

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

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM AMBIENTES PREDIAIS  
UTILIZANDO REDE SEM FIO ZIGBEE E CONTROLE  
FUZZY**

**PAULO AUGUSTO FERREIRA JÚNIOR**

**ORIENTADOR: Dr. Ing. ADOLFO BAUCHSPIESS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PUBLICAÇÃO: PPGENE.DM – 408/09**

**BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO – 2009**

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

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM AMBIENTES PREDIAIS  
UTILIZANDO REDE SEM FIO ZIGBEE E CONTROLE  
FUZZY**

**PAULO AUGUSTO FERREIRA JÚNIOR**

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

**APROVADA POR:**

---

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

---

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

---

**CARLOS HUMBERTO LLANOS QUINTERO, DOUTOR, ENE/UNB  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, DEZEMBRO DE 2009**

## FICHA CATALOGRÁFICA

FERREIRA JR, PAULO AUGUSTO

Eficiência Energética em Ambientes Prediais Utilizando Rede sem Fio ZigBee e Controle Fuzzy [Distrito Federal] 2009.

xvii, 111 p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

1. Automação Predial

2. Conforto Térmico

3. Controle Fuzzy

4. Racionalização de energia

5. Rede Wireless

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FERREIRA JR., P. A. (2009). Eficiência Energética em Ambientes Prediais Utilizando Rede sem Fio ZigBee e Controle Fuzzy. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM – XXA/09, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Paulo Augusto Ferreira Júnior.

TÍTULO: Eficiência Energética em Ambientes Prediais Utilizando Rede sem Fio ZigBee e Controle Fuzzy.

GRAU: Mestre

ANO: 2009

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

---

Paulo Augusto Ferreira Júnior  
Praça Itapuã Quadra 30 – B Lote 08, Jardim Planalto.  
74.333-015 Goiânia – GO – Brasil.

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer primeiro à minha família pelo apoio e amizade em mais esta etapa de minha vida, em especial, aos meus pais que sempre me incentivaram e me ajudaram na realização de meus projetos.

Ao professor Adolfo Bauchspiess pela paciência, apoio, orientação e conhecimento repassado ao longo de todo o tempo em que trabalhamos juntos.

Ao professor Geovany e aos alunos Felipe Brandão e Bruno Amui pela ajuda durante o desenvolvimento de minha pesquisa e a todos do laboratório LARA. Às pessoas que contribuíram através de seus trabalhos para o desenvolvimento de minha pesquisa, Daniel Bermudes, Márcio Piragibe, Rodrigo Almeida, Pedro Ramos, Yuri Ferreira, Raphael Almeida, Rodrigo Bertuol, Luís Figueiredo, e a todos do laboratório LAVSI. Ao Marco Willian e Rodrigo Such pelo apoio e ajuda. Agradeço ao meu amigo Helger Augusto pela amizade, apoio, ajuda e pelos momentos agradáveis que compartilhamos durante todo este tempo que passamos desenvolvendo nossas pesquisas.

## **RESUMO**

### **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM AMBIENTES PREDIAIS UTILIZANDO REDE SEM FIO ZIGBEE E CONTROLE FUZZY**

**Autor: Paulo Augusto Ferreira Júnior**

**Orientadora: Adolfo Bauchspiess**

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

**Brasília, Dezembro de 2009.**

Inserido em um contexto que visa reduzir o consumo de energia em ambientes prediais sem prejuízo ao conforto térmico, este artigo apresenta resultados sobre a aplicação de tecnologias de comunicação sem fio na automação predial, contribuindo para a automatização e conseqüente uso racional da energia elétrica. A automação sem fio visa, neste trabalho, simplificar o *retrofitting* em prédios já em operação. Foram utilizados aparelhos de ar condicionado do tipo *split*, medidores de energia e sensores de temperatura formando uma rede de sensores e atuadores sem fio ZigBee. Um computador supervisor integra atuadores e sensores. O controle do processo térmico implementado foi realizado utilizando-se módulos MeshBean compostos entre outros dispositivos por um ZigBit que contém um microcontrolador ATmega128 e o *transceiver* RF AT86RF230. Compara-se o controle convencional *on-off* com controle inteligente *fuzzy*, que implementa um sistema especialista baseado em regras. Verificou-se que ambos os controladores foram capazes de manter o conforto térmico, porém, o controlador *fuzzy* conseguiu com menor consumo de energia.

**ABSTRACT**  
**ENERGY SAVING IN BUILDING AUTOMATION USING ZIGBEE WIRELESS**  
**NETWORK AND FUZZY CONTROL**

**Author: Paulo Augusto Ferreira Júnior**

**Supervisor: Adolfo Bauchspiess**

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

**Brasília, December 2009.**

This work objective is results of wireless intelligent building automation focusing on the rational use of energy without prejudice to the thermal comfort. The wireless approach, in this work, could better target retro-fitting of buildings still in operation, a great HVAC market share in Brazil. We used split air conditioners, power meters and temperature sensors, forming a ZigBee wireless network of sensors and actuators. A supervisory computer integrates all measurements and command signals. The thermal regulation of a laboratory environment was implemented using MeshBean modules composite among others by a ZigBit that contains a ATmega128 microcontroller and RF AT86RF230 transceiver. We compared classical on-off and fuzzy control strategies. The fuzzy system, an expert rule based inference machine, could better take care of the different contexts in the building automation. We verified that both controllers were able to maintain the thermal comfort; however, the fuzzy controller attained it with lower energy consumption.

# SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                    | <b>1</b>  |
| <b>1.1 OBJETIVO DO TRABALHO .....</b>                         | <b>2</b>  |
| <b>1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                        | <b>2</b>  |
| <b>1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....</b>                     | <b>4</b>  |
| <b>2. CONTROLE FUZZY .....</b>                                | <b>6</b>  |
| <b>2.1 LÓGICA FUZZY.....</b>                                  | <b>6</b>  |
| <b>2.2 CONTROLADOR FUZZY.....</b>                             | <b>10</b> |
| <b>2.2.1 Fuzzyficação .....</b>                               | <b>11</b> |
| <b>2.2.2 Inferência.....</b>                                  | <b>12</b> |
| <b>2.2.3 Defuzzyficação .....</b>                             | <b>14</b> |
| <b>3. REDES SEM FIO E AUTOMAÇÃO PREDIAL .....</b>             | <b>18</b> |
| <b>3.1 INTRODUÇÃO .....</b>                                   | <b>18</b> |
| <b>3.2 ZIGBEE.....</b>  | <b>19</b> |
| <b>3.2.1 Características gerais .....</b>                     | <b>19</b> |
| <b>3.2.2 Topologia e modo de operação da rede .....</b>       | <b>21</b> |
| <b>3.2.3 Camadas de protocolo .....</b>                       | <b>23</b> |
| <b>3.2.4 Segurança .....</b>                                  | <b>25</b> |
| <b>3.2.5 Kit de Desenvolvimento MeshBean .....</b>            | <b>26</b> |
| <b>3.2.6 Módulo ZigBee ZigBit.....</b>                        | <b>27</b> |
| <b>3.2.7 Bitcloud.....</b>                                    | <b>28</b> |
| <b>3.3 AUTOMAÇÃO PREDIAL .....</b>                            | <b>29</b> |
| <b>3.3.1 INTRODUÇÃO .....</b>                                 | <b>29</b> |
| <b>3.3.2 REDES DE COMUNICAÇÃO.....</b>                        | <b>31</b> |
| <b>3.3.3 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO.....</b>                   | <b>32</b> |
| <b>3.4 SISTEMAS A SEREM AUTOMATIZADOS .....</b>               | <b>33</b> |
| <b>3.4.1 Controle do ar condicionado .....</b>                | <b>34</b> |
| <b>3.4.2 Controle da iluminação .....</b>                     | <b>34</b> |
| <b>3.4.3 Controle do alarme de incêndio .....</b>             | <b>35</b> |
| <b>3.4.4 Sistemas de segurança e controle de acesso .....</b> | <b>36</b> |
| <b>3.5 AUTOMAÇÃO PREDIAL USANDO REDES SEM FIO .....</b>       | <b>37</b> |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>4.</b> | <b>AUTOMAÇÃO DO AR CONDICIONADO.....</b>                        | <b>40</b> |
| 4.1       | DESCRIÇÃO DO AMBIENTE.....                                      | 40        |
| 4.2       | FENÔMENOS ENVOLVIDOS.....                                       | 41        |
| 4.2.1     | Condução.....   | 41        |
| 4.2.2     | Convecção.....  | 42        |
| 4.2.3     | Radiação .....  | 42        |
| 4.3       | HARDWARE .....  | 43        |
| 4.3.1     | Coordenador .....   | 43        |
| 4.3.2     | Módulo de controle.....   | 44        |
| 4.3.3     | Módulo de acionamento .....                                     | 44        |
| 4.3.4     | Módulo sensor .....   | 45        |
| 4.3.5     | Medidor de energia.....   | 45        |
| 4.4       | SOFTWARE SUPERVISÓRIO .....                                     | 45        |
| 4.5       | REDE IMPLEMENTADA .....   | 46        |
| 4.5.1     | Lowpower.c .....  | 47        |
| 4.5.2     | Coordinator.c .....   | 48        |
| 4.5.3     | Enddevice.c.....  | 49        |
| <b>5.</b> | <b>CONTROLE FUZZY DA TEMPERATURA.....</b>                       | <b>51</b> |
| 5.1       | CONTROLE ON-OFF .....   | 52        |
| 5.2       | CONTROLE FUZZY .....  | 52        |
| 5.2.1     | Função de fuzzyficação para a variável de entrada erro .....    | 54        |
| 5.2.2     | Função de fuzzyficação para a variável de entrada setpoint..... | 55        |
| 5.2.3     | Regras de inferência para o controle da temperatura .....       | 55        |
| 5.2.4     | Função de defuzzyficação para a variável de saída pwm .....     | 56        |
| <b>6.</b> | <b>RESULTADOS .....</b>   | <b>60</b> |
| 6.1       | MODELO DE CONTROLE SIMULINK .....                               | 60        |
| 6.2       | AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS.....                                   | 61        |
| 6.2.1     | Primeira etapa.....   | 61        |
| 6.2.1.1   | Primeiro experimento .....                                      | 61        |
| 6.2.1.2   | Segundo experimento .....                                       | 64        |
| 6.2.2     | Segunda etapa .....   | 67        |
| 6.2.2.1   | Primeiro experimento .....                                      | 67        |

|   |           |
|---|-----------|
| 6.2.2.2 Segundo experimento .....   | 68        |
| <b>7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS .....</b>                                | <b>71</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>  | <b>74</b> |
| <b>APÊNDICES</b>  |           |
| <b>APÊNDICE A – SBAI (SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE).....</b>      | <b>78</b> |
| <b>APÊNDICE B – COBEM (INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING).....</b> | <b>86</b> |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1.1 - Condições de conforto térmico. ....                         | 3  |
| Tabela 2.1 - Aplicações da Lógica <i>Fuzzy</i> .....                     | 7  |
| Tabela 2.2 - Tabela de regras.....                                       | 13 |
| Tabela 3.1 – Comparação de tecnologias sem fio .....                     | 19 |
| Tabela 3.2 - Tabela de funcionalidades dos dispositivos ZigBee .....     | 21 |
| Tabela 3.3 – Redes ZigBee: dispositivos lógicos e suas funções.....      | 21 |
| Tabela 3.4 – Conjunto de segurança suportado pelo IEEE 802.15.4. ....    | 25 |
| Tabela 3.5 - Características do módulo ZigBit.....                       | 28 |
| Tabela 4.1 - Configuração de endereços dos módulos da rede. ....         | 47 |
| Tabela 4.2 - Sinais de controle recebidos pela UART no coordenador ..... | 49 |
| Tabela 5.1 - Tabela de regras <i>fuzzy</i> .....                         | 55 |
| Tabela 5.2 - Consumo total do sistema.....                               | 58 |
| Tabela 6.1 - Consumo total do sistema no primeiro experimento.....       | 64 |
| Tabela 6.2 - Consumo total do sistema no segundo experimento. ....       | 66 |
| Tabela 6.3 - Consumo total do sistema no primeiro experimento.....       | 68 |
| Tabela 6.4 - Consumo total do sistema no segundo experimento. ....       | 70 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 - Escala de sensação térmica usada pelo índice PMV.....   | 3  |
| Figura 2.1 - Função de pertinência tipo triangular .....   | 8  |
| Figura 2.2 - Função de pertinência tipo trapezoidal. ....  | 9  |
| Figura 2.3 – Diagrama de blocos das etapas do Controle <i>Fuzzy</i> .....                                    | 10 |
| Figura 2.4 – Diagrama de blocos das etapas de processamento <i>fuzzy</i> . ....                              | 10 |
| Figura 2.5 - Gráfico da função de pertinência da variável de saída PWM.....                                  | 13 |
| Figura 2.6 – Representação gráfica do método de <i>defuzzificação</i> pelo método do primeiro máximo .....   | 15 |
| Figura 2.7 – Representação gráfica do método de <i>defuzzificação</i> pelo método do centróide .....         | 15 |
| Figura 2.8 – Representação gráfica do método de <i>defuzzificação</i> pelo método da média dos máximos ..... | 16 |
| Figura 2.9 – Ilustração da saída do PWM para erro = -1. ....   | 17 |
| Figura 3.1 – Comparação entre tecnologias <i>wireless</i> .....  | 19 |
| Figura 3.2 – Topologia estrela.....  | 22 |
| Figura 3.3 – Topologia malha.....  | 22 |
| Figura 3.4 – Topologia árvore .....  | 23 |
| Figura 3.5 – Modelo de camadas da pilha do protocolo ZigBee.....   | 24 |
| Figura 3.6 – Kit de desenvolvimento MeshBean2 .....  | 26 |
| Figura 3.7 - Módulo ZigBit .....   | 27 |
| Figura 3.8 - Arquitetura da pilha do BitCloud.....   | 28 |
| Figura 3.9 - Arquitetura de um Sistema de Supervisão e Controle .....  | 30 |
| Figura 3.10 – Topologia de rede distribuída.....   | 32 |
| Figura 3.11 – Sistema de ar condicionado.....  | 34 |
| Figura 3.12 – Sistema de controle de iluminação de um ambiente .....   | 35 |
| Figura 3.13 – Sistema de alarme contra incêndio ambiente .....   | 36 |
| Figura 3.14 – Sistema biométrico de análise de impressão digital.....  | 37 |
| Figura 3.15 - Uso de sensores e atuadores wireless .....   | 38 |
| Figura 4.1 - Sistema térmico.....  | 40 |
| Figura 4.2 - Módulo coordenador.....   | 44 |
| Figura 4.3 - Circuito de acionamento. ....   | 44 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.4 - Rede configurada .....  | 46 |
| Figura 4.5 - Diagrama de estados do aplicativo embarcado.....                          | 47 |
| Figura 4.6 - Diagrama de estado do dispositivo configurado como <i>enddevice</i> ..... | 49 |
| Figura 5.1 - Relação entre o PMV e o PPD.....  | 51 |
| Figura 5.2 - Controlador <i>fuzzy</i> implementado. ....                               | 53 |
| Figura 5.3 - Funções de pertinência da variável de entrada erro. ....                  | 54 |
| Figura 5.4 - Funções de pertinência da variável de entrada setpoint.....               | 55 |
| Figura 5.5 - Visualização das regras do controlador <i>fuzzy</i> . ....                | 56 |
| Figura 5.6 - Funções de pertinência da variável de saída pwm. ....                     | 56 |
| Figura 5.7 - Relação entre erro, referência e saída pwm. ....                          | 57 |
| Figura 6.1 - Modelo implementado para controlador <i>fuzzy</i> .....                   | 60 |
| Figura 6.2 - Ambiente controlado.....  | 61 |
| Figura 6.3 - Controle <i>on-off</i> – primeiro experimento. ....                       | 62 |
| Figura 6.4 - Status atuador – primeiro experimento.....                                | 62 |
| Figura 6.5 - Controle <i>fuzzy</i> – primeiro experimento.....                         | 63 |
| Figura 6.6 - Status atuador – primeiro experimento.....                                | 63 |
| Figura 6.7 - Controle <i>on-off</i> – segundo experimento. ....                        | 64 |
| Figura 6.8 - Status atuador – segundo experimento. ....                                | 65 |
| Figura 6.9 - Controle <i>fuzzy</i> – segundo experimento. ....                         | 65 |
| Figura 6.10 - Status atuador – segundo experimento. ....                               | 66 |
| Figura 6.11 - Controle <i>on-off</i> – primeiro experimento. ....                      | 67 |
| Figura 6.12 - Controle <i>fuzzy</i> – primeiro experimento.....                        | 68 |
| Figura 6.13 - Controle <i>on-off</i> – segundo experimento.....                        | 69 |
| Figura 6.14 - Controle <i>fuzzy</i> – segundo experimento.....                         | 69 |

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMECLATURA E ABREVIACÕES

|           |   |
|-----------|---|
| A         | Área de superfície  |
| A/D       | Analógico/digital   |
| AES       | Advanced Encryption Standard  |
| API       | Application Programming Interface   |
| APL       | Application Layer   |
| APS       | Application Support Sublayer  |
| ASHRAE    | American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers |
| BACNET    | Building Automation and Control Network                                   |
| BTU/h     | British Thermal Unity   |
| CLP       | Controlador Lógico Programável  |
| COBEM     | International Congress of Mechanical Engineering                          |
| CSMA – CA | Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance                       |
| F         | Fator de configuração   |
| FFD       | Full Function Device  |
| h         | Coefficiente de transferência de calor                                    |
| HVAC      | Heating, Ventilating, and Air-Conditioning                                |
| IBI       | Intelligent Buildings Institute   |
| IEEE      | Institute of Electrical and Electronics Engineers                         |
| ISM       | Industrial, Scientific and Medical  |
| k         | Condutividade térmica   |
| LAN       | Local Area Network  |
| MAC       | Media Access Control  |
| NWK       | Network Layer   |
| PHY       | Physical Layer  |
| PMV       | Predicted Mean Vote   |
| PPD       | Predicted Percentage Dissatisfied   |
| PWM       | Pulse Width Modulation  |
| RF        | Rádiofrequência   |
| RFD       | Reduced Function Device   |
| SBAI      | Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente                              |

|                      |   |
|----------------------|---|
| SCADA                | Supervisory Control and Data Acquisition    |
| $\theta$             | Temperatura absoluta                        |
| WPAN                 | Wireless Personal Área Network              |
| WLAN                 | Wireless Local Área Network                 |
| WMAN                 | Wireless Metropolitan Área Network          |
| WWAN                 | Wireless wide Área Network                  |
| UART                 | Universal Asynchronous Receiver/Transmitter |
| USB                  | Universal Serial Bus                        |
| ZDO                  | ZigBee Device Object                        |
| $\dot{q}$            | Taxa de transferência de calor              |
| $\frac{d\theta}{dx}$ | Gradiente térmico                           |
| $\epsilon$           | Emitância                                   |
| $\Delta\theta$       | Diferença de temperatura                    |
| $\sigma$             | Constante de Boltzmann                      |
| $\mu_A(x)$           | Função de pertinência                       |

# 1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica ocupa um lugar de destaque na matriz energética brasileira e com o consumo crescente da demanda de energia, aliado à falta de investimentos no setor, vem diminuindo a diferença entre a demanda e a oferta, levando concessionárias, pesquisadores entre outros a buscar soluções para o problema.

A busca de soluções para o problema abrange, entre outras alternativas, a expansão da potência elétrica instalada, importação de gás natural e energia elétrica de outros países e a implementação de campanhas de combate ao desperdício de energia. Além destas medidas, as concessionárias também promovem programas para encorajar a mudança dos hábitos de seus clientes quanto ao uso da energia, estimulando o uso mais eficiente da mesma.

Mas, a idéia de eficiência não deve ser associada à falta de conforto, pois, bons níveis de eficiência podem ser atingidos tomando medidas simples, como adquirir equipamentos com selo PROCEL, manter portas e janelas fechadas quando o aparelho de ar condicionado estiver funcionando, aproveitar a luz natural para iluminação de ambientes, entre outras. A intenção destas medidas não é privar as pessoas do conforto, mas sim manter o mesmo nível de conforto com o menor gasto de energia possível (Borduni, 2006).

Em edificações, verifica-se que a maioria dos gastos energéticos deve-se à utilização de aparelhos de ar condicionado. Cada vez mais acessíveis, os aparelhos de ar condicionado estão presentes tanto em residências, como em ambientes de trabalho e sua utilização visa garantir uma temperatura ambiente agradável, favorecendo conforto, produtividade, saúde e bem estar.

Segundo Bauchspiess estima-se que o consumo de energia de aparelhos de ar condicionado para manutenção do conforto térmico represente de 40% a 70% do consumo total do prédio (Bauchspiess et al 2004). O projeto arquitetônico inadequado e instalações de refrigeração não otimizadas, sem automação, muitas vezes levam ao desperdício de energia. Um exemplo: na maioria dos ambientes prediais com aparelhos de ar-condicionado de janela ocorre o *over-cooling*, i.é, nas horas menos quentes do dia a temperatura ambiente cai abaixo da temperatura de conforto. Afinal, não se quer ajustar o termostato de cada

aparelho ao longo do dia. Esta energia para refrigerar além do ponto de conforto é claramente um desperdício de energia.

A automação predial desenvolve mecanismos eficientes que podem evitar o consumo desnecessário de energia. Estes mecanismos se baseiam em um sistema de controle em malha aberta, constituído de uma rede de sensores e atuadores integrados por um sistema supervisorio.

Existem projetos na área de racionalização de energia e conforto térmico utilizando desde controladores PID até controladores neurais, sendo também verificado a utilização de controle *fuzzy* por alguns autores (Bauchsiess et al 2004; Baús et al 2008; Faiyas et al 2005; Haissig, 1999; Hamdi and Lachiver, 1998; Riad et al 2007).

## **1.1 OBJETIVO DO TRABALHO**

A proposta deste trabalho é desenvolver um sistema de controle inteligente para os aparelhos de ar condicionado, incorporando uma rede de sensores e atuadores sem fio ZigBee onde o software supervisorio coordenará o fluxo de dados entre os módulos sensores e os módulos de controle, e desenvolver ferramentas que, baseadas no uso de determinadas técnicas de controle, e.g controle *fuzzy*, tratem informações não usadas geralmente em prédios comuns. O processamento integrado destas informações tem o potencial de reduzir o consumo de energia, mantendo o conforto térmico do ambiente.

## **1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Na área de conforto térmico, (Lamberts e Xavier, 2002), (Ruas, 1999) e (Gallo e Ribeiro, 2007) apresentam um embasamento teórico sobre o assunto e fazem uma comparação das diferentes normas de conforto térmico, e. g. norma ISO 7730 demonstrando através de equações matemáticas o cálculo do índice de conforto térmico (PMV) e da percentagem de pessoas insatisfeitas (PPD).

Para determinação do índice PMV deve-se levar em consideração variáveis físicas (temperatura do ar, velocidade do ar, temperatura média radiante e umidade relativa) e

variáveis pessoais (isolamento da vestimenta e nível de atividade), obtendo-se através da mesma um escala de sensação térmica que varia entre -3 a 3, conforme figura 1.1.

**PMV - Nível de Conforto**

- 3 Muito Quente**
- 2 Quente**
- 1 Morno**
- 0 Confortável**
- 1 Levemente Frio**
- 2 Frio**
- 3 Muito Frio**

Figura 1.1 - Escala de sensação térmica usada pelo índice PMV (Gallo e Ribeiro, 2007).

Para o controle da temperatura foi levada em consideração a norma ASHRAE que estabelece as condições de conforto para determinada estação do ano, conforme apresentado na tabela 1.1 abaixo. Existem projetos de controle baseado na sensação humana de conforto térmico utilizando desde controladores *on-off* (Gallo e Ribeiro, 2007; Queiroz e Azevedo, 2009; Martin et al 2002) até controladores *fuzzy* (Baus et al 2008; Hamdi and Lachiver, 1998; Mirinejad et al 2008, Yonezawa, K. et al 2000).

Tabela 1.1 - Condições de conforto térmico (ASHRAE Standard 55).

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

Além dos projetos de controle baseados na sensação humana de conforto térmico utilizando controladores *fuzzy*, foram desenvolvidos a partir do trabalho seminal de Zadeh outros trabalhos sobre lógica *fuzzy* em que se buscou mostrar os princípios e idéias que

fundamentam a aplicação da mesma em sistemas inteligentes, controle de processo, entre outros (Gomide e Dudwin, 1994; Kohagura, 2007; Sandri e Correa, 1999).

Alguns autores utilizaram controle *fuzzy* para o controle da temperatura (Bilobrovec, 2005; Becker et al 1998; Rojas et al 2006; Barg, 2002) conseguindo reduzir o consumo de energia elétrica dos aparelhos de ar condicionado em até 30% (Ari et al 2006, Huang et al 2006; Santos, 2005; Urzedá, 2006).

A automação predial e residencial trouxe uma maior segurança e conforto a seus usuários e com menor consumo de energia, fazendo surgir a idéia de edifício inteligente. Como a grande maioria dos edifícios não está preparada para automação e os custos para a implantação da mesma podem ser elevados, os sistemas sem fio “*wireless*” se tornaram uma opção bastante interessante e que tem crescido bastante por apresentar entre outras características, as seguintes vantagens: fácil instalação, não utiliza ligação física (cabo elétrico) e permite uma mobilidade das unidades da rede. Em vista disto surgiram trabalhos (Chung e Oh, 2006; Mateus Filho e Dias, 2008; Mignaco, 2005; Monteiro, 2006; Oliveira et al 2007; Silva, 2007) apresentando os diferentes tipos de tecnologias *wireless*, sendo apresentado nos mesmos as vantagens, desvantagens e aplicações de cada uma das diferentes tecnologias *wireless*.

### **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

O trabalho está dividido em sete capítulos sendo o primeiro esta introdução.

No segundo capítulo serão apresentados aspectos teóricos sobre a lógica *fuzzy*, onde teremos um breve histórico a respeito da mesma e mostraremos suas principais características, bem como o funcionamento do raciocínio *fuzzy* e suas aplicações.

No terceiro capítulo serão apresentados os diferentes tipos de tecnologias sem fio “*wireless*”. É feito um estudo mais detalhado sobre o padrão ZigBee, mostrando suas principais características, camadas que compõe seu protocolo, topologia da rede e segurança, além do módulo MeshBean e do gerenciador de tarefas BitCloud que serão utilizados para a aplicação embarcada da rede e validação dos experimentos. Também será feita uma introdução sobre a automação predial, os principais sistemas a serem

automatizados e a importância da utilização de redes sem fio em edifícios não automatizados.

No quarto capítulo serão descritos o ambiente utilizado para realização dos testes, onde se poderá visualizar através de sua planta baixa a localização dos aparelhos de ar condicionado, sensores, atuadores e medidores de energia, bem como todo o hardware utilizado para aquisição dos dados e acionamento dos aparelhos, além do software supervisor utilizado para implementar o controle.

No quinto capítulo serão descritos os procedimentos adotados para implementação dos controladores utilizados para realizar o controle da temperatura detalhando cada uma das etapas e os ajustes feitos nos mesmos para que o controlador possa trabalhar de forma a manter o ambiente dentro dos padrões de conforto térmico e com o menor consumo de energia possível.

No sexto capítulo serão mostrados os resultados obtidos com as técnicas de controle adotadas para o controle da temperatura, fazendo-se uma comparação entre as mesmas em relação à manutenção da temperatura de conforto e economia de energia.

No sétimo capítulo serão apresentadas conclusões a respeito do uso de tecnologias sem fio e de determinadas técnicas de controle na automação predial e serão dadas algumas sugestões para continuidade deste trabalho.

## 2. CONTROLE FUZZY

### 2.1 LÓGICA FUZZY

A ciência lógica foi fundada por Aristóteles, criando a lógica Aristotélica ou Lógica bivalente, em que uma determinada informação só poderia ser verdadeira (1) ou não verdadeira (0), porém Bartrand Russell mostrou através do “Paradoxo de Russell” que nem todos os problemas poderiam ser resolvidos pela lógica bivalente. Em torno de 1930, Jan Lukasiewicz desenvolveu a lógica multinível, onde uma determinada afirmação pode ser verdadeira ou não, ao mesmo tempo. Isso se torna possível desde que não apresente apenas dois níveis, verdadeiro e falso, mas sim um grau de verdade, existindo assim em vários níveis (Kohagura, 2007).

Várias técnicas, tais como controle linear multivariável, estimação de estado a partir de medidas, controle ótimo, sistemas lineares estocásticos, além de certas classes de problemas não-lineares determinísticos, foram desenvolvidas e aplicadas com sucesso em um grande número de problemas bem postulados. Entretanto, todas estas técnicas não são capazes de resolver alguns problemas reais cuja modelagem matemática é impraticável de forma convencional (Gomide e Gudwin, 1994).

Em 1965 foi publicado o trabalho de Conjuntos Fuzzy, por Lotfi A. Zadeh, baseado na lógica multinível. O objetivo deste trabalho era fornecer um ferramental matemático para o tratamento de informações de caráter impreciso ou vago. Foi a partir do mesmo que surgiu a expressão lógica *fuzzy*, onde o termo em inglês “*fuzzy*” traduzido para o português tem o significado de algo nebuloso ou difuso.

Após o trabalho seminal de Zadeh surgiram inúmeras outras aplicações de lógica *fuzzy*, tabela 2.1 trazendo grandes benefícios principalmente no que se refere à economia de energia e melhor controle dos equipamentos.

Tabela 2.1 - Aplicações da Lógica *Fuzzy* (Kohagura, 2007).

| Produto               | Empresa   | Função da Lógica <i>Fuzzy</i>   |
|-----------------------|---|---|
| Ar condicionado       | Hitachi,<br>Matsushita,<br>Mitsubishi,<br>Sharp | Previne uma grande variação da temperatura ao ser regulada e consome menos energia.   |
| Freios antibloqueio   | Nissan  | Controle dos freios em caso de perigo, baseado na velocidade e na aceleração do carro e da roda.  |
| Motor de carro        | NOK/Nissan                                      | Controle da injeção do combustível e da ignição, através da quantidade de oxigênio, resfriamento da água, rpm, volume do combustível, ângulo da manivela, ruído, pressão dos tubos. |
| Transmissão do carro  | Honda,<br>Nissan,<br>Subaru                     | Muda a marcha de acordo com a aceleração do motor, estilo de dirigir e condições da rua.  |
| Controle de navegação | Isuzu,<br>Nissan,<br>Mitsubishi                 | Baseado na velocidade e aceleração do carro é ajustado o controle da velocidade.  |
| Controle do elevador  | Fujitec,<br>Mitsubish electric,<br>Toshiba      | Reduz o tempo de espera dos usuários baseado no tráfego de passageiros.   |
| Umidificador          | Casio   | Ajusta a umidade contida de acordo com as condições da sala.  |
| Forno microondas      | Hitachi,<br>Sanyo,<br>Sharp,<br>Toshiba         | Configura e ajusta a força e a estratégia de cozinhar.  |
| Lavador de pratos     | Matsushita                                      | Ajusta o ciclo de lavagem, o enxágue e estratégias de lavagem de acordo com o número de pratos, e pelos tipos e quantidades de comida incrustadas nos pratos.                       |

A Lógica *Fuzzy* é baseada na teoria dos Conjuntos *Fuzzy*. A Teoria de Conjuntos *Fuzzy* fundamenta-se basicamente na representação e manipulação de informações incertas e imprecisas tão comuns no cotidiano humano e que usualmente não podem ser tratadas pelos sistemas da lógica clássica sendo as mesmas expressas através de um conjunto de regras linguísticas.

O resultado é um sistema de inferência baseado em regras, onde cada regra é representada por uma relação *fuzzy* que em conjunto descreve o comportamento do sistema. Neste tipo de sistema não é necessário se conhecer o modelo matemático do processo.

Segundo a teoria dos Conjuntos *Fuzzy* dado um universo  $U$  e um elemento particular  $x \in U$ , a função de pertinência  $\mu_A(x)$  com respeito a um conjunto  $A \subseteq U$  é representado pela equação 1:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

Através de uma função de pertinência é possível saber o quanto um elemento pertence a um dado conjunto e também é possível, dependendo da sua aplicação ou da maneira de representar a mesma, se escolher qual tipo melhor se adequa a um determinado contexto. Entre os diferentes tipos de função de pertinência, podemos citar as funções triangulares e trapezoidais, conforme mostrado abaixo.

- **Triangular**

É representada pela equação 2:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x - a}{b - a} & \text{se } x \in [a, b] \\ \frac{c - x}{c - b} & \text{se } x \in [b, c] \\ 0 & \text{se } x \geq c \end{cases} \quad (2)$$

A representação gráfica da função triangular é mostrada na figura 2.1, abaixo:

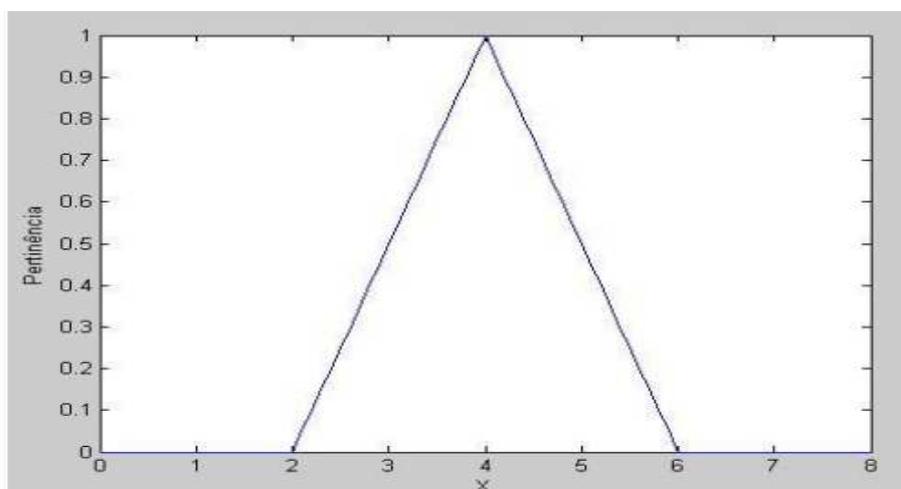


Figura 2.1 - Função de pertinência tipo triangular (Kohagura, 2007).

- **Trapezoidal**

É representada pela equação 3:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < a \\ \frac{x - a}{b - a} & \text{se } x \in [a, b] \\ 1 & \text{se } x \in [b, c] \\ \frac{d - x}{d - c} & \text{se } x \in [c, d] \\ 0 & \text{se } x > d \end{cases} \quad (3)$$

A representação gráfica da função trapezoidal é mostrada na figura 2.2, abaixo:

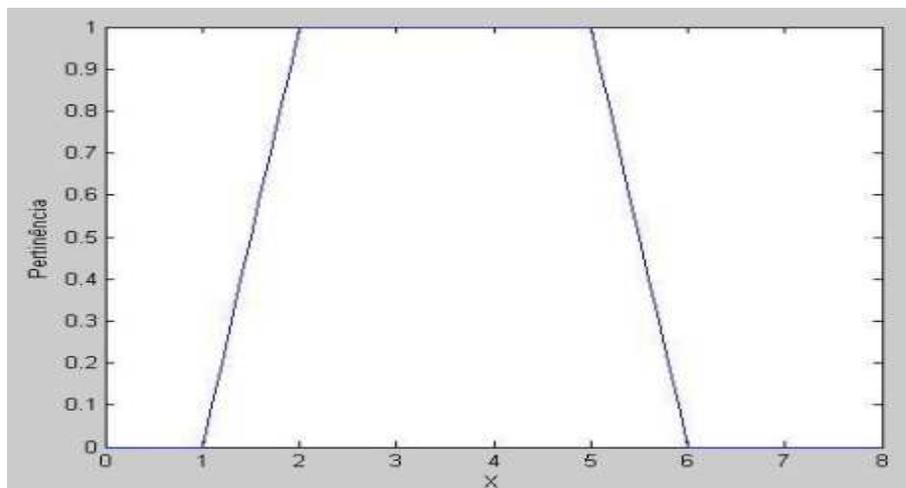


Figura 2.2 - Função de pertinência tipo trapezoidal (Kohagura, 2007).

Além das funções de pertinência triangular e trapezoidal, temos outras funções de simples implementação, como a sigmóide, cauchy e gaussiana (Santos, 2005).

A combinação de conjuntos *fuzzy* definidos pelas variáveis de entrada e saída, junto com um conjunto de regras que relacionam uma ou mais variáveis de entrada a uma ou mais variáveis de saída, é compreendido como um sistema de controle *fuzzy*, figura 2.3.

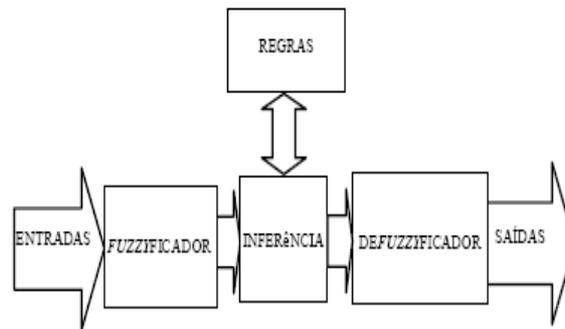


Figura 2.3 – Diagrama de blocos das etapas do Controle *Fuzzy* (Santos, 2005).

## 2.2 CONTROLADOR FUZZY

A idéia básica em controle *fuzzy* é modelar as ações a partir de conhecimento especialista, sendo a estratégia de controle descrita por intermédio de regras linguísticas que conectam de modo *fuzzy*, várias situações com as ações a serem tomadas.

No controle *fuzzy* os dados de entrada e de saída do sistema de controle são valores precisos necessitando de elementos adicionais entre o controlador nebuloso e o processo a ser controlado. Estes elementos são denominados de *fuzzyficador* e *defuzzyficador*.

No estágio de inferência ocorre a codificação do conhecimento do processo por meio de um conjunto de regras condicionais (SE <premissa> ENTÃO <consequência>) que podem ser fornecidas por especialistas em forma de sentenças linguísticas sendo seu ajuste definido por um conjunto de funções de pertinência e regras *fuzzy*.



Figura 2.4 – Diagrama de blocos das etapas de processamento *fuzzy* (Tanscheit, 1999).

A figura 2.4 ilustra o diagrama de blocos das etapas de processamento *fuzzy* que é composto por três etapas denominadas *fuzzyficação*, inferência e *defuzzyficação* e mostra como as mesmas se relacionam.

### 2.2.1 Fuzzyficação

A *fuzzyficação* é o processo de associar ou calcular um valor para representar um grau de pertinência da entrada em um ou mais grupos qualitativos, chamados de conjuntos difusos. O grau de pertinência é determinado por uma função de pertinência que foi definida com base na experiência ou intuição. Funções de pertinência são o meio pelo qual um controlador é sintonizado para alcançar respostas desejadas a determinadas entradas (Bilobrovec, 2005).

Nesta etapa, a interface de *fuzzyficação* toma os valores das variáveis de entrada, faz um escalonamento para condicionar os valores a universos de discurso normalizados e *fuzzyfica* os valores, transformando números em conjuntos *fuzzy*, de modo que possam se tornar instâncias de variáveis linguísticas (Gomide e Gudwin, 1994).

No dia-a-dia a *fuzzyficação* se encontra presente de certa maneira, no momento que uma mulher diz que o ambiente está frio pelo fato da temperatura da sala está a 20 °C ou um pai dizer que seu filho está correndo pelo fato da velocidade do carro está em 100 Km/h, são *fuzzyficações* realizadas tanto pela mulher quanto pelo pai.

Para melhor compreendermos, voltemos ao exemplo citado sobre a temperatura de uma sala, faremos um programa para controlar a temperatura da mesma, e para isto adotaremos apenas uma variável de entrada, o “erro”. O erro é uma variável *fuzzy* e é atribuído a mesma os conjuntos *fuzzy* “negativo”, “zero” e “positivo”, sendo estes tipos de atribuições denominadas de valores *fuzzy*.

Para cada valor *fuzzy* será atribuída uma função de pertinência de modo a transformar os valores de entrada em valores *fuzzy*. Seguem as funções de pertinência dos valores *fuzzy* da variável de entrada “erro”, equações 4, 5 e 6.

$$\mu_{NEGATIVO}(x) = \begin{cases} \frac{x - (-10)}{-5 - (-10)} & \text{se } x \in [-10, -5] \\ 1 & \text{se } x \in [-5, -1] \\ \frac{-0.5 - x}{-0.5 - (-1)} & \text{se } x \in [-1, -0.5] \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{ZERO}(x) = \begin{cases} \frac{x - (-1)}{(-0.5) - (-1)} & \text{se } x \in [-1, -0.5] \\ 1 & \text{se } x \in [-0.5, 0.5] \\ \frac{1 - x}{1 - 0.5} & \text{se } x \in [0.5, 1] \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_{POSITIVO}(x) = \begin{cases} \frac{x - 0.5}{1 - 0.5} & \text{se } x \in [0.5, 1] \\ 1 & \text{se } x \in [1, 5] \\ \frac{10 - x}{10 - 5} & \text{se } x \in [5, 10] \end{cases} \quad (6)$$

Supondo que para uma determinada temperatura ambiente o valor de erro apresentado seja de  $-1.0 \text{ }^\circ\text{C}$ , então teremos os seguintes graus de pertinência associados às funções de pertinência, negativo, zero e positivo, equações 7, 8 e 9.

$$\mu_{NEGATIVO}(x) = 1 \quad (7)$$

$$\mu_{ZERO}(x) = 0 \quad (8)$$

$$\mu_{POSITIVO}(x) = 0 \quad (9)$$

Estes valores obtidos na etapa de *fuzzificação* serão tratados na próxima etapa que é a etapa de inferência.

### 2.2.2 Inferência

A base de conhecimento consiste de uma base de regras, caracterizando a estratégia de controle e suas metas. A base de regras é formada por estruturas do tipo:

$$\text{SE } \langle \text{premissa} \rangle \text{ ENTÃO } \langle \text{consequência} \rangle$$

Na base de regras ficam armazenadas as definições sobre discretizações e normalizações dos universos de discurso e as definições das funções de pertinência. O procedimento de inferência processa os dados *fuzzy* de entrada, junto com as regras, de modo a inferir as ações de controle *fuzzy*, aplicando o operador de implicação *fuzzy* e as regras de inferência da lógica *fuzzy* (Gomide and Gudwin, 1994). As operações de implicação *fuzzy* recebem como entrada os valores de entrada  $\mu_A(x)$  recebidas da *fuzzyficação* e os valores de saída  $\mu_B(x)$  contidas na inferência, sendo o resultado da operação o dado de saída da relação de implicação.

Para o exemplo do controle de temperatura adotaremos uma variável *fuzzy* de saída denominada “PWM” sendo atribuído à mesma os conjuntos *fuzzy* “baixo”, “médio” e “alto”. A figura 2.5 apresenta as funções de pertinência dos valores *fuzzy* da variável de saída “PWM”.

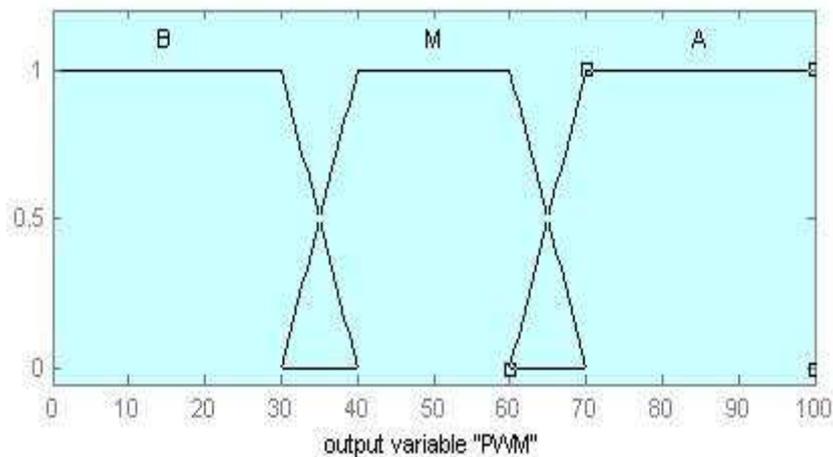


Figura 2.5 - Gráfico da função de pertinência da variável de saída PWM.

Através destes valores e dos valores determinados na *fuzzyficação* teremos o seguinte conjunto de regras do tipo se-então:

Tabela 2.2 - Tabela de regras

| <b>ERRO</b> | <b>PWM</b> |
|-------------|------------|
| NEGATIVO    | ALTO       |
| ZERO        | MÉDIO      |
| POSITIVO    | BAIXO      |

Através da tabela 2.2 podemos verificar que para um erro negativo, ou seja, a temperatura de referência menor do que a temperatura do ambiente, o valor do pwm deve ser alto, ligando assim o aparelho de ar condicionado de modo a resfriar o ambiente. Já para o erro igual a zero em que nós teremos a temperatura de referência igual à temperatura do ambiente o valor do pwm deve ser médio, fazendo com que o aparelho trabalhe a uma potência média. Finalmente, para erro positivo em que a temperatura de referência é maior que a temperatura do ambiente o valor do pwm deve ser baixo, desligando ou mantendo o mesmo operando em uma potência baixa.

Pelos dados recebidos da etapa de *fuzzyficação* representados na tabela acima, será disparada a regra 1 que determina que se o erro “negativo” então temos como consequência PWM “alto”, ou seja, “ligar o aparelho de ar condicionado”. Como o objetivo é controlar a temperatura do ambiente, foi realizada uma inferência para determinar a ação a ser realizada para a situação determinada, que no nosso caso foi “ligar o aparelho de ar condicionado”.

### **2.2.3 Defuzzyficação**

Após a etapa de inferência, é necessária a determinação de uma ação de controle não *fuzzy* que melhor represente a decisão *fuzzy*, para que a mesma possa ser efetivamente enviada ao controle atuando no processo de forma a regulá-lo.

O *defuzzyficador* atua sobre as ações de controle *fuzzy* inferidas transformando-as em ações de controle não *fuzzy*, efetuando em seguida um escalonamento para compatibilizar os valores normalizados vindos do passo anterior com os valores dos universos de discursos reais das variáveis (Barg, 2002).

Existem vários métodos para se realizar a *defuzzyficação* destacando-se entre eles o primeiro máximo, o método centróide ou centro de gravidade, e a média dos máximos (Urzedá, 2006).

- **Primeiro máximo**

Esse método também conhecido como método da altura produz como ação de controle o valor numérico da saída correspondente ao índice da variável linguística de saída, produzida pela máquina de inferência, de maior grau de pertinência, onde  $z^*$  é o resultado da *defuzzificação*. A figura 2.6 mostra o método do primeiro máximo.

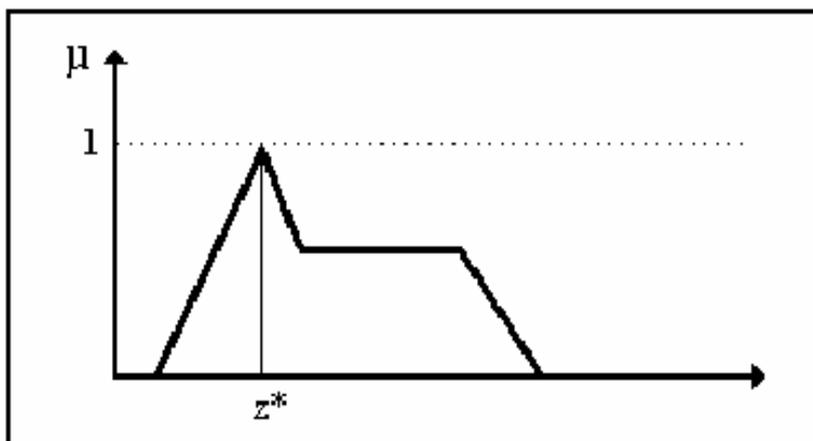


Figura 2.6 – Representação gráfica do método de *defuzzificação* pelo método do primeiro máximo (Barg, 2002).

- **Centróide**

Também conhecido como método do centro de gravidade é um dos métodos mais utilizados na *defuzzificação*. O valor da saída é o valor no universo que divide a área sob a curva da função de pertinência em duas partes iguais. A figura 2.7 mostra o método do centróide.

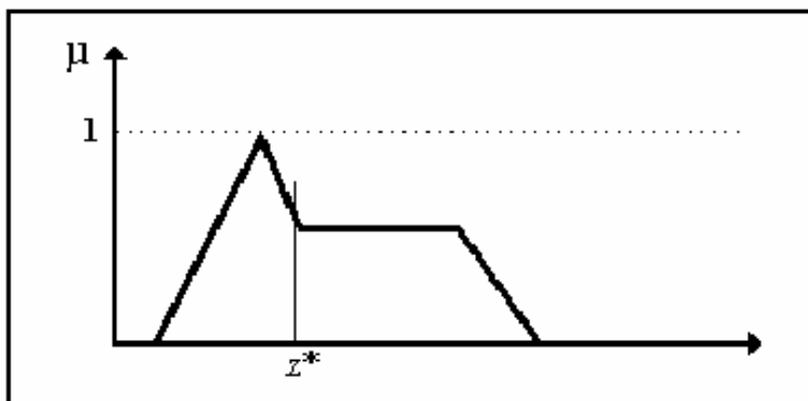


Figura 2.7 – Representação gráfica do método de *defuzzificação* pelo método do centróide (Barg, 2002).

O cálculo do centróide da área se dá da seguinte forma, equação 10:

$$z^* = \frac{\sum_{i=1}^n z_i * \mu_{SAÍDA}(z_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_{SAÍDA}(z_i)} \quad (10)$$

onde  $\mu_{SAÍDA}(z_i)$  é a área de uma função de pertinência modificada pelo resultado da inferência *fuzzy* e  $z_i$  é a posição do centróide da função de pertinência individual.

- **Média dos máximos**

Também conhecido como método da média da pertinência máxima é o método que busca retornar o ponto que possui o maior grau de pertinência, porém no universo existe mais de um ponto com grau de pertinência máxima. Neste caso a saída é obtida tomando-se a média entre os dois elementos extremos no universo que correspondem aos maiores valores da função de pertinência. A figura 2.8 mostra o método da média dos máximos onde o valor da *defuzzificação* é dado pela média de  $a$  e  $b$ .

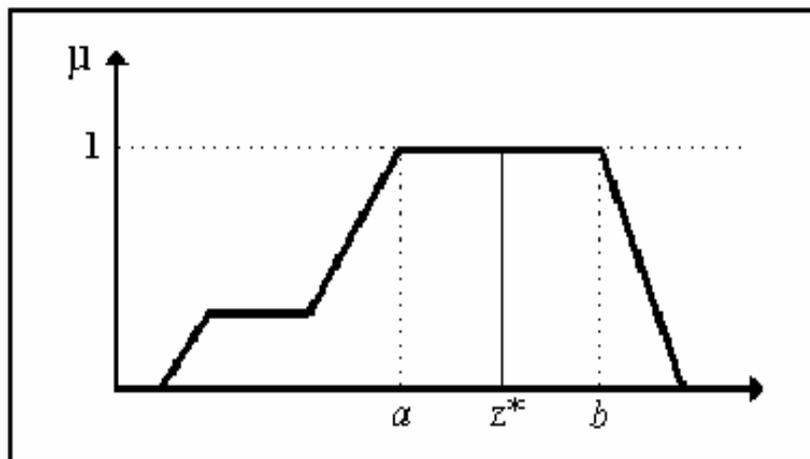


Figura 2.8 – Representação gráfica do método de *defuzzificação* pelo método da média dos máximos (Barg, 2002).

Para o exemplo do controle de temperatura será utilizado o método do centróide que fornecera para a saída PWM o valor de 82,6 % como mostrado na figura 2.9 abaixo.

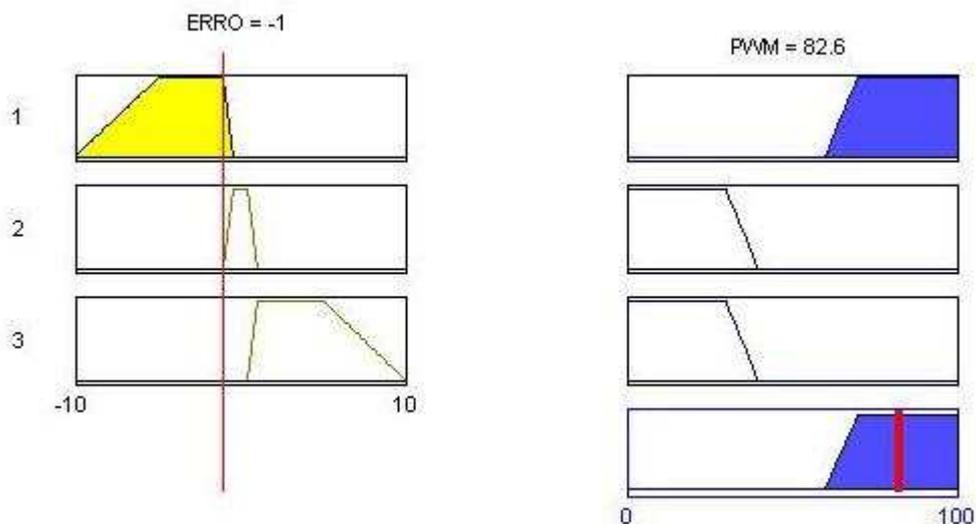


Figura 2.9 – Ilustração da saída do PWM para erro = -1.

Por tudo isso podemos dizer que a lógica *fuzzy* é uma ferramenta de projeto que procura utilizar o conhecimento especialista para produzir uma lei de controle não linear. O ajuste empírico das regras nem sempre produz bons resultados, mas a visualização da participação de cada regra na lei de controle é com certeza interessante para aplicações práticas.

No próximo capítulo serão apresentados conceitos sobre tecnologias de comunicação sem fio, especificamente o padrão ZigBee, além de conceitos e aplicações da automação predial, bem como a relação entre ambos no *retrofitting* em edifícios não automatizados.

### 3. REDES SEM FIO E AUTOMAÇÃO PREDIAL

#### 3.1 INTRODUÇÃO

As redes de sensores sem fio têm merecido atenção especial nos últimos anos graças às suas características intrínsecas que as tornam atrativas em diversas aplicações, como em atividades industriais, automação predial e residencial, monitoramento de ambientes e segurança, entre outros (MIGNACO, 2005).

Hoje existem vários tipos de redes sem fio, sendo a maioria delas aplicadas na telefonia celular, embora seu uso na automação predial tenha crescido bastante devido aos custos de obra civil e *retrofitting* elevados em prédios que não estão preparados para a automação.

Entre as principais redes sem fio podemos citar:

- WPAN (Wireless Personal Area Network) – Esta é a área de estudo e desenvolvimento normativo do grupo de trabalho definido pelo IEEE 802.15 que busca obter uma conectividade sem fio de reduzida complexidade, baixo custo e baixo consumo de energia. Nesta área se enquadram as tecnologias *wireless* de pequeno alcance (entre 10 e 100 m);
- WLAN (Wireless Local Area Network) – Neste tipo de tecnologia se encontram as redes com alcance entre 100 e 300 metros que surgiram como extensão ou alternativa para as redes com cabeamento convencional;
- WMAN (Wireless Metropolitan Area Network) - Neste grupo temos as tecnologias de caráter metropolitano que tratam dos acessos de banda larga e que possuem alcance em torno de 6 km. Uma WMAN normalmente resulta da interligação de varias WLAN's;
- WWAN (Wireless Wide Area Network) - Neste grupo estão as tecnologias voltadas para redes de telecomunicações que estão dispersas por uma grande área geográfica, atendendo aos serviços de voz e alguns serviços de dados. Ela se distingue de uma WLAN pelo seu porte e estrutura de telecomunicações;

A figura 3.1 mostra as tecnologias sem fio e como as mesmas são classificadas de acordo com alcance e taxa de transmissão.

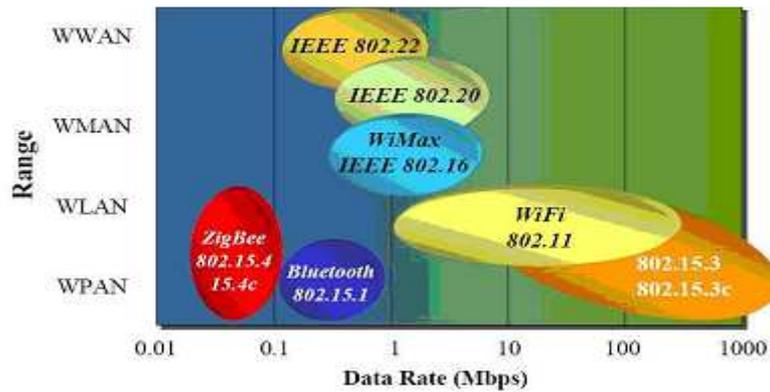


Figura 3.1 – Comparação entre tecnologias *wireless* (Oliveira et al 2007).

A tabela 3.1 também apresenta uma comparação entre as tecnologias sem fio, mostrando a camada física de cada tecnologia, consumo, aplicações, entre outras características.

Tabela 3.1 – Comparação de tecnologias sem fio (David et al 2006).

|   | Wi-Fi  | Bluetooth                                 | ZigBee  |
|---|--|---|---|
| Camada física                                       | 802.11   | 802.15.1                                  | 802.15.4  |
| Taxa de transmissão                                 | 54 Mbps  | 1 Mbps                                    | 250 Kbps  |
| Consumo   | > 400 mA TX;<br>standby 20 mA                  | 40 mA TX;<br>standby 0,2 mA               | 30 mA TX;<br>standby 3 $\mu$ A                          |
| Tamanho típico para implementar o protocolo (stack) | > 1 MB   | $\approx$ 250 Kb                          | $\approx$ 32 Kb   |
| Pontos fortes                                       | Alta taxa de transferência                     | Interoperabilidade, substituição de cabos | Consumo, confiabilidade, preço, número de nós, latência |
| Aplicações  | Internet, redes, transferência de dados, vídeo | Periféricos de PC e telemóveis, PDA's     | Controle remoto, dispositivos com baterias, sensores    |

## 3.2 ZIGBEE

### 3.2.1 Características gerais

O ZigBee é um padrão global e aberto para a comunicação sem fio, bidirecional, homologado pelo IEEE 802.15.4 e desenvolvido como solução em redes sem fio com baixo consumo de energia, baixa taxa de transmissão, segurança e confiabilidade, barateando assim os custos com a aquisição, instalação de equipamentos, manutenção e mão de obra. Esta voltado a aplicações relacionadas à automação residencial e predial, controle industrial, acesso a periféricos e utilização de sensores médicos.

Os dispositivos baseados na tecnologia ZigBee operam na faixa ISM de 2,4GHz, com taxas de transferência de dados de 250kbps e alcance variável, podendo conter até 255 dispositivos ativos (1 coordenador e 254 dispositivos), onde cada coordenador de rede pode se conectar a outros coordenadores visando criar redes maiores.

O padrão ZigBee foi projetado objetivando apresentar as seguintes características:

- Baixo custo e consumo de energia, pois o mesmo pode ser colocado em modo de espera e o pacote de dados da comunicação é pequeno;
- Admite diferentes topologias da rede: estrela, malha ou árvore;
- Dois estados principais de funcionamento: "*active*" para transmissão e recepção e "*sleep*", quando não está transmitindo;
- Pilha de protocolos de implementação simplificada permitindo a transferência confiável de dados com níveis apropriados de segurança e com interfaces de baixo custo;
- Dois modos de operação da rede: *beaconing* e *non-beaconing*;
- Elevada segurança, com recurso a 128-bit encryption (AES 128);
- Suporte para dois tipos de dispositivos físicos em uma rede ZigBee, definidos na norma IEEE 802.15.4:
  - **Full Function Device (FFD)** – são dispositivos mais complexos podendo funcionar em qualquer que seja a topologia da rede. Estes dispositivos podem ser Coordenador, Roteador, ou até mesmo um *End Device* e podem se comunicar com quaisquer outros membros da rede;
  - **Reduced Function Device (RFD)** – é limitado a uma configuração com topologia em estrela, funcionando apenas como componente de rede e podendo se comunicar apenas com dispositivos FFD (Coordenador ou Roteador). Do ponto de vista de uma rede ZigBee estes só podem assumir o papel de *End Device*. Na prática são os sensores, interruptores, controladores de relés, etc.

A tabela 3.2 apresenta as funcionalidades dos dispositivos físicos de uma rede ZigBee.

Tabela 3.2 - Tabela de funcionalidades dos dispositivos ZigBee (Pinheiro, 2004).

| Coordenador da Rede - FFD             | Nó da Rede - RFD                                      |
|---------------------------------------|---|
| Ajustes de parâmetros da rede         | Função passiva na rede                                |
| Transmite informações pela rede       | Efetua buscas por redes disponíveis                   |
| Gerencia os nós da rede               | Transferência de dados da aplicação                   |
| Armazena informações dos nós de rede  | Determina o status dos dados                          |
| Distribui mensagens entre nós de rede | Solicita dados ao coordenador da rede                 |
| Opera tipicamente no estado "active"  | Pode permanecer no estado "sleep" por longos períodos |

Às duas classes anteriores de dispositivos físicos (FFD e RFD) correspondem três tipos de dispositivos lógicos: Coordenador (*Coordinator*), Roteador (*Router*) e *Endpoint*, tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Redes ZigBee: dispositivos lógicos e suas funções (Silva, 2007).

| Dispositivo | Tipo de dispositivo físico associado (IEEE 802.15.4) | Função  |
|-------------|--|---|
| Coordinator | FFD  | Forma a rede, atribui endereços. Existe apenas um por rede.   |
| Router      | FFD  | Permite que mais nós se unam à rede. Pode também realizar funções de controle ou monitoração. A sua existência é opcional.    |
| Endpoint    | RFD ou FFD   | Realiza ação de controle ou monitoração através do dispositivo o qual esta associado (sensor, controlador, atuador, e outros) |

### 3.2.2 Topologia e modo de operação da rede

Conforme já mencionado, a estrutura da rede ZigBee permite três tipos de topologias a serem implementadas, dependendo do tipo de aplicação considerada.

- Estrela

Na topologia em estrela é ao Coordenador que cabe todo o controle da rede e é através do mesmo que as comunicações com todos os dispositivos *End Device* são realizadas, figura 3.2. Deste modo, o Coordenador tem a função de iniciar toda a rede e manter todos os

dispositivos associados dentro da rede. Toda a informação em circulação na rede passa pelo nó Coordenador (Saleiro e Ey, 2006).

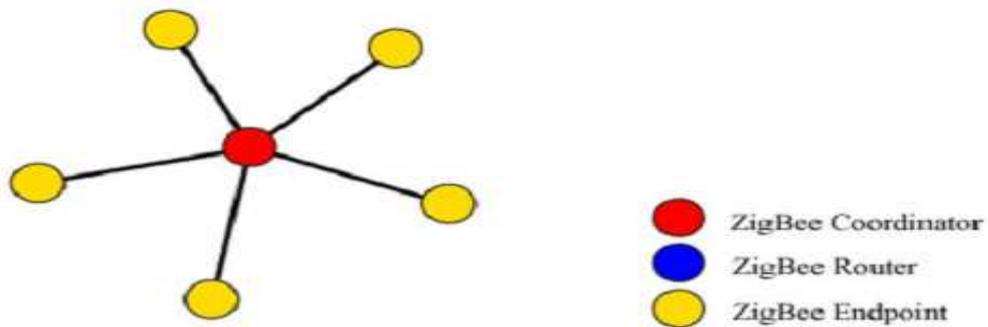


Figura 3.2 – Topologia estrela (Silva, 2007).

- Malha

Numa topologia em malha, figura 3.3, os dispositivos do tipo FFD (Coordenador/Roteador) são livres para se comunicar com outro dispositivo FFD permitindo um maior alcance da rede. O Coordenador registra toda a entrada e saída de dispositivos, mas não assume um papel tão preponderante em termos de fluxo de informação como na configuração anterior (Silva, 2007).

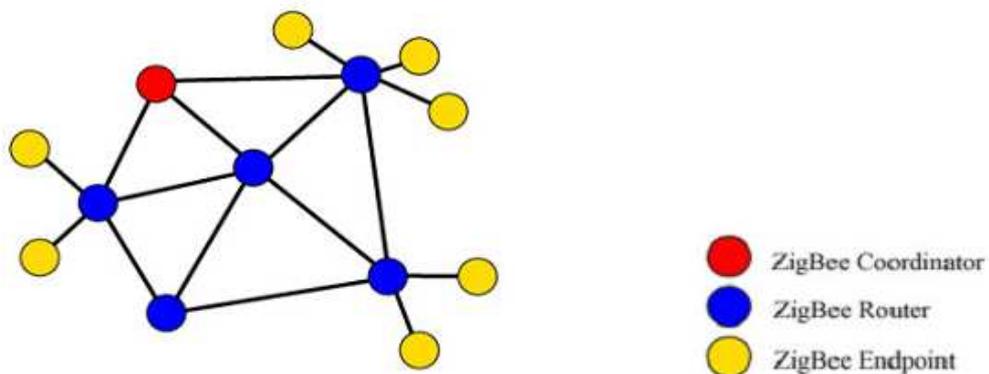


Figura 3.3 – Topologia malha (Silva, 2007).

- Árvore

Esta topologia é obtida a partir de uma modificação da topologia em estrela. Um ou mais dispositivos de função reduzida (RFDs) conectados a um coordenador são substituídos por dispositivos de função completa (FFDs) e a partir destes outros FFDs/RFDs podem ser conectados, Figura 3.4. A vantagem deste tipo de topologia é que pode ser usada para estender o alcance geográfico da rede (Schweitzer et al 2006).

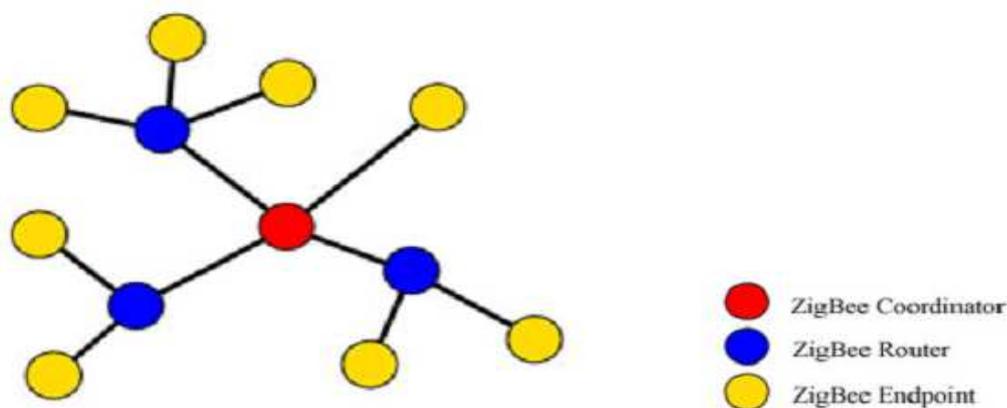


Figura 3.4 – Topologia árvore (Silva, 2007).

O protocolo ZigBee apresenta uma grande versatilidade ao permitir a implementação de varias tecnologias e essa versatilidade é aumentada pois o mesmo suporta dois modos de redes, o *beaconing* e o *non-beaconing*.

No modo *beaconing* os roteadores transmitirão periodicamente mensagens de sinalização a fim de confirmar a sua presença a outros nós na mesma rede. Estes apenas precisam está ativos no momento da sinalização, o que permitirá que os dispositivos ZigBee possam manter-se no modo *sleep* entre sinalizações (*beacons*), reduzindo o consumo de energia.

No segundo modo de operação de uma rede ZigBee, ou seja, no modo *non-beaconing*, a maioria dos dispositivos mantém os seus receptores permanentemente ativos, havendo um maior consumo de energia, o que torna necessário a utilização de fontes de alimentação com maiores capacidades (Saleiro e EY, 2006).

### 3.2.3 Camadas de protocolo

Assim como em outros protocolos, a pilha do protocolo ZigBee é formada por camadas, sendo elas: camada física (PHY) e de acesso ao meio (MAC), conforme padrão IEEE 802.15.4, camada de rede (NWK) e camada de aplicação (APL). Na camada de aplicação (APL) estão incluídas a subcamada de suporte aplicacional (APS), o objeto de dispositivo ZigBee (ZDO - ZigBee Device Object) e os objetos de aplicação (Application Objects), figura 3.5.

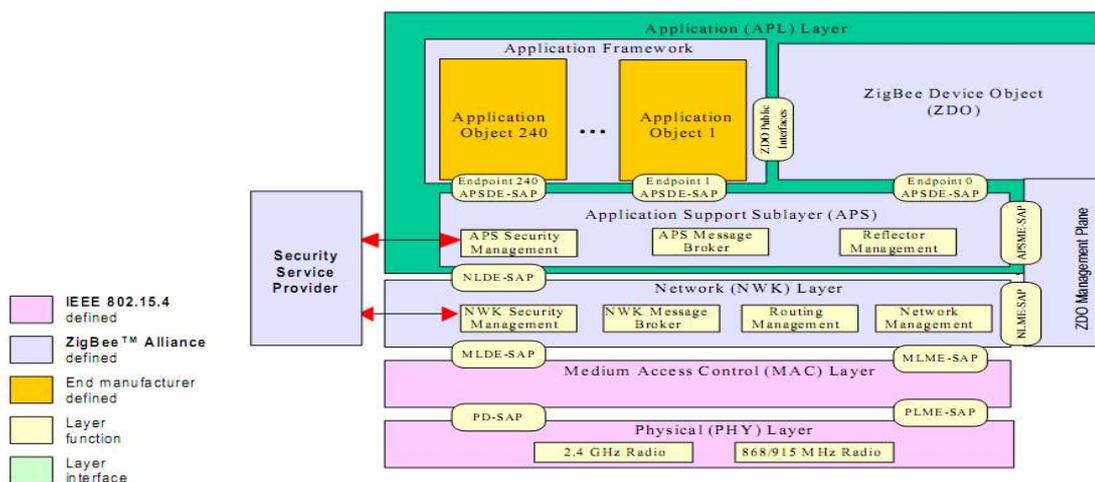


Figura 3.5 – Modelo de camadas da pilha do protocolo ZigBee (ZigBee).

A camada física (PHY) foi projetada para acomodar as necessidades de interfaces de baixo custo, permitindo níveis elevados de integração. O uso da técnica de transmissão de sequência direta permite que os equipamentos sejam muito simples, possibilitando implementações mais baratas. Ela é responsável pelo controle da transmissão e da recepção de mensagens através de um canal físico RF.

A camada MAC é responsável pelo controle de acesso aos canais RF entre *devices* vizinhos. Ela gera e reconhece os endereços e verifica as sequências das estruturas de controle (*frame check*). Também é responsável por sintonizar as transmissões dos *frames* no modo *non-beacon*, usando o método CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access – Collision Avoidance), onde um nó verifica a ausência de tráfego antes de iniciar uma transmissão.

A camada de rede (NWK), que é hierarquicamente a primeira camada definida pela norma ZigBee esta compreendida entre a camada MAC e a camada de aplicação (APL). Ela é responsável pela descoberta de rotas e pelo roteamento da informação. Roteamento é a escolha do caminho através do qual a mensagem será transmitida para o seu destinatário. A camada de rede também apresenta a capacidade de iniciar uma rede, permitir a entrada e a saída em uma rede e descobrir novos dispositivos que possam integrar a rede, armazenando as informações relativas aos mesmos.

A camada de aplicação (APL) tem a função de garantir uma gestão correta para as diversas aplicações. A subcamada de suporte aplicacional (APS) fornece uma interface entre a

camada de rede (NWK) e a camada de aplicação (APL) através de um conjunto geral de serviços que são usados pela ZDO e pelas aplicações definidas pelo fabricante. A Application Framework é um ambiente em que os objetos de aplicação (Application Objects) estão guardados em dispositivos ZigBee, enviando e recebendo dados, realizando funções de controle e manutenção das camadas de protocolo do dispositivo ZigBee e inicialização de funções de rede standard (Saleiro e EY, 2006).

Os ZDO situam-se entre a Application Framework e a subcamada de suporte aplicacional (APS) sendo responsáveis por inicializar a subcamada de suporte aplicacional (APS), a camada de rede (NWK) e o serviço de segurança (security service provider) além de juntar informações de configuração das aplicações finais para determinar e implementar a descoberta e gestão de segurança e rede.

### 3.2.4 Segurança

As redes sem fio apresentam vulnerabilidades de segurança em virtude do meio de transmissão ser o próprio ar o que permite a qualquer dispositivo localizado na área de alcance da rede considerada acessar as informações transmitidas. Devido a essa vulnerabilidade, mecanismos de segurança são concebidos com o objetivo de detectar, prevenir e recuperar de uma falha de segurança.

A especificação 802.15.4 define oito diferentes conjuntos de segurança, mostrados na Tabela 3.4 e classificados segundo a funcionalidade que os mesmos oferecem em: nenhuma segurança, somente criptografia (AES-CTR), somente autenticação (AES-CBC-MAC) e criptografia e autenticação (AES-CCM).

Tabela 3.4 – Conjunto de segurança suportado pelo IEEE 802.15.4 (Schweitzer et al 2006).

| Conjuntos de Segurança | Descrição                      |
|------------------------|--------------------------------|
| Null                   | Nenhuma segurança              |
| AES-CTR                | Criptografia somente, modo CTR |
| AES-CBC-MAC-128        | MAC de 128 bits                |
| AES-CBC-MAC-64         | MAC de 64 bits                 |
| AES-CBC-MAC-32         | MAC de 32 bits                 |
| AES-CCM-128            | Criptografia e MAC de 128 bits |
| AES-CCM-64             | Criptografia e MAC de 64 bits  |
| AES-CCM-32             | Criptografia e MAC de 32 bits  |

*AES – Advanced Encryption Standard*

*CTR – Counter Mode*

*CBC – Cipher Block Chaining*

*CCM – Counter Mode Encryption e Cipher Block Chaining Message Authentication Code*

*MAC – Message Authentication Code*

O ZigBee utiliza o padrão Advanced Encryption Standard (AES 128) e suporta o uso de criptografia e autenticação. A camada MAC faz o processamento de segurança e as camadas superiores controlam o processo, ajustando as chaves de criptografia e determinando os níveis de segurança a serem utilizados.

### 3.2.5 Kit de Desenvolvimento MeshBean

O kit de desenvolvimento MeshBean2, figura 3.6, fabricado pela Meshnetics, atualmente parte da Atmel, foi projetado para atender ao padrão IEEE 802.15.4, opera na banda de frequência de 2.4 GHz e contém todo o hardware e lógica necessária para implementar uma rede ZigBee. Dentre os diversos periféricos que o compõem podemos citar os sensores de temperatura (LM73CIMK) e de luminosidade (TSL2550T), DIP switches, módulo ZigBit que contém um microcontrolador Atmega128 e o *transceiver* RF AT86RF230, entre outros.

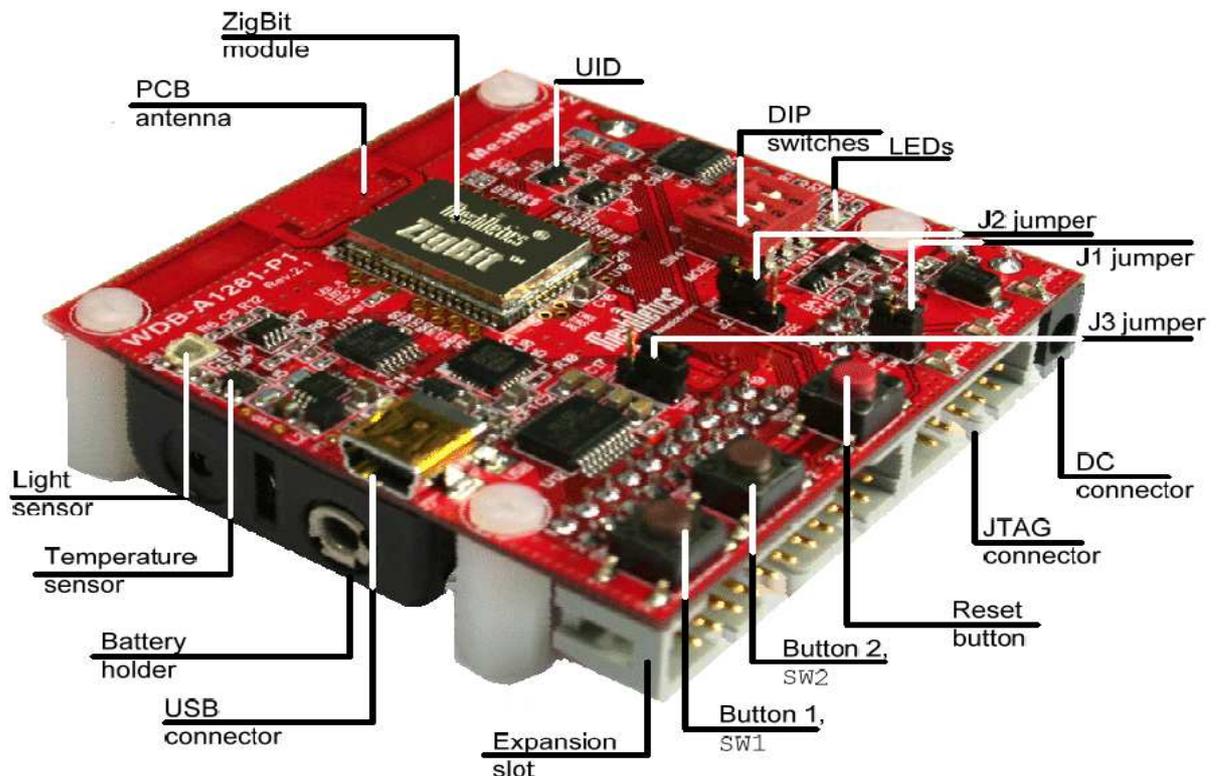


Figura 3.6 – Kit de desenvolvimento MeshBean2 (Meshnetics).

O kit possui um conversor de USB para UART, denominado CP2102. Ele proporciona uma interface de RS-232 para USB de forma que quando o driver for conectado, ele

permitirá que a porta USB seja visível pelo computador como uma porta COM de determinado número.

### 3.2.6 Módulo ZigBee ZigBit

O módulo ZigBit, figura 3.7, é um módulo compatível com 802.15.4/ZigBee, sendo sua plataforma baseada no Atmel's Z-Link 2.4 GHz. Contém em um mesmo encapsulamento o microcontrolador Atmega128 que vem com um bootloader instalado de fábrica, o que permite o carregamento de aplicações via USB a partir de uma aplicação em MS-DOS. Também contém o *transceiver* RF AT86RF230, proporcionando uma redução no tempo de desenvolvimento e nos custos de investimento que seriam necessários para se desenvolver uma solução RF. Existem duas versões para o módulo ZigBit: uma versão utilizando PCB ou antena externa e uma outra utilizando antena em chip.

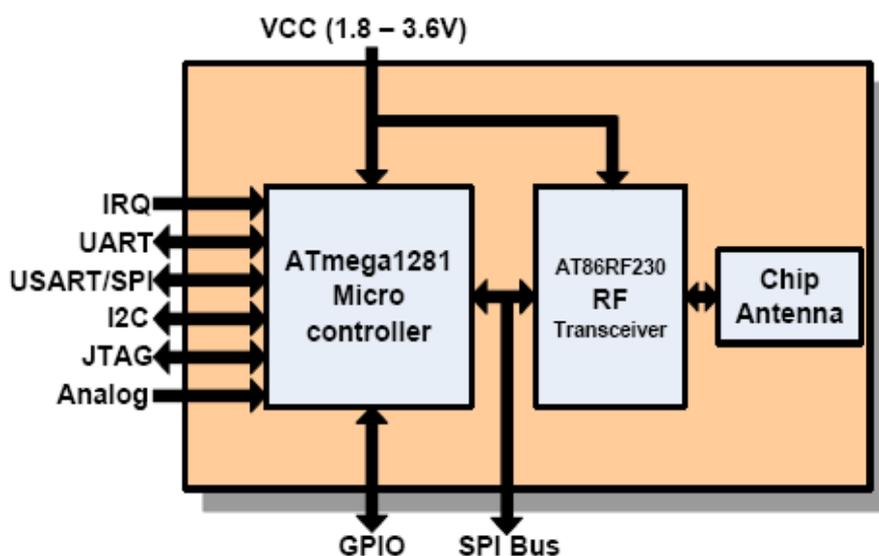


Figura 3.7 - Módulo ZigBit (Meshnetics).

A MeshNetics disponibiliza três tipos de configuração da pilha: o BitCloud, SerialNet e OpenMAC. BitCloud é uma plataforma de desenvolvimento de software ZigBee PRO certificado para aplicações wireless de tempo real com agendamento de tarefa. O SerialNet permite a manipulação dos módulos por comandos AT via interface serial. OpenMAC é uma implementação de código aberto da camada IEEE802.15.4 MAC para desenvolvedores experientes de software embarcado (Queiroz e Azevedo, 2009).

Algumas características do módulo podem ser visualizadas na tabela 3.5 abaixo.

Tabela 3.5 - Características do módulo ZigBit.

| Parâmetros                            | ZigBit     | Unidade |
|---------------------------------------|------------|---------|
| Faixa de frequência                   | 2400 -2483 | GHz     |
| Número de canais                      | 16         | -       |
| Taxa de transferência                 | 250        | Kbps    |
| Máxima potência de saída              | 3          | dBm     |
| 2 <sup>nd</sup> harmônico             | -28        | dBm     |
| 3 <sup>nd</sup> harmônico             | -26        | dBm     |
| Sensibilidade (PER 1 %)               | -101       | dBm     |
| Rejeição de canal adjacente           | 27         | dB      |
| Rejeição de canal alternado           | 53         | dB      |
| Alimentação                           | 1.8-3.6    | V       |
| Consumo de corrente RX                | 19         | mA      |
| Consumo de corrente TX                | 18         | mA      |
| Consumo de corrente modo <i>sleep</i> | 6          | $\mu$ A |
| Memória flash                         | 128        | kB      |
| Memória EPROM                         | 4          | kB      |
| Memória RAM                           | 8          | kB      |
| Temperatura de operação               | -40 / +85  | °C      |

### 3.2.7 Bitcloud

O BitCloud é um sistema de tempo real cooperativo multitarefa criado para facilitar o desenvolvimento de aplicações de redes sem fio embarcadas em hardware da Meshnetics. Aplicações primárias incluem automação residencial, automação predial, leitura de medidores automatizados e automação industrial.

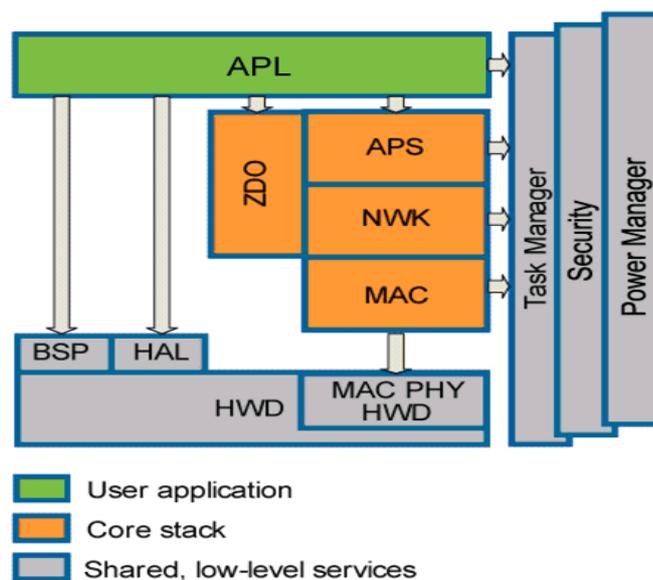


Figura 3.8 - Arquitetura da pilha do BitCloud (Atmel).

Sua arquitetura segue as orientações para a separação de camadas conforme IEEE 802.15.4 e ZigBee. Além das camadas que compõem o protocolo ZigBee, o BitCloud possui camadas adicionais para o desenvolvimento de aplicações do usuário ( *task manager*, *security* e *power manager*) e camadas de abstração ( *hardware abstraction layer* (HAL) e *board support package* (BSP)), figura 3.8.

O *Task manager* utiliza um algoritmo baseado em prioridade de fila (*priority queue-based*), especificamente desenvolvido para arquitetura de pilha multicamada e demandas de tempo críticas dos protocolos de rede (Queiroz e Azevedo, 2009).

*Power management* é responsável por desligar os componentes da pilha, salvar o estado do sistema quando prepara o dispositivo para dormir e restaurar o estado do mesmo quando o dispositivo acorda.

*Hardware Abstraction Layer* (HAL) contém APIs para o uso dos recursos de hardware (*EEPROM*, *sleep* e *watchdog timers*), bem como os *drivers* para facilitar a integração com uma série de periféricos externos ( *IRQ*, *I2C*, *SPI*, *UART*, *1-wire*) (Atmel).

*Board Support Package* (BSP) contém um conjunto de *drivers* para gerenciar os periféricos (sensores, UID chip, chaves e botões) do kit de desenvolvimento MeshBean 2.

### **3.3 AUTOMAÇÃO PREDIAL**

#### **3.3.1 INTRODUÇÃO**

O conceito de automação surgiu na indústria com o objetivo de substituir a mão-de-obra humana por máquinas e sistemas de controle que teriam como função controlar automaticamente os diversos sistemas existentes de modo a prover soluções às necessidades das indústrias, garantindo assim o aumento da produtividade e a qualidade dos produtos.

A partir dos anos 80, a automação passou a ser utilizada em prédios e residências trazendo uma maior segurança e conforto para seus usuários e com o menor consumo de energia possível, fazendo surgir a idéia de edifício inteligente (Montebeller, 2006).

De acordo com o Intelligent Buildings Institute (IBI), um edifício inteligente é aquele que oferece um ambiente produtivo e que é economicamente racional, através de otimização dos seus quatro elementos básicos – estrutura, sistema, serviços e gestão – e das relações entre eles.

Com a integração dos serviços e sistemas que constituem um edifício moderno, o conceito de edifício inteligente tornou-se ainda mais abrangente permitindo que o controle do processo fosse realizado por meio de dispositivos controladores e processadores que, em conjunto, são denominados Sistema de Supervisão e Controle.

Através de um sistema de supervisão e controle é possível centralizar as informações vindas de todas as partes do prédio, controlando de forma automática os equipamentos, garantindo assim, uma redução no consumo de energia.

Os sistemas de supervisão e controle de um edifício possuem uma arquitetura baseada em uma rede de equipamentos (processadores e controladores) organizados sob o ponto de vista da concepção de sistemas, conforme figura 3.13 abaixo.

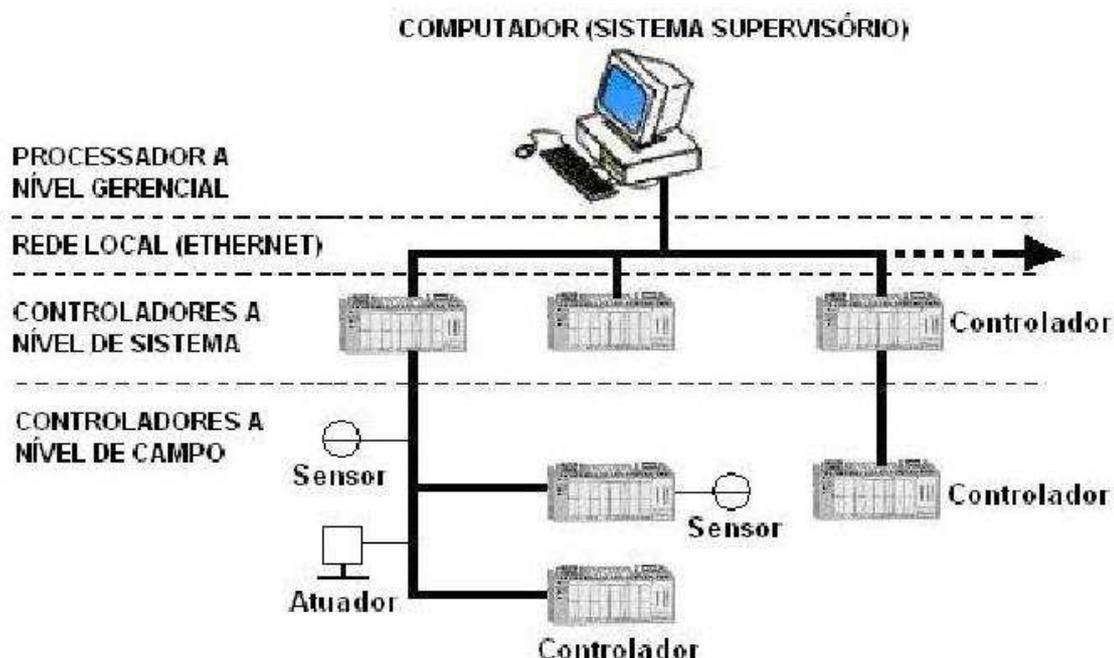


Figura 3.9 - Arquitetura de um Sistema de Supervisão e Controle (Montebeller, 2006).

O primeiro nível, denominado Gerencial é o responsável pela supervisão do Sistema de Supervisão e Controle sendo constituído por microprocessadores dotados de um software

supervisório que realiza o monitoramento e a gestão de todas as funções vitais do edifício (Braga, 2007).

O segundo nível, denominado Nível de Sistema é composto por Controladores Lógico Programáveis (CLP), interligados entre si, onde cada controlador é responsável por um determinado setor recebendo as informações vindas de sensores e realizando o controle dos equipamentos. No caso de falha da rede principal ou do controlador a nível de gerência, o controlador a nível de sistema pode operar normalmente.

Os controladores a nível de campo são geralmente de pequeno porte, servindo como extensão de entrada e saída remotas para os controladores a nível de sistema e estão conectados aos mesmos por meio de uma rede secundária. No caso de falha da rede secundária ou do controlador a nível de sistema, o controlador a nível de campo pode operar normalmente (Montebeller, 2006).

### **3.3.2 REDES DE COMUNICAÇÃO**

Em um sistema automatizado, para que ocorra a troca de informações entre os diversos equipamentos se faz necessário a existência de uma rede de comunicação local denominada LAN (Local Área Network).

Esta rede pode ser implementada sob duas formas: redes centralizadas, que apresenta a arquitetura em estrela, figura 3.2. Neste tipo de rede os elementos escravos estão conectados ao elemento mestre e a informação deve obrigatoriamente ser enviada ao elemento mestre.

A rede também pode ser implementada de forma distribuída. Neste tipo de configuração os elementos escravos estão conectados entre si e também com o elemento mestre, o que permite o funcionamento da rede sem a necessidade da informação ser enviada ao elemento mestre.

Uma rede distribuída pode apresentar a arquitetura em malha (elementos escravos conectados entre si e ao elemento mestre e com os dados trafegando por diversas rotas), em anel (elementos conectados em um canal de comunicação fechado e com os dados

trafegando por todos os elementos da rede) e em barramento (elementos conectados a um mesmo barramento e com os dados trafegando por todos os elementos da rede), figura 3.10.

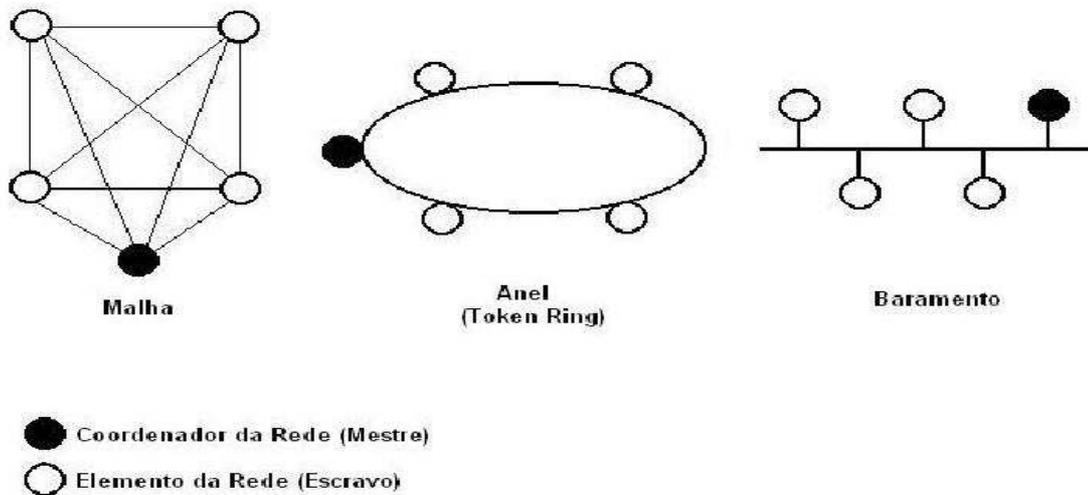


Figura 3.10 – Topologia de rede distribuída (Montebeller, 2006).

Em um projeto de rede de comunicação deve-se levar em conta não só a tecnologia dos equipamentos empregados, mas o meio físico a ser utilizado. A conexão física pode ser feita por cabos, conexão mais usada devido ao baixo custo e facilidade de instalação, por fibra óptica, indicada para transmissões de dados em alta velocidade (Internet, videoconferência), além de ser imune às interferências eletromagnéticas e de radiofrequência e através do ar, neste caso a transmissão pode ser feita por meio de luz infravermelha ou por ondas eletromagnéticas (RF - radiofrequência).

As redes sem fio utilizam o ar como meio de transmissão e estão se tornando cada vez mais populares por não dependerem de cabos ou infra-estrutura, facilitando a implementação deste tipo de rede. Entretanto, possuem desvantagens por sofrerem interferência eletromagnética produzida por outros equipamentos e obstáculos, por terem seu alcance limitado pelo local em que são instaladas, além de possuir uma baixa taxa de transmissão.

### 3.3.3 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO

Para que ocorra a comunicação entre os diferentes equipamentos permitindo a integração entre os mesmos de forma a garantir a troca de informações em uma rede, se faz necessária à utilização de um protocolo de comunicação.

O protocolo de comunicação é um elemento essencial na configuração de um sistema de supervisão e controle, devido ao volume de dados transferidos de um ponto a outro e da possibilidade de os controladores distribuídos terem informações interdependentes (Urzedá, 2006).

Os protocolos podem ser abertos ou proprietários, sendo que hoje existe uma tendência em se trabalhar com um protocolo unificado que possua as principais características dos protocolos existentes.

Entre os protocolos mais utilizados na automação predial e residencial podemos citar: BACnet, MODBUS, EIB, X – 10, etc.

- BACnet: protocolo aberto desenvolvido pela American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) para ser utilizado na automação predial permitindo que vários equipamentos conectados em rede possam compartilhar dados entre si;
- MODBUS: foi desenvolvido pela empresa Modicon e é provavelmente o protocolo mais utilizado na automação industrial devido a sua simplicidade e facilidade de implementação. Baseado na concepção mestre/escravo permite que uma rede contenha até 247 elementos;
- EIB: protocolo industrial originalmente desenvolvido pela SIEMENS apresenta topologia flexível e foi concebido para operar em redes muito grandes, mas com pequena transferência de dados;
- X – 10: Protocolo desenvolvido pela empresa PICO ELETRONICS LTDA, utiliza a rede elétrica para transmitir sinais de controle modulados na frequência da corrente a seus dispositivos. Os sistemas de automação baseados neste protocolo são de baixo custo e de fácil instalação. São susceptíveis a ruídos na rede elétrica no momento de acionamento de cargas (Braga, 2007).

### **3.4 SISTEMAS A SEREM AUTOMATIZADOS**

Em um edifício, os principais sistemas a serem automatizados são: iluminação, sistemas de ar condicionado, detecção de incêndio, sistemas de segurança e controle de acesso, dentre outros.

### 3.4.1 Controle do ar condicionado

A figura 3.11 mostra um sistema de condicionamento de ar responsável pelo controle da temperatura e umidade de um ambiente. O controle desse sistema consiste em manter o conforto térmico do ambiente, proporcionando um ambiente agradável aos ocupantes do mesmo. Para isto o controlador receberá as leituras analógicas dos sensores de temperatura, fluxo de ar e umidade e processará as mesmas atuando no sinal de controle de forma a acionar as saídas que controlam os dampers e ventiladores.

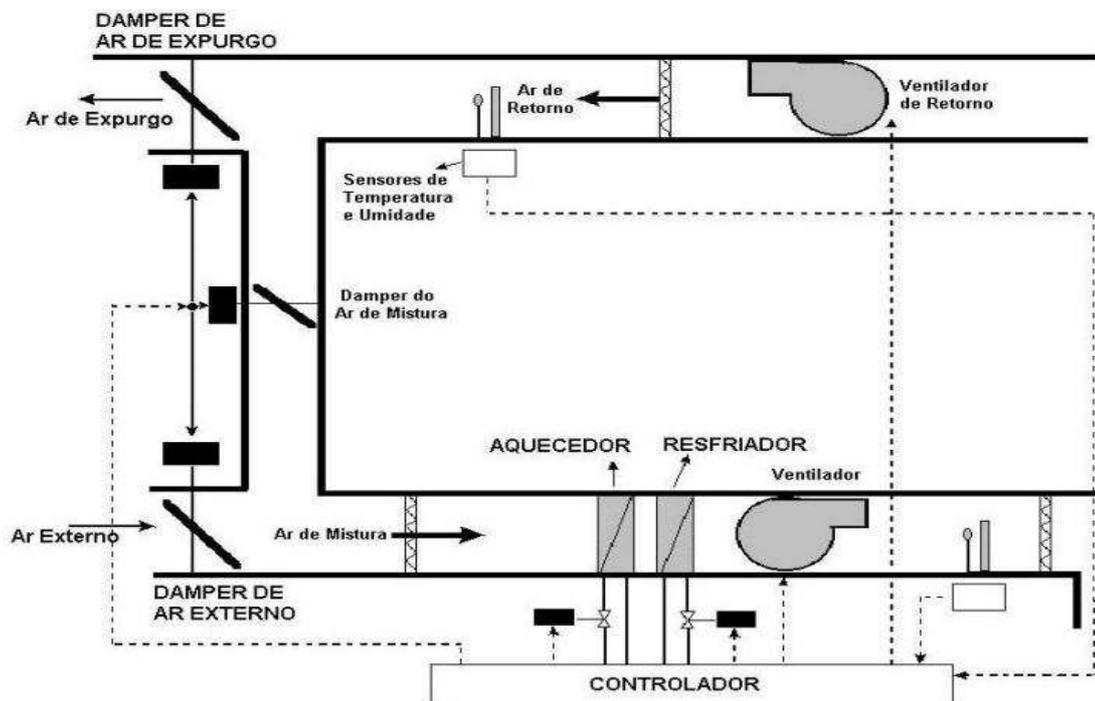


Figura 3.11 – Sistema de ar condicionado (Montebeller, 2006).

### 3.4.2 Controle da iluminação

Os sistemas de controle de iluminação tem por objetivo controlar o nível de iluminação do edifício, fornecendo um ambiente agradável, adequado à necessidade visual dos usuários e ao mesmo tempo diminuindo o consumo de energia elétrica do edifício.

Existem diversas maneiras de se controlar automaticamente um sistema de iluminação, possibilitando aos ocupantes uma sensação de bem estar além de reduzir o consumo de energia. Dentre os mecanismos mais utilizados podemos citar: sensores de presença, minuterias, dimmers e comutadores fotoelétricos, figura 3.12.

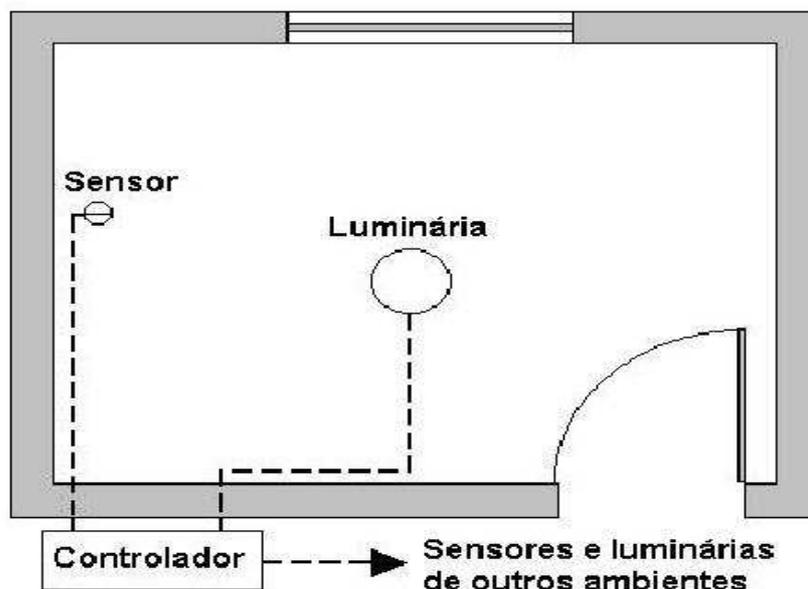


Figura 3.12 – Sistema de controle de iluminação de um ambiente (Montebeller, 2006).

Os sensores de presença são dispositivos que acionam o sistema de iluminação quando detectam uma movimentação no ambiente, desligando o mesmo quando não existir mais movimentação.

Minuterias são interruptores temporizados que desligam as lâmpadas sob seu comando após um tempo determinado. Podem ser utilizadas para controlar a iluminação de áreas que não necessitam de luminosidade constante, como hall social de apartamentos, escadas etc.

O dimmer é um variador de tensão que permite uma variação no fluxo luminoso das luminárias de forma que quanto maior a parcela de luz natural incidente no ambiente, menor seja o uso da iluminação artificial.

Comutadores fotoelétricos são dispositivos que utilizam a energia luminosa como meio de acionamento para emissão de energia elétrica enviando um sinal elétrico através de uma fotocélula conforme a iluminância do ambiente.

### 3.4.3 Controle do alarme de incêndio

Os sistemas de detecção e combate de incêndio são de extrema importância à segurança dos ocupantes da edificação, sendo seu funcionamento realizado de forma independente.

Geralmente, este sistema é composto por uma central de comando, sensores e atuadores interligados entre si, figura 3.13, de forma que a central possa receber e enviar dados aos controladores microprocessados que estão conectados a todos os sensores e atuadores (Braga, 2007).

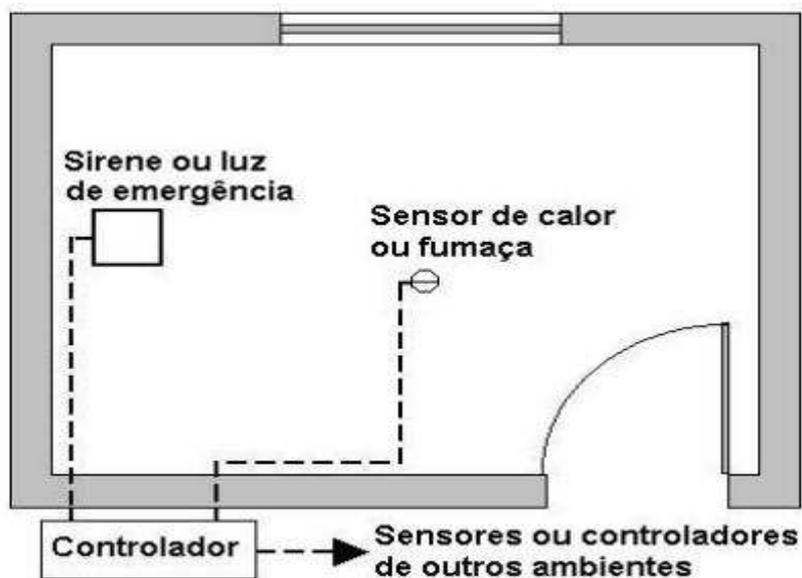


Figura 3.13 – Sistema de alarme contra incêndio ambiente (Montebeller, 2006).

Desta forma quando os sensores detectarem fumaça ou calor, a central de alarme e incêndio adotará as seguintes medidas:

- Identificar os setores afetados;
- Proceder ao desligamento da energia elétrica destes setores;
- Posicionar os elevadores no térreo com as portas abertas e travadas;
- Através de luminosos e indicadores, estabelecer as rotas preferenciais de fuga;
- Executar a insuflação de ar nas escadas de emergência, impedindo que estas sejam invadidas pela fumaça;

#### 3.4.4 Sistemas de segurança e controle de acesso

Um sistema de segurança deve garantir através do uso de centrais de alarmes, câmaras de segurança, sensores de presença, sistemas de identificação dos usuários, dentre outros, a vigilância das diversas áreas do edifício. Para aumentar a eficiência do mesmo recomenda-

se a integração com outros sistemas existentes, como os sistemas de controle de acesso que são responsáveis por liberar ou restringir o acesso dos usuários a algumas áreas.

O sistema de controle de acesso em edifícios inteligentes pode ser feito por meio de sistemas capazes de reconhecer e distinguir pessoas por suas características físicas, figura 3.14.



Figura 3.14 – Sistema biométrico de análise de impressão digital.

### **3.5 AUTOMAÇÃO PREDIAL USANDO REDES SEM FIO**

A automação predial apresenta dois modelos que podem ser assim caracterizados: os que foram implementados juntamente com a construção do edifício, apresentando a vantagem de reduzir os custos com equipamentos e instalação, além de permitir o uso de novas tecnologias e os que foram instalados depois do edifício está pronto, neste caso podendo apresentar custos elevados com a aquisição de cabos, mão-de-obra e equipamentos, além de gerar transtornos devido à necessidade de se quebrar tetos e paredes.

No caso dos edifícios prontos, que geralmente não estão preparados para receber novas tecnologias, o uso de redes sem fio tem se tornado uma opção bastante interessante, pois permite que as mesmas possam ser utilizadas em diversas áreas do edifício, permitindo ao

usuário rapidez de instalação, maior mobilidade, liberdade para os pontos da rede e sem a necessidade de se quebrar paredes e/ou pisos.

Comparando-se uma instalação wireless com uma comum a mesma apresenta as seguintes vantagens:

- Sensores e atuadores possuem uma maior mobilidade, facilitando a instalação e realocação dos mesmos;
- Meio de transmissão não susceptível a corrosão;
- Sensores e atuadores possuem baixo consumo;
- A instalação da rede é rápida e de fácil configuração;
- Redução no custo da instalação;
- Sensores e atuadores podem ser instalados em ambientes não preparados para automação;

A figura 3.15 apresenta um exemplo do uso de sensores e atuadores wireless na iluminação de ambientes.

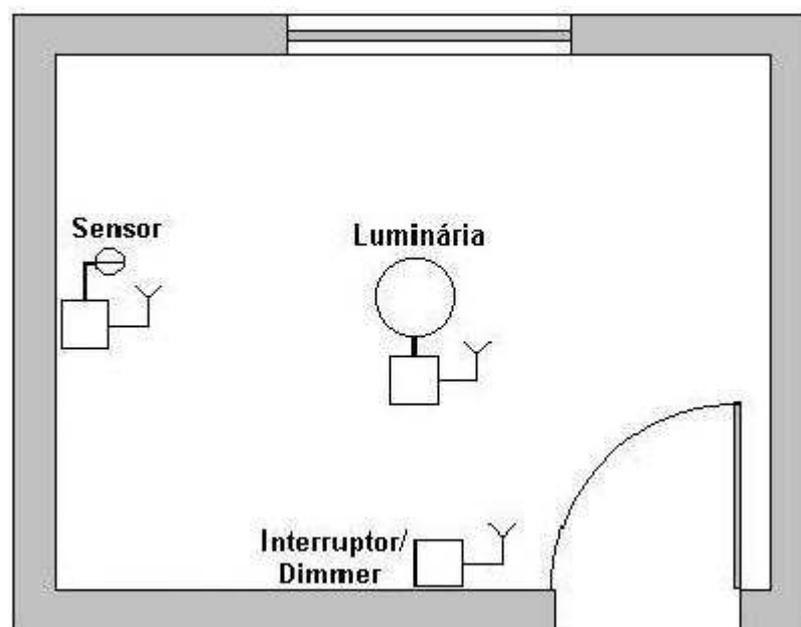


Figura 3.15 - Uso de sensores e atuadores wireless (Montebeller, 2006).

Neste exemplo, cada dispositivo possui um módulo RF com um número de identificação que permite que eles se comuniquem entre si. O controle da luminária é feito no módulo

interruptor onde o usuário estabelece qual a intensidade luminosa adequada para o ambiente, sendo este valor enviado à luminária. O módulo sensor mede e transmite a intensidade luminosa do ambiente para o interruptor que enviará a nova intensidade luminosa para a luminária de forma a compensar variações de luz externa. Os sensores e atuadores são alimentados por baterias e podem ser instalados em qualquer ponto do ambiente.

Pelo que vimos neste capítulo podemos verificar a importância da utilização de uma rede de sensores sem fio na automação predial, principalmente em prédios que não estão preparados para receber novas tecnologias, diminuindo assim os gastos com mão de obra, aquisição de equipamentos e diminuindo os transtornos gerados pela necessidade de se quebrar tetos e/ou paredes.

No próximo capítulo serão descritos a metodologia desenvolvida para o controle da temperatura do ambiente estudado, detalhando todo o hardware e software utilizado, além de descrever a rede ZigBee formada que juntamente com as técnicas de controle adotadas contribuirão para a manutenção da temperatura do ambiente dentro dos padrões de conforto térmico e com o mínimo gasto de energia possível.

## 4. AUTOMAÇÃO DO AR CONDICIONADO

### 4.1 DESCRIÇÃO DO AMBIENTE

No sistema térmico utilizado neste trabalho, figura 4.1, pode-se observar a disposição dos aparelhos de ar condicionado, que juntamente com os medidores de energia e os sensores de temperatura formarão uma rede ZigBee gerenciada por um computador coordenador rodando um software supervisor.

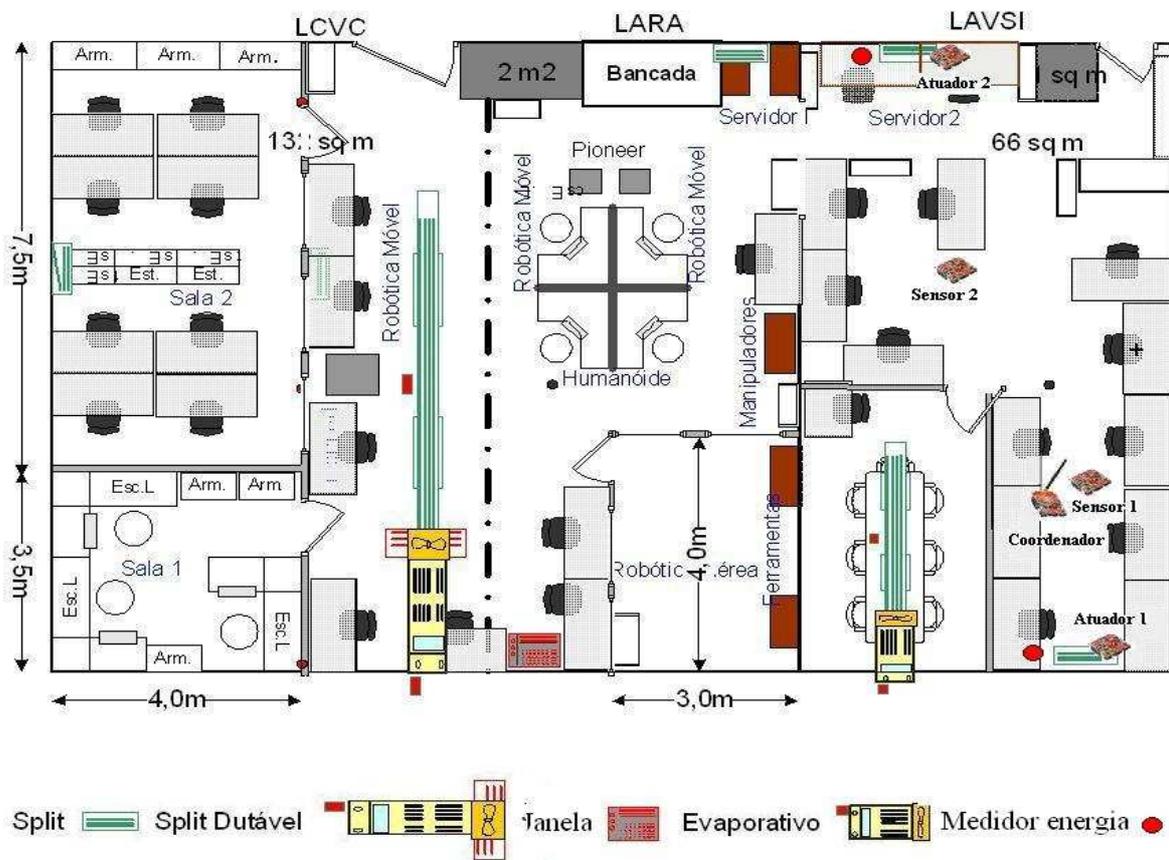


Figura 4.1 - Sistema térmico.

Foram utilizados dois aparelhos de ar condicionado do tipo *split* com capacidade 22.000 BTU/h cada, sendo que cada aparelho é composto por uma unidade interna, também chamada de evaporadora e que é responsável por insuflar o ar frio na sala e a unidade externa, também chamada de condensadora, responsável por resfriar o gás que retorna da unidade evaporadora.

## 4.2 FENÔMENOS ENVOLVIDOS

Ao se desenvolver um controle de temperatura deve-se buscar manter a temperatura do ambiente confortável e com o menor gasto de energia possível e para isto é importante analisar os fenômenos envolvidos.

### 4.2.1 Condução

Considere um corpo de material sólido que se encontre todo a uma temperatura “ $\theta_1$ ” e que em determinado instante a temperatura de um ponto interior do mesmo seja elevada e mantida no valor “ $\theta_2$ ”, onde  $\theta_2 > \theta_1$ . Após um intervalo de tempo poderemos perceber que a temperatura da extremidade que apresenta a temperatura “ $\theta_1$ ” também começara a aumentar, pois as partículas que formam o material receberam energia passando a se agitar com maior intensidade, transferindo essa agitação de partícula a partícula. O modo como o calor é transferido através de um meio material, de uma molécula ou átomo para sua vizinhança é conhecido como condução (Bejan, 1996).

O fluxo de calor transferido através de condução pode ser calculado pela equação 11:

$$\dot{q} = -kA \frac{d\theta}{dx} \quad (11)$$

onde:

- $\dot{q}$  = taxa de transferência de calor, em Btu/hr ou W;
- $k$  = condutividade térmica, em Btu/(h - ft - F) ou W/( m - C);
- $A$  = área normal ao fluxo de calor, ft<sup>2</sup> ou m<sup>2</sup>;
- $\frac{d\theta}{dx}$  = gradiente térmico;

### 4.2.2 Convecção

Convecção é o processo de transferência de calor, nos líquidos ou nos gases, executado pelo escoamento de fluido. O processo de transferência de calor se dá quando uma certa massa de um fluido é aquecida fazendo com que a mesma se mova mais rapidamente e ocupe um volume maior, o que a torna menos densa. Pelo fato dessa massa se tornar menos densa ela sofrera um movimento de ascensão ocupando o lugar das massas do fluido que estão a uma temperatura inferior (mais densa). Esse processo se repete enquanto o aquecimento é mantido dando origem às chamadas correntes de convecção.

Assim como na condução, a transmissão de calor entre um fluido e uma parede sólida é regulada por uma equação, equação 12.

$$\dot{q} = hA\Delta\theta \quad (12)$$

onde:

- $\dot{q}$  = taxa de transferência de calor, em Btu/hr;
- $h$  = coeficiente de transferência de calor, em Btu/(hr - ft<sup>2</sup> - F) ou W/(m<sup>2</sup> - s);
- $A$  = área de superfície, ft<sup>2</sup> ou m<sup>2</sup>;
- $\Delta\theta$  = diferença de temperatura, em °F ou °C;

### 4.2.3 Radiação

A radiação pode ser definida como o fluxo de radiação eletromagnética emitida por uma entidade material (corpo sólido, mistura de gases, etc) devida à temperatura absoluta finita da entidade. A temperatura e a radiação emitida são reflexos do grau de agitação do material (Bejan, 1996).

Diferentemente das outras modalidades de transmissão citadas, a radiação não requer a presença de um meio material para sua realização podendo a mesma ocorrer no vácuo ou através de meios transparentes.

Todos os corpos emitem radiação, entretanto a composição espectral da radiação emitida varia de acordo com a temperatura. Para cada caso podemos quantificar em termos de taxas de transferência de calor os processos de transferência de calor, conforme equação 13.

$$q_{12} = \frac{\sigma(\theta_1^4 - \theta_2^4)}{\frac{1-\epsilon_1}{A_1 \epsilon_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\epsilon_2}{A_2 \epsilon_2}} \quad (13)$$

onde:

- $\sigma$  = constante de Boltzmann,  $0.1713 \times 10^{-8}$  Btu/(h - ft<sup>2</sup> - R<sup>4</sup>) ou  $5.673 \times 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup> - K<sup>4</sup>);
- $\theta$  = temperatura absoluta, R ou K;
- $\epsilon$  = emitância;
- $A$  = área de superfície, ft<sup>2</sup> ou m<sup>2</sup>;
- $F$  = fator de configuração;

### 4.3 HARDWARE

Para o desenvolvimento deste projeto foram implementados alguns dispositivos que serão detalhados a seguir:

#### 4.3.1 Coordenador

O módulo coordenador (Coordinator) é responsável pela interligação entre os nós *End Device* e o computador, Figura 4.2, recebendo do nó dos sensores os dados referentes à temperatura dos ambientes e retransmitindo a informação processada para o nó dos atuadores.

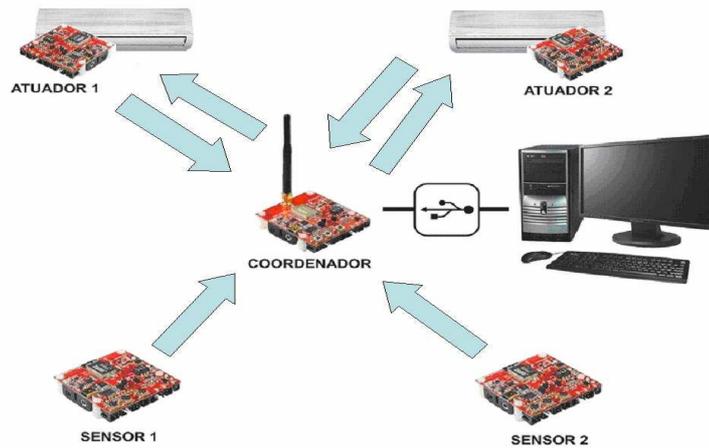


Figura 4.2 - Módulo coordenador.

### 4.3.2 Módulo de controle

O módulo de controle tem a função de controlar a placa de acionamento instalada na unidade evaporadora, e dependendo dos valores de temperatura do ambiente e da temperatura desejada (*setpoint*) enviará um sinal de comando para ligar ou desligar o compressor.

### 4.3.3 Módulo de acionamento

O módulo de acionamento tem a função de acionar o compressor dos aparelhos de ar condicionado do sistema térmico. Para o trabalho em questão, como a carga a ser acionada são aparelhos de ar condicionado que operam com tensão de alimentação de 220 V, 60 Hz, foi utilizado um relé, conforme figura 4.3.

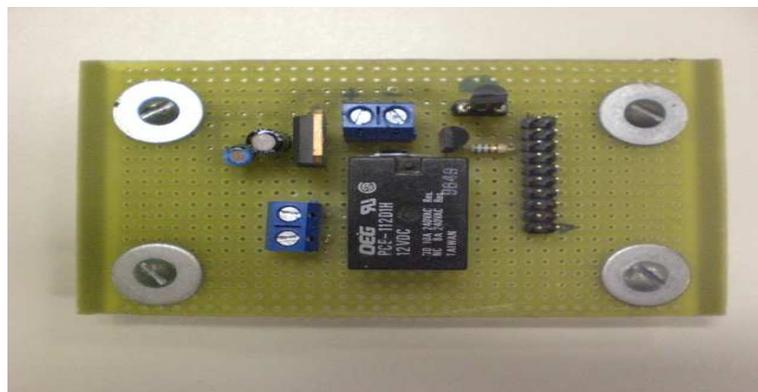


Figura 4.3 - Circuito de acionamento.

#### **4.3.4 Módulo sensor**

O módulo sensor é responsável pela captação dos sinais analógicos referentes às temperaturas lidas pelos sensores, enviando as mesmas para o módulo coordenador. Os sensores estão programados para realizar a leitura do valor da temperatura a cada 10 segundos e após enviar a leitura entrar em modo sleep. O sensor de temperatura LM73 opera na faixa de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+150^{\circ}\text{C}$ , precisão de  $0,25^{\circ}\text{C}$  e apresenta um baixo consumo (modo ativo =  $320\ \mu\text{A}$ ).

#### **4.3.5 Medidor de energia**

Como o objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de controle inteligente para os aparelhos de ar condicionado de forma a reduzir o consumo de energia, mantendo a sensação de conforto térmico, durante a realização dos experimentos, além da temperatura da sala foram registrados os consumos em Wh dos aparelhos de ar condicionado utilizados. O monitoramento do consumo de energia dos aparelhos de ar condicionado foi realizado através de medidores Landis&Gyr modelo ZMD-128, sendo a comunicação com os mesmos feita através de um conector óptico. Os valores de consumo são visualizados em tempo real através de um software do fabricante.

### **4.4 SOFTWARE SUPERVISÓRIO**

Softwares SCADA são responsáveis pela aquisição dos dados de determinados equipamentos (sensores, atuadores, controladores programáveis e outros) para o computador, por sua organização, utilização e gerenciamento, mostrando ao operador do sistema o estado dos circuitos em tempo real.

As variáveis do processo devem ser claramente apresentadas ao operador por meio de telas específicas que podem ser visualizadas durante a navegação no módulo tempo real, permitindo aos operadores controlar e supervisionar toda a planta (Galo e Ribeiro, 2007).

Neste trabalho, no computador supervisório há uma implementação em Simulink/Matlab<sup>®</sup> que faz o processamento dos dados e realiza o controle da temperatura do ambiente por meio do software implementado no módulo dos atuadores e que são responsáveis por

acionar o compressor através de um sinal PWM enviado pelo nó coordenador. Essa implementação no Simulink<sup>®</sup> faz uso de uma porta COM permitindo assim a comunicação entre a USB e o MATLAB.

Através do sistema supervisorio desenvolvido é possível acompanhar em tempo real a temperatura em cada um dos setores, além do status dos atuadores e o valor do sinal de PWM.

#### 4.5 REDE IMPLEMENTADA

Foi desenvolvida uma rede de sensores e atuadores sem fio, por meio do MesheBean, implementados no laboratório LAVSI, de forma a garantir o conforto térmico neste ambiente com a maior economia de energia possível.

A rede definida para implementação deste projeto é constituída por dois nós sensores, dois nós atuadores e um nó coordenador conectados em forma de estrela, onde os módulos possuem endereço fixo para envio e captação de dados, figura 4.4.

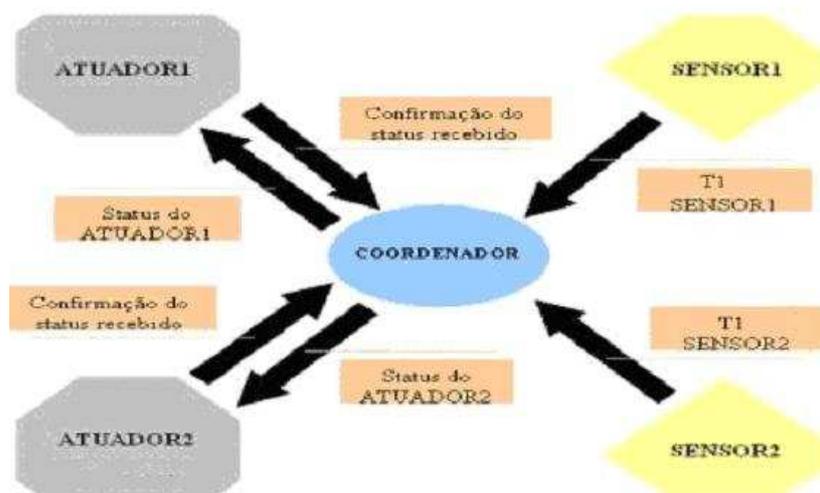


Figura 4.4 - Rede configurada (Mateus Filho e Dias, 2008).

A configuração dos nós foi feita de forma que o nó sensor apenas transmitisse os dados referentes à temperatura lida para o nó coordenador e este retransmitisse a informação processada para o nó atuador. O endereçamento e a definição da função do módulo são definidos por meio do valor atribuído aos *DIP Switches*, conforme mostrado na tabela 4.1 abaixo.

Tabela 4.1 - Configuração de endereços dos módulos da rede.

| Coordenador | Sensor 1 | Sensor 2 | Atuador 1 | Atuador 2 |
|-------------|----------|----------|-----------|-----------|
| 0           | 1        | 2        | 3         | 4         |

Para a configuração dos módulos foi utilizada a aplicação *lowpower.srec* que foi dividida em três arquivos principais: *lowpower.c*, *coordinator.c* e *enddevice.c*.

#### 4.5.1 Lowpower.c

É a parte inicial comum para todos os módulos e é responsável por configurar a rede e determinar o funcionamento de cada módulo, figura 4.5. O estado inicial *APP\_INITIAL\_STATE* do módulo possui uma única função, a *initApp()*, que realiza a leitura dos DIP switches e atribui este valor ao endereço do módulo na rede dizendo se o mesmo irá funcionar como coordenador, neste caso invocando a função *appCoordinatorInit()* do arquivo *coordinator.c* ou como *enddevice*, neste caso invocando a função *appEndDeviceInit()* do arquivo *enddevice.c*.

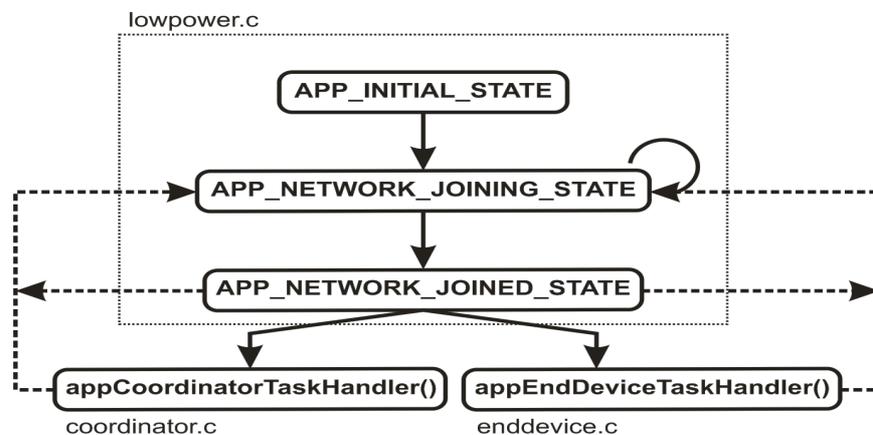


Figura 4.5 - Diagrama de estados do aplicativo embarcado (Queiroz e Azevedo, 2009).

Após estas configurações, a função *initApp()* invoca a função *appOpenButtons(NULL, buttonReleased)* que aguarda um dos botões do módulo *MeshBean* ser pressionado e liberado para atualizar o estado da estrutura. Se o botão pressionado for o botão 1, o estado é atualizado para *APP\_NETWORK\_JOINING\_STATE*, se o botão pressionado for o 2 e o dispositivo estiver trabalhando como *end device*, o estado do dispositivo passa a ser *DEVICE\_AWAKENING\_STATE* (Queiroz e Azevedo, 2009).

No APP\_NETWORK\_JOINING\_STATE, a função responsável pela requisição de criação da rede é invocada (startNetwork()) fazendo uma requisição da rede conforme as configurações passadas por um ponteiro de uma estrutura. A função de *callback* é uma destas configurações e quando chamada recebe o status da conexão. Se o status for ZDO\_SUCCESS\_STATUS, o estado do dispositivo é atualizado para APP\_NETWORK\_JOINED\_STATE, caso o status seja ZDO\_FAIL\_STATUS, o estado da rede se mantém em APP\_NETWORK\_JOINING\_STATE realizando nova tentativa de criação da rede. Se por algum motivo ocorrer uma falha na rede a função ZDO\_MgmtNwkUpdateNotf () é chamada para restabelecer a comunicação.

No estado APP\_NETWORK\_JOINED\_STATE, se o módulo estiver configurado como coordenador a Task Handler appCoordinatorTaskHandler() passará a administrar os estados do módulo, caso contrario será chamada a Task Handler appEndDeviceTaskHandler.

#### **4.5.2 Coordinator.c**

É a parte do aplicativo específica para o módulo coordenador da rede configurando os parâmetros de comunicação serial com o computador e de mensagens enviadas pela rede ZigBee.

A *Task Handler* do módulo coordenador possui um único estado, o DEVICE\_ACTIVE\_IDLE\_STATE, iniciando o timer para que a cada 2 segundos os dados coletados pela rede possam ser enviados ao computador.

Os dados enviados pelo aplicativo supervisorio provocam interrupções *byte a byte* no módulo coordenador invocando a função de *callback* definida nos parâmetros de inicialização da UART, a appReadByteEvent(). O software supervisorio envia dois sinais de controle, atribuídos pelo coordenador às variáveis atuador\_1 e atuador\_2.

A tabela 4.2 descreve os sinais de controle que podem ser recebidos pelo coordenador através da UART (Queiroz e Azevedo, 2009).

Tabela 4.2 - Sinais de controle recebidos pela UART no coordenador (Queiroz e Azevedo, 2009).

| Atuador 1 | Atuador 2 | Comando para split 1 | Comando para split 2 |
|-----------|-----------|----------------------|----------------------|
| 0         | 0         | Desligar             | Desligar             |
| 0         | 1         | Desligar             | Ligar                |
| 1         | 0         | Ligar                | Desligar             |
| 1         | 1         | Ligar                | Ligar                |

### 4.5.3 Enddevice.c

É a parte do aplicativo específico para os módulos sensores e atuadores. Inicialmente a função `appEndDeviceInit()` é chamada pelo estado inicial comum a todos os módulos, observando o valor do endereço atribuído pelos *DIP Switches*. Se o endereço atribuído for igual a três ou quatro, o módulo irá funcionar como dispositivo atuador, se o endereço atribuído for igual a um ou dois, o módulo irá funcionar como dispositivo sensor.

O diagrama de estados do funcionamento deste tipo de dispositivo pode ser observado na figura 4.6.

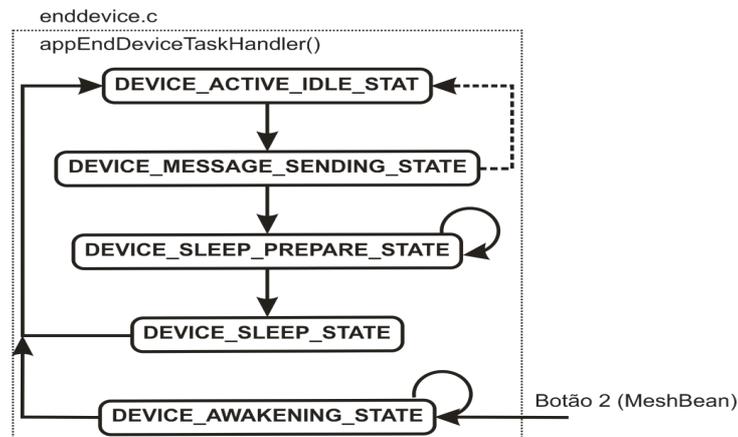


Figura 4.6 - Diagrama de estado do dispositivo configurado como *enddevice* (Queiroz e Azevedo, 2009).

No estado `DEVICE_ACTIVE_IDLE_STATE` do arquivo *enddevice.c* ocorre a realização da leitura das medidas de temperatura que são originadas do sensor LM73 disponível no kit de desenvolvimento.

Após a leitura do valor da temperatura ocorre a atualização do dispositivo que passará para o estado `DEVICE_MESSAGE_SENDING_STATE`. Neste estado ocorre a leitura do

estado da porta de atuação (se o dispositivo estiver configurado como atuador) e a atualização da informação na variável da estrutura de mensagem, sendo os dados enviados ao coordenador. Se a mensagem for enviada com sucesso o estado do dispositivo é atualizado para `DEVICE_SLEEP_PREPARE_STATE`, preparando o dispositivo para entrar em modo *sleep*, caso contrário, o dispositivo retorna ao estado `DEVICE_ACTIVE_IDLE_STATE` realizando novas leituras e uma nova tentativa de envio (Queiroz e Azevedo, 2009).

Os módulos atuadores não chamam a função `DEVICE_SLEEP_PREPARE_STATE`, pois precisam manter o valor da porta de saída para manter o sistema de ar condicionado ligado ou desligado.

Os módulos sensores que estão no modo `DEVICE_SLEEP_PREPARE_STATE` solicitam a camada ZDO do BitCloud para entrar em modo *sleep* e em caso de um retorno positivo, tem o seu estado atualizado para `DEVICE_SLEEP_STATE`, caso contrário, permanecem no estado `DEVICE_SLEEP_PREPARE_STATE` ocorrendo nova requisição para o modo *sleep*.

O estado `DEVICE_SLEEP_STATE` só é encerrado quando o timer configurado para manter o dispositivo no modo *sleep* gerar uma interrupção, o que fará com que ocorra a abertura dos periféricos do microcontrolador nos módulos sensores fazendo com que o dispositivo volte ao estado `DEVICE_ACTIVE_IDLE_STATE`.

No próximo capítulo serão detalhados os procedimentos adotados para implementação dos controladores utilizados nos experimentos, bem como os resultados preliminares obtidos e que foram utilizados para a submissão de artigos em congresso na área.

## 5. CONTROLE FUZZY DA TEMPERATURA

A sensação térmica humana está relacionada ao equilíbrio térmico corporal, equilíbrio este que pode ser influenciado por algumas variáveis físicas (temperatura do ar, velocidade do ar, temperatura média radiante e umidade relativa) e variáveis pessoais (nível de atividade e vestimenta).

Segundo a norma de conforto térmico ISO 7730, estas variáveis influem na sensação de conforto térmico e conseqüentemente no consumo de energia. Quando as mesmas são medidas ou estimadas podem nos fornecer através de cálculo a sensação térmica para o corpo, PMV (Predicted Mean Vote) e a percentagem de pessoas insatisfeitas com o ambiente, PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), figura 5.1.

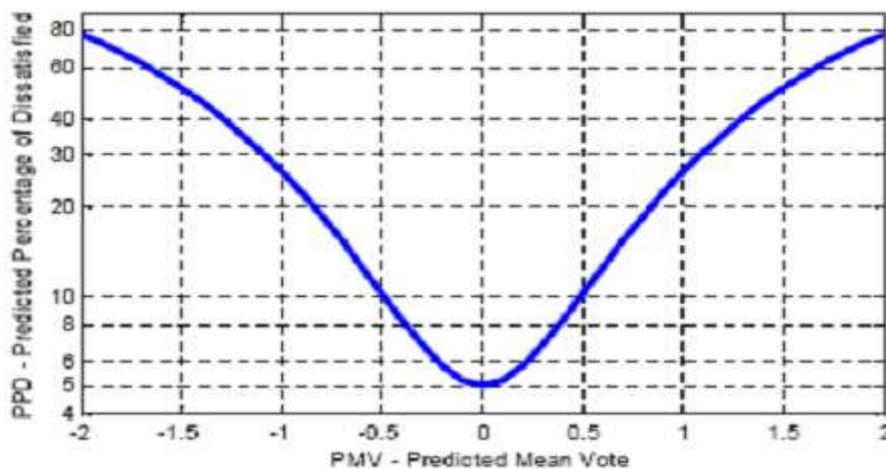


Figura 5.1 - Relação entre o PMV e o PPD (Gallo and Ribeiro, 2007).

Para este trabalho, consideraremos apenas o controle de temperatura como indicativo do conforto térmico. A temperatura é, de fato, o fator predominante na norma de conforto térmico. A umidade relativa do ar tem pequena influência nas faixas usuais medidas em Brasília. A velocidade do vento é fator importante, mas será considerada como adequada. Temperatura média radiante é considerada constante, bem como nível de atividade e vestimenta são assumidos como adequados à estação do ano.

Para verificar a eficiência dos controladores no que se refere à manutenção do conforto térmico com a conseqüente redução do consumo de energia foram utilizados o controlador

*on-off* (base do controle de aparelhos de ar condicionado) e o controlador *fuzzy* (utilizados em sistemas dinâmicos complexos) (Santos, 2005).

A redução do consumo de energia é obtida através da diminuição do tempo de funcionamento dos aparelhos de ar condicionado e da quantidade de vezes em que o mesmo é acionado.

## 5.1 CONTROLE ON-OFF

O controlador *on-off* é um dos controladores mais simples de ser implementado, sendo por isso bastante utilizado, para o controle de temperatura em ambientes prediais. No trabalho em questão, o controlador compara a temperatura média de saída com o valor de referência, sendo que, se a temperatura de referência for maior que a temperatura ambiente e se a diferença entre elas estiver  $0,5^{\circ}\text{C}$  acima, coloca-se o sinal de controle em zero (baixo). Se a temperatura de referência for menor que a temperatura ambiente e se a diferença entre elas estiver  $0,5^{\circ}\text{C}$  abaixo, o atuador age próximo ao seu ponto limite de operação (alto), equação 15.

$$u = \begin{cases} \text{baixo} & \text{se } t_{\text{ref}} > t_{\text{media}} \text{ e } t_{\text{ref}} - t_{\text{media}} > 0,5 \\ \text{alto} & \text{se } t_{\text{ref}} < t_{\text{media}} \text{ e } t_{\text{ref}} - t_{\text{media}} < -0,5 \end{cases} \quad (14)$$

## 5.2 CONTROLE FUZZY

Sistemas de controle *fuzzy* têm como objetivo alcançar robustez, tratabilidade e baixo custo sem um modelamento matemático elaborado.

Um controlador *fuzzy* tem como princípio modelar um especialista, o qual é capaz de controlar bem o processo. Ao invés de lidar com uma formulação matemática do processo, imita-se o especialista. Para a construção de um modelo baseado no conhecimento das ações de controle de um especialista, há a necessidade de uma estrutura matemática apropriada (Urzedda, 2006).

Como a leitura dos sensores e dos sinais esperados pelos atuadores do sistema de controle não são nebulosos, necessita-se de elementos adicionais entre o controlador nebuloso e o

processo a ser controlado, sendo os mesmos denominados de *fuzzyficador* e *defuzzyficador* e estão posicionados na entrada e na saída do sistema de controle respectivamente.

A base de conhecimento consiste de uma base de regras, de maneira a caracterizar a estratégia de controle. Na base de regras ficam armazenadas as definições sobre discretização e normalização dos universos de discurso, e as definições das funções de pertinência dos termos nebulosos, sendo a base de regras formada por estruturas do tipo: SE <premissa> ENTÃO <consequência>, sendo que, essas regras, juntamente com os dados de entrada, são processadas pelo procedimento de inferência, o qual infere as ações de controle de acordo com o estado do sistema (Urzedo, 2006).

Um conjunto de regras adequado além de garantir o conforto térmico pode racionalizar o consumo de energia elétrica para o condicionamento de ar em instalações prediais.

Com base nos dados iniciais e no modelo de esquema geral de um sistema de controle *fuzzy*, foram definidas duas variáveis de entrada: erro e setpoint e uma variável de saída: saída do PWM, figura 5.2.

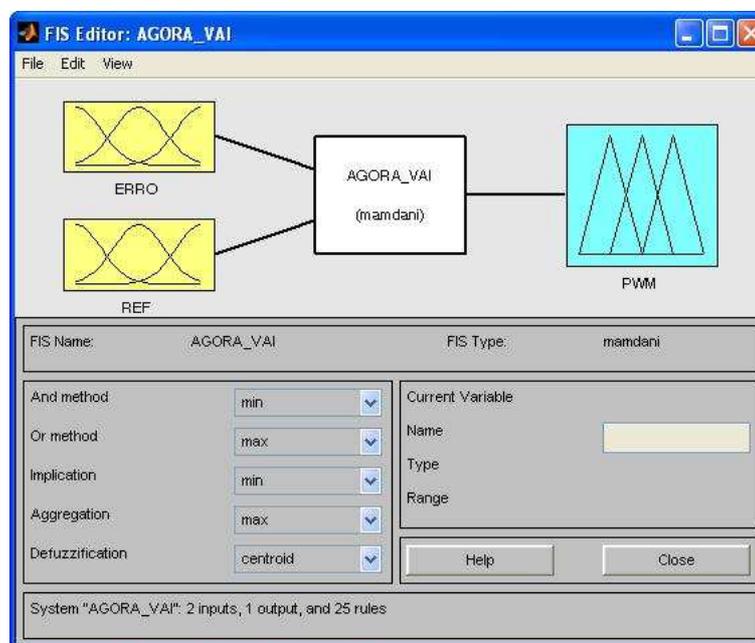


Figura 5.2 - Controlador *fuzzy* implementado.

Através do erro é possível verificar o quão distante do valor desejado está a temperatura da sala controlada, utilizando-se funções trapezoidais para emular o comportamento do

especialista em controle térmico; o setpoint acrescenta a saída um ganho proporcional à variação da referência, contribuindo para a manutenção do erro em regime permanente para qualquer valor de temperatura (Santos, 2005).

O modelo Mandani foi adotado para o sistema de inferência *fuzzy* e apresenta as seguintes características:

- Método de cálculo de AND: mínimo;
- Método de cálculo de OR: máximo;
- Método de cálculo de implicação: mínimo;
- Método de cálculo de agregação: máximo;
- Método de *defuzzificação*: centróide;

### 5.2.1 Função de fuzzyficação para a variável de entrada erro

Os conjuntos *fuzzy* para a diferença entre a temperatura de referência e a temperatura do ambiente (erro) apresentam cinco funções de pertinências trapezoidais e têm como limite inferior -35 °C e superior de 35 °C.

A figura 5.3 ilustra o conjunto *fuzzy* gerado para a variável de entrada erro. Definiu-se que os valores lingüísticos possíveis para esta variável serão: NEG (negativo), PN (pouco negativo), ZERO, PP (pouco positivo) e POS (positivo).

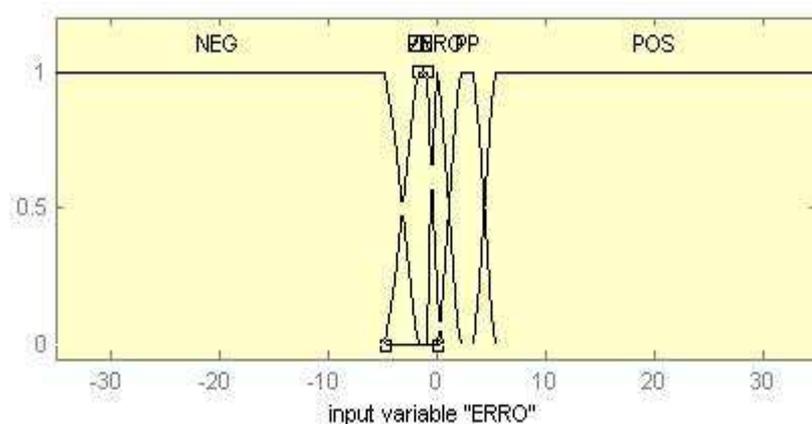


Figura 5.3 - Funções de pertinência da variável de entrada erro.

## 5.2.2 Função de fuzzyficação para a variável de entrada setpoint

O mesmo se aplica para a variável de entrada setpoint, que também é composta por cinco funções de pertinência trapezoidais e seus conjuntos fuzzy apresentam as seguintes características: limites inferior de 0 °C e superior de 35 °C .

A figura 5.4 ilustra o conjunto *fuzzy* gerado para a variável de entrada *setpoint*. Definiu-se que os valores lingüísticos possíveis para esta variável serão: MB (muito baixa), B (baixa), M (média), A (alta), MA (muito alta).

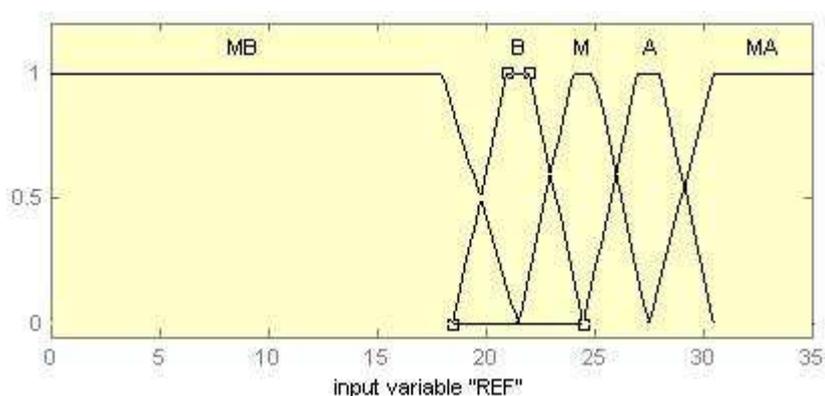


Figura 5.4 - Funções de pertinência da variável de entrada setpoint.

## 5.2.3 Regras de inferência para o controle da temperatura

A lógica *fuzzy* necessita de regras para definir seu comportamento definindo as condições esperadas durante o processo e as atitudes a serem tomadas para cada condição, substituindo assim as fórmulas matemáticas normalmente utilizadas (Barg, 2002).

Tabela 5.1 - Tabela de regras *fuzzy*.

| Erro x T <sub>ref</sub> | MB | B  | M  | A  | MA |
|-------------------------|----|----|----|----|----|
| NEG                     | A  | A  | A  | A  | A  |
| PN                      | M  | M  | M  | M  | M  |
| ZERO                    | M  | M  | M  | M  | M  |
| PP                      | MB | MB | MB | MB | MB |
| POS                     | MB | MB | MB | MB | MB |

A tabela *fuzzy* que representa o comportamento do sistema de controle da temperatura do ambiente é construída analisando-se os conjuntos *fuzzy* para a diferença

entre a temperatura de referência e a temperatura do ambiente (erro), em função do setpoint e é composta por 25 regras, conforme tabela 5.1.

O funcionamento das regras pode ser visualizado através da opção Rule Viewer do Matlab™ conforme figura 5.5 abaixo.

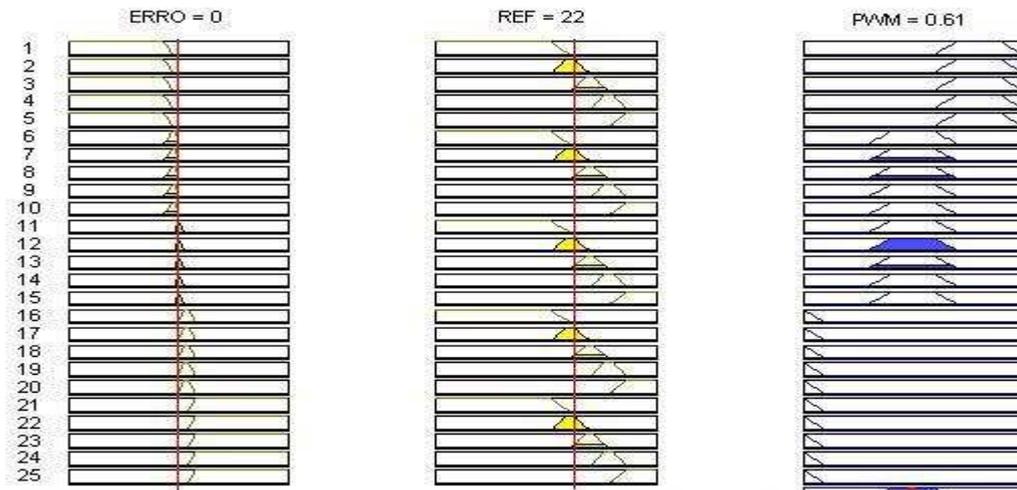


Figura 5.5 - Visualização das regras do controlador *fuzzy*.

#### 5.2.4 Função de defuzzyficação para a variável de saída pwm

Como parte final do controlador *fuzzy* tem-se a etapa de *defuzzyficação*. A partir da variável lingüística de controle se obtém o valor para qual o controlador executará a ação de controle desejada. No caso deste trabalho é o acionamento dos aparelhos de ar condicionado.

Os conjuntos *fuzzy* adotados para a variável de saída são representados por cinco funções trapezoidais e apresenta como limite inferior -0.1 e superior de 1.2.

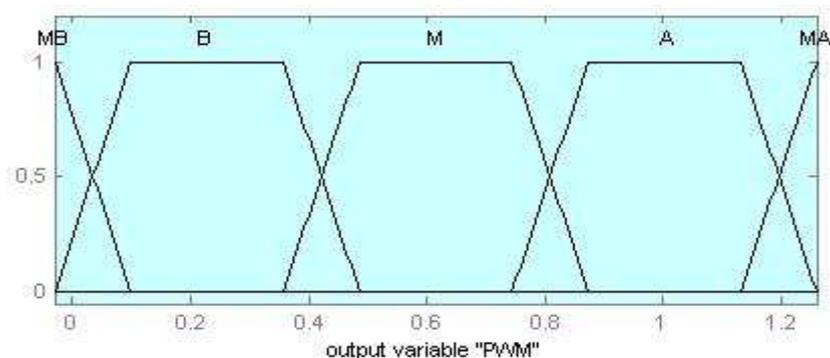


Figura 5.6 - Funções de pertinência da variável de saída pwm.

A figura 5.6 ilustra o conjunto *fuzzy* gerado para a variável de saída pwm. Definiu-se que os valores lingüísticos possíveis para esta variável serão: MB (muito baixo), B (baixo), M (médio), A (alto), MA (muito alto).

A figura 5.7 apresenta as características selecionadas para o controlador *fuzzy* implementado, onde através da mesma é possível ver a relação entre as variáveis de entrada erro e *setpoint* com a variável de saída pwm.

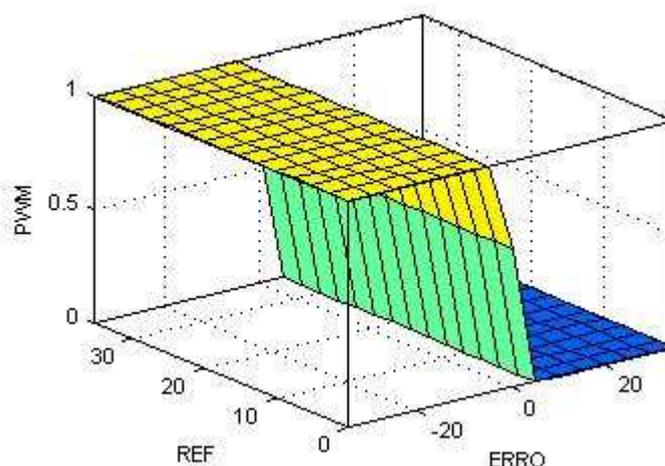


Figura 5.7 - Relação entre erro, referência e saída pwm.

Através da figura pode-se observar que para um erro pouco positivo ou positivo, em que temos a temperatura de referência maior que a temperatura do ambiente, independentemente da temperatura de referência o valor do PWM será muito baixo, pois a temperatura do ambiente vai estar abaixo da temperatura de referência. Para um valor de erro zero, ou seja, temperatura de referência igual à temperatura do ambiente, o valor do PWM será médio, e por fim para um valor de erro pouco negativo ou negativo em que a temperatura de referência é menor que a temperatura do ambiente, o valor do PWM poderá ser médio e alto respectivamente.

Através do controlador *fuzzy* implementado acima foram realizados alguns testes no ambiente utilizado para validação dos mesmos (LAVSI – UNB), sendo os resultados utilizados para submissão de alguns artigos a congressos na área.

Em um dos artigos é feita uma comparação entre o controlador *fuzzy* e o controlador *on-off* (Ferreira Júnior e Bauchspiess, 2009). Os testes foram divididos em duas etapas, onde na

primeira etapa a temperatura de referência foi mantida constante durante todo o experimento no valor de 24,0 °C, já no segundo teste, com o objetivo de verificar o comportamento transitório dos controladores a temperatura foi fixada inicialmente em 24,0 °C e durante o experimento a mesma será modificada para 23,0 °C. Ambos os testes tiveram o mesmo período de duração, ou seja, 45 minutos.

Analisando os resultados obtidos, pode-se verificar em ambos os testes que os controladores implementados conseguiram atingir o objetivo proposto que era o de manter a temperatura do ambiente dentro dos padrões de conforto térmico com erros inferiores a  $\pm 1,0$  °C, sendo que o controlador *fuzzy* o conseguiu com um menor consumo de energia, tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Consumo total do sistema.

| Tipo de controlador | Consumo primeiro teste (kWh) | Consumo Segundo teste (kWh) |
|---------------------|------------------------------|-----------------------------|
| On-off              | 1,64                         | 1,80                        |
| Fuzzy               | 1,36                         | 1,51                        |

Em um outro artigo é feita uma comparação entre o controlador *on-off* implementado e o controle próprio dos aparelhos de ar condicionado (Mateus Filho et al 2009).

Para a realização dos experimentos foi adotada como temperatura de referência o valor de 22,0 °C e todos os experimentos foram realizados entre 08:00 e 17:00. O ambiente adotado para realização dos testes é o mostrado na figura 4.1. Foram realizados dois testes: no primeiro teste os sensores foram posicionados no centro de cada setor, já no segundo teste os sensores foram posicionados no retorno dos aparelhos de ar condicionado, que é onde fica o sensor dos aparelhos. Além da temperatura dos setores também foi registrado o consumo dos aparelhos.

Pode-se verificar no primeiro teste que com o controlador *on-off* implementado a temperatura do ambiente permaneceu próximo à temperatura de referência, com erros inferiores a  $\pm 1,0$  °C, e o consumo dos aparelhos foi de 20,77 kWh, o mesmo não acontece com o controle próprio do aparelho, que neste caso apresentou erros superiores a  $\pm 1,0$  °C e o consumo dos aparelhos foi superior, registrando 31,47 kWh.

Através do segundo experimento pode-se observar que com o controlador *on-off* implementado o setor 1 conseguiu manter a temperatura dentro do valor de referência, com erros inferiores a  $\pm 1$  °C, já o setor 2 apresentou erros superiores a  $\pm 2$  °C. Isto pode ser explicado pelo fato de haver uma abertura interligando os laboratórios LAVSI e LARA, que não possuía aparelho de refrigeração instalado, aumentando a troca de calor entre os mesmos e conseqüentemente aumentando o tempo de funcionamento do aparelho situado neste setor. O consumo registrado pelos aparelhos foi de 26,21 kWh. Com o controle próprio dos aparelhos pode-se observar que apresentou resultados parecidos ao apresentados pelo controlador *on-off* implementado e o consumo de energia para este experimento foi de 32,58 kWh.

Os artigos acima descritos podem ser visualizados nos apêndices A e B.

Através destes resultados preliminares pode-se verificar a importância da automatização, primeiro porque garante um ambiente agradável a maioria das pessoas, aumentando o desempenho das mesmas e segundo pelo fato que através da automação do ambiente pode-se conseguir reduzir o consumo de energia dos aparelhos de ar condicionado.

Na realização dos testes pode-se verificar também a influência nos resultados e no consumo de energia quando os mesmos são realizados na ausência ou não de pessoas no ambiente fazendo com que a temperatura no setor onde ocorre a circulação de pessoas se eleve. Também é notável a influência da temperatura externa sobre o ambiente que em determinado período do dia era de até 5,0 °C, aumentando assim o tempo de em que os aparelhos ficavam acionados para refrigerar o ambiente.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos com os controladores implementados. Para isto serão realizados alguns experimentos onde poderemos verificar a eficiência dos mesmos sob o ponto de vista da manutenção da temperatura dentro de padrões estabelecidos por norma e consumo de energia.

## 6. RESULTADOS

### 6.1 MODELO DE CONTROLE SIMULINK

Para o trabalho em questão o controle da temperatura do ambiente será feito utilizando o *Simulink Matlab*. Este modelo foi adaptado para captar os dados enviados pelos sensores de temperatura e após o processamento da informação transmitir o sinal de PWM para os atuadores. Foram utilizados os módulos *To Frame* (coloca as informações de PWM em um quadro de transmissão para serem enviadas a porta USB) e *To Sample* (utiliza um quadro recebido pela USB e separa este nas duas amostras referentes à temperatura enviadas pelos sensores e atuadores).

Também foram utilizados os blocos *Query Instrument* (faz a separação das amostras, ou seja, determina quando uma amostra começa e quando outra termina) e *To Instrument* (envia os dados processados aos atuadores). O modelo implementado para o controlador *fuzzy* no *Simulink* é mostrado na figura 6.1 abaixo.

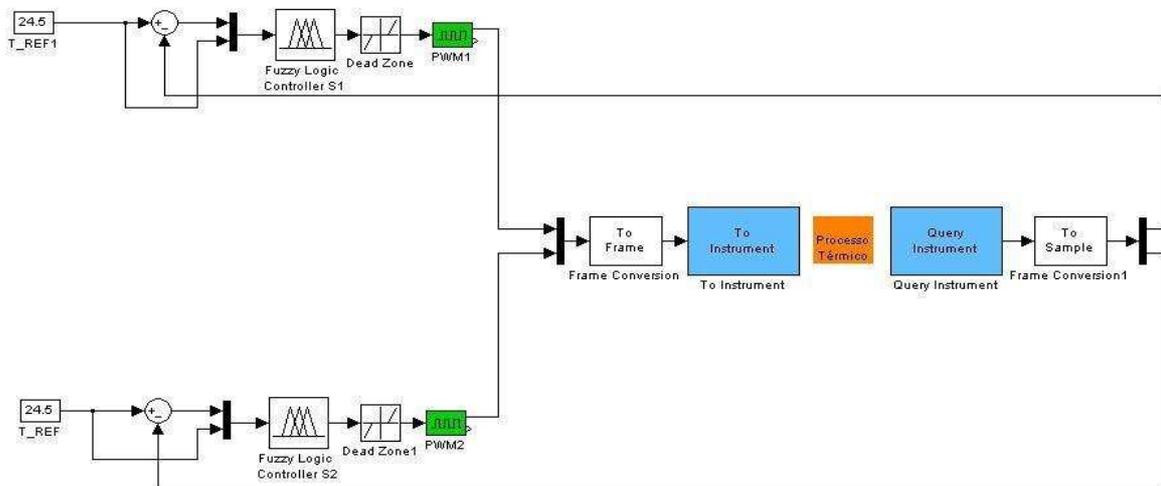


Figura 6.1 - Modelo implementado para controlador *fuzzy*.

A fim de garantir uma maior vida útil para os aparelhos de ar condicionado foi colocado um bloco chamado *dead zone*, que tem como função colocar o valor de saída em zero quando a saída do controlador *fuzzy* estiver dentro de limites predeterminados, não permitindo que quando a temperatura do ambiente estiver perto da temperatura de referência o aparelho seja acionado durante poucos segundos e logo após desligue.

## 6.2 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Os experimentos conduzidos no laboratório LAVSI – UNB, figura 6.2 e serão realizados entre 08:00 e 17:00 e serão divididos em dois experimentos.

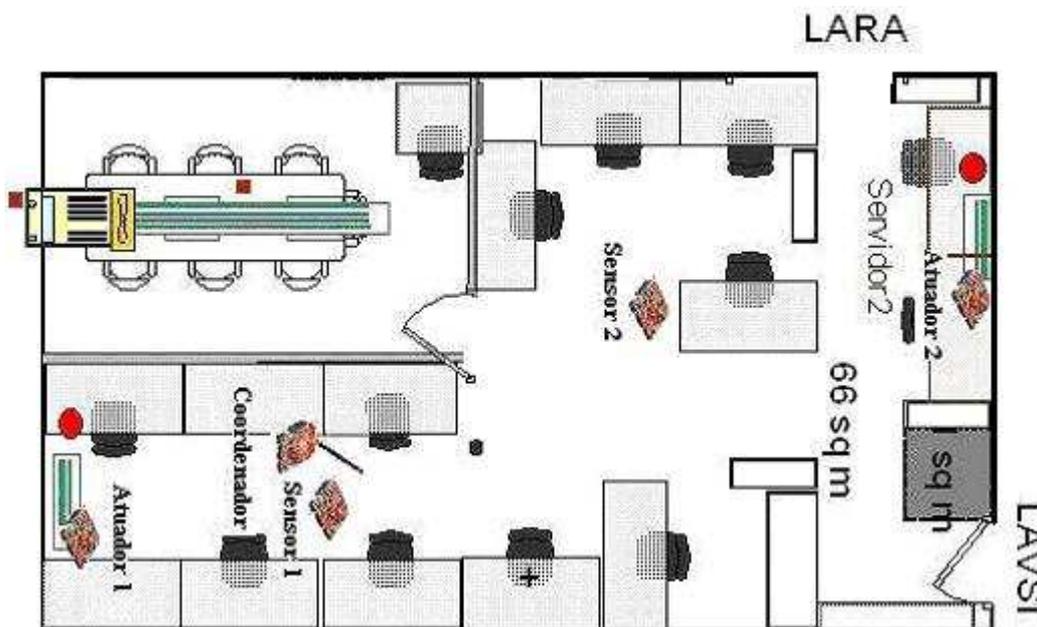


Figura 6.2 - Ambiente controlado (Queiroz e Azevedo, 2009).

No primeiro experimento a temperatura de referência para os dois setores será de 22,0 °C. No segundo experimento a temperatura de referência para os dois setores será inicialmente de 22,0 °C, mas durante o experimento submeteremos o sistema a um distúrbio associado que nada mais é que uma onda quadrada de amplitude 1 °C e período 10800 segundos, assim poderemos verificar o comportamento transitório dos controladores. Para a manutenção do conforto térmico do ambiente será considerada uma variação máxima da temperatura de  $\pm 2$  °C, faixa usualmente aceita para climatização (Bauchspiess, 2004). Durante os experimentos além dos valores da temperatura, também será registrado o consumo dos aparelhos de ar condicionado.

### 6.2.1 Primeira etapa

#### 6.2.1.1 Primeiro experimento

No primeiro experimento a temperatura de referência durante todo o experimento será de 22,0 °C. A temperatura externa durante o experimento variou entre 24,9 e 29,6 °C.

Podemos verificar através da figura 6.3 que o controlador *on-off* implementado conseguiu manter a temperatura dentro do valor de referência com erros inferiores a  $\pm 1,0$  °C, embora o mesmo acionasse os aparelhos com uma frequência relativamente grande, não respeitando as vezes o tempo mínimo recomendado pelo fabricante em que o aparelho deve ficar desligado até a pressão do gás no compressor diminuir, para garantir uma maior vida útil ao compressor, figura 6.4.

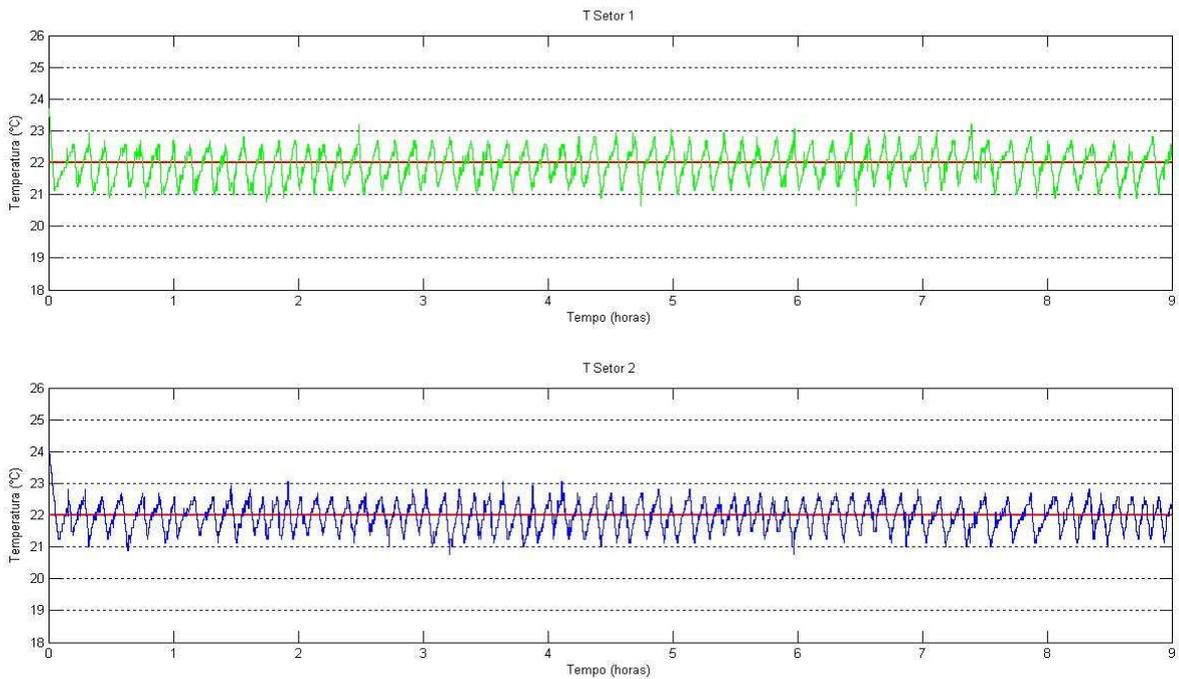


Figura 6.3 - Controle *on-off* – primeiro experimento.

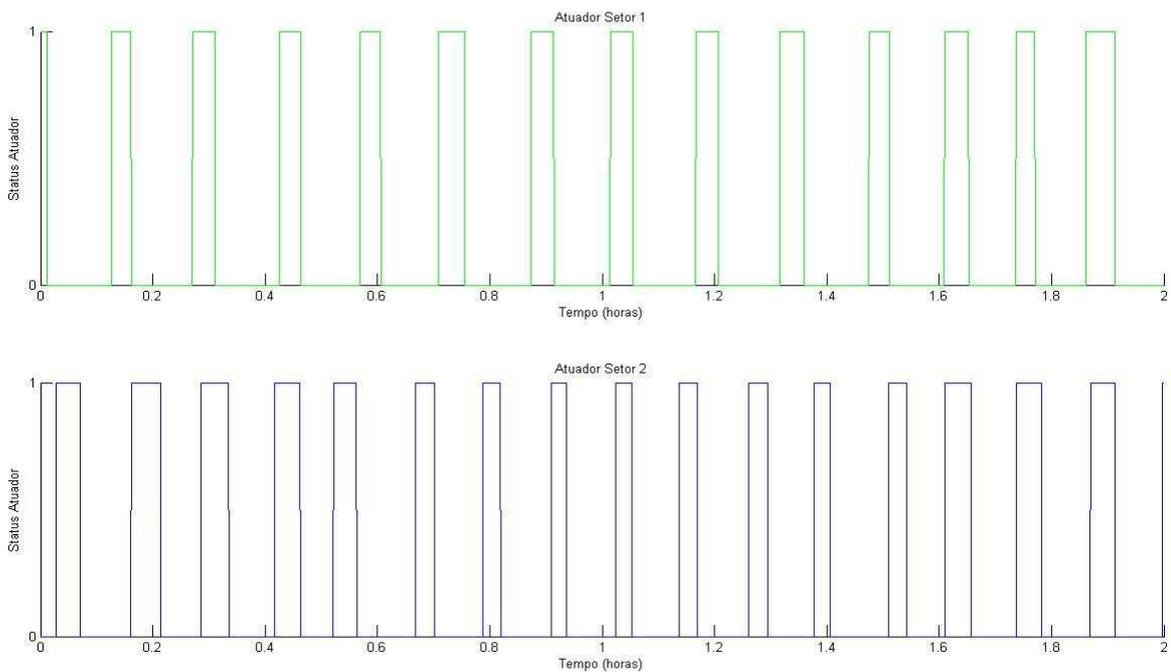


Figura 6.4 - Status atuador – primeiro experimento.

Assim como no experimento com o controlador *on-off*, com o controlador *fuzzy* a temperatura de referência também se manteve constante durante todo o experimento e no valor de 22,0 °C. Durante o experimento a temperatura externa variou entre 22,2 e 30,9 °C. Observando a figura 6.5 referente ao controle *fuzzy*, percebe-se que o mesmo também conseguiu manter a temperatura dentro do valor estabelecido como referência, com erros inferiores a  $\pm 1,0$  °C e respeitando o tempo mínimo recomendado pelo fabricante em que o aparelho deve ficar desligado, embora alguns sinais ruidosos fizessem com que o compressor fosse acionado algumas vezes erroneamente, figura 6.6.

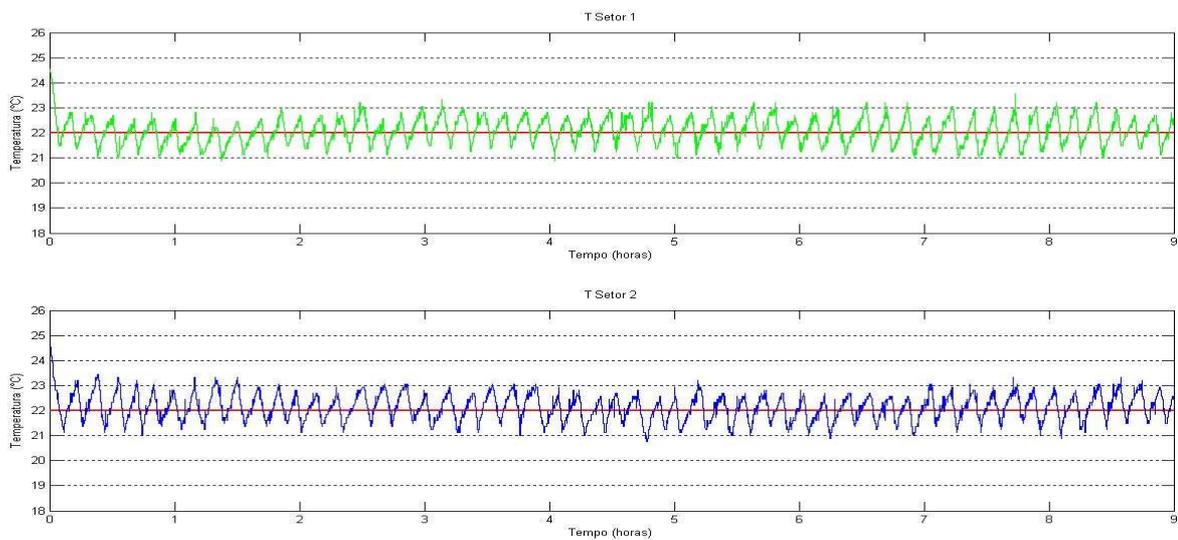


Figura 6.5 - Controle *fuzzy* – primeiro experimento.

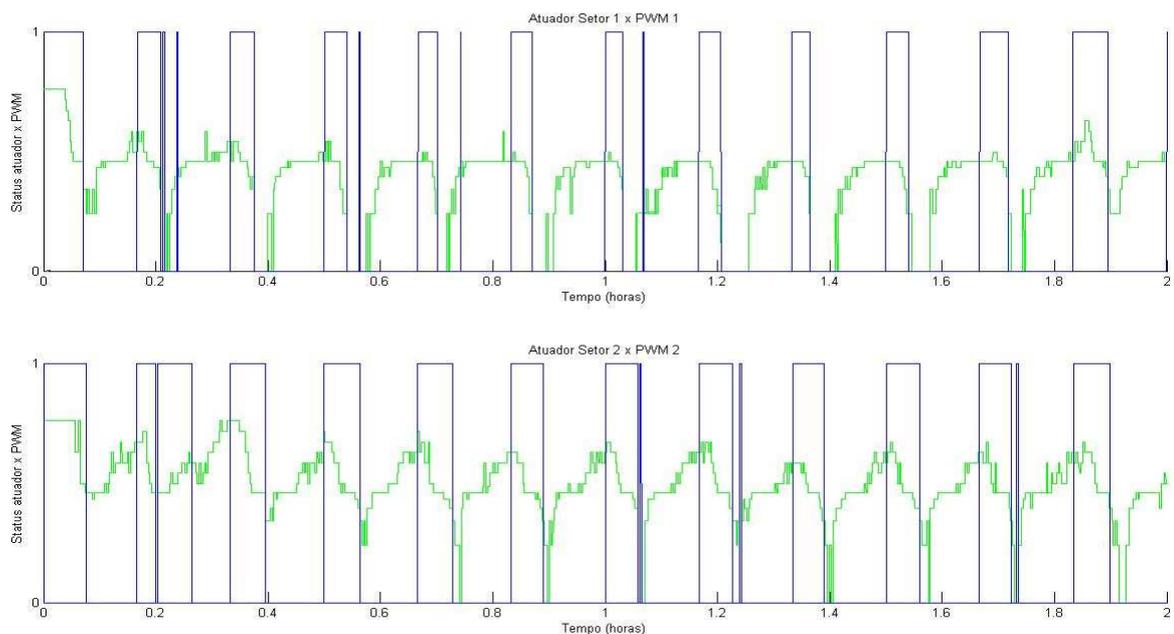


Figura 6.6 - Status atuador – primeiro experimento.

Em termos de consumo de energia pode-se observar através da tabela 6.1 que o controlador *fuzzy* apresentou um consumo relativamente menor do que o controlador *on-off*. Isto se deve em parte ao fato que no controle *on-off* o consumo de energia dos atuadores é praticamente o mesmo durante todo o experimento, enquanto que no controle *fuzzy* o conjunto de regras adotado contribuiu para que os atuadores não fossem acionados durante todo o experimento, reduzindo assim o consumo dos mesmos. Em termos percentuais o controlador *fuzzy* economizou 19,05 % da energia consumida se comparado ao controlador *on-off*.

Tabela 6.1 - Consumo total do sistema no primeiro experimento.

| Modelo controle | Consumo setor 1 (kWh) | Consumo setor 2 (kWh) | Consumo total (kWh) |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| On-Off          | 6,98                  | 7,52                  | 14,50               |
| <i>Fuzzy</i>    | 5,74                  | 6,44                  | 12,18               |

#### 6.2.1.2 Segundo experimento

No segundo experimento a temperatura de referência inicial para o experimento será de 22,0 °C sendo modificada durante o experimento. A temperatura externa durante o experimento variou entre 25,8 e 31,6 °C. Pode-se observar através da figura 6.7 que o controlador *on-off* conseguiu manter a temperatura do ambiente dentro da referência estabelecida com erros em regime menores do que  $\pm 1,0$  °C, o que para os padrões de conforto térmico é satisfatório.

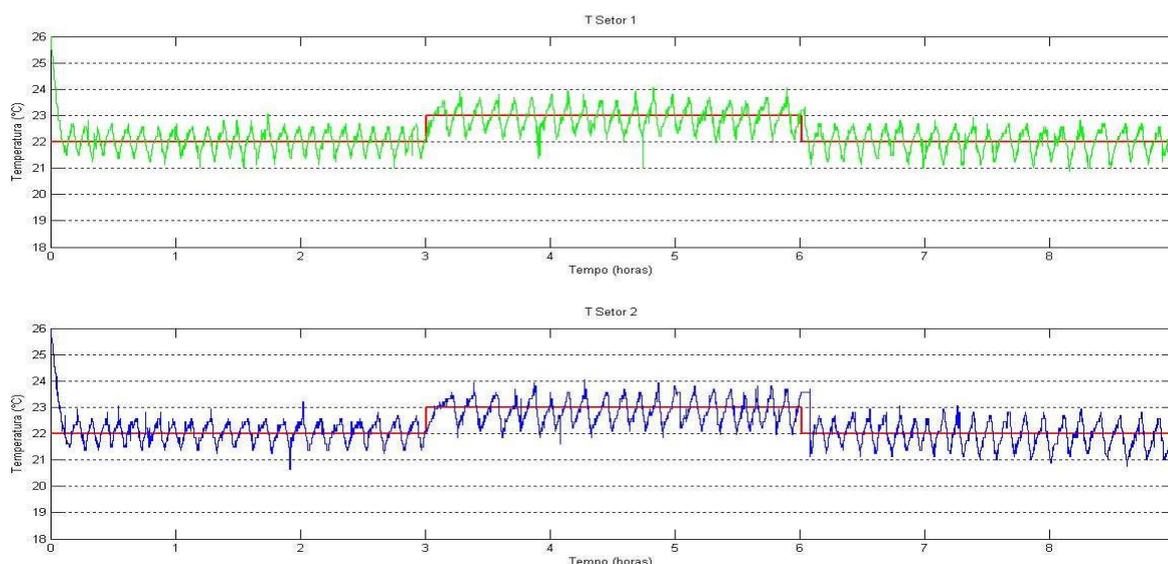


Figura 6.7 - Controle *on-off* – segundo experimento.

Através da figura 6.8 podemos visualizar o status do atuador durante o intervalo de duas horas. Podemos verificar que após uma hora o mesmo fica um bom tempo desligado, isto se deve ao fato de ocorrer uma mudança na temperatura de referência que passou a ser 23,0 °C.

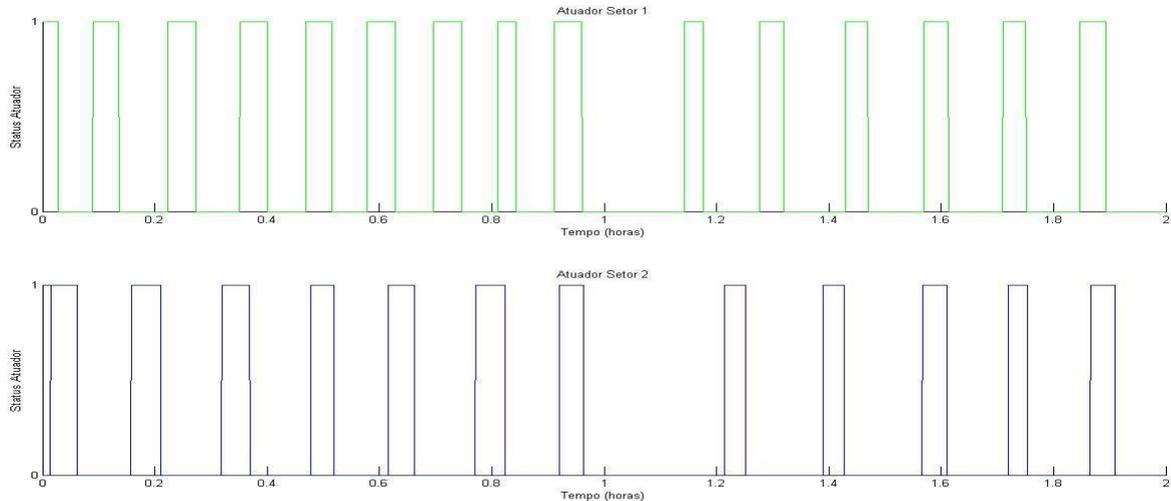


Figura 6.8 - Status atuador – segundo experimento.

Para o experimento utilizando o controle *fuzzy* a temperatura de referência também será inicialmente de 22,0 °C sofrendo um distúrbio durante o experimento a fim de verificarmos como se comporta o controlador frente a esta variação de temperatura. Durante o experimento a temperatura externa variou entre 23,9 °C e 33,3 °C. Assim como o controlador *on-off*, o controlador *fuzzy* também conseguiu manter a temperatura de conforto com erro em regime inferiores a  $\pm 1,0$  °C. O resultado pode ser visualizado através da figura 6.9.

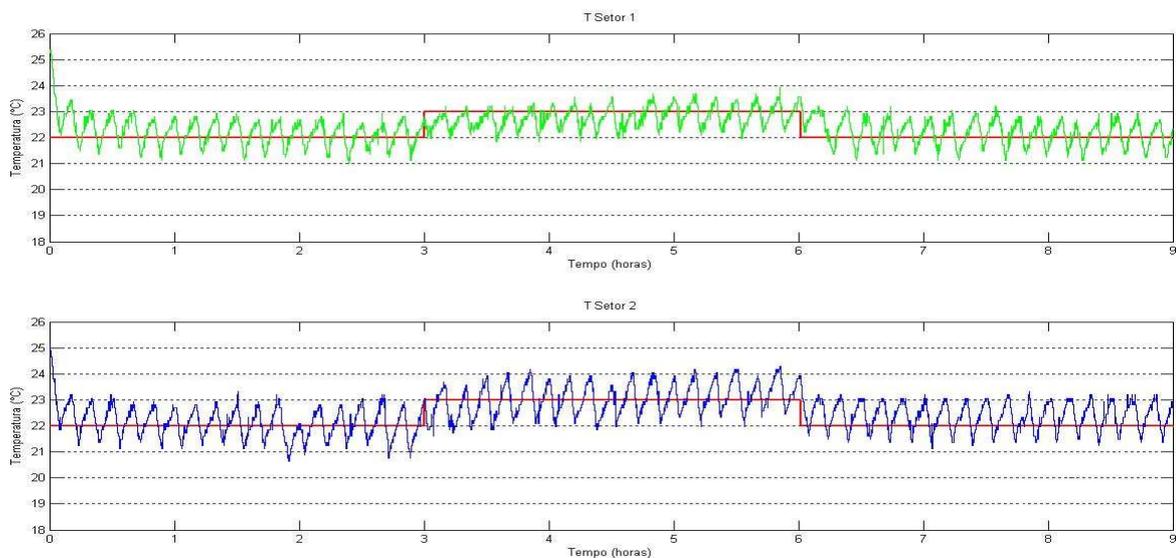


Figura 6.9 - Controle *fuzzy* – segundo experimento.

Novamente podemos verificar através da figura 6.10 que alguns sinais ruidosos fizeram com que fosse enviado erroneamente um sinal ao atuador, acionando o compressor do aparelho.

Um melhor tratamento da informação, solicitando que os dados fossem enviados novamente caso a diferença entre a temperatura atual e a temperatura anterior atingisse um determinado valor poderia resolver o problema.

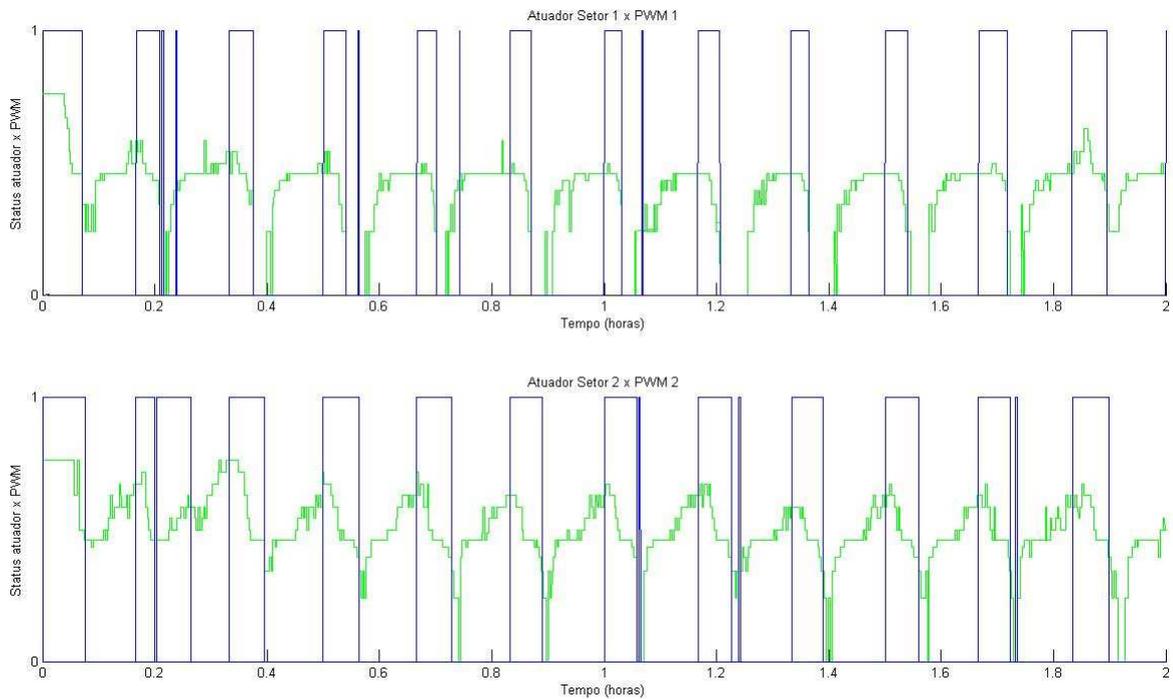


Figura 6.10 - Status atuador – segundo experimento.

O comportamento do consumo de energia para o segundo experimento mostrou que assim como no primeiro experimento, o controlador *fuzzy* conseguiu reduzir o consumo na demanda de energia se comparado ao controlador *on-off*.

Para o experimento em questão a economia foi de 17,91 % como pode ser observado através da tabela 6.2 abaixo.

Tabela 6.2 - Consumo total do sistema no segundo experimento.

| Modelo controle | Consumo setor 1 (KWh) | Consumo setor 2 (KWh) | Consumo total (KWh) |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| <i>On-Off</i>   | 7,30                  | 7,91                  | 15,21               |
| <i>Fuzzy</i>    | 6,19                  | 6,71                  | 12,90               |

## 6.2.2 Segunda etapa

Realizados estes experimentos e a fim de confirmar se os resultados obtidos nos experimentos estão condizentes, os experimentos foram repetidos na semana seguinte e com o mesmo intervalo de duração, entre 08:00 e 17:00, sendo os resultados obtidos visualizados nas figuras abaixo.

### 6.2.2.1 Primeiro experimento

Assim como no primeiro experimento da primeira etapa, neste pode-se verificar que o controlador on-off manteve a temperatura do ambiente dentro dos padrões de conforto térmico, apresentando erros inferiores a  $\pm 1,0$  °C , valor este que está dentro da faixa usualmente aceita para climatização, figura 6.11. A temperatura externa durante o experimento variou entre 25,2 e 30,0 °C.

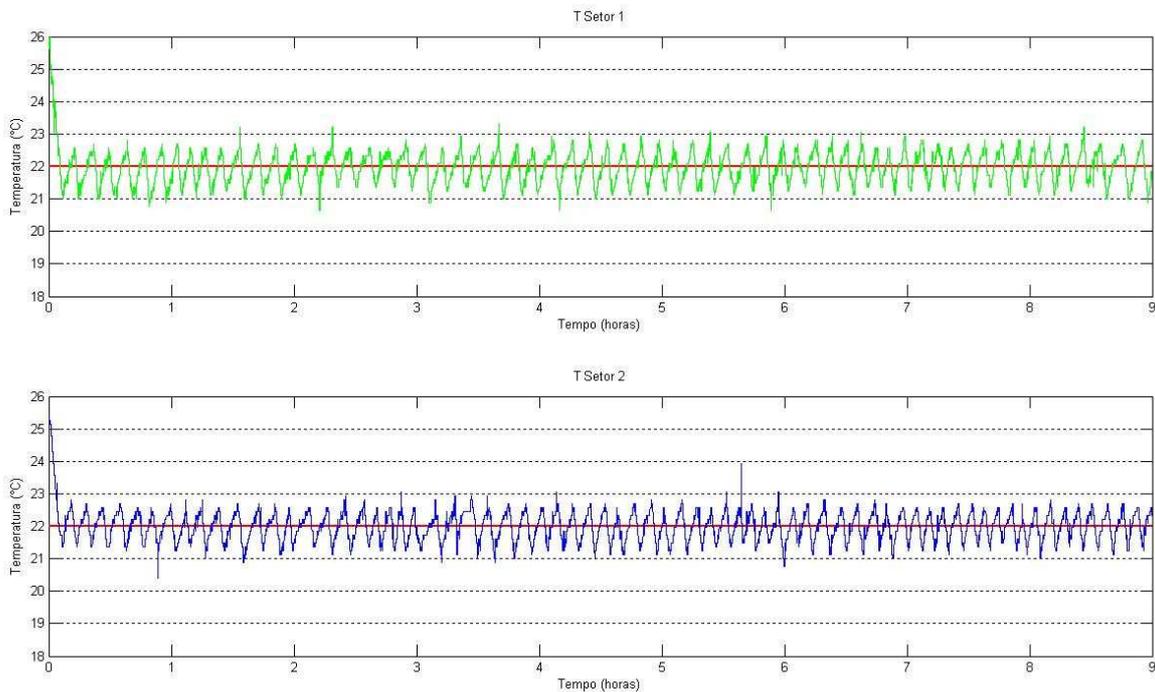


Figura 6.11 - Controle *on-off* – primeiro experimento.

Para o experimento com o controlador *fuzzy* a temperatura externa variou entre 24,9 °C e 32,5 °C. O controlador *fuzzy* neste experimento também manteve a temperatura do ambiente dentro dos padrões usualmente aceitos para climatização, com erros inferiores a  $\pm 1,0$  °C, conforme mostrado na figura 6.12 abaixo.

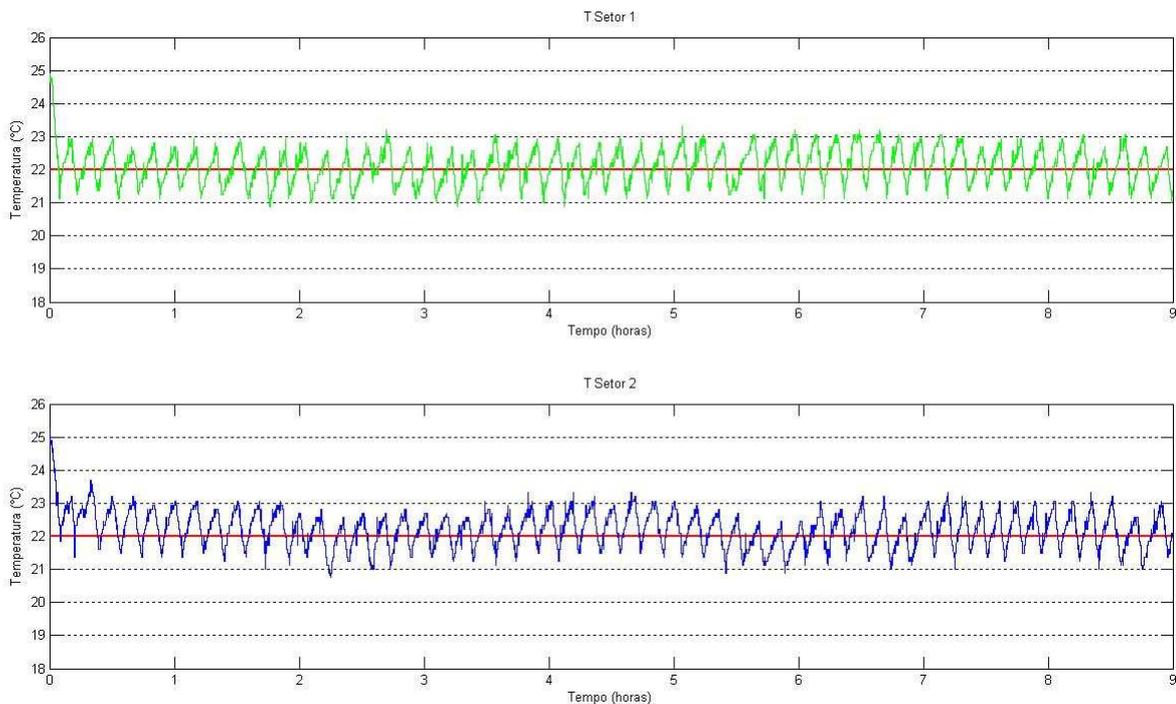


Figura 6.12 - Controle *fuzzy* – primeiro experimento.

Em termos de consumo os resultados obtidos vão de encontro com o do experimento anteriormente realizados na primeira etapa, ou seja, o controlador *fuzzy* conseguiu manter a temperatura do ambiente dentro dos padrões estabelecidos e com menor gasto energético se comparado ao controlador *on-off*, tabela 6.3.

Para o experimento em questão a economia foi de 18,82 %, valor este que vai de encontro com o da primeira etapa, no qual se obteve uma economia de 19,04 % do controlador *fuzzy* em relação ao controlador *on-off*.

Tabela 6.3 - Consumo total do sistema no primeiro experimento.

| Modelo controle | Consumo setor 1 (KWh) | Consumo setor 2 (KWh) | Consumo total (KWh) |
|-----------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| <i>On-Off</i>   | 7,02                  | 7,50                  | 14,52               |
| <i>Fuzzy</i>    | 5,83                  | 6,39                  | 12,22               |

#### 6.2.2.2 Segundo experimento

Neste segundo experimento a temperatura externa variou entre 25,0 e 33,6 °C. O controlador *on-off* conseguiu manter a temperatura de conforto, com erros inferiores a  $\pm 1,0$  °C, figura 6.13.

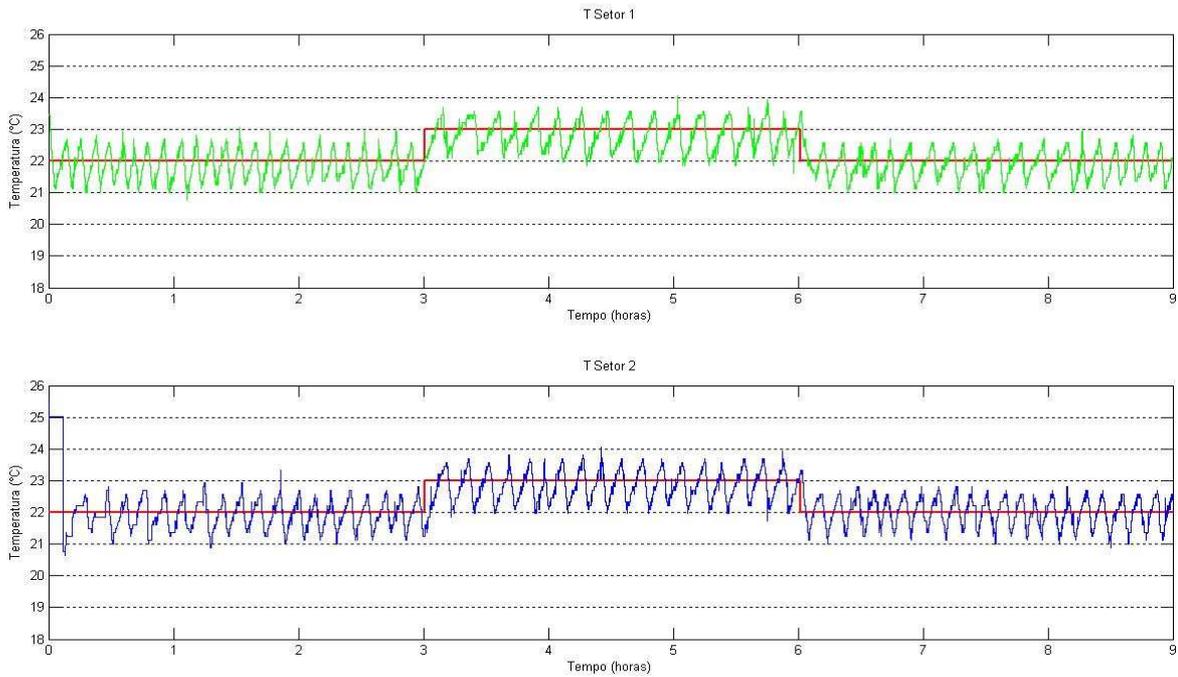


Figura 6.13 - Controle *on-off* – segundo experimento.

Para o experimento com o controlador *fuzzy*, a temperatura externa durante o experimento variou entre 24,9 °C e 34,1 °C. As mesmas conclusões obtidas com o experimento da primeira etapa são válidas para este experimento, ou seja, o controlador conseguiu manter a temperatura dentro dos valores estabelecidos por normas, com erros inferiores a  $\pm 1,0$  °C, figura 6.14.

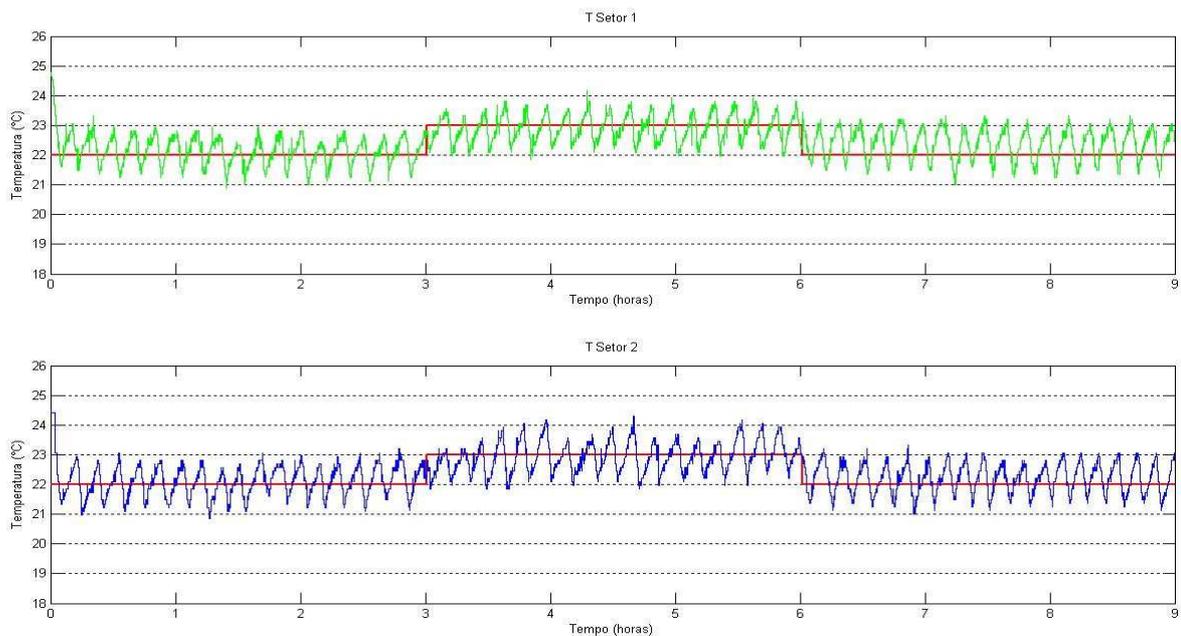


Figura 6.14 - Controle *fuzzy* – segundo experimento.

Em termos de consumo de energia, neste experimento a economia de energia conseguida com a utilização do controlador fuzzy foi de 17,0 %, o que vai de encontro com o experimento realizado na primeira etapa no qual obtivemos 17,91 %.

Tabela 6.4 - Consumo total do sistema no segundo experimento.

| <b>Modelo controle</b> | <b>Consumo setor 1<br/>(KWh)</b> | <b>Consumo setor 2<br/>(KWh)</b> | <b>Consumo total<br/>(KWh)</b> |
|------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| <i>On-Off</i>          | 7,53                             | 8,16                             | 15,69                          |
| <i>Fuzzy</i>           | 6,28                             | 7,13                             | 13,41                          |

Através dos resultados obtidos podemos verificar que ambos os controladores conseguiram manter a temperatura dentro dos padrões de conforto térmico, com erro em regime permanente inferiores a  $\pm 1,0$  °C. O controlador *fuzzy* obteve para os experimentos realizados um consumo de energia menor que o do controlador *on-off*. Esta redução se deve em parte ao tempo em que os aparelhos ficavam acionados. A utilização de outras variáveis de entrada para controlador *fuzzy*, e. g. temperatura externa, poderá reduzir ainda mais o consumo de energia dos aparelhos.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

Este projeto teve como objetivo mostrar como a automação predial inteligente pode contribuir para o *retrofitting* em prédios já em operação, mantendo a temperatura dentro dos padrões de conforto térmico e com o mínimo gasto de energia possível. A economia de energia pode ser obtida por um sistema especialista, baseado em regras *fuzzy*, que levam em conta os diferentes contextos do gerenciamento predial.

Através dos experimentos, pode-se observar que ambos os controladores conseguiram manter a temperatura ambiente dentro dos padrões de conforto térmico, mas o controlador *fuzzy* se comparado ao controlador *on-off*, que é a base de controle dos aparelhos de ar condicionado o conseguiu com um menor gasto de energia, respectivamente 19,04 % e 17,91 % de economia no primeiro e segundo experimentos.

Os resultados obtidos com os experimentos estão condizentes com os resultados obtidos por outros autores que utilizaram o controlador *fuzzy* para manutenção da temperatura em sistemas de condicionamento de ar (Hamdi e Lachiver, 1998; Huang et al 2006; Mirinejad et al 2008; Santos, 2005; Urzeda, 2006; Yonezawa et al 2000).

Podemos verificar que no controlador *fuzzy* projetado o erro em regime permanente foi de aproximadamente  $\pm 1,0$  °C. Uma maior redução no erro e consequentemente no consumo de energia pode ser conseguida se além de variarmos a largura do pulso também variássemos o período do pwm, técnica esta conhecida por PMAC (modulação por largura de pulso adaptativa) e que foi aplicada com sucesso por alguns autores (Dentz et al 2008), (Salsbury, 2002).

As tecnologias de comunicação *wireless* mostraram que é possível obter uma grande flexibilidade no que diz respeito à construção de um sistema de automação. Os dispositivos que compõe a rede, nós atuadores e sensores podem ser dispostos independentemente da passagem de cabos de conexão, o que pode significar redução de custos e complexidade de instalação.

A flexibilidade de se posicionar sensores *wireless* de temperatura, umidade, velocidade do ar e outros livremente no ambiente, permite que se controle a temperatura que efetivamente interessa aos usuários do ambiente e não a usual temperatura de retorno dos aparelhos de ar condicionado de janela.

A rede *ZigBee* projetada a partir dos módulos *MeshBean*, apresentou bons resultados para a aplicação em questão, pois permite fácil carregamento de aplicações nos módulos. No entanto, a utilização de comunicação sem fio *ZigBee* mostrou, esporadicamente, perdas de pacotes que eram detectadas por trocas nos valores de referências das duas salas controladas (Oliveira et al., 2007). Isto ocorreu pela utilização do simulink e de uma porta serial do PC para se comunicar com os dois nos *end device*. A implementação de um protocolo de comunicação, e.g. BACNet deverá identificar tais situações e solicitar o reenvio dos dados perdidos. Como o processo térmico é muito lento (constantes de tempo maiores que alguns minutos) não haverá prejuízo perceptível em termos de conforto térmico.

Em trabalhos futuros uma melhor análise deve ser feita utilizando outros tipos de controladores comparando qual dos controladores é mais eficiente sob o ponto de vista da manutenção da temperatura de conforto e economia de energia.

O posicionamento dos sensores também deve ser verificado, pois o mesmo é um fator que influencia tanto na temperatura de conforto como no consumo de energia, como podemos verificar através da figura 7.1 abaixo.

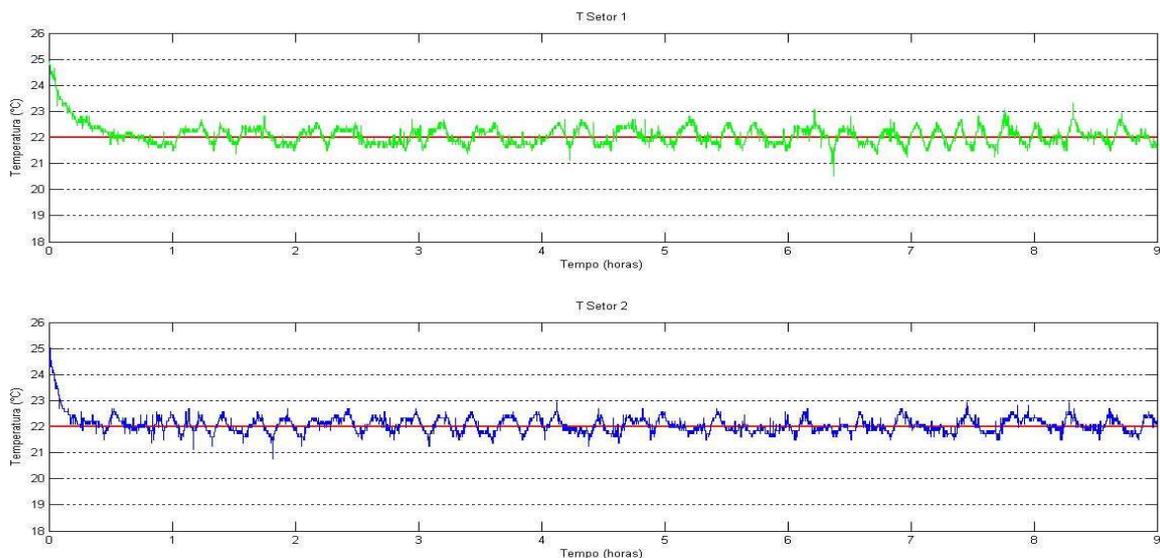


Figura 7.1 - Controle *on-off* para temperatura de referência 22,0 °C.

Neste experimento o sensor foi posicionado em um local onde não apresente a incidência direta do ar frio que saía dos aparelhos. A temperatura durante o experimento variou entre 25,2 e 35,7 °C. Podemos verificar que o erro em regime é menor do que  $\pm 0,5$  °C, embora o consumo tenha sido de 23,84 kWh, maior que o registrado nos mesmos testes feitos anteriormente, só que com o sensor posicionado no centro de cada setor. Isso se deve em parte ao tempo em que os aparelhos ficaram acionados, tempo este bem superior ao dos testes anteriormente realizados, conforme podemos visualizar na figura 7.2 abaixo.

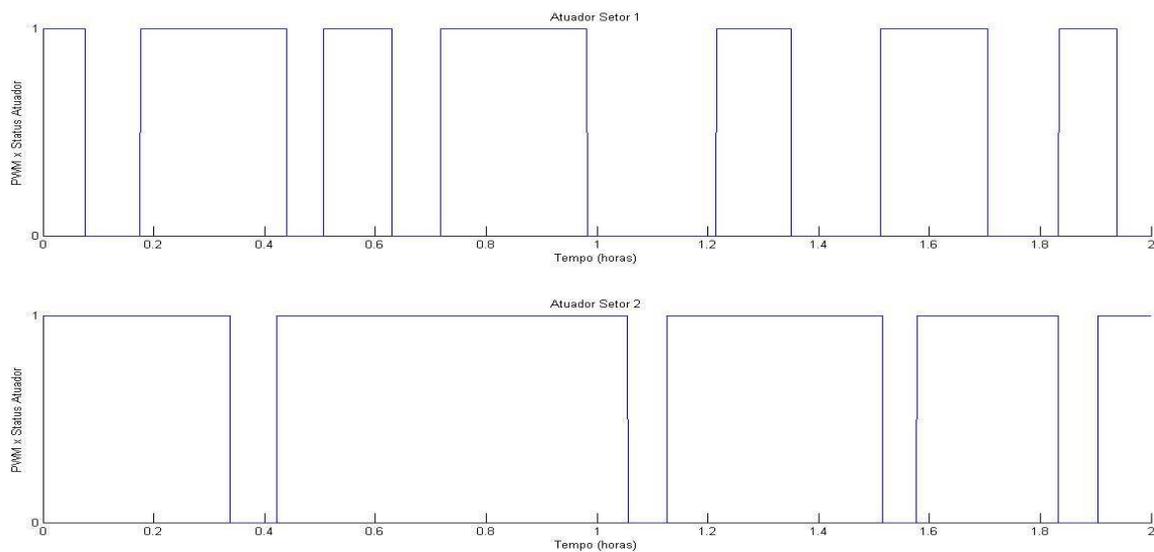


Figura 7.2 - Status atuador.

A utilização de outros sensores (velocidade do vento, umidade, temperatura média radiante, radiação solar, e outros) possibilitará que se possa levantar a curva PMV x PPD e assim desenvolver um controlador inteligente que garantirá a temperatura ótima ao maior número de pessoas e com o menor gasto de energia possível.

A integração da rede ZigBee a um software SCADA possibilitara ao usuário acompanhar o processo em tempo real, utilizando as informações recebidas para geração de gráficos e/ou relatórios, geração de alarmes quando uma situação anormal acontecer, entre outros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ari, S., Khalifa, H. E., Dannenhoffer, J. F., Wilcoxon, P. and Isik, C. (2006). “Fuzzy Logic and Neural Network Approximation to Indoor Comfort and Energy Optimization.” In: *Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society*, 692-695.
- ATMEL CORPORATION, *BitCloud User Guide* 2009, disponível em <[http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc8199.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8199.pdf)> , acesso 5 de agosto de 2009.
- Barg, E. K. (2002). “*Protótipo de um Controlador de Temperatura Baseado em Lógica Fuzzy Utilizando um Microcontrolador.*” Projeto de Graduação, Departamento de Ciências da Computação da Universidade Regional de Blumenau, 57p.
- Baús, Z. L., Nikolovski, S. N. e Maric, P. Z. (2008). “Process Control for Thermal Comfort Maintenance Using Fuzzy Logic.” In: *Journal of Electrical Engineering*, 59(1), 34-39.
- Bauchspiess, A., Souza, A. S., Leite, A. A. C, Ramos, L. M. A., Perreira, E. S. e Santos, R. J. (2004). “Fuzzy Thermal Control with Remote Access for Building Automation.” In: *11th IFAC INCOM*, Salvador, Brazil, 6 pp.
- Becker, M., Oestreich, D., Hasse, H. e Litz, L. (1994). “Fuzzy Control for Temperature and Humidity in Refrigeration Systems” In: *IEEE International Conference on Control Applications*, 3, 1607-1612.
- Benjan, A. (1996). “*Transferência de Calor.*” Carolina do Norte, EUA, Editora John Wiley & Sons
- Bilobrovec, M. (2005). “*Sistema Especialista em Lógica Fuzzy para o Controle, Gerenciamento e Manutenção da Qualidade em Processo de Aeração de Grãos.*” Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 75p.
- Borduni, R. N. (2006). “*Simulação Computacional para Análise de Eficiência Energética em Edificações.*” Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, 112p.
- Braga, L. C. (2007). “*Estudos de Aspectos de Eficiência Energética de Edificações com uma Abordagem de Automação Predial.*” Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, 158p.

- Chung, W. Y. and Ju, O. S. (2006). "Remote Monitoring System with Wireless Sensors Module for Room Environment." In: *Sensors and Actuators. B, Chemical Journal*, 113(1), 64-70.
- Dentz, G. V., Bauer, K., Oliveira, G. H. C. e Mendes, N. (2008). "Integração de Sistemas de Controle de Conforto Térmico com Sistemas de Climatização." In: *Mercofrio – Congresso de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação do Mercosul*, Curitiba – PR.
- Doctor, F., Hagrais, H., Callaghan, V. (2005). "A Fuzzy Embedded Agent-Based Approach for Realizing Ambient in Intelligent Inhabited Environments." In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 35(1), 55-65.
- FARAHANI, S., *Zigbee Wireless Networks and Tranceiver*. Burlington, MA, : Elsevier, 2008.
- Mateus Filho, P. R. e Dias, Y. F. G , Ferreira Jr., P. A. and Bauchspiess, A. (2009). "Automação Predial Wireless em Ambiente com Cargas Térmicas Compartilhadas." In: *IX Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, Brasília – DF.
- Mateus Filho, P. R. e Dias, Y. F. G. (2008). "Acionamento de Potência para Redes de Automação Wireless." Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, 67p.
- Gallo, E. A. e Ribeiro, F. N. (2007). "Índice de Conforto Térmico ISO7730 em Automação Predial." Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, 98p.
- Ferreira Jr., P. A. and Bauchspiess, A. (2009). "Energy Saving in Building Automation Using ZigBee Wireless Network and Fuzzy Control." In: *20th International Congress of Mechanical Engineering*, Gramado – RS.
- Gomide, F. A. C. e Gudwin, R. R. (1994). "Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy." In: *SBA Controle & Automação*, 4(3), 97-115.
- Haissig, G. (1999). "Adaptive Fuzzy Temperature Control for Hydronic Heating Systems." In: *IEEE International Conference on Control Applications*, 20(2), 39-48.
- Hamdi, M. e Lachiver, V. (1998). "A Fuzzy Control System Based on the Human Sensation of Thermal Comfort." In: *IEEE International Conference on Fuzzy Systems Proceedings*, 1, 487-492.
- Huang, Y., Li, N., Yi, Y. And Zhan, J. (2006). "Fuzzy Model Predictive Control for a Comfort Air Conditioning System." In: *International Conference on Automation Science and Engineerig*, 530-533.

- Kohagura, T. (2007). “*Lógica Fuzzy e suas Aplicações.*” Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, 48p.
- Lamberts, R. e Xavier, A. A. P. (2002). “*Conforto Térmico e Stress Térmico.*” LabEEE, Santa Catarina.
- Martin, R. A., Federspiel, C. C and Auslander, D. M. (2002). “*Supervisory Control for Energy Savings and Thermal Comfort in Commercial Building HVAC Systems.*” Association for Artificial Intelligence, Califórnia/EUA.
- MESHNETICS, *ZigBit™ Development Kit 2.0 User’s Guide*, manual fornecido em CD pelo fabricante, 2008.
- Mignaco, A. G. (2005). “*Análise de Desempenho de Redes de Sensores sem Fio.*” Dissertação de Mestrado, Departamento de Computação da Universidade Estadual de Londrina, 49p.
- Mirinejad, H., Sadati, S. H., Ghasemian, M. and Torab, H. (2008). “Control Techniques in Heating, Ventilating and Air Conditioning(HVAC) Systems.” In: *Journal of Computer Science*, 4(9), 777-783.
- Montebeller, S. J. (2006). “*Estudo sobre o Emprego de Dispositivos sem Fios – Wireless na Automação do Ar Condicionado e de Outros Sistemas Prediais.*” Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 129p.
- Oliveira, D. B. S., Zanatt, M. P. B. F. e Santos, R. A. (2007). “*Redes de Sensores e Atuadores Wireless para Automação Predial.*” Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, 48p.
- Pinheiro, J. M. S. (2004). “*As Redes com ZigBee.*” <[http://www.projetoderedes.com.br/artigos/artigo\\_zigbee.php](http://www.projetoderedes.com.br/artigos/artigo_zigbee.php)>.
- Queiroz, R. B. and Azevedo, R. C. A. (2009). “*Rede de Sensores sem Fio para Automação Predial com Módulos MeshBean.*” Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, 81p.
- Riadi, R., Tawegoum, R., Rachid, A. e Chassériaux, G. (2007). “Decentralized Temperature Fuzzy Logic Control of a Passive Air Conditioning Unit.” In: *Mediterranean Conference on Control & Automation*, 1-6.
- Rojas, I., Pomares, H., Gonzalez, J., Herrera, L. J., Guillen, A., Rojas, F. e Valenzuela, O. (2006). “Adaptive Fuzzy Controller: Application to the Control of the Temperatura of a Dynamic Room in Real Time.” In: *Fuzzy Sets and Systems*, 157, 2241-2258.
- Ruas, A. C. (1999). “*Conforto Térmico nos Ambientes de Trabalho.*” FUNDACENTRO, São Paulo.

- Saleiro, M. e Ey, M. (2006). “*ZigBee – Uma Abordagem Prática.*” EEE, Faro, Portugal.
- Salsbury, T. I. (2002). “A New Pulse Modulation Adaptive Controller (PMAC) Applied to HVAC Systems.” In: *Elsevier, Control Engineering Practice 10*, 1357 – 1370.
- Sandri, S. e Correa, C. (1999). “*Lógica Nebulosa.*” Escola de Redes Neuras, Ita, São José dos Campos, São Paulo.
- Santos, R. J. (2005). “*Controle Fuzzy para Racionalização de Energia em Processo de Condicionamento de Ar.*” Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, 134p.
- Schweitzer, C. M, Sakuragui, R. R., Carvalho, T. C. e Venturini, Y. R. (2006). “*Tecnologia de Redes sem Fio: WPANs, WLANs e WMANs, Desafios de Segurança, Vulnerabilidades e Soluções.*” PCS-LARC, São Paulo.
- Silva, A. T. (2007). “*Módulos de Comunicação Wireless para Sensores.*” Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Universidade do Porto, 84p.
- Tanscheit, R. (1999). “*Fundamentos de Lógica Fuzzy e Controle Fuzzy.*” DEE – Puc, Rio de Janeiro.
- Urzedá, C. C. (2006). “*Software Scada como Plataforma para Racionalização Inteligente de Energia Elétrica em Automação Predial.*” Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, 81p.
- Yonezawa, K., Yamada, F., Wada, Y. and Hanada Y. (2000). “Comfort Air-Conditioning Control for Building Energy Saving.” In: *26<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE*, vol. 3, 1737-1742.
- ZigBee Alliance. (2005). *ZigBee Specification*, Technical report.

## APÊNDICE

### APÊNDICE A – SBAI (SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE)

#### AUTOMAÇÃO PREDIAL WIRELESS EM AMBIENTE COM CARGAS TÉRMICAS COMPARTILHADAS

PEDRO R. MATEUS FILHO, YURI F. G. DIAS, PAULO A. FERREIRA JÚNIOR, ADOLFO BAUCHSPIESS

*Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes – LAVSI  
Grupo de Robótica, Automação e Visão computacional – GRAV  
Depto. de Engenharia Elétrica - Universidade de Brasília  
Campus Darcy Ribeiro, SG11 Sala A1-48/15, 70910-970, Brasília, Distrito Federal  
E-mails: pedroramosmateus@gmail.com, yuriyuri29@gmail.com,  
paulo.eletrica@gmail.com, adolfobs@ene.unb.br*

**Abstract**— This paper presents the thermal control of a test environment using *wireless* building automation. In order to carry out this work, sensors and actuators nodes were implemented employing *Xbee* transceivers, based on the *ZigBee* protocol (IEEE 802.14.5). The actuator nodes were implemented with ATmega8 microcontrollers, which run all necessary routines to control the air conditioners compressor by driven solid-state relays. The comparative study between the internal control (from the internal air conditioner thermostat) and external on-off control shows that the external on-off control gives us lower error and lower power consumption.

**Keywords**— Building Automation, *wireless* network, thermal control, energy consumption

**Resumo**— Este artigo apresenta o controle térmico em um ambiente de teste utilizando automação predial *wireless*. Foram projetados e implementados nós sensores e atuadores utilizando o transceiver *Xbee*, baseado no protocolo *ZigBee* (IEEE 802.14.5). O processamento nos nós atuadores foi efetuado por microcontroladores ATmega8, responsável por executar as rotinas de controle do acionamento das unidades condensadoras dos aparelhos de ar condicionado através de acionamento de relés de estado sólido. O estudo comparativo entre o controle realizado internamente pelos aparelhos de ar condicionado e um controlador liga-desliga externo mostrou que o controle liga-desliga externo além de apresentar um menor erro, possibilitou um menor consumo de energia.

**Palavras-chave**— Automação predial, *wireless* network, controle térmico, consumo de energia

## 1 Introdução

O conceito “*Ambient Intelligence*” é um paradigma relativamente novo que leva a uma densa rede de comunicação de sensores e atuadores, que são integrados por um supervisor e que podem ou não executar tarefas locais, além de fornecer serviços ao usuário de forma praticamente invisível. Das diversas formas de conexão entre estes dispositivos, destaca-se o uso de nós de sensoriamento e atuação *wireless*, que oferecem uma grande flexibilidade no desenvolvimento e em particular no *retrofitting* de prédios antigos, uma vez que não acarreta maiores alterações na infra-estrutura predial, como a instalação de novos cabeamentos.

O protocolo de rede sem fio *ZigBee* foi desenvolvido para aplicações de automação predial, ramo da automação que está ganhando uma importância crescente. De acordo com (Koubãa, *et al.*, 2007), o padrão foi concebido para dispositivos sem fio de baixo custo e tem como características o baixo consumo de energia e as garantias de controle da rede em tempo real. No presente trabalho, foi implementada toda a infra-estrutura de rede necessária para o controle de temperatura em um ambiente do Laboratório de Automação, Visão e Sistemas Inteligentes (LAVSI), incluindo o projeto e configuração dos nós sensores, nós atuadores e *software* supervisor.

Dentre as variadas técnicas de controle, liga-desliga, PID e controladores *Fuzzy* (Santos, 2005; Urzêda, 2006), utilizadas em projetos na área de conforto térmico e racionalização de energia, este artigo apresenta um estudo comparativo entre o controle de temperatura próprio dos aparelhos de ar condicionado e o controle liga-desliga instalado externamente aos aparelhos. O objetivo é mostrar qual dos controladores é mais eficiente no controle da temperatura do ambiente e com o menor consumo de energia.

## 2 ZigBee

*ZigBee* é um protocolo de comunicação baseado no padrão IEEE 802.15.4, que tem aplicação em redes sem fio, integrando pequenas unidades de comunicação de dados em áreas muito limitadas. Seu conceito original aplicase na integração de pequenas unidades telemétricas recorrendo a sinais de rádio não licenciados (Tsang, *et al.* 2007).

O padrão IEEE 802.15.4 é comparável às tecnologias de rede *Wi-Fi* e *Bluetooth*, sendo que o primeiro funciona com um menor consumo de energia e menor taxa de transmissão, cerca de 250 kbps (Cordas, *et al.*, 2007).

Neste trabalho, foi utilizado o *transceiver Xbee* da empresa *Maxstream* (atualmente *Digi*) que foi projetado para atender ao padrão IEEE 802.15.4, operando na frequência de 2,4 GHz.

Além de um *transceiver ZigBee*, o *Xbee* possui funcionalidades úteis para um elemento de automação, como portas de entrada e saída, canais de conversão analógico-digital e canais de *PWM*.

## 3 Ambiente Predial Utilizado

Este trabalho propõe um sistema de controle de temperatura para um ambiente com dois setores contíguos (cargas térmicas compartilhadas) utilizando o protocolo de comunicação *ZigBee*, IEEE 802.15.4. Estão disponíveis nesse sistema: dois nós atuadores (módulos de controle, módulos de acionamento e aparelhos de ar condicionado), dois nós sensores e um nó coordenador ligado a um computador, (Fig. 1). Na figura foi colocado uma linha pontilhada entre os setores 1 e 2 para delimitar a área limítrofe de cada um dos setores.



Figura 1. Ambiente predial controlado.

O módulo de controle tem a função de controlar os aparelhos de ar condicionado através do módulo de acionamento e o nó sensor é responsável pela aquisição da variável controlada (temperatura). O *software* de controle coordena, através do nó coordenador, o fluxo de dados entre os módulos que compõem a rede, tais como o recebimento dos dados de temperatura do ambiente, execução dos cálculos do controlador liga-desliga e envio do sinal que determina o estado dos atuadores.

Os dados são armazenados em arquivos texto, para a subsequente reprodução gráfica em Matlab®.

## 4 Nó Atuador

### 4.1 Ar condicionado

Foram utilizados dois aparelhos de ar condicionado do tipo *split*, Springer Hi Wall, com capacidade 22.000 BTU/h. Este tipo de aparelho possui duas unidades, uma interna e outra externa. A unidade interna, também chamada de evaporadora, fica localizada dentro da sala e é responsável por insuflar ar frio na mesma. A unidade externa, também chamada de condensadora, tem função de resfriar o gás que retorna da unidade evaporada.

Na parte interna da unidade evaporadora está localizado o sensor responsável pela medição da temperatura do ambiente, valor este que é utilizado pelo controlador do aparelho de ar condicionado para controle de temperatura.

O acionamento da unidade condensadora é feito por uma placa eletrônica instalada na unidade evaporadora, que dependendo da temperatura solicitada pelo usuário e da temperatura do ambiente, envia um sinal de comando para ligar ou desligar a unidade externa. Trata-se de um sinal 220 VAC, por onde circula no estado ligado uma corrente de aproximadamente 0,8 A. O controle liga-desliga externo foi realizado na unidade condensadora através do chaveamento deste sinal de comando proveniente da unidade evaporadora.

Para realização do controle liga-desliga externo, os aparelhos de ar condicionado são configurados para operarem em sua potência máxima, ou seja, selecionando-se a temperatura de 17 °C. Desta forma, o sinal proveniente da unidade evaporadora que liga a unidade condensadora sempre estará ativo, permitindo que ação de ligar e desligar tal unidade seja controlada unicamente pelo módulo de controle através do módulo de acionamento.

#### 4.2 Módulo de Controle

O módulo de controle (Fig. 2) tem a função de controlar o módulo de acionamento do ar condicionado. O projeto é composto por um microcontrolador Atmega8 e um módulo *Xbee*, com interface para gravação e interface serial com possibilidade de seleção por intermédio de *jumpers* entre as opções: *PC/Xbee*, *Xbee/Atmega8* e *PC/Atmega8*.

O *firmware* gravado no microcontrolador recebe do supervisor o estado do atuador, e através de uma porta de I/O comanda o módulo de acionamento para que esta ligue ou desligue a unidade externa do ar condicionado.

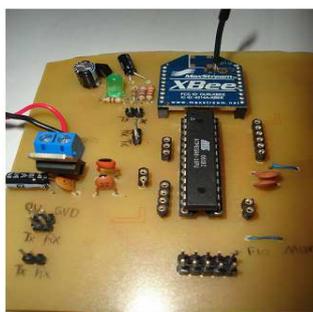


Figura 2. Foto do módulo de controle com *Atmega8*.

#### 4.3 Módulo de Acionamento

Para o acionamento da carga alimentada com tensão 220 VAC, 60 Hz, foi projetado um relé de estado sólido utilizando um *triac* para o chaveamento. O *triac* escolhido foi o TIC246D, que trabalha com correntes até 16A e suporta tensões de até 400 VAC.

Utilizou-se também o MOC3081, um optoacoplador indicado para aplicações de 240 VAC. Além de isolar os circuitos de controle do circuito de potência, ele possui internamente um *triac* com um circuito detector de passagem por zero Volt.

De acordo com Soares (2006), a resistência R1 (Fig. 3) tem a função de limitar a corrente no pino 1 do MOC3081 em 15 mA e R2 limita a corrente no triac interno, pino 6. O conjunto R4/C1 é o chamado snubber RC e tem a função de reduzir as interferências eletromagnéticas geradas por cargas indutivas. A resistência R3, denominado resistor de gate, impede que o triac seja acionado por alguma interferência gerada pelo próprio circuito.

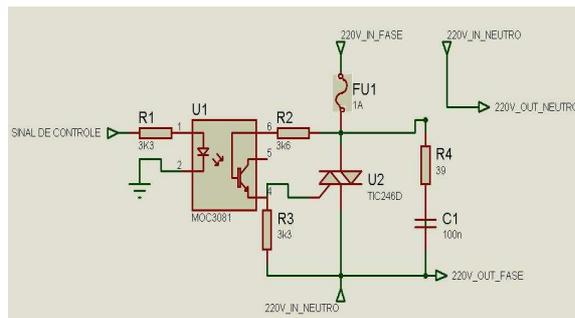


Figura 3. Esquema elétrico do módulo de acionamento.

#### 4.4 Medidores de energia

Para realizar a medição do consumo de energia nos aparelhos de ar condicionado, foram utilizados medidores de energia digitais, modelo *ZMD128*, fabricados pela empresa *Landis Gyr*, que possuem interface de comunicação serial optoacoplada. Os dados do consumo são obtidos através de um computador conectado à interface do equipamento e disponibilizados por um *software* fornecido pelo fabricante.

### 5 Nó Sensor

No módulo sensor projetado (Fig. 4), foi utilizada a funcionalidade de conversão A/D do módulo *Xbee*, eliminando a necessidade de utilização de um microcontrolador nestes módulos.



Figura 4. Foto do módulo sensor.

O sensor de temperatura utilizado foi o LM35, que possui ganho de 10 mV/°C e exatidão de 0,5 °C. A placa possui, ainda, um amplificador operacional para amplificar o sinal do sensor em outro canal A/D do *Xbee* e disponibiliza a interface serial para configuração.

### 6 Rede de Automação Wireless

#### 6.1 Topologia da rede

O controle da rede projetada (Fig. 5) é efetuado pelo *software* de controle instalado em um PC e conectado a um *Xbee*. O nó coordenador utiliza a placa *CON-USBEE*, fabricada pela ROGERCOM, que disponibiliza uma interface USB para o módulo *Xbee* e permite a atualização do *firmware* do mesmo.

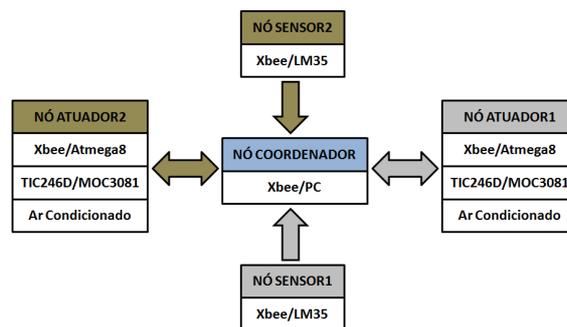


Figura 5. Rede de automação *wireless* para cargas térmicas compartilhadas.

A comunicação é feita em modo *unicast* e os nós sensores e atuadores possuem endereçamento fixo. Os nós de sensoriamento apenas enviam dados para o coordenador e os nós atuadores enviam e recebem dados do coordenador.

#### 6.2 Software de Controle

O supervísório foi desenvolvido em linguagem C e coordena todo o fluxo de dados na rede utilizando o nó coordenador conectado ao PC e seguindo um fluxograma pré-determinado (Fig. 6).

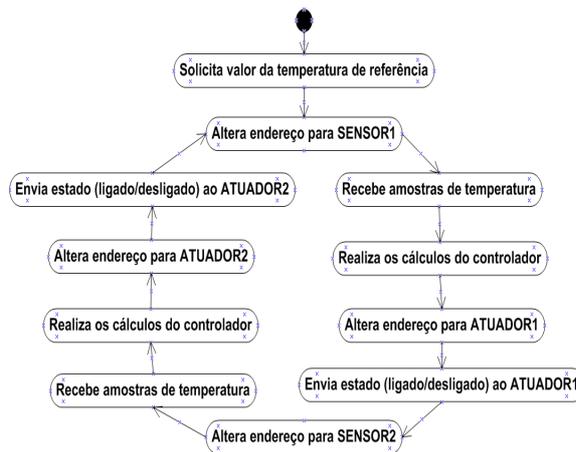


Figura 6. Fluxograma do *software* de controle.

Ele trabalha alterando o endereço próprio e de destino do coordenador para que este receba/envie os dados para os nós apontados pelo supervisor e permite a configuração da temperatura de referência e do tempo de execução dos experimentos.

Esse *software* grava, em um arquivo texto, os dados da temperatura de referência, temperatura em cada nó sensor, status dos atuadores e o tempo de funcionamento, permitindo a geração de gráficos com os dados coletados.

O *software* de controle é responsável pelo cálculo do controle liga-desliga e apenas envia o estado do atuador até o nó determinado. O controlador foi implementado com uma histerese de 0,5 °C.

O cálculo é realizado separadamente para cada setor do ambiente a ser controlado, porém a temperatura de referência é única para todo o ambiente. Cada ciclo, que engloba a leitura dos dados dos sensores e o envio do estado dos atuadores, dura aproximadamente 6 segundos. A taxa de aquisição dos dados de temperatura de cada área é de aproximadamente 3 segundos.

São consideradas três amostras de temperatura para cada sensor. Essas amostras são tratadas pelo *software* de controle na tentativa de impedir que um valor lido incorretamente possa alterar os cálculos do controlador liga-desliga. São usadas as equações a seguir:

$$se[(t_1 - t_2) > 1 | e(t_1 - t_3) > 1 | e(t_2 - t_3) > 1] \Rightarrow \text{repete leitura} \quad (1)$$

$$se[(t_1 - t_2) \leq 1 | e(t_1 - t_3) \leq 1 | e(t_2 - t_3) \leq 1] \Rightarrow \text{média} = (t_1 + t_2 + t_3) / 3 \quad (2)$$

$$\text{senão } se(t_1 - t_2 \leq 1) \Rightarrow \text{média} = (t_1 + t_2) / 2 \quad (3)$$

$$se(t_1 - t_3 \leq 1) \Rightarrow \text{média} = (t_1 + t_3) / 2 \quad (4)$$

$$se(t_2 - t_3 \leq 1) \Rightarrow \text{média} = (t_2 + t_3) / 2 \quad (5)$$

## 7 Análise dos Resultados

Para analisar o desempenho do controle liga-desliga aplicado externamente e o controle próprio dos aparelhos de ar condicionado foram realizados vários experimentos comparativos no ambiente controlado, dentre os quais dois serão apresentados.

Como o sensor de temperatura dos aparelhos de ar condicionado está localizado internamente medindo a temperatura do ar que retorna do ambiente, e o controle liga-desliga externo utiliza como referência as amostras de temperatura enviadas pelos nós sensores, é necessário considerar o posicionamento dos sensores para comparar as duas estratégias de controle.

Desta forma, para melhor comparação dos resultados obtidos em relação ao controle de temperatura e consumo de energia, os experimentos foram realizados com os nós sensores posicionados em dois locais, em um deles no centro de cada setor do ambiente controlado e no outro na posição da entrada do retorno do ar dos aparelhos de ar condicionado.

Todos os experimentos foram realizados no período de 8hs às 17hs e a temperatura de referência estabelecida foi de 22 °C. Nos experimentos com o controlador liga-desliga, a referência foi informada no *software* supervisor, enquanto que nos experimentos com o controle próprio dos aparelhos, a referência é configurada através do controle remoto dos mesmos.

Durante os experimentos, além da temperatura dos dois setores e a temperatura externa, foi registrado o consumo de energia dos aparelhos de ar condicionado utilizados.

Nos dois primeiros experimentos os nós sensores foram posicionados no centro dos dois setores.

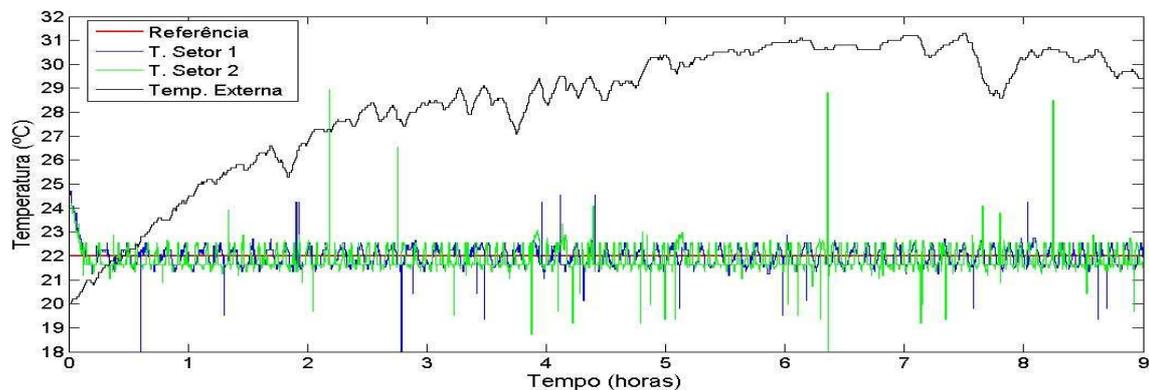


Figura 7. Experimento 1 – Controle liga-desliga.

A Figura 7 mostra a ação característica do controle liga-desliga nos dois setores do ambiente controlado, onde é verificado um erro médio menor que 1 °C. É nítida a ocorrência de medidas espúrias em algumas amostras de temperatura recebidas dos nós sensores, resultando em pontos destoantes na curva. A soma do consumo medido nos dois aparelhos de ar condicionado foi de 20,77 kWh.

A ação de controle própria dos aparelhos de ar condicionado (Fig. 8) mantém a temperatura dos dois setores do ambiente com um erro superior a 1 °C. O consumo de energia medido foi 31,41 kWh. O fato de a temperatura de retorno do ar medida pelo sensor interno dos aparelhos de ar condicionado ser superior a temperatura medida pelos nós sensores, faz com que a unidade condensadora dos aparelhos fique acionada por mais tempo, o que pode explicar o maior consumo de energia.

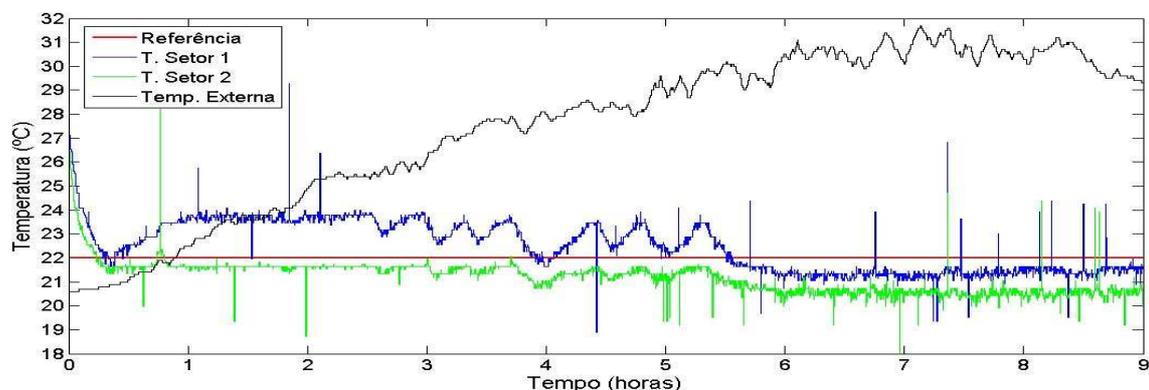


Figura 8. Experimento 2 – Controle próprio dos aparelhos.

Nos dois últimos experimentos os nós sensores foram posicionados na entrada do retorno do ar dos aparelhos de ar condicionado. Com a localização dos nós sensores próximos do sensor interno dos aparelhos, os valores de temperatura medidos por ambos serão bem próximos. O intuito foi tentar colocar os dois controladores em condições de igualdade para efetuar o controle de temperatura do ambiente, podendo assim realizar uma melhor comparação.

O resultado do controle liga-desliga realizado com os nós sensores no novo posicionamento (Fig. 9), evidenciou algumas diferenças no controle de temperatura efetuado no setor 2. Nesta área do ambiente foi verificado um erro médio superior a 3 °C, fato que pode ser explicado pela comunicação deste setor com outro laboratório, o que aumenta a temperatura do ar na posição do retorno dos aparelhos. Esta característica fez com que a unidade condensadora do ar condicionado deste setor fosse mais acionada e conseqüentemente aumentou o consumo de energia, medido em 26,21 kWh.

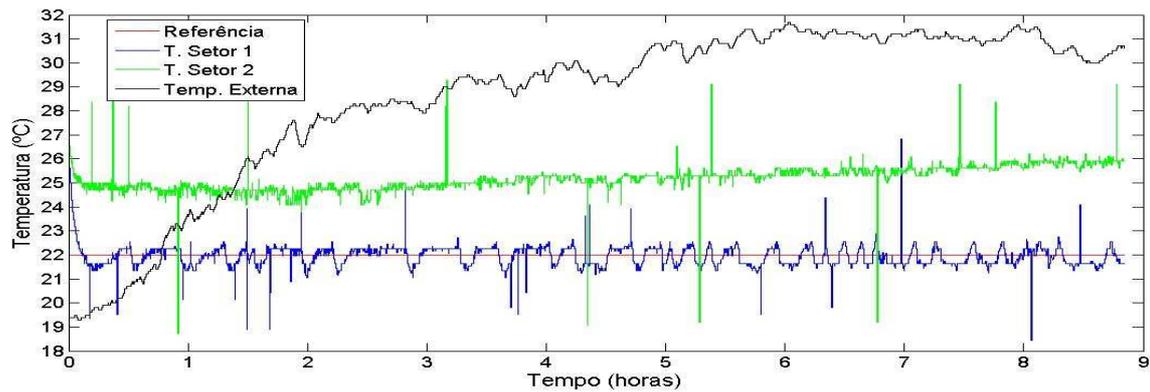


Figura 9. Experimento 3 – Controle liga-desliga.

A mesma característica observada no Experimento 3 foi verificada no resultado do controle próprio dos aparelhos de ar condicionado com o novo posicionamento dos nós sensores. O erro médio no controle de temperatura observado nos dois setores, comparados com o experimento anterior foi bastante semelhante. O consumo de energia medido foi de 32,58 kWh, bem próximo do valor atingido no Experimento 2.

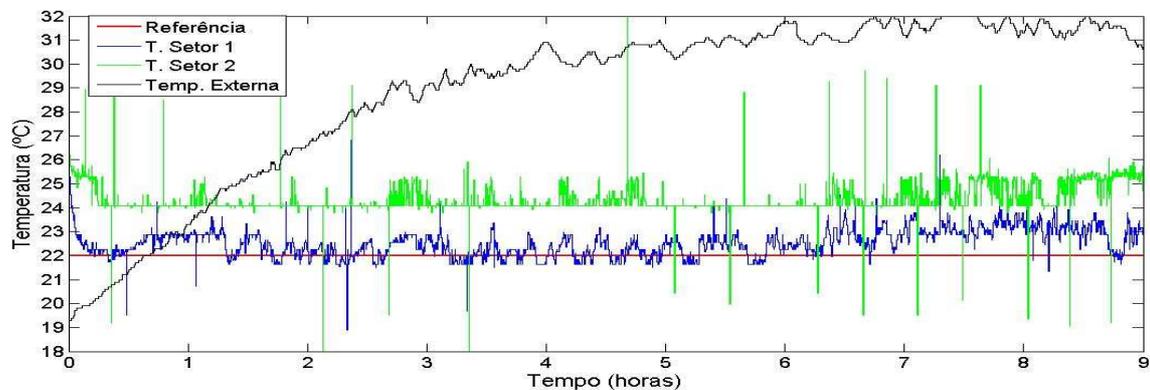


Figura 10. Experimento 4 – Controle próprio dos aparelhos.

Através dos resultados foi verificada a influência que o posicionamento dos nós sensores faz para manutenção do controle da temperatura e conseqüentemente para o consumo de energia, conforme pode ser observado nos resultados dos dois experimentos com o controle liga-desliga. No entanto, nas duas estratégias de posicionamento dos nós sensores propostas, o controle liga-desliga conseguiu combinar a melhor manutenção da temperatura na referência estabelecida com um menor consumo de energia (Tabela 1).

Tabela 1. Comparativo entre os experimentos.

| Experimento | Tipo de controle      | Posição dos nós sensores | Consumo   |
|-------------|-----------------------|--------------------------|-----------|
| 1           | Liga-desliga          | Centralizado             | 20,77 kWh |
| 2           | Próprio dos aparelhos | Centralizado             | 31,41 kWh |
| 3           | Liga-desliga          | Retorno                  | 26,21 kWh |
| 4           | Próprio dos aparelhos | Retorno                  | 32,58 kWh |

## 8 Conclusão

As tecnologias de comunicação *wireless* trazem uma grande flexibilidade no que diz respeito à construção de um sistema de automação. Os dispositivos que compõe a rede, nós atuadores e sensores podem ser dispostos independentemente da passagem de cabos de conexão, o que pode significar redução de custos e complexidade de instalação. Uma alteração do uso do espaço é facilmente assimilada.

A rede *ZigBee*, projetada a partir dos módulos *Xbee*, apresentou bons resultados para a aplicação em questão. No entanto, mesmo com o tratamento dado pelo *software* supervisor, esporadicamente amostras de temperatura incorretas eram recebidas. Esta falha pode ser corrigida com a implementação no supervisor de um tratamento mais minucioso das amostras recebidas.

Os experimentos demonstraram que o controle liga-desliga aplicado externamente aos aparelhos de ar condicionado apresentou melhores resultados do que o controle efetuado pelos próprios aparelhos, no que se

refere a controle de temperatura e consumo de energia. No entanto, em termos de conforto térmico em todo o ambiente, é necessária a realização de estudos mais aprofundados, por exemplo, utilizando um maior número de nós sensores para a verificação da temperatura em mais pontos do ambiente.

Em trabalhos futuros, é importante que seja realizado um estudo mais sistemático dos fatores que acarretaram um menor consumo de energia com a utilização do controle liga-desliga aplicado externamente nos aparelhos de ar condicionado.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem ao CNPq – CT-Energ, à CAPES - PROBRAL e à FINEP – PROMOVE iNOVA pelo apoio recebido.

### **Referências Bibliográficas**

Cordas, C., Rodrigues, J., Borrego, Vitor. (2007) *Sistema Distribuído de aquisição remota de grandezas atmosféricas*. Trabalho Final de Curso do 1º Ciclo (Escola Superior de Tecnologia) – Instituto Politécnico de Setúbal.

Kuobâa, A., Cunha, A., Alves M. (2007) *A Time Division Beacon Scheduling Mechanism for IEEE 802.15.4/Zigbee Cluster-Tree Wireless Sensor Networks*, Al-Imam Muhammad Ibn Saud University.

Monsignore, F. (2007). *Sensoriamento de ambiente utilizando o padrão ZigBee*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Montbeller, S. J. (2006) *Estudo sobre o emprego de dispositivos sem fio – wireless na automação do ar condicionado e de outros sistemas prediais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Ruas, A. C. (1999) *Conforto Térmico nos Ambientes de Trabalho*, FUNDACENTRO, São Paulo.

Santos, R. J. (2005) *Utilização de Controle Fuzzy para a Racionalização de Energia em Processo de Condicionamento de Ar*, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Brasília.

Silva, A. T. (2007) *Módulos de Comunicação Wireless para Sensores*. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Universidade do Porto.

Soares, M. J. *Controle de cargas AC com conjunto TRIAC/MOC*. Saber Eletrônica, Tatuapé, jun. 2006. p.10-15.

Tsang, K. F., Lee, W. C., Lam, K. L., Tung, H. Y., Kai Xuan (2007) *An integrated ZigBee automation system: An energy saving solution*. IEEE 14th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice Volume; pp. 252-258.

Urzêda, C. C. (2006) *Software SCADA como Plataforma para Racionalização Inteligente de Energia Elétrica em Automação Predial*, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Brasília.

## ENERGY SAVING IN BUILDING AUTOMATION USING ZIGBEE WIRELESS NETWORK AND FUZZY CONTROL

Paulo A. F. Júnior, paulo.eletrica@gmail.com

Adolfo Bauchspiess, adolfobs@unb.br

Automation, Vision and Intelligent Systems Laboratory - LAVSI

Robotics, Automation and Computer Vision Group – GRAV

Electrical Engineering Department - University of Brasília

Caixa Postas 4.386 70910-970 - Brasília – DF

**Abstract.** This paper presents results of wireless intelligent building automation focusing on the rational use of energy without prejudice to thermal comfort. The wireless approach, in this work, is used for better target retro-fitting of buildings still in operation, a great HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning) market share in Brazil. We used split air conditioners, power meters and temperature sensors, forming a ZigBee wireless network of sensors and actuators. A supervisory computer integrates all measurements and command signals. The thermal regulation of a laboratory environment was implemented with Atmel ATmega8 microcontrollers and XBee transceivers. Through the use of information not generally used in building automation we could reduce significantly the energy consumption while maintaining the thermal comfort sensation. We compared classical on-off and fuzzy control strategies. The fuzzy system, an expert rule based inference machine, could better take care of the different contexts in the building automation. We verified that both controllers were able to maintain the thermal comfort; however, the fuzzy controller attained it with lower energy consumption (reaching 30% savings in some situations).

*Keywords:* Building Automation; Thermal Comfort; Fuzzy Control; Energy Saving; Wireless Network

### 1. INTRODUCTION

The consumption of electric energy is increasing gradually in Brazil, buildings are responsible by much of this consumption. Much of this energy is consumed in maintaining thermal comfort. This is typically between 40% to 70% of total energy consumption of the building (Bauchspiess et al, 2004). Inadequate architectural project and non-controlled actuators may lead to waste of energy. An example: In most building environments with air-conditioning for windows over-cooling occurs, in other words, in certain hours of the day the ambient temperature drops below the comfort of temperature. After all, do not want to adjust the thermostat of each air-conditioning for windows throughout the day. The temperature going beyond of the comfort point is clearly a waste of energy.

The concessionaires promote programs to encourage the change of the habits of their customers regarding the use of energy stimulating most efficient consume. However the idea of energy efficiency hasn't be associated with lack of comfort, therefore, good levels of energy efficiency can be achieved taking simple measures. In other words, the intention isn't deprive people of comfort, but to maintain the same level of comfort with lesser expense of energy (Borduni, et al., 2006).

The building automation develops adequate techniques of implementation of efficient mechanisms that can avoid the unnecessary consumption of energy. According to the thermal comfort ISO 7730, environmental parameters as radiant temperature, air temperature, air humidity and wind speed and individual parameters as metabolism and clothing affect the sensation of thermal comfort and consequently energy consumption. There are projects in the area of rationalization of energy and thermal comfort using since

PID controllers until neural controllers, being also verified the use of fuzzy controllers for some authors (Gouda et al, 2001), (Haissig, 1999), (Santos, 2005), (Urzedo, 2006).

This paper presents results of intelligent building automation, forming a ZigBee wireless network of sensors and actuators. The use of wireless node sensors and actuators, aims in this work to simplify the retrofitting in buildings already in operation, reducing costs of equipment and installation.

A comparative study will be done between the ON-OFF controller (base on control of air conditioners) and the *fuzzy* controller (used in complex dynamic systems), aiming to show which of the controllers is more efficient in maintaining of the thermal comfort of the environment and with the least energy consumption.

In this work, we will consider only the control of temperature as indicative of thermal comfort. The temperature is, in fact, the predominant factor in the norm of thermal comfort. The relative air humidity has small influence in the usual bands measured in Brasilia (without extreme drought). The speed of the wind is important factor, but it will be considered appropriate. Mean radiating temperature is considered constant, as well as activity level and clothes are assumed as appropriate for the season.

## 2. THERMAL PROCESS

In the thermal system used in this work, Fig. 1, we can observe the provision of air conditioners, that together with power meters and temperature sensors that will form a ZigBee network managed by a coordinating computer running supervisory software. We used two split air conditioners with capacity 22.000 BTU / hr, each split air conditioners is composed of an internal unit, also called an evaporator, responsible for pumping cold air in the room and the external unit, also called condenser, responsible for cooling the gas that returns from the evaporator unit.

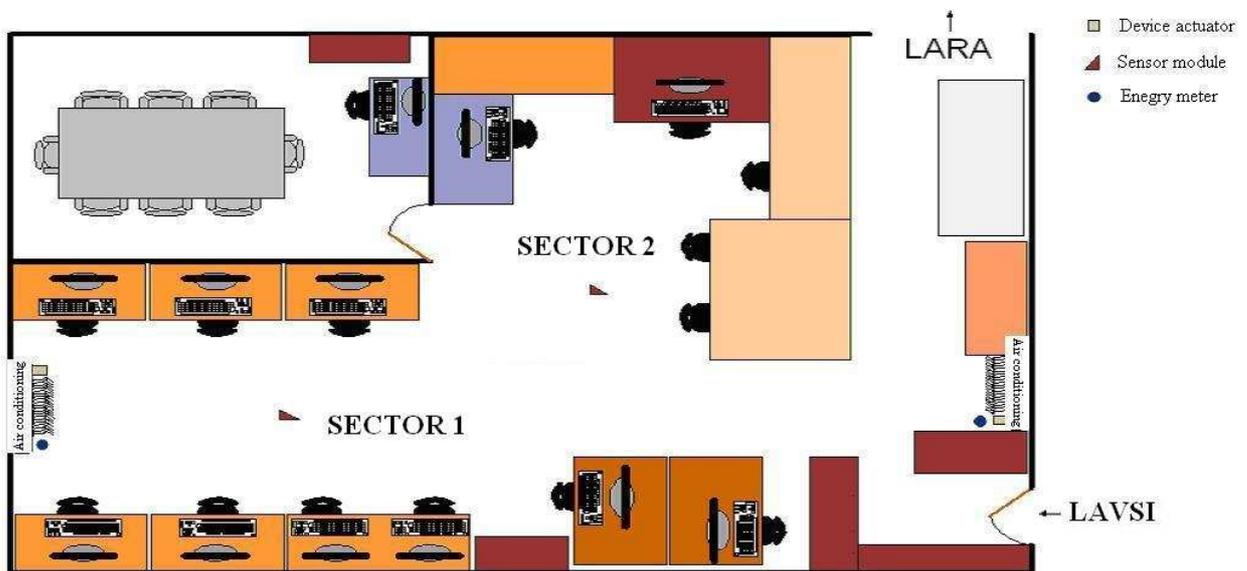


Figure 1. Thermal Systems (Filho and Dias, 2008).

## 3. USE OF WIRELESS NETWORKS IN BUILDING AUTOMATION

### 3.1. GENERAL ARCHITECTURE

The architecture of a system of supervision and control (SCADA) of a building is based on network equipment (processors and controllers). For the project in question was used an architecture based on modules from company Digi (previously MaxStream) called XBee.

The XBee is a wireless technology designed to meet the standard IEEE 802.15.4, it operates in a band of frequency of 2.4 GHz with a rate transmission of 250 Kbps and uses radio devices of low power (~ 100mW), low cost and small reach (100m). Figure 2 shows the topology used.

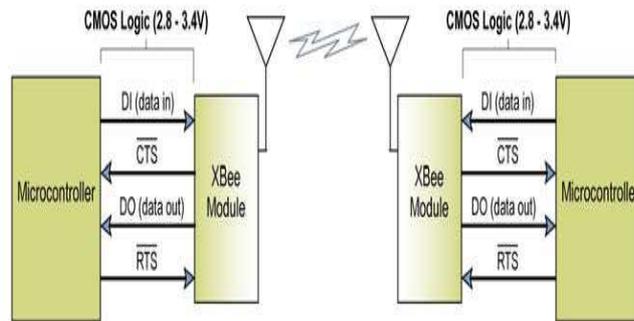


Figure 2. System Data Flow in an environment with UART interface (Oliveira et al 2007), (MaxStream, 2006).

We used two types of devices: The first device, the coordinator module is responsible for the interconnection between the node End Device and the PC, Fig. 3. It receives the node sensors data relate the temperature of environments and relaying the processed information for the node actuator.

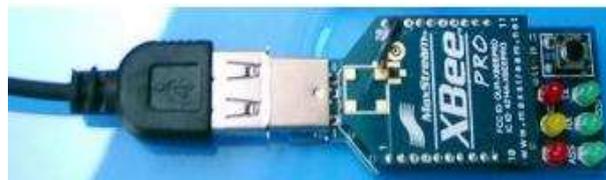


Figure 3. Plaque CON-USBEE (Rogercom).

There are also two End Devices (two specialized nodes), each responsible for the capture of analog signals relative the temperature read by the sensor, Fig. 4, and the other for the actuation of the output of the PWM, Fig. 5 and 6 .

In the sensor module, Figure 4, the functionality of conversion A / D for the XBee module was used. This allows a conversion without the microcontroller. Also a temperature sensor LM35 was used, that operates in the range of  $-55^{\circ}\text{C}$  to  $+125^{\circ}\text{C}$ , has a gain of  $10\text{mV} / ^{\circ}\text{C}$ , precision of  $0.5^{\circ}\text{C}$ , low energy consumption (active mode =  $250\ \mu\text{A}$ ) and, an operational amplifier to amplify the signal of the sensor in one of the A / D channel of the XBee.



Figure 4. Diagram of the End Device Sensor (Filho and Dias, 2008).

In Figure 5, the end device actuator is composed of a XBee, a microcontroller Atmega 8, an interface for a programmer and, a serial interface with the possibility of selection through jumpers between the communication PC / XBee, XBee/ATmega8 and, PC/ATmega8.



Figure 5. Diagram of the End Device Actuator (Filho and Dias, 2008).

The drive circuit, Figure 6 is composed for a TRIAC TIC246D that supports voltages of up to 400V and works with current of up to 16 A although the current that passes to the compressor is of approximately 0.8 A. It is composed for a optocoplador MOC3081 that beyond isolate the control circuit of the power circuit has a device zero detector, guaranteeing that the actuation of TRIAC only occur when the mains voltage passes for value zero and also contains a fuse.

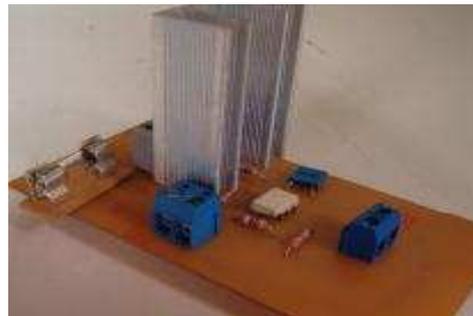


Figure 6. Drive Circuit (Filho and Dias, 2008).

### 3.2. SUPERVISORY SOFTWARE

The software SCADA is responsible for data acquisition equipment (sensors, actuators, programmable controllers, etc) to the computer, by your organization, use and management, showing to the operator of the system the status of the system in real time.

The variables of the process must be clearly presented to the operator through specific screens that can be visualized during the navigation in the module in real time, allowing operators to control and monitor all the system (Galo and Ribeiro, 2007).

In this work, the supervisory system was developed in language C, being that, all the flow of data in the network is done through of coordinator node. He modifies the personal address and destination of coordinator so that it receives / sends the data to the indicators node, saving in a file the referring data of the reference temperature, nodes temperature and actuators status, allowing the generation of reports and graphs with the data collected. The operations of configuration are done in the command mode and the reading of data in API mode of the XBee module. This is also where all information that enters or leaves the module is contained in framed composites in sequence by a party that delimits the begin of

the frame, one that informs its size, the part where it finds the data and the checksum (which it verifies the integrity of the frame) (Filho and Dias, 2008).

### 3.3. MEASUREMENT OF TEMPERATURE

In this work, a network of wireless sensors and actuators was developed. This was done by using a Xbee, that was implemented at the LAVSI laboratory. This was combined together with a fuzzy controller to ensure a thermally comfortable environment and with the least consumption of energy possible.

The network defined for implementation of this project consists of two nodes sensors, two nodes actuators and one node coordinator connected in a star form, where the sensor and actuator modules possess fixed addresses for sending and collecting of data.

The communication is done in unicast mode, and for this, the supervisory repeatedly changes the personal and destination address of the coordinator node, Fig. 7.

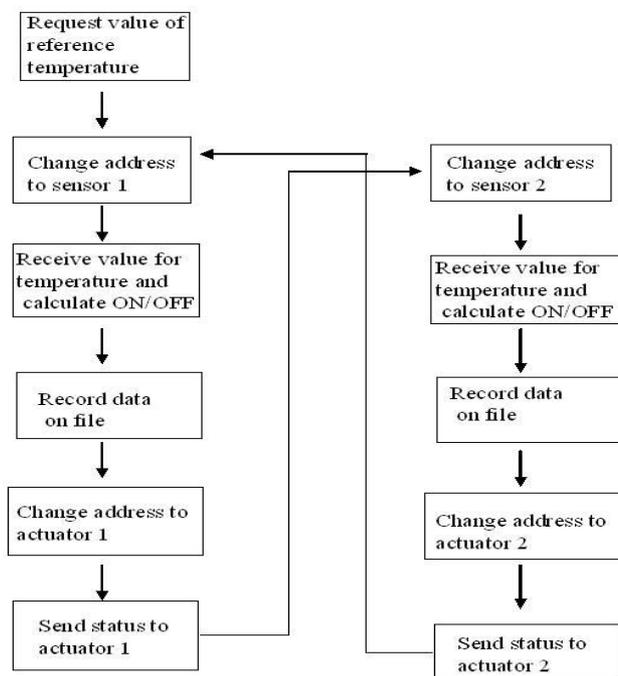


Figure 7. Flowchart of functioning of supervisory software (Filho and Dias, 2008).

The sensor nodes are configured to send three samples of temperature, Fig. 8, being that the data are sent inside of a package API. If the pair to pair absolute difference between the three read are lesser or equal to 1, or all are bigger than 1, the average of 3 read is taken, otherwise, it will be the average of two samples that have a different lesser than or equal to 1, (Filho and Dias, 2008).

|                     |            |            |            |                |
|---------------------|------------|------------|------------|----------------|
| SENSOR ADDRESS: 205 | T1 = 22.26 | T2 = 22.56 | T3 = 22.26 | ACTUATOR = OFF |
| REFERENCE = 22.00   |            |            |            | DURATION = 2   |
| SENSOR ADDRESS: 201 | T1 = 25.91 | T2 = 24.09 | T3 = 24.70 | ACTUATOR = ON  |
| SENSOR ADDRESS: 205 | T1 = 21.95 | T2 = 21.95 | T3 = 21.65 | ACTUATOR = OFF |
| REFERENCE = 22.00   |            |            |            | DURATION = 3   |
| SENSOR ADDRESS: 201 | T1 = 24.09 | T2 = 24.09 | T3 = 24.09 | ACTUATOR = ON  |
| SENSOR ADDRESS: 205 | T1 = 22.26 | T2 = 21.65 | T3 = 22.56 | ACTUATOR = OFF |
| REFERENCE = 22.00   |            |            |            | DURATION = 4   |
| SENSOR ADDRESS: 201 | T1 = 24.09 | T2 = 24.09 | T3 = 24.09 | ACTUATOR = ON  |
| SENSOR ADDRESS: 205 | T1 = 22.56 | T2 = 21.65 | T3 = 26.83 | ACTUATOR = OFF |
| REFERENCE = 22.00   |            |            |            | DURATION = 5   |

Figure 8. Supervisory.

The software implemented in the sensors module makes the read of the temperature and send to the supervisory computer through the Coordinator module, which is connected to the computer through a USB port, and converts data from serial to USB.

In the supervisory computer occurs the processing of the data and the control of the process done by the software implemented in the modules of the actuators that trigger the condenser unit through a PWM signal sent by the coordinator node.

#### 4. CASE STUDY: STUDY OF WIRELESS DEVICES IN BUILDING AUTOMATION

In this section techniques of control that can be used to control the temperature of building environments are shown.

##### 4.1. ON-OFF CONTROLLER

The on-off controller is one of the simplest controllers to be implemented, being therefore sufficiently used for temperature control in building environments. This is done by the controller, which compares the mean temperature output with the reference value, Eq. 1. If the reference temperature is higher than the mean temperature and if the difference between them is 0.5 ° C above, the control signal is zero. If the reference temperature is lower than the mean temperature and if the difference between them is 0.5 ° C below, the actuator closes to its limit point of operation.

$$u = \begin{cases} \text{low} & \text{if } t_{\text{ref}} > t_{\text{mean}} \text{ e } t_{\text{ref}} - t_{\text{mean}} > 0,5 \\ \text{high} & \text{if } t_{\text{ref}} < t_{\text{mean}} \text{ e } t_{\text{ref}} - t_{\text{mean}} < -0,5 \end{cases} \quad (1)$$

##### 4.2 FUZZY CONTROLLER

A fuzzy controller has as principle model a specialist, which is well able to control the process. Instead of dealing with a mathematical formulation of the process, imitate the specialist. For the construction of a model based on knowledge of the actions of the control of a specialist, there is a necessity of an appropriate mathematical structure (Urzedza, 2006). Figure 9 shows the block diagram with the stages of processing the fuzzy control.

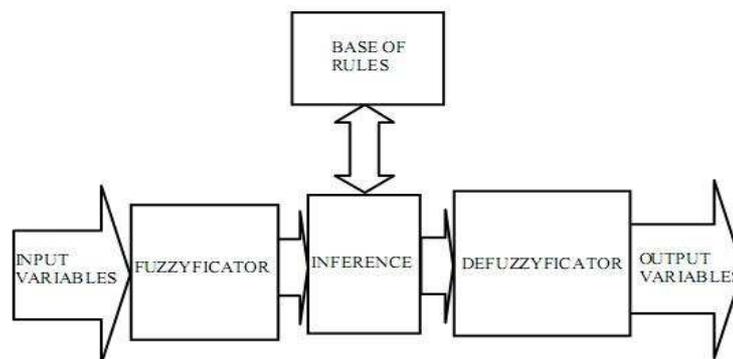


Figure 9. Diagram of a Fuzzy system [12].

The interface of fuzzification takes the values of input variables, make a scaling for conditioning the values to universes of normalized discourse and fuzzify the values, transforming numbers in fuzzy sets, in way that can become instances of linguistic variables (Gomide and Gudwin, 1994). These rules characterize the strategies of control and their objectives. The inference procedure acts on the data fuzzy input, together with the

rules to infer the actions of fuzzy control, using the fuzzy implication operator and the rules of inference of fuzzy logic. The defuzzifier acts on the actions of fuzzy control inferred, transforming them in action of non-fuzzy control, scaling toward compatible normalized values from the previous step with the values of the universes of discourse of real variables (Barg 2002).

In the implementation of the fuzzy controller the following input variables were defined: error and setpoint and one output variable: PWM output. Through error is possible to verify how far from the desired value is the temperature of the controlled room, setpoint adds the output a gain proportional the variation of reference, contributing to maintenance of the error in permanent regimen for any value of temperature (Santos, 2005). The output variable was formed by five triangular functions of relevance: very low, low, medium, high and very high. 25 rules were used in the database, as shown in Tab. 1 below.

Table 1. Rules Fuzzy

| <b>Erro x T_ref</b> | VERY LOW | LOW      | MEDIUM   | HIGH     | VERY HIGH |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| NEGATIVE            | HIGH     | HIGH     | HIGH     | HIGH     | HIGH      |
| LOW NEGATIVE        | MEDIUM   | MEDIUM   | MEDIUM   | MEDIUM   | MEDIUM    |
| ZERO                | MEDIUM   | MEDIUM   | MEDIUM   | MEDIUM   | MEDIUM    |
| LOW POSITIVE        | VERY LOW  |
| POSITIVE            | VERY LOW  |

### 4.3. ANALYSIS OF RESULTS

This stage consists in verify the results of the implementation. If the system developed takes care of the main objective, which is to use energy rationally while gradually reducing its consumption. Then the controllers will act in a form that allows that the temperature of the room to be maintained around the reference signal.

The energy saving will done by the using of an expert system based on fuzzy rules, which take care of the different contexts in building management, which will cause a decrease in the time of operation of air conditioners, and the amount of times in which it is activated.

During the experiments, besides the temperature of the room was registered the consumption in Wh of air conditioners were used. The monitoring of energy consumption of air conditioners was done by the meter Landis & Gyr model ZMD-128, being the communication with the two meter made through of an optical connector and the values of consumption visualized by software of the manufacturer.

To maintain the thermal comfort of the environment a maximum variation of the temperature of 2 ° C, range usually accepted for climatization was used (Gouda et al 2001). Two tests were done. In the first test the controller worked with a fix reference. The results obtained in the first test can be viewed in the Fig. 10 and 11.

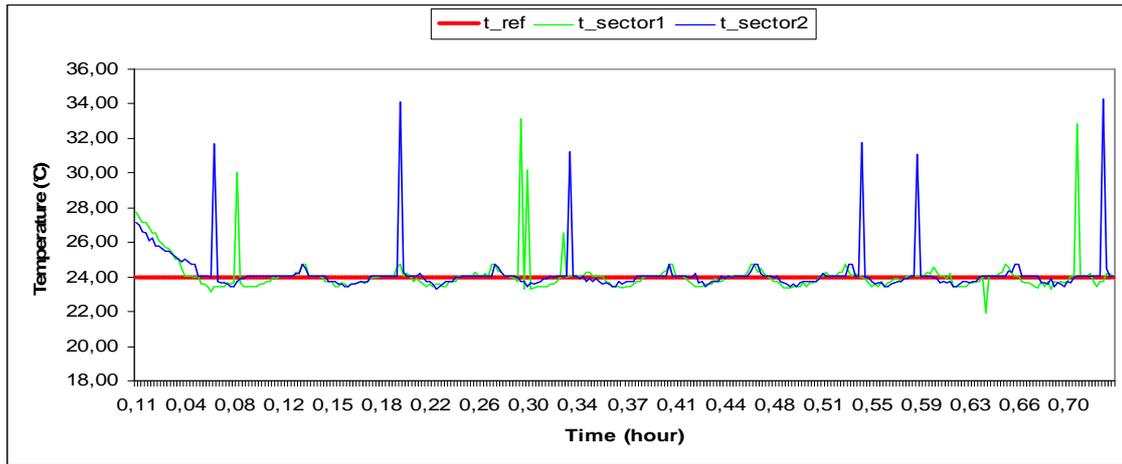


Figure 10. Fuzzy controller – first test

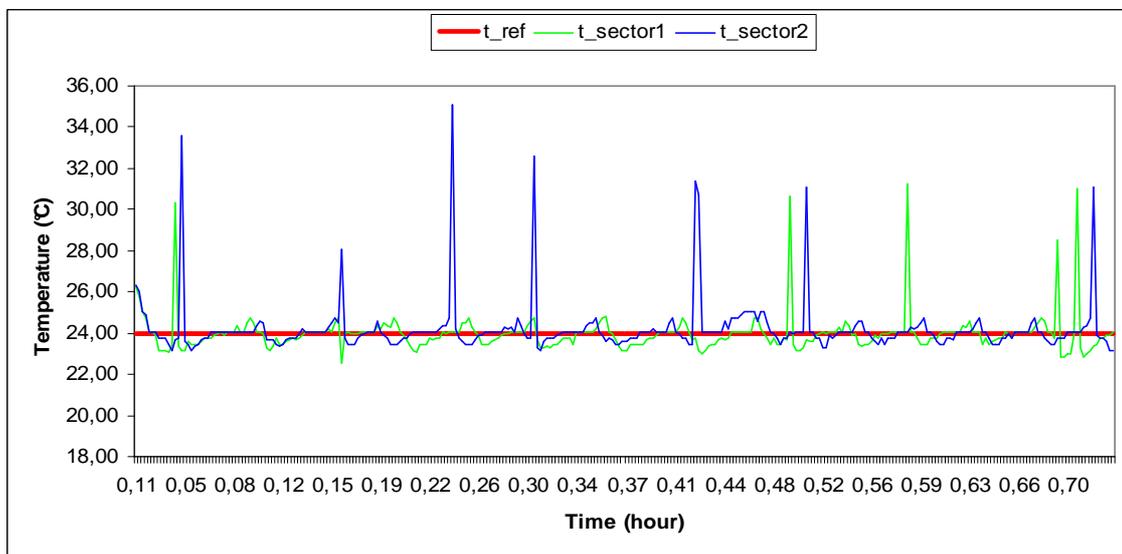


Figure 11. On-off controller – first test

It can be verified in fuzzy control that the temperature of the room remained around 24.5 ° C, with errors less than 1 ° C, which is a value that is inside of the standard of thermal comfort. In the on-off control, the temperature of the room also remained around 24.5 ° C, with errors of less than 1 ° C. Through the signal of the actuators it can be verified that the time that the air conditioning is activated and the amount of switching to trigger it is lower in the fuzzy controller compared to the on-off controller. This fact contributes directly in the consumption of energy and the useful life of the equipment.

This fact can be demonstrated through Tab. 2 which shows the consumption of energy for the controllers where it can be verified that the consumption of energy in the on-off control, which is practically the same during all the experiment, is bigger than the consumption in fuzzy control.

Table 2. Total consumption of the controller in the first test

| Tippe controller | consumption first test (KWh) |
|------------------|------------------------------|
| On-Off           | 1,64                         |
| Fuzzy            | 1,36                         |

For the second test a change in the values of the reference temperature was done to observe the transient behavior of controllers. The results obtained in the second test is visualized in the Fig. 12 and 13.

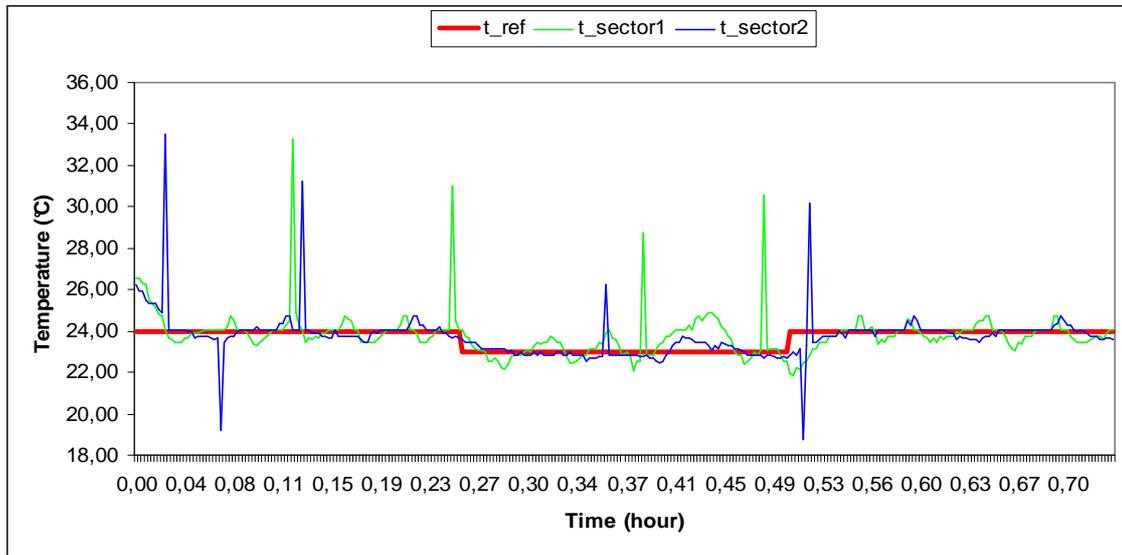


Figure 12. Fuzzy controller – second test

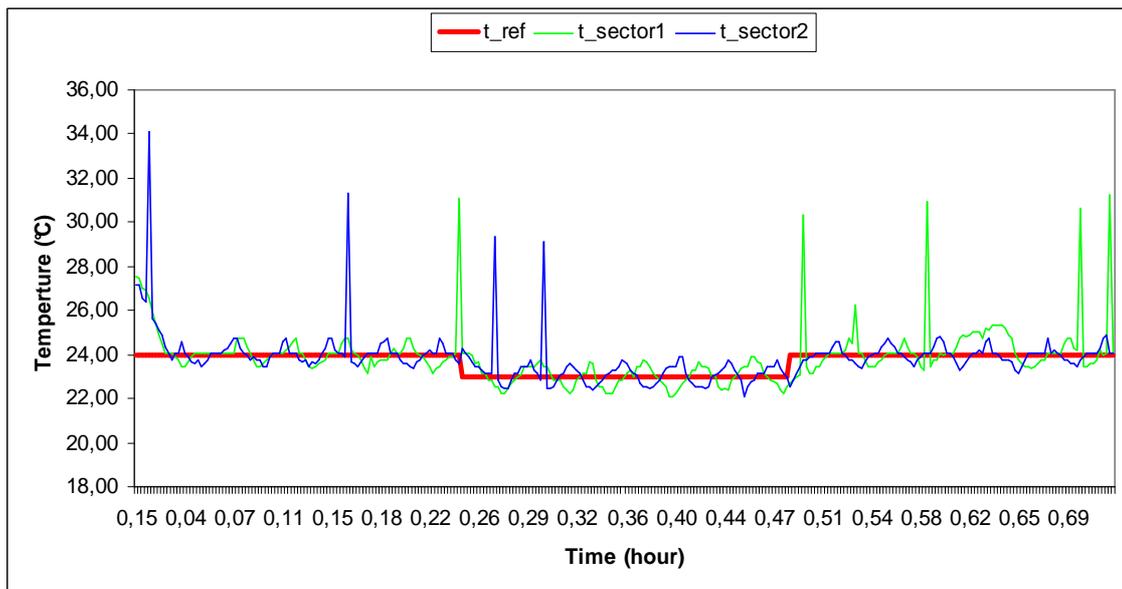


Figure 13. On-off controller – second test

As in the first test, we can observe that both controllers were able to maintain the temperature inside the limits of thermal comfort. Furthermore, using the fuzzy controller energy consumption dropped dramatically, Tab. 3. While conducting the tests were also verified the influence in the results and in energy consumption when they are conducted without the presence of people in the environment and the part of the morning where the external temperature is lower. When tests are done in the morning or without the presence of people the consumption of energy and drive of the air-conditioning to maintain the temperature inside of the limits of thermal comfort is lower.

Table 3. Total consumption of the controller in the second test

| Type controller | consumption second test (KWh) |
|-----------------|-------------------------------|
| On-Off          | 1,80                          |
| Fuzzy           | 1,51                          |

## 5. CONCLUSION

This project had as objective to show how the intelligent building automation can contribute to the reduction of energy consumption in air conditioning systems. The energy saving can be achieved by a specialized system based on fuzzy rules, that take into account the different contexts of building management.

Through experiments, we can observe that besides maintaining thermal comfort of the environment there was a saving of 19.97% and 22.94% respectively in energy consumption with the use of fuzzy controller compared with ON-OFF controller that is the base of control of air conditioners. The reduction in energy consumption was due to use of an appropriate conjunct of rules, which ensured a decrease in the time of operation of equipment and the amount of times they were actuated.

The use of ZigBee wireless communication occasionally showed missed packets that were detected by the transmission of temperature equal to zero, requiring the forwarding of them. The implementation of a protocol for communication, e.g. BACNet should identify such situations and request the forward of lost data while ensuring greater reliability in data traffic.

The implementation of a protocol of communication, e.g BACNet and the monitoring system of remote form, through the Internet, would be a great improvement to the system, guaranteeing a bigger reliability in the traffic of the data and allowing the operator to monitor to follow the process from anywhere.

The use of API mode for the operations of configuration makes the total time spent in reading of the data of all sensors and actuators 6 seconds approximately, allowing a larger sample data for analysis.

The flexibility to deploy wireless temperature, humidity, air speed, etc sensors. freely in the environment, allows control of the temperature that effectively interests the user of the environment and not the usual temperature returned by the air conditioners of window.

A better analysis must be made using other types of controllers, but also increasing the time of the simulation experiments, allowing a greater improvement of the controller used for the type of application desired.

## 4. REFERENCES

- Barg, E. K., 2002, "Protótipo de um Controlador de Temperatura Baseado em Lógica Fuzzy Utilizando um Microcontrolador", Projeto de Graduação (Departamento de Ciências da Computação) - Universidade Regional de Blumenau, 57pp.
- Bauchspiess, A., Souza, A.S. Leite, A.A.C., Ramos, L.M.A., Pereira, E.S., Santos, R.J., 2004, "Fuzzy Thermal Control with Remote Access for Building Automation", 11th IFAC INCOM, Salvador/Brazil, 6 pp
- Bilobrovec, M., Marçal, R. F. M., Kovaleski, J. L., 2004, "Implementação de um Sistema de Controle Inteligente Utilizando a Lógica Fuzzy", XI SIMPEP, Bauru/Brasil
- Bourdini, R. N., 2006, "Simulação comutacional para Análise de Eficiência Energética em Edificações", Projeto de Graduação (Departamento de Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, 64pp.

- Filho, P. R. M. and DIAS, Y. F. G., 2008, “Acionamento de potência para rede de automação wireless”, Projeto de Graduação (Departamento de Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, 67pp.
- Gallo, E. A. and Ribeiro, F. N., 2007, “Índice de Conforto Térmico ISSO 7730 em Automação Predial”, Projeto de Graduação (Departamento de Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, 98pp.
- Gomide, F. A. C. and Gudwin, R. R., 1994, “Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy”, SBA Controle e Automação. Vol 4, nº 3, pp 97-115
- Gouda, M. M., S. Danaher and C. P. Underwood, 2001, “Thermal Comfort Based Fuzzy Logic Controller”, Building Serv. Eng. Rs. Technol. Vol 22(4), pp 237-253
- Haissig, Ch., 1999, “Adaptive Fuzzy Temperature Control for Hydronic Heating Systems”, IEEE Int. Conference on Control Applications; Hawai 582-588
- MaxStream, 2006 “XBee/XBee-Pro OEM RF Modules”, xbeeproductmanual.pdf <[www.digi.com](http://www.digi.com)>
- Montbeller, S. J., 2006, “Estudo sobre o emprego de dispositivos sem fio – wireless na automação do ar condicionado e de outros sistemas prediais”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Oliveira, D.B.S., Zanatta, M.P.B.F. and Santos, R. A., 2007, “Redes de Sensores e Atuadores Wireless para Automação Predial”, Projeto de Graduação (Departamento de Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, 59pp.
- ROGERCOM – Tutorial sobre ZigBee. Tópico sobre o transceiver wireless XBee/ZigBee IEEE 802.15.4, <http://www.rogercom.com/>
- Santos, R. J., 2005, “Utilização de Controle Fuzzy para a Racionalização de Energia em Processo de Condicionamento de Ar”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Brasília.
- Shepherd. A.B. and Batty, W.J., 2003, “Fuzzy control strategies to provide cost and energy high quality indoor environments in buildings with high occupant densities”, Building Services Engineers Rs. Tech. 24, 1, pp.35-45
- Urzêda, C. C., 2006, “Software SCADA como Plataforma para Racionalização Inteligente de Energia Elétrica em Automação Predial”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Brasília.
- Yonezawa, K., F. Yamada, Y. Wada and Y. Hanada, 2000, “Comfort Air-conditioning Control for Building Energy saving”, 26th IEEE Industrial Electronics Society Conference. Vol. 3. pp. 1737-1742.

## **5. RESPONSIBILITY NOTICE**

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