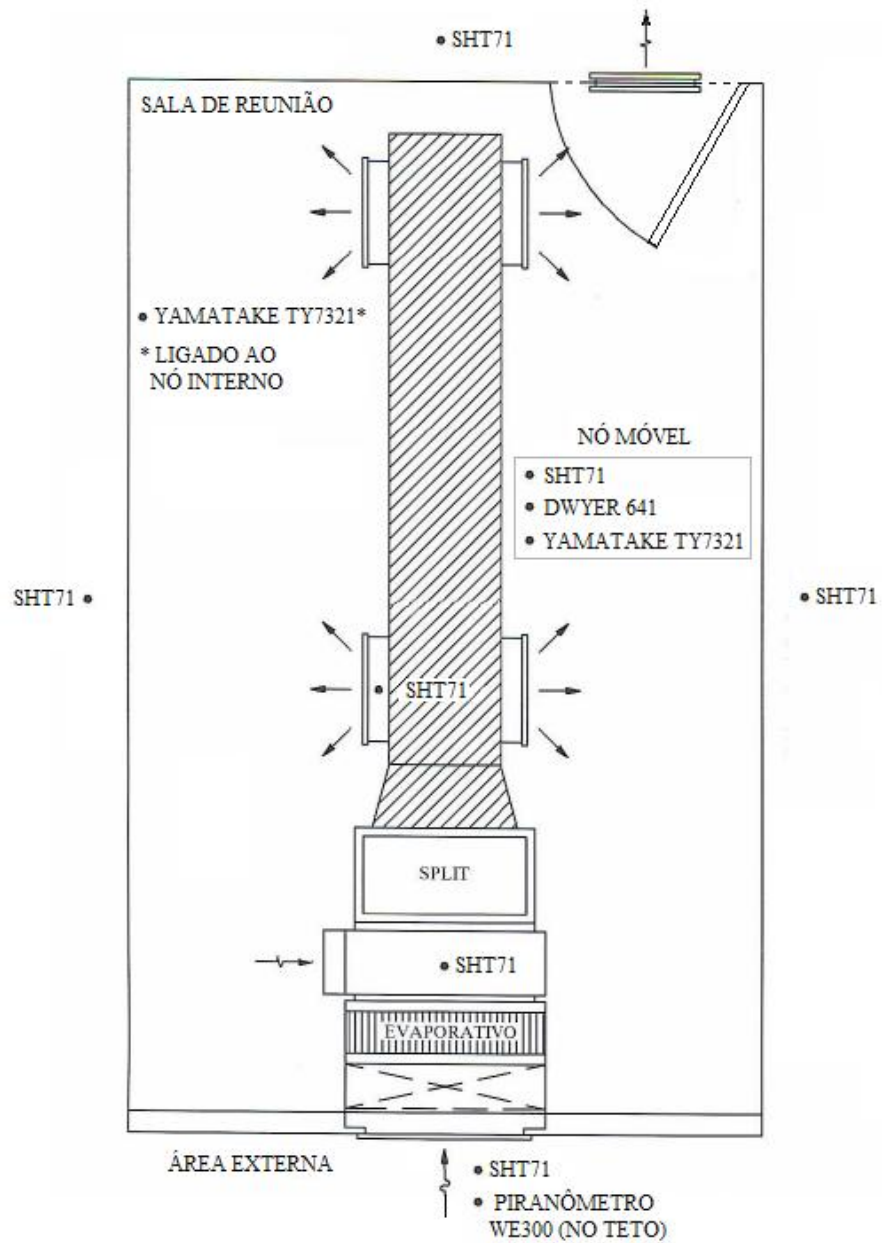


Figura 3.21 – Posicionamento dos sensores.

## 4. IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

O controle térmico de um ambiente predial pode ser, conforme dito anteriormente, um problema complicado se tanto o conforto quanto a economia de energia forem exigidos. A temperatura do ambiente depende da dinâmica térmica com a sua vizinhança, bem como da dinâmica térmica correspondente à atuação dos atuadores (ar-condicionado e aquecedores) sobre o ambiente controlado. Uma série de fatores, tais como fontes de calor presentes no ambiente (computadores e presença de pessoas) influenciam a sensação de conforto térmico e a demanda de energia. Levando em conta o fato de que processos térmicos são inerentemente de parâmetros distribuídos, o resultado é um sistema com múltiplas entradas, múltiplas saídas e uma intrincada interação entre as variáveis.

É importante salientar que não é desejado obter precisamente a temperatura em cada ponto do ambiente estudado, mas sim obter um modelo que represente suficientemente bem o comportamento da temperatura, considerando a contribuição das variáveis mais relevantes para empregá-lo no projeto de controladores mais eficazes, visando economia de energia e conforto térmico.

### 4.1 CAPTAÇÃO DOS DADOS

Foi utilizado no estudo um sistema implementado em MATLAB/*Simulink*<sup>®</sup> para captar os dados enviados pelos sensores e salvá-los para posterior análise. Utilizou-se o módulo *Query Instrument* para recebimento da informação, o bloco *To Sample* para separar um frame recebido pela interface USB/serial nas amostras referentes a cada uma das variáveis monitoradas, *To Instrument* para envio de dado ao nó atuador e os blocos *S-Function* *converte\_SHT* (temperatura e umidade) e *converte\_Rs* (radiação solar) para converter os dados brutos de entrada em seus valores finais. O modelo implementado para captura de dados é mostrado na figura 4.1. Foi feito também um bloco para o cálculo do índice PMV/PPD.

Dezessete variáveis são monitoradas, muitas das quais não são utilizadas no presente trabalho, mas que possibilitam um vasto leque de possibilidade para pesquisas futuras. Dentre elas, estão as temperaturas e umidades nas saídas dos condicionadores de ar (split dutável e evaporativo), a velocidade do ar e a temperatura radiante média na sala e as umidades em todos os ambientes (vizinhança e na sala).

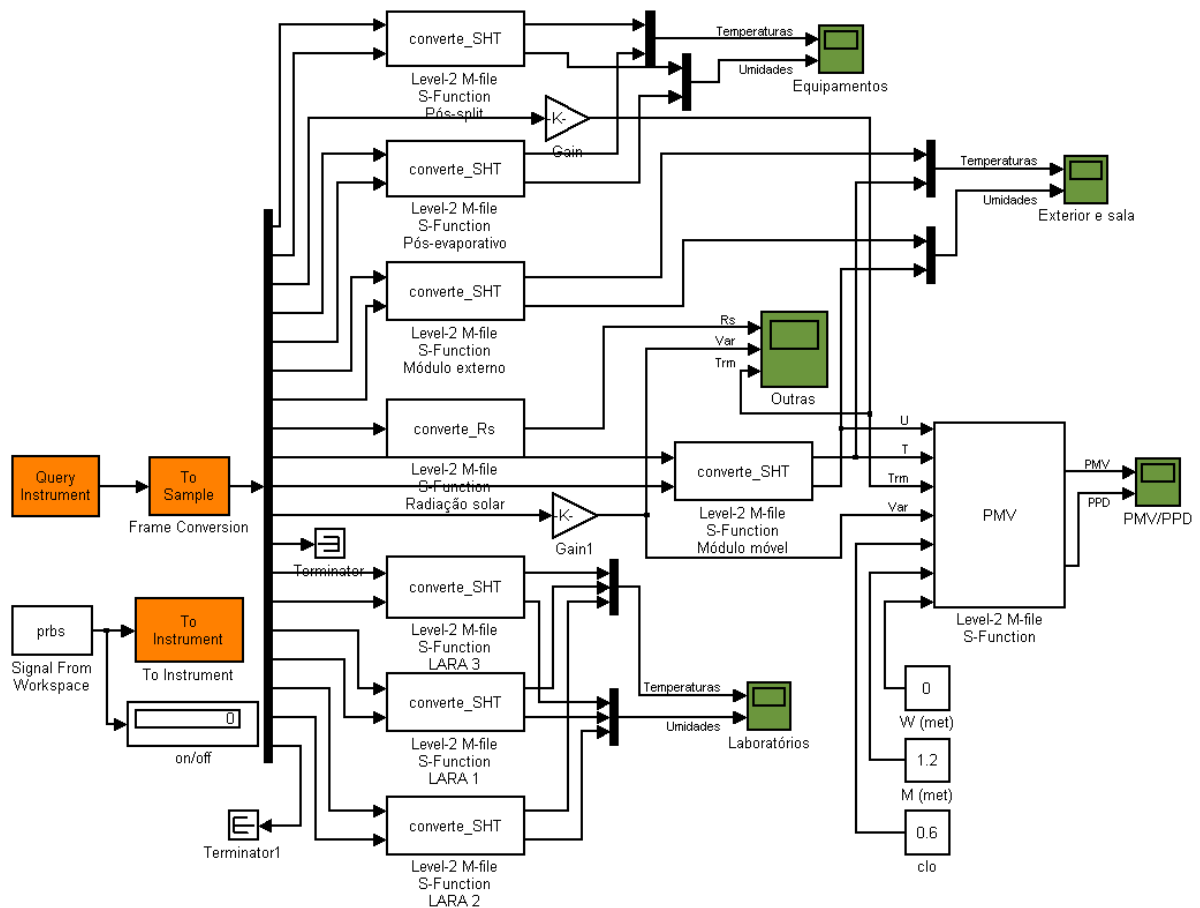


Figura 4.1 – Modelo para captação de dados.

Bauchspiess *et al.* (2006) propõem uma identificação estruturada por princípios fundamentais (*first-principles*) para controle preditivo de sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC), em que a idéia básica é a composição de um modelo pela adição das parcelas de fluxo de calor envolvidas na dinâmica térmica do ambiente. A identificação experimental utilizando o modelo de predição estruturado por princípios fundamentais foi obtida através de cooperação entre a Universidade de Brasília e a Universidade de Kaiserslautern, Alemanha.

O modelo estruturado proposto (figura 4.2) é construído usando também a ferramenta de modelamento, simulação e análise de sistemas dinâmicos MATLAB/Simulink® e a parede deve ser investigada para modelar a transferência de calor entre salas vizinhas.

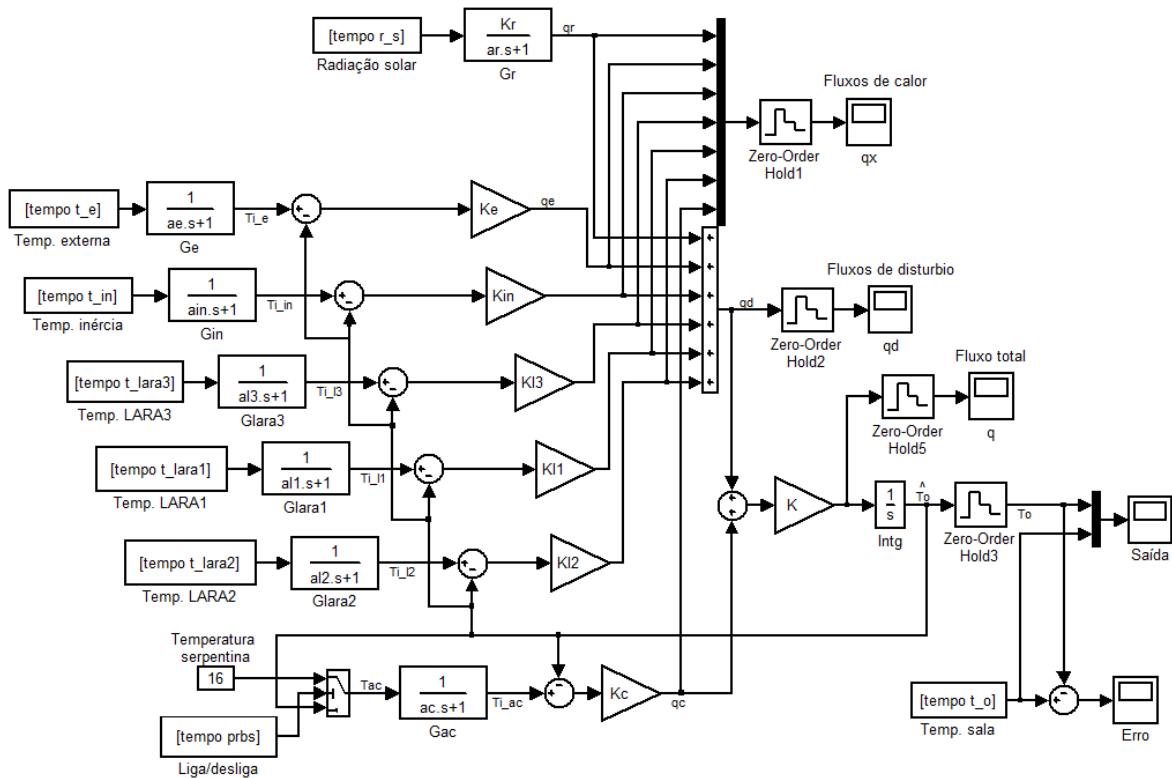


Figura 4.2 – Modelo da sala.

Fraisse *et al.* (2002) analisam diferentes tipos de paredes e propõe modelos análogos a circuitos elétricos  $RC$ . Há também a possibilidade de se usar modelos mais complexos de paredes compostas por materiais diferentes (1R2C, 3R4C, 3R2C), de modo a representar separadamente a diferente dinâmica do fluxo de calor por cada parte da parede (Fraisse *et al.*, 2002). Com o objetivo de simplificar o modelo construído, será empregado o modelo mais simples, 2R1C, assumindo assim um modelo de primeira ordem, assim como o modelo usado em Bauchspiess *et al.* (2006), Vieira e Wyant (2007) e Vieira *et al.* (2008). Nesse modelo (figura 4.3) são consideradas a capacitância térmica interna da parede,  $C_v$ , e dois elementos de condutividade térmica  $R$ .

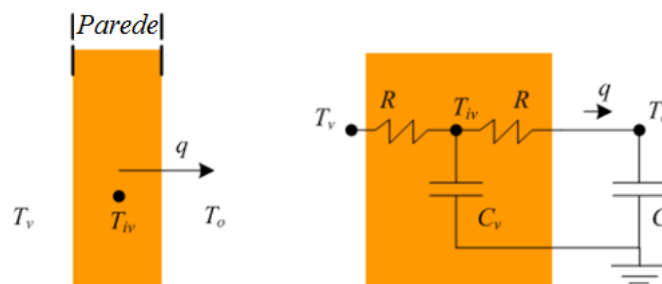


Figura 4.3 – Modelo da parede (adaptada de Bauchspiess *et al.*, 2006).

O fluxo de calor  $q$  entre duas salas vizinhas depende da diferença de temperatura  $T_v - T_o$ . A temperatura  $T_{iv}$  corresponde a um ponto fictício no meio da parede. As características  $R$  e  $C_v$  dependem do material, das dimensões e da forma como é construída a parede.

A equação (59) mostra uma função de transferência correspondente à transferência de calor entre salas vizinhas.

$$\frac{T_o(s)}{T_v(s)} = \frac{1}{as + 1} \quad (59)$$

Essa equação descreve um sistema de primeira ordem com ganho unitário e constante de tempo  $a = RC_v$ . O significado físico dessa estrutura, conforme foi dito, é a representação da forma não imediata da propagação do calor entre salas vizinhas, usada para modelar as paredes. Do mesmo modo, o resfriamento promovido pelo ar condicionado também é modelado como um processo de primeira ordem com ganho unitário, em que a constante de tempo desse processo refere-se à dinâmica do processo de convecção.

O ar-condicionado pode ser modelado como um dispositivo que tem  $(16 - T_o)$  como entrada. A primeira temperatura refere-se a do ar resfriado que é fornecido pelo ar-condicionado quando ligado (fixada como a menor temperatura observada caso o sistema permanecesse ligado), enquanto a segunda é a própria temperatura da sala.

Como a entrada do ar-condicionado é binária (equipamento ligado/desligado), tem-se um sistema não-linear e dependente do ponto de operação. Para evitar que isso ocorra e para que a identificação do ar-condicionado seja linear, considera-se  $(16^\circ\text{C} - T_o)$  como entrada quando ligado e  $T_o$  quando desligado.

Há ainda o termo referente à inércia térmica do prédio. Sua presença no modelamento pode ser justificada como um termo de correção, que leva o sistema a um ponto de operação.

## 4.2 METODOLOGIA DE IDENTIFICAÇÃO

Uma característica interessante da abordagem de identificação estruturada por princípios fundamentais é a possibilidade de se adicionar as parcelas individuais de fluxo de calor, permitindo que a identificação dos parâmetros do sistema seja feita de forma separada, em etapas.

A primeira etapa consiste na identificação do sistema fazendo a aquisição dos dados das temperaturas com o equipamento de ar-condicionado desligado para determinar apenas os

parâmetros envolvidos no fluxo de calor entre salas e o ambiente externo. Nessa etapa, seria interessante utilizarmos apenas dados de períodos noturnos, a fim de desconsiderar o efeito da radiação solar. No entanto, seriam necessárias transições suaves entre dados representativos de períodos noturnos distintos. Assim, essa etapa é realizada com o conjunto de dados completo.

Na segunda etapa são realizados testes com o ar-condicionado atuando sobre o sistema. Além das temperaturas internas e externas das salas, faz-se a aquisição do sinal do ar-condicionado. A estratégia para geração de um sinal de entrada se baseia na utilização de uma seqüência binária pseudo-aleatória (PRBS) gerada usando o MATLAB<sup>®</sup>. De posse dos parâmetros estimados no passo anterior e dos novos dados, os parâmetros ar-condicionado são então calculados.

O sinal PRBS se aproxima, em termos espectrais, de um ruído branco e é comumente empregado em identificação de sistemas. Nos testes realizados, em ambas as etapas, o período de amostragem é de 10 segundos.

Virk e Loveday (1994) destacam a necessidade de uma excitação de entrada rica em termos espectrais ao longo de um período de tempo extenso para que a identificação seja coerente. Sua aquisição de dados durou três dias.

Diferentes técnicas podem ser usadas na produção de um modelo dinâmico a ser usado para prever o comportamento térmico da sala. A figura 4.4 nos mostra um conjunto de dados de aquisição, cuja coleta se iniciou por volta das 14h00.

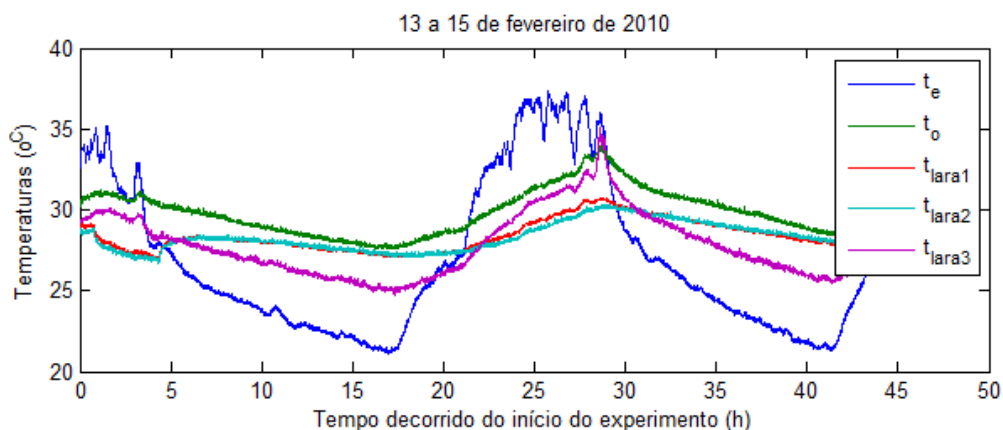


Figura 4.4 – Conjunto de identificação típico sem ar-condicionado.

A figura 4.5 nos mostra um conjunto de dados de aquisição típico para a identificação, cuja coleta se iniciou por volta das 18h00 (C, deslocado no gráfico, denota o estado do ar-condicionado, *on/off*).

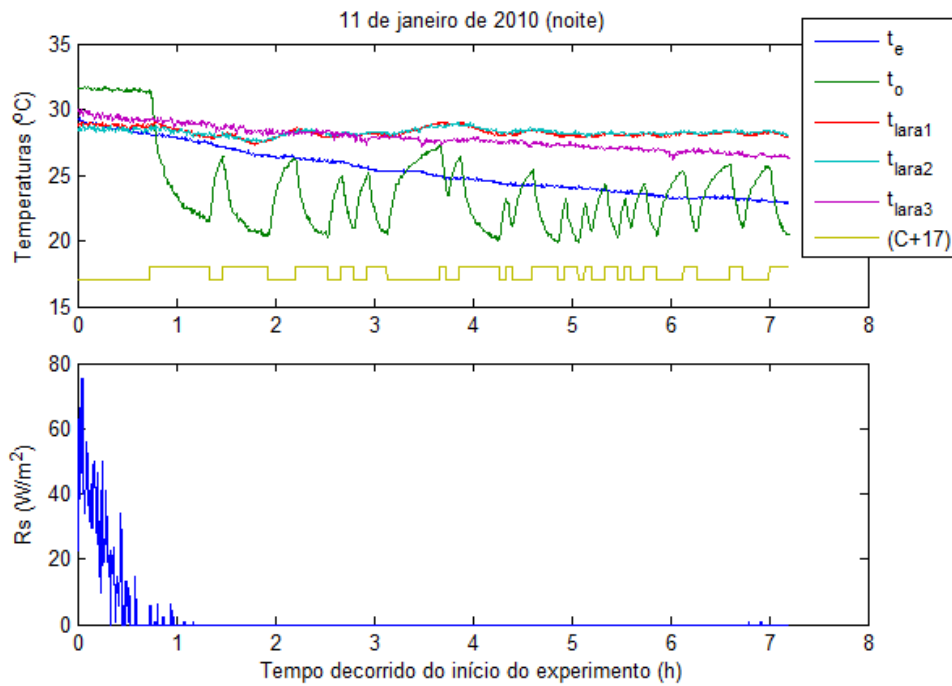


Figura 4.5 – Dados com o uso do ar-condicionado (pela noite).

Em relação à radiação solar, nota-se que muitas medidas estão demasiadamente ruidosas, conforme pode ser visto na figura 4.6.

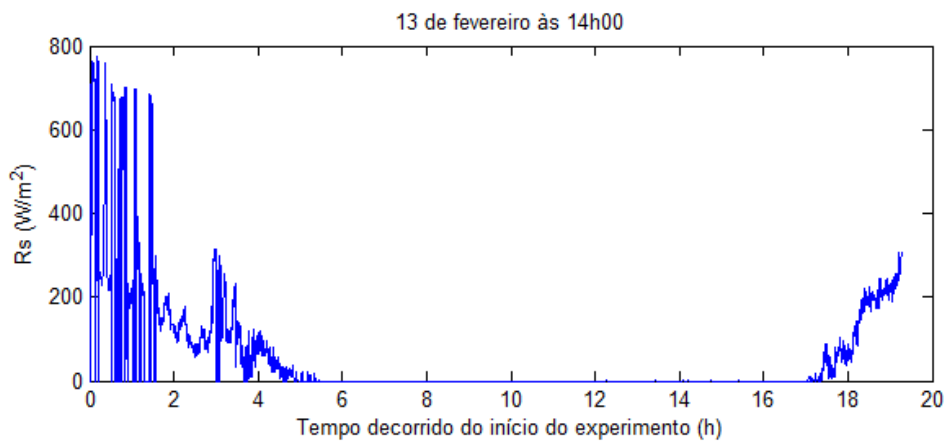


Figura 4.6 – Radiação solar.

É fato que há algum tipo de problema, seja na obtenção das medidas ou no código do programa embarcado, que deve ser observado futuramente.

Conforme já fora mencionado, outras variáveis além de temperaturas (figura 4.7), tais como umidade (figura 4.8), foram obtidas, possibilitando um futuro estudo sobre suas influências no ambiente.

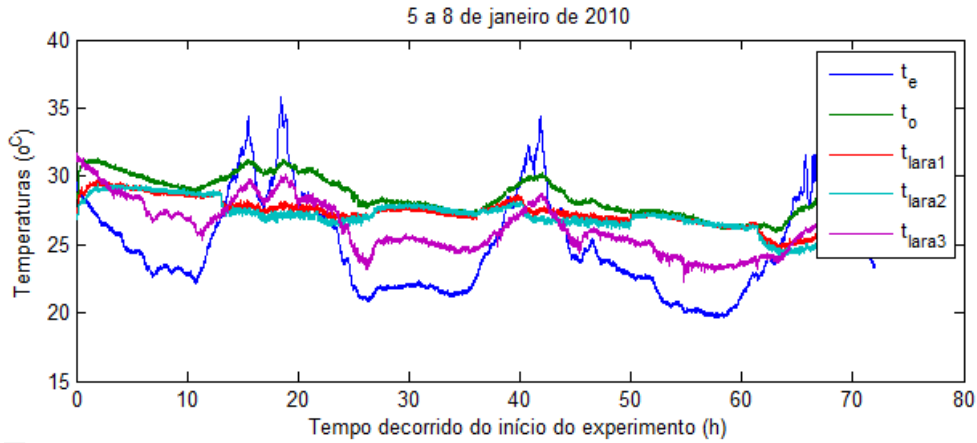


Figura 4.7 – Exemplo de conjunto de temperaturas obtidas.

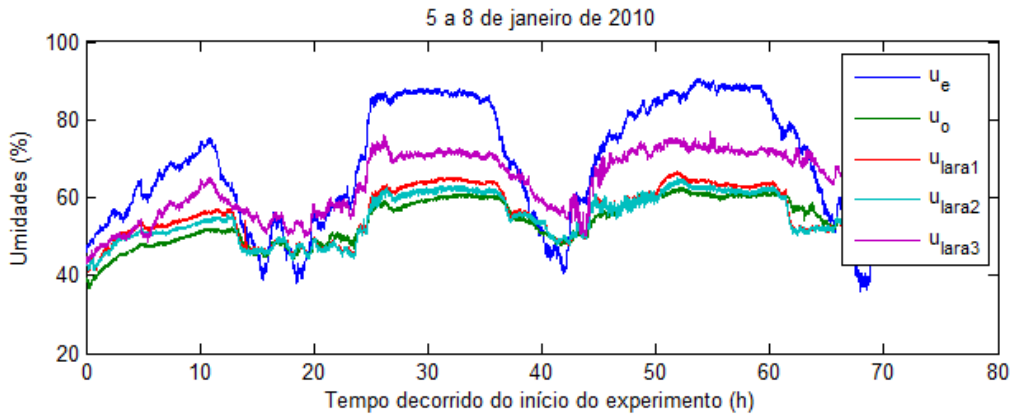


Figura 4.8 – Exemplo de conjunto de umidades obtidas.

Para obter um modelo de predição são, então, examinadas algumas abordagens, uma baseada em uma identificação linear com múltiplas entradas (identificação caixa preta), uma por identificação estruturada por princípios fundamentais (*first-principles modelling*) e outra por método de filtragem estocástica.

#### 4.2.1 Abordagem linear MISO

Nesta abordagem, as matrizes no espaço de estados ( $A, B, C, D, E$ ) dadas pela equação (60) são ajustadas para se ajustar ao conjunto de treinamento minimizando o erro quadrático médio. Desse modo,

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Ee \\ y = Cx + Du \end{cases}, \quad (60)$$



onde  $\mathbf{x}$  é o vetor de estados,  $\mathbf{u}$  é o vetor de entrada,  $\mathbf{e}$  é um ruído do processo e  $\mathbf{y}$  a saída (temperatura da sala).

Usando seis entradas,  $\mathbf{u} = [t_{lara3} \ t_{lara1} \ t_{lara2} \ t_e \ t_{in} \ t_c]^T$ , onde  $t_c$  é a temperatura efetiva aplicada na entrada do canal do ar-condicionado,  $t_{in}$  é a temperatura de inércia (prédio), tida como a média da temperatura da sala, e as demais são referentes às temperaturas na vizinhança da sala (figura 4.8). Não utilizou-se a radiação solar, visto que os a maioria dos dados estão problemáticos. Além disso, são removidas as médias de cada vetor de entrada.

A função *n4sid* do MATLAB<sup>®</sup> permite o uso de múltiplas variáveis de entrada para estimar um modelo em espaço de estados a partir dos dados adquiridos e utiliza métodos de subespaço (Poshtan e Mojallali, 2005). Algoritmos de identificação por subespaço sempre consistem de dois passos. O primeiro faz uma projeção de certos subespaços gerados pelos dados para achar uma estimativa da matriz de observabilidade estendida e/ou uma estimativa dos estados do sistema desconhecido. O segundo passo retorna as matrizes do sistema pela matriz de observabilidade estendida ou pelos estados estimados.

Os parâmetros informados à função são: entradas, saída, período de amostragem, e ordem do sistema desejada.

Para o conjunto de dados obtidos no dia 20 de janeiro de 2010 presente na figura 4.9, cuja coleta se iniciou às 19h28, conseguiu-se os resultados mostrados na figura 4.10 e figura 4.11 (C, deslocado no gráfico, denota o estado do ar-condicionado, *on/off*).

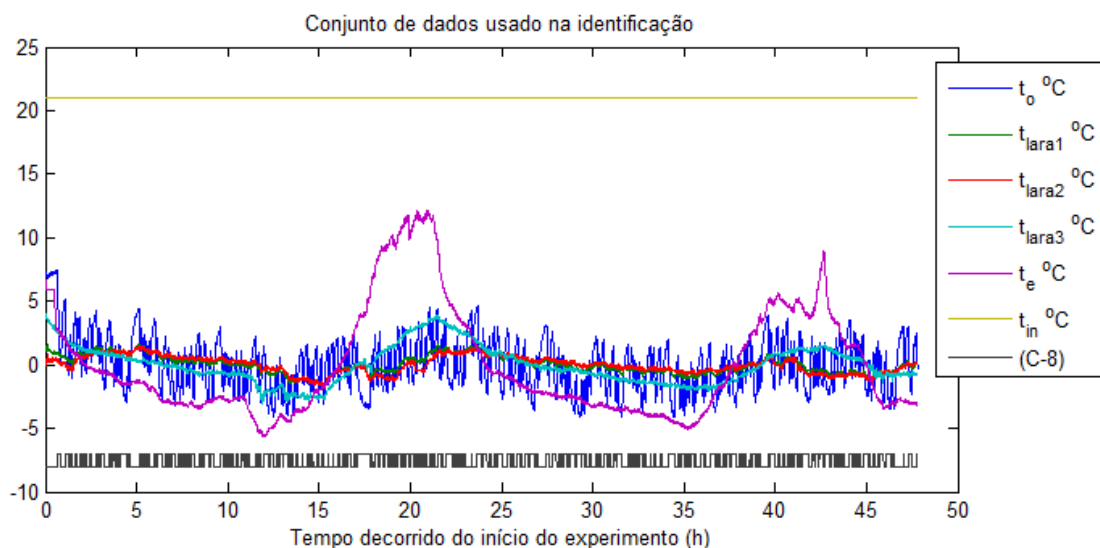


Figura 4.9 – Dados usados na identificação com o *N4SID*.

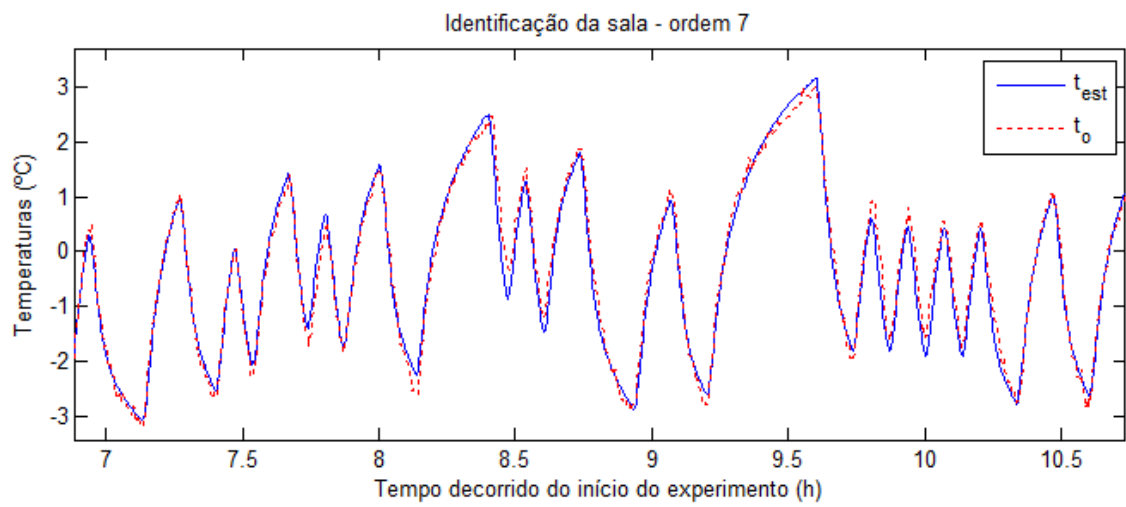
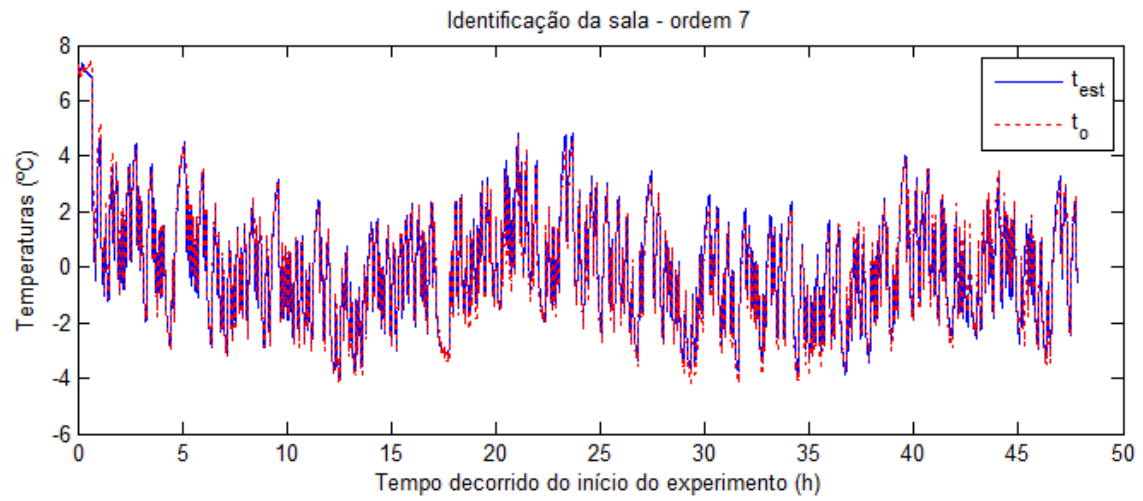


Figura 4.10 – Resultado da identificação pelo *N4SID* e detalhe.

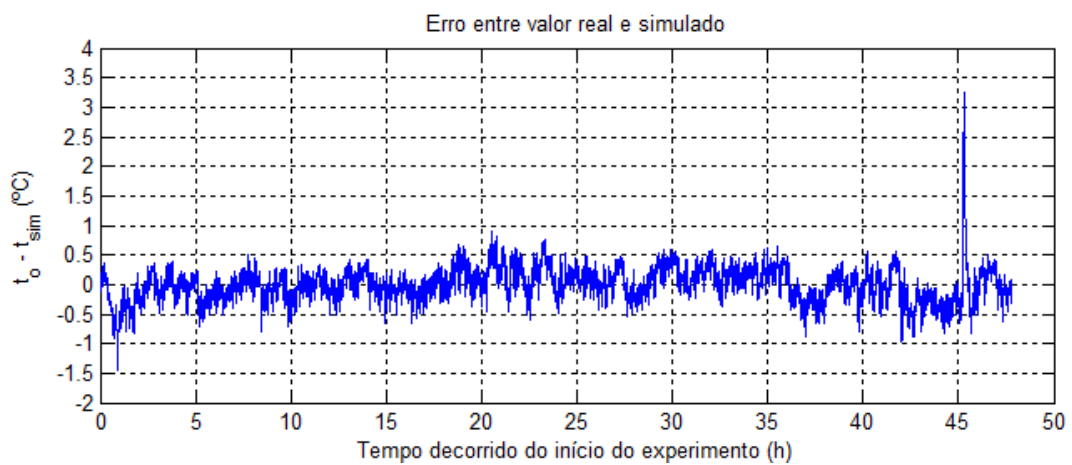


Figura 4.11 – Resultado da identificação pelo *N4SID*.

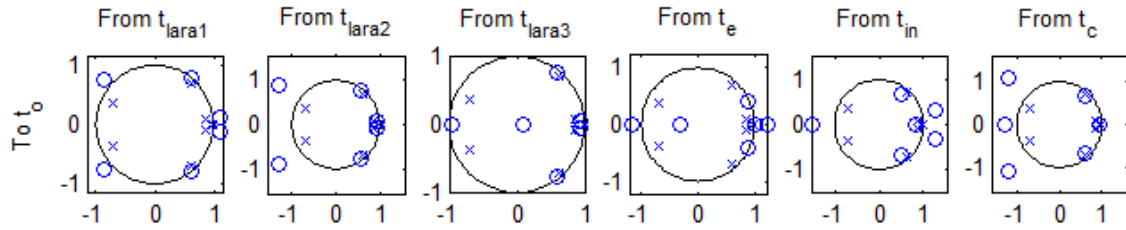


Figura 4.12 – Mapa de pólos e zeros para o sistema MISO com 6 entradas.

Observa-se na figura 4.12 a presença de pólos complexos e zeros de fase não-mínima, não compatíveis com um processo físico, já que em um processo térmico a temperatura em malha aberta não oscila.

#### 4.2.2 Identificação estruturada por princípios fundamentais (*first-principles*)

Nesta abordagem, as diferentes contribuições do fluxo de calor podem ser somadas, permitindo a identificação de parâmetros separada para cada canal individual, conforme dito anteriormente.

A figura 4.13 mostra o modelo da sala montado conforme estrutura para identificação por princípios fundamentais.

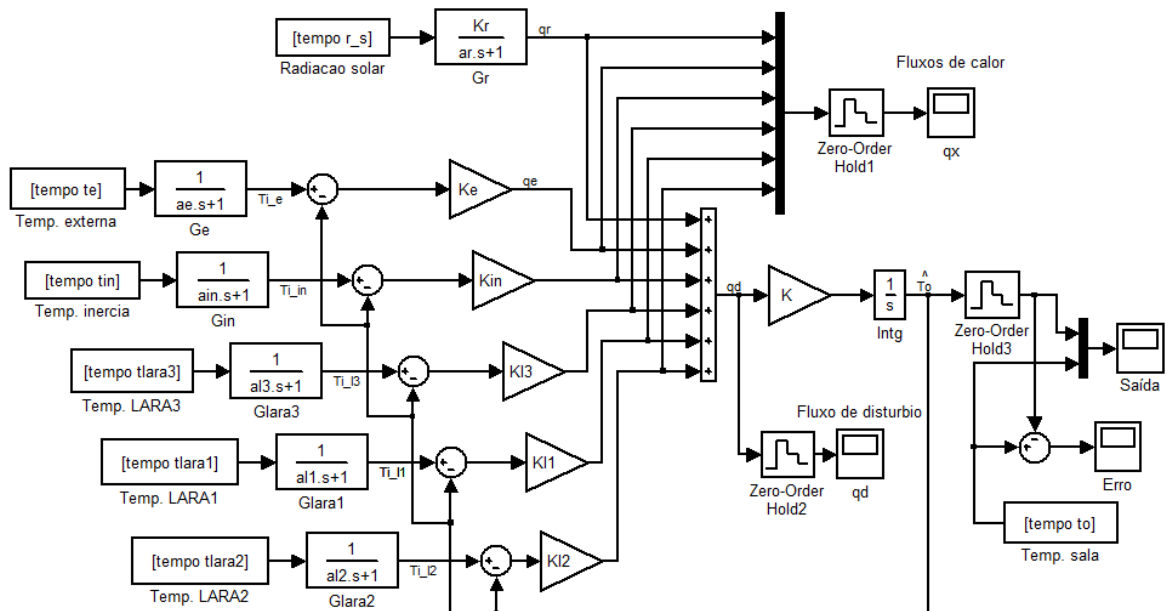


Figura 4.13 – Modelo da sala sem ar-condicionado.

Aplicando a fórmula de ganho de Mason ao sistema da figura 4.13, tem-se para o canal da temperatura externa  $t_e$ :

$$\frac{T_o(s)}{T_e(s)} = \frac{\frac{K_e K}{(a_e s + 1) s}}{1 + \frac{K_e K}{s} + \frac{K_{in} K}{s} + \frac{K_{l3} K}{s} + \frac{K_{l1} K}{s} + \frac{K_{l2} K}{s}} \quad (61)$$

Logo,

$$\frac{T_o(s)}{T_e(s)} = \frac{\frac{K_e K}{(a_e s + 1) s}}{1 + \frac{K}{s} (K_e + K_{in} + K_{l3} + K_{l1} + K_{l2})} \quad (62)$$

Reorganizando os termos, obtêm-se as funções de transferência de cada componente a seguir:

- Temperatura externa

$$\frac{T_o(s)}{T_e(s)} = \frac{\frac{K_e K}{K(K_e + K_{in} + K_{l3} + K_{l1} + K_{l2})}}{\left( \frac{1}{K(K_e + K_{in} + K_{l3} + K_{l1} + K_{l2})} s + 1 \right) (a_e s + 1)} \quad (63)$$

- Temperatura de inércia

$$\frac{T_o(s)}{T_{in}(s)} = \frac{\frac{K_{in} K}{K(K_e + K_{in} + K_{l3} + K_{l1} + K_{l2})}}{\left( \frac{1}{K(K_e + K_{in} + K_{l3} + K_{l1} + K_{l2})} s + 1 \right) (a_{in} s + 1)} \quad (64)$$

- Temperatura sala vizinha (LARA3):

$$\frac{T_o(s)}{T_{l3}(s)} = \frac{\frac{K_{l3} K}{K(K_e + K_{in} + K_{l3} + K_{l1} + K_{l2})}}{\left( \frac{1}{K(K_e + K_{in} + K_{l3} + K_{l1} + K_{l2})} s + 1 \right) (a_{l3} s + 1)} \quad (65)$$

- Temperatura sala vizinha (LARA1):

$$\frac{T_o(s)}{T_{l1}(s)} = \frac{\frac{K_{l1}K}{K(K_e + K_{in} + K_{l3} + K_{l1} + K_{l2})}}{\left(\frac{1}{K(K_e + K_{in} + K_{l3} + K_{l1} + K_{l2})}\right)^{s+1}}(a_{l1}s + 1) \quad (66)$$

- Temperatura sala vizinha (LARA2)

$$\frac{T_o(s)}{T_{l2}(s)} = \frac{\frac{K_{l2}K}{K(K_e + K_{in} + K_{l3} + K_{l1} + K_{l2})}}{\left(\frac{1}{K(K_e + K_{in} + K_{l3} + K_{l1} + K_{l2})}\right)^{s+1}}(a_{l2}s + 1) \quad (67)$$

Vê-se que a função de transferência de qualquer entrada para  $T_o$  é de segunda ordem. Um dos pólos é oriundo do correspondente bloco de ganho unitário no caminho direto, enquanto o segundo pólo, representando fisicamente a inércia térmica da sala, é dado pela combinação do ganho  $K$  da sala com o ganho de cada parcela de fluxo de calor envolvida no sistema.

Primeiramente busca-se obter uma aproximação para as constantes de tempo das funções de primeira ordem ( $G_r$ ,  $G_e$ ,  $G_{in}$ ,  $G_{lara3}$ ,  $G_{lara1}$ ,  $G_{lara2}$ ) nos ramos de entrada (figura 4.13). Para tal, estimam-se funções tendo como entrada a variável de interesse e como saída a temperatura da sala utilizando a ferramenta gráfica de identificação de sistemas *ident* do MATLAB<sup>®</sup>.

É importante ressaltar que é feito um pré-processamento dos dados, ou seja, são removidas as médias de cada vetor de entrada de modo a levar o sistema em torno de um ponto de operação. Não foram removidas, no entanto, tendências de primeira ordem em virtude de tomarmos geralmente medições de cerca de três dias, não sendo, assim, necessário.

Usando como entrada apenas a temperatura externa no *ident*, estimam-se funções com dois pólos (P2); dois pólos e um zero (P2Z); dois pólos e um atraso (P2D); dois pólos, um zero e um atraso (P2DZ); três pólos e um zero (P3Z); e três pólos, um zero e um atraso (P3DZ). Para o conjunto de dados da figura 4.14, cuja coleta se iniciou às 17h50, os resultados são mostrados na figura 4.15, onde *Best Fits* é o resultado de uma normalização realizada pela *toolbox* de identificação de sistemas, que resulta em 100% quando o modelo se ajusta

perfeitamente ao dado de saída (não é o que procuramos inicialmente ao considerar entradas individuais, por exemplo).

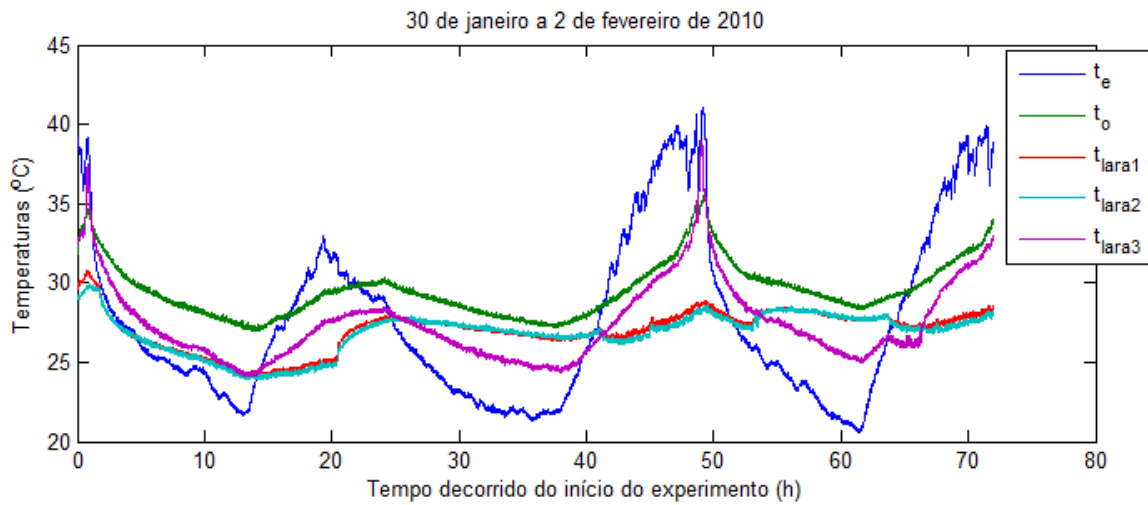


Figura 4.14 – Conjunto de dados utilizado.

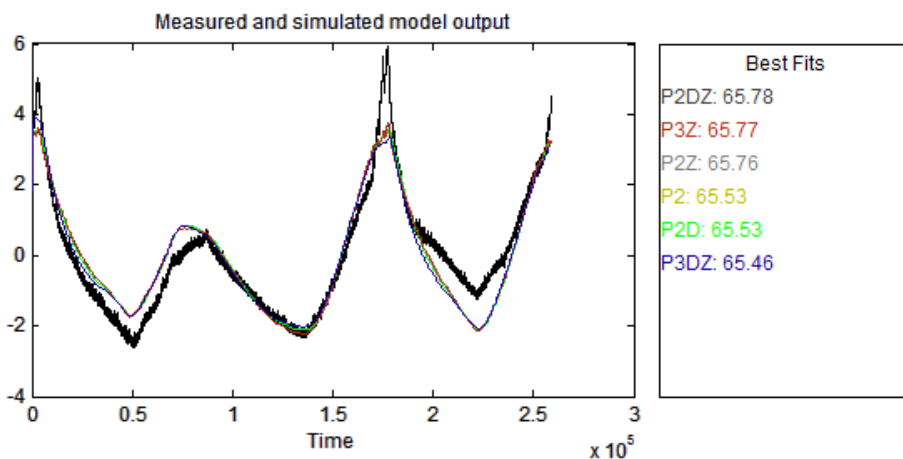


Figura 4.15 – Saídas dos modelos estimados para  $t_e$ .

Em princípio é de se esperar que um modelo com apenas dois pólos (P2) seja o mais adequado (pela fórmula de Mason). Ao observar os resultados, no entanto, verifica-se que seu pólo mais rápido (da ordem de  $10^{-3}$  s), que em princípio seria uma aproximação para a constante de tempo  $a_e$ , não possui significado físico (um sistema térmico predial nunca responderá tão rapidamente).

Na verdade, é de se esperar que o sistema não possa ser explicado com a aplicação de apenas um estímulo na entrada. Tendo em vista que uma entrada como a temperatura externa, por exemplo, é capaz de influenciar os demais ambientes, fica clara a presença de

influências em paralelo no sistema, de modo que modelos com a presença de um zero possam ser levados em conta. Isso pode ser visto a seguir a partir da aplicação da fórmula de Mason para dois ramos em paralelo (com  $T_e$  e  $T_{laral}$ ):

$$\frac{T_o(s)}{T_e(s)} = \frac{\left( \frac{1}{(a_e s + 1)} + \frac{1}{(a_{laral} s + 1)} \right) \frac{K \cdot K_e}{s}}{1 + \frac{K_e K}{s} + \frac{K_{in} K}{s} + \frac{K_{l1} K}{s} + \frac{K_{l2} K}{s} + \frac{K_{l3} K}{s}} \quad (68)$$

Portanto

$$\frac{T_o(s)}{T_e(s)} = \frac{\left( \frac{a_{laral} s + a_e s + 2}{(a_e s + 1)(a_{laral} s + 1)} \right) \frac{K K_e}{s}}{1 + \frac{K}{s} (K_e + K_{in} + K_{l1} + K_{l2} + K_{l3})} \quad (69)$$

Resultando em

$$\frac{T_o(s)}{T_e(s)} = \frac{((a_{laral} + a_e) s + 2) \frac{K K_e}{K(K_e + K_{in} + K_{l1} + K_{l2} + K_{l3})}}{\left( \frac{1}{K(K_e + K_{in} + K_{l1} + K_{l2} + K_{l3})} s + 1 \right) (a_e s + 1)(a_{laral} s + 1)} \quad (70)$$

Para a temperatura externa, por exemplo, obteve-se pela função *ident* da *toolbox* de identificação do MATLAB<sup>®</sup> o seguinte modelo:

$$\frac{T_o(s)}{T_e(s)} = \frac{0,39518(1 + 2004,7s)}{(11392s + 1)(329,21s + 1)} \quad (71)$$

A constante de tempo obtida,  $a_e = 329$  s (pouco mais que cinco minutos), é plausível com a sala modelada, em princípio.

Prosseguindo o raciocínio, segue-se o mesmo procedimento para todas as entradas do sistema de modo a determinar uma estimativa das constantes de tempo e ganhos.

Observa-se também que para grande parte dos modelos estimados com três pólos e um zero, existe um pólo muito lento (com um constante de tempo da ordem de semanas), que deve ser desconsiderado.

De posse desses dados e utilizando o modelo, aplica-se apenas uma entrada por vez, de modo a obter a influência de cada temperatura de entrada individualmente. Na figura 4.16, por exemplo, aplica-se apenas a temperatura externa (as demais entradas são nulas), permitindo obter a variação da temperatura causada por  $t_e$ . Com isso, uma nova identificação relacionando agora a entrada  $t_e$  com a variação que ela causa na saída pode ser feita posteriormente, podendo gerar melhorias no modelo.

Na primeira etapa do processo não havia como calcular os fluxos de calor gerados, já que não tínhamos estimativas das constantes envolvidas nos fluxos,  $K_e$ ,  $K_{in}$ ,  $K_{l3}$ ,  $K_{l1}$ ,  $K_{l2}$ . Agora é possível tomar o fluxo de distúrbio  $q_d$  e subtrair dos demais para obter o fluxo gerado pela entrada em questão (figura 4.16). A partir da integração desse valor é que se obtém a variação de temperatura gerada.

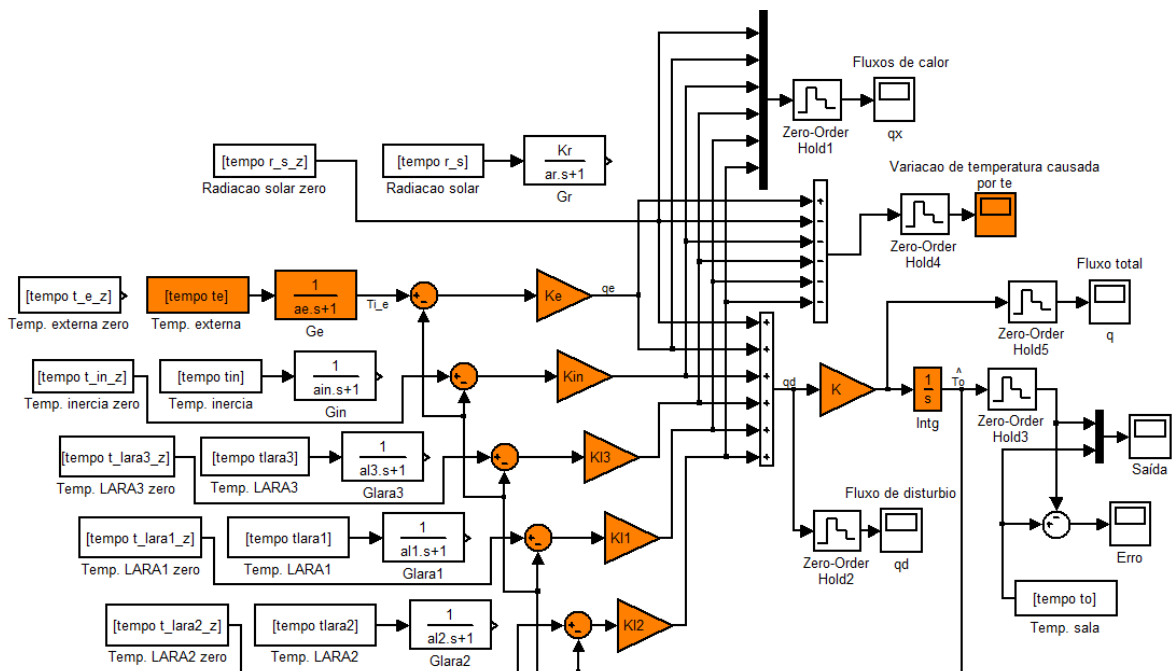


Figura 4.16 – Exemplo de aplicação de apenas uma entrada ao modelo.

A saída do sistema, como resultado da aplicação de  $t_e$ , é mostrada na figura 4.17.



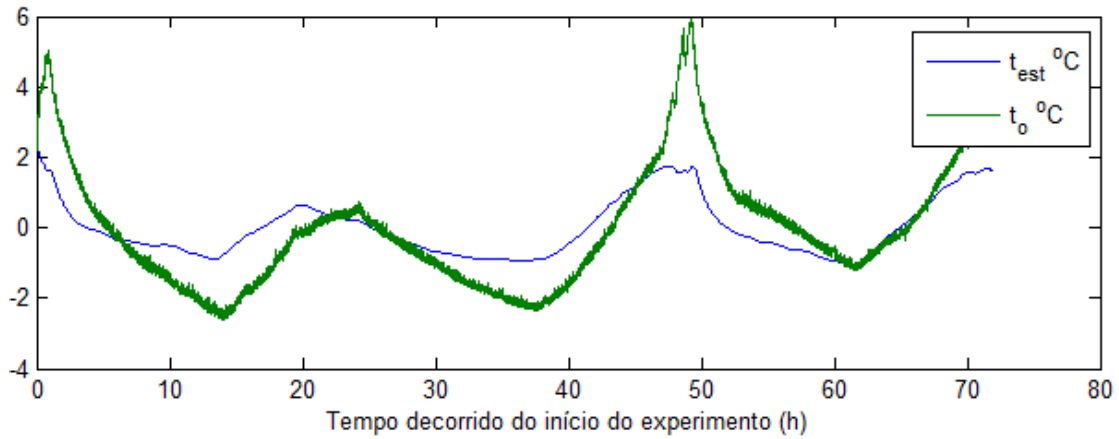


Figura 4.17 – Temperatura estimada pelo modelo aplicando apenas  $t_e$ .

Obtidos os parâmetros com a aplicação de cada entrada individual, a saída resultante da aplicação de todas as entradas (com os parâmetros obtidos e alguns ajustes) é mostrada na figura 4.18.

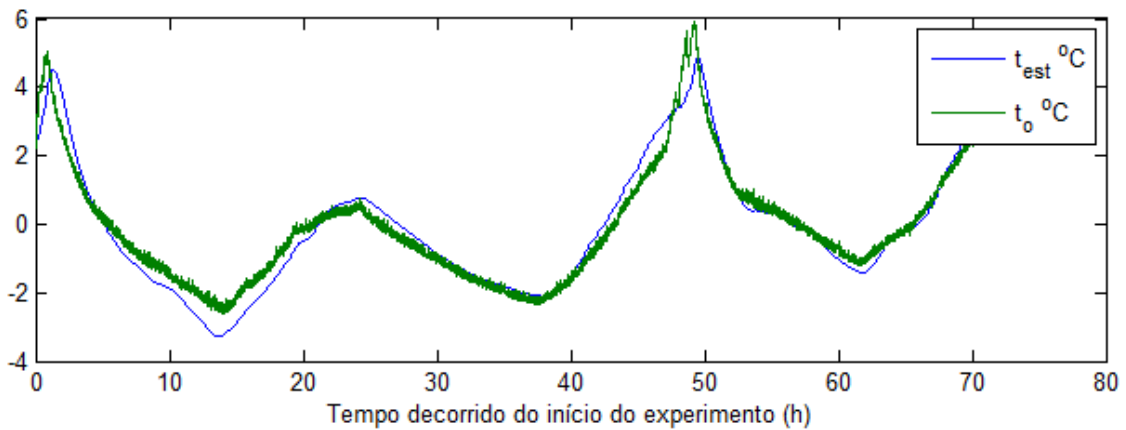


Figura 4.18 – Saída resultante do ajuste.

Pode-se agora realizar identificações relacionando a variação de temperatura causada por cada entrada individual, considerar ramos em paralelo na identificação, utilizar o conhecimento que se tem sobre o sistema (em relação aos ganhos envolvidos no fluxo, visto que uma parede é maior que a outra) e assim por diante com o objetivo de refinar o modelo sem o ar-condicionado; não é de se esperar, no entanto, que a cada iteração no modelo se obtenha um resultado melhor. A inclusão do ar-condicionado também pode ser investigada, resultando na adição de mais um canal ao modelo, ou seja, mais uma parcela de energia envolvida (seção 2.1.5).

O que se verifica é que na falta de uma ferramenta de otimização que permita estimar os parâmetros, o processo é feito de forma iterativa. Tem-se o gradiente do erro avaliado em uma superfície de muitas dimensões, de modo que não é certo que haja convergência para um mínimo a cada passo. Mostra-se, contudo, que é possível obter um modelo que mantém significado físico, permitindo decompor as parcelas de fluxo. Caso haja alguma mudança no sistema, não é necessário proceder todo o processo de identificação novamente, como no caso de identificação caixa preta.

### 4.2.3 Abordagem por filtragem estocástica

A partir do modelo estruturado simplificado da figura 4.19, é possível obter um modelo no espaço de estados tomando  $\mathbf{x} = [t_o \ t_{ie} \ t_{iv} \ t_{ic}]^T$ , em que  $t_{ie}$ ,  $t_{iv}$  e  $t_{ic}$  representam as temperaturas nas saídas das funções de transferência de primeira ordem e a entrada  $t_v$  representa a temperatura média na vizinhança da sala no interior do prédio (adotada como 23 °C).

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} = \mathbf{Cx} \end{cases}, \quad (72)$$

onde

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -K(K_e + K_v + K_c) & K_e K & K_v K & K_c K \\ 0 & -1/a_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/a_v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/a_c \end{bmatrix}, \quad (73)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1/a_e & 0 & 0 \\ 0 & 1/a_v & 0 \\ 0 & 0 & 1/a_c \end{bmatrix}, \quad (74)$$

$$\mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (75)$$

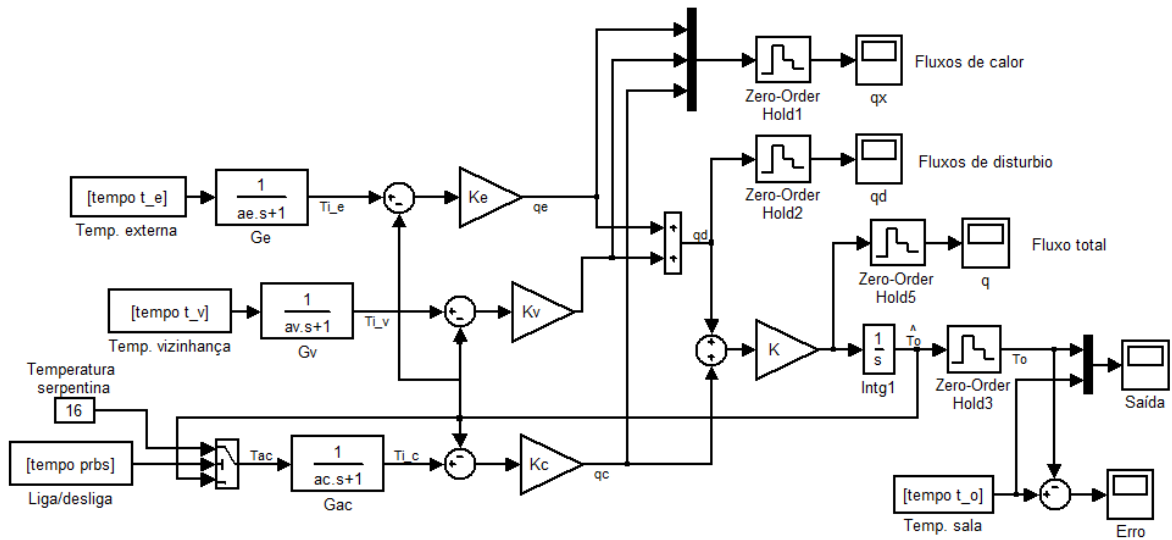


Figura 4.19 – Modelo *first-principles* simplificado.

O modelo no espaço de estados obtido é contínuo, logo se procede uma discretização. Tomando os termos  $-K(K_e+K_v+K_c) = a_1$ ,  $K_eK = b_1$ ,  $K_vK = b_2$ ,  $K_cK = b_3$ ,  $-1/a_e = a_2$ ,  $-1/a_v = a_3$  e  $-1/a_c = a_4$ , tem-se

$$\mathbf{A}_d = e^{AT} = \begin{bmatrix} e^{a_1T} & \frac{b_1(e^{a_2T} - e^{a_1T})}{a_2 - a_1} & \frac{-b_2(e^{a_3T} - e^{a_1T})}{a_3 - a_1} & \frac{b_1(e^{a_4T} - e^{a_1T})}{a_4 - a_1} \\ 0 & e^{a_2T} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{a_3T} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{a_4T} \end{bmatrix} \quad (76)$$

em que  $T$  é o período de amostragem e

$$\mathbf{B}_d = \left( \int_0^T e^{A\tau} d\tau \right) \mathbf{B} \quad (77)$$

Segue

$$\mathbf{B}_d = \begin{bmatrix} \frac{-1+e^{a_1T}}{a_1} & \frac{-b_1(-a_2+a_1-e^{a_2T}a_1+e^{a_1T}a_2)}{(a_2-a_1)a_2a_1} & \frac{-b_2(-a_3+a_1-e^{a_3T}a_1+e^{a_1T}a_3)}{(a_3-a_1)a_3a_1} & \frac{-b_3(-a_4+a_1-e^{a_4T}a_4+e^{a_1T}a_1)}{(a_4-a_1)a_4a_1} \\ 0 & \frac{-1+e^{a_2T}}{a_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1+e^{a_3T}}{a_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1+e^{a_4T}}{a_4} \end{bmatrix} \mathbf{B} \quad (78)$$

Assim,

$$\mathbf{B}_d = \begin{bmatrix} \frac{b_1(-a_2 + a_1 - e^{a_2^T} a_1 + e^{a_1^T} a_2)}{(a_2 - a_1)a_1} & \frac{b_2(-a_3 + a_1 - e^{a_3^T} a_1 + e^{a_1^T} a_3)}{(a_3 - a_1)a_1} & \frac{b_3(-a_4 + a_1 + e^{a_4^T} a_4 - e^{a_1^T} a_1)}{(a_4 - a_1)a_1} \\ 1 - e^{a_2^T} & 0 & 0 \\ 0 & 1 - e^{a_3^T} & 0 \\ 0 & 0 & 1 - e^{a_4^T} \end{bmatrix} \quad (79)$$

O vetor de entrada é dado por  $\mathbf{u} = [t_e \ t_v \ t_c]^T$ . Deseja-se aqui estimar estados e parâmetros, utiliza-se, assim, um vetor de estados aumentado, ou seja,

$$\mathbf{x} = [t_o \ t_{ie} \ t_{iv} \ t_{ic} \ a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ b_1 \ b_2 \ b_3]^T \quad (80)$$

Segue também que

$$\mathbf{A}_{da} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & \mathbf{0}_{4 \times 7} \\ \mathbf{0}_{7 \times 4} & \mathbf{I}_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{a_1^T} & \frac{b_1(e^{a_2^T} - e^{a_1^T})}{(a_2 - a_1)} & -\frac{b_2(-e^{a_3^T} + e^{a_1^T})}{(a_3 - a_1)} & -\frac{b_3(e^{a_4^T} - e^{a_1^T})}{(a_4 - a_1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{a_2^T} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{a_3^T} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{a_4^T} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (81)$$

e

$$\mathbf{B}_{da} = \begin{bmatrix} \frac{b_1(-a_2 + a_1 + e^{a_1^T} a_2 - e^{a_2^T} a_1)}{(a_2 - a_1)a_1} & \frac{b_2(-a_3 + a_1 + e^{a_1^T} a_3 - e^{a_3^T} a_1)}{(a_4 - a_1)a_1} & \frac{b_3(-a_4 + a_1 + e^{a_1^T} a_4 - e^{a_4^T} a_1)}{(a_4 - a_1)a_1} \\ 1 - e^{a_2^T} & 0 & 0 \\ 0 & 1 - e^{a_3^T} & 0 \\ 0 & 0 & 1 - e^{a_4^T} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (82)$$

Observa-se que a equação do processo é uma função não-linear do estado aumentado (estados com a inclusão dos parâmetros a serem estimados). Utilizamos, então, o filtro de Kalman estendido. Nota-se também a presença de uma restrição no sistema, um dos novos estados (parâmetro  $a_1$ ) é uma combinação linear de outros ( $b_1, b_2, b_3$ ).

Calculam-se as matrizes Jacobianas

$$A_{k-1} = \frac{\partial f(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1})}{\partial \hat{\mathbf{x}}_{k-1}} \text{ e } C_k = \frac{\partial h(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})}{\partial \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}} \quad (83)$$

e procede-se o processo de filtragem (Aguirre, 2007).

Para o conjunto de dados da figura 4.20, cuja coleta se iniciou às 19h28, obtêm-se a resposta mostrada na figura 4.21.

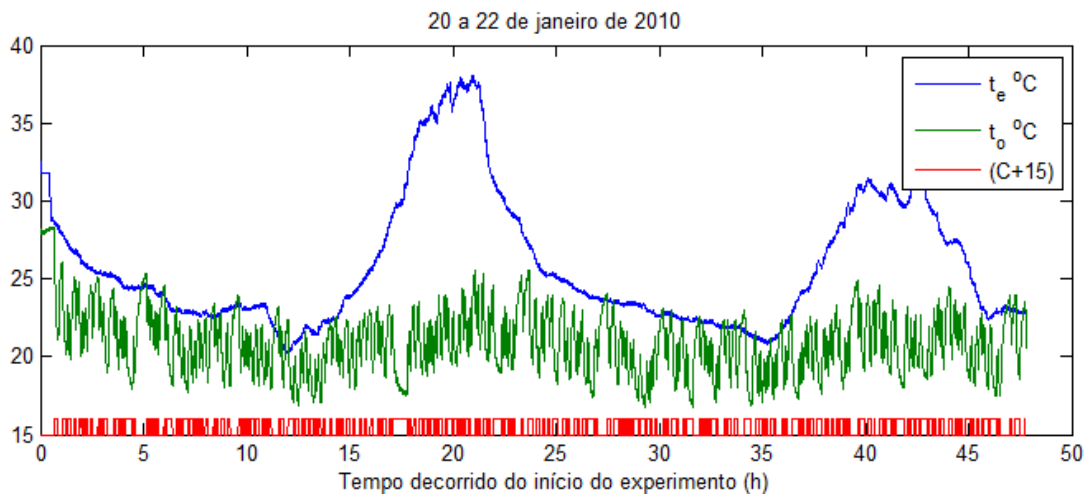


Figura 4.20 – Conjunto de dados usado na implementação do FKE.

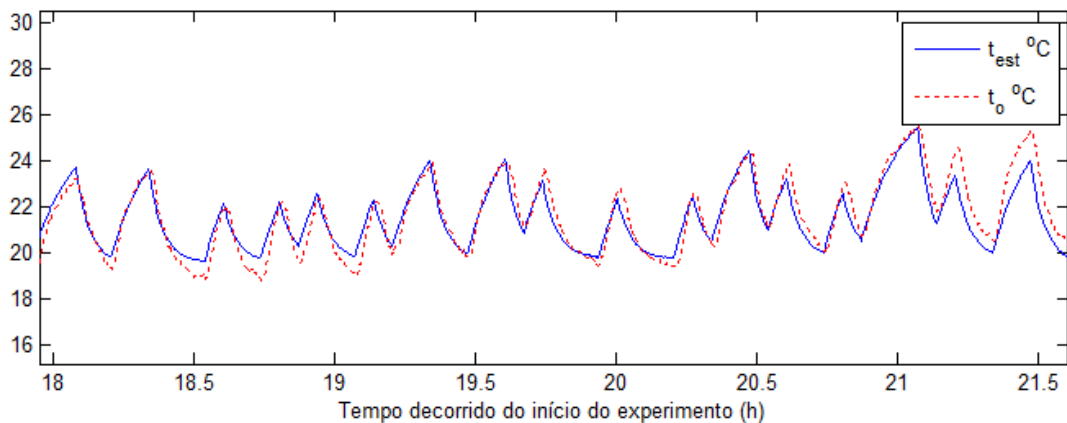


Figura 4.21 – Resultado do uso do FKE na estimação.

O ajuste dos termos iniciais é de suma importância no processo, em especial a covariância do processo,  $Q_k$ . Tomaram-se como estimativa inicial para  $x_0$  e  $P_0$  valores obtidos nas simulações iterativas. Ocorre que se a estimativa de estado inicial não for muito boa, o filtro pode divergir.

O erro entre o valor real e o estimado é mostrado na figura 4.22.

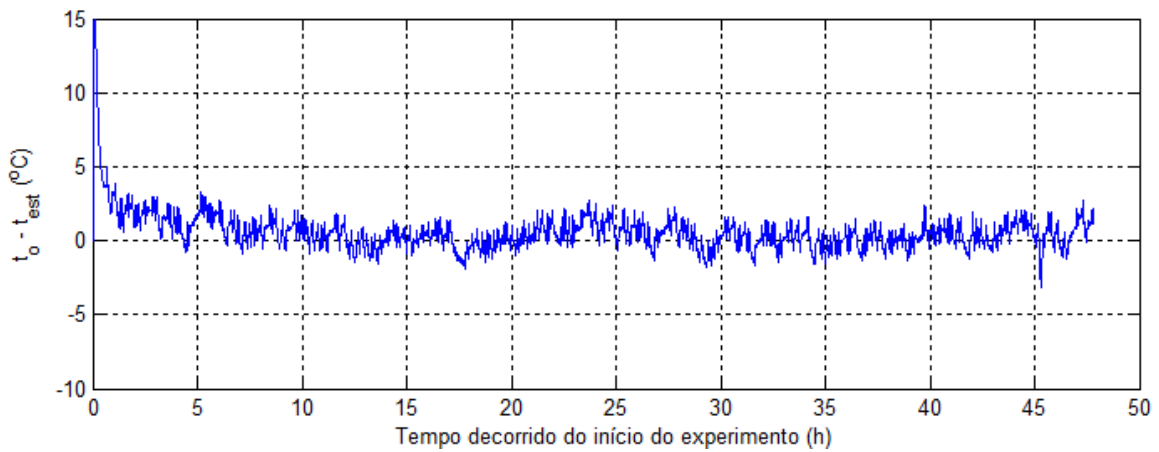


Figura 4.22 – Erro entre valor real e estimado pelo FKE.

Utilizando os parâmetros obtidos (tabela 4.1) e os dados mostrados na figura 4.23, cuja coleta se iniciou às 21h15, foi feita a validação do modelo.

Tabela 4.1 – Parâmetros de modelo obtidos.

$i$	$e$	$v$	$c$
$a_i$	220	321.3	175.4
$K_i$	0.035	0.095	0.241

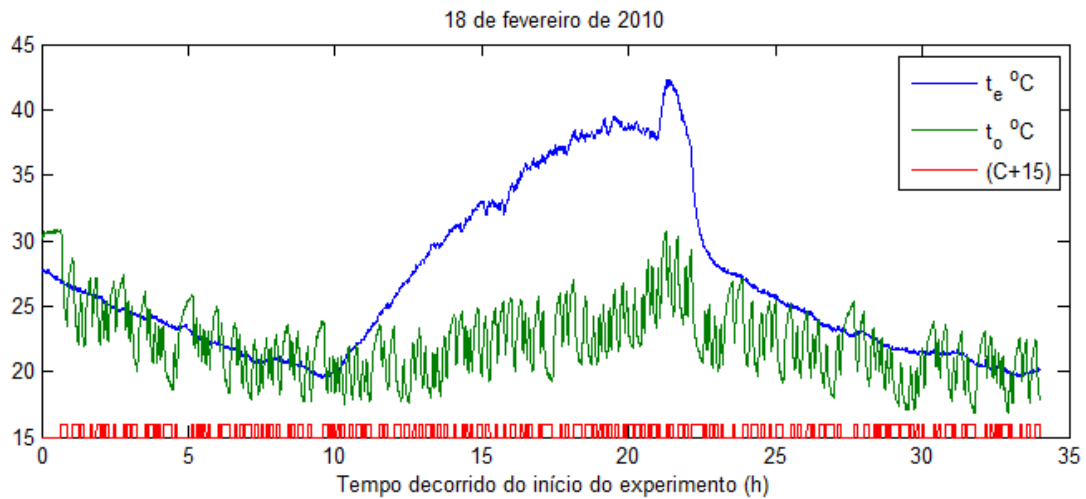


Figura 4.23 – Conjunto de dados para validação.

Já a figura 4.24 mostra o resultado da validação, enquanto os fluxos são exibidos na figura 4.25 para ilustrar seu comportamento.

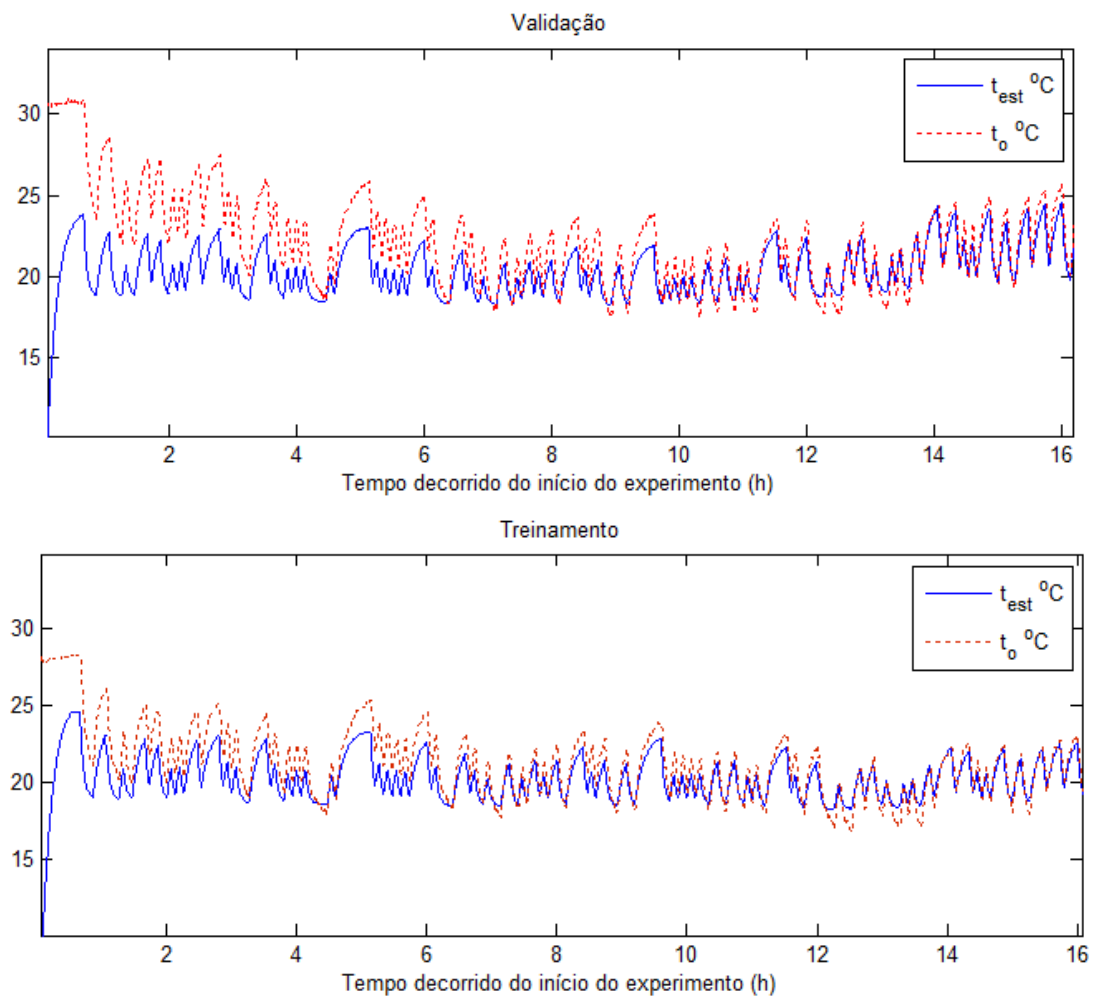


Figura 4.24 – Resultados de validação e treinamento, respectivamente.

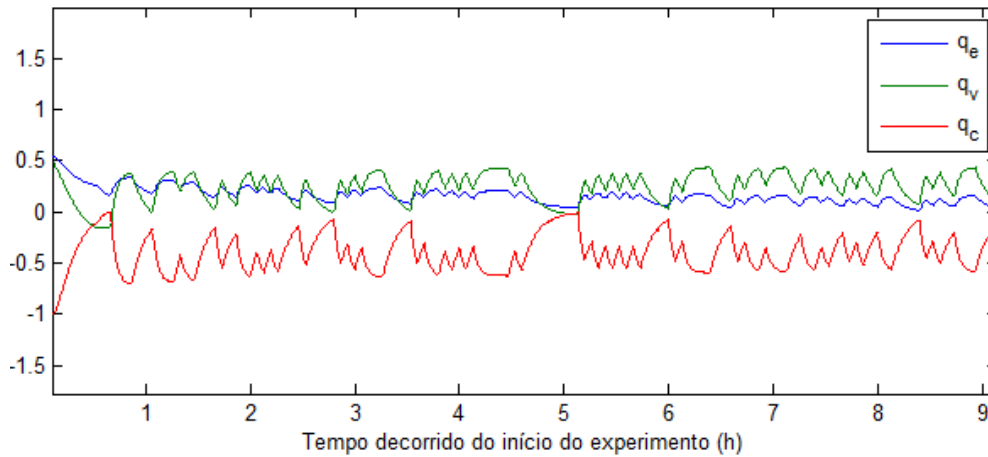


Figura 4.25 – Parcelas de fluxo de energia finais obtidas na estimação.

Observa-se na figura 4.24 que inicialmente o erro entre o valor real da temperatura e o valor estimado é grande, visto que o sistema encontra-se fora de sua faixa de operação. Para a validação, por exemplo, a temperatura inicial da sala estava em torno de 31 °C. Não foi considerada também a influência da radiação solar. Pela figura 4.26, é possível verificar sua influência, conforme pode ser observado após cerca de vinte horas decorridas do início do experimento (por volta das cinco horas da tarde). É durante esse período que o sol incide diretamente na sala, visto que a sala fica virada para o noroeste (figura 3.3).

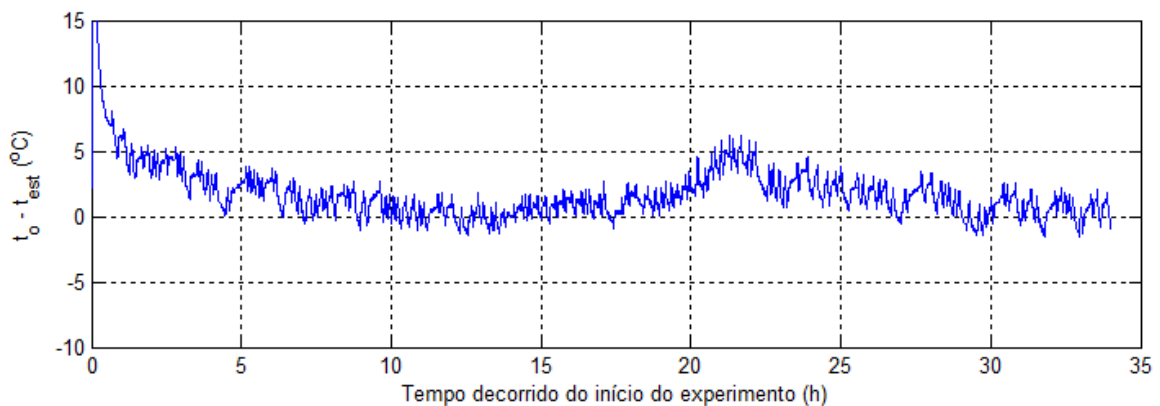


Figura 4.26 – Erro entre o valor real e o estimado na validação.

Nota-se que temos um processo de predição em malha aberta do comportamento térmico que se estende por muitas horas, enquanto um controlador preditivo predial raramente utiliza mais de duas horas como horizonte de predição. A abordagem com horizonte deslizante (*receding horizon*) usa apenas o primeiro sinal de controle calculado para proceder outra otimização no novo instante de amostragem.



É importante ressaltar que os resultados obtidos são apenas um ponto de partida para o estudo de controladores mais eficientes, tais como os controladores preditivos MBPC (*Model-Based Predictive Control*). É sugerido também o uso de outros métodos, tais como o filtro de partículas (filtro seqüencial de Monte Carlo) e o filtro de Kalman Unscented (UKF).

## 5. CONCLUSÕES

A abordagem de identificação por princípios fundamentais permite a separação das diferentes contribuições do fluxo de calor, simplificando a identificação de parâmetros. Além disso, ela associa significado físico aos estados do modelo, ajudando a discutir a validade e coerência dos parâmetros encontrados, e facilita o ajuste de parâmetros em caso de mudanças no ambiente sem a necessidade de descartar o modelo como um todo, como na identificação caixa preta.

Uma vantagem dessa abordagem é sua menor complexidade, já que se assume que um modelo contínuo, de parâmetros concentrados, linear e invariante no tempo é capaz de representar suficientemente bem o sistema.

Do ponto de vista da automação, a identificação de um modelo do sistema deve produzir informações que permitam o projeto de controladores mais eficazes. Uma vez obtido o modelo, este pode ser usado como modelo de predição em controle preditivo, que pode potencialmente obter o melhor compromisso entre conforto térmico e economia energética por meio de um processo de otimização, além de já levar em conta efeitos de saturações automaticamente (Bauchspiess *et al.*, 2006). O processo térmico é lento e atuar antecipadamente pode melhorar a performance do sistema.

A tecnologia de comunicação sem fio na automação predial torna possível uma maior flexibilidade no que diz respeito à construção de um sistema de automação, simplificando o *retrofitting* de prédios antigos. Os dispositivos que compõe a rede, nós atuadores e sensores, podem ser dispostos independentemente da passagem de cabos de conexão, reduzindo custos e complexidade de instalação.

A rede *ZigBee* utilizada, formada a partir dos módulos *Zigbit* e das placas *MeshBean2*, apresentou bons resultados para a aplicação em questão, não gerando dificuldades quanto à sua programação; a rede, no entanto, apresentou pequenos problemas de perda de pacotes em certas ocasiões.

A instrumentação completa da sala de reuniões foi realizada, abrindo uma série de possibilidades para pesquisas futuras, tais como o levantamento do modelo matemático do condicionador híbrido e o próprio estudo de controladores preditivos para conforto térmico segundo a norma ISO7730 com redução no consumo de energia.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma proposta para trabalhos futuros se caracteriza pela geração, a cada instante de amostragem, de um sinal de referência de temperatura ótimo em função da temperatura, temperatura radiante média, umidade, velocidade do ar (figura 5.1) e demais parâmetros do PMV fornecidos pelo usuário.

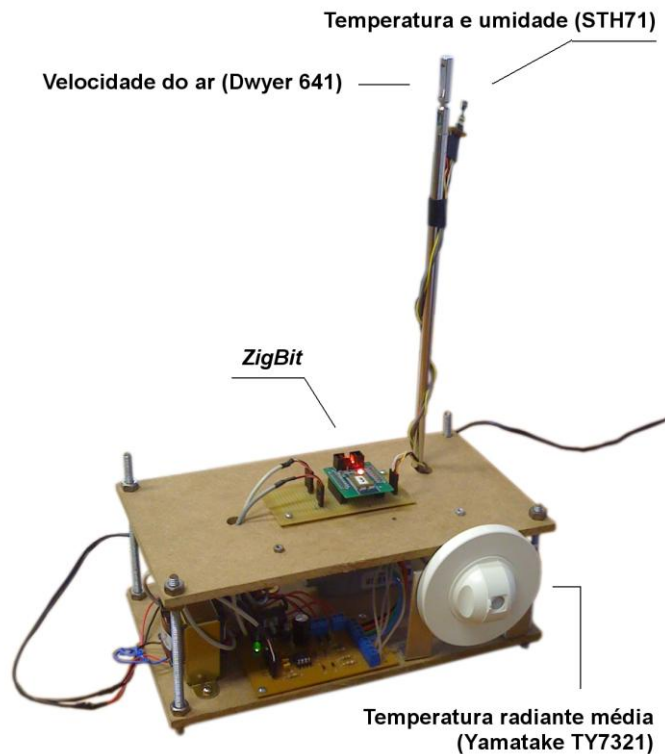


Figura 5.1 – Variáveis mensuradas para a otimização.

A geração do sinal é feita através da utilização de um método de otimização unidirecional (figura 5.2).

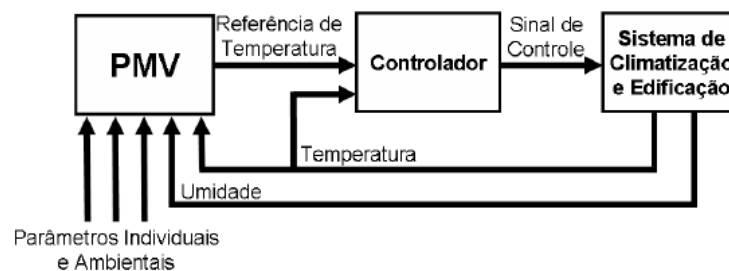


Figura 5.2 – Estratégia de geração de referência ótima (Donaisky, 2008)

O bloco para o *Simulink*<sup>®</sup> que realiza essa tarefa já foi inclusive implementado (semelhante ao presente na figura 4.1, gerando também como saída a referência de temperatura ótima). A cada instante de amostragem, baseado nos parâmetros passados e nas medições, o problema de otimização  $T^*(k) = \arg \min G(T(k), U(k), T_{rm}(k), v(k), M(k), I_{vest}(k))^2$  é resolvido, sujeito à restrição  $-3 < G(.) < 3$ , sendo  $G(.)$  a equação de cálculo do índice PMV, com  $U$  representando a umidade relativa (as equações, assim como a descrição das variáveis podem ser vistas no apêndice A).

Essa estratégia pode ser utilizada também em controle *Fuzzy* da temperatura, visto que muitos trabalhos têm sido feitos sobre este assunto por alunos no LARA (Santos, 2005; Urzêda, 2006; Such, 2009; Ferreira Jr. e Bauchspiess, 2009).

A *toolbox* de identificação de sistemas do MATLAB<sup>®</sup> apresenta recursos para a identificação de modelos com múltiplas entradas, tal como o algoritmo *n4sid*, suficiente para fazer a identificação de um modelo com múltiplas entradas, embora com grandes chances de se obter um modelo incompatível com um processo físico (Vieira *et al.*, 2008).

Para que a identificação de um sistema produza bons resultado é necessário que o conjunto de dados represente corretamente o alvo da identificação. O período de aquisição de dados deve ser longo o bastante para minimizar o efeito de contribuições espúrias ou tendências.

Além disso, cuidado especial deve ser tomado com o posicionamento dos sensores a fim de que suas medidas representem adequadamente o processo real de parâmetros distribuídos.

Verificou-se que a não-linearidade no modelo do ar-condicionado influencia de forma considerável os resultados, funcionando bem em torno do ponto de operação. Contudo, graças a uma das características do tipo de identificação empregada, isso poderá ser reparado sem a necessidade de descartar o restante da identificação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acampora, G., Loia, V., Nappi, M. e Ricciardi, S. (2005). “Ambient Intelligence Framework for context awareadaptive applications”, 7th Int. W. on Computer Architecture for Machine Perception (CAMP’05), 6 pp.
- Aguirre, L. A. (2007). *Introdução à Identificação de Sistemas - técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*, 3a ed., Editora UFMG, Belo Horizonte.
- ANSI/ASHRAE Standard 55 (2004). “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy”.
- ATMEL Corporation (2009). “BitCloud Stack Documentation, disponível em [http://www.atmel.com/forms/bitcloud\\_rzraven.asp?fn=dl\\_BitCloud\\_ZDK\\_1\\_5\\_0.zip](http://www.atmel.com/forms/bitcloud_rzraven.asp?fn=dl_BitCloud_ZDK_1_5_0.zip)., acesso em 16 de outubro de 2009.
- Bauchspiess, A., Ishihara, J. Y., Felgner F. e Litz L. (2006). “First-Principles Structured Identification for Predictive HVAC Control”, CLCA2006, Salvador, 6pp..
- Clarke, D. W. (1994). “Advances in Model Based Predictive Control”, Oxford University Press.
- Cook, D. J., Augusto, J. C. e Jakkula, V. R. (2009). “Review: Ambient intelligence: Technologies, applications, and opportunities”, *Pervasive and Mobile Computing*, v.5 n.4, p. 277-298.
- Donaisky, E. (2008). *Avaliação numérica e Experimental de Técnicas de Controle Para Conforto Térmico*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Brasil.
- Farahani, S. (2008). “ZigBee wireless networks and transceivers”, Elsevier, Burlington, MA.
- Fanger, P. O. (1970). “Thermal Comfort”, McGraw-Hill Inc., New York, USA.
- Felgner, F., Merz, R. e Litz, L. (2006). “Modular modelling of thermal bulding behaviour using Modelica”, In: *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, v.12, n. 1, p. 35-39.
- Felgner, F. (2008). “Design of Virtual Airflow Sensors for Thermal Comfort Control”, Tese de Doutorado, Universidade de Kaiserslautern, Shaker Verlag, Aachen.
- Felgner, F. (2009). “Virtuelle Raumlufstromungssensoren zur Regelung der thermischen Behaglichkeit”, in *Automatisierungstechnik*, Oldenbourg Verlag, Vol. 57, No. 9, pp. 432-442.
- Ferreira Jr., P. A. e Bauchspiess, A. (2009). “Energy Saving in Building Automation Using ZigBee Wireless Network and Fuzzy Control”, In: 20th International Congress of Mechanical Engineering, Gramado, RS, Brasil.

- Fraisse, G., Viardot, C., Lafabrie, O. e Archand, G. (2002). “Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy”, *Energy and Buildings* 34(2002) 1017-1031.
- Freire, R. Z., Oliveira, G. H. C. e Mendes, N. (2005a). “Development of single-zone predictive equations using linear regression for advanced controllers synthesis”, In: *Proc. of the Ninth Building Simulation Conference (IBPSA'05)*. Vol. 1. Montreal, Canada.
- Freire, R. Z., Oliveira, G. H. C. e Mendes, N. (2005b). “Thermal comfort based predictive controllers for building heating systems”, In: *Proc. of the 16th IFAC World Congress (IFAC'05)*. Prague, Czech Republic.
- Freire, R. Z., Oliveira, G. H. C. e Mendes, N. (2008). “Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings”, *Energy and Buildings* 40: 1353-1365.
- Givoni, B. e Krüger, E. L. (2003). “An attempt to base prediction of indoor temperatures of occupied houses on their thermo-physical properties”, In: *Proc. of the Eighteenth International Passive and Low Energy Architecture Conference (PLEA'03)*. Santiago, Chile.
- Gruber, M., Gwerder, J. e Tödtli, J. (2001). "Predictive Control for Heating Applications", *CLIMA 2000 World Congress*, Nápoles, setembro, 15-18.
- Gwerder, M., Tödtli, J. (2005). “Predictive Control for Integrated Room Automation”, *Clima 2005, 8th REHVA World Congress*, Lausanne, Switzerland.
- Haseltine, E. L. e Rawlings, J. B. (2003). “A critical evaluation of extended Kalman filtering and moving horizon estimation”, *Texas-Wiscosin Modeling and Control Consortium (TWMCC)*, Tech. Rep.
- Incropera, F. P. e DeWitt, D. P. (2006). “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, 6th edition, John Wiley & Sons.
- ISO7730 (1994). “Moderate thermal environments – determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort”.
- Jazwinski, A. H. (1970). “Stochastic Processes and Filtering Theory”, Academic Press.
- Kolokotsa, D., Pouliezos, A. e Stavrakakis, G. (2009). “Predictive control techniques for energy and indoor environmental quality management in buildings”, *Building and Environment*, vol. 44, no. 9, pp. 1850-1863.
- Ljung, L. e T. Glad (1994). “Modelling of Dynamic Systems”, 1 ed., Prentice Hall, Inc.
- Ljung, L. (1999). “System Identification: Theory for the user”, 2 ed. Prentice Hall, Inc.
- Markov, D. (2002). “Standards in thermal comfort”. In: *ANNUAL INTERNATIONAL COURSE: VENTILATION AND INDOOR CLIMATE*, Sofia, 2002. P. Stankov (Ed). p. 147 – 157.

- MESHNETICS (2008). “ZigBit™ Development Kit 2.0 User’s Guide”, manual fornecido em CD pelo fabricante.
- Oldewurtel, F., Gyalistras, D., Gwerder, M., Jones, C.N., Parisio, A., Stauch, V., Lehmann, B. e Morari, M. (2010a). “Increasing Energy Efficiency in Building Climate Control using Weather Forecasts and Model Predictive Control”, *Clima - RHEVA World Congress*, Antalya, Turquia (artigo aceito).
- Oldewurtel, F., Parisio, A., Jones, C.N., Morari, M., Gyalistras, D., Gwerder, M., Stauch, V., Lehmann, B. e Wirth, K. (2010b). “Energy Efficient Building Climate Control using Stochastic Model Predictive Control and Weather Predictions”, *American Control Conference*, Baltimore, MD (artigo aceito).
- Olmos, C. C. (2009). *Sistema híbrido de climatização visando conforto térmico e eficiência energética*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 81p.
- Papst, L. A. e Lamberts, R. (2001). “Thermal performance evaluation of three houses in Florianópolis, south of Brazil”, In: *Proc. of the Eighteenth International Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA'01)*. pp. 293-297.
- Poshtan, J. e Mojallali, H. (2005). “Subspace system identification”, *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 11-17.
- PROBRAL – Projeto de Cooperação Universitária entre Brasil e Alemanha (2007). “Networked Control with Distributed Processing for Building Automation in an Ambient Intelligence Framework”, Universidade de Brasília-Technische Universität Kaiserslautern, CAPES-DAAD.
- Queiroz, R. B. e Azevedo, R. C. A. (2009). *Rede de Sensores sem fio para Automação Predial com Módulos MeshBean*, Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 81p.
- Remagnino, P. e Foresti, G. L. (2005). “Ambient Intelligence - a new multidisciplinary paradigm”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A*, Vol. 35, No. 1.
- Research Center Ambient Intelligence TU Kaiserslautern*, disponível em <http://www.eit.uni-kl.de/ami>, acesso em 25 de novembro, 2009 .
- Ríos-Moreno, G.J., Trejo-Perea, M., Castañeda-Miranda, R., Hernández-Guzmán, V. M. e Herrera-Ruiz, G. (2007). “Modeling temperature in intelligent buildings by means of autoregressive models”, *Automation in Construction*, 16: 713–722.
- Saloio, B., e Ávila, A. (2009). *Instrumentação e controle de um sistema de ar condicionado híbrido*. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 107p.

- Santos, R. J. (2005). *Controle Fuzzy para Racionalização de Energia em Processo de Condicionamento de Ar*”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 134p.
- Scandaroli, G. G. (2009). *Estimação em sistemas com restrições de igualdade e aplicações em robótica móvel e de reabilitação*, Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 115p.
- Simon, D. e Chia, T. L. (2002). “Kalman filtering with state equality constraints”, Aerospace and Electronics Systems, IEEE Transactions on vol. 38, no. 1, pp. 128-136.
- Spasokukotskiy, K., Tränkler, H.-R. e Luksheva, K. (2003) “Model-Based Method to Measure Thermal Comfort in Buildings”, IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing System, Lviv, Ukraine, pp. 154-158.
- Such, R. N. (2009). *Implementação de um Controlador Fuzzy em um Sistema de Refrigeração Híbrido através de uma Rede de Sensores ZigBee*, Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 87p.
- Uzêda, C. C. (2006). *Software Scada como Plataforma para Racionalização Inteligente de Energia Elétrica em Automação Predial*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 81p.
- van Lith, P. F., Betlem, B. H. L. e Roffel, B. (2002). “A structured modeling approach for dynamic hybrid fuzzy-first principles models”, Journal of Process Control 12(2002):605-615.
- van Overschee, P. e De Moor, B. (1995). “N4SID: Subspace algorithms for the identification of combined deterministic-stochastic systems”, Automatica, 30, 75-93.
- Vieira, B. de B. S. e Wyant, R. S. (2007). *Automação e controle de um ambiente predial multisalas utilizando o supervisor ActionView*, Trabalho de graduação em Engenharia Mecatrônica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília., Brasília, DF, 88 p.
- Vieira, B. B. S., Wyant, R. S., Oliveira, F. A. R., Litz, L. e Bauchspiess, A. (2008). “Building Identification for Energy-Saving Automation using First-Principles Models”, In: VIII INDUSCON - Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Poços de Caldas.
- Virk, G. S. e D. L. Loveday (1994). “Model-based control for hvac applications”, In: Proc. Of The Third IEEE Conference on Control Applications. Glasgow, Scotland. pp. 1861-1866.
- Virk, G. S. e Cheung, J. Y. M. (1995). “Practical stochastic multivariable identification for buildings”, Applied Math. Modeling, 19(10):621-636.



## **APÊNDICES**

## A – O MODELO PMV

Nessa seção são apresentadas as fórmulas para o cálculo dos índices PMV (*Predicted Mean Vote*) e PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*). Uma derivação detalhada pode ser encontrada em Fanger (1970).

A base do modelo é o balanço energético do corpo humano, dado por:

$$\underbrace{M - W}_H - E_d - E_{tr} - E_{rs} - E_{rl} - \underbrace{(R + C)}_K = 0, \quad (84)$$

com:

$M$ : taxa metabólica, taxa de transformação de energia por oxidação no corpo;

$W$ : trabalho mecânico (nulo para a maioria das atividades);

$H$ : taxa de produção de calor no corpo;

$E_d$ : perda de calor por difusão de vapor de água pela pele;

$E_{tr}$ : perda de calor pela evaporação do suor na superfície da pele (transpiração);

$E_{rs}$ : perda de calor por respiração sensível;

$E_{rl}$ : perda de calor por respiração latente;

$R$ : perda de calor por radiação;

$C$ : perda de calor por convecção;

$K$ : fluxo de calor conduzido da pele para a superfície externa das roupas através das roupas.

Todas as parcelas envolvidas na equação (84) são fluxos de energia ( $W/m^2$ ) relacionados à área de superfície corporal (área de Dubois).

O sistema de termorregulação do corpo humano mantém o balanço energético corporal sob diversas condições ambientais. O balanço energético, no entanto, é somente uma condição necessária e não suficiente para o conforto térmico. De modo a incluir uma condição suficiente, o modelo assume que, até certo ponto, a taxa  $M$ , a temperatura da pele  $T_{pele}$  e a perda de calor por transpiração  $E_{tr}$  são as únicas variáveis fisiológicas influenciando o balanço de energia. Fanger (1970) observou que, em média, sob condições confortáveis,

$$T_{pele}^{conf} = 35,7 - 0,028(M - W), \quad (85)$$

$$E_{tr}^{conf} = 0,42(M - W - 58,15), \quad (86)$$

com  $T_{pele}$  em °C e  $M, W$  em W/m<sup>2</sup>. Com as equações (85) e (86),  $E_d$  sob condições de conforto é dado por

$$E_d^{conf} = 3,05 \cdot 10^{-3} \{256[35,7 - 0,0275(M - W)] - 3370 - p_a\}, \quad (87)$$

com  $E_d^{conf}$  em W/m<sup>2</sup> e  $p_a$ , a pressão parcial de vapor do ar no ambiente, em Pa.

As demais parcelas de fluxo, seja em conforto ou desconforto, são calculadas por

$$E_{rs} = 1,7 \cdot 10^{-5} M(5867 - p_a), \quad (88)$$

$$E_{rl} = 0,0014M(34 - T), \quad (89)$$

$$R = 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{vest} [(T_{vest} + 273)^4 - (T_{rm} + 273)^4], \quad (90)$$

$$C = f_{vest} h(T_{vest} - T), \quad (91)$$

em que  $T$  é a temperatura ambiente (°C),  $T_{vest}$  a temperatura da superfície da vestimenta (°C),  $T_{rm}$  a temperatura radiante média,  $h$  o coeficiente de transferência de calor por convecção (W/(m<sup>2</sup>K)) e  $f_{vest}$  a razão entre a área corporal com e sem vestimenta.

A diferença entre  $T_{vest}$  e  $T_{pele}$  e o isolamento da vestimenta  $I_{vest}$  definem o fluxo  $K$  através da roupa, necessário para o cálculo de  $T_{vest}$ . Segue

$$T_{vest} = T_{pele} - I_{vest} K \quad (92)$$

A temperatura da superfície da vestimenta pode ser resolvida iterativamente por:

$$T_{vest} = 35,7 - 0,028(M - W) - I_{vest} \left\{ 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{vest} [(T_{vest} + 273)^4 - (T_{rm} + 273)^4] + f_{vest} h(T_{vest} - T) \right\} \quad (93)$$

$$h = \begin{cases} 2,38(T_{vest} - T)^{0,25}, & \text{se } 2,38(T_{vest} - T)^{0,25} \geq 12,1\sqrt{v} \\ 12,1\sqrt{v}, & \text{se } 2,38(T_{vest} - T)^{0,25} < 12,1\sqrt{v} \end{cases} \quad (94)$$

$$f_{vest} = \begin{cases} 1 + 1,29I_{vest}, & \text{se } I_{vest} \leq 0,078 \text{ m}^2 \text{K/W} \\ 1,05 + 0,645I_{vest}, & \text{se } I_{vest} > 0,078 \text{ m}^2 \text{K/W} \end{cases} \quad (95)$$

Na equação (94),  $v$  é a velocidade do ar em m/s.

Valores confortáveis de perdas por secreção de suor e difusão de vapor d'água pelas equações (86) e (87) e as demais parcelas, equações (88) a (91), são inseridas no balanço de calor, equação (84). Isso fornece a equação do conforto, um critério que deve ser satisfeito sob condições confortáveis.

Para avaliar qualquer condição ambiental, isto é, inclusive as que não satisfazem a equação de conforto, um índice é requerido para quantificar os desvios das condições confortáveis, ou seja, a medida do desconforto. Fanger (1970) assume o desconforto como uma função da carga térmica. Esta carga é definida como

$$D := M - W - E_d^{conf} - E_{tr}^{conf} - E_{rs} - E_{rl} - R - C, \quad (96)$$

em que  $D$  ( $W/m^2$ ), a discrepância entre a produção de calor interna  $H$  e todas as perdas de calor de uma pessoa hipoteticamente mantida sob valores confortáveis de  $T_{pele}$  e  $E_{tr}$ .

Baseado em experimentos com diferentes níveis de atividade, Fanger (1970) determinou o índice de sensação térmica média, o PMV, como uma função de  $D$  e  $M$ :

$$PMV = (0,303.e^{-0,036M} + 0,028)D \quad (97)$$

Substituindo  $D$ , a equação completa é obtida por

$$PMV = (0,303.e^{-0,036M} + 0,028)(M - W - E_d^{conf} - E_{tr}^{conf} - E_{rs} - E_{rl} - R - C) \quad (98)$$

Com o *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD), Fanger encontrou a relação que estima a porcentagem de pessoas, dentro de um grupo grande de pessoas, que se sentem desconfortáveis sob certo PMV.

A norma ISO7730 contém valores aproximados de  $M$  para atividades típicas.

Tabela A.1 – Valores do metabolismo em função do nível de atividade.

<i>Metabolismo (met)</i>	<i>Nível de atividade</i>
0,8 met (46 W/m <sup>2</sup> )	Sentado, deitado
1,0 met (58 W/m <sup>2</sup> )	Sentado, relaxado
1,2 met (70 W/m <sup>2</sup> )	Sentado, trabalho leve
1,4 met (81 W/m <sup>2</sup> )	Sentado, trabalho manual médio
1,6 met (93 W/m <sup>2</sup> )	Trabalho leve em pé
2,0 met (116 W/m <sup>2</sup> )	Trabalho médio em pé

Para atividades de trabalho leves (sala de reunião, por exemplo) tem-se, em geral, atividades de 1,0 met a 1,4 met. A tabela a.2 mostra as resistências térmicas de diferentes tipos de vestuário, em que 1 clo = 0,155 m<sup>2</sup>K/W.

Tabela A.2 – Resistência térmica da vestimenta.

<i>Vestuário</i>	<i>Resistência térmica (clo)</i>
<i>Calção</i>	0,1
<i>Vestimenta tropical</i>	0,3
<i>Vestimenta leve de verão</i>	0,5
<i>Vestimenta de trabalho</i>	0,7
<i>Vestimenta de inverno</i>	1,0
<i>Vestimenta completa</i>	1,5

## B – AR-CONDICIONADO HÍBRIDO

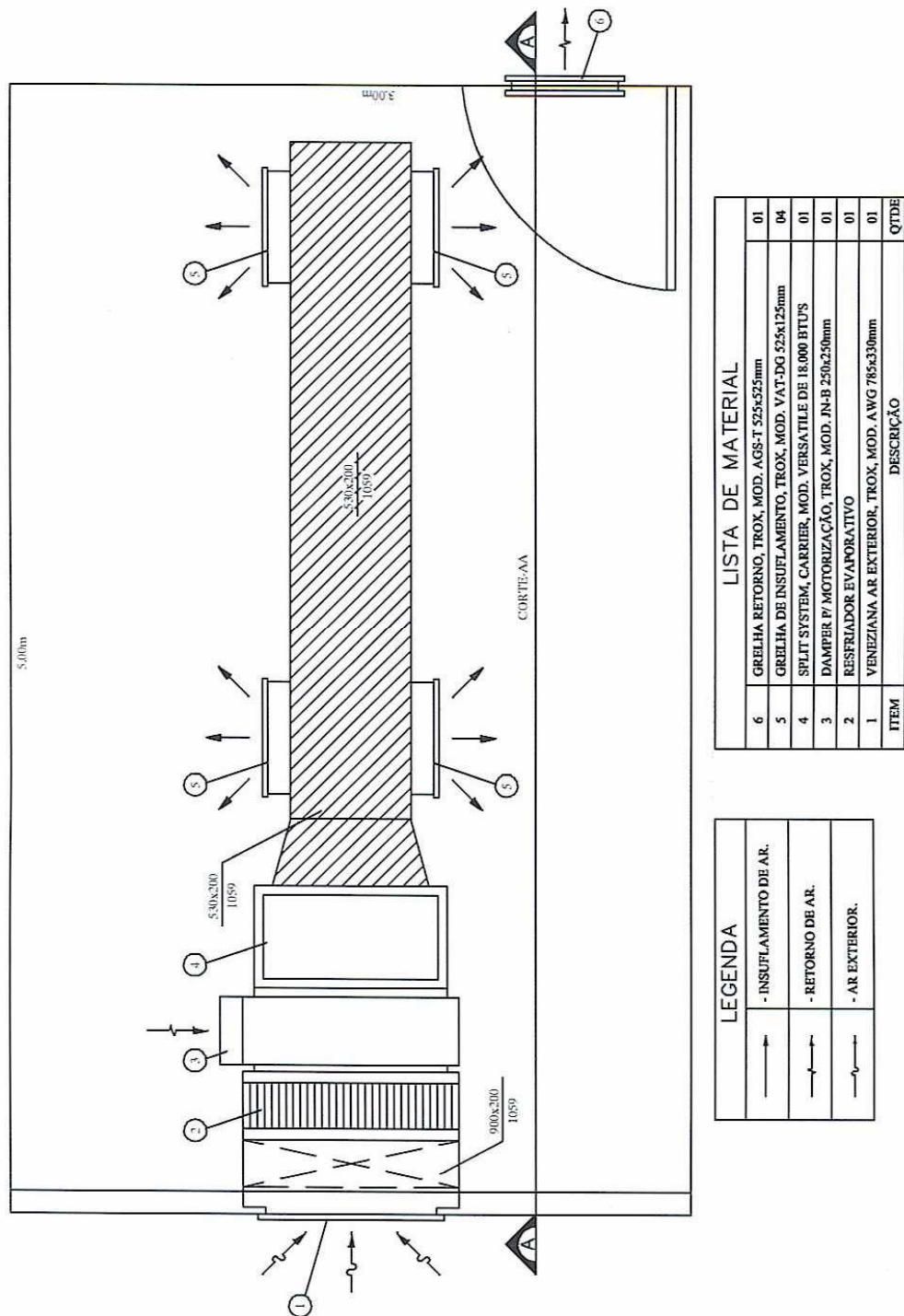


Figura B.1 – Projeto do sistema híbrido (planta baixa).



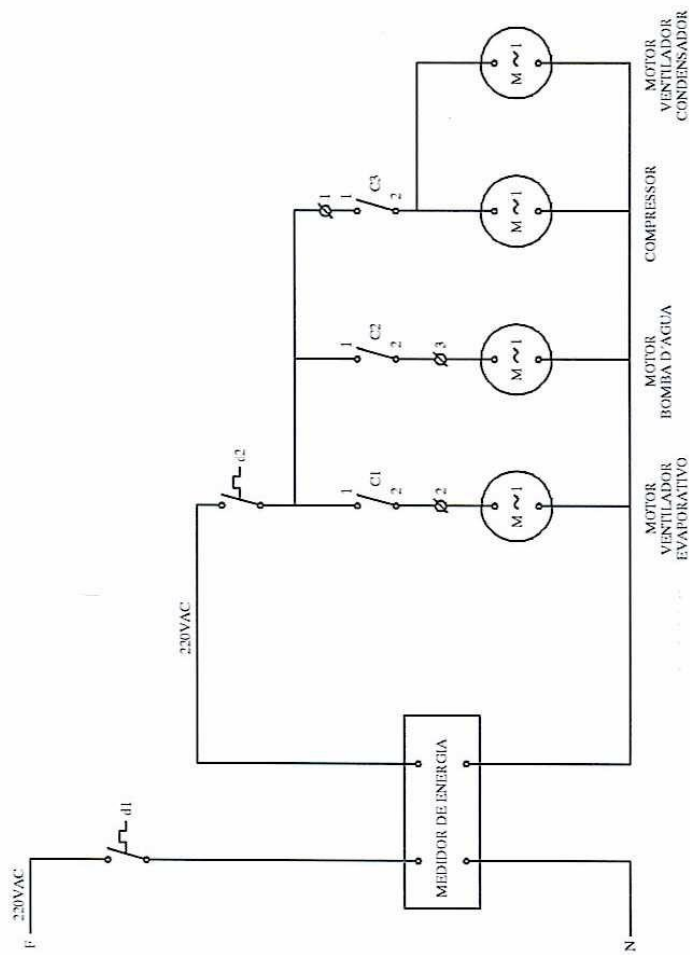


Figura B.3 – Projeto do sistema híbrido (diagrama de força).



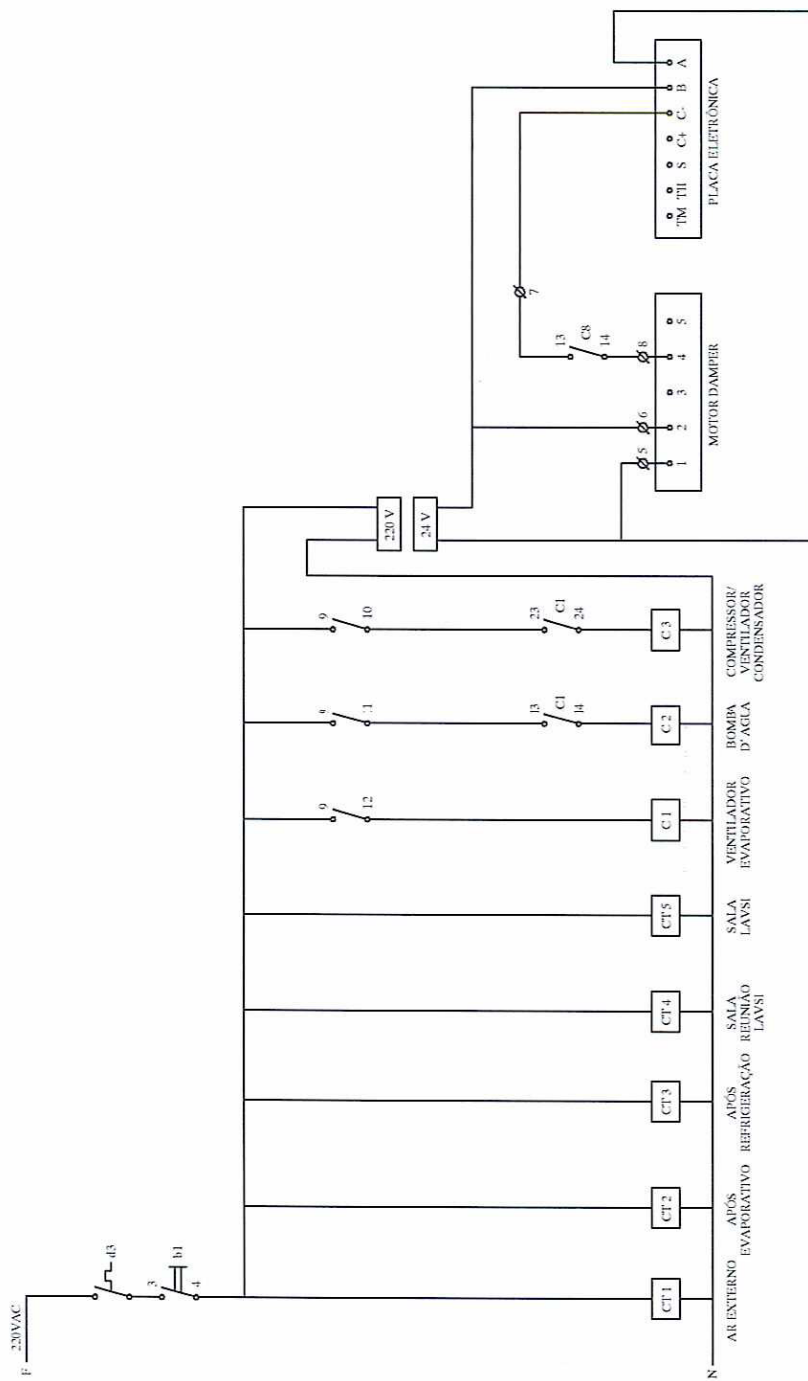


Figura B.4 – Projeto do sistema híbrido (diagrama de comando).

## C – DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS

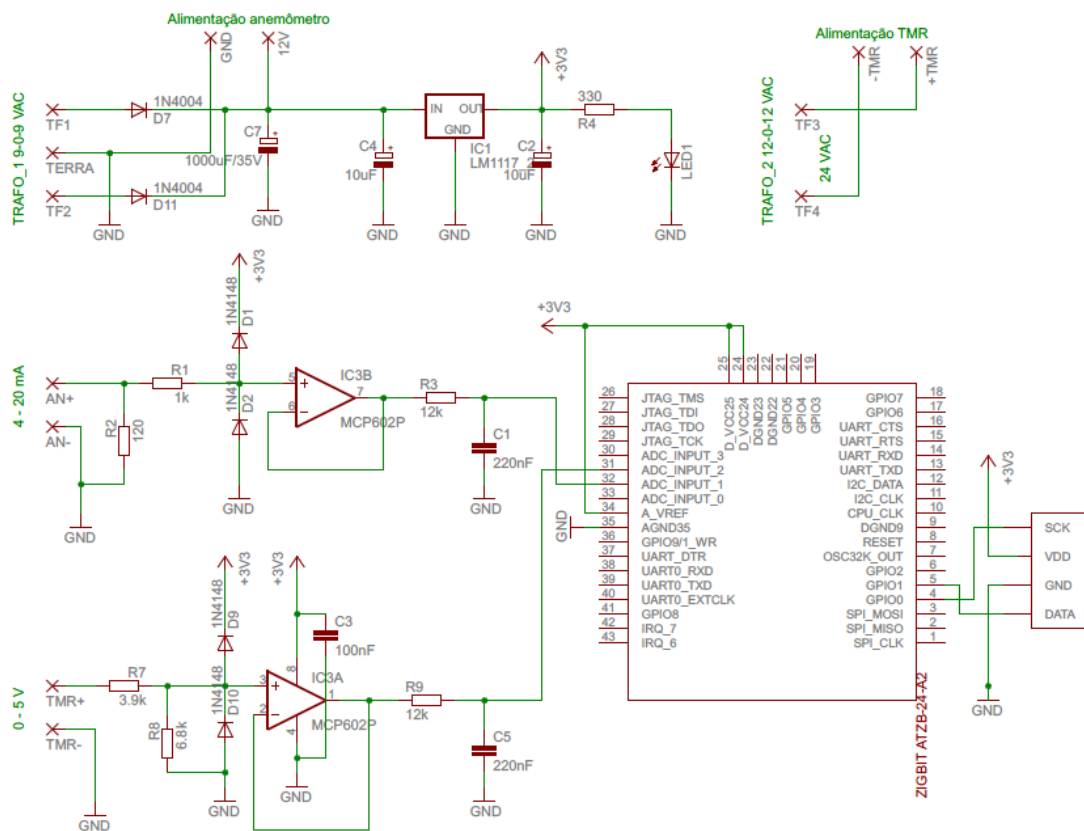


Figura C.1 – Esquemático do módulo móvel.

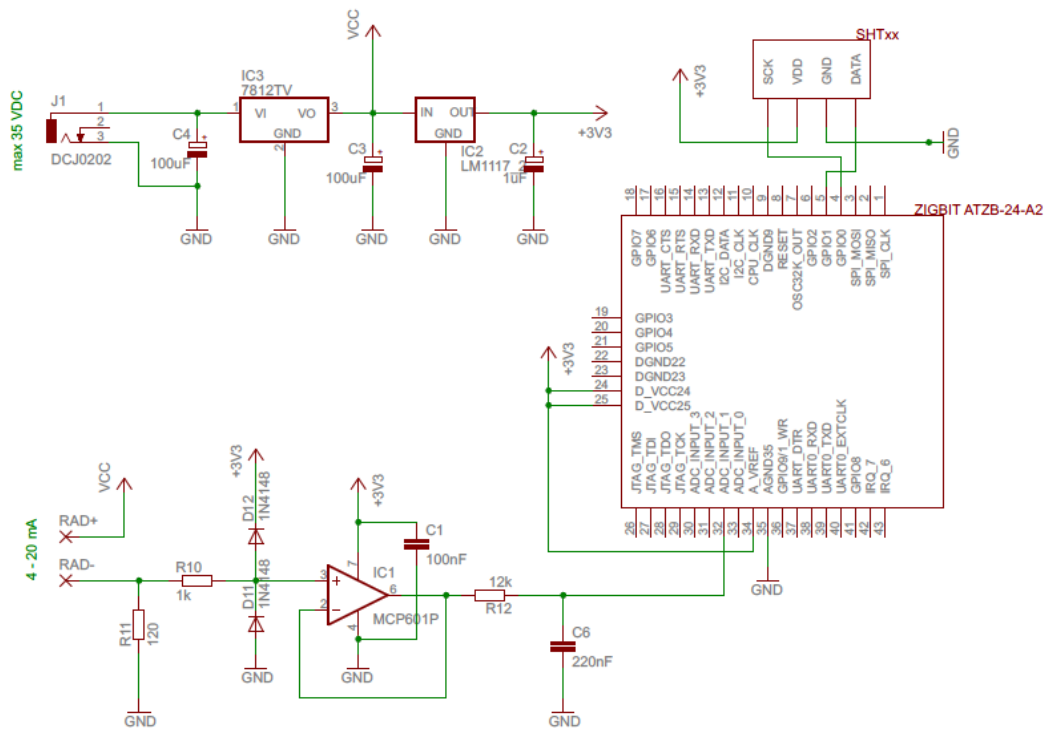


Figura C.2 – Esquemático do módulo externo.

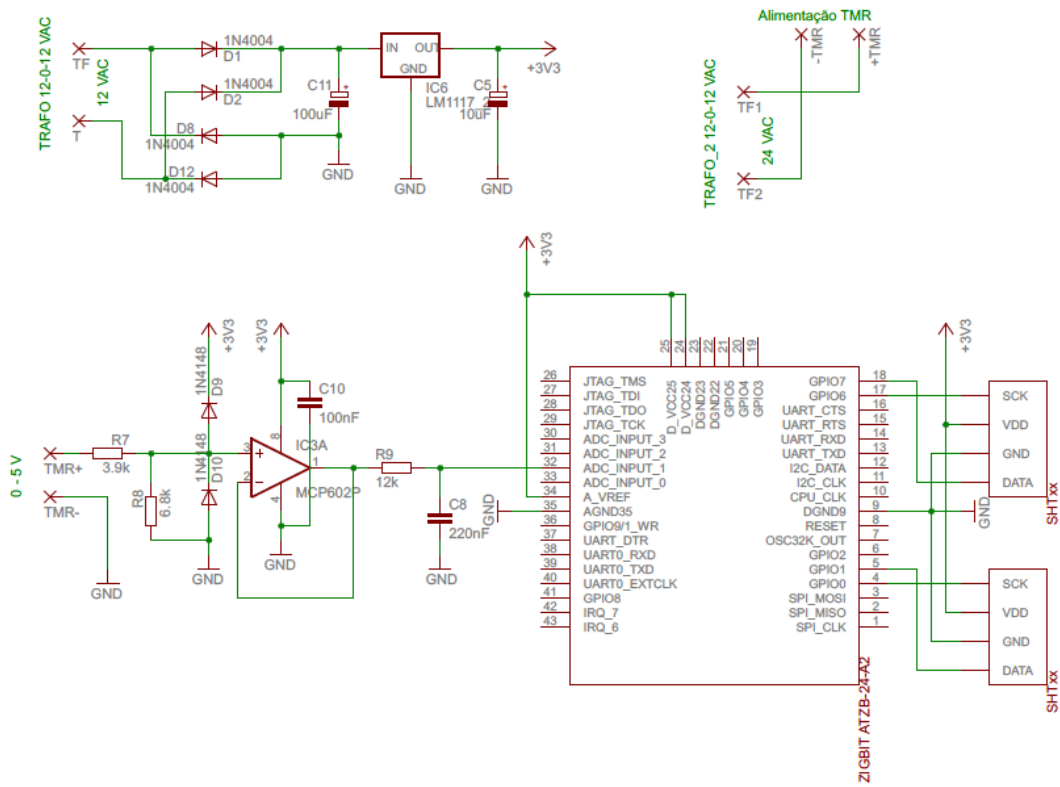


Figura C.3 – Esquemático do módulo interno.

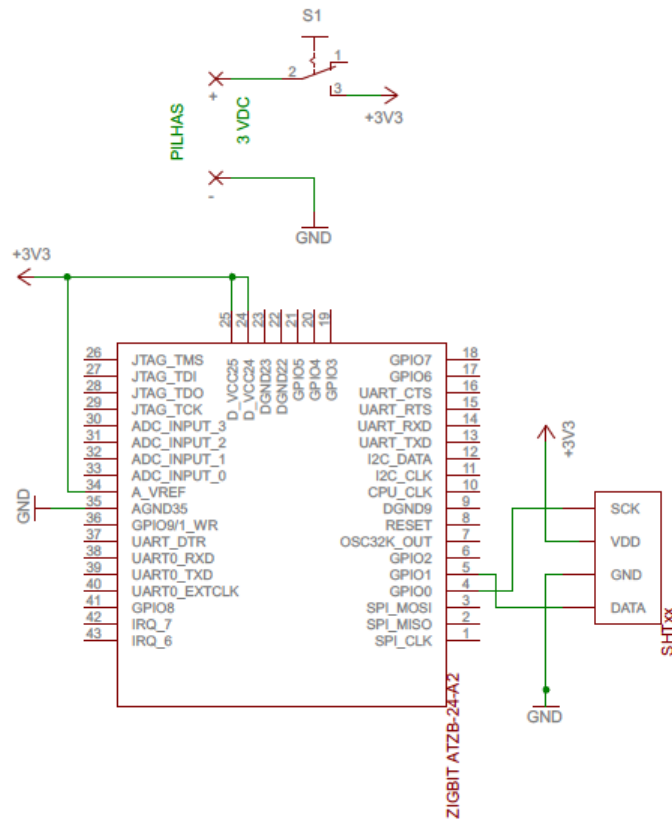


Figura C.4 – Esquemático dos módulos sensores.

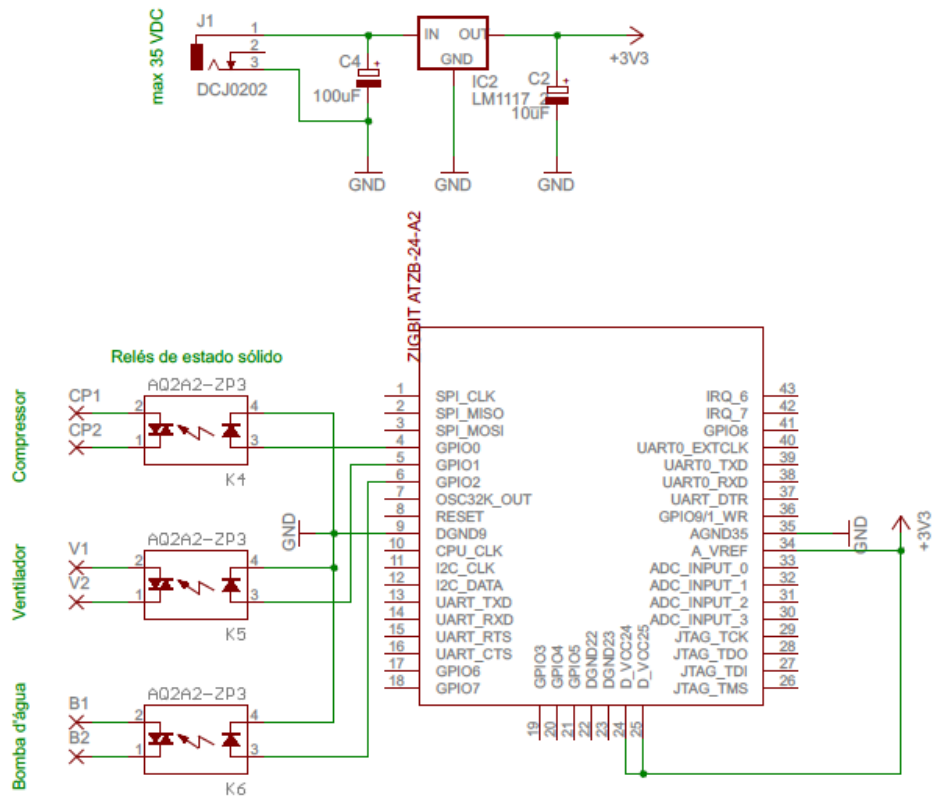


Figura C.5 – Esquemático do módulo atuador.

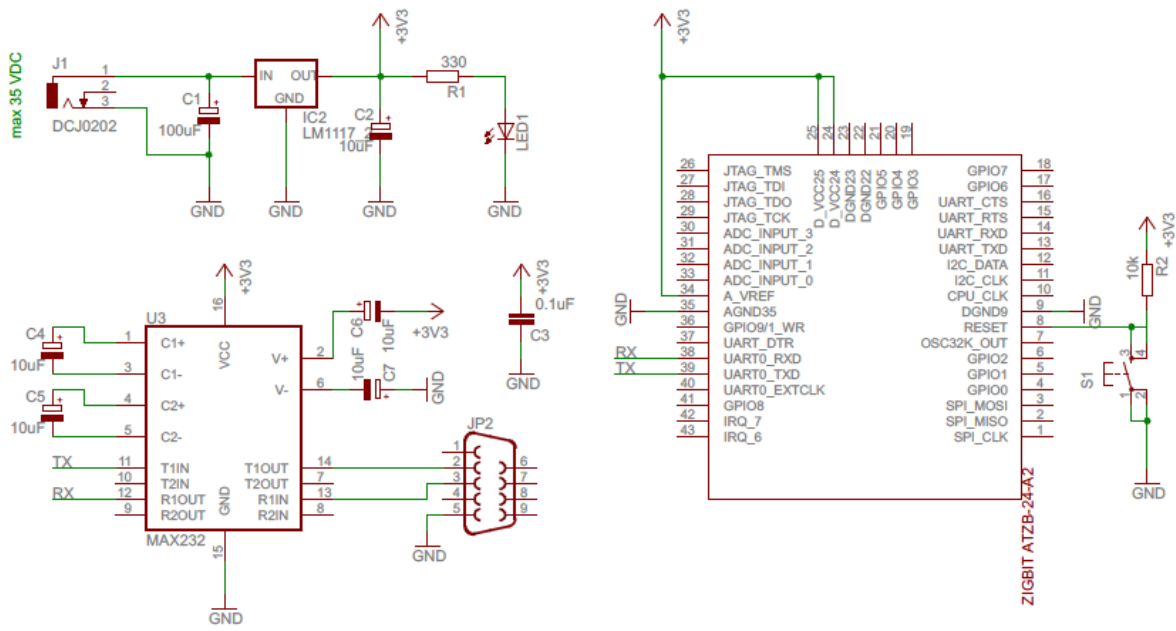


Figura C.6 – Esquemático do módulo coordenador/gravador.

## D – CÓDIGOS DO MATLAB USADOS NA IDENTIFICAÇÃO

```
% Implementacao do Filtro de Kalman Estendido
%
% function [xk_pred, Pk_pred, xk_corr, Pk_corr] =
extendedKalmanFilter(Ak, Bk, Ck, Dk, Qk, Rk, Pk_ant, xk_ant, uk, yk)
%
% Modelo:
%
%     xk+1 = f(xk, uk) + wk
%     yk+1 = h(xk+1) + vk+1
%
%     wk ~ N(0, Qk)   vk ~ N(0, Rk)   x0 ~ N(x0_est, P0)
%
% Flavio Augusto Rodrigues de Oliveira

function [xk_pred, Pk_pred, xk_corr, Pk_corr, Gk] =
extendedKalmanFilter(Qk, Rk, Pk_ant, xk_ant, uk, uk_ant, yk, T)

% Dimensoes do vetor de estados
[dimL, dimC] = size(xk_ant);

% Calcula a funcao de evolucao do processo e sua Jacobiana
[f, F] = auxiliar_EKF(xk_ant, uk, uk_ant, T);

% Etapa de predicao
% FK: xk_pred = Ak*xk_ant+Bk*uk
xk_pred = f;
% FK: Pk_pred = Ak*Pk_ant*(Ak') + Dk*Qk*(Dk');
Pk_pred = F*Pk_ant*(F') + Qk;

% Estimativa de leitura baseada na predicao do estado
H = zeros(2, 14);
H(1, 1) = 1;
H(2, 6) = 1; H(2, 11) = 1; H(2, 12) = 1; H(2, 13) = 1; H(2, 14) = 1;
h = H*xk_pred;

% Etapa de correcao
Sk = H*Pk_pred*(H') + Rk;
% FK: Gk = Pk_pred*(Ck') * inv(Ck*Pk_pred*(Ck') + Rk);
Gk = Pk_pred*(H') * inv(Sk);      % Ganho de Kalman
% FK: vk = yk - Ck*xk_pred;
vk = yk - h;      % Inovacao

% Estimativa do estado a posteriori
xk_corr = xk_pred + Gk*(vk);

% Estimativa da covariancia a posteriori
% FK: Pk_corr = (eye(dimL) - Gk*Ck) * Pk_pred * ( (eye(dimL) - Gk*Ck)') + Gk*Rk*(Gk');
Pk_corr = (eye(dimL) - Gk*H) * Pk_pred * ( (eye(dimL) - Gk*H)') + Gk*Rk*(Gk');
```



```

% Funcao auxiliar que calcula a funcao de evolucao do processo e sua
% Jacobiana
%
% Flavio Augusto Rodrigues de Oliveira
function [f,F] = auxiliar_EKF(xk_ant,uk,uk_ant,T)

% Atribuicao de valor as variaveis simbolicas
x1 = xk_ant(1);
x2 = xk_ant(2);
x3 = xk_ant(3);
x4 = xk_ant(4);
x5 = xk_ant(5);
a1 = xk_ant(6);
a2 = xk_ant(7);
a3 = xk_ant(8);
a4 = xk_ant(9);
a5 = xk_ant(10);
b1 = xk_ant(11);
b2 = xk_ant(12);
b3 = xk_ant(13);
b4 = xk_ant(14);

rs = uk_ant(1);
Te = uk_ant(2);
Tv = uk_ant(3);
Tc = uk_ant(4);

% Estimativa do proximo estado dado a estimativa do estado anterior e a
% entrada anterior
f = [exp(a1*T)*x1-b1*(-exp(a2*T)+exp(a1*T))*x2/(a2-a1)-b2*(-
exp(a3*T)+exp(a1*T))*x3/(a3-a1)+b3*(-exp(a1*T)+exp(a4*T))*x4/(a4-
a1)+b4*(-exp(a1*T)+exp(a5*T))*x5/(a5-a1)-b1*(-a2+a1-
exp(a2*T)*a1+exp(a1*T)*a2)*rs/((a2-a1)*a2*a1)+b2*(-a3+a1-
exp(a3*T)*a1+exp(a1*T)*a3)*Te/((a3-a1)*a1)+b3*(-a4+a1+exp(a1*T)*a4-
exp(a4*T)*a1)*Tv/((a4-a1)*a1)+b4*(-a5+a1-
exp(a5*T)*a1+exp(a1*T)*a5)*Tc/((a5-a1)*a1);
    exp(a2*T)*x2+(-1+exp(a2*T))*rs/a2;
    exp(a3*T)*x3+(1-exp(a3*T))*Te;
    exp(a4*T)*x4+(1-exp(a4*T))*Tv;
    exp(a5*T)*x5+(1-exp(a5*T))*Tc;
    a1;a2;a3;a4;a5;b1;b2;b3;b4];

% Jacobiana da funcao de evolucao do processo avaliada na ultima
% estimativa
F = zeros(14,14);

F(1,1) = exp(a1*T);
F(2,2) = -b1*(-exp(a2*T)+exp(a1*T))/(a2-a1);
F(3,3) = -b2*(-exp(a3*T)+exp(a1*T))/(a3-a1);
F(4,4) = b3*(-exp(a1*T)+exp(a4*T))/(a4-a1);
F(5,5) = b4*(-exp(a1*T)+exp(a5*T))/(a5-a1);
F(6,6) = T*exp(a1*T)*x1-b1*T*exp(a1*T)*x2/(a2-a1)-b1*(-
exp(a2*T)+exp(a1*T))*x2/(a2-a1)^2-b2*T*exp(a1*T)*x3/(a3-a1)-b2*(-
exp(a3*T)+exp(a1*T))*x3/(a3-a1)^2-b3*T*exp(a1*T)*x4/(a4-a1)+b3*(-
exp(a1*T)+exp(a4*T))*x4/(a4-a1)^2-b4*T*exp(a1*T)*x5/(a5-a1)+b4*(-
exp(a1*T)+exp(a5*T))*x5/(a5-a1)^2-b1*(1-
exp(a2*T)+T*exp(a1*T)*a2)*rs/((a2-a1)*a2*a1)-b1*(-a2+a1-
exp(a2*T)*a1+exp(a1*T)*a2)*rs/((a2-a1)^2*a2*a1)+b1*(-a2+a1-
exp(a2*T)*a1+exp(a1*T)*a2)*rs/((a2-a1)*a2*a1^2)+b2*(1-
exp(a3*T)+T*exp(a1*T)*a3)*Te/((a3-a1)*a1)+b2*(-a3+a1-

```

```

exp(a3*T)*a1+exp(a1*T)*a3)*Te/((a3-a1)^2*a1)-b2*(-a3+a1-
exp(a3*T)*a1+exp(a1*T)*a3)*Te/((a3-a1)*a1^2)+b3*(1+T*exp(a1*T)*a4-
exp(a4*T))*Tv/((a4-a1)*a1)+b3*(-a4+a1+exp(a1*T)*a4-exp(a4*T)*a1)*Tv/((a4-
a1)^2*a1)-b3*(-a4+a1+exp(a1*T)*a4-exp(a4*T)*a1)*Tv/((a4-a1)*a1^2)+b4*(1-
exp(a5*T)+T*exp(a1*T)*a5)*Tc/((a5-a1)*a1)+b4*(-a5+a1-
exp(a5*T)*a1+exp(a1*T)*a5)*Tc/((a5-a1)^2*a1)-b4*(-a5+a1-
exp(a5*T)*a1+exp(a1*T)*a5)*Tc/((a5-a1)*a1^2);
F(7,7) = b1*T*exp(a2*T)*x2/(a2-a1)+b1*(-exp(a2*T)+exp(a1*T))*x2/(a2-
a1)^2-b1*(-1-T*exp(a2*T)*a1+exp(a1*T))*rs/((a2-a1)*a2*a1)+b1*(-a2+a1-
exp(a2*T)*a1+exp(a1*T)*a2)*rs/((a2-a1)^2*a2*a1)+b1*(-a2+a1-
exp(a2*T)*a1+exp(a1*T)*a2)*rs/((a2-a1)*a2^2*a1);
F(8,8) = b2*T*exp(a3*T)*x3/(a3-a1)+b2*(-exp(a3*T)+exp(a1*T))*x3/(a3-
a1)^2+b2*(-1-T*exp(a3*T)*a1+exp(a1*T))*Te/((a3-a1)*a1)-b2*(-a3+a1-
exp(a3*T)*a1+exp(a1*T)*a3)*Te/((a3-a1)^2*a1);
F(9,9) = b3*T*exp(a4*T)*x4/(a4-a1)-b3*(-exp(a1*T)+exp(a4*T))*x4/(a4-
a1)^2+b3*(-1+exp(a1*T)-T*exp(a4*T)*a1)*Tv/((a4-a1)*a1)-b3*(-
a4+a1+exp(a1*T)*a4-exp(a4*T)*a1)*Tv/((a4-a1)^2*a1);
F(10,10) = b4*T*exp(a5*T)*x5/(a5-a1)-b4*(-exp(a1*T)+exp(a5*T))*x5/(a5-
a1)^2+b4*(-1-T*exp(a5*T)*a1+exp(a1*T))*Tc/((a5-a1)*a1)-b4*(-a5+a1-
exp(a5*T)*a1+exp(a1*T)*a5)*Tc/((a5-a1)^2*a1);
F(11,11) = -(-exp(a2*T)+exp(a1*T))*x2/(a2-a1)-(-a2+a1-
exp(a2*T)*a1+exp(a1*T)*a2)*rs/((a2-a1)*a2*a1);
F(12,12) = -(-exp(a3*T)+exp(a1*T))*x3/(a3-a1)+(-a3+a1-
exp(a3*T)*a1+exp(a1*T)*a3)*Te/((a3-a1)*a1);
F(13,13) = (-exp(a1*T)+exp(a4*T))*x4/(a4-a1)+(-a4+a1+exp(a1*T)*a4-
exp(a4*T)*a1)*Tv/((a4-a1)*a1);
F(14,14) = (-exp(a1*T)+exp(a5*T))*x5/(a5-a1)+(-a5+a1-
exp(a5*T)*a1+exp(a1*T)*a5)*Tc/((a5-a1)*a1);
F(2,2) = exp(a2*T);
F(2,7) = T*exp(a2*T)*x2+T*exp(a2*T)*rs/a2-(-1+exp(a2*T))*rs/a2^2;
F(3,3) = exp(a3*T);
F(3,8) = T*exp(a3*T)*x3-T*exp(a3*T)*Te;
F(4,4) = exp(a4*T);
F(4,9) = T*exp(a4*T)*x4-T*exp(a4*T)*Tv;
F(5,5) = exp(a5*T);
F(5,10) = T*exp(a5*T)*x5-T*exp(a5*T)*Tc;

for i=6:14
    F(i,i) = 1;
end

```

```

% Identificacao MIMO
% N4SID de ordem 7 - sem Rs
% N4SID de ordem 8 - com Rs
% Flavio Augusto Rodrigues de Oliveira

clear all;
close all;
clc

% Dados com aplicacao do sinal PRBS por 2 dias
% Tempo minimo de 4 min para desligamento do compressor
% Inicio do experimento: 19h28 do dia 20/02/2010
load 20_01-22_01_PRBS;

t
% Leitura das estruturas e armazenamento nos vetores
t_e = sala.signals(1,1).values(:,1); % Temperatura externa
t_o = sala.signals(1,1).values(:,2); % Temperatura sala
% figure(1)
% plot(tempo/3600,t_e,tempo,t_o);
% legend('t_e','t_o');

t_lara3 = lab.signals(1,1).values(:,1); % Temperatura LARA3
t_lara1 = lab.signals(1,1).values(:,2); % Temperatura LARA1
t_lara2 = lab.signals(1,1).values(:,3); % Temperatura LARA2
% figure(2)
% plot(tempo/3600,t_lara3,tempo,t_lara1,tempo,t_lara2);
% legend('t_l_a_r_a_3','t_l_a_r_a_1','t_l_a_r_a_2');
% figure(3)
% plot(tempo/3600,t_lara3,tempo,t_e);
% legend('t_l_a_r_a_3','t_e');

rs = outras.signals(1).values(:);
%rs = medfilt1(rs_aux,90);
% figure(4)
% plot(tempo/3600,rs);
% legend('rs (W/m^2)');

% Intervalo
amostras = size(sala.signals(1,1).values(:,1),1);
fim = (amostras-1);
tmp = (0:fim);
tempo = 10*tmp'; % Ts = 10 s
ai = 2;
af = amostras;

% Temperaturas
t_e = t_e(ai:af);
t_o = t_o(ai:af);
t_lara3 = t_lara3(ai:af);
t_lara1 = t_lara1(ai:af);
t_lara2 = t_lara2(ai:af);

% Radiacao solar
rs = rs(ai:af);
t_o_m = mean(t_o);

% Numero de amostras no intervalo especificado
na = size(t_o,1)

```

```

% Temperatura de inercia - média de t_o
t_in = t_o_m*ones(na,1);

% Temperatura efetiva na entrada do ramo do ar-condicionado
t_c = zeros(na,1);

% Obtencao da temperatura na saida do ar-condicionado
prbs(na) = 1;
for i=1:(na)
    if(prbs(i) == 0)
        t_c(i) = t_o(i);
    else
        t_c(i) = 4;
    end
end

% Tirando a media
t_e = t_e - mean(t_e);
t_o = t_o - mean(t_o);
t_lara3 = t_lara3 - mean(t_lara3);
t_lara1 = t_lara1 - mean(t_lara1);
t_lara2 = t_lara2 - mean(t_lara2);
rs = rs - mean(rs);

t = (0: (na-1))/360; % Em horas

% Ajustar no grafico
prbs_ = prbs - 8*ones(size(prbs,1),1);

% Dados de identificacao
% figure(5);
% plot(t,[t_o,t_lara1,t_lara2,t_lara3,t_e,t_in,prbs_,rs/40]);
% xlabel('Tempo (h)')
% title('Conjunto de dados usado na identificação')
% legend('t_o ^oC','t_l_a_r_a_1 ^oC','t_l_a_r_a_2 ^oC','t_l_a_r_a_3
^oC',...
%      't_e ^oC','t_i_n ^oC','C - 8 (on/off)','rs/40 (W/m^2)')
figure(5);
plot(t,[t_o,t_lara1,t_lara2,t_lara3,t_e,t_in,prbs_]);
xlabel('Tempo decorrido do início do experimento (h)')
title('Conjunto de dados usado na identificação')
legend('t_o ^oC','t_l_a_r_a_1 ^oC','t_l_a_r_a_2 ^oC','t_l_a_r_a_3
^oC',...
      't_e ^oC','t_i_n ^oC','(C-8) on/off')

% Cria objeto de dados a ser usado pelas rotinas de identificacao (Ts =
10)
%data = iddata(t_o,[t_lara3,t_lara1,t_lara2,t_e,t_in,rs,t_c],10);
data = iddata(t_o,[t_lara1,t_lara2,t_lara3,t_e,t_in,t_c],10);

% Ordem 8
% m = n4sid(data, 8)
% set(m, 'outputname', 't_o', 'inputname',
%      {'t_l_a_r_a_3';'t_l_a_r_a_1';...
%      't_l_a_r_a_2';'t_e';'t_i_n';'rs';'t_c'})
% Ordem 7
m = n4sid(data, 7)
set(m, 'outputname', 't_o', 'inputname', {'t_l_a_r_a_1';'t_l_a_r_a_2';...
      't_l_a_r_a_3';'t_e';'t_i_n';'t_c'})

```

```

% Plota a resposta do sistema discreto
% ye =
dlsim(m.a,m.b,m.c,m.d,[t_lara3,t_lara1,t_lara2,t_e,t_in,rs,t_c],...
%      m.x(1:8));
ye = dlsim(m.a,m.b,m.c,m.d,[t_lara1,t_lara2,t_lara3,t_e,t_in,t_c],...
%      m.x(1:7));

% Resultado da identificacao
% figure(6)
% plot(t,[ye,t_o]);
% xlabel('Tempo decorrido do inicio do experimento (h)')
% ylabel('Temperaturas (°C)')
% legend('t_e_s_t','t_o')
% title('Identificação da sala - ordem 8')
% erro8 = (ye - t_o);
figure(6)
plot(t,[ye,t_o]);
xlabel('Tempo decorrido do inicio do experimento (h)')
ylabel('Temperaturas (°C)')
legend('t_e_s_t','t_o')
title('Identificação da sala - ordem 7')
erro7 = (ye - t_o);

% Media do quadrado dos erros
%mqe8 = sum((t_o - ye).*(t_o - ye))/(2*na)
mqe7 = sum((t_o - ye).*(t_o - ye))/(2*na)

% Erro e lugar das raizes
% figure(7)
% plot(t,erro8);
% xlabel('Tempo (h)')
% ylabel('t_o - t_s_i_m (°C)')
% title('Erro entre valor real e simulado')
% grid;
% figure(8),pzmap(m)
figure(7)
plot(t,erro7);
xlabel('Tempo decorrido do inicio do experimento (h)')
ylabel('t_o - t_s_i_m (°C)')
title('Erro entre valor real e simulado')
grid;
figure(8),pzmap(m)

```

## **E – VIII INDUSCON (ARTIGO PUBLICADO)**

INDUSCON (Conferência Internacional de Aplicações Industriais) é uma conferência internacional idealizada pelo IEEE-IAS (*Institute of Electrical and Electronics Engineers & Industrial Application Society*) Seção Sul Brasil, com objetivo de promover o progresso tecnológico da teoria e prática da melhor aplicação de engenharia elétrica e eletrônica na indústria.

## BUILDING IDENTIFICATION FOR ENERGY-SAVING AUTOMATION USING FIRST-PRINCIPLES MODELS

Bruno B. S. Vieira, Rafael S. Wyant, Flávio A. R. Oliveira, Lothar Litz and Adolfo Bauchspiess

Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes

Grupo de Robótica, Automação e Visão Computacional

Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade de Brasília

brunobsvieira@yahoo.com.br , rafaelsoaresw@yahoo.com, flavioaugustor@gmail.com, litz@eit.uni-kl.de, adolfobs@unb.br

**Abstract** – This paper presents a first-principles structured identification approach for a thermal environment consisting of four rooms in an office building, aiming an efficient model that can lead to successful controller designs suitable for energy-saving and comfort control strategies, such as predictive HVAC control. The controller can take into account different time constants (dynamics) of the environment and the scheduled and real occupation, minimizing de energy demand. The obtained first-principles model simplifies the parameters identification, associating physical meaning to the internal model states and allowing easier parameters adjusts in case of environment changes.

**Keywords** – Building Automation, first-principles models, system identification.

### I. INTRODUCTION

Energy consumption in Brazil has increased strongly in recent years, in part due to higher industry production volumes, but without considerable gains in energy efficiency. There still exists significant and costly energy waste, [1], [2].

Buildings are responsible for great part of energy consumption, considering commercial and residential sectors, mostly consumed by air conditioning and lighting. Besides there are many factors influencing an environment, all of them with a complex interaction with thermal comfort and energy demand [3].

In this scenario, it is easy to see that building acclimatization may become quite a cumbersome problem if high degrees of comfort and energy saving are required.

As very complex dynamic systems, a prior knowledge is required to have information that can lead to successful controller designs best suited for energy-saving and comfort control strategies.

Creating more efficient buildings could represent great energy save and consequently result environmental and economic consequences.

In Section II we present a review of previous work involving HVAC systems and building identification.

Section III presents the first-principles structured identification approach. Section IV presents the modeled bureau rooms, the test environment. Section V shows the experimental apparatus and section V some results from the retrofitted bureaus. We conclude this paper with the conclusions.

### II. BUILDING IDENTIFICATION

Some relevant previous work that use identification has been presented in the field of energy-saving building automation. Anderson et al., [4], presented a robust MIMO approach for the control of a HVAC system. However most of such works deal with central air conditioning. Window air conditioners are seldom focused, despite their widespread utilization.

Most controllers used in buildings are very simple. The on-off controller with hysteresis is perhaps the most widely used building controller due to its simplicity. The also very popular PI controller is often designed empirically. In both cases no process model is used. To really enhance the control with respect to energy saving and comfort, some kind of model-based approach is needed. With this objective, different approaches have been proposed.

Virk et al., [5], presents a practical methodology to identify buildings as linear MIMO ARMAX models. Heating, cooling and humidification are used as inputs. Climatic variables and occupants are considered disturbances. The output variables are the temperature and the relative humidity of an office zone. For the test room considered, with a 5min sampling period, a 3rd order model was obtained. The authors point out the need for a rich input signal excitation over long periods of time. They carried out 3 days of data acquisition.

The latter approach is known as black-box identification because no information about the inner process is used to guide the identification, only the input-output dynamic behavior is. The underlying assumption is that the excitation signals are almost white noise, indeed approximated by Pseudorandom Binary Sequence (PRBS), so that no frequency band is benefited by the identification routine.

When dealing with climate signals as outside temperature, solar radiation and wind, it is virtually impossible to guarantee a good excitation.

The linear MIMO 3rd model used by Virk, [5], uses 8 input signals and one disturbance to predict the temperature and the humidity.

Spasokukotskiy et al., [6], proposes to use a simplified lumped-parameters thermodynamic model of the building to access the Predicted Mean Vote (PMV) comfort index. The weather is assumed to be a disturbance.

The most important practical difficulty of such first-principles modeling is the great quantity of parameters defining the thermal behavior of the building materials and their interaction with the room air and the outer climate. This kind of modeling is, therefore, quite cumbersome for a practical application in predictive control.

## I. FIRST-PRINCIPLES IDENTIFICATION

Different techniques can be used to produce a dynamical model that predicts the thermal behavior of a building environment. The objective is to have a model that supports an energy-saving controller.

Heating, cooling, outside and vicinity temperature are the most easily measured parameters and which have the greater impact on the ISO7730 PMV norm.

The use of generic MISO identification algorithms give rise to physical inconsistencies, [7], e.g., the obtained complex poles and non minimal-phase zeros, not compatible with a thermal process.

### A. First-Principles Structured Identification

The basic idea in the first-principles structured identification is to add the thermal energy flow into a room. Depending on the modeling effort employed, different physical phenomena can be included, [7], [8].

To model the heat transfer from the vicinity, the wall should be investigated. Fraisse, [9], analyzed different wall models, e.g. 2R1C, 1R2C, 3R4C, 3R2C. In the simplest 2R1C conduction model, [9], we consider a wall internal thermal capacitance and two thermal conductivity elements (Fig. 1). The heat flow  $q$  between rooms depends on the difference  $T_{iv} - T_o$ . The temperature  $T_{iv}$  relates to a fictitious point in the middle of the wall, while  $T_o$  is the room temperature and  $T_v$  is the vicinity temperature.

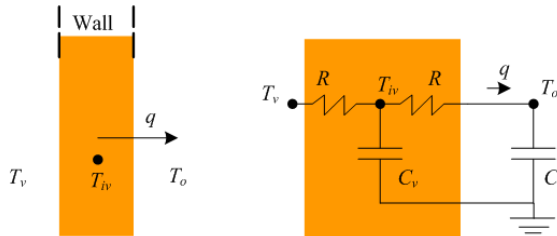


Fig.1. 2R1C analogy of the vicinity heat transfer.

The room equivalent thermal capacitance is given by

$$C = mc, \quad (1)$$

where:

$C$  - room's thermal capacitance (J/K),

$m$  - air mass in the room (Kg),

$c$  - specific heat of the air (J/Kg.K).

The specific heat of the air, in normal conditions, is 1005 J/Kg.K. Each room has a different volume. For the mass calculation the following equation was used, considering the air density 1.2Kg/m<sup>3</sup>,

$$m = \rho V, \quad (2)$$

where:

$\rho$  - air density (Kg/m<sup>3</sup>),

$V$  - air volume (m<sup>3</sup>).

An equivalent calculation can be done for the wall thermal capacitance  $C_v$ . It should be emphasized that this is a very strong simplification of the wall thermal behavior, a concentrated parameter model. We obtain these parameters using an experimental procedure and it should only be sufficiently precise to allow a good controller design.

From the signal-flow graph, Fig. 2, we can calculate the transfer function from  $T_v$  to  $T_o$ :

$$\frac{T_o(s)}{T_v(s)} = \frac{1}{R_v C_v s + 1} \frac{1}{R_v C s + 1} \quad (3)$$

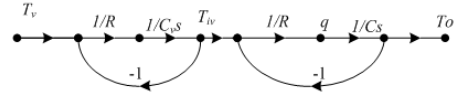


Fig. 2. 2R1C-based wall model.

If, for example, we also consider the solar radiation  $G_s$  and the external temperature  $T_w$ , we can easily build a first-principles model where the thermal energy flow  $q_r$ ,  $q_v$  and  $q_w$  are summed in order to explain the room temperature  $T_o$ , as can be seen in Fig. 3. The point is that each parcel can be inspected individually.

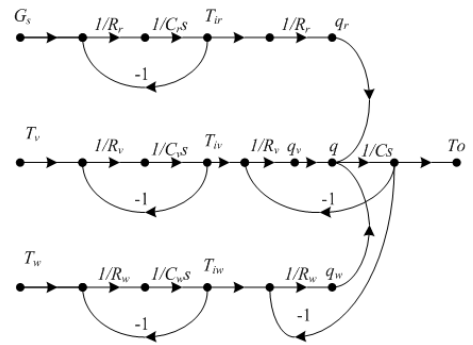


Fig. 3. 2R1C-based room model – considering: vicinity, solar radiation and external temperature.

Every neighboring room has, most often, a different temperature. The walls constitution can also differ. Ceiling and floor have very different thermal characteristics. In the present work we will assume that the dominant vicinity



dynamics can be approximated by the simple 2R1C model, Fig. 1.

The weather contribution is similar, considering a fictitious temperature inside the window's glass. The solar radiation produces a heat transfer that could be delayed (first order assumed), but is not dependent on the room temperature.

The air volume in the room is modeled as a concentrated thermal capacitance  $C$ . In the first-principles model we sum the heat flows allowing a separate identification of each model component. A positive heat flow to  $C$  is accumulated and enhances the room temperature. A negative heat flow reduces the room temperature.

### I. THE MODELED ENVIRONMENT

Figure 1 shows the bureau's floor plan modeled in this research. Each room has a window air conditioner installed, except room A4.



Fig. 1. MIMO thermal environment.

Figure 2 shows the model of the room 2 obtained using the first-principles identification approach. The process identification was divided in three stages, [10].

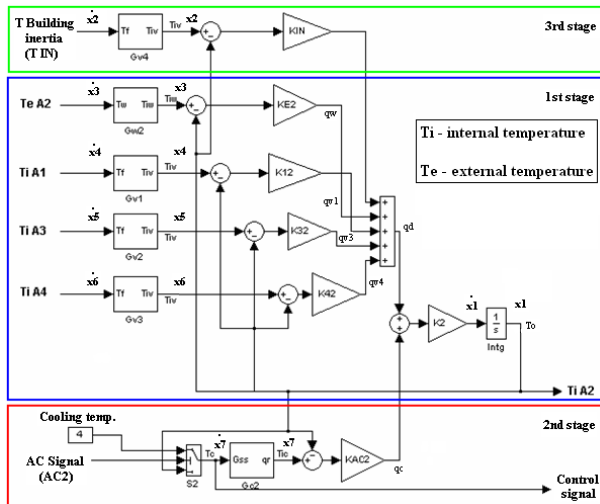


Fig. 2. First-principles structured thermal model for room A2.

Table I shows the thermal parameters of each room.

**Table I**  
**Room's thermal capacity (at 25°C)**

Room	A4	A3	A2	A1
V (m³)	72.51	44.37	29.61	25.96
C (J/°C)	87448	53507	35707	31307
1/C(°C/J)	3.194e-5	2.800e-5	1.869e-5	1.144e-5

From Figure 2, it is possible to obtain the model in a state-space form.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (1)$$

where

$$A = \begin{bmatrix} -\left(\frac{K_{IN} + K_{E2}}{C_2} + \frac{K_{12} + K_{32}}{C_2} + \frac{K_{42} + K_{AC2}}{C_2}\right) & K_{IN}/C_2 & K_{E2}/C_2 & K_{12}/C_2 & K_{32}/C_2 & K_{42}/C_2 & K_{AC2}/C_2 \\ 0 & -1/a_{IN} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/a_{E2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/a_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1/a_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/a_{42} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1/a_{AC2} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1/a_{IN} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/a_{E2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/a_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/a_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/a_{42} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/a_{AC2} \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

where

- $x$  – state vector,
- $u$  – input vector plus measurable disturbance signal,
- $y$  – Output signal (room temperature).

The first-principles model simplifies the parameters identification, associating physical meaning to the internal model states. If we have another room with similar walls, the gain  $K$  and the time constant can be calculated. With the conventional black-box identification, however, every time the whole model has to be identified.

The first stage only considers the heat flow between the room and the external environment. The constants found on this stage don't change on the next stages.

On the second stage, the influence of the air conditioners was also considered. The only room without second stage is the room A4, because it doesn't have an air conditioner.

The third and last stage of the identification process considers the building's thermal inertia and relates to its ability to object to changes in the inside temperature, due to the heat accumulation in its elements of construction.

Figure 3 shows the complete four-room model. Each room has a similar model as shown on Fig. 2. In the model can also

be seen controllers prepared for simulation of digital control of the room temperature using the air conditioners.

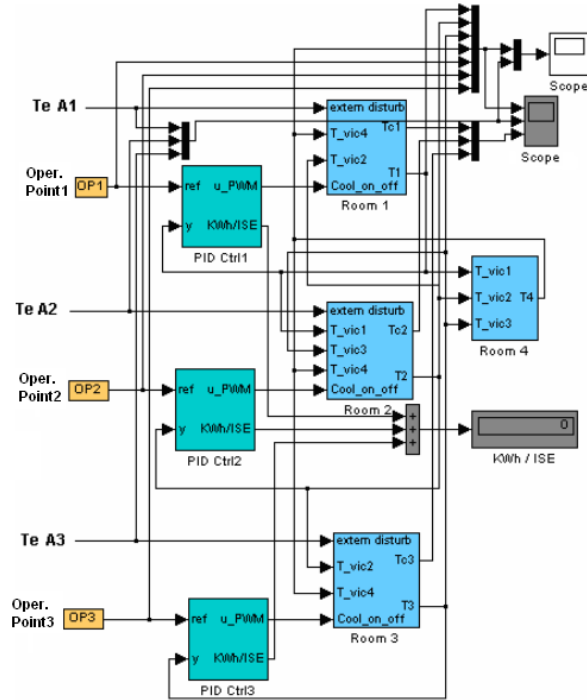


Fig. 1. Four-room model of the test environment.

In the next section the experimental setup will be described.

### I. THE EXPERIMENTAL APPARATUS

A SCADA system was set up to get all the measures necessary in order to achieve the identification of the environment as well as to apply a future digital control of this system.

Each room, except the fourth one, had an air conditioner installed. To switch them on/off, a thyristor based circuit was built to actuate externally, not to void the manufacturer's warranty. Each circuit was connected to a PLC. Besides, thermistors were connected to the PLCs to measure temperature. The kit used in each air conditioner is shown on Fig. 2.



Fig. 2. Photo of an air conditioner interface kit.

A PC with a SCADA software installed acts as the brain of the system and is responsible for acquiring all the data measured by the CLPs. This relation can be seen in Fig. 2.

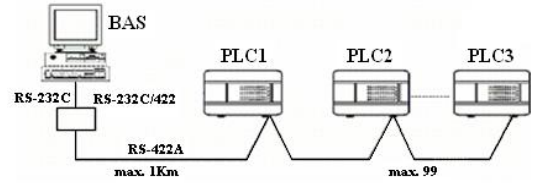


Fig. 3. Implemented automation architecture.

### II. RESULTS

The obtained values for the parameters of the modeled environment are summarized in Table II. This table presents for each heat flow component considered in the identification the gain  $K_n$  and the time constant  $a_n$ , where  $n$  stands for the referred room number. Taking the influence of the room thermal capacitance into account, the value of each heat flow gain is multiplied by its particular room thermal capacitance.

**Table I**  
**Preliminary model parameters**  
( $a$  - time constants [min],  $K$  - gain, ND = Not Defined)

Heat Flow		Room A1	Room A2	Room A3	Room A4
Room	$K_n$	1	1	1	1
Thermal Inertia	$a_n$	2.569	3,281	4.500	38.850
Building	$K_{In}$	9.58e-2	8.40e-2	6.91e-2	3.43e-3
Thermal Inertia	$a_{In}$	100	100	100	100
Room A1	$K_{In}$	ND	8.40e-2	ND	1.14e-3
Vicinity	$a_{In}$	ND	0.637	ND	2.369
Room A2	$K_{In}$	1.113e-1	ND	1.96e-2	6.86e-3
Vicinity	$a_{In}$	0.895	ND	0.810	ND
Room A3	$K_{In}$	ND	2.80e-2	ND	1.43e-2
Vicinity	$a_{In}$	ND	2.073	ND	1.692
Room A4	$K_{In}$	1.118e-1	3.03e-2	8.48e-2	ND
Vicinity	$a_{In}$	1,180	ND	4,029	ND
External	$K_{En}$	3.51e-2	5.04e-2	1.50e-2	ND
Environment	$a_{En}$	258,93	128,41	149,81	ND
Air	$K_{ACn}$	3.51e-2	2.80e-2	3.36e-2	ND
Conditioner	$a_{ACn}$	2	2	2	ND

The time constant value of the room's thermal inertia increases in a nonlinear fashion as the size of the room increases: room A1, the smallest one, has a time constant of 2.57 minutes while the biggest room, A4, has a time constant of approximately 39 minutes. It is in conformance with the common sense physical intuition: the bigger the room capacitance is, the longer the step responses will be.

During the data acquisition phase it was observed that room A4 had the smallest daily thermal amplitude while room A1 registered the biggest daily thermal amplitude. This behavior is represented by a smaller heat flow gain for each heat flow contribution. This is expected once a larger room has a bigger thermal capacitance, therefore demanding more thermal energy to increase its temperature by a certain temperature interval.

Considering the building thermal inertia, it is noticed that the largest room has the smallest heat flow gain while the room with the smallest area has the biggest heat flow gain. It indicates that a room with a smaller thermal capacitance is more affected by a building temperature fluctuation than a room with a bigger thermal capacitance.

Once the identification of the cooling system was done considering the air conditioner status (on/off) instead of the current temperature actuating over the room ( $4^{\circ}\text{C}/\text{room}$  temperature  $T_o$ ), a nonlinear term ( $T_o - 4$ ) must be added in order to compensate the air conditioner gain. Assuming the ASHRAE *Standard 55* ideal temperature for winter ( $22^{\circ}\text{C}$ ) as the operation point OP, each air conditioner gain shall be multiplied by 18.

Regarding the weather contribution, the heat flow is expected to be directly proportional to the area of the wall separating the room from the external environment, but the room thermal capacitance shall also be taken into consideration. Room A2, which has the largest wall area, has the biggest heat flow gain. However, room A3 has the second largest wall area but has the smallest heat flow gain, which is consequence of its bigger thermal capacitance.

The identification of the heat flow between adjacent rooms shall take into account the parameters calculated in both single room identifications. Once the wall characteristics are invariable, the parameters of the single room identifications should be the same; otherwise a heat flow unbalance would be produced when the adjacent rooms are interconnected.

These parameters are in fact not identical, Table II. The system identification was done using the function *n4sid* from the MATLAB system identification toolbox. This function computes the system state-space model using an error minimization algorithm, while the proposed model is structured. This difference in modeling approach can produce incoherent results, such as models with complex poles, which are not compatible with a thermal process.

Furthermore, the modeled thermal process is inherently a distributed parameter system, which is being modeled as a lumped parameter system. For that reason special attention should be given to the data acquisition stage, particularly to the sensor's locations, in order to obtain a data set which represents reasonably well the whole system dynamic.

In order to solve the matter regarding the identification of the heat flow between adjacent rooms, the final model considers the average of the two different values found in the single room identifications, Table III.

**Table III**  
**Heat flow parameters between adjacent rooms – adjusted**  
**(*a* - time constants [min], *K* - gain, ND = Not Defined)**

Heat Flow	Room A1	Room A2	Room A3	Room A4
Room A1	$K_{In}$	ND	$9.77\text{e-}2$	$5.65\text{e-}2$
Vicinity	$a_{In}$	0,766	ND	1,775
Room A2	$K_{2n}$	$9.77\text{e-}2$	ND	$2.38\text{e-}2$
Vicinity	$a_{2n}$	0,766	1,442	ND
Room A3	$K_{3n}$	ND	$2.38\text{e-}2$	$4.96\text{e-}2$
Vicinity	$a_{3n}$	ND	1,442	2,861
Room A4	$K_{4n}$	$5.65\text{e-}2$	$1.86\text{e-}2$	$4.96\text{e-}2$
Vicinity	$a_{4n}$	1,775	ND	2,861

The final values for the parameters of the modeled environment including the adjustments are summarized in Table IV.

**Table IV**  
**Final model parameters**  
**(*a* - time constants [min], *K* - gain, ND = Not Defined)**

Heat Flow	Room A1	Room A2	Room A3	Room A4
Room Thermal Inertia	$K_n$	1	1	1
	$a_n$	2.569	3.281	4.500
Building Thermal Inertia	$K_{In}$	$9.58\text{e-}2$	$8.40\text{e-}2$	$6.91\text{e-}2$
	$a_{In}$	100	100	100
Room A1 Vicinity	$K_{1n}$	ND	$9.77\text{e-}2$	ND
	$a_{1n}$	ND	0,766	1,775
Room A2 Vicinity	$K_{2n}$	$9.77\text{e-}2$	ND	$2.38\text{e-}2$
	$a_{2n}$	0,766	ND	1,442
Room A3 Vicinity	$K_{3n}$	ND	$2.38\text{e-}2$	ND
	$a_{3n}$	ND	1,442	2,861
Room A4 Vicinity	$K_{4n}$	$5.65\text{e-}2$	$1.86\text{e-}2$	$4.96\text{e-}2$
	$a_{4n}$	1,775	ND	2,861
External Environment	$K_{En}$	$3.51\text{e-}2$	$5.04\text{e-}2$	$1.50\text{e-}2$
	$a_{En}$	258.93	128.41	149.81
Air Conditioner	$K_{ACn}$	0.632	0.504	0.605
	$a_{ACn}$	2	2	2

Figure 1. shows a sample data signal used in the identification and Fig.2 the related identification error.

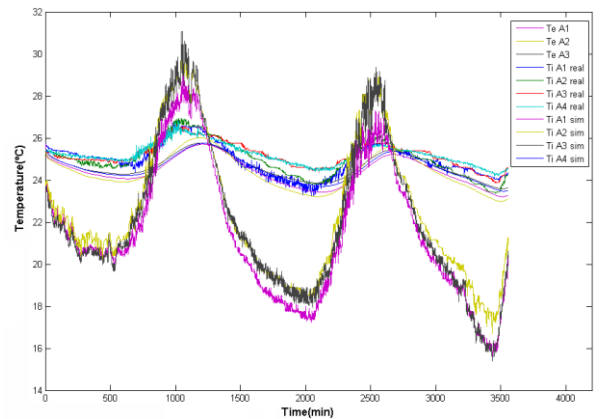


Fig. 1. Measured signals used in the identification.

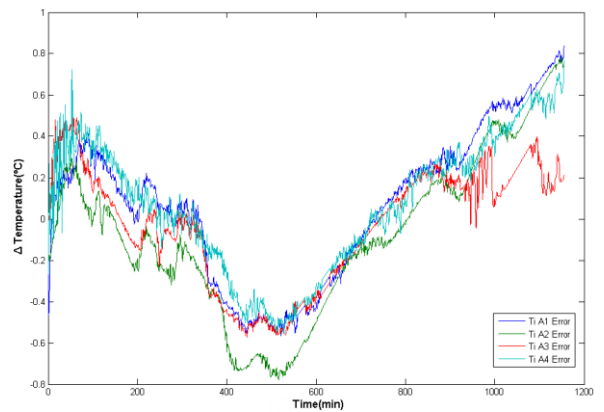


Fig. 2. Obtained error of the identified model.

Figure 1 shows the identification results of room A2 using the final model parameters. The red line indicates the air conditioner signal (on/off). In Figure 2 we see the residual error, smaller than 1°C.

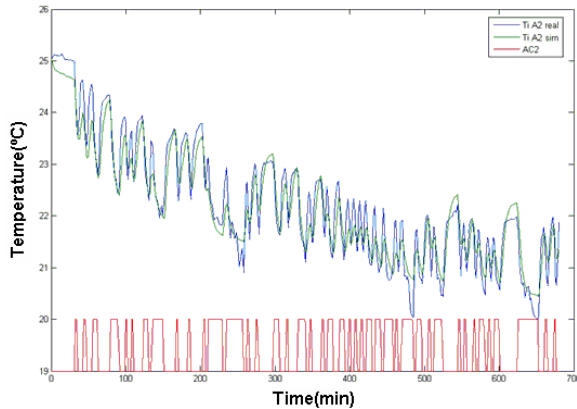


Fig. 1. Identification results of room A2.

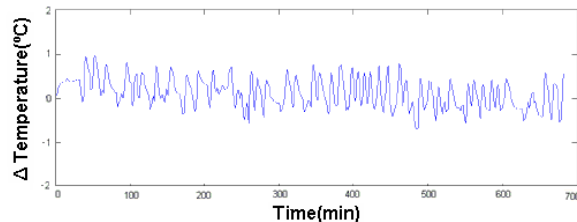


Fig. 2. Error of the identified model.

The first-principles model simplifies the parameters identification, associating physical meaning to the internal model states. If we have another room with similar walls, the gain  $K$  and the time constant can be derived. With the conventional black-box identification, however, every time the whole model should be identified.

## I. CONCLUSIONS

The first-principles approach allows the separation of different heat flow contributions, simplifying the parameters identification, associating physical meaning to the internal model states and allowing easier parameters adjusts in case of environment changes without the need of discarding the entire model, as with the conventional black-box identification.

Aiming an efficient model for successful controller designs taking into account energy-saving and thermal comfort, the resulting analytical dynamic model obtained was satisfactory. Besides, the model is suitable for predictive HVAC control.

A predictive HVAC controller seems to be a natural choice whilst it can cope with actuator saturations and can potentially obtain the best compromise between comfort and energy-saving through an optimization problem. The process

is slow and acting in advance could considerably improve thermal comfort.

Further research lies on methodology improvements, which involves the use of more accurate temperature sensors, their positioning in the rooms and the design of the controller for evaluating purpose. The use of wireless technologies in Building Automation (eg. Zigbee) can also be explored, simplifying the retrofitting task and making the automation more affordable.

## ACKNOWLEDGEMENT

The authors acknowledge CAPES-PROBRAL and CNPq-CT-Energ and Spin Engenharia de Automação Ltda. for supporting this research.

## REFERENCES

- [1] BEN2007, "Balanço Energético Nacional 2007", *Ministério de Minas e Energia*, Ano-Base 2006, Brasil, 2007.
- [2] PROCEL2008, <http://www.eletronbras.com/elb/procel/main.asp>, Brasil, 2008.
- [3] F. Felgner, R. Merz, L. Litz, "Modular Modelling of Thermal Building Behaviour", *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 12(1), 35-49, 2006.
- [4] M. Anderson, M. Buehner, P. Young, D. Hittle, C. Anderson, J. Tu, D. Hodgson, "An experimental system for advanced heating, ventilating and air conditioning (HVAC) control", *Energy and Buildings* 39, pp. 136-147, 2007.
- [5] G. S. Virk, J. Y. M. Cheung, "Practical stochastic multivariable identification for buildings", *Applied Math. Modeling*, 19(10):621-636, 1995.
- [6] K. Spasokukotskiy, H.-R. Tränkle, and K. Lukasheva, "Model-Based Method to Measure Thermal Comfort in Buildings", *IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing System*, Lviv, Ukraine, pp. 154-158, 2003.
- [7] A. Bauchspiess, J. Y. Ishihara, F. Felgner, L. Litz, "First-Principles Structured Identification for Predictive HVAC Control", *CLCA2006*, Salvador, 6pp., 2006.
- [8] van Lith, P. F., Betlem, B. H. L. and Roffel, B., "A structured modeling approach for dynamic hybrid fuzzy-first principles models", *Journal of Process Control* 12(2002):605-615, 2002.
- [9] G. Fraisse, C. Viardot, O. Lafabrie, G. Archand, "Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy", *Energy and Buildings* 34(2002) 1017-1031, 2002.
- [10] B. B. S. Vieira and R. S. Wyant, "Automação e Controle de um Ambiente Predial Multi-Salas utilizando o Supervisorio ActionView", *Graduation Work, University of Brasília*, 51pp, in portuguese, 2007.