

## **TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

# **Automação e Controle de um Ambiente Predial Multi-Salas utilizando o Supervisório “ActionView”**

Por,  
**Bruno de Brito Silva Vieira**  
**Rafael Soares Wyant**

**Brasília, Julho de 2007**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

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

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

## **TRABALHO DE GRADUAÇÃO**

# **Automação e Controle de um Ambiente Predial Multi-Salas utilizando o Supervisório “ActionView”**

**POR,**

**Bruno de Brito Silva Vieira  
Rafael Soares Wyant**

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

### **Banca Examinadora**

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

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

Prof. Carlos Humberto Quintero Llanos, UnB/ ENM \_\_\_\_\_

Brasília, Julho de 2007

## FICHA CATALOGRÁFICA

VIEIRA, BRUNO DE BRITO SILVA

WYANT, RAFAEL SOARES

Automação e Controle de um Ambiente Predial Multi-Salas utilizando o Supervisório “ActionView”, [Distrito Federal] 2007.

xi, 77p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2007). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

1. Automação Predial

2. Identificação de Sistemas

3. Conforto Térmico

4. Software SCADA

I. Mecatrônica/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VIEIRA, B. B. S., WYANT, R. S. (2007). Automação e Controle de um Ambiente Predial Multi-Salas utilizando o Supervisório “ActionView”. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº 013/07, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 82p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTORES: Bruno de Brito Silva Vieira e Rafael Soares Wyant.

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: Automação e Controle de um Ambiente Predial Multi-Salas utilizando o Supervisório “ActionView”.

GRAU: Engenheiro

ANO: 2007

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

---

Bruno de Brito Silva Vieira

SQN 313 Bloco C ap 501 - Asa Norte.

70766-030 Brasília – DF – Brasil.

---

Rafael Soares Wyant

SQS 306 Bloco K ap 201 - Asa Sul.

70353-110 Brasília – DF – Brasil.

## AGRADECIMENTOS

*Aos meus pais e à minha irmã, pelo apoio incondicional em todos os momentos; ao professor Adolfo Bauchspiess, pela oportunidade de trabalho e orientação; à Spin Engenharia, especialmente ao Simões e ao Wellington, pelo apoio ao projeto; aos amigos e à família, pelo incentivo incessante; aos colegas de curso, pelo companheirismo e amizade dentro e fora da UnB; ao Wyant, que encarou dividir o desafio deste projeto comigo; e à minha namorada, por ter mudado a minha vida com um sorriso.*

*Bruno de Brito Silva Vieira*

*Ao professor Adolfo Bauchspiess, pela orientação e total disponibilidade; à Spin Engenharia, pela oportunidade de usar a sala e os aparelhos sem restrições; à minha mãe e à minha irmã, por me aturar e apoiar em tempos tão difíceis; aos amigos, meu pai e à família, por eu ser o que sou hoje; à minha namorada, por tudo, perfeitinha; ao Bruno, a.k.a. Cocoti, pela grande demonstração de perseverança, encarando cada desafio encontrado ao longo do projeto.*

*Rafael Soares Wyant*

## RESUMO

Equipamentos de ar condicionado são o maior responsável pelo consumo de energia na maioria dos ambientes prediais, sendo que boa parte desse consumo é devido ao desperdício. A automação predial é responsável pela criação de soluções relacionadas ao uso racional e seguro de energia elétrica e de soluções de automação que proporcionem maior conforto e qualidade de vida.

Este trabalho trata da identificação de um ambiente predial composto por quatro salas. O objetivo da identificação é levantar um modelo matemático que represente suficientemente bem o comportamento térmico das salas, de modo que as informações resultantes possam ser usadas no projeto de controladores mais eficientes do ponto de vista de consumo de energia e cujo desempenho atenda às exigências de conforto térmico.

O conceito de identificação estruturada por princípios fundamentais é apresentado; suas características e vantagens são descritas, e uma metodologia de identificação usando esses princípios é proposta e discutida. Os resultados obtidos são empregados então no projeto de controladores para o sistema. Um software SCADA é usado para fazer a aquisição de dados e, posteriormente, para interface do acompanhamento do desempenho dos controladores projetados.

# **ABSTRACT**

On buildings environment, the air conditioner is responsible for the greatest consumption of electrical energy, but a big fraction of this consumption is just waste of energy. Building automation is in charge of solving this energy problem but always with comfort and healthy life issues in mind. This work is about the identification of a thermal environment compound by a room divided in four rooms. The objective of the identification is to create a mathematical model of the thermal environment. This model must be accurate enough to be used in projects of controller which the focus is the best use of electrical energy and achieving the thermal comfort standards. The first-principles structured identification is presented; the characteristics and advantages of this method are described and an identification methodology using these principles is proposed and discussed. Then, the results are used in a controller project for the system. A SCADA software is used for data acquisition and later to supervise the performance of the projected controllers.

# SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                         | <b>1</b>  |
| 1.1      | MOTIVAÇÃO                                 | 1         |
| 1.2      | OBJETIVO                                  | 2         |
| 1.3      | ESTRUTURA DO TEXTO                        | 2         |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>               | <b>3</b>  |
| 2.1      | SISTEMA TÉRMICO                           | 3         |
| 2.1.1    | Condução                                  | 3         |
| 2.1.2    | Convecção                                 | 4         |
| 2.1.3    | Radiação                                  | 5         |
| 2.2      | CONFORTO TÉRMICO                          | 5         |
| 2.2.1    | Norma ISO 7730                            | 5         |
| 2.2.2    | ASHRAE <i>Standard 55</i>                 | 8         |
| 2.3      | CONTROLE DE PROCESSOS                     | 9         |
| 2.3.1    | Liga-desliga                              | 9         |
| 2.3.2    | PID                                       | 10        |
| 2.3.3    | PID Digital                               | 11        |
| 2.4      | CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL            | 12        |
| 2.5      | PROGRAMA SUPERVISÓRIO (SCADA)             | 13        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA E APARATO EXPERIMENTAL</b> | <b>15</b> |
| 3.1      | AMBIENTE PREDIAL ESTUDADO                 | 15        |
| 3.2      | HARDWARE E SOFTWARE                       | 16        |
| 3.2.1    | Termístor                                 | 16        |
| 3.2.2    | Controladoras KMC                         | 17        |
| 3.2.3    | ActionView                                | 17        |
| <b>4</b> | <b>IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA</b>           | <b>20</b> |
| 4.1      | IDENTIFICAÇÃO ESTRUTURADA                 | 20        |
| 4.2      | METODOLOGIA DA IDENTIFICAÇÃO              | 25        |
| 4.3      | RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS             | 30        |
| <b>5</b> | <b>CONTROLE DO AMBIENTE</b>               | <b>44</b> |
| 5.1      | ESTRATÉGIAS DE CONTROLE                   | 44        |
| 5.1.1    | Liga-desliga                              | 44        |
| 5.1.2    | PID                                       | 44        |
| 5.2      | PROJETO DO CONTROLADOR                    | 44        |
| 5.2.1    | PID                                       | 44        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÕES</b> .....   | <b>48</b> |
| 6.1      | CONCLUSÕES GERAIS .....   | 48        |
| 6.2      | RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....                      | 49        |
|          | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....                         | <b>50</b> |
|          | <b>APÊNDICE I – CÓDIGOS MATLAB</b> .....                        | <b>51</b> |
|          | <b>APÊNDICE II – CÓDIGOS KMC</b> .....                          | <b>59</b> |
|          | <b>APÊNDICE III – MODELO DAS SALAS NO <i>SIMULINK</i></b> ..... | <b>62</b> |
|          | <b>APÊNDICE IV – IDENTIFICAÇÃO DAS SALAS</b> .....              | <b>64</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 – Relação entre PMV e PPD.....  | 8  |
| Figura 2.2 – Sistema com liga-desliga .....  | 9  |
| Figura 2.3 – Histerese liga-desliga.....   | 10 |
| Figura 3.1 – Planta SPIN.....  | 15 |
| Figura 3.2 – Controladora KMC .....  | 17 |
| Figura 3.3 – Supervisório ActionView .....   | 18 |
| Figura 3.4 – Tela de alarmes - <i>ActionView</i> .....                                       | 19 |
| Figura 3.5 – Tela de evolução das variáveis monitoradas - <i>ActionView</i> .....            | 19 |
| Figura 4.1 – Modelo de uma sala no <i>Simulink</i> .....                                     | 21 |
| Figura 4.2 – Análogo elétrico da transferência de calor entre salas vizinhas. ....           | 21 |
| Figura 4.3 – Diagrama de blocos do fluxo de calor entre salas vizinhas .....                 | 22 |
| Figura 4.4 – Modelo sala A2 para identificação estruturada por princípios fundamentais. .... | 26 |
| Figura 4.5 – Resultado da identificação da sala A2 .....                                     | 34 |
| Figura 4.6 – Erro na identificação da sala A2 .....  | 35 |
| Figura 4.7 – Resultado da validação da sala A2.....  | 35 |
| Figura 4.8 – Erro na validação da sala A2. ....  | 36 |
| Figura 4.9 – Resultado da identificação da sala A2 com ar condicionado.....                  | 37 |
| Figura 4.10 – Erro na identificação da sala A2 com ar condicionado .....                     | 37 |
| Figura 4.11 – Resultado da validação da sala A2 com ar condicionado.....                     | 38 |
| Figura 4.12 – Erro na validação da sala A2 com ar condicionado .....                         | 38 |
| Figura 4.13 – Modelo incluindo as quatro salas.....  | 40 |
| Figura 4.14 – Resultado da simulação do modelo incluindo as quatro salas .....               | 41 |
| Figura 4.15 – Erro na simulação do modelo incluindo as quatro salas.....                     | 41 |
| Figura 4.16 – Resultado da validação do modelo incluindo as quatro salas .....               | 42 |
| Figura 4.17 – Erro na validação do modelo incluindo as quatro salas.....                     | 42 |
| Figura 5.1 – LGR do processo de resfriamento da sala A2 sem controlador. ....                | 45 |
| Figura 5.2 – Projeto PID.....  | 46 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Atividades e o gasto de energia .....   | 6  |
| Tabela 2.2 – Vestuário e sua resistência térmica .....   | 7  |
| Tabela 2.3 – ASHRAE padrão 55 .....  | 8  |
| Tabela 4.1 – Capacitância térmica das salas (a 25°C) .....   | 23 |
| Tabela 4.2 – Parâmetros preliminares da identificação (constantes de tempo* $a$ e ganho $K$ ).<br>.....                    | 30 |
| Tabela 4.3 – Ganho do ar condicionado no ponto de operação em 22°C. ....   | 31 |
| Tabela 4.4 – Parâmetros de fluxo de calor entre salas vizinhas corrigidos (constantes de<br>tempo* $a$ e ganho $K$ ). .... | 33 |
| Tabela 4.5 – Parâmetros finais da identificação (constantes de tempo* $a$ e ganho $K$ .....                                | 33 |
| Tabela 5.1 – Parâmetros do controlador PID sala A2.....  | 47 |
| Tabela 5.2 – Parâmetros do controlador PID sala A1.....  | 47 |
| Tabela 5.3 – Parâmetros do controlador PID sala A3.....  | 47 |

# LISTA DE SÍMBOLOS

|        |  |
|--------|--|
| ASHRAE | - <i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i> |
| CLP    | - <i>Controlador Lógico Programável</i>  |
| DCS    | - <i>Distributed Control System</i>  |
| HVAC   | - <i>Heating, Ventilation and Air-Conditioning</i>                                 |
| KMC    | - <i>KMC Controls</i>  |
| PMV    | - <i>Predicted Mean Vote</i>   |
| PPD    | - <i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>                                      |
| PRBS   | - <i>Pseudorandom Binary Sequence</i>  |
| PWM    | - <i>Pulse Width Modulation</i>  |
| SCADA  | - <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>                                  |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

O consumo de energia elétrica vem aumentando a cada ano em todo o Brasil. Em parte, isso acontece porque o país está crescendo, o que significa mais indústrias, serviços, empregos etc. Mas outra parte é puro desperdício de energia.

As edificações são responsáveis por cerca de 48% do consumo de energia elétrica no Brasil, considerando-se os setores residencial e comercial. Grande parte dessa energia é consumida na geração do conforto ambiental aos usuários. O ar-condicionado, durante o verão, é responsável por um terço do gasto de eletricidade doméstico (ELETROBRÁS/Procel, 2007).

Para evitar o consumo exagerado de um ar condicionado, vários pequenos cuidados podem ser tomados, como manter o ambiente isolado (portas e janelas fechadas), não instalar o ar condicionado em lugares onde ele seja exposto a radiação solar, usar cortinas para evitar que a radiação solar aqueça a sala, limpar sempre os filtros para melhorar o desempenho, entre outros.

Mesmo tomando esses cuidados básicos ainda se registra um alto consumo de energia. Verifica-se que o maior desperdício de energia está diretamente associado ao fato de não existir um controle integrado que possa gerenciar o consumo de energia (Silva, 2005).

Há um ramo da engenharia chamado Automação Predial onde são estudados vários fatores para o controle de um ambiente predial sendo um deles a diminuição do consumo de energia garantindo o conforto térmico no ambiente.

O conforto térmico não depende apenas da temperatura, mas também da umidade, da velocidade do vento e da radiação, ainda há, além dos fatores ambientais, os fatores individuais que são o metabolismo e o vestuário (Fanger, 1972).

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. Isto requer que seja feita a identificação do sistema levando em consideração todas as variáveis que o afetam.

Bauchspiess et al., 2006, propõem uma identificação estruturada para controle preditivo de sistemas de calefação, ventilação e ar condicionado (HVAC). A idéia básica dessa abordagem é compor um modelo pela adição das parcelas de fluxo de energia envolvidas na dinâmica térmica do ambiente.

## 1.2 OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é criar condições para um estudo mais aprofundado do controle de temperatura em um ambiente predial. Para isso é necessário que seja feito um estudo acerca de todas as variáveis que influenciam o balanço energético de um ambiente e como essas variáveis se relacionam.

A proposta do projeto é levantar um modelo matemático válido para um ambiente predial multi-salas que represente suficientemente bem 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 às exigências de conforto térmico.

## 1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

Este trabalho é composto por seis capítulos. O primeiro é introdutório, aborda aspectos anteriores ao trabalho como motivação e os objetivos propostos para a realização do mesmo.

No segundo capítulo é apresentado um resumo da teoria relacionada ao que foi realizado neste trabalho: Uma breve explicação do funcionamento de um sistema térmico de acordo com seu balanço energético e as trocas de calor que o caracterizam. São abordados também os conceitos de controle usados neste trabalho. Uma descrição a respeito de controladores, em especial, os controladores liga-desliga e PID (Proporcional Integral Derivativo) é fornecida. O último tópico diz respeito ao funcionamento e aplicações dos *softwares* SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*).

O terceiro capítulo traz em seu conteúdo a metodologia e o aparato utilizado para a verificação experimental da proposta deste trabalho. O ambiente estudado é apresentado, assim como os equipamentos de hardwares e o software utilizados.

O capítulo quatro abrange a identificação do sistema. Ele dispõe sobre o tipo de identificação empregado, princípios envolvidos, metodologia do procedimento e, por fim, apresenta os resultados obtidos.

No quinto capítulo é apresentado o projeto de um controlador feito baseado do modelo identificado no capítulo quatro.

No capítulo seis são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 SISTEMA TÉRMICO

Para se identificar um sistema térmico, primeiramente deve-se saber quais as fontes de calor que o influenciam. No escopo deste projeto, o maior interesse é garantir conforto térmico com economia de energia, e para alcançar tal objetivo será obtido o modelo dinâmico do processo.

A temperatura de um ambiente varia de acordo com o fluxo de calor entre o ambiente e os ambientes vizinhos. O fluxo de calor entre os ambientes pode se dar de três maneiras: condução, convecção e radiação.

Para se realizar o cálculo do fluxo, os parâmetros como resistência e capacitância térmica serão aproximados a parâmetros concentrados a fim de permitir uma descrição por funções de transferência. Apesar de serem, de fato, de parâmetros distribuídos. A descrição por funções de transferência é suficiente para projetar melhores controladores para os aparelhos de ar condicionado que o controlador convencional liga-desliga.

#### 2.1.1 Condução

Na condução, o calor é transferido de molécula para molécula, ou seja, não há condução no vácuo. Mas cada material possui características diferentes. Cada um vai transferir o calor de maneira diferente, uns vão permitir uma passagem maior de calor e outros menor. Cada material tem a sua resistência térmica. Uma resistência alta indica que o material conduz menos calor.

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

A condução pode ser calculada pela equação 2.1:

$$q = \frac{kA}{\Delta X} \Delta T \quad (2.1)$$

- $q$  = taxa de fluxo de calor, kcal/s
- $k$  = condutividade térmica, kcal/m s °C
- $A$  = área normal ao fluxo de calor, m<sup>2</sup>

- $\Delta X$  = espessura do condutor, m
- $\Delta T$  = diferença de temperatura, °C

A resistência do material é definida como:

$$R = \frac{\Delta X}{kA} \quad (2.2)$$

A resistência de um objeto não depende apenas de seu material e de suas características ( $k$ , condutividade térmica), depende também da sua forma. Quanto maior a espessura, maior a resistência e quanto maior a área, menor a resistência do objeto.

### 2.1.2 Convecção

A convecção ocorre quando dois fluidos em um mesmo recipiente estão a temperaturas diferentes. O fluido tende a se misturar por causa da diferença de densidade. A transferência de calor ocorre juntamente com a transferência de massa do fluido.

Essa transferência pode ser calculada com a equação 2.3 mostrada a seguir:

$$q = HA\Delta T \quad (2.3)$$

- $q$  = taxa de fluxo de calor, kcal/s
- $H$  = coeficiente de convecção, kcal/m<sup>2</sup> s °C
- $A$  = área normal ao fluxo de calor, m<sup>2</sup>
- $\Delta T$  = diferença de temperatura, °C

Na convecção também há o entendimento de uma resistência térmica. A resistência indica a dificuldade que possui um material em transferir calor por convecção e depende tanto do material quanto da área normal ao fluxo de calor.

A resistência térmica na convecção é calculada pela equação 2.4:

$$R = \frac{1}{HA} \quad (2.4)$$

Em um ambiente predial, a convecção é importante para o entendimento do resfriamento por ar condicionado, que se dá inteiramente por convecção, ou seja, o ar condicionado apenas injeta ar a uma temperatura menor e as trocas de calor são dadas por convecção à medida que as massas de ar quente e fria se misturam.

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**

Um objeto também pode trocar calor sem contato direto, como são os casos da condução e da convecção. As trocas de calor por radiação se dão por meio de ondas eletromagnéticas. A energia transferida dessa forma é chamada de radiação térmica. Por se tratar de ondas, essa troca de calor pode acontecer mesmo no vácuo.

Quanto maior a temperatura de um objeto, maior será a radiação térmica emitida. A radiação está relacionada à temperatura absoluta de um corpo, isto significa dizer que apenas um corpo a 0 K não vai emitir radiação.

Em um ambiente predial, apesar de várias trocas ocorrerem entre todos os objetos, a fonte de radiação de maior importância é o sol. Mesmo assim a troca de calor depende do material que a radiação solar encontra, podendo ser, muitas vezes, desprezada a importância dessa troca de calor.

## **2.2 CONFORTO TÉRMICO**

Para determinar se um ambiente está confortável não basta apenas observar uma certa temperatura, outros fatores ambientais como umidade e velocidade do vento também devem ser levados em conta.

Mas apenas os fatores ambientais também não são suficientes para determinar o conforto térmico. O conforto é uma medida subjetiva e individual, ou seja, não se pode garantir que duas pessoas irão se sentir confortáveis em um mesmo ambiente. Fatores como idade, sexo, atividade e vestuário também influenciam.

Para quantificar essa questão, duas normas serão consideradas nesse texto, a norma ISO 7730 e o padrão 55 da ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers*). Nesta norma, há uma fórmula que relaciona as variáveis individuais e ambientais com o número de pessoas insatisfeitas.

### **2.2.1 Norma ISO 7730**

Esta norma de 1994 relaciona diversos parâmetros individuais e ambientais com o número de pessoas insatisfeitas (PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied). A partir dos valores dos parâmetros, o PMV (Predicted Mean Vote) é calculado e em seguida, é feita a relação entre o PMV e o PPD.

O PMV varia de -3 até 3 e está relacionado com a noção de frio e quente, ou seja, quanto mais negativo, maior a sensação de frio e quanto mais positivo, maior a sensação de quente. A equação do PMV foi proposta por Fanger em 1972.

Para o cálculo do PMV são considerados os seguintes parâmetros:

- Parâmetros Individuais

- **Metabolismo** – Corresponde ao gasto de energia do corpo. Quanto maior o esforço da atividade, maior será o gasto de energia. Além da atividade, o metabolismo também está relacionado à área do corpo e é uma das variáveis de maior importância quando se analisa o conforto térmico pois altera consideravelmente a sensação de frio e quente.

A tabela a seguir mostra algumas atividades e seus valores de metabolismo.

Tabela 2.1 – Atividades e o gasto de energia

| Atividade  | Metabolismo        |     |
|--|--------------------|-----|
|  | W / m <sup>2</sup> | met |
| Deitado, reclinado                                     | 46                 | 0,8 |
| Sentado, relaxado                                      | 58                 | 1,0 |
| Atividade sedentária (escritório, residência, escola)  | 70                 | 1,2 |
| Atividade leve em pé (compras, indústria leve)         | 93                 | 1,6 |
| Atividade média em pé (balconista, trabalho doméstico) | 116                | 2,0 |
| Andando com velocidade 2 km/h                          | 110                | 1,9 |
| 3 km/h   | 140                | 2,4 |
| 4 km/h   | 165                | 2,8 |
| 5 km/h   | 200                | 3,4 |

- **Vestuário** – Outro dado importante para se estudar conforto térmico é a roupa que se está usando pois quanto mais agasalhado, maior será a sensação de calor. Essa variável é medida em relação à resistência térmica da roupa (m<sup>2</sup>K/W). A resistência também pode ser expressa em clo (corresponde a 0,155m<sup>2</sup>K/W).

Exemplos de vestuário e suas resistências térmicas são dados na tabela a seguir.

Tabela 2.2 – Vestuário e sua resistência térmica

| Vestuário             | Resistência Térmica |                      |
|-----------------------|---------------------|----------------------|
|                       | clo                 | m <sup>2</sup> K / W |
| Nu                    | 0,0                 | 0,000                |
| Calções               | 0,1                 | 0,016                |
| Tropical              | 0,3                 | 0,047                |
| Leve de verão         | 0,5                 | 0,078                |
| Trabalho              | 0,7                 | 0,124                |
| Inverno para interior | 1,0                 | 0,155                |
| Fato completo         | 1,5                 | 0,233                |

- Parâmetros Ambientais

- Temperatura do ar

Valor que indica a temperatura do ar seco. O fator ambiental predominante do ambiente quando se trata da sensação térmica.

- Umidade do ar

Corresponde a umidade relativa do ar. Um valor entre 0 e 1 a ser considerado na equação do PMV.

- Velocidade do ar

A velocidade do ar está diretamente ligada à convecção. Quanto maior a velocidade do ar, maior será a troca de calor com o meio e mais baixa será a sensação térmica.

- Temperatura radiante média

Utilizando o valor do PMV, podemos calcular o PPD pela equação 2.5.

$$PPD = 100 - 95e^{-(0,03353PMV^4 + 0,2179PMV^2)} \quad (2.5)$$

A figura 2.1 mostra a relação entre PPD e PMV.

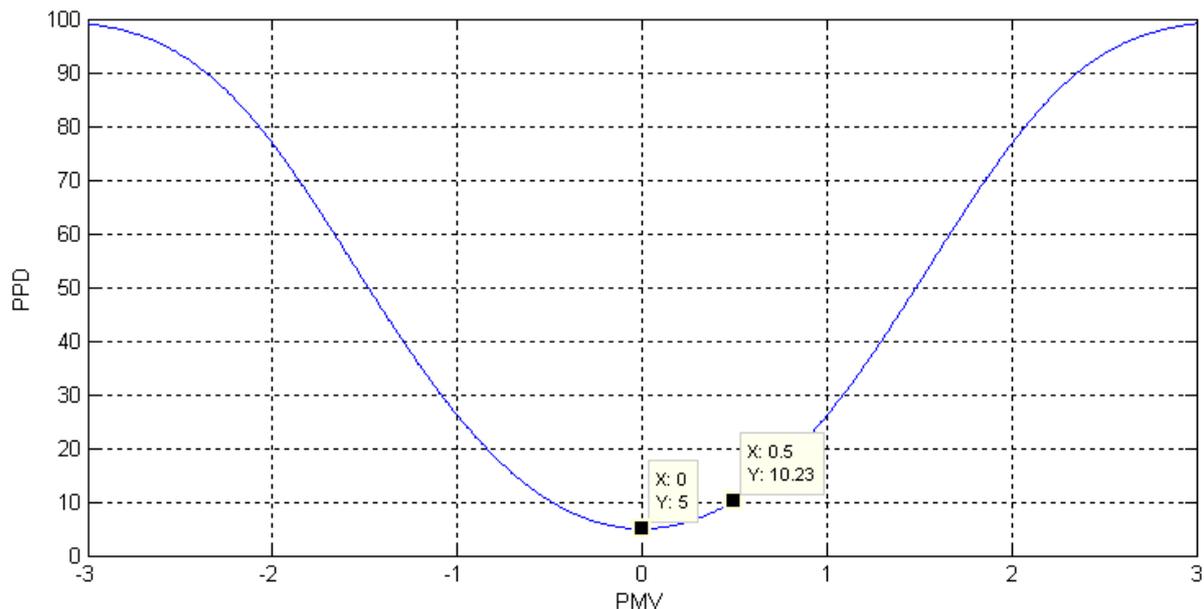


Figura 2.1 – Relação entre PMV e PPD

Pode-se ver na figura 2.1 que mesmo em condições ideais do PMV (igual a zero) ainda há um índice 5% de pessoas insatisfeitas com as condições térmicas do ambiente.

A Norma ISO 7730 afirma que, para um ambiente ser considerado termicamente confortável, o índice de insatisfação (PPD) não deve ultrapassar 10%. Isto significa dizer que o PMV deve sempre estar entre -0,5 e 0,5.

### 2.2.2 ASHRAE Standard 55

O padrão 55 da ASHRAE surgiu em 1992 e também é baseada na equação do PMV proposta por Fanger que foi descrita na seção anterior. O padrão 55 considera que para um ambiente estar termicamente confortável o percentual de insatisfação não pode ser superior a 20%.

A tabela 2.3 mostra os valores ideais de temperaturas e as outras condições de entrada que devem ser seguidas:

Tabela 2.3 – ASHRAE padrão 55

| Estação | Temperatura | Faixa aceitável | Condições  |
|---------|-------------|-----------------|--|
| Inverno | 22°C        | 20-23°C         | Umidade relativa: 50%<br>Velocidade relativa média: <0,15m/s<br>Temperatura radiante média: 1,2met<br>Isolação da vestimenta: 0,9clo |
| Verão   | 24,5°C      | 23-26°C         | Umidade relativa: 50%<br>Velocidade relativa média: <0,15m/s<br>Temperatura radiante média: 1,2met<br>Isolação da vestimenta: 0,5clo |

## 2.3 CONTROLE DE PROCESSOS

O controle é usado para, em um determinado sistema, garantir que uma variável física permaneça em um determinado valor estabelecido usando como entrada um ponto de operação, no caso de um controle de malha aberta, ou um erro, caracterizado pela diferença entre a saída do sistema e o ponto de operação desejado. No último caso, o controlador atua de forma a minimizar este erro.

Neste trabalho deseja-se controlar a temperatura de um ambiente predial e para isso serão utilizados os seguintes controladores.

### 2.3.1 Liga-desliga

O controle liga-desliga (*on-off*) é um dos controladores mais simples, por isso, é largamente utilizado em indústrias. Este tipo de controle também é chamado de controle de duas posições.

O controle liga-desliga se resume em ligar (potência máxima do atuador) quando a variável controlada atingir um limite mínimo e desligar quando a variável atingir um limite máximo. Quanto menor a diferença entre os limites máximo e mínimo, melhor é a precisão do controlador, mas normalmente essa diferença é limitada para evitar danos aos controlador por excesso de chaveamentos.

A figura 2.2 ilustra um sistema de malha fechada com um controlador liga e desliga.

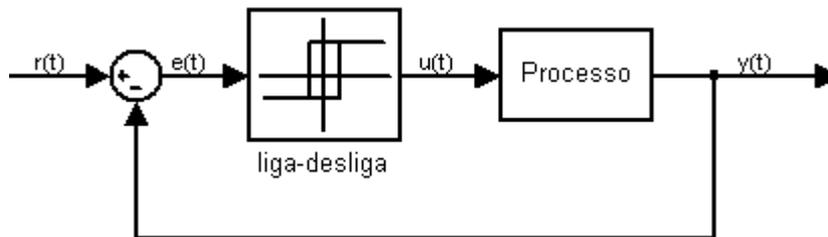


Figura 2.2 – Sistema com liga-desliga

Sendo  $r(t)$  a referência a ser seguida,  $e(t)$  o erro entre a saída  $y(t)$  e o ponto de operação desejado. O sinal  $u(t)$  representa a saída do controlador. O controlador liga-desliga é, normalmente, utilizado com uma histerese. Essa característica é melhor ilustrada na figura 2.3.

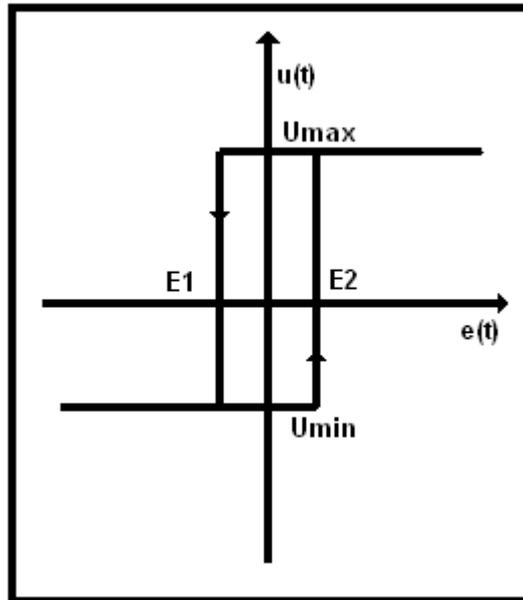


Figura 2.3 – Histerese liga-desliga

A figura 2.3 mostra que quando o erro aumenta até o limite máximo E2, a saída do controlador irá para  $U_{max}$  e assim permanecerá até que o erro diminua e passe pelo limite mínimo E1, quando o controlador desligará e sua saída será  $U_{min}$ , caracterizando assim uma histerese.

Apesar da simplicidade, o controlador liga-desliga não possui uma boa precisão, pois o sistema estará sempre oscilando e nunca entrará em regime permanente.

### 2.3.2 PID

O controlador PID é o mais utilizado na indústria atualmente. Essa popularidade se dá pelo fato de apresentar bons resultados quando o modelo matemático do sistema controlado não é conhecido ou não está bem caracterizado.

O sinal de controle em um controlador PID é gerado pela soma de três termos. A equação 2.6 mostra a soma dos termos proporcional, integral e derivativo, respectivamente.

$$u_{PID}(t) = u_p(t) + u_i(t) + u_d(t) \quad (2.6)$$

A equação 2.7 mostra a contribuição de cada um desses termos.

$$u_{PID}(t) = K_p \left( e(t) + \frac{K}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.7)$$

A equação 2.8 mostra a função de transferência de um controlador PID

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (2.8)$$

Cada um desses termos possui uma ação característica para controlar o sistema.

- Ação Proporcional

O termo isolado da ação proporcional é mostrado na equação 2.9.

$$U(s) = K_P E(s) \quad (2.9)$$

Esse termo atua diretamente no sinal de erro, quanto maior o erro, maior o sinal de controle a ser usado.

- Ação integral

O termo da ação integral é a equação 2.10.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_P 1}{T_I s} \quad (2.10)$$

A ação integral leva em conta a soma de todos os erros. Desse modo, essa ação garante que não haja erro em regime. Mas, apesar de acabar com o erro de regime, a ação integral diminui a estabilidade do sistema tendendo a gerar sobressinal.

- Ação derivativa

Caracterizada pela equação 2.11.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P T_D s \quad (2.11)$$

A ação derivativa leva em conta a rapidez com que o erro varia. Essa ação é empregada para aumentar a estabilidade do sistema impedindo que sejam gerados altos sobressinais.

A escolha das constantes normalmente se dá usando métodos por lugar geométrico das raízes (LGR) ou muitas vezes por tentativa e erro (comum na indústria).

### 2.3.3 PID Digital

Para que o controle PID possa ser aplicado a um processo controlado por um computador, o controle deve ser implementado de forma discreta. Para aproximar as equações diferenciais para a forma discreta será usado o método de Euler. As equações obtidas para cada termo do PID são mostradas a seguir, sendo T o tempo de amostragem.

Ação proporcional:

$$u(k) = K e(k) \quad (2.12)$$

Ação integral

$$u(k) = u(k-1) + \frac{K}{T_I} T e(k) \quad (2.13)$$

Ação derivativa

$$u(k) = \frac{KT_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \quad (2.14)$$

A combinação nesse caso deve ser feita com cuidado. Para fazer a combinação será usada a equação diferencial do PID, a equação 2.7. Primeiramente, a equação será colocada em termo de derivadas para que o método de Euler possa ser aplicado. A equação 2.15 mostra essa modificação.

$$\dot{u} = K \left( \dot{e} + \frac{1}{T_I} e + T_D \ddot{e} \right) \quad (2.15)$$

Usando o método de Euler (duas vezes para  $\ddot{e}$ ), é obtida a equação 2.16, a forma discreta do controlador PID.

$$u(k) = u(k-1) + K \left[ \left( 1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T} \right) e(k) - \left( 1 + 2 \frac{T_D}{T} \right) e(k-1) + \frac{T_D}{T} e(k-2) \right] \quad (2.16)$$

## 2.4 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL

Os CLP's (Controlador Lógico Programável), que normalmente são encontrados em indústrias, estão sendo utilizados também na área de automação predial.

O CLP é um computador construído para ser um sistema robusto e confiável. Existem fatores de proteção para o CLP que indicam qual seu grau de segurança ou o quanto ele está isento a falhas.

Para o funcionamento do CLP, é preciso programá-lo. A maioria dos CLP's pode ser programada em diversas linguagens. Essas linguagens normalmente são mais simples com uma lógica mais fácil ou uma linguagem que permita que o sistema continue com boa robustez.

Algumas das linguagens mais comuns para se programar em CLP's são Ladder, GRAFCET ou SFC (Sequential Flow Chart) e BASIC entre outros.

Um controlador CLP geralmente é construído de forma a aceitar módulos de entradas e saídas, o que confere uma grande flexibilidade ao equipamento. A expansão do número de entradas e saídas pode ser feita pela simples adição de módulos novos, sem a necessidade de alterar a configuração física do sistema implementado.

As entradas e saídas do CLP podem ser de dois tipos: analógicas e digitais. As entradas analógicas são usadas para medir quantidades que não se resumem a verdadeiro e falso, como o valor da temperatura ou umidade do ar. As entradas digitais possuem apenas dois estados e podem ser usadas para valores que podem variar entre dois valores exclusivos como um sensor de presença em uma sala, o pressionar de um botão ou o giro de uma chave.

Os valores analógicos precisam antes ser convertidos para seu respectivo valor em bytes, um valor que pode ser entendido pelo CLP. Para isso, o CLP já possui um Conversor A/D (analógico para digital) interno. Isso faz com que essa entrada analógica tenha uma taxa mínima de atualização.

## **2.5 PROGRAMA SUPERVISÓRIO (SCADA)**

Um “Supervisory Control and data Acquisition” (SCADA) é o software através do qual dados são recebidos e manipulados. É um ambiente útil para qualquer sistema que requer controle e supervisão de variáveis.

Os sistemas SCADA existem, praticamente, desde o surgimento do controle de processos. Tratava-se de máquinas com interface composta de LED's, mostradores de ponteiro, enquanto a supervisão e o controle eram feitos pelo operador da máquina. Esses mostradores, chaves e botões recebem o nome de IHM (Interface homem máquina). IHM é uma das principais características de um sistema SCADA.

Nos dias atuais, os sistemas SCADA normalmente são softwares que possuem uma IHM para supervisão e manipulação dos dados. Esses softwares ficam ligados por meio de uma rede a CLP's ou a outros pontos inteligentes.

O IHM de um software SCADA se resume a uma interface gráfica no computador. Essa tela é usada ao invés dos LED's e ponteiros usados tempos atrás.

As principais funções exercidas por um software SCADA são:

- Acompanhamento das variáveis do sistema;
- Acionamento de alarmes;
- Monitoração de falhas no hardware;

- Execução do programa de controle;
- Supervisão da rede de equipamentos;
- Ser capaz de “entender” diversos protocolos de comunicação.

Outras funções também podem existir dependendo da aplicação do sistema que deseja ser controlado e monitorado.

Os softwares SCADA também possuem hierarquia para o acesso ao sistema. Pode haver vários perfis de acesso ao programa, ou seja, pode haver perfis como “monitoração”, que será capaz apenas de acessar informações das medidas de dados, e outro perfil como “supervisor” para o qual será permitido efetuar mudanças diretas no sistema (alteração de um ponto de operação ou inclusive a parada total do sistema, por exemplo).

# 3 METODOLOGIA E APARATO EXPERIMENTAL

## 3.1 AMBIENTE PREDIAL ESTUDADO

O ambiente predial estudado é a sede da empresa Spin Engenharia de Automação Ltda. em Brasília. Trata-se de uma área de aproximadamente 100m<sup>2</sup> dividida em quatro salas. Apenas três das salas possuem ar-condicionado. A figura 4 mostra a planta do ambiente.



Figura 3.1 – Planta SPIN

Neste texto será usada a notação para as salas mostrada na figura 4, isto é, enumeradas de A1 até A4. As salas têm as seguintes características:

- Sala A1

Esta é a menor das salas, possui uma área de aproximadamente 11m<sup>2</sup>.

Possui contato com uma janela por onde troca calor com o ambiente externo. Também troca calor com a sala A2, a sala A4 e com o “prédio” (paredes de alvenaria).

A sala A1 conta com um ar-condicionado de 7500btu.

- Sala A2

Esta sala troca calor com todas as salas, com o ambiente externo e com o prédio (pelo chão e pelo teto). Possui uma área de aproximadamente 13m<sup>2</sup> e conta com um ar-condicionado de 7500btu idêntico ao da sala A1.

- Sala A3

A sala A3 é a maior sala que possui ar-condicionado. A área da sala A3 é de aproximadamente 19m<sup>2</sup> e por ter uma área maior que as salas A1 e A2, possui um equipamento de ar condicionado mais potente, de 18000btu. Esta sala troca calor com a sala A4, a sala A2, o ambiente externo e o “prédio”.

- Sala A4

É a maior sala com 31m<sup>2</sup>, mas não possui ar-condicionado. Esta sala troca calor com todas as outras salas, mas não troca com o ambiente externo. Esta sala é a sala com maior contato com o “prédio” (paredes internas de alvenaria, piso e teto).

O pé-direito de todas as salas é de 2,36m.

O controle da temperatura será feito individualmente em cada sala. Os atuadores das salas A1, A2 e A3 serão seus respectivos aparelhos de ar-condicionado e a sala A4, por não possuir um ar condicionado, será controlada apenas indiretamente por meio de troca de calor com os ambientes controlados.

## **3.2 HARDWARE E SOFTWARE**

Para a supervisão e controle da temperatura do ambiente estudado, foram necessários diversos aparelhos, sensores e softwares. Nesta seção será mostrado um pouco sobre eles.

### **3.2.1 Termistor**

Para a medição da temperatura, foram usados termistores por usarem apenas dois fios e pela implementação facilitada pela controladora KMC, que já tem curvas de calibração para medição de temperatura usando termistores.

Um termistor é, basicamente, um material semicondutor sensível à temperatura, ou seja, a resistência do material varia com a temperatura. Com isso é possível medir a temperatura, já que a resistência pode ser medida eletronicamente.

### 3.2.2 Controladoras KMC

Para aquisição de dados e controle da temperatura, foram usadas controladoras KMC 7301 de quatro saídas e quatro entradas.

Apesar de pequeno o número de entradas e saídas, é suficiente para o sistema estudado. Cada uma das três salas que possuem ar-condicionado (A1, A2 e A3) também possuem um CLP KMC 7301.

A controladora KMC é responsável pela aquisição de dados e pelo acionamento do ar-condicionado. A rotina de controle de cada sala foi implementada na sua respectiva controladora em BASIC, linguagem usada para programar controladoras KMC, usando o software proprietário *WinControl*.



Figura 3.2 – Controladora KMC

Para a comunicação entre as controladoras e o computador rodando o Software SCADA foi usado um barramento RS485, que é o meio físico de comunicação usado pela KMC. O computador usa um conversor RS485 para RS232 para ser ligado nesse mesmo barramento e conseguir se comunicar com as controladoras.

As entradas da controladora são usadas para a leitura da medida da temperatura através dos termístores. Por se tratar de uma medida em que a tensão varia proporcionalmente à temperatura, uma entrada analógica foi utilizada. As saídas digitais são usadas para o acionamento dos aparelhos de ar-condicionado, pois apenas os estados liga e desliga são necessários.

### 3.2.3 ActionView

O *ActionView* foi o software SCADA utilizado para a realização do trabalho. Trata-se de um software de controle e aquisição de dados da empresa Spin Engenharia de Automação Ltda.

de Brasília. Este software possui boa integração com o sistema operacional *Windows* para aumentar a sua robustez.

O *ActionView* vem acompanhado de outro software para a produção das telas da IHM chamado *ActionStudio*, também da empresa Spin Engenharia. A figura 3.3 mostra a janela do *ActionView* criada com a ajuda do software *ActionStudio* para o ambiente estudado.

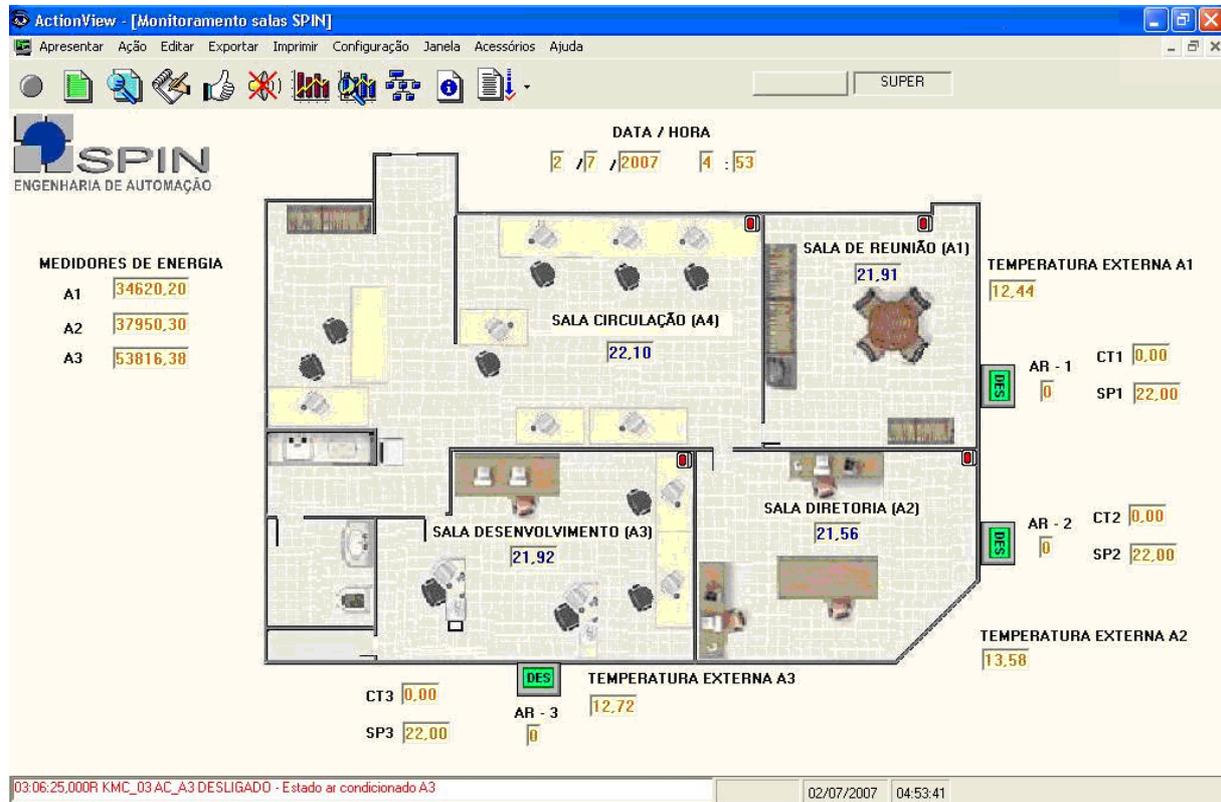


Figura 3.3 – Supervisório ActionView

Nessa tela é mostrado o IHM para o ambiente em estudo. Nota-se que nela estão presentes todas as variáveis usadas no processo: as temperaturas internas e externas e o estado dos aparelhos de ar-condicionado como ligados ou desligados.

Além das variáveis monitoradas, existem 3 variáveis de controle SP1, SP2 e SP3 que são usadas como *setpoint* dos controladores. Essas variáveis são passadas para as controladoras, que alteram o valor desse parâmetro em suas respectivas rotinas de controle. Há também variáveis CT1, CT2 e CT3 que mostram o ciclo de trabalho do PWM quando o algoritmo de controle PID é usado.

Além da tela da IHM, o software *ActionView* ainda possui opções para que sejam mostradas a monitoração de alarmes, de eventos marcados por data no calendário, gráficos em função do tempo das variáveis monitoradas e das acionadas.

A figura 3.4 mostra a tela de alarmes, enquanto a figura 3.5 apresenta uma tela contendo a evolução das variáveis monitoradas:

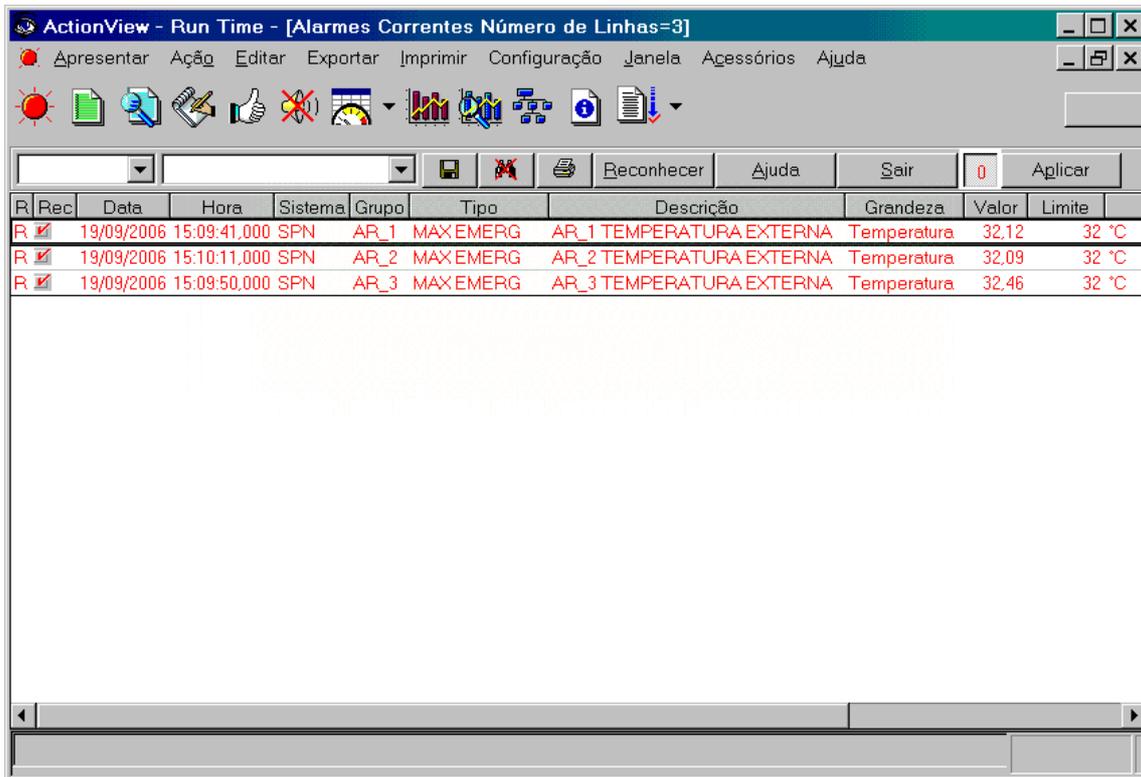


Figura 3.4 – Tela de alarmes - *ActionView*

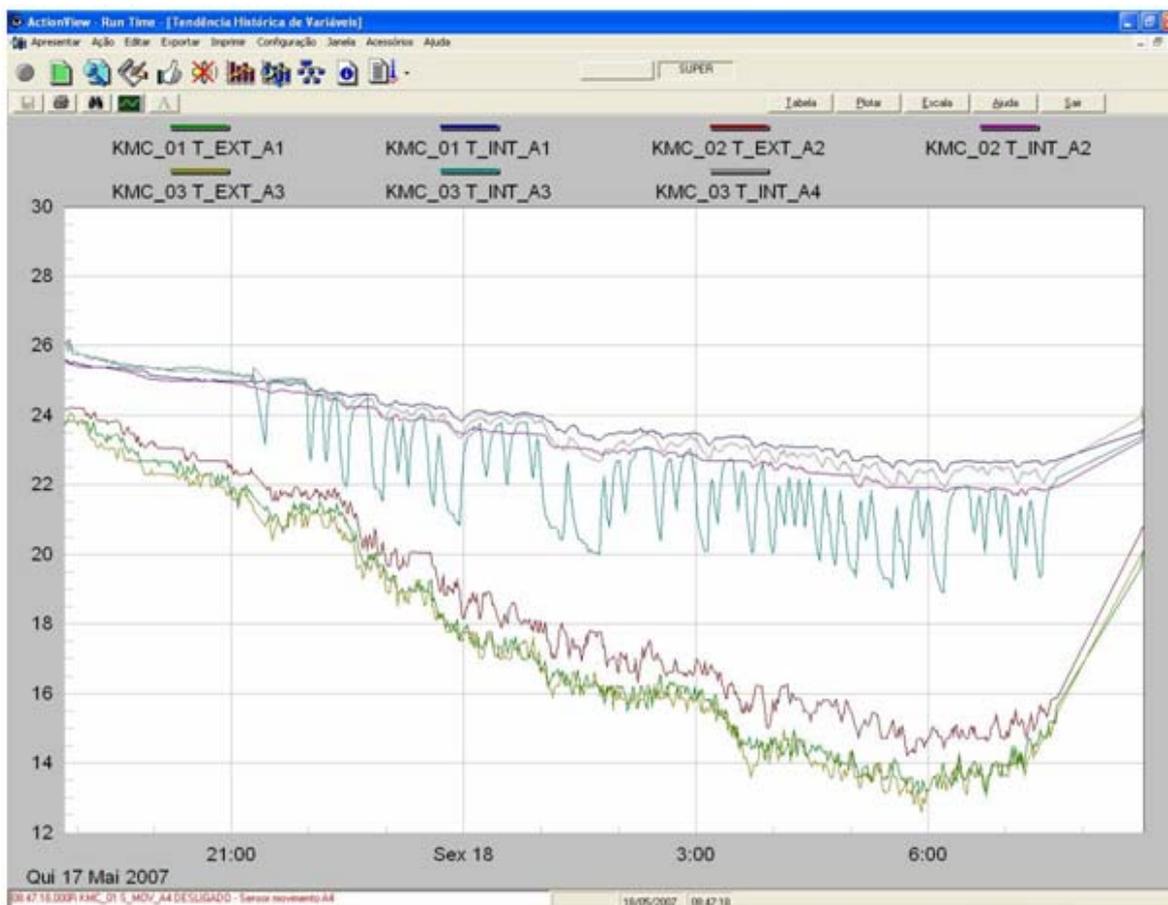


Figura 3.5 – Tela de evolução das variáveis monitoradas - *ActionView*

## 4 IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

### 4.1 IDENTIFICAÇÃO ESTRUTURADA

O controle térmico de um ambiente predial multi-salas pode ser um problema de controle complicado se altos graus de conforto e economia de energia forem exigidos. A temperatura em uma sala depende da dinâmica térmica entre esta e sua vizinhança, qual seja, salas adjacentes e ambiente externo, bem como da dinâmica térmica correspondente à atuação de equipamentos de aquecimento ou refrigeração sobre o ambiente controlado. Fatores como presença de pessoas, fontes de calor (computadores), mudanças na iluminação (incidência de radiação solar) e umidade do ambiente influenciam o conforto térmico e a demanda de energia. Some-se a isso 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 estas.

O objetivo da identificação do sistema não é poder determinar precisamente qual a temperatura em cada ponto do ambiente, porém produzir um modelo que, considerando a contribuição das variáveis mais relevantes, represente suficientemente bem o comportamento da temperatura. As informações obtidas do modelo são então empregadas no projeto de controladores mais eficazes, visando à economia de energia e a melhores índices de conforto térmico.

Bauchspiess et al., 2006, propõem uma identificação estruturada por princípios fundamentais para controle preditivo de sistemas de calefação, ventilação e ar condicionado (HVAC). A idéia básica dessa abordagem é compor um modelo pela adição das parcelas de fluxo de energia envolvidas na dinâmica térmica do ambiente. Um modelo de parâmetros concentrados, contínuo, linear e invariante no tempo é apresentado, e resultados satisfatórios são obtidos. A mesma abordagem é seguida neste trabalho, fazendo-se as adaptações necessárias para um ambiente multi-salas.

Cinco fenômenos térmicos são considerados na identificação de cada sala:

- Transferência de calor entre as salas A1, A2, A3 e A4 (salas vizinhas);
- Transferência de calor entre as salas A1, A2 e A3 e o ambiente externo;
- Inércia térmica do prédio;
- Inércia térmica do volume de ar na sala;
- Resfriamento promovido pelos equipamentos de ar condicionado.

O modelo proposto é construído usando a plataforma *Simulink* do MATLAB. Cada sala é representada por um diagrama de blocos descrevendo a dinâmica entre as variáveis de entrada e saída envolvidas (Figura 4.1).

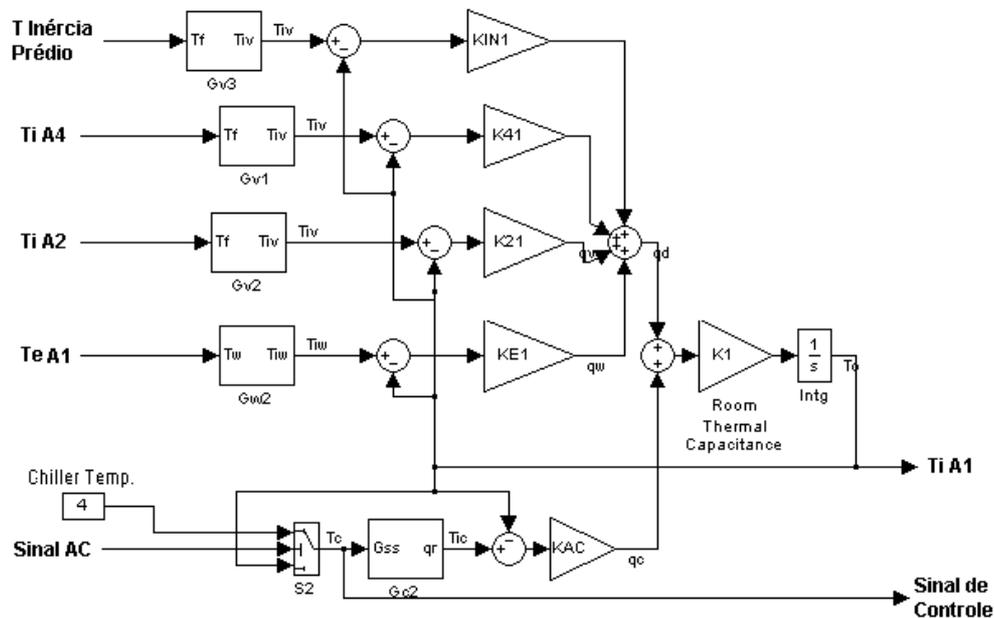


Figura 4.1 – Modelo de uma sala no *Simulink*.

Para modelar a transferência de calor entre salas vizinhas, a parede deve ser investigada. Fraisse, 2002, analisa diferentes tipos de paredes e propõe modelos análogos a circuitos RC. O modelo mais simples 2R1C é apresentado na Figura 4.2. Nesse modelo são consideradas a capacitância térmica interna da parede  $C_v$ , e dois elementos de condutividade térmica  $R$ .

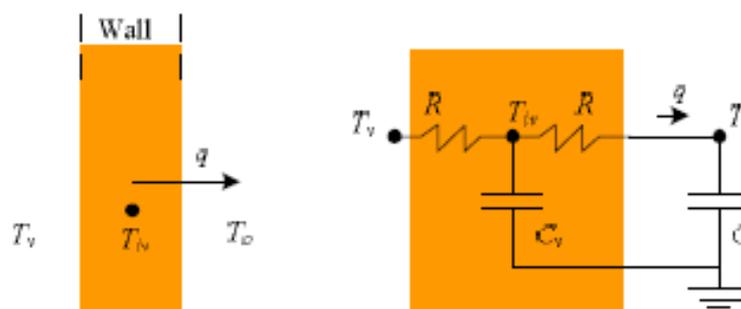


Figura 4.2 – Análogo elétrico da transferência de calor entre salas vizinhas.

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.

No ambiente estudado, a separação interna das salas é feita por divisórias compostas por uma parte inferior de madeira revestida com material plástico e uma parte superior de vidro. Próximo ao teto, a parte de vidro apresenta aberturas que permitem um fluxo direto de ar entre salas vizinhas, o que aumenta a troca de calor por convecção.

Em seu trabalho, Fraisse, 2002, propõe que paredes compostas por materiais diferentes sejam representadas por modelos mais complexos que o 2R1C a fim de representar separadamente a diferente dinâmica do fluxo de calor por cada parte da parede. Com o objetivo de simplificar o modelo construído, nesse trabalho será empregado o modelo mais simples, 2R1C, assumindo assim um modelo de primeira ordem. A representação obtida é equivalente a uma dinâmica da média dos fluxos pelas 3 partes distintas (de uma sala  $i$  para uma sala  $j$  e da sala  $j$  para sala  $i$ , que deveriam, em princípio, ser idênticas).

No modelo do *Simulink*, a transferência de calor entre salas vizinhas é representada por um bloco semelhante ao da Figura 4.3.

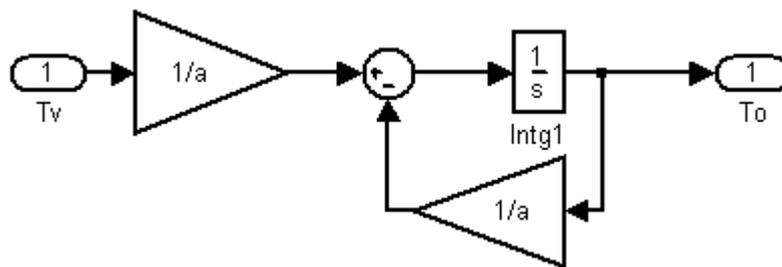


Figura 4.3 – Diagrama de blocos do fluxo de calor entre salas vizinhas.

A equação 4.1 mostra a função de transferência correspondente ao diagrama de blocos da Figura 4.3:

$$\frac{T_o(s)}{T_v(s)} = \frac{1}{as + 1} \quad (4.1)$$

Esta função de transferência descreve um sistema de primeira ordem com ganho unitário e constante de tempo  $a = R \cdot C_v$ . O significado físico dessa estrutura é a representação da forma não imediata da propagação do calor entre salas vizinhas.

Essa construção é usada para modelar as paredes entre as salas A1 e A2, A2 e A3, A3 e A4, e entre as salas A4 e A1. Uma vez que não há uma parede separando as salas A2 e A4, há apenas uma porta que permanece constantemente aberta, não é usado um bloco como o da Figura 4.3 no modelo dessa interrelação.

O modelamento da influência da temperatura externa é feito de maneira análoga a descrita acima. A diferença é que as paredes que separam as salas do ambiente externo são feitas

de concreto e apresentam janelas de vidro que permanecem totalmente fechadas, impedindo assim a propagação de calor por convecção. Dessa forma, os parâmetros  $R$  e  $C_v$  para esse processo são diferentes daqueles do caso anterior.

O volume de ar na sala é modelado como uma capacitância térmica concentrada, proporcional ao volume de ar. Para se calcular o valor da capacitância térmica usa-se a equação 4.2.

$$C_v = mc \quad (4.2)$$

- $C_v$  = capacitância térmica da sala ( $J/^\circ C$ )
- $m$  = massa do ar da sala (Kg)
- $c$  = calor específico do ar ( $J/Kg^\circ C$ )

O valor do calor específico do ar é igual a  $1005 J/Kg^\circ C$ . A massa do ar é diferente em cada sala. Para o cálculo da massa do ar de cada sala foi usada a equação 4.3, com a densidade do ar igual a  $1,2Kg/m^3$ .

$$m = \rho V \quad (4.3)$$

- $\rho$  = densidade do ar ( $Kg/m^3$ )
- $V$  = Volume do ar ( $m^3$ )

Na tabela 4.1 são mostrados os valores calculados do volume e da capacitância térmica de cada uma das salas.

Tabela 4.1 – Capacitância térmica das salas (a  $25^\circ C$ )

| Sala                     | A1       | A2       | A3       | A4       |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|
| V ( $m^3$ )              | 72,51    | 44,37    | 29,61    | 25,96    |
| $C_v$ ( $J/^\circ C$ )   | 87448    | 53507    | 35707    | 31307    |
| $1/C_v$ ( $J/^\circ C$ ) | 3.194e-5 | 2.800e-5 | 1.869e-5 | 1.144e-5 |

O resfriamento promovido pelo ar condicionado também é modelado como um processo de primeira ordem com ganho unitário idêntico ao mostrado na figura 4.3. 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, conseqüentemente, o efeito de resfriamento seja percebido na sala.

A entrada do ar condicionado é considerada variando de  $4^\circ C$  a  $T_o$  (temperatura da sala). A primeira temperatura refere-se a do ar resfriado que é fornecido pelo ar condicionado

quando este está ligado, enquanto a segunda é a própria temperatura da sala. Se a entrada do ar condicionado for considerada binária (ligado-desligado), tem-se um sistema não linear e dependente do ponto de operação. Para evitar que isso ocorra e também para que a identificação do ar condicionado seja linear, deve-se considerar a entrada igual a  $4^{\circ}\text{C}$  quando ligado e  $T_o$  quando desligado.

A última parcela de fluxo de calor a ser considerada é a 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 (piso, paredes, teto). A velocidade de absorção e a quantidade de calor absorvida determina a inércia térmica de um edifício.

No Regulamento das características de Comportamento Térmico dos Edifícios, Decreto-Lei n.º 40/90 que impõe requisitos ao projeto de novos edifícios em Portugal, é possível encontrar uma classificação da inércia térmica segundo o cálculo da massa superficial útil por  $\text{m}^2$  de área de pavimento.

No ambiente em estudo, a inércia térmica do prédio está relacionada à influência do calor trocado pelo ambiente com os escritórios vizinhos – paredes das salas A1, A3 e A4 - e com os pavimentos superior e inferior. Esse conjunto possui uma elevada capacitância térmica associada e atua impedindo que a temperatura das salas oscile muito. O efeito mais evidente é a lentidão do processo de esfriamento das salas durante a noite, período em que a temperatura externa diminui de forma acentuada, porém a temperatura das salas pouco varia.

Uma contribuição que não é levada em consideração nesse projeto é a da radiação solar. Esta age de maneira unidirecional, tendendo sempre a aumentar a temperatura das salas. Como não se dispunha de um sensor de radiação para medir essa variável, ela não foi incluída no processo de identificação. A fim de minimizar sua influência sobre o sistema, a maioria dos testes foi realizada durante a noite, e para os testes realizados durante o dia, as persianas das salas foram mantidas fechadas.

## 4.2 METODOLOGIA DA IDENTIFICAÇÃO

Uma característica interessante da identificação estruturada por princípios fundamentais é a possibilidade de se adicionar as parcelas individuais de fluxo de calor. Isso permite que a identificação dos parâmetros do sistema seja feita de forma separada. Por esse motivo, o processo de identificação nesse projeto é dividido em três etapas.

A primeira etapa consiste na identificação do sistema fazendo a aquisição dos dados das temperaturas internas e externas das salas com o equipamento de ar condicionado desligado. Isto é feito a fim de determinar apenas os parâmetros envolvidos no fluxo de calor entre salas vizinhas e entre as salas A1, A2 e A3 e o ambiente externo.

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 (ligado/desligado). De posse dos parâmetros estimados no passo anterior e dos novos dados, os parâmetros ar condicionado são então calculados. Por fim, na terceira etapa são feitos os ajustes necessários dos parâmetros do sistema para incluir a parcela de fluxo de calor correspondente à inércia térmica do prédio e ajustar a resposta simulada à dinâmica real.

Em seu trabalho, Virk et al., 1995, destacam a necessidade de uma excitação de entrada rica ao longo de um período de tempo extenso para que a identificação seja coerente. Sua aquisição de dados durou três dias. O teste realizado para a primeira etapa da identificação neste projeto foi iniciada às 21:00h de sexta-feira (27/04/07) e encerrado às 08:20h de segunda-feira (30/04/07) num total de pouco mais de 2 dias e 11 horas.

Para a segunda etapa, foram realizados testes com os equipamentos de ar condicionado no período da noite entre os dias 17 e 19 de maio deste ano. Neste caso, a estratégia para geração de um sinal rico foi diferente: uma seqüência binária pseudo-aleatória (PRBS) gerada usando o MATLAB foi implementada nas controladoras KMC e usada para indicar o estado do ar condicionado (ver APÊNDICE II).

O sinal PRBS se aproxima de um ruído branco e é comumente empregado em processos de identificação de sistemas. Nos testes realizados em ambas as etapas, o período de amostragem é de um minuto, mínimo permitido pelo *software* SCADA usado para aquisição dos dados.

Os dados obtidos nos testes da primeira e segunda etapa são então processados no MATLAB empregando a *toolbox* de identificação de sistemas *System Identification Toolbox 7.0*. A função *n4sid* permite o uso de múltiplas variáveis de entrada para estimar um modelo em espaço de estados a partir dos dados adquiridos. Os parâmetros informados à função

são: entradas, saída, período de amostragem, e ordem do sistema desejada (ver APÊNDICE I).

De acordo com as parcelas de fluxo de calor que possui, a cada sala é associado um modelo no *Simulink* contendo com o diagrama de blocos correspondente. A Figura 4.4 mostra o modelo da sala A2 montado conforme estrutura para identificação por princípios fundamentais.

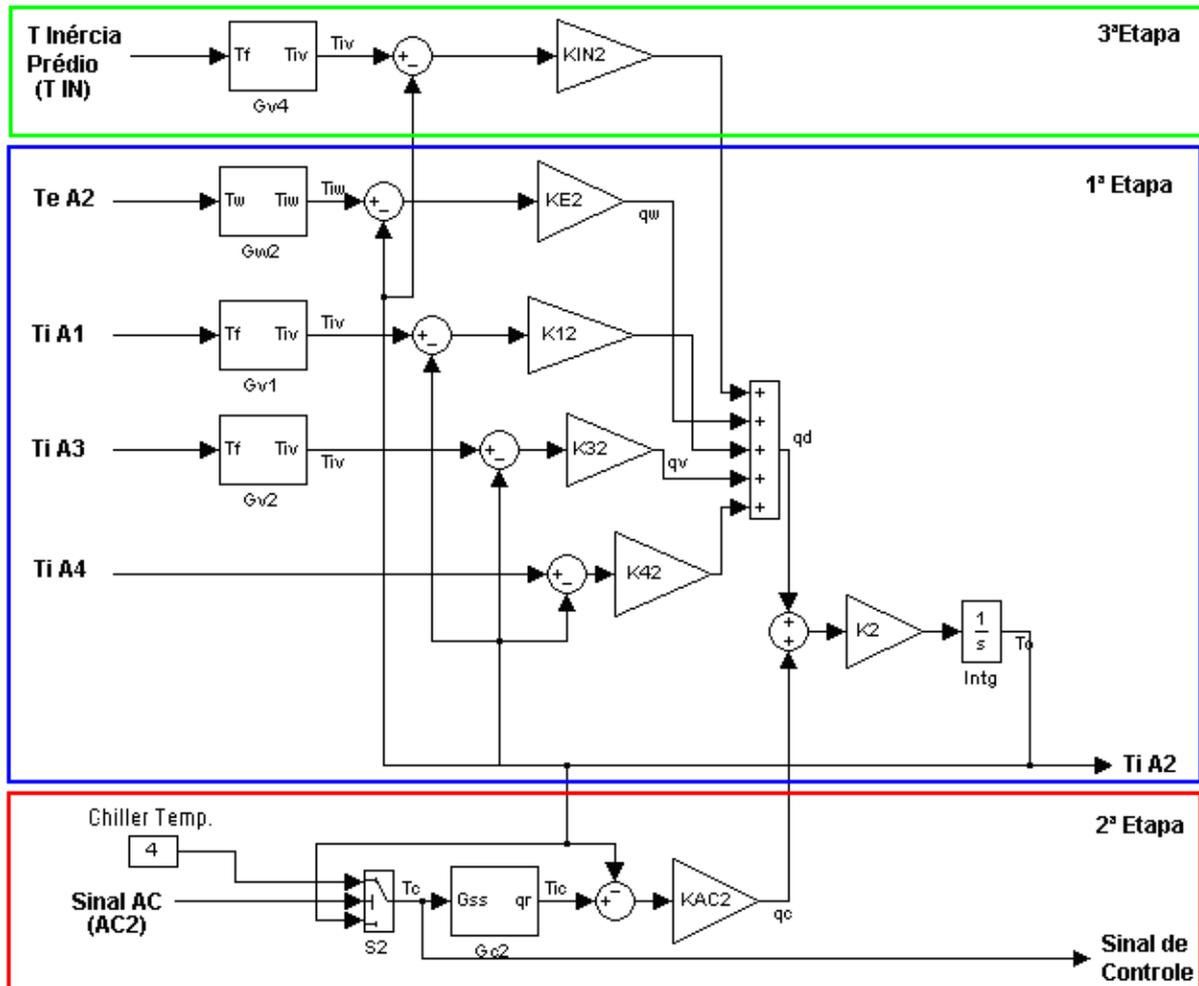


Figura 4.4 – Modelo sala A2 para identificação estruturada por princípios fundamentais.

Os blocos retangulares correspondem à função de transferência de primeira ordem com ganho unitário, idêntico ao visto na Figura 4.3. O ramo que representa a relação entre a temperatura interna na sala A2 e na sala A4 não contém tal bloco por ser assumido que ambas estão diretamente acopladas. Na Figura 4.4,  $T_i$  significa temperatura interna, enquanto  $T_e$  temperatura externa,  $T_{IN}$  a temperatura do prédio (relativo à sua inércia térmica) e AC2 o estado do ar condicionado (ligado-desligado).

O ganho  $K_2$  é calculado pela equação:

$$Kn = \frac{1}{Cv} \quad (4.4)$$

Onde  $n$  é o número da sala ( $n = 1, 2, 3, 4$ ) e  $Cv$  a capacitância térmica, encontrado da tabela 4.1.

As salas A1 e A3 seguem esquema análogo ao da Figura 4.4. A sala A4, por não possuir ar condicionado, não contém em seu modelo o conjunto apontado no bloco em vermelho (2ª Etapa). Os modelos de todas as salas encontram-se no APÊNDICE III.

Analisando o diagrama de blocos da Figura 4.4, verifica-se que cada bloco integrador corresponde a um pólo. Da figura 4.3 tem-se que cada bloco retangular também contém um bloco integrador. Dessa forma, o sistema que representa completamente a sala A2 é de sexta ordem. Os modelos das salas A1 e A3 também são de sexta ordem, enquanto o modelo da sala A4 é de quarta ordem.

Aplicando a fórmula de ganho de Mason ao sistema da Figura 4.4, vê-se que a função de transferência de qualquer entrada (exceto  $Ti A4$ ) para  $Ti A2$  é de segunda ordem. Um dos pólos é oriundo do correspondente bloco de ganho unitário (Figura 4.3) no caminho direto. O segundo pólo, representando fisicamente a inércia térmica da sala, é dado pela combinação do ganho  $K_2$  da sala com o ganho de cada parcela de fluxo de calor envolvida no sistema.

Para a primeira etapa de identificação, descartando as contribuições da inércia térmica do prédio e do resfriamento do ar condicionado, o pólo da sala  $z_{A_2}$  é expresso por:

$$z_{A_2} = K_2(K_{12} + K_{32} + K_{42} + K E_2) \quad (4.5)$$

De maneira análoga, na segunda e terceira etapas da identificação, com a adição das novas contribuições de fluxo de calor, o pólo da sala A2 assume a forma (4.6) na identificação incluindo apenas o ar condicionado, e a forma (4.7) ao serem consideradas todas as contribuições:

$$z_{A_2} = K_2(K_{12} + K_{32} + K_{42} + K E_2 + K A C_2) \quad (4.6)$$

$$z_{A_2} = K_2(K_{12} + K_{32} + K_{42} + K E_2 + K A C_2 + K E_2) \quad (4.7)$$

Onde os parâmetros  $K I N_2$ ,  $K E_2$ ,  $K_{12}$ ,  $K_{42}$  e  $K A C_2$  simbolizam, na devida ordem, o ganho referente à inércia térmica do prédio, ao fluxo de calor com o ambiente externo, ao fluxo de calor entre salas vizinhas e ao fluxo de calor do ar condicionado.

Dessa maneira, ao final da terceira etapa, as funções de transferência para cada componente de fluxo de calor da sala A2 são:

- Inércia térmica do prédio:

$$\frac{T_{iA_2}(s)}{T_{IN}(s)} = \frac{K_{IN_2} \cdot K_2}{(a_{IN_2}s + 1) \cdot (s + z_{A_2})} \quad (4.8)$$

- Temperatura externa sala A2:

$$\frac{T_{iA_2}(s)}{T_{eA_2}(s)} = \frac{K_{E_2} \cdot K_2}{(a_{E_2}s + 1) \cdot (s + z_{A_2})} \quad (4.9)$$

- Temperatura sala vizinha A1:

$$\frac{T_{iA_2}(s)}{T_{iA_1}(s)} = \frac{K_{12} \cdot K_2}{(a_{12}s + 1) \cdot (s + z_{A_2})} \quad (4.10)$$

- Temperatura sala vizinha A3:

$$\frac{T_{iA_2}(s)}{T_{iA_3}(s)} = \frac{K_{32} \cdot K_2}{(a_{32}s + 1) \cdot (s + z_{A_2})} \quad (4.11)$$

- Temperatura sala vizinha A4:

$$\frac{T_{iA_2}(s)}{T_{iA_4}(s)} = \frac{K_{42} \cdot K_2}{(s + z_{A_2})} \quad (4.12)$$

- Ar condicionado:

$$\frac{T_{iA_2}(s)}{A_{C_2}(s)} = \frac{K_{AC_2} \cdot K_2}{(a_{AC_2}s + 1) \cdot (s + z_{A_2})} \quad (4.13)$$

Onde  $a_{IN_2}$ ,  $a_{E_2}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{32}$ ,  $a_{42}$  e  $a_{AC_2}$  representam, respectivamente, a constante de tempo correspondente à inércia térmica do prédio, ao fluxo de calor com o ambiente externo, ao fluxo de calor entre salas vizinhas e ao fluxo de calor do ar condicionado.

Para sala A2, o primeiro passo da identificação usando o MATLAB é estimar uma modelo de espaço de estados de quarta ordem. Como entrada da função *n4sid*, são passados os dados  $T_{eA_2}$ ,  $T_{iA_1}$ ,  $T_{iA_3}$ ,  $T_{iA_4}$  e como saída  $T_{iA_2}$  (código disponível no APÊNDICE I).

Nessa etapa são identificadas as constantes de tempo dos blocos correspondentes do fluxo de calor entre salas vizinhas, fluxo de calor com o ambiente externo e o pólo da sala ( $a_{12}$ ,  $a_{32}$ ,  $a_{42}$ ,  $a_{E_2}$  e  $z_{A_2}$ ). Esses parâmetros não são alterados nas duas etapas seguintes.

A manutenção do pólo da sala é crucial para as etapas seguintes. Como o parâmetro  $K_2$  é obtido da tabela 4.1, mantido fixo o valor de  $z_{A_2}$ , o procedimento de identificação se reduz a identificar as constantes de tempo relacionadas ao processo do ar condicionado ( $a_{AC_2}$ ) e ao da inércia térmica do prédio ( $a_{IN_2}$ ) e a ajustar os valores dos ganhos envolvidos em cada etapa de acordo com as equações 4.5, 4.6 e 4.7.

Na segunda etapa da identificação é incluída a contribuição de fluxo de calor do equipamento de ar condicionado. Uma possibilidade seria fazer a identificação usando o *n4sid*, porém informando também como entrada o sinal do ar condicionado. Dessa maneira, a entrada passaria a ser Sinal *AC2*, *Te A2*, *Ti A1*, *Ti A3*, *Ti A4*; a saída *Ti A2* seria mantida e a ordem desejada é elevada para cinco.

Contudo, isso não usaria o princípio da adição de parcelas de fluxo de calor proposta na identificação por princípios fundamentais, pois novos pólos, diferentes dos anteriores, poderiam ser estimados pela ferramenta computacional. Por esse motivo, a identificação foi feita calculando-se a constante de tempo do ar condicionado por meio de resposta à entrada degrau e, em seguida, remanejados os ganhos a fim de ajustar a nova contribuição de fluxo de calor.

A última etapa da identificação considera a contribuição da inércia térmica do prédio sobre a dinâmica da sala. Como não se dispunha de sensores para medição da temperatura do prédio, a alternativa usada foi aproximar essa contribuição como uma entrada de valor constante adicionada ao sistema por meio de um bloco de primeira ordem de ganho unitário, mesma estratégia empregada por Bauchspiess, 2006.

A média da temperatura da sala A4 foi adotada como valor estimado para a temperatura do prédio. Índícios como a maior área comum com o prédio (paredes, piso), menor amplitude térmica durante o teste de identificação da primeira etapa, e ausência de influência direta pela temperatura externa, apontam que essa sala é a que melhor retrata o comportamento da temperatura do prédio. A constante de tempo foi estimada inicialmente como da mesma ordem de grandeza da contribuição da temperatura externa e posteriormente ajustada por sucessivas aproximações até o resultado obtido ser coerente.

### 4.3 RESULTADOS E ANÁLISE DE DADOS

Os parâmetros obtidos no processo de identificação das salas encontram-se agrupados na Tabela 4.2. Nessa tabela são apresentados nas colunas o ganho  $K$  e a constante de tempo  $a$ , em minutos, relacionados a cada fluxo de calor das salas A1, A2, A3 e A4. O valor dos ganhos na Tabela 4.2 está multiplicado pelo ganho da respectiva. Isso foi feito para incluir a influencia da capacitância térmica das salas na análise dos resultados.

Tabela 4.2 – Parâmetros preliminares da identificação (constantes de tempo\*  $a$  e ganho  $K$ ).

|                  |     | Sala A1  | Sala A2 | Sala A3 | Sala A4 |
|------------------|-----|----------|---------|---------|---------|
| Inércia Sala     | $K$ | 1        | 1       | 1       | 1       |
|                  | $a$ | 2,569    | 3,281   | 4,500   | 38,850  |
| Inércia Prédio   | $K$ | 9,58e-2  | 8,40e-2 | 6,91e-2 | 3,43e-3 |
|                  | $a$ | 100      | 100     | 100     | 100     |
| Vizinhança A1    | $K$ |          | 8,40e-2 |         | 1,14e-3 |
|                  | $a$ | ***      | 0,637   | ***     | 2.369   |
| Vizinhança A2    | $K$ | 1,113e-1 |         | 1,96e-2 | 6,86e-3 |
|                  | $a$ | 0.895    | ***     | 0,810   | ***     |
| Vizinhança A3    | $K$ |          | 2,80e-2 |         | 1,43e-2 |
|                  | $a$ | ***      | 2,073   | ***     | 1.692   |
| Vizinhança A4    | $K$ | 1,118e-1 | 3,03e-2 | 8,48e-2 |         |
|                  | $a$ | 1.180    | ***     | 4,029   | ***     |
| Ambiente Externo | $K$ | 3,51e-2  | 5,04e-2 | 1,50e-2 |         |
|                  | $a$ | 258,93   | 128,41  | 149,81  | ***     |
| Ar condicionado  | $K$ | 3,51e-2  | 2,80e-2 | 3,36e-2 |         |
|                  | $a$ | 2        | 2       | 2       | ***     |

\*Valores das constantes de tempo em minutos.

Os valores das constantes de tempo das salas obtidos na identificação mostram que o sentido físico da inércia térmica da sala proporcional ao volume de ar é verificado: os valores aumentam, embora de forma não linear, de 2,569 minutos em A1 (menor sala) até aproximadamente 39 minutos em A4, sala de maior área.

Foi identificado ao longo dos testes que a sala A4 apresentava as menores amplitudes térmicas. Na identificação dos parâmetros do sistema, esse comportamento se reflete como

o menor valor de ganho  $K$  comparado com o ganho das demais salas para cada fenômeno térmico envolvido. Isso significa que para determinada natureza de fluxo de calor, uma mesma diferença de temperatura produzirá uma menor variação na sala A4 do que nas demais salas. Isso é esperado, pois a sala A4 é a que possui maior inércia térmica e, portanto, demanda uma maior quantidade de calor para sofrer uma mesma mudança de temperatura.

Analisando o ganho referente à contribuição do fluxo de calor da inércia térmica do prédio, é possível observar como ele se relaciona com a inércia térmica da sala. O maior ganho é verificado na em A1, sala de menor inércia térmica, mostrando que essa está mais sujeita a influência desse termo. Por sua vez, a sala A4 registra o menor ganho, indicando que sua elevada inércia térmica reduz a influência desse termo.

Os valores dos ganhos relativos ao ar condicionado devem ser corrigidos incluindo um termo não linear. Como a identificação do sistema foi feita levando em consideração o sinal binário (ligado/desligado) do ar condicionado em vez da temperatura atuando sobre o sistema ( $4^{\circ}\text{C}$  ou temperatura da sala  $T_o$ ), um termo  $(T_o - 4)$  deve ser incluído nesse ganho.

Assumindo como ponto de operação  $22^{\circ}\text{C}$ , temperatura ideal durante o inverno proposta pela norma de conforto térmico ASHRAE *Standard 55* (Tabela 2.3), os novos valores para os ganhos (Tabela 4.3) devem ser multiplicados por 18.

Tabela 4.3 – Ganho do ar condicionado no ponto de operação em  $22^{\circ}\text{C}$ .

|                 |     | Sala A1 | Sala A2 | Sala A3 |
|-----------------|-----|---------|---------|---------|
| Ar condicionado | $K$ | 0,632   | 0.504   | 0,605   |

No caso de um controle liga-deliga, seria mais adequado atribuir a  $T_o$   $23^{\circ}\text{C}$ , que é o limite superior da temperatura aceitável durante o inverno proposto pela norma de conforto térmico ASHRAE *Standard 55* (Tabela 2.3) e seria o ponto em que o ar condicionado seria ligado.

No resultado para os parâmetros do fluxo de calor com o ambiente externo, espera-se que a o ganho do processo seja proporcional à área comum entre a sala e o ambiente externo. A sala A2, com maior área comum com o exterior, de fato apresentou o maior ganho. Entretanto, a sala com menor área comum (A1) foi quem apresentou o segundo maior ganho. Uma possível explicação é que, embora possua a segunda maior área comum com o ambiente externo, a sala A3 sofre uma influência menor devido a sua maior inércia térmica.

Um segundo motivo provável para esse resultado está na ferramenta usada na identificação do sistema. A função *n4sid*, pertencente à *toolbox* de identificação do sistema do MATLAB, produz o modelo em espaço de estados do sistema empregando um algoritmo que busca a minimização do erro, enquanto o modelo proposto é estruturado, e sua grande qualidade reside exatamente nisso. Essa dissonância de princípios pode gerar incoerências na identificação.

Em diversas tentativas de identificação foram obtidos resultados com pólos complexos, o que não tem sentido físico no modelamento estruturado, uma vez que isso indicaria que mesmo sob um sinal de excitação constante a temperatura da sala oscilaria. Os resultados obtidos do *n4sid* são aqueles que melhor modelam o conjunto específico de dados usado naquela identificação. Por essa razão é importante que os dados de entrada sejam satisfatoriamente ricos.

Um outro ponto que merece ser destacado é o posicionamento dos sensores. O sistema térmico modelado é um sistema de parâmetros distribuídos. Dessa maneira, a dinâmica da temperatura na sala varia de acordo com a posição espacial. Por conseguinte, fazer a aquisição de dados que representem razoavelmente bem a dinâmica de toda a sala usando apenas um sensor de temperatura torna-se uma tarefa complexa. Além da preocupação com o lugar apropriado sob o ponto de vista da identificação, o sensor deve ser posicionado de tal forma que não altere o ambiente, tampouco cause transtornos aos usuários.

A identificação dos parâmetros de constante de tempo e ganho envolvidos nos processos de fluxo de calor entre salas vizinhas exige um tratamento dos dados obtidos nas identificações individuais das salas. O processo de uma mesma parede é identificado duas vezes. Como a característica da parede é constante, os parâmetros resultantes devem ser os mesmos independentemente da identificação. Caso contrário, a parede apresentaria um fluxo de calor diferente quando submetida a uma mesma diferença de temperatura, o que provocaria um desequilíbrio no balanço térmico do modelo quando as quatro salas fossem acopladas, o que não é coerente sob o ponto de vista físico.

Embora próximos, os valores da tabela 4.2 não coincidem quando comparados de duas identificações distintas. Por exemplo: a identificação da sala A1 gera parâmetro ganho  $K_{21} = 1,113e-1$  e constante de tempo  $a_{21} = 0.898$ , enquanto a identificação da sala A2 estima um parâmetro de ganho  $K_{12} = 8,40e-2$  e constante de tempo  $a_{12} = 0.638$ .

Visando a resolver essa questão de assimetria, novos parâmetros foram calculados para a identificação do fluxo de calor entre salas vizinhas calculando-se a média das estimativas obtidas na identificação individual de cada sala (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Parâmetros de fluxo de calor entre salas vizinhas corrigidos (constantes de tempo\* a e ganho K).

|               |   | Sala A1 | Sala A2 | Sala A3 | Sala A4 |
|---------------|---|---------|---------|---------|---------|
| Vizinhança A1 | K |         | 9,77e-2 |         | 5,65e-2 |
|               | a | ***     | 0,766   | ***     | 1,775   |
| Vizinhança A2 | K | 9,77e-1 |         | 2,38e-2 | 1,86e-2 |
|               | a | 0.766   | ***     | 1,442   | ***     |
| Vizinhança A3 | K |         | 2,38e-2 |         | 4,96e-2 |
|               | a | ***     | 1,442   | ***     | 2,861   |
| Vizinhança A4 | K | 5,65e-2 | 1,86e-2 | 4,96e-2 |         |
|               | a | 1,775   | ***     | 2,861   | ***     |

\*Valores das constantes de tempo em minutos

A tabela 4.5 sumariza os parâmetros obtidos após as adequações realizadas nos ganho do ar condicionado (Tabela 4.3) e no ganho e constante de tempo das salas no processo relacionado ao fluxo de calor entre salas vizinhas.

Tabela 4.5 – Parâmetros finais da identificação (constantes de tempo\* a e ganho K).

|                |   | Sala A1 | Sala A2 | Sala A3 | Sala A4 |
|----------------|---|---------|---------|---------|---------|
| Inércia Sala   | K | 1       | 1       | 1       | 1       |
|                | a | 2,569   | 3,281   | 4,500   | 38,850  |
| Inércia Prédio | K | 9,58e-2 | 8,40e-2 | 6,91e-2 | 3,43e-3 |
|                | a | 100     | 100     | 100     | 100     |
| Vizinhança A1  | K |         | 9,77e-2 |         | 5,65e-2 |
|                | a | ***     | 0,766   | ***     | 1,775   |
| Vizinhança A2  | K | 9,77e-1 |         | 2,38e-2 | 1,86e-2 |
|                | a | 0.766   | ***     | 1,442   | ***     |
| Vizinhança A3  | K |         | 2,38e-2 |         | 4,96e-2 |
|                | a | ***     | 1,442   | ***     | 2,861   |
| Vizinhança A4  | K | 5,65e-2 | 1,86e-2 | 4,96e-2 |         |
|                | a | 1,775   | ***     | 2,861   | ***     |

|                  |          |         |         |         |     |
|------------------|----------|---------|---------|---------|-----|
| Ambiente Externo | <i>K</i> | 3,51e-2 | 5,04e-2 | 1,50e-2 | *** |
|                  | <i>a</i> | 258,93  | 128,41  | 149,81  |     |
| Ar condicionado  | <i>K</i> | 0,632   | 0,504   | 0,605   | *** |
|                  | <i>a</i> | 2       | 2       | 2       |     |

\*Valores das constantes de tempo em minutos

A seguir, são apresentados os resultados obtidos usando os parâmetros finais (tabela 4.5) no modelo da sala A2. Primeiramente são apresentados os resultados das simulações usando a identificação sem o ar condicionado, onde o conjunto que representa o ar condicionado (retângulo em vermelho na Figura 4.4) é desacoplado. Em seguida, são mostrados os resultados incluindo esse bloco. Para cada forma de identificação, há dois conjuntos de dados: um usado na identificação e outro diferente para validação. Procedimento idêntico foi feito para as demais salas, salvo a sala A4, que não possui ar condicionado. Os resultados de todas as salas estão no APÊNDICE IV.

A figura 4.5 mostra o resultado da identificação sem ar condicionado, enquanto a figura 4.7 corresponde ao resultado da validação. As figuras 4.6 e 4.8 indicam o erro entre o valor real e o valor simulado em cada caso.

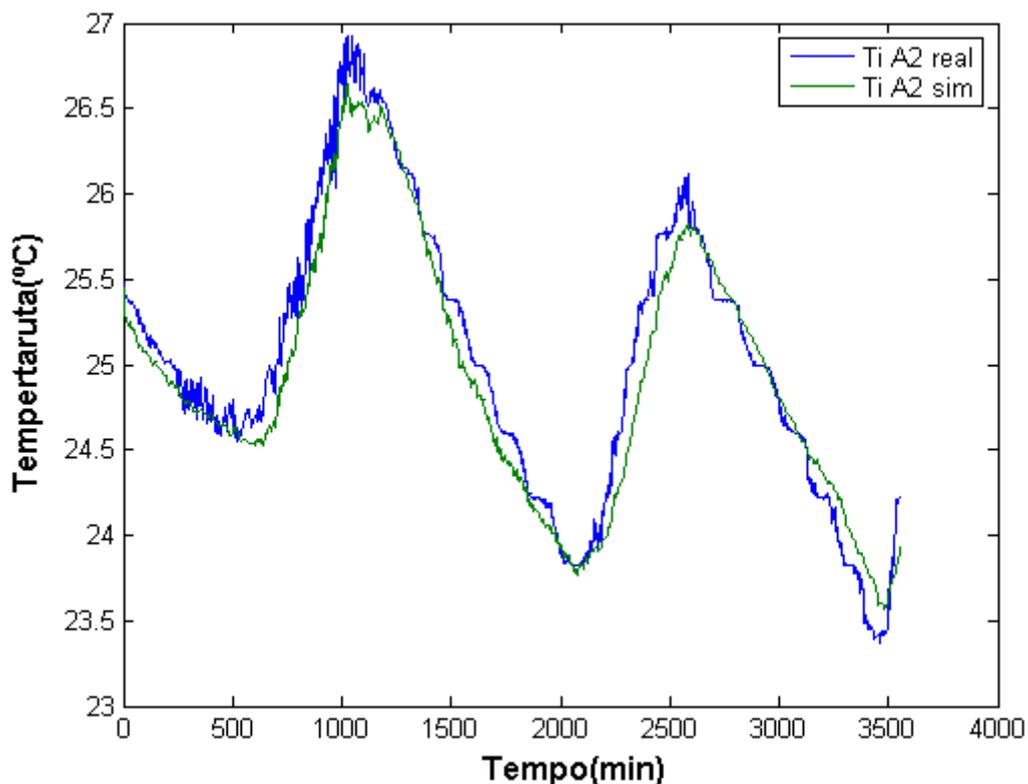


Figura 4.5 – Resultado da identificação da sala A2

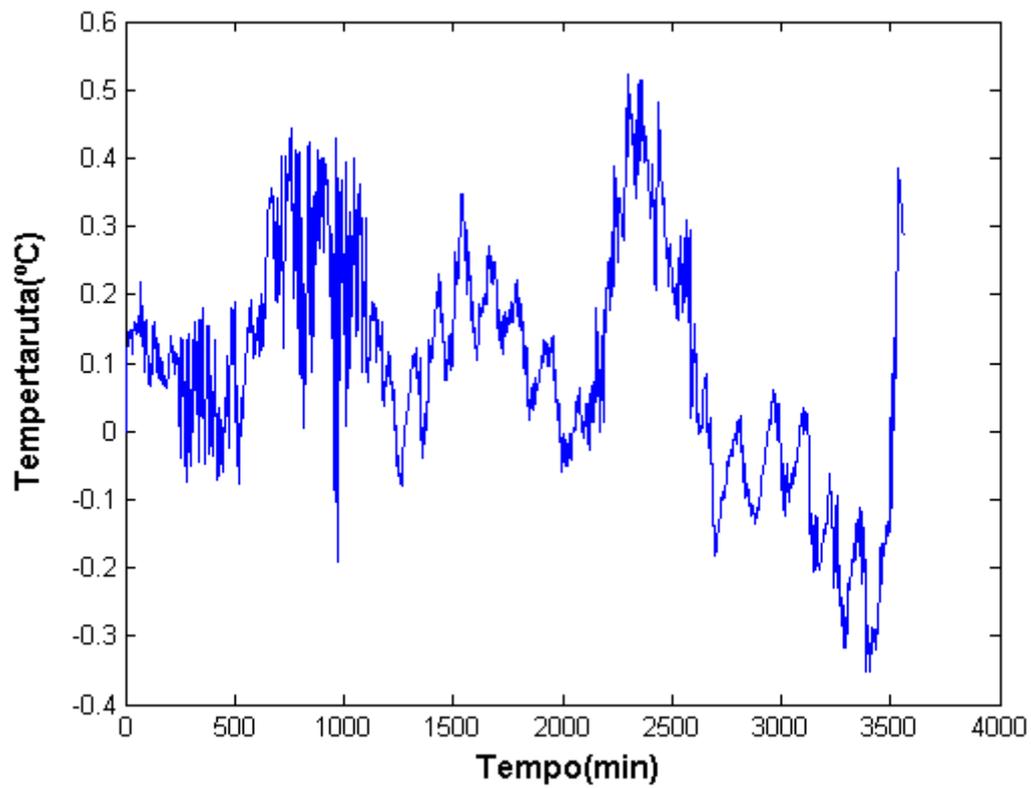


Figura 4.6 – Erro na identificação da sala A2

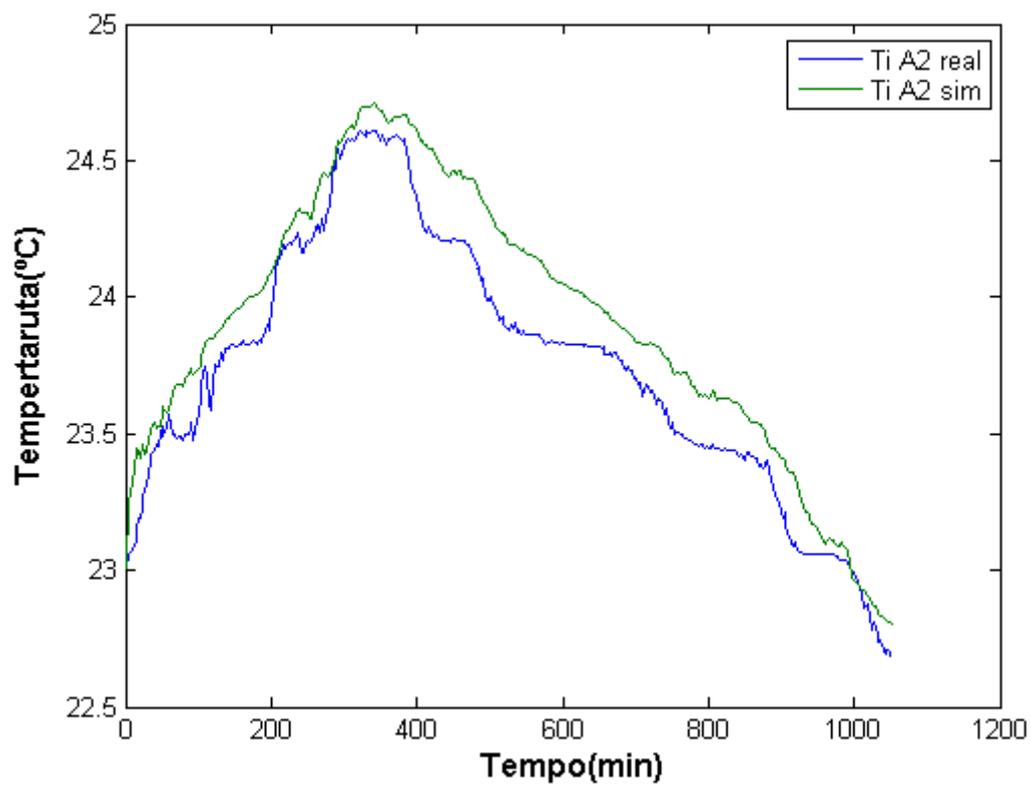


Figura 4.7 – Resultado da validação da sala A2

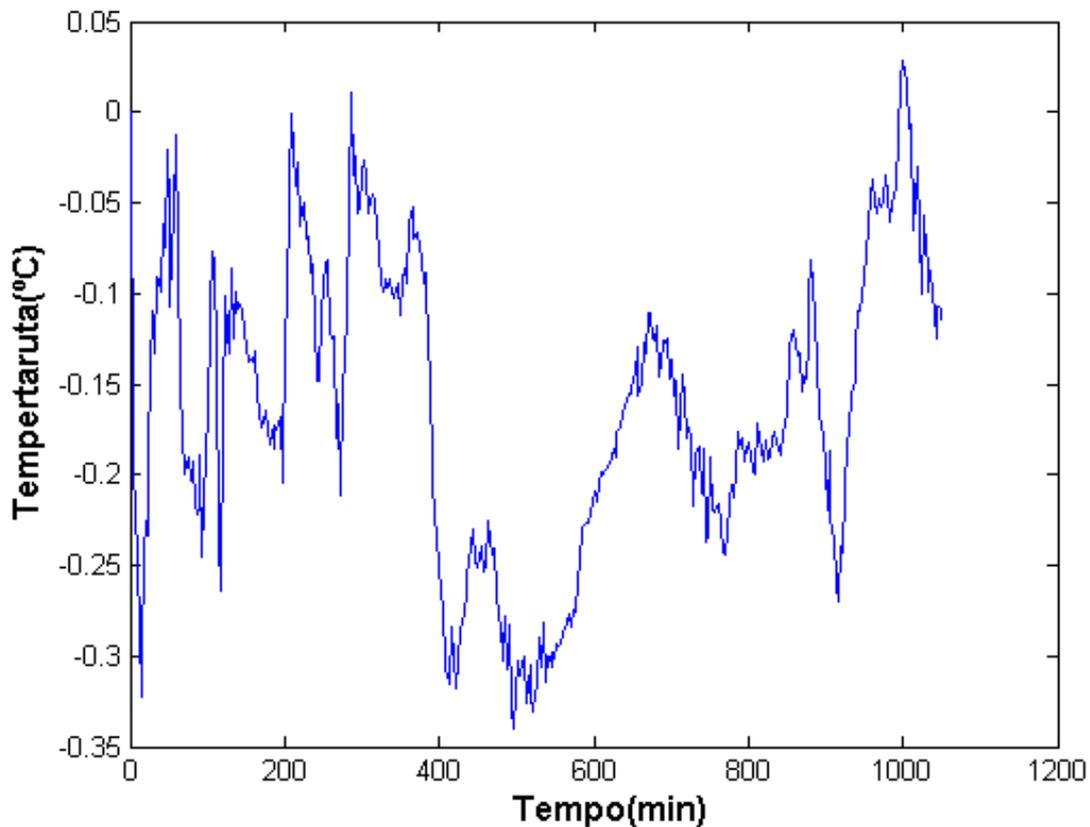


Figura 4.8 – Erro na validação da sala A2.

O modelo reproduziu bem tanto o conjunto de identificação quanto o de validação, com erros máximos menores que  $0,6^\circ$  no primeiro caso e inferiores a  $0,35^\circ\text{C}$  no segundo. Esses resultados são considerados satisfatórios, haja vista que a precisão do termistor empregado na medição é de  $0,5^\circ\text{C}$ . Analisando também os resultados das demais salas (APÊNDICE IV), verifica-se que das oito simulações feitas, em sete o erro máximo é inferior a  $0,6^\circ\text{C}$ , sendo que o erro médio é bem inferior a isso. Ainda assim, no pior caso (Figura I - Identificação da sala A1), o erro não ultrapassa  $0,9^\circ\text{C}$ .

Agora são apresentados os resultados das simulações incluindo o ar condicionado. A Figura 4.9 mostra o resultado usando o conjunto de dados de identificação e a Figura 4.10 o erro entre o valor real e o simulado. A Figura 4.11 exhibe os resultados usando o conjunto de dados da validação, enquanto o erro é indicado na Figura 4.12.

A curva AC2 registra o sinal do ar condicionado. Esse sinal é binário (0 para ar condicionado desligado e 1 para ligado), porém encontra-se deslocado no eixo das ordenadas das figuras 4.9 e 4.11 para permitir uma melhor visualização.

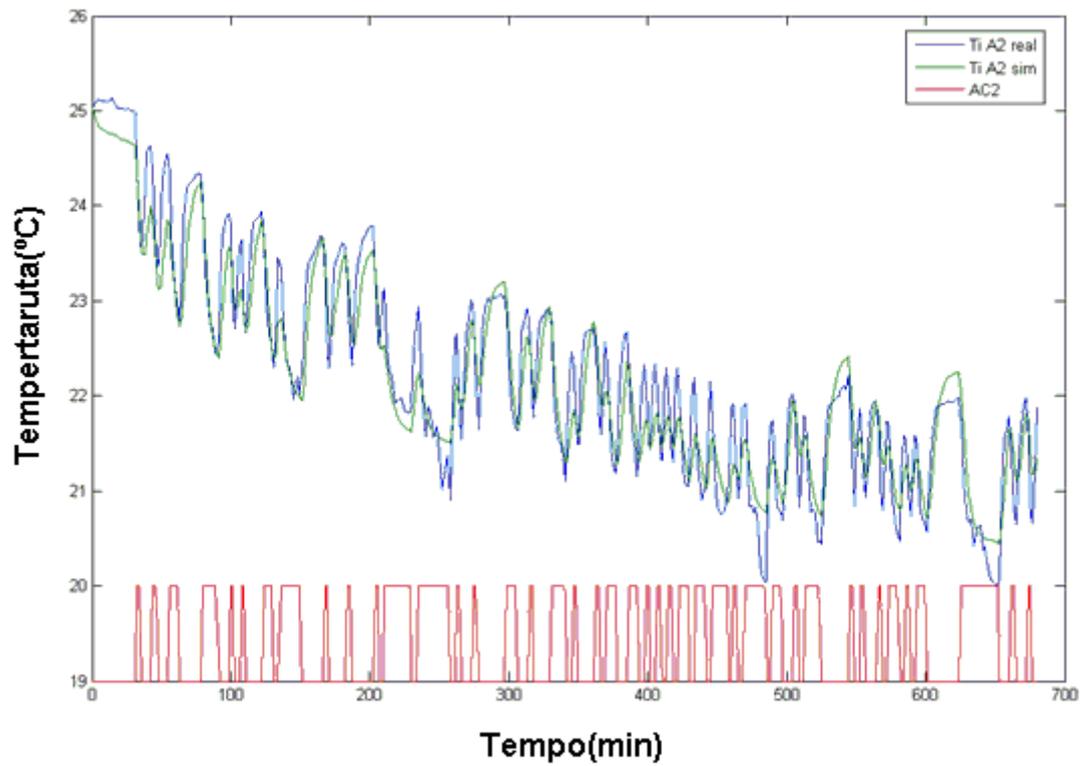


Figura 4.9 – Resultado da identificação da sala A2 com ar condicionado.

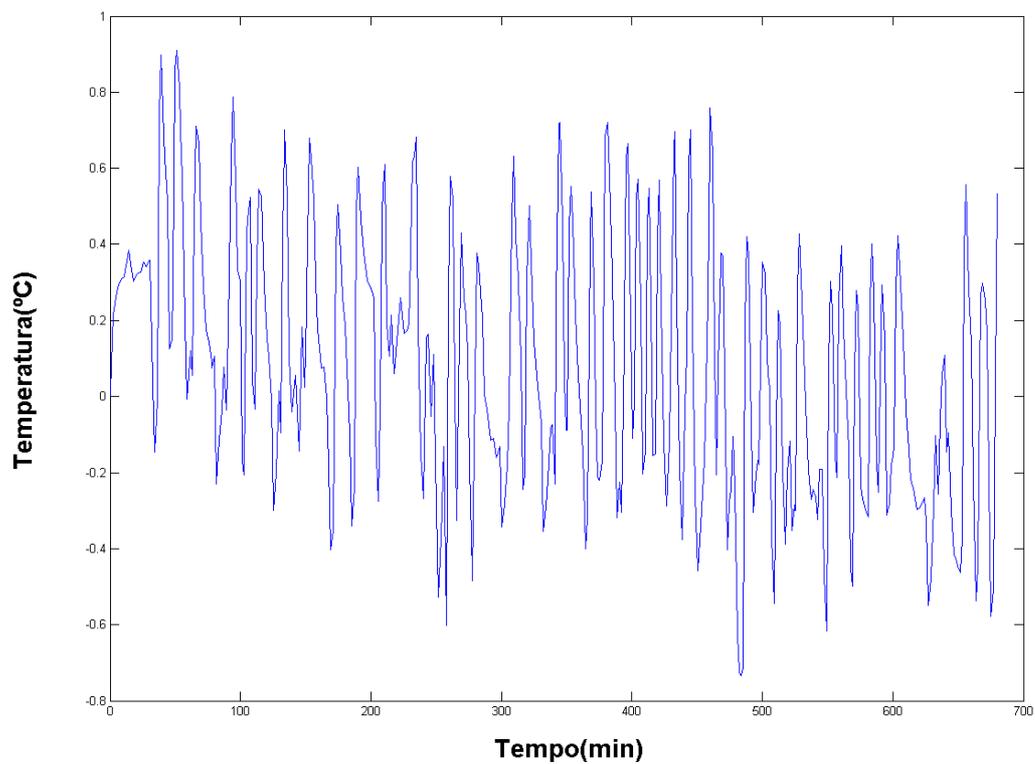


Figura 4.10 – Erro na identificação da sala A2 com ar condicionado

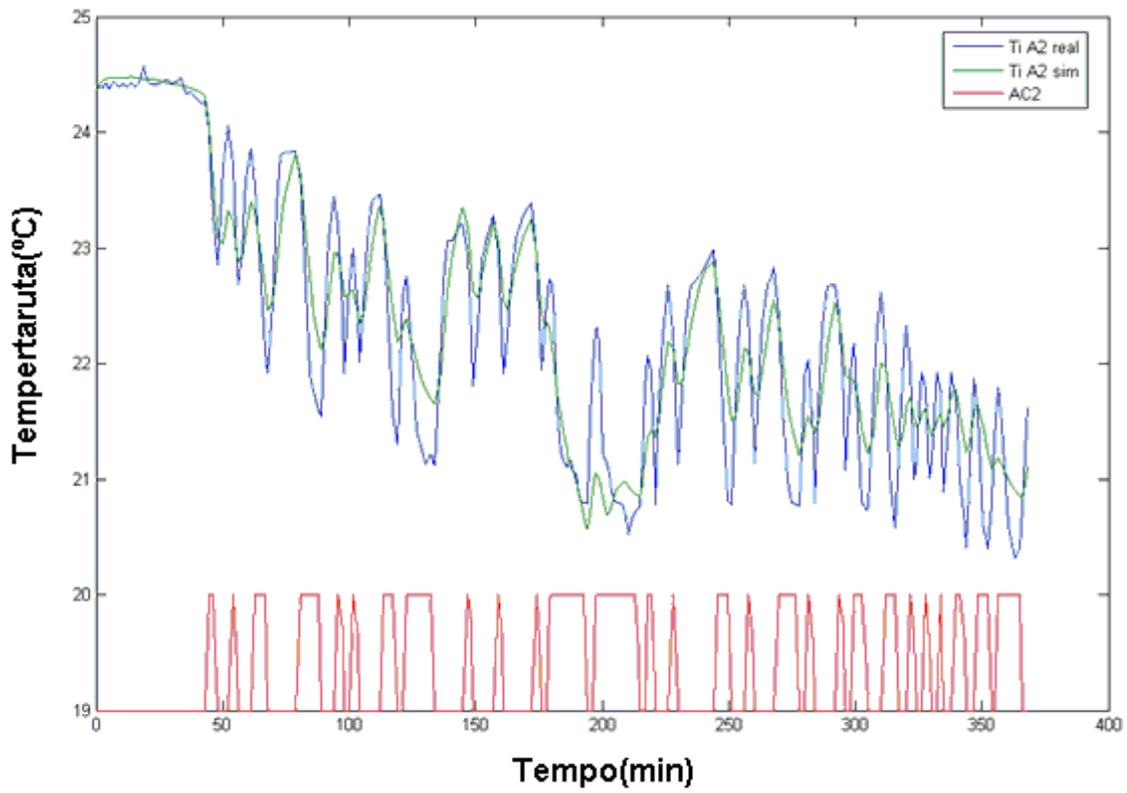


Figura 4.11 – Resultado da validação da sala A2 com ar condicionado.

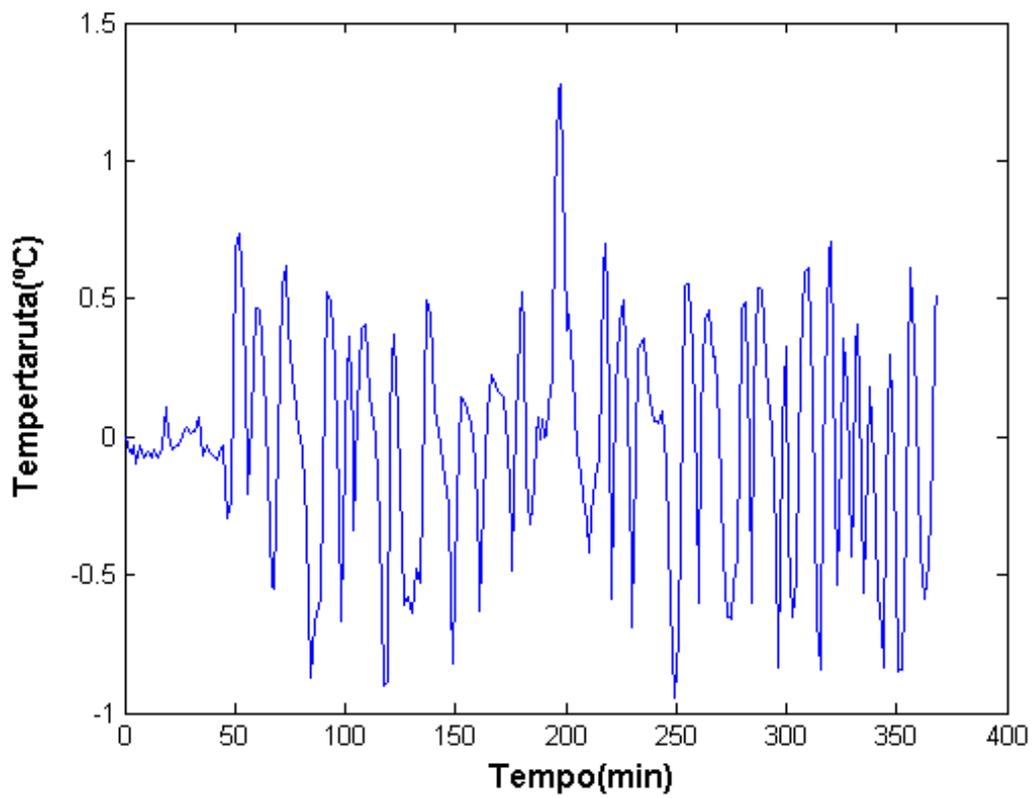


Figura 4.12 – Erro na validação da sala A2 com ar condicionado

A identificação e a validação do modelo com ar condicionado da sala A2 apresentam erros superiores àqueles obtidos nas simulações sem ar condicionado. O mesmo comportamento é observado no resultado das simulações das demais salas (APÊNDICE IV), onde o erro médio fica em torno de  $0.8^{\circ}\text{C}$  para as salas A1 e A2. Contudo, o resultado da sala A3 não foi tão bom assim, com um erro médio superior a  $1^{\circ}\text{C}$  e erro máximo superior a  $1.5^{\circ}\text{C}$ .

Fazendo uma análise relacionada ao tratamento dispensado aos dados, uma possível causa desse resultado é a não linearidade do modelo do ar condicionado, cujo ganho varia de acordo com o ponto de operação. Desta forma, o ganho fixo proposto pode não ser adequado aos conjuntos de dados da identificação e validação, e o resultado obtido do modelo será ruim.

Tão ou mais importante do que isso, é interpretar os resultados da seguinte forma: os parâmetros usados na identificação e validação acima são produtos de uma metodologia que separa processos que são inter-relacionados, e que há um compromisso entre o melhor resultado individual e o global. No caso, foi obtido um bom resultado para as todas as salas funcionando sem ar condicionado, porém atendeu-se bem somente às salas A1 e A2 com o ar condicionado atuando sobre o sistema.

Assumindo que o conjunto de dados seja suficientemente extenso e adequado à identificação, acredita-se que um processo de iterações sucessivas permitirá encontrar um modelo que represente satisfatoriamente bem todas as situações.

Após a identificação individual dos modelos das salas, o modelo completo do ambiente multi-salas é montado (Figura 4.13). Neste modelo estão representadas as quatro salas (blocos azuis), seus respectivos inter-relacionamentos, os controladores dos equipamentos de ar condicionado das salas A1, A2 e A3 (blocos verdes), e entradas do processo (temperaturas externas).

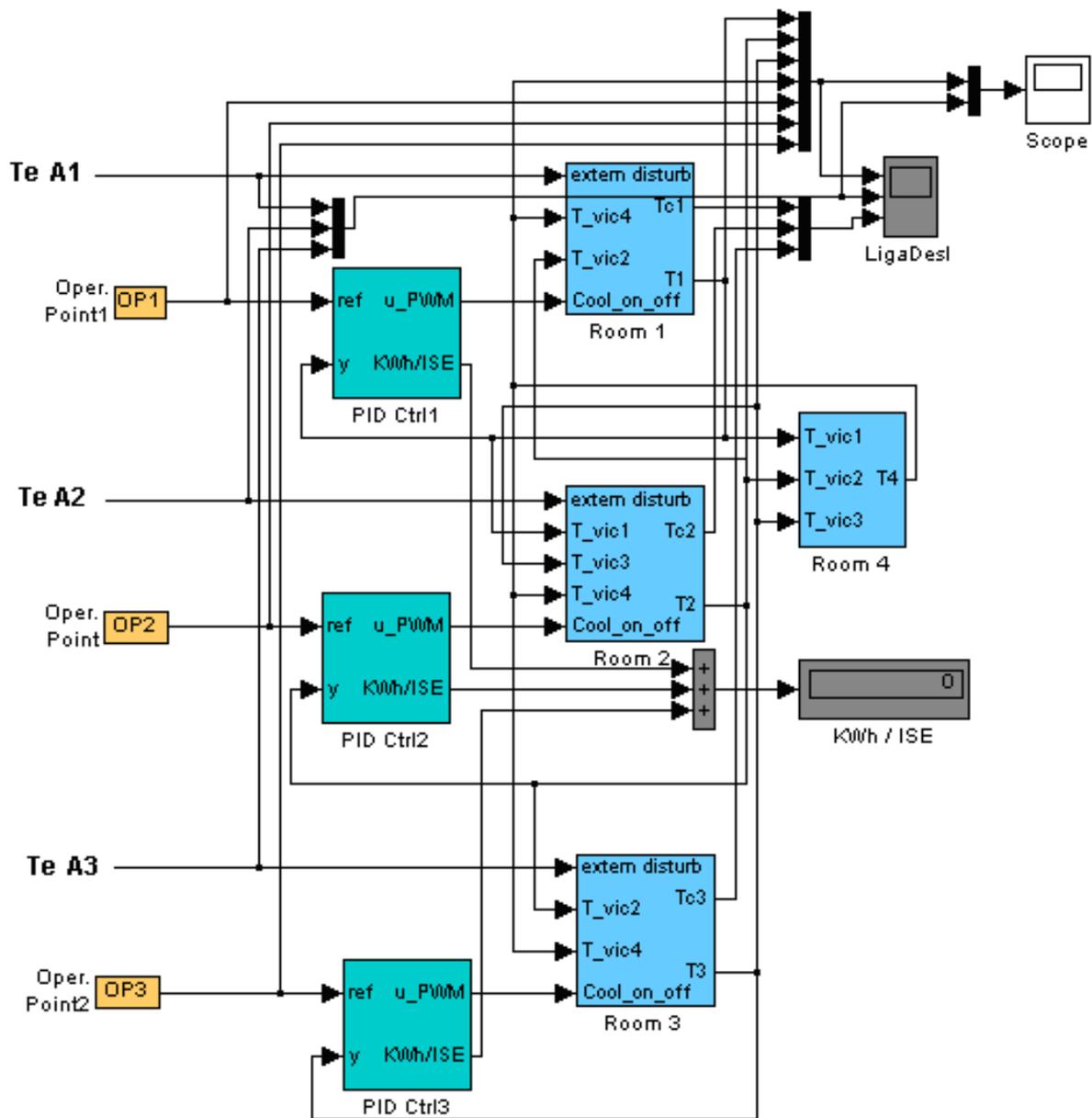


Figura 4.13 – Modelo incluindo as quatro salas.

O resultado da simulação do modelo da figura 4.13 usando o conjunto de dados de identificação é apresentado abaixo (Figura 4.14):

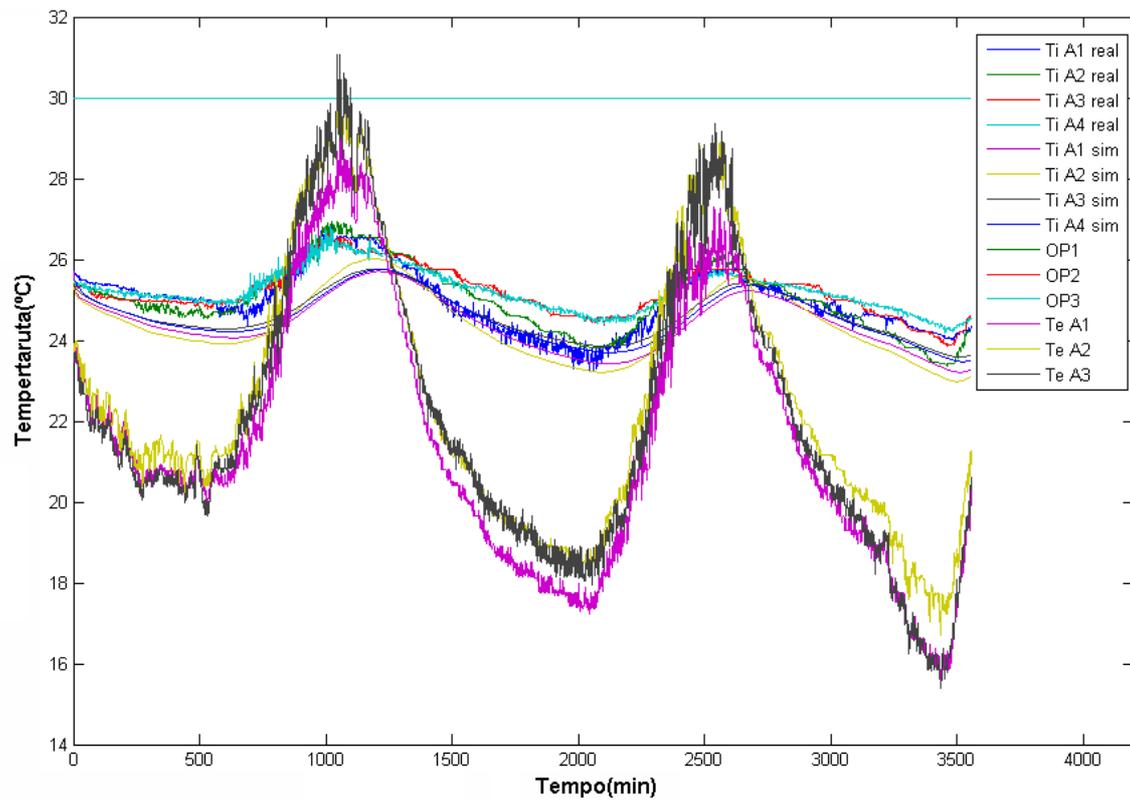


Figura 4.14 – Resultado da simulação do modelo incluindo as quatro salas.

A figura 4.15 mostra o erro entre o valor real e simulado:

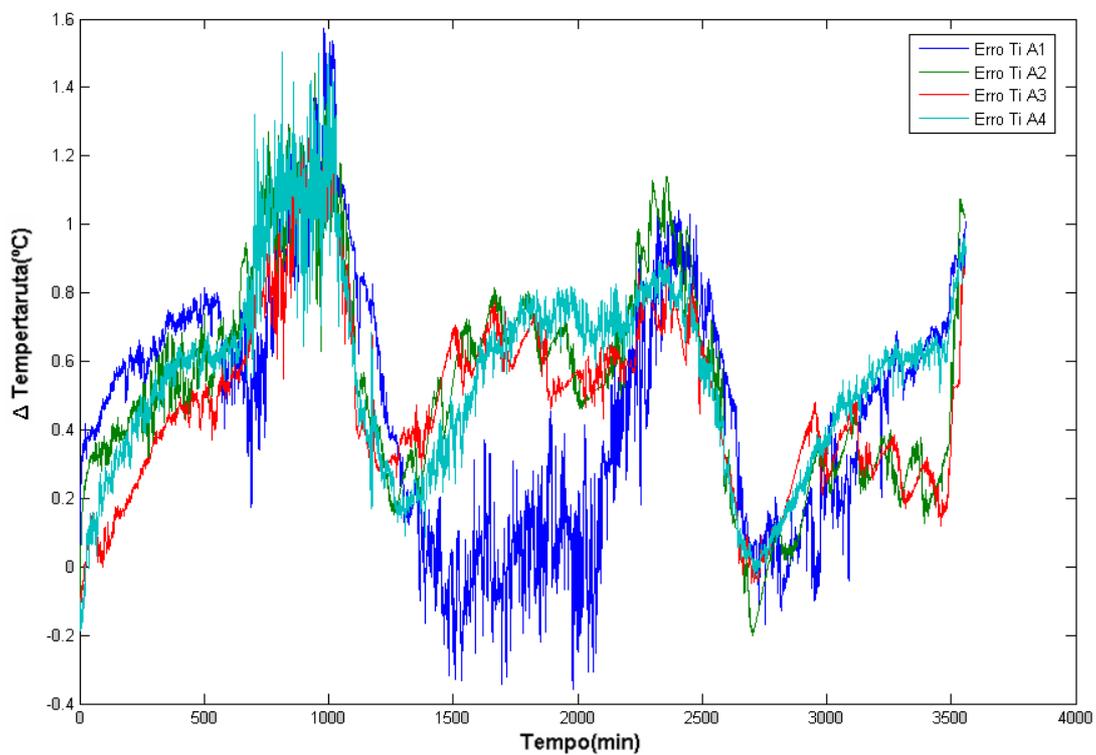


Figura 4.15 – Erro na simulação do modelo incluindo as quatro salas.

Após a simulação usando o conjunto de dados de identificação foi feita uma nova simulação usando o conjunto de dados de validação. O resultado é mostrado na Figura 4.16, enquanto o erro entre o valor real e o medido está representado na figura 4.17.

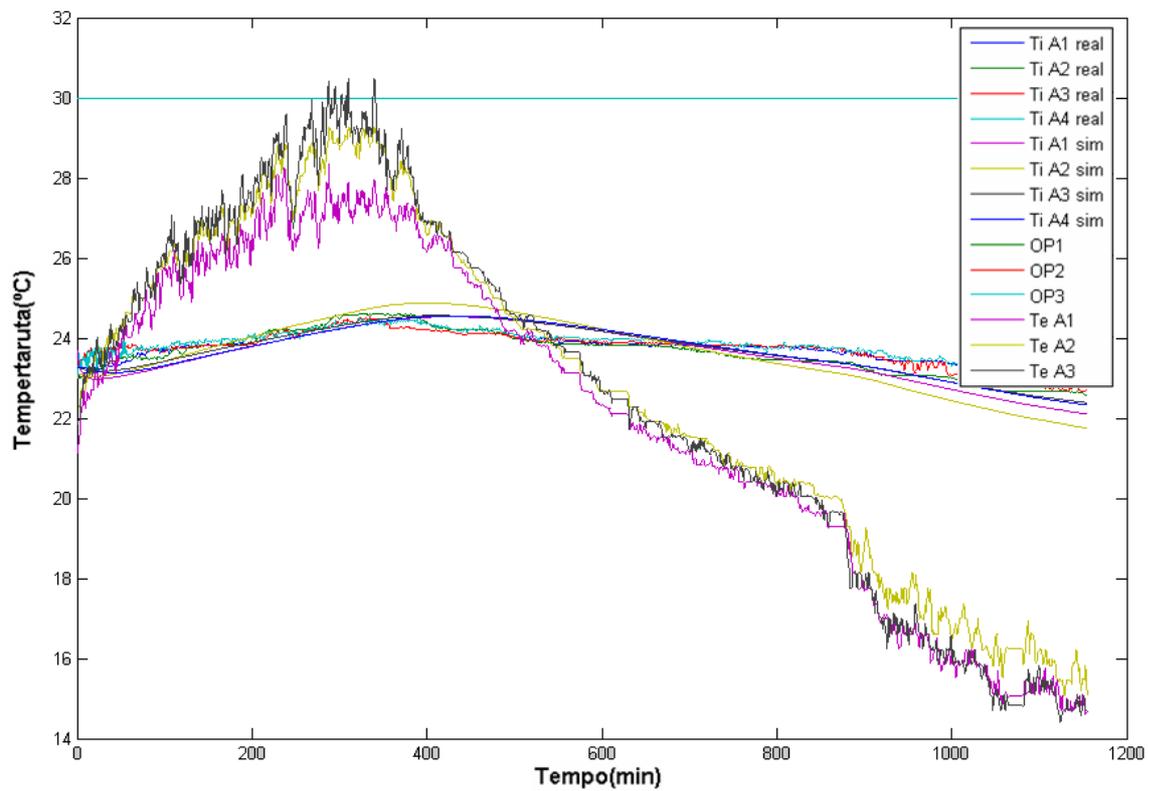


Figura 4.16 – Resultado da validação do modelo incluindo as quatro salas.

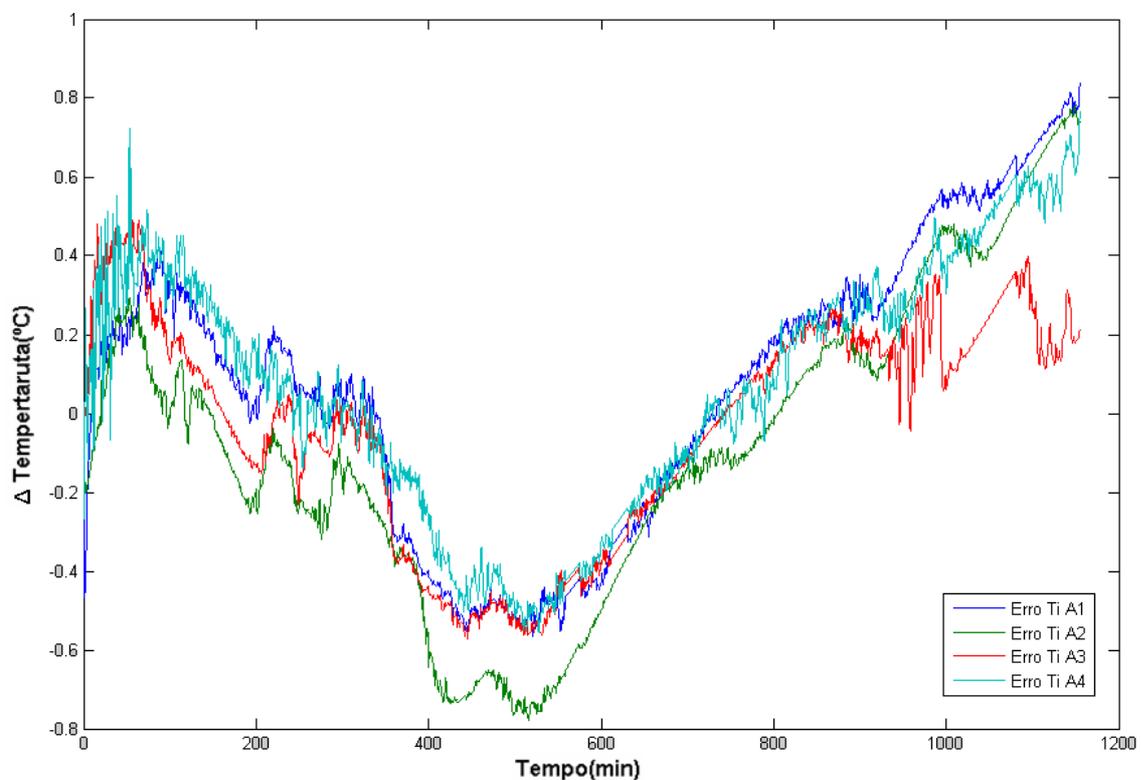


Figura 4.17 – Erro na validação do modelo incluindo as quatro salas.

Na Figura 4.15, o valor máximo de erro encontrado se aproxima de  $1,6^{\circ}\text{C}$ , contudo esse valor está provavelmente relacionado a um ruído na medição. Considerando que o erro máximo seja então de aproximadamente  $1,2^{\circ}\text{C}$ , os resultados obtidos nas simulações mostram que o modelo formado pelas quatro salas consegue reproduzir satisfatoriamente o comportamento real.

Nota-se, contudo, que o erro obtido no modelo com as quatro salas é maior que aquele observado em cada identificação individual. Isso pode ocorrer no modelo multi-salas devido ao acoplamento entre as salas vizinhas, que faz com que um efeito combinado de erros individuais numa mesma direção seja acentuado. Quanto mais precisas forem as identificações individuais das salas, melhor será o resultado obtido após o acoplamento.

# 5 CONTROLE DO AMBIENTE

## 5.1 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

Para controlar a temperatura do ambiente estudado, duas estratégias de controle são propostas: controle liga-desliga e controle PID. O ponto de operação e a faixa aceitável de temperaturas usadas foram retirados da tabela 2.3 baseada na norma ASHRAE, *Standard 55*.

### 5.1.1 Liga-desliga

O controlador liga-desliga com histerese é baseado nos dados obtidos na medição instantânea das temperaturas internas das salas. Como a leitura das temperaturas apresenta um ruído considerável, uma análise para saber quanto a temperatura varia entre duas amostragens sucessivas deve ser feita para evitar que o sinal de controle oscile (entre ligado e desligado) com uma frequência muito grande, o que poderia danificar o aparelho. Recomenda-se que a histerese seja de pelo menos  $0,5^{\circ}\text{C}$ .

Por se tratar de inverno em Brasília, propõe-se o ponto de operação em  $22^{\circ}\text{C}$  com uma histerese de  $1^{\circ}\text{C}$  para que o equipamento de ar condicionado não seja demasiadamente exigido, mas que ainda assim o conforto térmico seja satisfeito.

### 5.1.2 PID

Para realizar o controle PID, primeiramente deve-se fazer a identificação do sistema para obter um modelo do ambiente predial. A partir do modelo matemático, um controlador PID pode ser projetado pelo método do lugar geométrico das raízes usando o MATLAB.

O desempenho do controlador é então estimado por meio de simulações usando o modelo do sistema. Quando um controlador satisfizer as exigências do projeto na simulação, este é então implementado nas controladoras KMC e um teste no ambiente real é feito.

## 5.2 PROJETO DO CONTROLADOR

### 5.2.1 PID

O projeto do PID usando o método do Lugar Geométrico das Raízes será explicado para a sala A2. Para as salas A1 e A3 o procedimento é idêntico, bastando substituir os parâmetros de ganho e constante de tempo do modelo da sala.

Primeiramente, tem-se a função de transferência do processo de resfriamento promovido pelo ar condicionado da Sala A2, equação 5.1:

$$G_2(s) = \frac{0,252}{(s + 0,5)(s + 0,3048)} \quad (5.1)$$

A figura 5.1 mostra o LGR da equação 5.1 obtido usando o MATLAB:

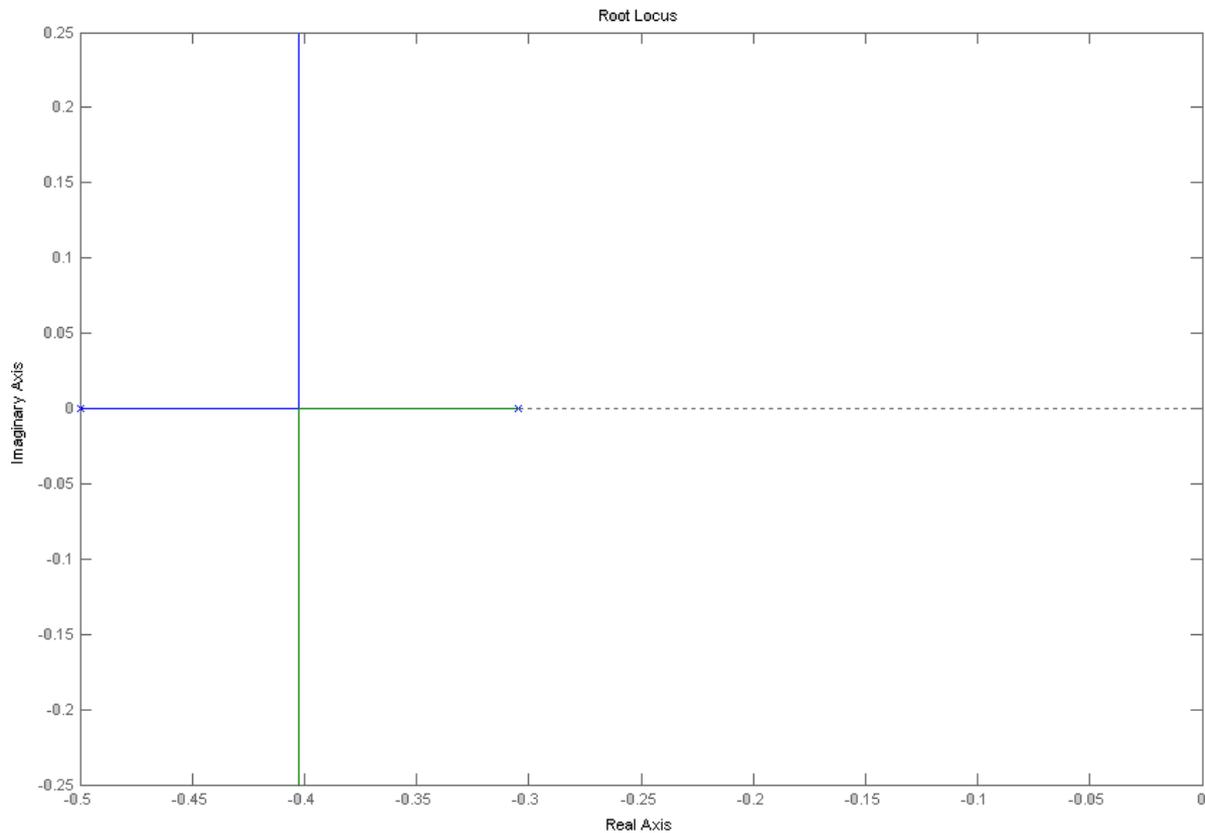


Figura 5.1 – LGR do processo de resfriamento da sala A2 sem controlador.

O controlador a ser usado tem sua função de transferência mostrada na equação 2.8. Por questão de comodidade, aquela equação será reescrita como na equação 5.2:

$$C_2(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (5.2)$$

A mesma equação pode ser reescrita como mostrada na equação 5.3:

$$C_2(s) = \frac{K_p s + \frac{K_p}{T_I} + K_p T_D s^2}{s} \quad (5.3)$$

Para projetar o controlador PID, sobrepuseram-se os pólos do sistema com os zeros do PID. O PID resultante sem o ajuste do ganho é mostrado na equação 5.4.

$$C_2(s) = \frac{K_{PID}(s + 0,5)(s + 0,3048)}{s} \quad (5.4)$$

Recomenda-se, entretanto, que no projeto do controlador seja incluído um pólo para que a função de transferência do PID seja própria. Este pólo deve ser mais rápido que os zeros, de forma a não comprometer o desempenho do controlador.

A figura 5.2 mostra o LGR contendo os zeros e pólo do PID já aplicado ao processo, mas sem ajustar o ganho.

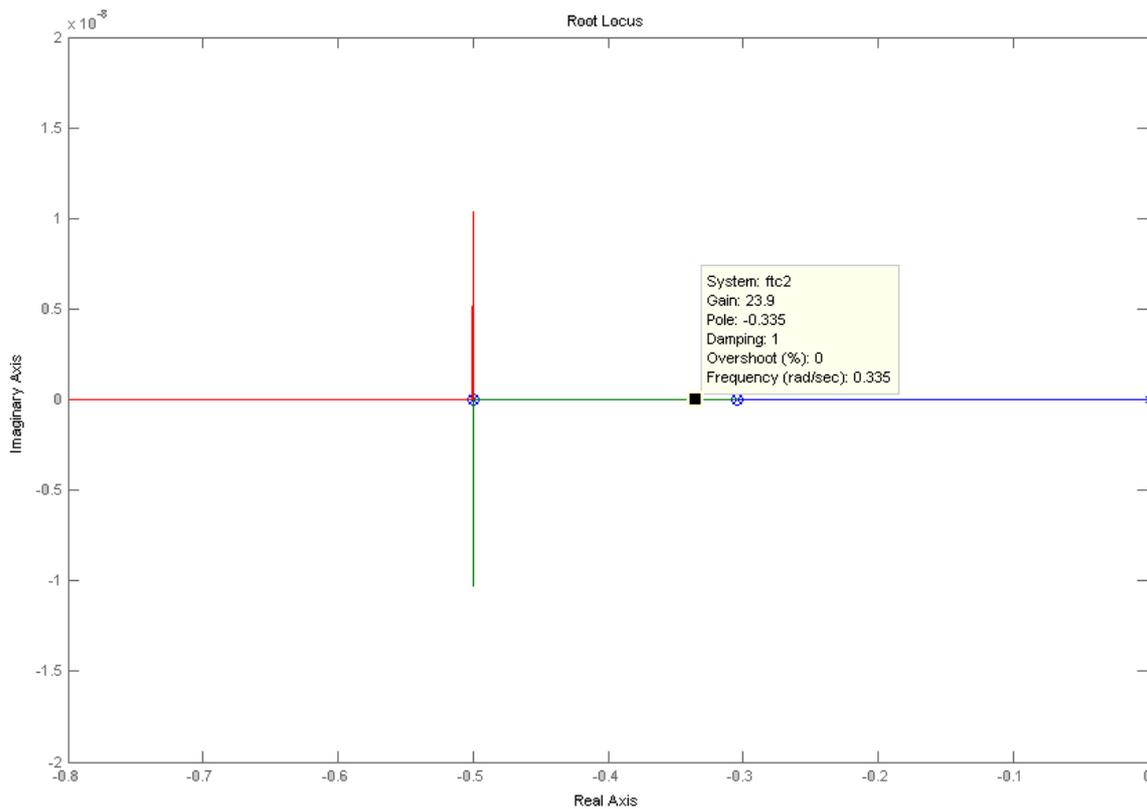


Figura 5.2 – Projeto PID.

Para um pólo dominante em malha fechada em  $z = -0.333$ , que significaria uma constante de tempo de 3 minutos, é necessário um ganho de 23,9. Portanto, o ganho  $K_{PID}$  que o processo controlado (PID+Processo) deve fornecer é:

$$K_{PID} = \frac{23,9}{0,252} = 94,83 \quad (5.5)$$

A equação 5.6 mostra duas maneiras de representar controlador PID:

$$C_2(s) = \frac{K_{PID}(s + z_1)(s + z_2)}{s} = \frac{K_{PID}(s^2 + (z_1 + z_2)s + z_1 \cdot z_2)}{s} \quad (5.6)$$

Relacionando a equação 5.6 com a equação 5.3, podemos obter os valores dos parâmetros  $K_P$ ,  $K_I$  e  $K_D$  respectivamente por:

$$K_P = K_{PID}(z_1 + z_2) \quad (5.7)$$

$$K_I = \frac{K_P}{T_I} = K_{PID} \cdot z_1 \cdot z_2 \quad (5.8)$$

$$K_D = K_P T_D = K_{PID} \quad (5.9)$$

O resultado para o controlador PID da sala A2 é exibido na tabela 5.1:

Tabela 5.1 – Parâmetros do controlador PID sala A2.

| $K_{P2}$ | $K_{I2}$ | $K_{D2}$ |
|----------|----------|----------|
| 76,33    | 14,45    | 94,83    |

Os valores dos parâmetros dos controladores para as salas A1 e A3 são encontrados seguindo o mesmo procedimento. Esses valores são mostrados nas tabelas 5.2 e 5.3, respectivamente.

Tabela 5.2 – Parâmetros do controlador PID sala A1.

| $K_{P1}$ | $K_{I1}$ | $K_{D1}$ |
|----------|----------|----------|
| 53,42    | 11,69    | 60,08    |

Tabela 5.3 – Parâmetros do controlador PID sala A3.

| $K_{P3}$ | $K_{I3}$ | $K_{D3}$ |
|----------|----------|----------|
| 47,71    | 7,34     | 66,06    |

De posse desses valores, pode-se implementar um controlador PID digital na forma mostrada pela equação 5.10.

$$u(k) = u(k-1) + K \left[ \left( 1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T} \right) e(k) - \left( 1 + 2 \frac{T_D}{T} \right) e(k-1) + \frac{T_D}{T} e(k-2) \right] \quad (5.10)$$

O código para o PID implementado na controladora KMC encontra-se no APÊNDICE II.

# 6 CONCLUSÕES

## 6.1 CONCLUSÕES GERAIS

O controle térmico de um ambiente pode ser uma tarefa bastante complexa se altos graus de conforto térmico e economia de energia forem exigidos. O atendimento de tais requisitos exige que um grande número de variáveis e fenômenos sejam considerados. Do ponto de vista da automação, a identificação de um modelo do sistema deve produzir informações que permitam o projeto de controladores mais eficazes. Nesse trabalho, um modelo do ambiente multi-salas foi produzido usando identificação estruturada por princípios fundamentais, cuja proposição é construir um modelo pela adição das parcelas individuais de fluxo de calor.

Uma vantagem dessa abordagem é sua menor complexidade: assume-se que um modelo contínuo, de parâmetros concentrados, linear e invariante no tempo é capaz de representar suficientemente bem o sistema. Uma segunda característica interessante é que há um sentido físico associado a cada parcela do modelo. Isto ajuda a discutir a validade e coerência dos parâmetros encontrados. Por fim, a independência das parcelas de fluxo de calor permite que mudanças ocorridas no sistema real possam ser ajustas individualmente, sem ser preciso descartar o modelo inteiro.

A *toolbox* de identificação de sistemas do MATLAB apresenta recursos suficientes para fazer a identificação de um modelo com múltiplas entradas. Contudo, seu algoritmo de processamento dos dados é orientado a minimizar o erro da identificação. Por esse motivo, em várias ocasiões resultados inconsistentes com um modelo estruturado foram gerados, cabendo àquele que conduz a identificação perceber e tratar essas falhas.

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. Contudo, graças a uma das características do tipo de identificação empregada, isso poderá ser reparado sem a necessidade de descartar o restante da identificação.

Nesse trabalho foi possível estabelecer uma metodologia clara para a identificação estruturada por princípios fundamentais de um modelo de um ambiente multi-salas. Os resultados obtidos foram satisfatórios: os parâmetros da identificação estão coerentes com seu significado físico e os resultados das simulações, salvo os da sala A3 com ar condicionado, estão dentro de limites admissíveis. Esses dados são suficientes para a etapa seguinte que consiste no projeto de controladores mais eficazes. O uso desta plataforma reduzirá o tempo de projeto de controladores e ainda economizará energia ao passo que reduz o número de testes de desempenho no sistema real.

## 6.2 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Além das sugestões citadas acima, algumas outras poderiam ser adotadas. Primeiramente, o sensoriamento feito usando termistores, pouco práticos e precisos, poderia ser substituído por sensores sem fio ZigBee, padrão de comunicação sem fio mais adequado para esta aplicação. Cada sala poderia contar com mais de um ponto de medição, o que ajudaria a reduzir os efeitos da simplificação de um modelo de parâmetros distribuídos a um de parâmetros concentrados, além de contribuir para uma identificação mais precisa do ambiente. Sensores para medição da radiação solar e da temperatura efetiva do prédio possibilitariam a identificação dessas contribuições, que não puderam ser medidas nesse trabalho.

Um segundo estágio envolve o uso dos recursos do supervisório para implementação de estratégias de controle inteligentes, com múltiplas variáveis de entrada - *Lógica Fuzzy* possivelmente. O supervisório poderia ser usado como *gateway* e reunir num único ponto informações sobre equipamentos que se comunicam usando protocolos distintos. Informações sobre consumo de energia elétrica e sinais dos sensores de presença poderiam ser incluídas nos algoritmos de controle. Além disso, uma estratégia de controle que privilegie o uso do equipamento de ar condicionado que estiver submetido a uma menor temperatura externa pode ser adotada buscando economia de energia.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Action View, Software SCADA, Versão 7.4 (2007). Desenvolvido e comercializado por Spin Engenharia de Automação Ltda.
- AGUIRRE, L. A. (2000). "Introdução à Identificação de Sistemas". Editora UFMG. Belo Horizonte, Brasil.
- ÁGUAS, Miguel P. N. (2000). Conforto Térmico. Mestrado. IST / DEM – Instituto Superior Técnico, Portugal.
- ASHRAE *standard 55* (2004). Thermal Environments Conditions for Human Occupancy, Atlanta: ASHRAE Inc.
- BAUCHSPIESS, Adolfo, ISHIHARA, João Y., FELGNER, Felix, LITZ, Lothar. (2006) First-Principles Structured Identification for Predictive HVAC Control.
- FANGER, P. O. (1972). Thermal Comfort : analysis and applications in environmental engineering., McGraw-Hill Book Co., New York. 244p.
- FELGNER, F., MERZ, R., LITZ, L. (2006). Modular Modeling of thermal building behavior. *Mathematical and Computer Modeling of Dynamical Systems*, 12(1):35-49.
- FRAISSE, G., VIARDOT, C., LAFABRIE, O., ARCHAND, G. (2002). Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy, *Energy and Buildings* 34(2002) 1017-1031
- FRANKLIN, Gene F., POWEL, J. David, WORKMAN, Michael L. (1998). Digital control of dynamic systems, 3ª edição, Addison Wesley Logman.
- HALLIDAY, David, RESNICK, Robert, WALKER, Jearl.(2002). Fundamentos de Física 2 – Gravitação, ondas e termodinâmica, 6ª edição, LTC – Livros Técnicos e Científicos.
- ISO 7730 (1994). Moderate Thermal Environments – Determination of the PMV and PPD Índices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort.
- JIMENEZ, M. J., MADSEN, H.(2007) Models for describing the thermal characteristics of building components. *Buildings and Energy*.
- KILIAN, Christopher T.(2000). Modern Control Technology: Components and Systems, 2ª edição, Delmar Thomson Learning.
- OGATA, Katsuhiko. (2003). Engenharia de controle moderno, 4ª edição, Pearson – Prentice Hall.
- Regulamento das características de Comportamento Térmico dos Edifícios, Decreto-Lei n.º 40/90, Portugal (1990).
- SANTOS, Ronaldo de J. (2005). Controle Fuzzy para Racionalização de Energia em Processo de Condicionamento de Ar. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação ENE.DM-187/05, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 134p.
- SILVA, M. A. (2005). Análise de uma Rede Adequada para Monitoração e Controle de Energia na Automação Predial. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação ENE.DM – 228/05, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 86p.
- SOUTO, R. F. (2006). Avaliação e implementação de técnicas de controle para condicionamento térmico de ambientes prediais. Graduação. Publicação ENE. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 56p
- URZÊDA, C. C. (2006). Software SCADA como plataforma para racionalização inteligente de energia elétrica em automação predial. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação ENE.DM – 281/06, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 96p.
- VIRK, G. S., CHEUNG, J. Y. M. (1995). Practical stochastic multivariable identification for buildings, *Ap. Math Modeling*, 19(10):621-636.
- WinControl XL Plus User's Manual. KMC Controls (2006).

# APÊNDICE I – CÓDIGOS MATLAB

## SCRIPTS USADOS NA IDENTIFICAÇÃO DAS SALAS IDENTIFICAÇÃO DAS SALAS

```
%%%%%%%%%%  
%% SCRIPT USADO NA IDENTIFICAÇÃO DA SALA 1  
%%%%%%%%%%  
clear all;  
close all;  
  
intr = load('Temp_int_27_04_07_a_30_04_07_reparada.txt');  
extr = load('Temp_ext_27_04_07_a_30_04_07.txt');  
  
ai = 1200;  
af = 2750;  
  
iA1 = intr(ai:af,1);  
iA2 = intr(ai:af,2);  
iA3 = intr(ai:af,3);  
iA4 = intr(ai:af,4);  
eA1 = extr(ai:af,1);  
eA2 = extr(ai:af,2);  
eA3 = extr(ai:af,3);  
  
iA1 = iA1 - mean(iA1);  
iA2 = iA2 - mean(iA2);  
iA3 = iA3 - mean(iA3);  
iA4 = iA4 - mean(iA4);  
eA1 = eA1 - mean(eA1);  
eA2 = eA2 - mean(eA2);  
eA3 = eA3 - mean(eA3);  
  
na = size(iA1);  
na = na(1)  
t = (13*60+40: (na-1)+13*60+40)/60; % <- MODIFICAR DE ACORDO COM O TIMESTAMP  
t2 = (0: (na-1));  
t3 = t2';
```

```

figure(1);
plot(t,[iA1,iA2,iA3,iA4,eA1,eA2,eA3]);
xlabel('tempo(h)')
ylabel('temperatura(°C)')
title('Teste sem ar condicionado')
% axis([13 50 -1 30]);

data = iddata(iA1,[iA2,iA4,eA1],1);

% quarta ordem
m = n4sid(data, 4)
zpk(m)
zpk(d2c(m))

ye=dlsim(m.a,m.b,m.c,m.d,[iA2,iA4,eA1],m.x(1:4));
figure(5);
plot(t,[ye,iA1]);
xlabel('tempo(h)')
ylabel('temperatura(°C)')
title('Identificação do sistema da sala 1 - Ordem 4')
% axis([13 50 15 30]);
erro4 = (ye - iA1);

%MEDIA DO QUADRADO DOS ERROS
mqe4 = sum((iA1 - ye).*(iA1 - ye))/(2*na)

figure(6);
plot(t,erro4);
xlabel('tempo(h)')
ylabel('delta temperatura(°C)')
title('Erro entre valor real e simulado')
grid;

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%% SCRIPT DE IDENTIFICAÇÃO DA SALA 2
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
clear all;
```

```
close all;
```

```
intr = load('Temp_int_27_04_07_a_30_04_07_reparada.txt');
```

```
extr = load('Temp_ext_27_04_07_a_30_04_07.txt');
```

```
ai = 1237;
```

```
af = 3350;
```

```
iA1 = intr(ai:af,1);
```

```
iA2 = intr(ai:af,2);
```

```
iA3 = intr(ai:af,3);
```

```
iA4 = intr(ai:af,4);
```

```
eA1 = extr(ai:af,1);
```

```
eA2 = extr(ai:af,2);
```

```
eA3 = extr(ai:af,3);
```

```
iA1 = iA1 - mean(iA1);
```

```
iA2 = iA2 - mean(iA2);
```

```
iA3 = iA3 - mean(iA3);
```

```
iA4 = iA4 - mean(iA4);
```

```
eA1 = eA1 - mean(eA1);
```

```
eA2 = eA2 - mean(eA2);
```

```
eA3 = eA3 - mean(eA3);
```

```
na = size(iA1);
```

```
na = na(1);
```

```
t = (13*60+40: (na-1)+13*60+40)/60; % <- MODIFICAR DE ACORDO COM O TIMESTAMP
```

```
t2 = (0: (na-1));
```

```
t3 = t2';
```

```
figure(1);
```

```
plot(t,[iA2]);
```

```
xlabel('tempo(h)')
```

```
ylabel('temperatura(°C)')
```

```

title('Teste sem ar condicionado')

data = iddata(iA2,[iA1,iA3,iA4,eA2],1);

% quarta ordem
m = n4sid(data, 4)
zpk(m)
zpk(d2c(m))

ye=dlsim(m.a,m.b,m.c,m.d,[iA1,iA3,iA4,eA2],m.x(1:4));
figure(5);
plot(t,[ye,iA2]);
xlabel('tempo(h)')
ylabel('temperatura(°C)')
title('Identificação do sistema da sala 2 - Ordem 4')
% axis([13 50 15 30]);
erro4 = (ye - iA2);

%MEDIA DO QUADRADO DOS ERROS
mqe4 = sum((iA2 - ye).*(iA2 - ye))/(2*na);

figure(6);
plot(t,erro4);
xlabel('tempo(h)')
ylabel('delta temperatura(°C)')
title('Erro entre valor real e simulado')
grid;
axis([13 50 -2 2]);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% SCRIPT DE IDENTIFICAÇÃO DA SALA 3
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all;
close all;

intr = load('Temp_int_27_04_07_a_30_04_07_reparada.txt');
extr = load('Temp_ext_27_04_07_a_30_04_07.txt');

```

```

ai = 1;
af = 3558;

iA1 = intr(ai:af,1);
iA2 = intr(ai:af,2);
iA3 = intr(ai:af,3);
iA4 = intr(ai:af,4);
eA1 = extr(ai:af,1);
eA2 = extr(ai:af,2);
eA3 = extr(ai:af,3);

iA1 = iA1 - mean(iA1);
iA2 = iA2 - mean(iA2);
iA3 = iA3 - mean(iA3);
iA4 = iA4 - mean(iA4);
eA1 = eA1 - mean(eA1);
eA2 = eA2 - mean(eA2);
eA3 = eA3 - mean(eA3);

na = size(iA1);
na = na(1);
t = (13*60+40: (na-1)+13*60+40)/60; % <- MODIFICAR DE ACORDO COM O TIMESTAMP
t2 = (0: (na-1));
t3 = t2';

figure(1);
plot(t,[iA1,iA2,iA3,iA4,eA1,eA2,eA3]);
xlabel('tempo(h)')
ylabel('temperatura(°C)')
title('Teste sem ar condicionado')

data = iddata(iA3,[iA2,iA4,eA3],1);

% quarta ordem
m = n4sid(data, 4)
zpk(m)
zpk(d2c(m))

```

```

ye=dlsim(m.a,m.b,m.c,m.d,[iA2,iA4,eA3],m.x(1:4));
figure(5);
plot(t,[ye,iA3]);
xlabel('tempo(h)')
ylabel('temperatura(°C)')
title('Identificação do sistema da sala 3 - Ordem 4')
% axis([13 50 15 30]);
erro4 = (ye - iA3);

%MEDIA DO QUADRADO DOS ERROS
mqe4 = sum((iA3 - ye).*(iA3 - ye))/(2*na);

figure(6);
plot(t,erro4);
xlabel('tempo(h)')
ylabel('delta temperatura(°C)')
title('Erro entre valor real e simulado')
grid;
axis([13 50 -2 2]);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% SCRIPT DE IDENTIFICAÇÃO DA SALA 4
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all;
close all;

intr = load('Temp_int_27_04_07_a_30_04_07_reparada.txt');
extr = load('Temp_ext_27_04_07_a_30_04_07.txt');

ai = 1200;
af = 2750;

iA1 = intr(ai:af,1);
iA2 = intr(ai:af,2);
iA3 = intr(ai:af,3);
iA4 = intr(ai:af,4);

```

```

eA1 = extr(ai:af,1);
eA2 = extr(ai:af,2);
eA3 = extr(ai:af,3);

iA1 = iA1 - mean(iA1);
iA2 = iA2 - mean(iA2);
iA3 = iA3 - mean(iA3);
iA4 = iA4 - mean(iA4);
eA1 = eA1 - mean(eA1);
eA2 = eA2 - mean(eA2);
eA3 = eA3 - mean(eA3);

na = size(iA1);
na = na(1)
t = (13*60+40: (na-1)+13*60+40)/60; % <- MODIFICAR DE ACORDO COM O TIMESTAMP
t2 = (0: (na-1));
t3 = t2';
figure(1);
plot(t,[iA1,iA2,iA3,iA4,eA1,eA2,eA3]);
xlabel('tempo(h)')
ylabel('temperatura(°C)')
title('Teste sem ar condicionado')
data = iddata(iA4,[iA1,iA2,iA3],1);

% terceira ordem
m = n4sid(data, 3)
zpk(m)
zpk(d2c(m))

ye=dlsim(m.a,m.b,m.c,m.d,[iA1,iA2,iA3],m.x(1:3));
figure(4);
plot(t,[ye,iA4]);
xlabel('tempo(h)')
ylabel('temperatura(°C)')
title('Identificação do sistema da sala 4 - Ordem 3')
% axis([13 50 15 30]);
erro3 = (ye - iA4);

```

```

%MEDIA DO QUADRADO DOS ERROS
mqe3 = sum((iA4 - ye).*(iA4 - ye))/(2*na);

% quarta ordem

m = n4sid(data, 4)
zpk(m)
zpk(d2c(m))

ye=dlsim(m.a,m.b,m.c,m.d,[iA1,iA2,iA3],m.x(1:4));
figure(5);
plot(t,[ye,iA4]);
xlabel('tempo(h)')
ylabel('temperatura(°C)')
title('Identificação do sistema da sala 4 - Ordem 4')
% axis([13 50 15 30]);
erro4 = (ye - iA4);

%MEDIA DO QUADRADO DOS ERROS
mqe4 = sum((iA4 - ye).*(iA4 - ye))/(2*na);

figure(6);
plot(t,[erro3,erro4]);
xlabel('tempo(h)')
ylabel('delta temperatura(°C)')
title('Erro entre valor real e simulado')
grid;
axis([13 50 -2 2]);

```

# APÊNDICE II – CÓDIGOS KMC

## II.1 CÓDIGO USADO NO TESTE PRBS DE IDENTIFICAÇÃO DO AR CONDICIONADO

O mesmo código é usado nas três controladoras. Dentro de cada controladora, devido ao limite de tamanho para programas, foi necessário dividir a rotina em duas partes menores para que pudessem ser gravadas. Os dois programas são então habilitados para trabalhar ao mesmo tempo. Essa não é a maneira mais requintada de proceder a geração de um sinal PRBS. De fato, o procedimento adotado apenas reproduz em todos os testes uma determinada seqüência PRBS gerada usando o MATLAB.

PROGRAMA PRBS 01:

\*\*\*\*\*

```
10 WAIT 0:03:00
20 difB = difB + 1
25 difA = difA + 1
30 IF ARLIGA = 0 THEN GOTO 50
40 IF difB = 1 OR difB = 10 OR difB = 13 OR difB = 17 OR difB = 24 OR difB = 27 OR difB
= 29 OR difB = 34 OR difB = 39 OR difB = 44 OR difB = 48 OR difB = 53 OR difB = 59 OR
difB = 66 OR difB = 68 OR difB = 71 OR difB = 78 OR difB = 81 OR difB = 87 OR difB = 89
OR difB = 93 OR difB = 96 OR difB = 100 OR difB = 102 OR difB = 104 OR difB = 106 OR
difB = 109 OR difB = 112 OR difB = 116 OR difB = 118 OR difB = 123 OR difB = 126 THEN
GOTO 70
50 IF difB = 9 OR difB = 12 OR difB = 15 OR difB = 21 OR difB = 26 OR difB = 28 OR difB
= 32 OR difB = 35 OR difB = 43 OR difB = 47 OR difB = 52 OR difB = 54 OR difB = 60 OR
difB = 67 OR difB = 70 OR difB = 76 OR difB = 80 OR difB = 84 OR difB = 88 OR difB = 92
OR difB = 94 OR difB = 98 OR difB = 101 OR difB = 103 OR difB = 105 OR difB = 107 OR
difB = 110 OR difB = 113 OR difB = 117 OR difB = 119 OR difB = 124 THEN ARLIGA = 1
60 GOTO 80
70 ARLIGA = 0
80 difC = ARLIGA
90 END
```

## PROGRAMA PRBS 02:

\*\*\*\*\*

5 IF difA < 126 THEN GOTO 90

30 IF ARLIGA = 0 THEN GOTO 50

40 IF difA = 129 OR difA = 133 OR difA = 139 OR difA = 141 OR difA = 144 OR difA = 147  
OR difA = 149 OR difA = 152 OR difA = 165 OR difA = 168 OR difA = 171 OR difA = 173 OR  
difA = 177 OR difA = 180 OR difA = 182 OR difA = 188 OR difA = 190 OR difA = 195 OR  
difA = 199 OR difA = 203 OR difA = 208 OR difA = 215 OR difA = 222 OR difA = 226 OR  
difA = 232 OR difA = 234 OR difA = 236 THEN GOTO 70

50 IF difA = 128 OR difA = 130 OR difA = 138 OR difA = 140 OR difA = 143 OR difA = 145  
OR difA = 148 OR difA = 150 OR difA = 158 OR difA = 167 OR difA = 170 OR difA = 172 OR  
difA = 174 OR difA = 178 OR difA = 181 OR difA = 186 OR difA = 189 OR difA = 192 OR  
difA = 196 OR difA = 201 OR difA = 205 OR difA = 211 OR difA = 217 OR difA = 225 OR  
difA = 228 OR difA = 233 OR difA = 235 THEN ARLIGA = 1

60 GOTO 80

70 ARLIGA = 0

80 difC = ARLIGA

90 END

## II.2 CÓDIGO USADO NO PID DIGITAL E PWM

Código que implementa um PID digitalizado pela aplicação do método de Euller duas vezes, porém não há dispositivo anti-windup programado. Uma rotina que simula o comportamento e um PWM foi criada, limitando o ciclo mínimo de trabalho a 15% e transformando sinais de controle superiores a 85% em 100%. Isso é feito para evitar chaveamentos num período muito curto de tempo, o que poderia danificar o equipamento.

O código apresentado refere-se ao PID discretizado da controladora da sala A3. O código das demais controladoras é idêntico ao apresentado, havendo apenas a necessidade de substituir o índice '3' nos parâmetros do código, pelo índice da sala correspondente.

CÒDIGO PID SALA A3:

\*\*\*\*\*

1 E3(k) = difD - TempIN

2 U3(k) = U3(k-1) + KP3 \* ( 1 + SR3 / TI3 + TD3 / SR3 ) \* E3(k) - KP3 \* ( 1 + 2 \* TD3 / SR3 ) \* E3(k-1) + KP3 \* TD3 / SR3 \* E3(k-2)

3 E3(k-2) = E3(k-1)

4 E3(k-1) = E3(k)

6 IF U3(k) < -200 THEN U3(k) = -200

7 IF U3(k) > 0 THEN U3(k) = 0

8 U3(k-1) = U3(k)

9 SIN3 = ( 0 - U3(k) ) / 2

10 IF ARLIGA = 0 THEN GOTO 30

15 IF TIME-ON( ARLIGA ) < difB THEN GOTO 100 ELSE ARLIGA = 0

30 IF TIME-OFF( ARLIGA ) < 240 / 36 - difB THEN GOTO 100

40 difB = 240 \* SIN3 / 3600

50 IF difB < 240 \* 15 / 3600 THEN ARLIGA = 0 ELSE ARLIGA = 1

60 IF difB < 240 \* 15 / 3600 THEN difB = 0 ELSE GOTO 70

65 REM IF difB < 240 \* 10 / 3600 THEN difB = 0

70 IF difB > 240 \* 85 / 3600 THEN difB = 240 \* 100 / 3600 ELSE GOTO 100

80 REM IF difB > 240 \* 90 / 3600 THEN difB = 240 \* 100 / 3600

100 CT\_AC3 = SIN3

110 difC = ARLIGA

111 TON3 = TIME-ON( ARLIGA )

115 TOFF3 = TIME-OFF( ARLIGA )

113 WAIT 0:00:10

120 END

# APÊNDICE III – MODELO DAS SALAS NO SIMULINK

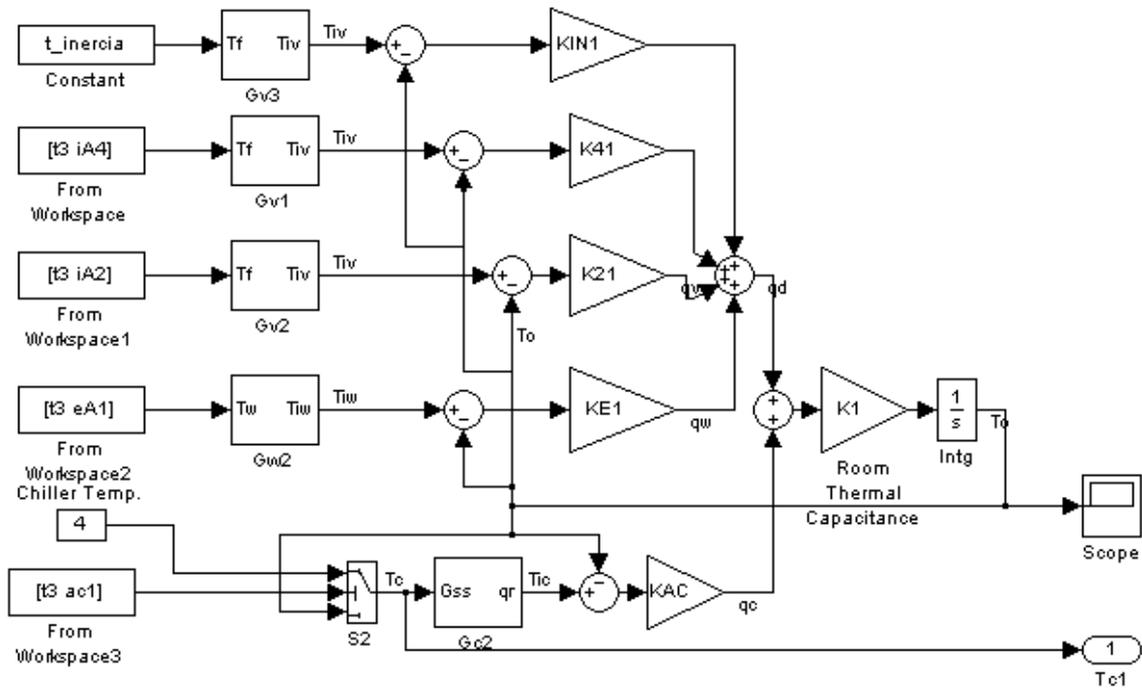


Figura I – Modelo da Sala A1

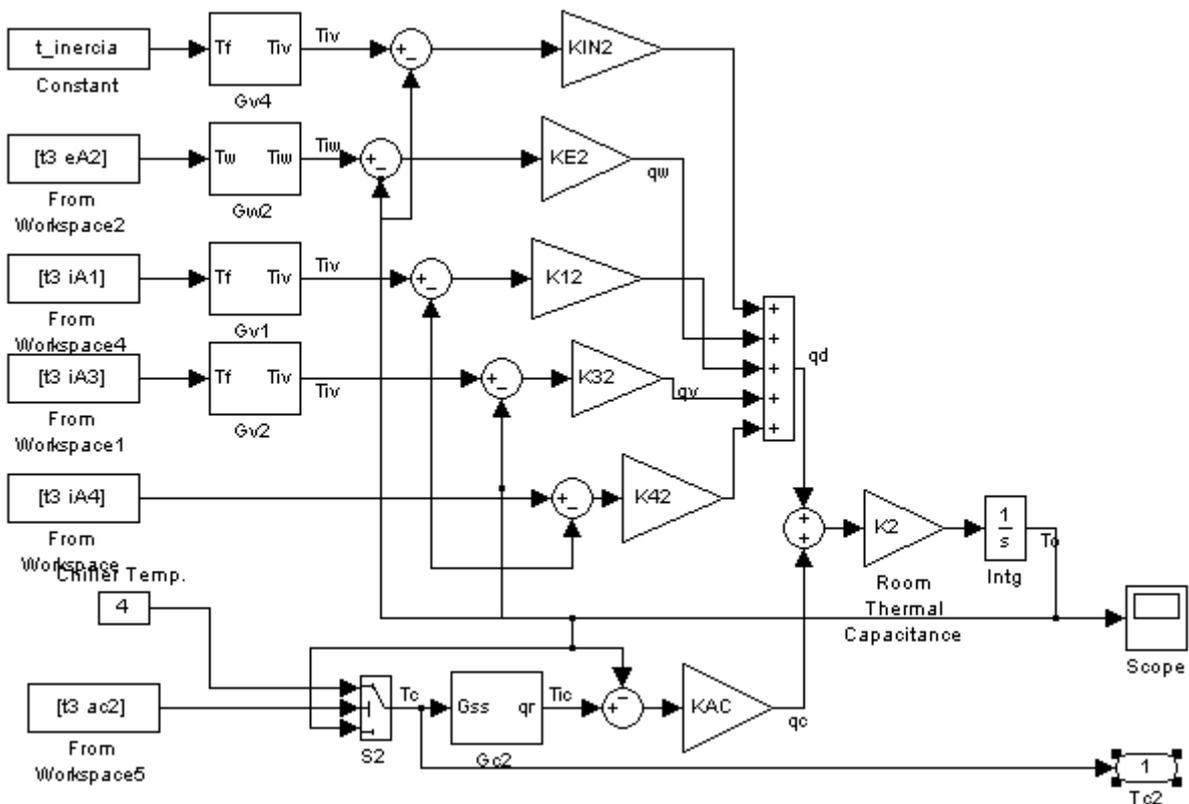


Figura II – Modelo da Sala A2

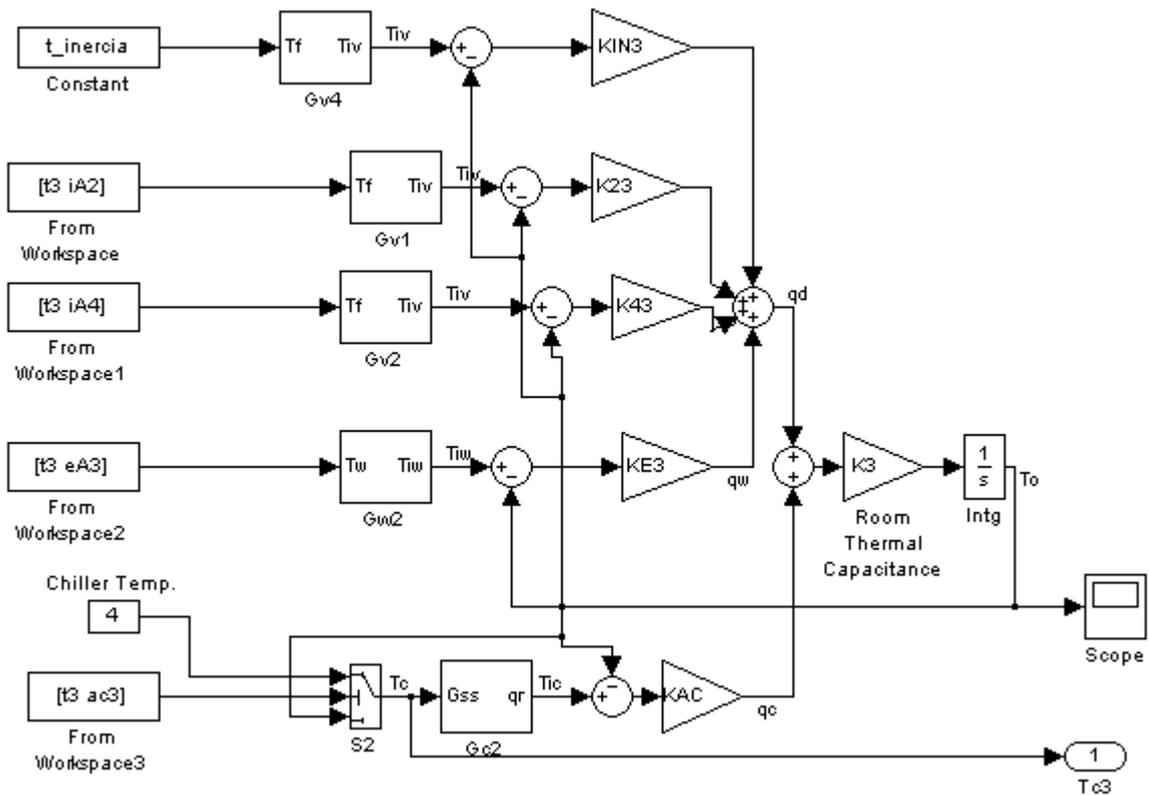


Figura III – Modelo da Sala A3

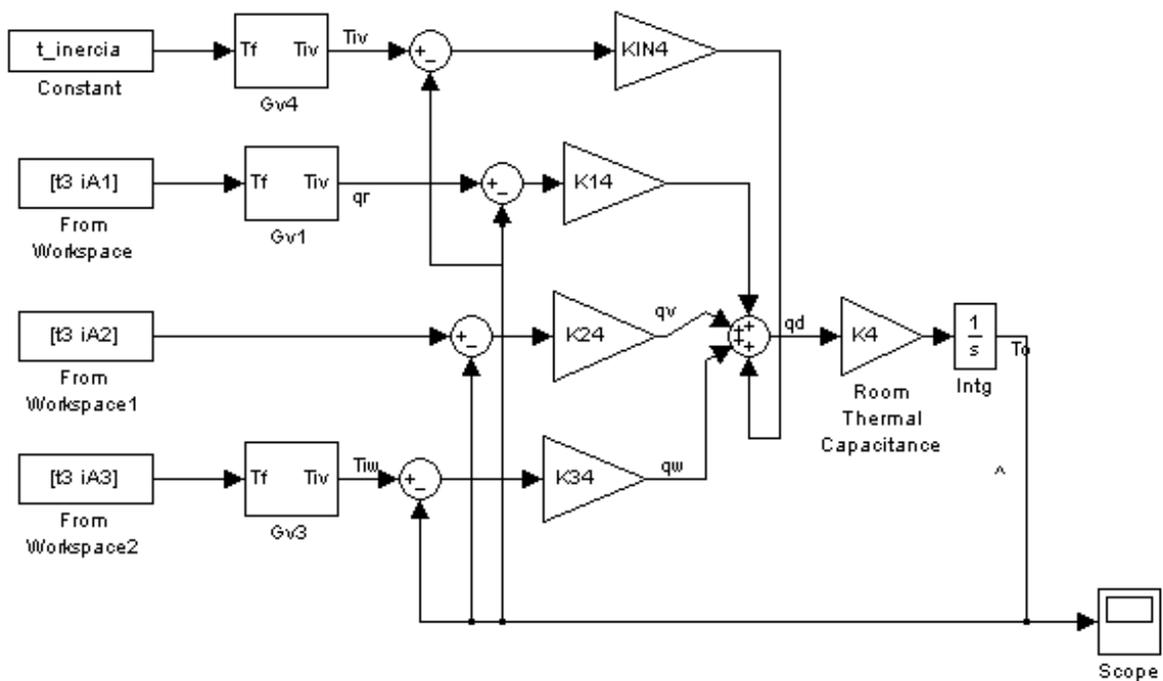


Figura IV – Modelo da Sala A4

# APÊNDICE IV – IDENTIFICAÇÃO DAS SALAS

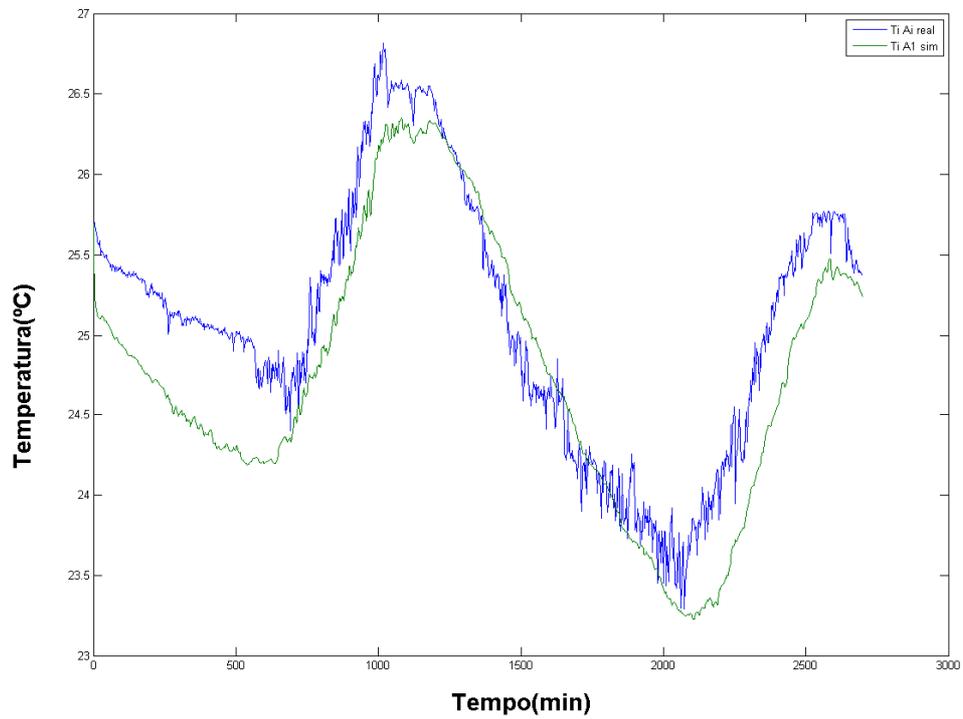


Figura I – Resultado da identificação da Sala 1

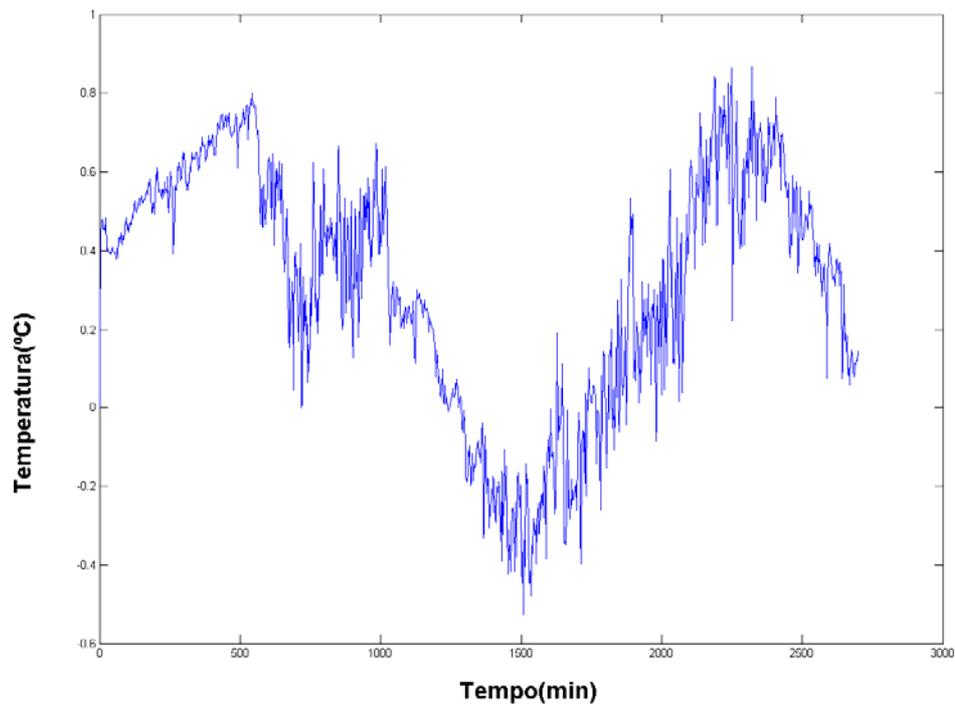
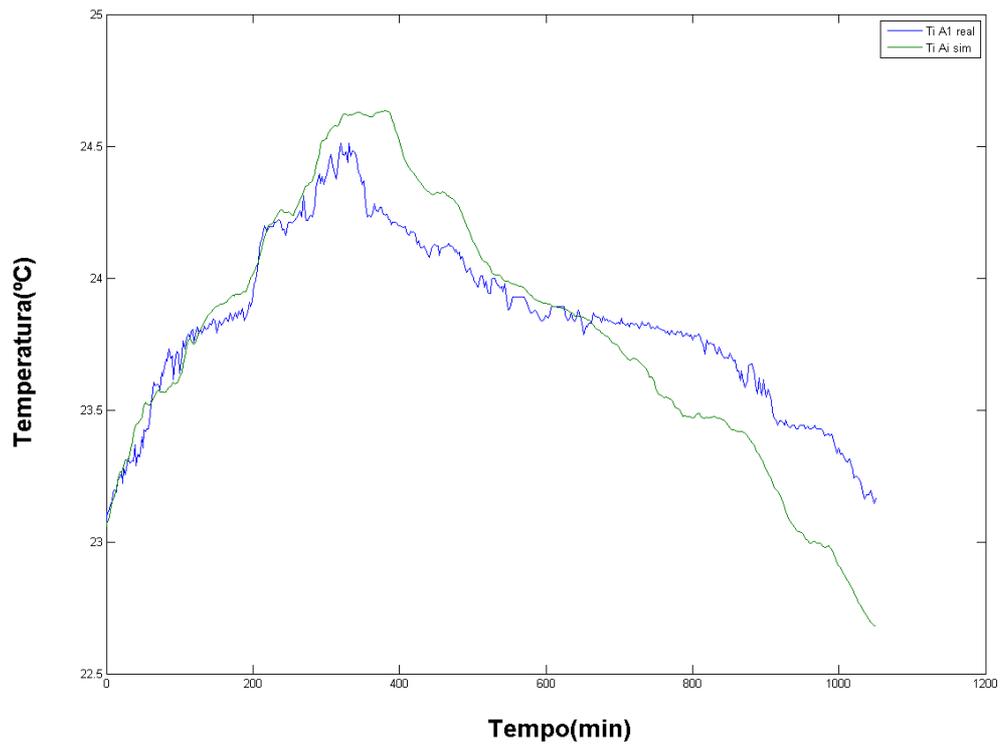
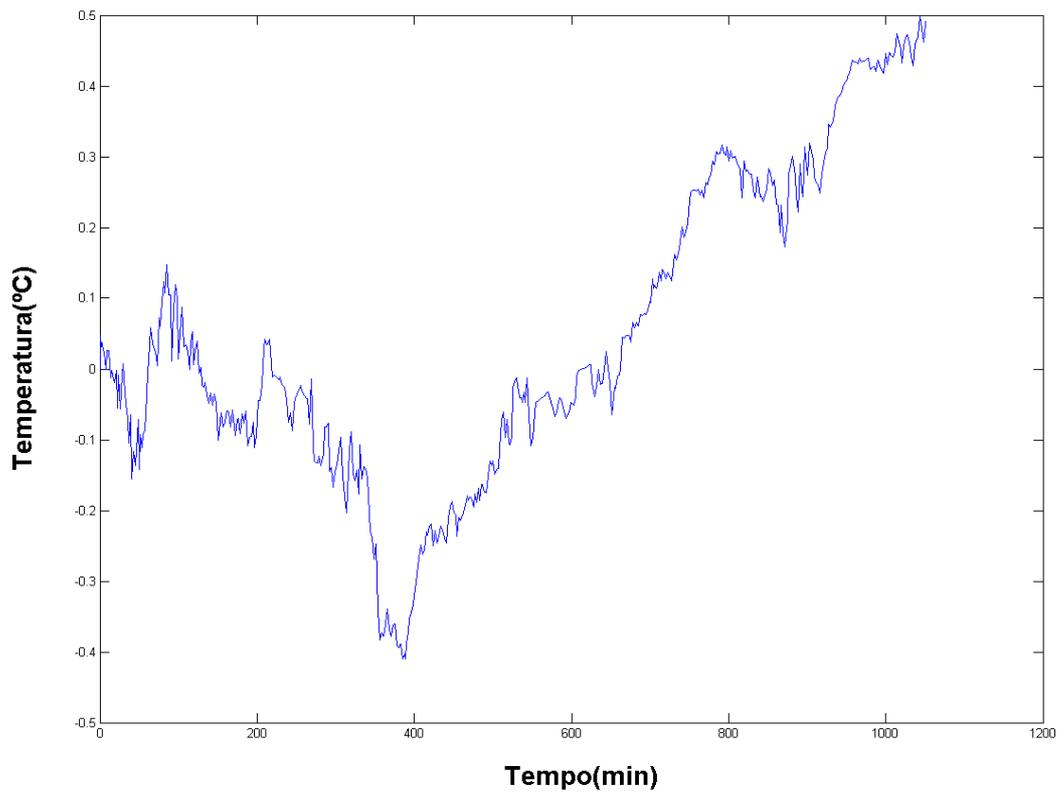


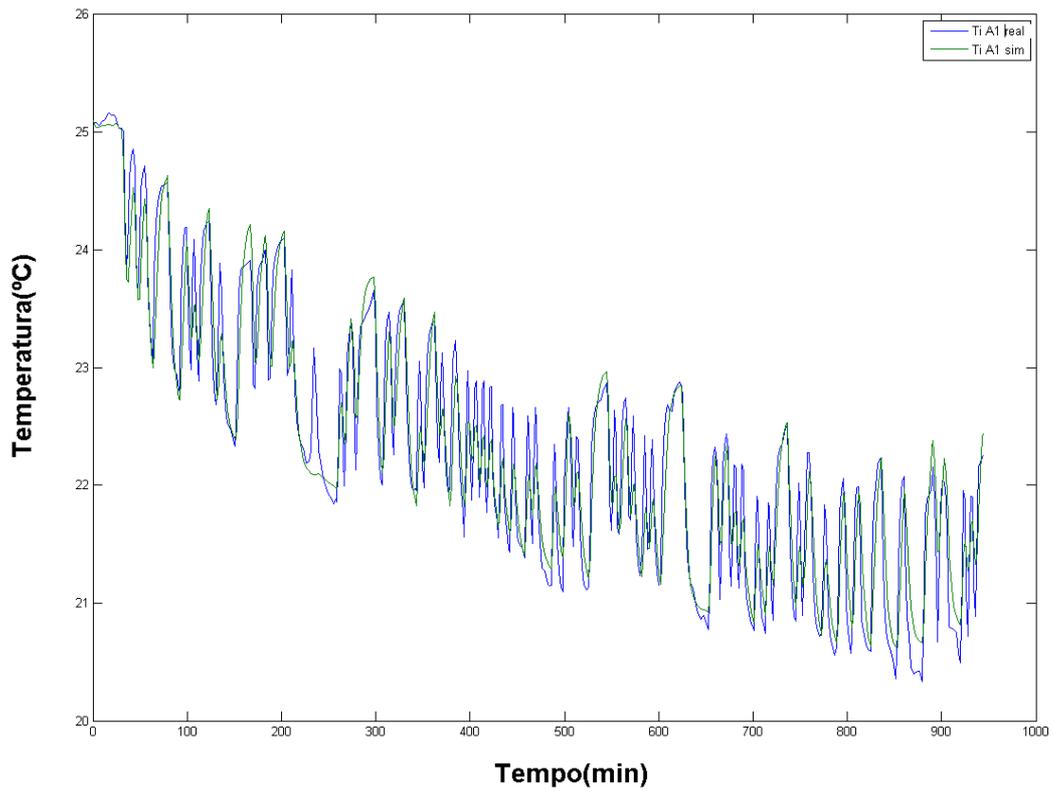
Figura II – Erro na identificação da Sala 1



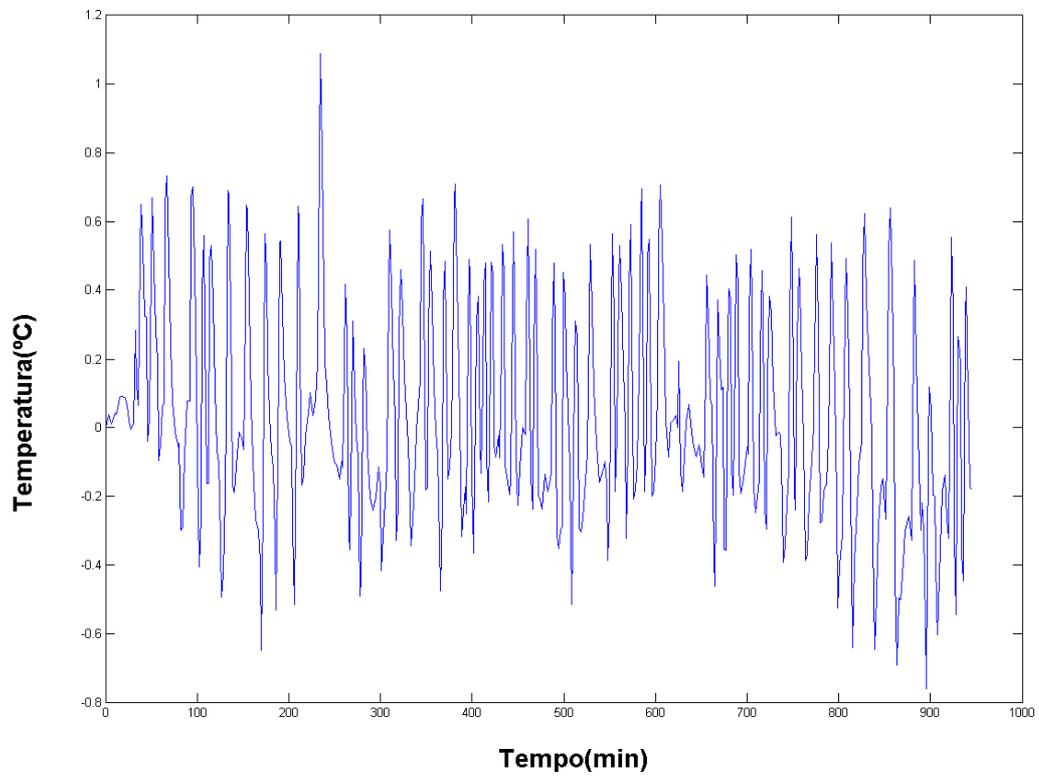
**Figura III – Resultado da validação da Sala 1**



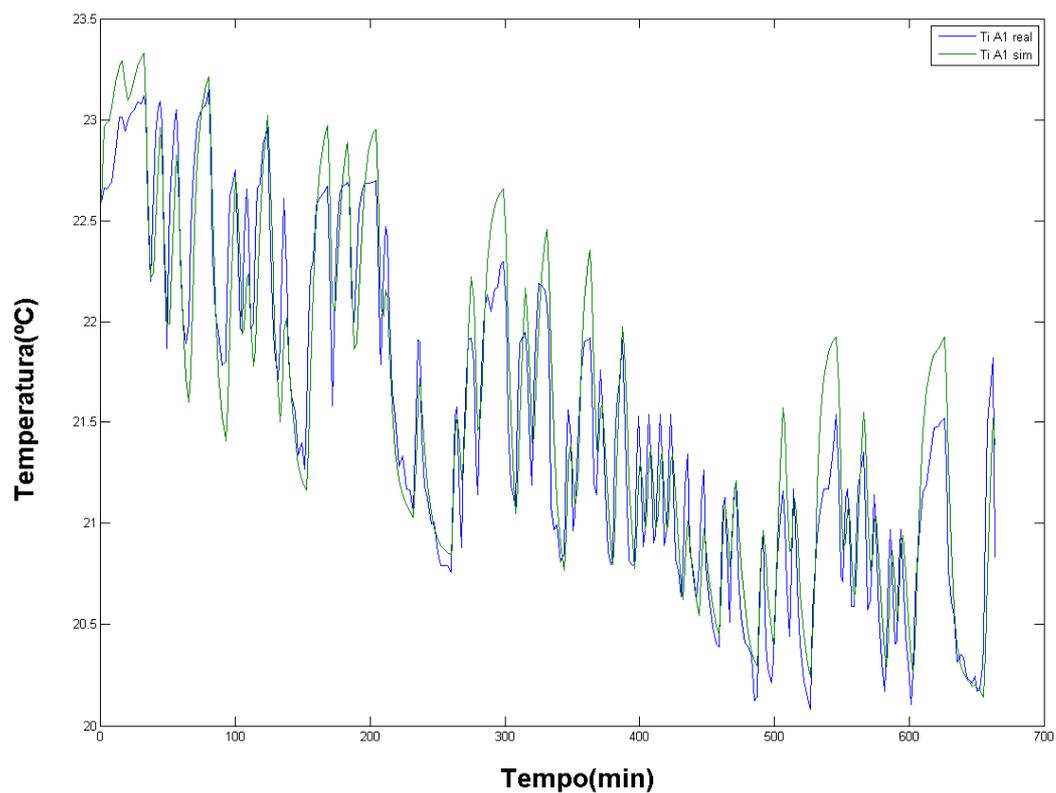
**Figura IV – Erro na validação da Sala 1**



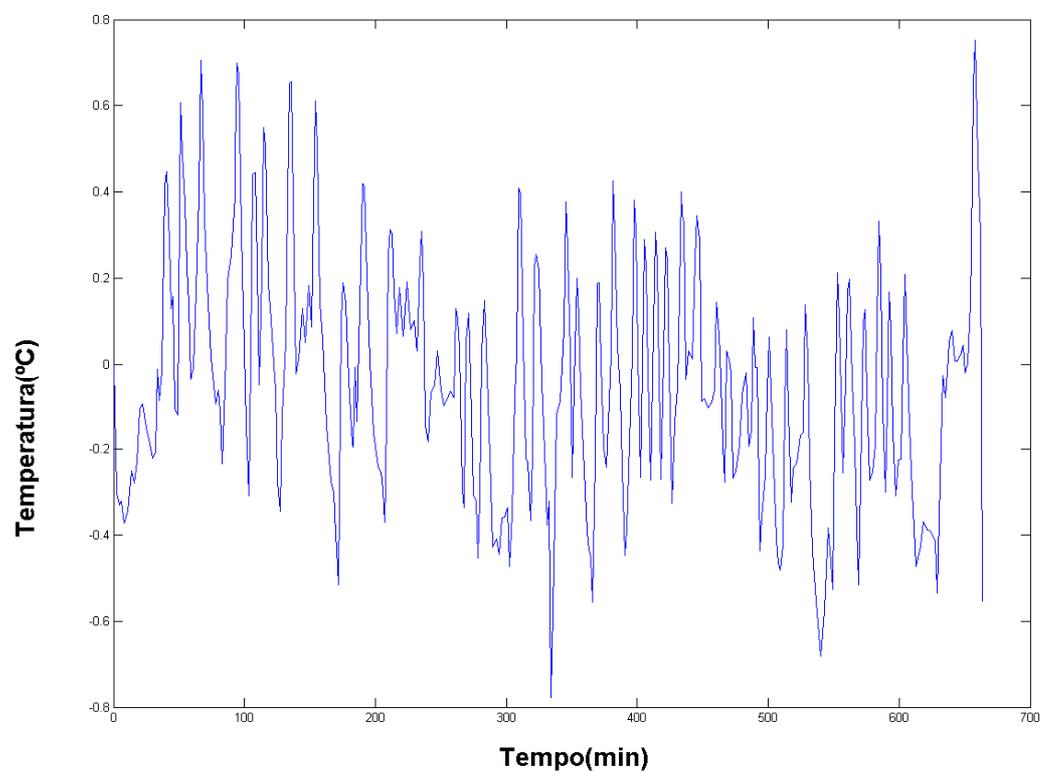
**Figura V – Resultado da identificação da Sala 1 com ar-condicionado**



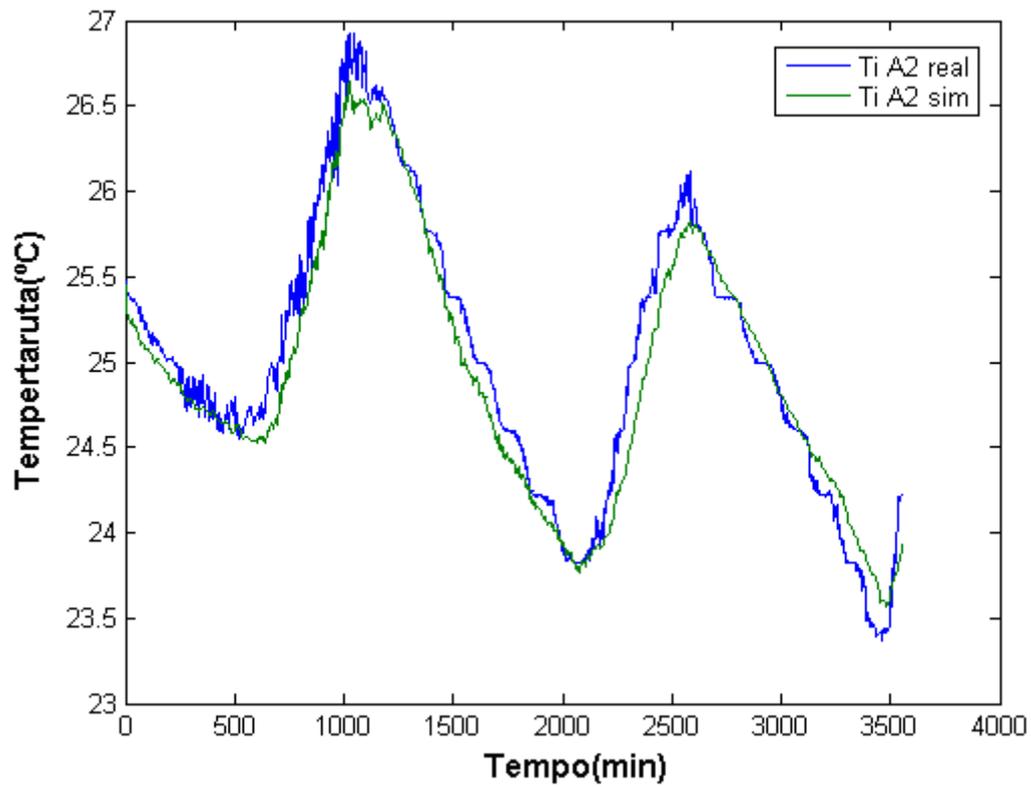
**Figura VI – Erro na identificação da Sala 1 com ar-condicionado**



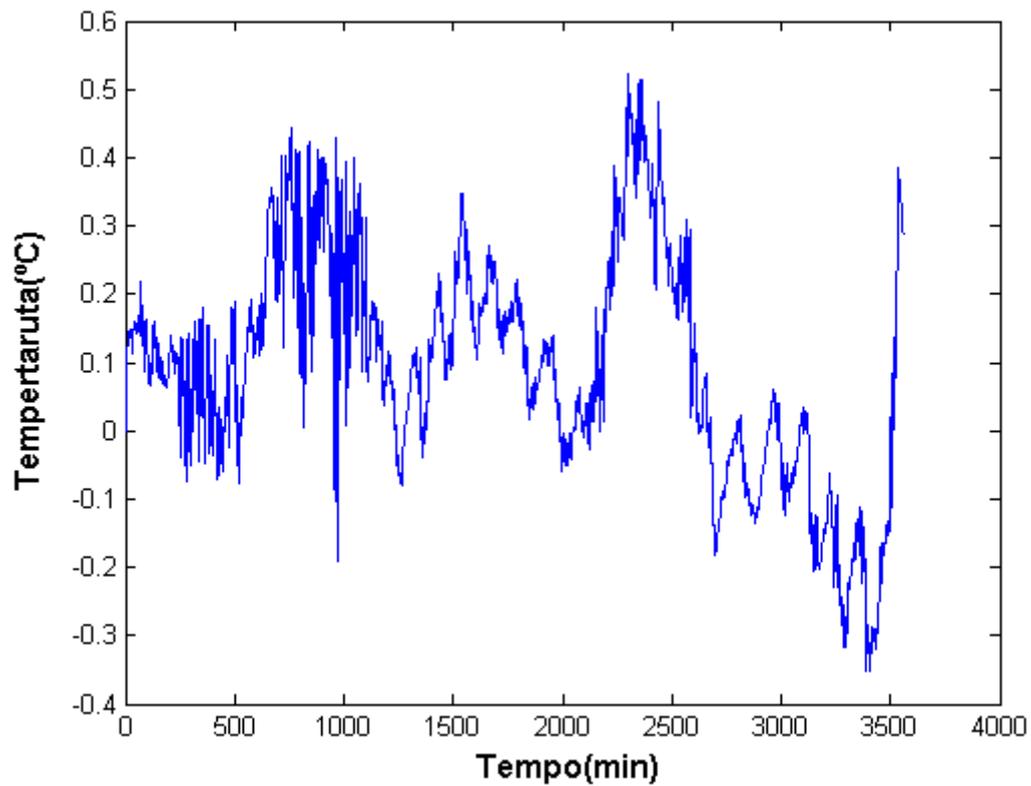
**Figura VII – Resultado da validação da Sala 1 com ar-condicionado**



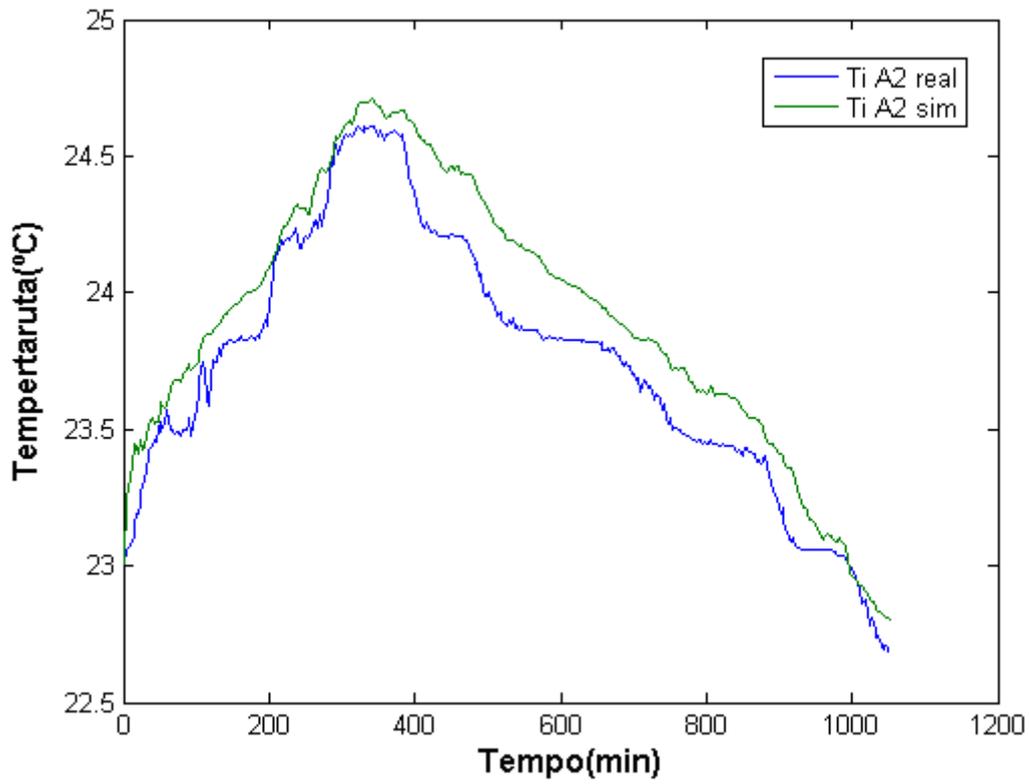
**Figura VIII – Erro na validação da Sala 1 com ar-condicionado**



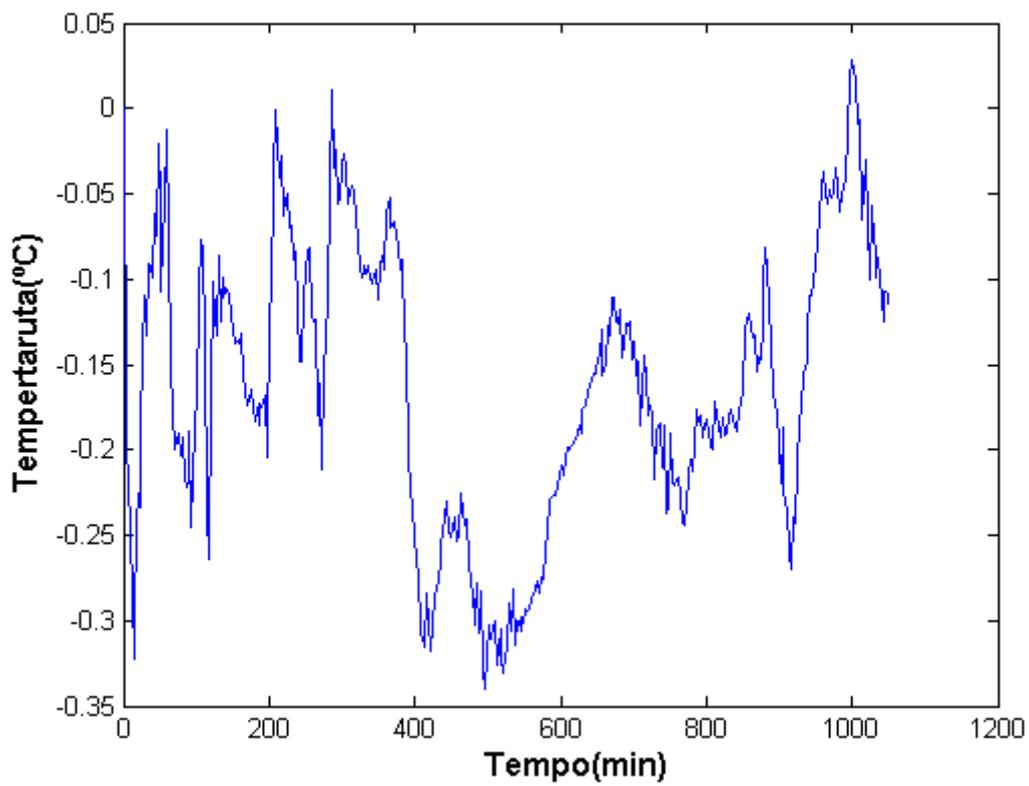
**Figura IX – Resultado da identificação da Sala 2**



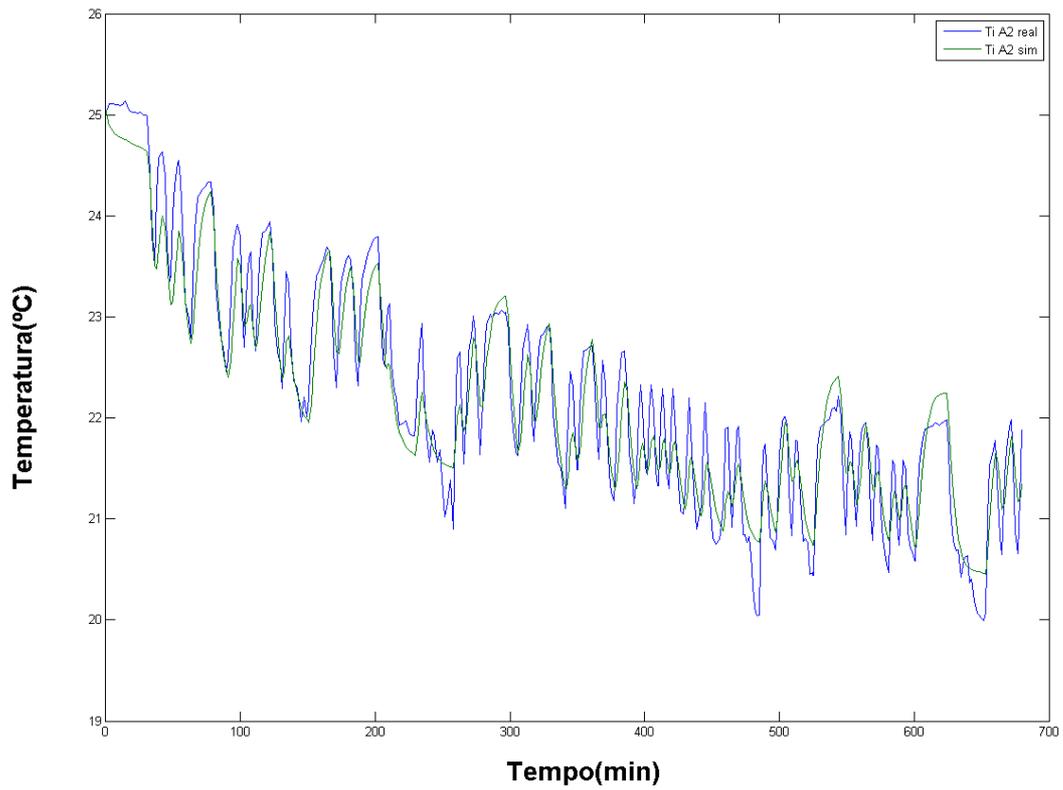
**Figura X – Erro na identificação da Sala 2**



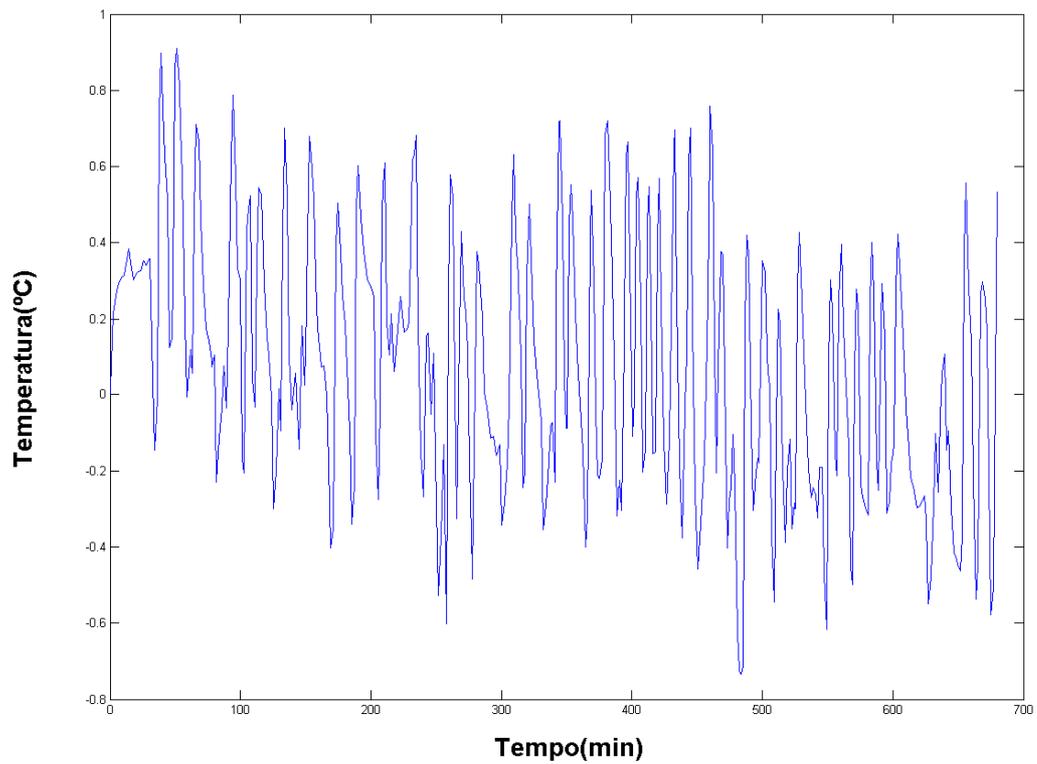
**Figura XI – Resultado da validação da Sala 2**



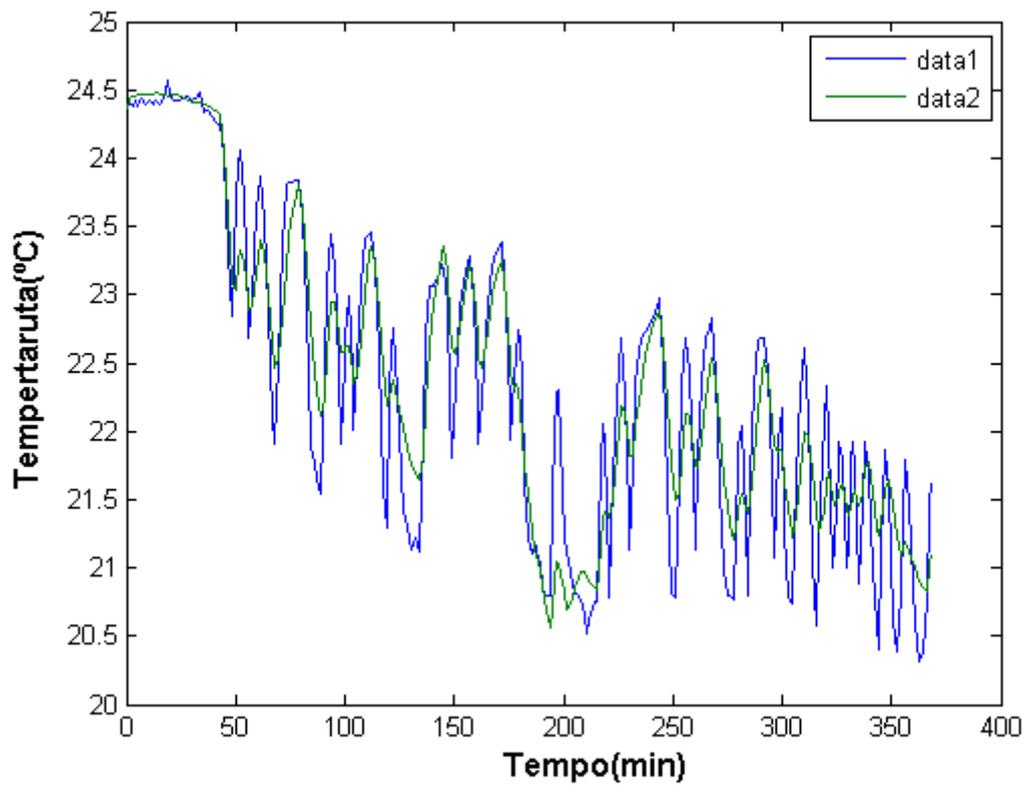
**Figura XII – Erro na validação da Sala 2**



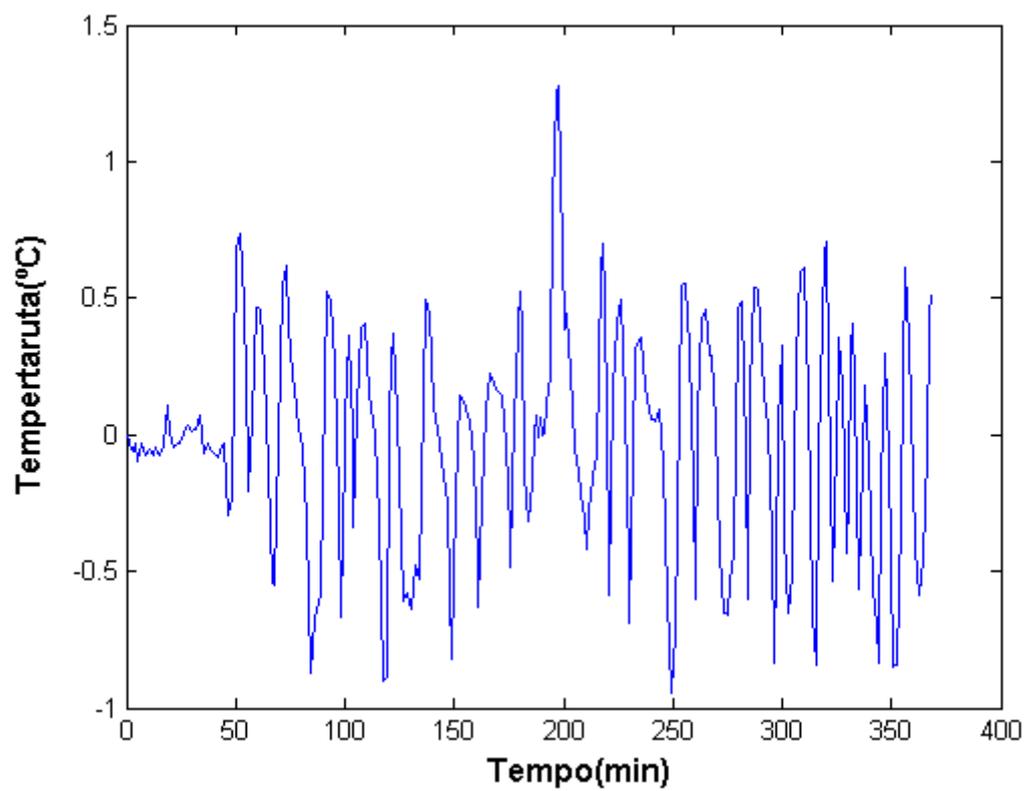
**Figura XII – Resultado da identificação da Sala 2 com ar-condicionado**



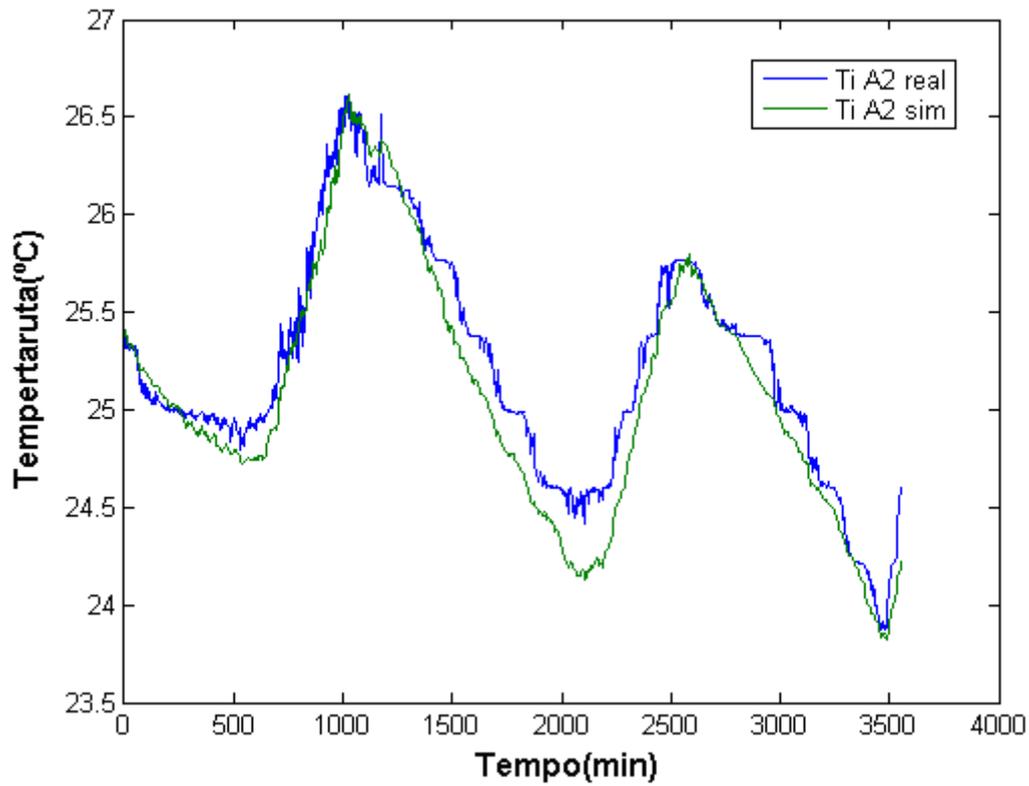
**Figura XIV – Erro na identificação da Sala 2 com ar-condicionado**



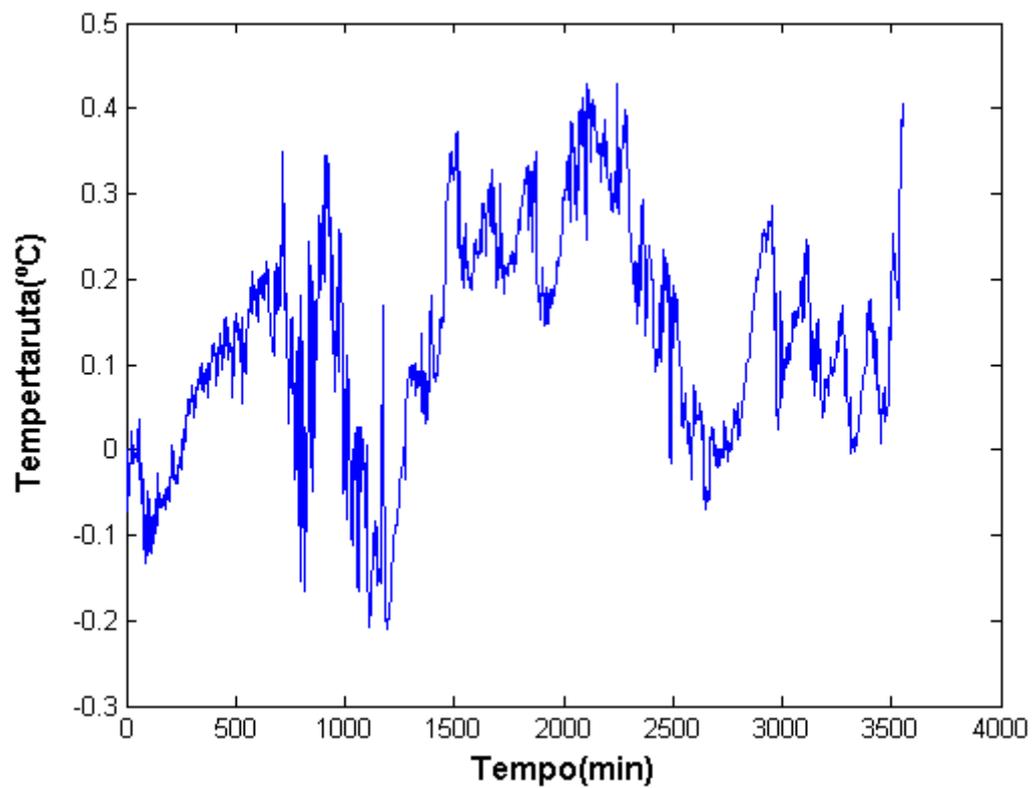
**Figura XV – Resultado da validação da Sala 2 com ar-condicionado**



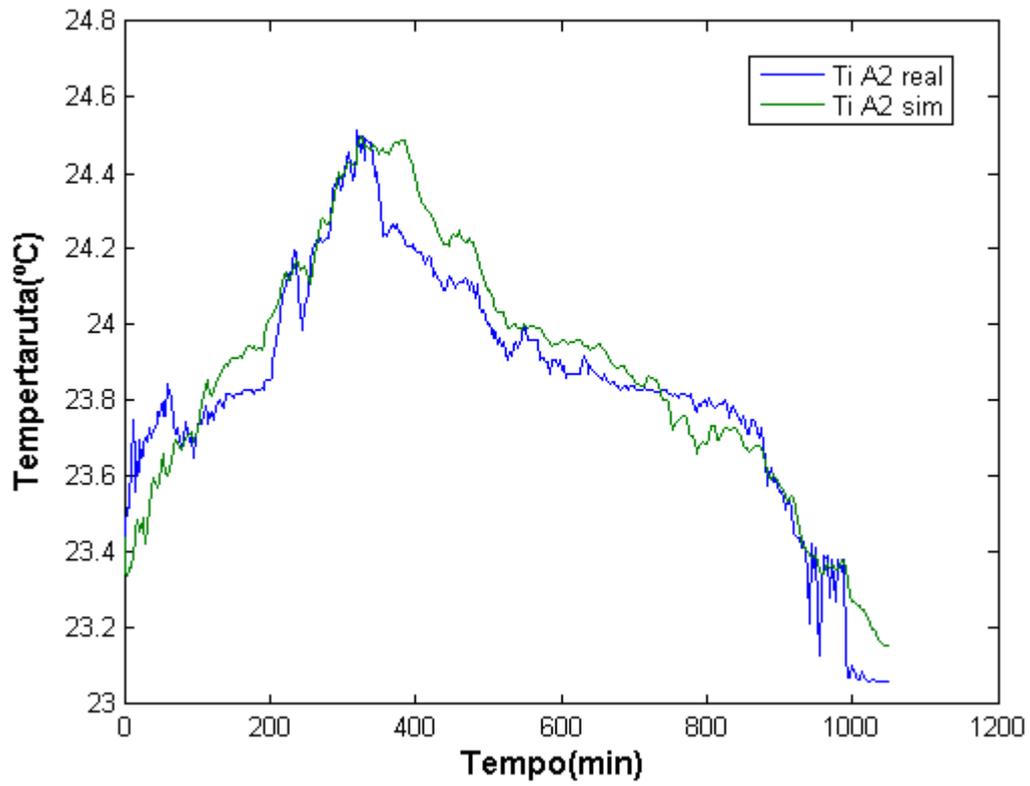
**Figura XVI – Erro na validação da Sala 2 com ar-condicionado**



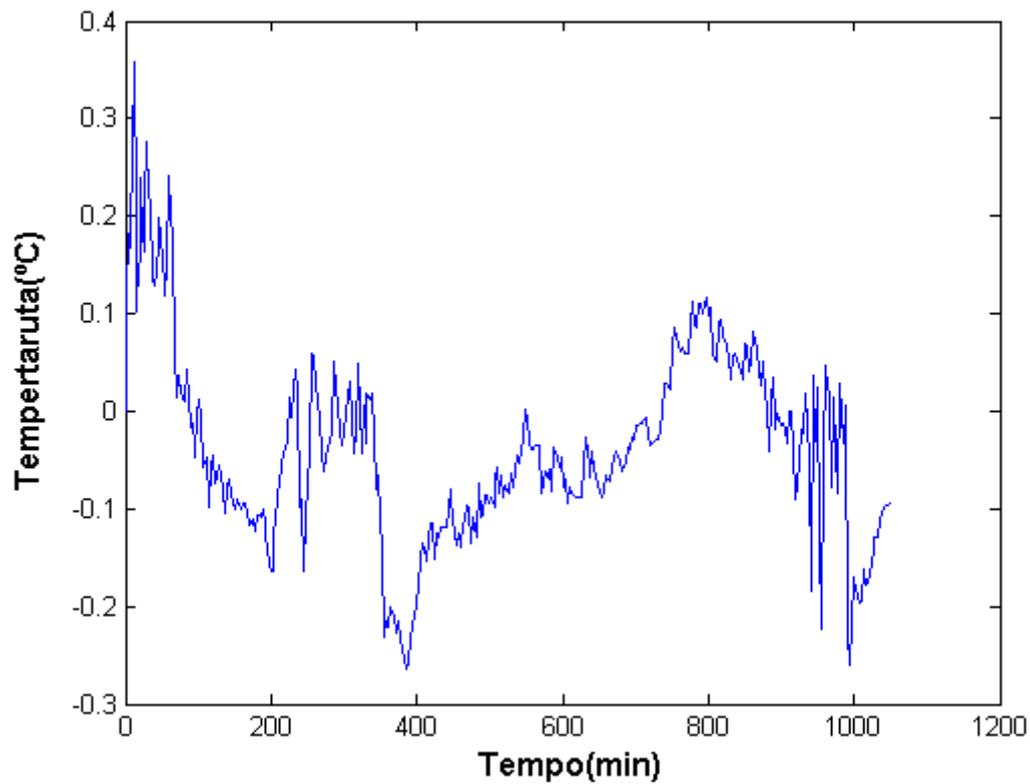
**Figura XVII – Resultado da identificação da Sala 3**



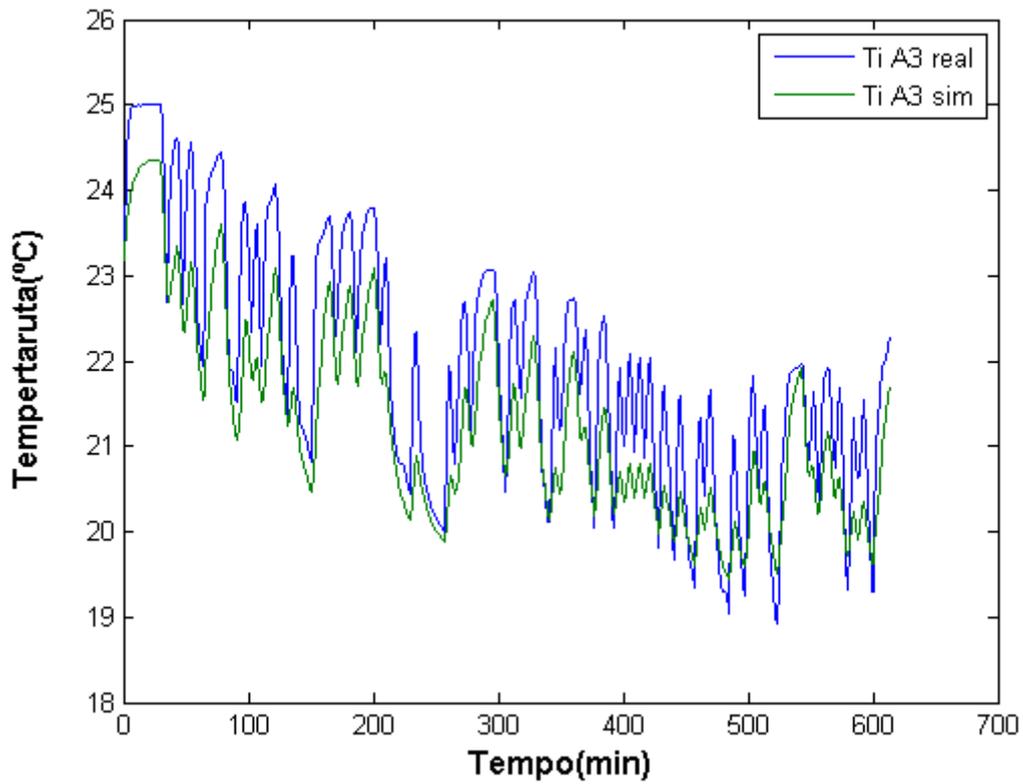
**Figura XVIII – Erro na identificação da Sala 3**



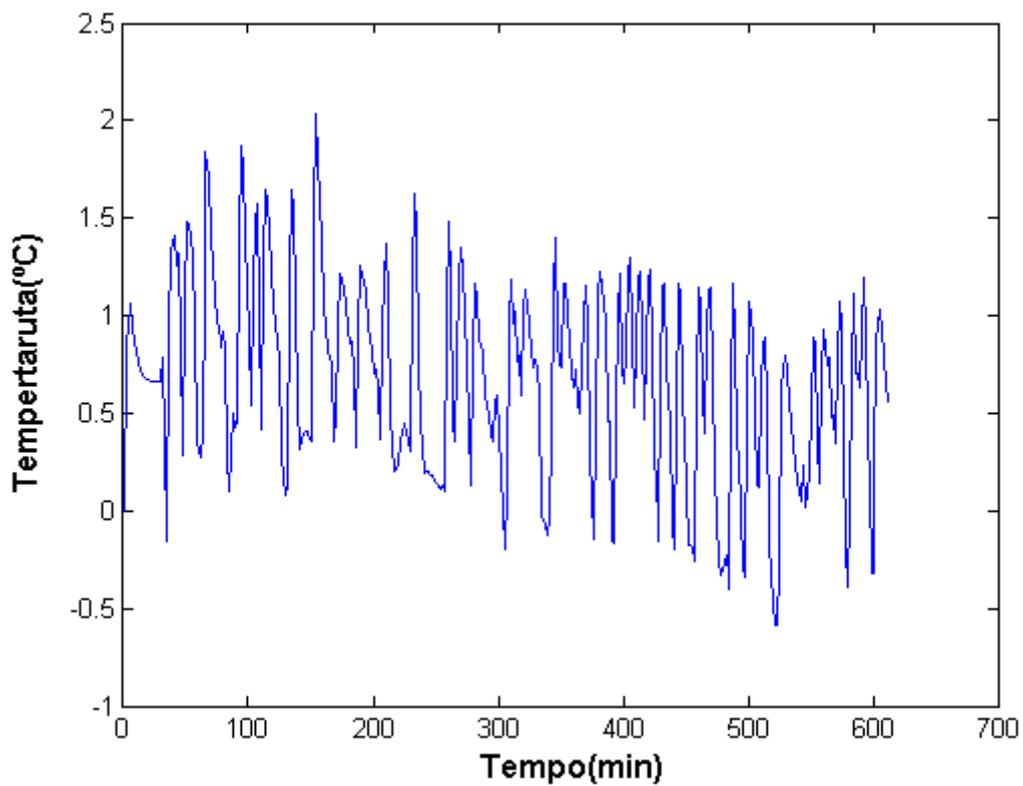
**Figura XIX – Resultado da validação da Sala 3**



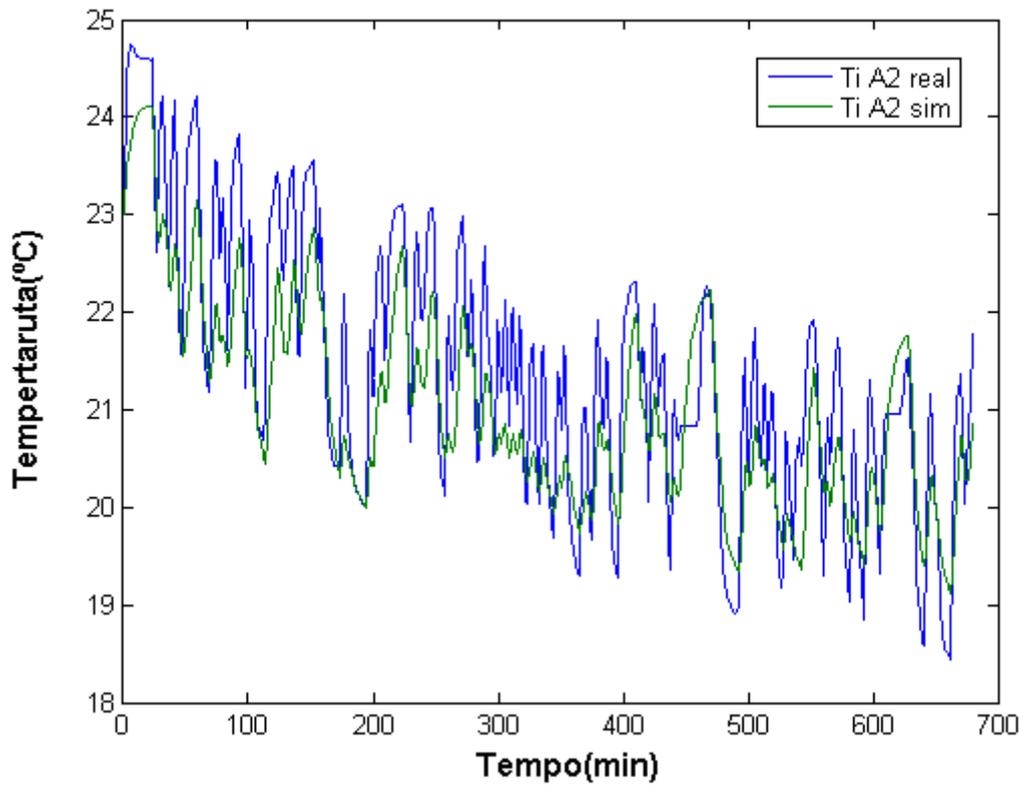
**Figura XX – Erro na validação da Sala 3**



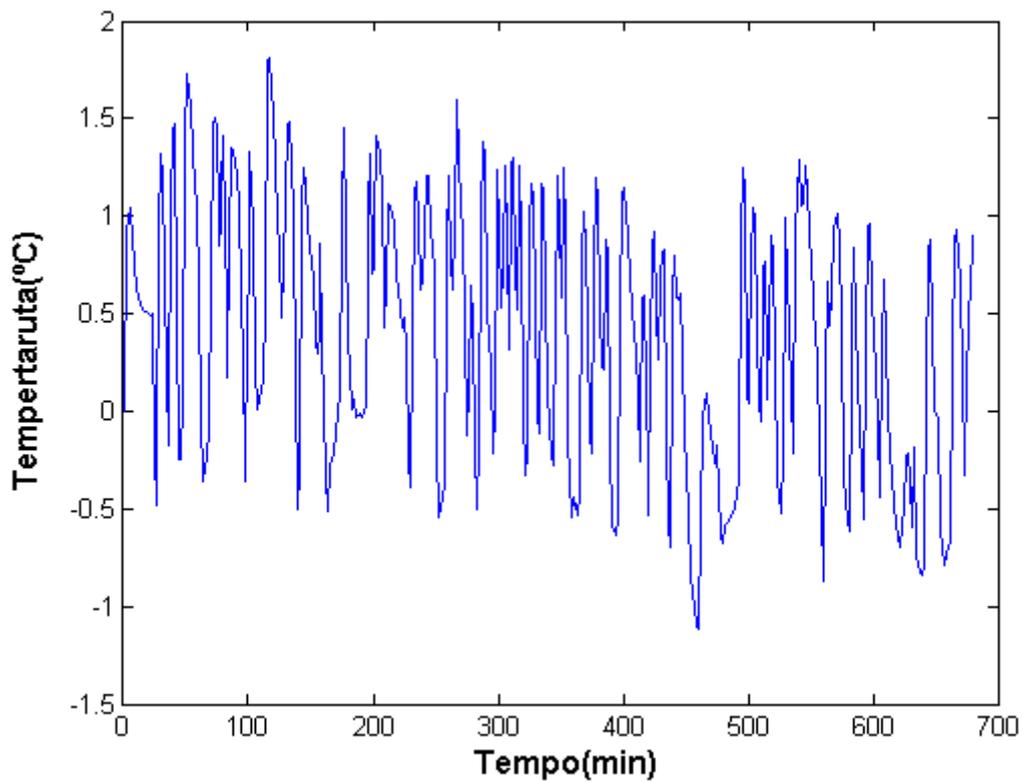
**Figura XXI – Resultado da identificação da Sala 3 com ar-condicionado**



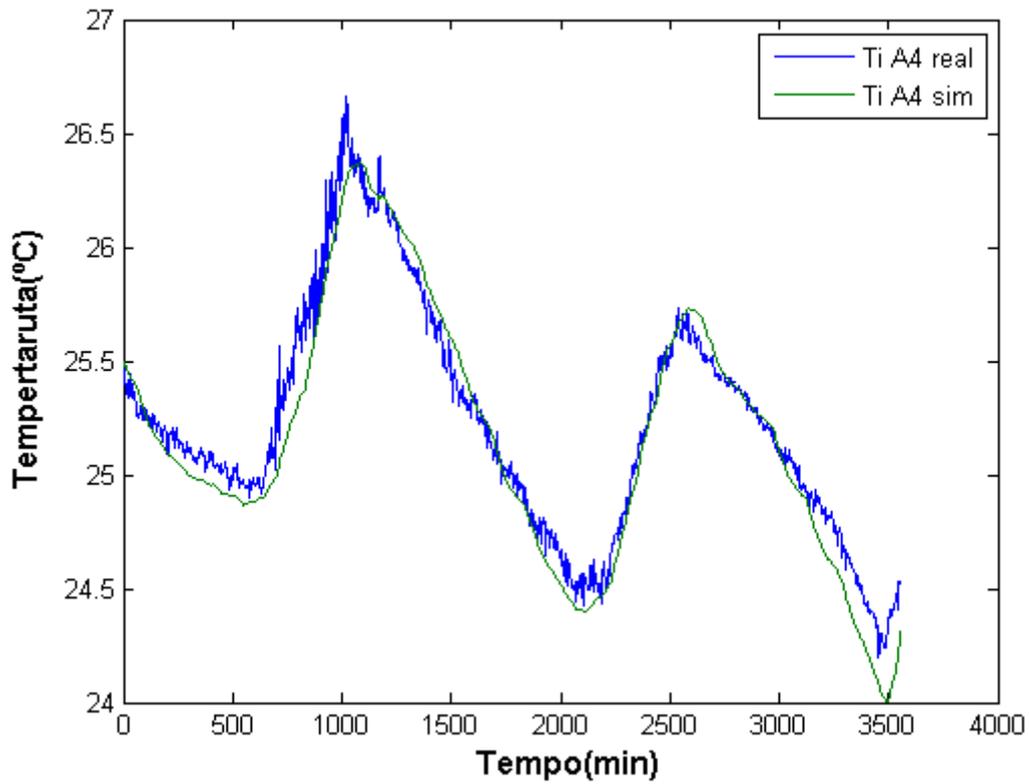
**Figura XXII – Erro na identificação da Sala 3 com ar-condicionado**



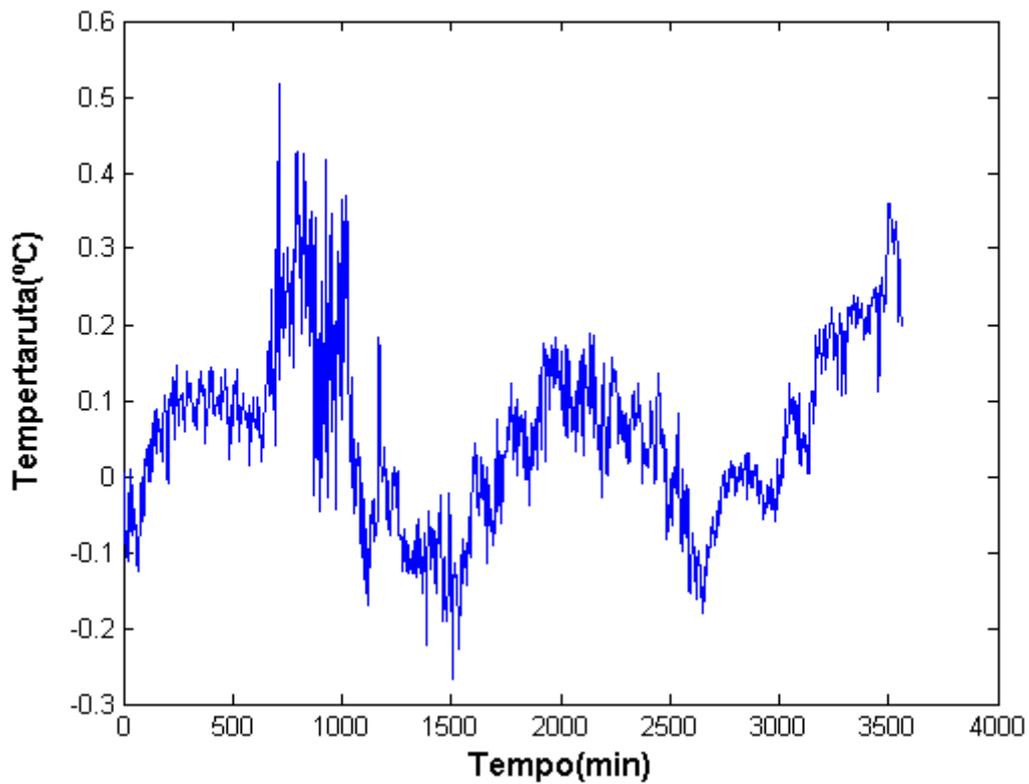
**Figura XXIII – Resultado da validação da Sala 3 com ar-condicionado**



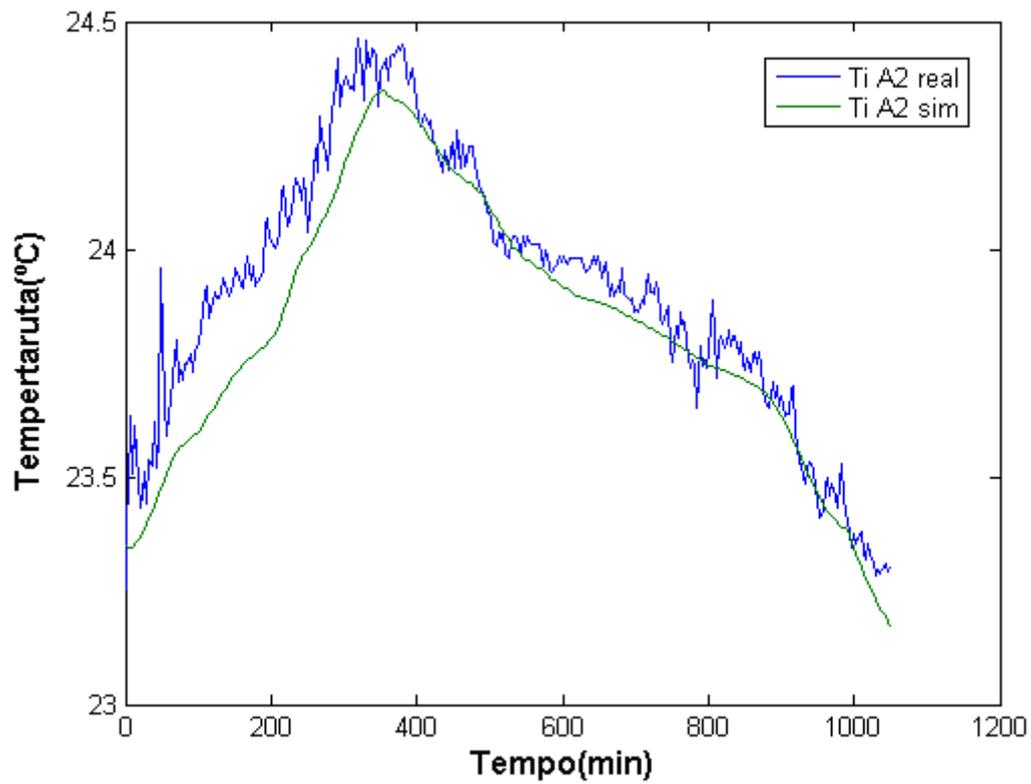
**Figura XXIV – Erro na validação da Sala 3 com ar-condicionado**



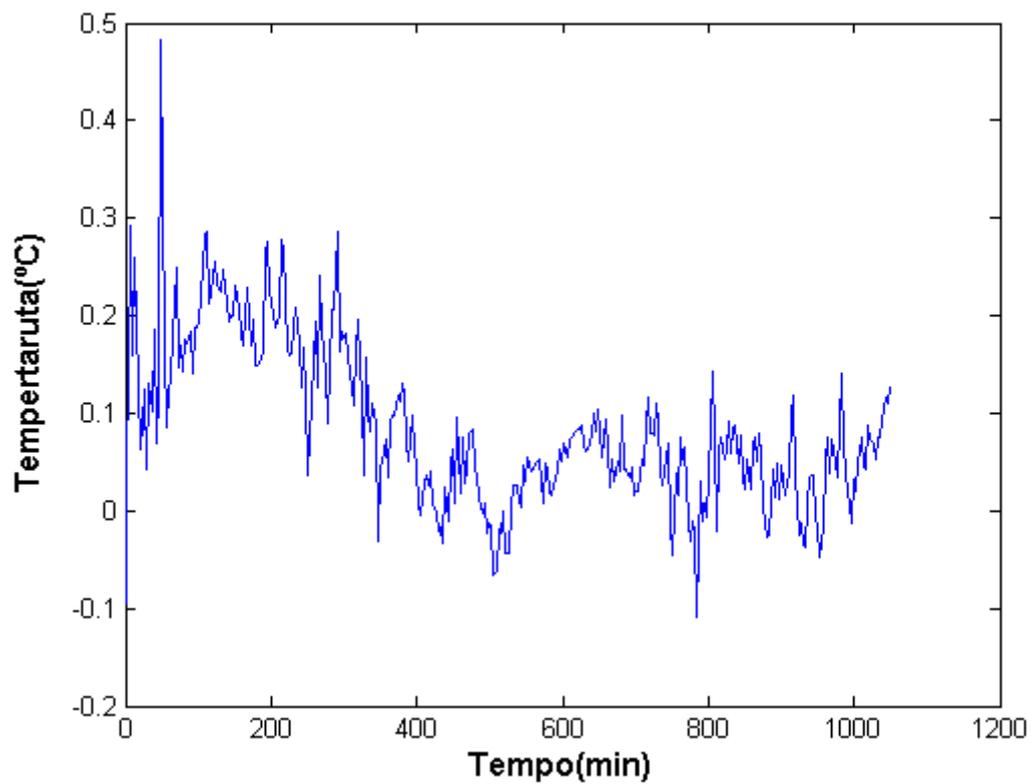
**Figura XXV – Resultado da identificação da Sala 4**



**Figura XXVI – Erro na identificação da Sala 4**



**Figura XXVII – Resultado da validação da Sala 4**



**Figura XXVIII – Erro na validação da Sala 4**