



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Conforto Térmico Multiusuário com Controle da  
Temperatura e Velocidade do Ar com base no Voto Médio  
Estimado usando Controle *Fuzzy* e Rede sem fio *Zigbee***

Gautama Gandhi Cardoso de Azevedo

Manaus - Amazonas

Agosto de 2018

Gautama Gandhi Cardoso de Azevedo

**Conforto Térmico Multiusuário com Controle da  
Temperatura e Velocidade do Ar com base no Voto Médio  
Estimado usando Controle *Fuzzy* e Rede sem fio *Zigbee***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade do Amazonas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica na área de concentração de Controle e Automação de Sistemas.

Orientador: Prof. D.Sc. Celso Barbosa Carvalho

Gautama Gandhi Cardoso de Azevedo

**Conforto Térmico Multiusuário com Controle da  
Temperatura e Velocidade do Ar com base no Voto Médio  
Estimado usando Controle *Fuzzy* e Rede sem fio *Zigbee***


Aprovado em 29 de junho de 2018.

BANCA EXAMINADORA



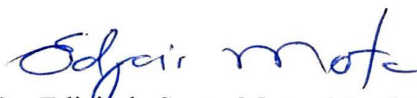
Prof. D.Sc. Celso Barbosa Carvalho - Presidente e Orientador

Universidade Federal do Amazonas – UFAM



Prof. D.Sc. André Luiz Duarte Cavalcante - Membro Interno

Universidade Federal do Amazonas – UFAM



Prof. D.Sc. Edjair de Sousa Mota - Membro Externo

Universidade Federal do Amazonas – UFAM

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

A994c Azevedo, Gautama Gandhi Cardoso de  
Conforto térmico multiusuário com controle da temperatura e  
velocidade do ar com base no Voto Médio Estimado usando  
controle Fuzzy e rede sem fio Zigbee / Gautama Gandhi Cardoso  
de Azevedo. 2018  
72 f.: il.; 31 cm.

Orientador: Celso Barbosa Carvalho  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade  
Federal do Amazonas.

1. Conforto térmico. 2. controlador fuzzy. 3. Voto Médio Estimado.  
4. Predicted Mean Vote. I. Carvalho, Celso Barbosa II. Universidade  
Federal do Amazonas III. Título

## **Agradecimentos**

Primeiramente à Deus, por ter me concedido forças e sabedoria para concluir esta missão.

Aos meus pais Adailton e Gecilda.

À minha esposa Elanne Roberta pelo prestimoso apoio e incentivo.

À minha eterna filha Sasha Maria que não está mais entre nós, pois partiu para o plano espiritual, minha eterna gratidão.

Ao meu afilhado Lucas Moura pelo incentivo.

Aos meus sogros Shirley Maria e Miguel Hernandez.

Ao meu orientador Prof. D.Sc. Celso Barbosa Carvalho.

Ao Programa de Pós – Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal do Amazonas – UFAM.

Parte dos resultados apresentados neste trabalho foram obtidos através do Projeto de Pesquisa e formação de recursos humanos, em nível de graduação e pós-graduação, nas áreas de automação industrial, software para dispositivos móveis e TV Digital, financiado pela Samsung Eletrônica da Amazônia Ltda., no âmbito da Lei no 8.387/91, Art. 2º. Esta pesquisa também foi financiada com recursos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM).

Resumo da Dissertação apresentada à UFAM como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

CONFORTO TÉRMICO MULTIUSUÁRIO COM CONTROLE DA TEMPERATURA E VELOCIDADE DO AR COM BASE NO VOTO MÉDIO ESTIMADO USANDO CONTROLE *FUZZY* E REDE SEM FIO *ZIGBEE*

Gautama Gandhi Cardoso de Azevedo

Orientador: Celso Barbosa Carvalho

Programa: Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Nesta dissertação, utilizamos uma metodologia que demonstra a importância da velocidade do ar no conforto térmico em torno dos usuários de um recinto climatizado. Para isso utilizamos redes de sensores sem fio onde os dados de temperatura, umidade e velocidade do ar trafegaram pela rede usando o padrão *Zigbee* e um controlador baseado na lógica *fuzzy* realizou as simulações dos ajustes de um aparelho de ar condicionado e um ventilador de teto, visando manter a temperatura e velocidade do ar em torno dos usuários de um recinto dentro de valores aceitáveis para proporcionar o conforto térmico com base no índice de sensação térmica conhecido como Voto Médio Estimado ou *Predicted Mean Vote (PMV)*. Dois métodos foram utilizados para medir o desempenho da metodologia proposta: o método convencional e o método com controle *fuzzy*. Para isso analisamos os consumos de energia do sistema utilizando o método convencional que consiste apenas em um aparelho de ar condicionado funcionando e o consumo de energia com o método de controle *fuzzy* atuando, ou seja, o aparelho de ar condicionado opera para proporcionar a temperatura de conforto térmico em torno dos usuários com base no *PMV* e o ventilador de teto mantém a temperatura de conforto térmico o maior tempo possível utilizando-se da velocidade do ar enquanto o aparelho de ar condicionado encontra-se desligado economizando energia.

**Palavras-chave:** Conforto térmico, controlador *fuzzy*, Voto Médio Estimado.

Abstract of Dissertation presented to UFAM as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering

MULTI-USER THERMAL COMFORT WITH AIR TEMPERATURE AND SPEED  
CONTROL BASED ON PREDICTED MEAN VOTE USING FUZZY CONTROL AND  
WIRELESS NETWORK ZIGBEE

Gautama Gandhi Cardoso de Azevedo

Advisor: Celso Barbosa Carvalho

Department: Postgraduate in Electrical Engineering

In this Master's thesis, we use a methodology that demonstrates the importance of air speed in thermal comfort around the users of an air-conditioned enclosure. For this, we used wireless sensor networks where the data of temperature, humidity and air speed traveled through the network using the Zigbee standard and a controller based on fuzzy logic performed the simulations of the settings of an air conditioner and a ceiling fan, aiming to maintain the temperature and air speed around the users of an enclosure within acceptable values to provide thermal comfort based on the Predicted Mean Vote (PMV) thermal sensation index. Two methods were used to measure the performance of the proposed methodology, the conventional method and the method with fuzzy control, for this we analyze the energy consumption of the system using the conventional method, which consists of only the functioning air conditioner and the energy consumption with the acting fuzzy control method, the air conditioner operates to provide the thermal comfort temperature around the users based on the PMV and the ceiling fan maintains the thermal comfort temperature as long as possible using of the air speed while the air conditioner is off saving energy

**Keywords:** Thermal Comfort, fuzzy controller, Predicted Mean Vote.

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	Visão Geral .....	14
1.2	Motivação .....	15
1.3	Objetivos .....	16
1.4	Organização do Trabalho .....	17
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>18</b>
2.1	Lógica <i>Fuzzy</i> .....	18
2.2	Voto Médio Estimado ( <i>Predicted Mean Vote -PMV</i> ).....	22
2.3	O Padrão <i>Zigbee</i> .....	26
2.4	Sensor de Temperatura e Umidade DHT 11 .....	27
2.5	Trabalhos Relacionados .....	28
<b>3</b>	<b>PROPOSTA DO SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA E VELOCIDADE DO AR UTILIZANDO CONTROLE <i>FUZZY</i> E REDE SEM FIO <i>ZIGBEE</i> .....</b>	<b>31</b>
3.1	Introdução .....	31
3.2	O Controlador <i>Fuzzy</i> .....	33
3.2.1	Variável de Entrada Temperatura de Referência <i>Tref</i> .....	35
3.2.2	Variável de Entrada Erro .....	35
3.2.3	Variável de Entrada Umidade .....	37
3.2.4	Base de Regras .....	37
3.2.5	Variáveis de Saída <i>AjusteVent</i> e <i>AjusteAr</i> .....	39
<b>4</b>	<b>PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>43</b>
4.1	Setup dos Experimentos.....	43
4.2	Base de Dados.....	47
4.3	Descrição das Métricas de Desempenho .....	48
4.4	Resultados .....	49
4.5	Análise dos Resultados .....	54
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>56</b>
5.1	Trabalhos Futuros .....	56



<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>58</b>
<b>A CÓDIGO DE IMPLEMENTAÇÃO DO ARDUÍNO UTILIZANDO A REDE <i>ZIGBEE</i> PARA TRÁFEGO DE DADOS DE TEMPERATURA E UMIDADE .....</b>	<b>62</b>
<b>B CÓDIGOS IR DO APARELHO DE AR CONDICIONADO CAPTURADOS PELO ARDUÍNO .....</b>	<b>64</b>
<b>C CÓDIGO DO WATTÍMETRO IMPLEMENTADO NO ARDUÍNO MEGA.....</b>	<b>68</b>
<b>D ALGORITMO DO CONTROLADOR <i>FUZZY</i> EXTRAÍDO DO MATLAB R2014...</b>	<b>71</b>

# Lista de Figuras

2.1	Processo básico de um sistema lógico <i>fuzzy</i> . Fonte: Moraes (2010).....	19
2.1a	Funções de pertinência da lógica <i>fuzzy</i> .....	19
2.1b	Funções de pertinência da lógica <i>fuzzy</i> .....	20
2.2	Variáveis linguísticas. Fonte: Pilatti (2012).....	20
2.3	Método de <i>defuzzificação</i> da centróide ou centro da gravidade. Fonte: Barg (2002)...	21
2.4	Trocas de calor realizadas pelo corpo e o ambiente. Fonte: Ruas (1999).....	22
2.5	Escala de sensação térmica de Fanger. Fonte: Fanger (1970).....	25
2.6	Gráfico da Porcentagem de insatisfeitos em função do <i>PMV</i> . Fonte: Fanger (1970)...	26
2.7	Topologias da rede Zigbee. Fonte: Caetano (2016).....	27
2.8	Pinagem do sensor DHT11.....	28
3.1	Transmissão dos sinais entre os dispositivos da rede <i>Zigbee</i> .....	32
3.2	Digrama de blocos do sistema.....	33
3.3	Modelo do controlador <i>fuzzy</i> .....	33
3.4	Funções de pertinência da variável de entrada Tref.....	35
3.5	Cálculo da variável de entrada Erro.....	36
3.6	Funções de pertinência da variável de entrada Erro.....	36
3.7	Funções de pertinência da variável de entrada Umidade.....	37
3.8	Valores linguísticos da variável de saída AjusteVent.....	39
3.9	Valores linguísticos da variável de saída AjusteAr.....	39
3.10	Simulação do Controle <i>Fuzzy</i> com a visualização das regras.....	40
3.11	Superfície 3D - Relação entre as variáveis de entrada Tref, Erro e a saída AjusteVent.....	41
3.12	Superfície 3D - Relação entre as variáveis de entrada Tref, Erro e a saída AjusteAr.....	41

3.13 Superfície 3D - Relação entre as variáveis de entrada Tref, Umid e a saída AjusteVent.....	41
3.14 Superfície 3D - Relação entre as variáveis de entrada Tref, Umid e a saída AjusteAr.....	42
4.1 Esquema do Circuito <i>Dimmer AC</i> para o ajuste da velocidade de rotação do ventilador de teto.....	45
4.2 Disposição dos módulos sensores, coordenador e dispositivos na sala.....	46
4.3 Dados de temperatura e umidade coletados no nó coordenador e nós sensores trafegados pela rede Zigbee e capturados pela serial do arduíno.....	47
4.4 Dados de velocidade do ar medidos no ambiente.....	48
4.5 Variação das temperaturas nos nós sensores pelo método convencional.....	50
4.6 Variação do PMV nos nós sensores pelo método convencional.....	50
4.7 Variação da temperatura nos nós sensores pelo método de controle fuzzy.....	51
4.8 Variação do índice PMV nos nós sensores pelo método de controle fuzzy.....	51
4.9 Variação da umidade nos nós sensores pelo método convencional.....	52
4.10 Variação da umidade nos nós sensores pelo método de controle fuzzy.....	52
4.11 Variação da potência média do sistema pelo método convencional.....	53
4.12 Variação da potência média do sistema pelo método com controle <i>fuzzy</i> .....	54

# Lista de Abreviaturas

<i>PMV</i>	<i>Predicted Mean Vote</i>
<i>ANFIS</i>	<i>Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System</i>
<i>FIS</i>	<i>Fuzzy Inference System</i>
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>
<i>ISM</i>	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
<i>IEEE</i>	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
<i>API</i>	<i>Application Programming Interface</i>
<i>NTC</i>	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
<i>HVAC</i>	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>
<i>IR</i>	<i>Infrared</i>
<i>PWM</i>	<i>Pulse Width Modulation</i>

# Lista de Tabelas

2.1	Variáveis utilizadas no método PMV.....	21
2.2	Taxas de metabolismo para atividades comuns.....	22
2.3	Índices de isolamento de alguns tipos de vestuário.....	22
3.1	Base de Regras Fuzzy com os antecedentes e consequentes.....	53
4.1	Comparação dos Consumos de Energia entre os Métodos.....	46

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Visão Geral

Os sistemas de climatização no Brasil representam parcelas significativas no consumo de energia nas áreas comercial e residencial. Nas regiões Norte e Nordeste do país, onde a média anual de temperatura é mais elevada, estas parcelas são mais representativas.

Pesquisas realizadas na área de conforto térmico como de K. L. Ku, J. S. Liaw, M. Y. Tsai e T. S. Liu (2015), Jaeseok Yun e Kwang–Ho Won (2012), Santos (2011), Ruas (1999), LUO Yifan, LI Ning, LI Shaoyuan (2014), e Souza (2014) visam tornar os sistemas de climatização mais econômicos quanto ao consumo de energia dos equipamentos de condicionamento de ar.

Vale ressaltar, que para abordarmos Novos sistemas de controle com foco em conforto térmico, os sistemas de climatização precisam estar bem dimensionados conforme a carga térmica que compreende as trocas de calor entre o ambiente interno e externo, calor produzido por luminárias, equipamentos elétricos e por ocupantes presentes no recinto.

Na região Norte do Brasil, o clima é classificado como quente e úmido, onde a ventilação exerce um papel importante no conforto térmico promovendo as trocas térmicas através das correntes de ar, que se movimentam em torno dos ocupantes, conhecida como correntes de convecção, e pela evaporação do suor a partir da pele entre o corpo e o ambiente (RUAS, 1999).

Convecção é o processo de remoção do calor do corpo, que ocorre quando o ar apresenta temperatura inferior à do corpo e o corpo transfere calor pelo contato com o ar frio circundante. À medida que ar quente sobe, o ar frio ocupa seu lugar, completando-se, desta forma, o ciclo de convecção (RUAS, 1999).

Segundo De Vecchi e Lamberts (2013), a contribuição da velocidade do ar na evaporação do suor a partir da pele varia de acordo com certas condições ambientais e pessoais como temperatura ambiente, umidade relativa do ar, velocidade do ar, temperatura média radiante, atividade exercida pelo corpo e tipo de roupa usada, que precisam estar com valores adequados para garantir o conforto térmico, o qual é medido por um índice conhecido como Voto Médio Estimado (*Predicted Mean Vote – PMV*).

O *PMV (Predicted Mean Vote)* é um índice que avalia as condições de conforto ou desconforto térmico das pessoas com base nas sensações térmicas experimentadas pelas mesmas em decorrência da combinação de determinados fatores ambientais e pessoais a serem abordados posteriormente (FANGER,1970).

A sensação térmica é a temperatura aparente sentida pela pele exposta, decorrente da combinação de variáveis ambientais tais como temperatura do ar e velocidade do vento, e está relacionada com a percepção de frio e calor pelo corpo. O vento intensifica a evaporação da água presente na pele, provocando a redução da temperatura corporal.

A proposta deste trabalho é apresentar um sistema de controle para conforto térmico dos usuários de um recinto, onde a umidade relativa, temperatura ambiente e a velocidade do ar serão medidas. No entanto, as variáveis a serem controladas serão apenas a temperatura e a velocidade do ar visando manter o *PMV (Predicted Mean Vote)* dentro de determinados valores de sensações térmicas de conforto (FANGER,1970).

Para isto, utilizamos uma rede de sensores sem fio e um Controlador Lógico *Fuzzy*, com o objetivo de promover o ajuste da temperatura que disponibilizará conforto térmico, utilizando para isto, um aparelho de ar condicionado e um ventilador de teto que controlarão a temperatura e a velocidade do ar no ambiente.

## **1.2 Motivação**

Os condicionadores de ar convencionais existentes no mercado, ajustam a temperatura e velocidade do ar de acordo com a preferência do usuário e não possuem sistemas de controles que possibilitem o ajuste destes parâmetros com base no conforto térmico das pessoas no interior de um ambiente.

Os sistemas convencionais ajustam as temperaturas sem levar em consideração o conforto térmico dos ocupantes de um recinto. Dentro do ambiente, alguns usuários podem estar com frio e outros com calor.

A implementação de um sistema de controle eficaz da temperatura e velocidade do ar no interior do ambiente com base no *PMV* para múltiplos usuários, garantirá que o conforto térmico dos mesmos seja mantido dentro de parâmetros aceitáveis.

Um Controlador lógico *fuzzy* possibilitará que o controle da velocidade do ar e da temperatura no ambiente em torno dos usuários, seja realizado com a utilização de ventilação forçada (ventilador de teto) e de aparelho de ar condicionado, que trabalharão

com intervalos de tempo diferentes, ou seja, um ou outro estará operando para manter o *PMV* dentro da faixa de conforto térmico, possibilitando a economia de energia.

### 1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho de pesquisa é propor um sistema de controle com base no *PMV*, que promova a medição e controle da temperatura e velocidade do ar no interior de um ambiente com a utilização da Lógica *Fuzzy* com foco na economia de energia e no conforto térmico de múltiplos usuários.

Quando falamos sobre conforto térmico, não há como não falarmos do índice de conforto térmico criado por Fanger (1970), o *PMV*, onde variáveis são medidas no ambiente (ex.: temperatura, umidade e velocidade do ar) para determinar, mesmo sem um sistema de votação, se os usuários de um ambiente estão ou não em situação de conforto térmico, por isso a designação de múltiplos usuários. Isto possibilita o desenvolvimento de um sistema de controle que não necessita ser treinado, tornando este sistema cômodo de ser utilizado.

Condições imprecisas aliadas às sensações térmicas relacionadas à percepção de frio e calor sentidas pelo corpo, nos possibilita que a Lógica *Fuzzy* seja aplicada com presteza na execução das decisões.

Com os controles efetivos da temperatura e velocidade do ar atuando nos equipamentos (ar condicionado e ventilador de teto), esperamos reduzir o consumo de energia e conseqüentemente promovendo a economia nas contas de luz.

Os objetivos específicos que embasam este trabalho estão descritos a seguir:

- Criar um sistema de controle baseado na Lógica *Fuzzy*;
- Utilizar a Lógica *Fuzzy* para o controle da temperatura e velocidade do ar no interior do ambiente;
- Projetar e implementar um sistema de coleta de dados de temperatura, velocidade do ar e umidade relativa, utilizando uma rede de sensores sem fio com o uso do padrão Zigbee;
- Os controladores *fuzzy* visarão a economia de energia e possibilitará controlar as variáveis ambientais (temperatura e velocidade do ar) a fim de proporcionar conforto térmico para os ocupantes de um ambiente com base no *PMV*.
- Avaliar o desempenho do sistema proposto.



## 1.4 Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. No Capítulo 2, são apresentados os conceitos relacionados ao Voto Médio Estimado (*Predicted Mean Vote - PMV*), redes de sensores sem fio *Zigbee* e controladores baseados em lógica *fuzzy* e alguns trabalhos relacionados com o tema deste trabalho de pesquisa.

O Capítulo 3, detalhamos a proposta do Sistema de Controle de Temperatura e Velocidade do Ar Utilizando Controle Fuzzy e Rede sem fio *Zigbee*.

O Capítulo 4, mostramos os procedimentos experimentais usados para avaliar o desempenho do sistema de controle de temperatura e velocidade do ar utilizando controle *fuzzy* e rede sem fio *Zigbee*, detalhando os passos utilizados nos experimentos, bem como os resultados alcançados e suas análises.

No Capítulo 5 traz as conclusões do trabalho, discute as limitações e contribuições do trabalho desenvolvido e apresenta sugestões de trabalhos futuros.

## Capítulo 2

### Fundamentação Teórica

Apresentamos os conceitos relacionados ao Voto Médio Estimado (*Predicted Mean Vote - PMV*), redes de sensores sem fio e um controlador baseado em lógica *fuzzy*, que servirão para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa.

#### 2.1 Lógica *Fuzzy*

Diante da complexidade das variáveis envolvidas em determinados problemas matemáticos que apresentavam informações vagas e imprecisas, onde a teoria clássica dos conjuntos mostrava dificuldades de resolução, Lofti A. Zadeh em 1965, criou a teoria dos conjuntos *fuzzy*, ou simplesmente, lógica *fuzzy*.

Um conjunto *fuzzy* denominado de A definido no universo de discurso X é caracterizado por uma função de pertinência  $\mu_A$ , a qual mapeia os elementos de X para o intervalo [0,1], conforme mostrado na equação 1.

$$\mu_{A(X)}: X \rightarrow [0,1] \quad (1)$$

A idéia básica da teoria de conjuntos *fuzzy* é que um elemento pertence a um conjunto *fuzzy* com um certo grau de pertinência. Assim, uma proposição não é verdadeira ou falsa, mas pode ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa em qualquer grau (MORAES, 2010). Este grau é geralmente tomado no intervalo [0, 1].

A função de pertinência  $\mu_{A(X)}$  indica o grau de compatibilidade entre x e o conjunto *fuzzy* A:

$\mu_{A(X)} = 1$  indica de que x está totalmente em A;

$\mu_{A(X)} = 0$  indica de que x não está em A;

$0 < \mu_{A(X)} < 1$  indica de que x está parcialmente em A, com grau  $\mu_{A(X)}$ .

Enquanto que na engenharia trabalha-se com números como, por exemplo, valores de temperatura, pressão, umidade, vapor d'água, etc., a lógica *fuzzy* trabalha com variáveis linguísticas (BAUCHSPIESS, 2008).

As variáveis linguísticas, utilizadas para representar um conceito ou uma variável de um determinado problema, possuem valores que não são números, mas sim palavras ou frases na linguagem natural (FABRO; OLIVEIRA, 2012).

Desta forma, para que um sistema lógico *fuzzy* possa ser utilizado é preciso converter valores exatos (números) em variáveis linguísticas e vice-versa (BAUCHSPIESS, 2008). Este processo se desenvolve conforme Figura 2.1:

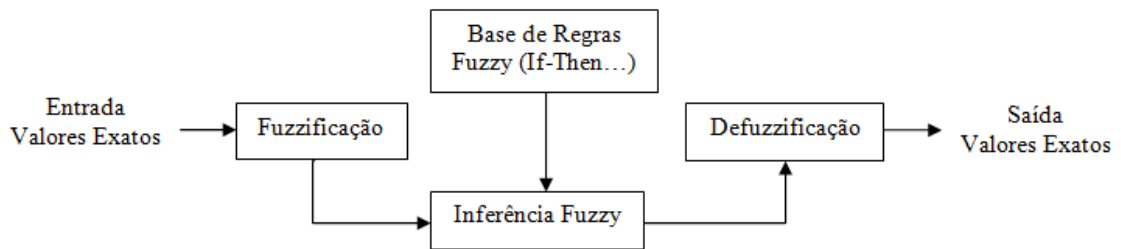


Figura 2.1 – Processo básico de um sistema lógico fuzzy. Fonte: Moraes (2010).

O módulo de *fuzzificação* modela matematicamente a informação das variáveis de entrada (valores exatos), mediante conjuntos *fuzzy* (CAVALCANTI *et al.*, 2012). Para cada variável de entrada são atribuídos termos linguísticos que representam os estados desta variável, e a para cada termo linguístico é associado um conjunto *fuzzy* por uma função de pertinência que pode ser Triangular, Trapezoidal, Gaussiana, Sino Generalizada, Universo Discreto e Universo Contínuo, onde são apresentadas na Figura 2.1a e 2.1b (CAVALCANTI *et al.*, 2012).

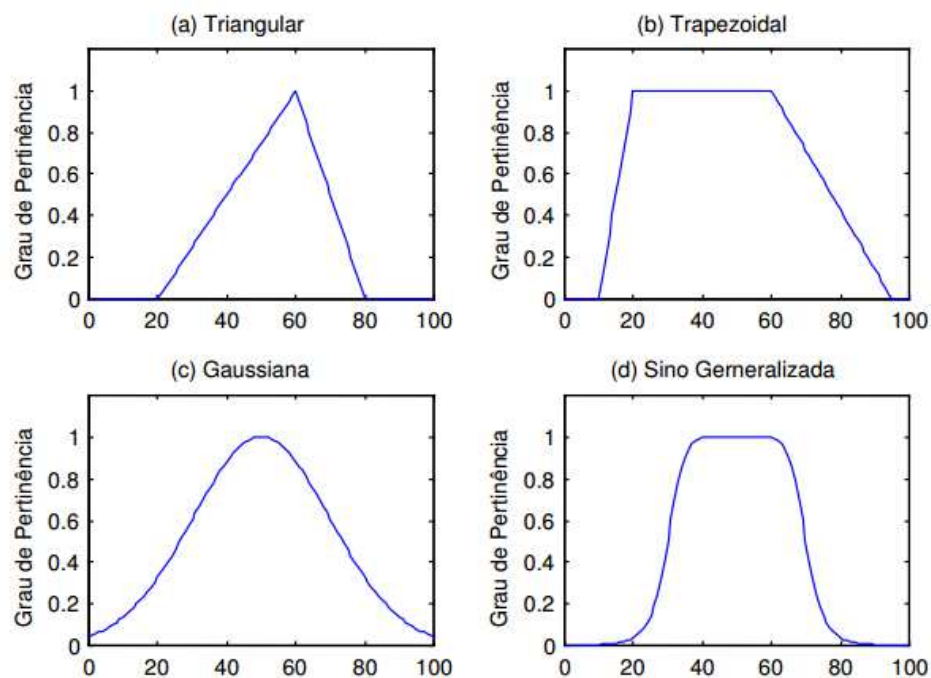


Figura 2.1a – Funções de pertinência da lógica fuzzy

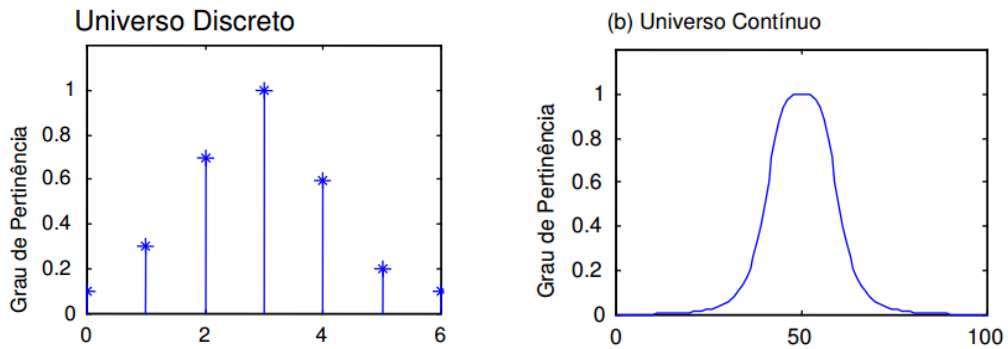


Figura 2.1b – Funções de pertinência da lógica fuzzy

Por exemplo, a temperatura de um determinado processo poderia ser uma variável linguística assumindo valores de baixa, média e alta (PILATTI, 2012). Estes valores são descritos por intermédio de conjuntos *fuzzy* e representados na Figura 2.2.

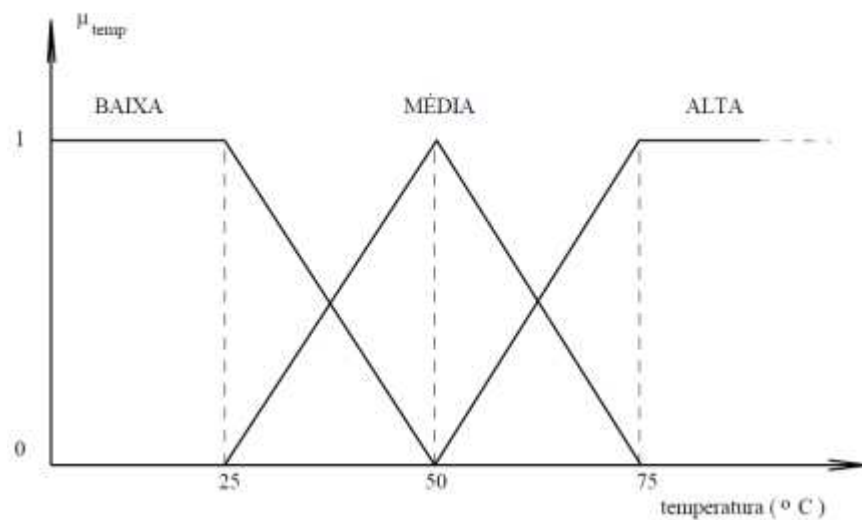


Figura 2.2 – Variáveis linguísticas. Fonte: Pilatti (2012).

No módulo denominado de **Base de Regras**, são armazenadas as variáveis e suas classificações linguísticas (CAVALCANTI *et al.*, 2012). É considerada o “núcleo” do sistema lógico *fuzzy* podendo ser fornecida por especialistas ou extraída a partir de dados por aprendizado (REZENDE; LORENZONI; KULITZ, 2015).

A base de regras *fuzzy* consiste na base de conhecimento, caracterizando a estratégia de controle e suas metas (PILATTI, 2012). É constituída por regras do tipo:

SE < antecedente > ENTÃO < consequente >

No módulo de **inferência fuzzy** ocorrem as operações com os conjuntos *fuzzy* com as combinações dos antecedentes e consequentes das regras para gerar os conjuntos *fuzzy*

de saída (PILATTI, 2012). Por ser um dos métodos de inferência mais utilizados, adotamos para este experimento, a máquina de inferência de *Mamdani*, onde se espera que cada entrada “*crisp*” (um número real, ou par de números reais) faça corresponder uma saída “*crisp*”, tendo como característica o fato das relações *fuzzy* ocorrerem tanto nos antecedentes quanto nos consequentes das regras (CAVALCANTI et al., 2012; POSSELT, 2011).

O módulo de *defuzzificação* interpreta as informações geradas no conjunto *fuzzy* de saída, dando origem às ações demandadas pelo sistema permitindo representar um conjunto *fuzzy* por um valor numérico (POSSELT, 2011).

Neste experimento, o método de *defuzzificação* utilizado é o centróide ou centro de gravidade, sendo o mais utilizado de todos os métodos de *defuzzificação*. Tem como saída o ponto que divide a área da função de pertinência em duas partes iguais. A Figura 2.3 mostra o método da centróide (BARG, 2002).

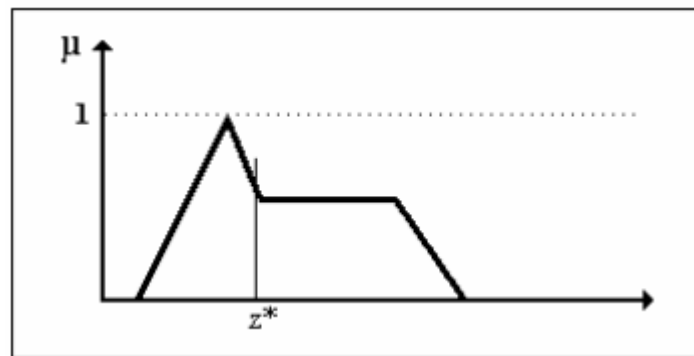


Figura 2.3 – Método de defuzzificação da centróide ou centro da gravidade. Fonte: Barg (2002).

## 2.2 Voto Médio Estimado (*Predicted Mean Vote - PMV*)

Conforto térmico consiste na condição de um indivíduo manifestar uma satisfação térmica com relação ao ambiente no qual está inserido, ou seja, o indivíduo mantém um balanço térmico com o ambiente no qual se encontra trocando calor corporal com o mesmo (RUAS, 1999).

A Figura 2.4 mostra os diversos tipos de trocas de calor do corpo humano com o ambiente.

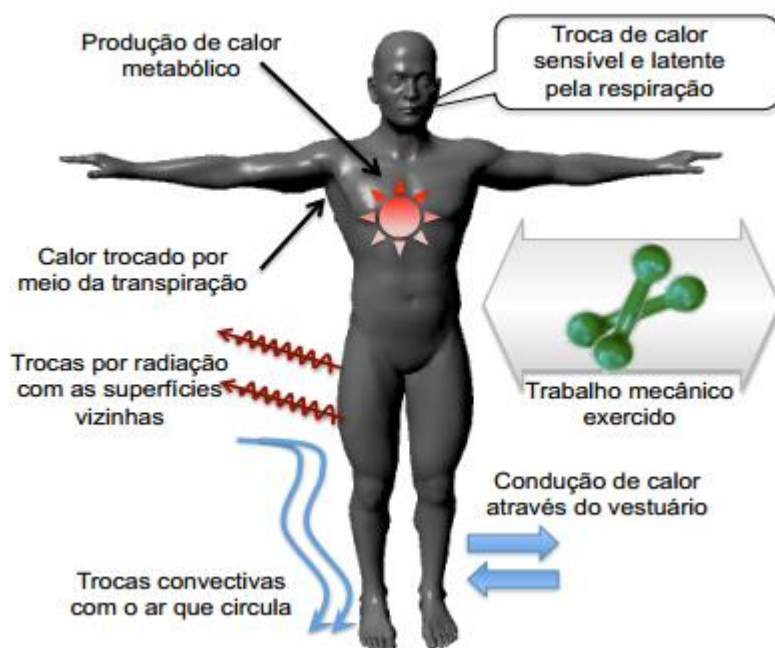


Figura 2.4 – Trocas de calor realizadas pelo corpo e o ambiente. Fonte: Ruas (1999).

Segundo Fanger (1970), com base em experimentos, criou um método conhecido como *Predicted Mean Vote - PMV*, cuja equação, a ser vista posteriormente, nos confere a sensação térmica experimentada por um indivíduo considerando variáveis ambientais e pessoais conforme descrito na Tabela 2.1:

Tabela 2.1 - Variáveis utilizadas no método PMV. Fonte: Ruas (1999).

Variáveis Ambientais	Temperatura do Ar Velocidade do Ar Umidade Relativa do Ar Temperatura Média Radiante
Variáveis Pessoais	Taxa Metabólica Nível de isolamento da roupa

A produção do calor metabólico varia de acordo com a atividade física desempenhada pelo indivíduo. Quanto mais intensa for a atividade física maior será o calor trocado com o ambiente conforme mostrado na Tabela 2. A atividade metabólica é expressa em  $W/m^2$  onde a sua unidade é *met* ( $1\text{ met} = 58,5W/m^2$ ).

Tabela 2.2 – Taxas de metabolismo para atividades comuns. Fonte: Ruas (1999).

Tipo de Atividade	Metabolismo ( $W/m^2$ )	Metabolismo (met)
Sentado em repouso	58	1,0
Atividade Sedentária	70	1,2
Atividade leve, de pé	93	1,6
Atividade moderada, de pé	117	2,0
Atividade intensa	175	3,0
Deitado	47	0,8

De acordo com Fanger (1970), o tipo de roupa usado pelo indivíduo em um determinado ambiente, é um outro fator importante para o conforto térmico, pois a roupa possibilita um certo isolamento térmico promovendo uma resistência à transferência de calor do corpo para o ambiente.

Como podemos observar na Tabela 2.3, existem diversos tipos de vestimentas onde cada uma possui um índice de isolamento e permeabilidade, o tipo de tecido e o modelo de roupa fabricada, definirá a magnitude da condução de calor através do vestuário para o ambiente. A unidade que expressa o índice de isolamento da roupa é definido por clo ( $1\text{clo} = 0,155m^2 \cdot ^\circ C/W$ ).

Tabela 2.3 – Índices de isolamento de alguns tipos de vestuário. Fonte: Ruas (1999).

Itens de Vestuário	Material de fabricação	Massa (g)	Iclu (clo)
Camiseta com manga curta	100% algodão	105	0,08
Camiseta com manga longa	Algodão	200	0,12
Calça jeans	Algodão	832	0,24
Bermuda até o joelho	Algodão	416	0,11
Jaqueta de trabalho	Algodão	652	0,26

Portanto, o conforto térmico de um indivíduo consiste no equilíbrio térmico do seu corpo com as combinações das variáveis ambientais e pessoais.

Fanger (1970) com base em estudos e experimentos com cerca de 1.600 pessoas, as submeteram, de forma controlada, às diversas variáveis ambientais e pessoais e por meio de voto escrito, cada pessoa expressava a sua sensação térmica. Fanger (1970) definiu este método como Voto Médio Estimado ou *Predicted Mean Vote (PMV)*.

Com base nestes experimentos, Fanger formulou uma equação que combina todas as variáveis ambientais e pessoais, conforme demonstrado na Equação 2 e 3:

$$PMV = (0,028 + 0,3033 \cdot e^{(-0,036 \cdot M)}) \cdot L \quad (2)$$

onde:

$M$  = Taxa metabólica expressa em  $W/m^2$ ;

$L$  = Carga térmica do corpo resultante das trocas de calor com o ambiente [1];

$$L = M - W - 3,05 \cdot 10^{-3} [5733 - 6,99(M - W) - P_a] - 0,42(M - W - 58,15) - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - P_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] \quad (3)$$

Onde:

$W$  = Trabalho mecânico desenvolvido pelo corpo ( $W/m^2$ )

$P_a$  = Pressão parcial do vapor d'água;

$t_a$  = Temperatura do ar ( $^{\circ}C$ );

$f_{cl}$  = Relação entre a área exterior do vestuário e a área do corpo;

$h_c$  = coeficiente de transferência de calor por convecção ( $W/m^2 \cdot K$ );

$t_{cl}$  = Temperatura da superfície da roupa ( $^{\circ}C$ ); e

$\bar{t}_r$  = Temperatura média radiante

O coeficiente de transferência de calor por convecção  $h_c$  é definida pela Equação 4:

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0,25}, & \text{se } 2,38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{V} \\ 12,1 \cdot \sqrt{V}, & \text{se } 2,38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{V} \end{cases} \quad (4)$$

A temperatura da superfície da roupa é expressa por  $t_{cl}$ :



$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \{3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\} \quad (5)$$

Onde:  $M$  = Taxa metabólica expressa em  $W/m^2$ ;

$W$  = Trabalho mecânico desenvolvido pelo corpo expresso em  $W/m^2$ ;

$I_{cl}$  = Índice de isolamento da roupa (clo);

$f_{cl}$  = Relação entre a área exterior do vestuário e a área do corpo;

$t_a$  = Temperatura do ar ( $^{\circ}C$ );

$V$  = Velocidade do ar (m/s);

$t_{mrt}$  = Temperatura média radiante;

$P_a$  = Pressão parcial do vapor d'água;

$h_c$  = coeficiente de transferência de calor por convecção ( $W/m^2.K$ );

$t_{cl}$  = Temperatura da superfície da roupa ( $^{\circ}C$ );

Os experimentos realizados por Fanger utilizando o método *PMV* permitiu-lhe criar uma escala com base nas sensações térmicas de desconforto experimentadas pelas pessoas, conhecida como escala de sensação térmica conforme visto na Figura 2.5:

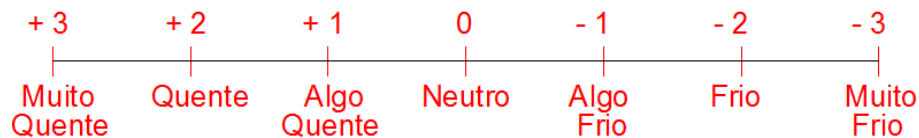


Figura 2.5 – Escala de sensação térmica de Fanger. Fonte: Fanger (1970).

Portanto, uma condição aceitável de conforto térmico, é o *PMV* estar entre os valores de  $[+0.5 \text{ à } -0.5]$ , onde a maioria das pessoas de um recinto se sentiriam confortáveis e apenas 10% delas estariam se sentindo desconfortáveis, como mostrado na Figura 2.6.

Esse *PMV* se relaciona ao percentual de insatisfeitos (*PPD*) conforme mostra a equação 6.

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp[-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)] \quad (6)$$

Onde “insatisfeito” é alguém não votando -1, +1 ou 0.

$PPD = 10\% \longrightarrow -0,5 \geq PMV \geq +0,5 \longrightarrow$  condição aceitável

$PMV = 0\% \longrightarrow$  condição ideal de conforto  $\longrightarrow PPD = 5\%$

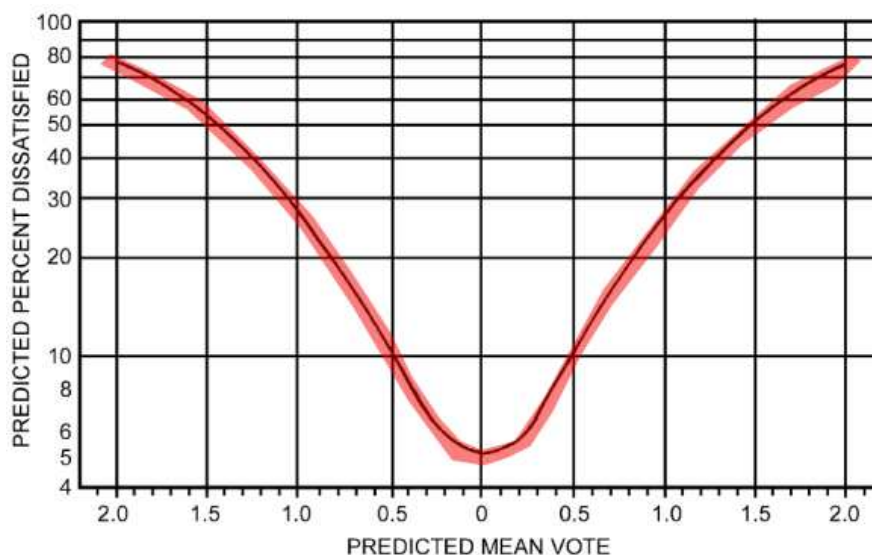


Figura 2.6 – Gráfico da Porcentagem de insatisfeitos em função do PMV. Fonte: Fanger (1970).

### 2.3 O Padrão Zigbee

O padrão *Zigbee* consiste em um conjunto de especificações adotadas para a comunicação de dados entre dispositivos eletrônicos. Este padrão é regido pela IEEE 802.11 e opera na frequência *ISM (Industrial, Scientific and Medical)*, sendo aqui no Brasil 2,4 GHz (16 canais) e em outras partes do mundo, e não requerem licença para funcionamento (IEEE, 1997). É largamente utilizado por redes de sensores em virtude de características tais como: baixo consumo de energia, trafega pequeno volume de dados e possui uma baixa taxa de transmissão (REDE ZIGBEE, 2011).

Um dispositivo denominado de módulo *Xbee* é um módulo RF (Rádio Frequência) que se comunica no padrão *Zigbee* IEEE 802.15.4 possuindo portas analógicas e digitais de entrada e saída. Utilizando este módulo, pode-se implementar uma rede de sensores de até 65.000 nós, que apresenta excelente imunidade contra interferências com taxas de transferências de dados variando entre 20Kbps a 250Kbps. O módulo *Xbee* pode trabalhar com 03 (três) tipos de nós sensores: Nó coordenador, nó roteador e nó final (REDE ZIGBEE, 2011).

As redes de nós sensores utilizando o módulo *Xbee* permite a concepção de topologias do tipo árvore e estrela conforme mostrado na Figura 2.7.

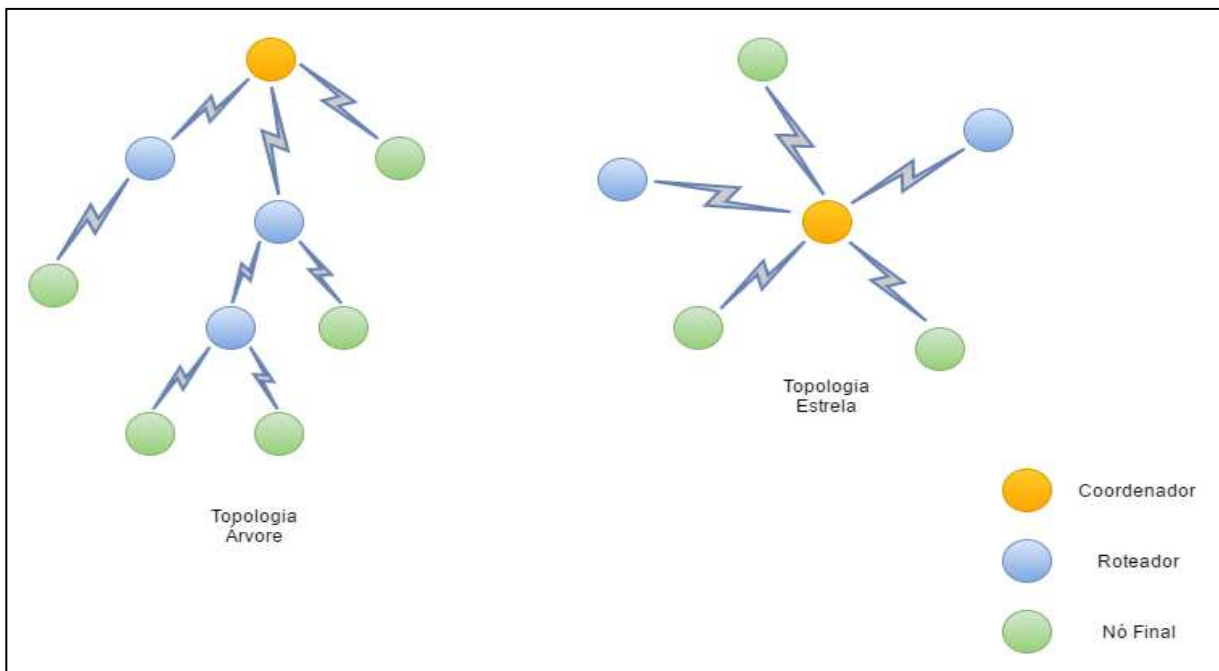


Figura 2.7 – Topologias da rede Zigbee. Fonte: Caetano (2016).

O módulo *Xbee* possui dois modos de operação definidos como: modo de operação transparente e modo de operação *API (Application Programming Interface)* (CAETANO, 2016).

O modo de operação transparente consiste na comunicação dos dados entre antena e serial, ou seja, os dados que chegam na antena são transmitidos para a porta serial e vice-versa. Neste tipo de modo, não é possível enviar dados para diversos destinatários e nem tampouco o envio de configurações remotas para os módulos (CAETANO, 2016).

O modo de operação *API (Application Programming Interface)*, é aquele onde os dados são agrupados em pacotes permitindo, desta forma, o envio de comando remoto.

Os módulos *Xbee* foram criados para economizar o máximo de energia possível. Desta forma, permite-se criar aplicações onde é possível ler sensores em campo de forma remota, apenas utilizando pilhas ou baterias comuns, que duram meses, isto se deve ao fato de que os módulos *Zigbee* quando não estão transmitindo ou recebendo dados, entram num estado denominado de "*Sleep*", consumindo o mínimo de energia (REDE ZIGBEE, 2011).

## 2.4 Sensor de temperatura e umidade DHT11

O DHT11 é um sensor de temperatura e umidade que permite fazer leituras de temperaturas entre 0 a 50°C e umidade entre 20 a 90%, muito usado para projetos com Arduíno (ARDUINO, 2013).

O elemento sensor de temperatura é um termistor do tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*) e o sensor de umidade é do tipo HR202. O circuito interno faz a

leitura dos sensores e se comunica com um microcontrolador através de um sinal serial de uma via. A pinagem deste sensor é mostrada na Figura 2.8.

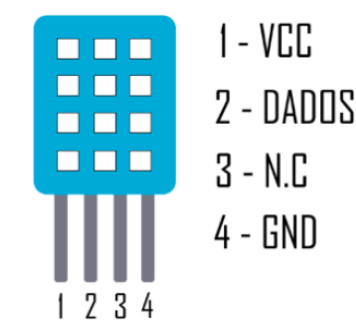


Figura 2.8 – Pinagem do sensor DHT11

## 2.5 Trabalhos Relacionados

Os estudos referentes ao Conforto Térmico dos ocupantes de ambientes internos climatizados são abrangentes na literatura, e visando oferecer relevantes contribuições para o tema desta dissertação, foram selecionados artigos sobre a obtenção do Conforto Térmico com base no controle do *PMV* (*Predicted Mean Vote*) dos ocupantes de edificações.

O artigo de K.L.Ku *et al.* (2015) apresenta um sistema automático de controle do conforto térmico baseado no índice *PMV* inverso dos ocupantes de ambientes internos proporcionando economia de consumo de energia elétrica. Esta abordagem consiste em determinar a temperatura de conforto térmico dos ocupantes de um ambiente de escritório climatizado. O algoritmo de Enxame de Partículas (*Particle Swarm Algorithms*) e um Sistema de Inferência que utiliza a lógica *fuzzy* e redes neurais são utilizados para resolver o modelo do *PMV* inverso obtendo, desta forma, a temperatura de conforto desejada em torno dos ocupantes.

Para manter o índice *PMV* no intervalo de [-0,5 à +0,5] a fim de expressar uma condição aceitável de conforto térmico, métodos de controle como *o feed-forward-feedback controller* e um *digital self-tuning controller* são utilizados. Os conjuntos de dados físicos usados para a realização do experimento são obtidos mediante à uma rede de sensores que medem temperatura, velocidade do ar e umidade relativa do ambiente de interesse utilizando uma tecnologia de comunicação sem fio (*wireless*) aplicada à sistemas de automação predial, o *Zigbee*.

O resultado deste experimento mostra que a obtenção da temperatura de conforto térmico pelo método do Enxame de Partículas (*Particle Swarm Algorithm*) é o método que apresentou o menor erro na busca desta temperatura de conforto, e método de controle mais eficaz no controle do *PMV* mantendo-o no intervalo de conforto térmico aceitável  $[-0,5$  à  $+0,5]$  foi o *Feed-Forward Fuzzy Feedback Control*, e conseqüentemente houve uma redução de 37,3% no consumo de energia do equipamento de ar condicionado.

O artigo de Jaeseok Yun e Kwang-Ho Won (2012) propôs a concepção de um sistema de controle possibilitando o equilíbrio do conforto térmico dos ocupantes de um prédio atuando no controle do consumo de energia no sistema *HVAC* (*heating, ventilation, and air conditioning*). A coleta dos dados de temperatura e umidade foi realizada por meio de uma rede de nós sensores sem fio com o uso da plataforma *Zigbee*, onde a análise desses conjuntos de dados foi avaliada pelo *Kohonen Self-Organizing Map (SOM)* (MathWorks, 2015) e o algoritmo *k-Means* (Theodoridis, 2006). Com isso, um mapa de conforto do ambiente foi criado através dos votos dos ocupantes usando as redes sociais ou *email-s*. O artigo abordou a utilização dos dados de temperatura e umidade para fins de avaliação do conforto térmico utilizando também a *clusterização* através do algoritmo *k-means* para classificar as zonas de conforto. Desta forma, esta abordagem serviu para auxiliar no desenvolvimento deste trabalho, pois usamos o índice *PMV* (*Predicted Mean Vote*) para avaliar o conforto térmico dos ocupantes utilizando-se dos dados de temperatura e velocidade do ar do ambiente de interesse.

O artigo de Luo Yifan *et al.* (2014) abordou o ajuste da temperatura interna do ambiente para o conforto térmico de um sistema *HVAC* em torno dos ocupantes com base no índice *PMV*.

Os autores utilizaram-se de conhecimentos prévios sobre as condições de trabalho dos ocupantes no interior do ambiente, e através de uma modelagem utilizando um sistema que combina lógica *fuzzy* e redes neurais encontrou-se o índice *PMV* dentro do intervalo da escala de sensação térmica de Fanger que vai de  $[-3$  à  $+3]$ .

Os resultados deste experimento mostraram que os índices *PMV* não permanecem dentro da faixa tolerável de conforto térmico  $[-0,5$  à  $+0,5]$ , no entanto, os resultados evidenciaram a viabilidade e eficiência do método, bem como a sua precisão na busca do *PMV*.

K. L. Ku, J. S. Liaw, M. Y. Tsai e T. S. Liu (2015) afirmaram que os experimentos resultaram em redução do consumo de energia do equipamento de climatização atuando no

sistema de controle, no entanto, não mostraram medições que pudessem evidenciar tais reduções.

Luo Yifan *et al.* (2014) afirmaram que os experimentos resultaram em redução do consumo de energia do equipamento de climatização atuando no sistema de controle, no entanto, não mostraram medições que pudessem evidenciar tais reduções.

O artigo de Vecchi, Cândido e Lamberts (2013) avaliaram o efeito de valores elevados de velocidade do ar no conforto térmico dos ocupantes de salas de aula utilizando um sistema de condicionamento híbrido (ar condicionado + ventilador de teto), localizadas em uma região de clima quente e úmido.

A metodologia usada neste experimento consistiu na utilização de equipamentos de medições ambientais como temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do ar e temperatura de globo, que representa uma temperatura uniforme de invólucro imaginário no interior do qual a transferência de calor por radiação entre o corpo e o invólucro iguala a que ocorre no ambiente climatizado real. Os voluntários desta pesquisa usaram formulários para preenchimento das sensações térmicas.

Já o artigo de Yifan, Ning e Shaoyuan (2014) utilizaram um controlador combinando lógica *fuzzy* e redes neurais para modelar o *PMV* baseando-se em conhecimentos prévios do ambiente. Um sistema *HVAC* foi utilizado para a realização dos experimentos.

O resultado dos quais demonstrou que o método foi eficiente e confiável, no entanto, o índice *PMV* não foi controlado.

Neste trabalho de pesquisa, foram adotados múltiplos pontos de coleta de dados de sensores de temperatura e umidade, onde podemos analisar o comportamento deles durante o experimento. Foi medida a velocidade do ar no ambiente, onde com base nos valores apresentados serviram como suporte para a decisão de proporcionar o controle da sensação térmica em torno dos ocupantes expresso pelo Voto Médio Estimado (*Predicted Mean Vote PMV*). Além de se atuar no controle do equipamento de climatização a fim manter a temperatura e umidade em condições de conforto térmico, se propôs atuar também no controle de velocidade do vento de um ventilador de teto a fim de manter o conforto térmico dos usuários do recinto com base no *PMV*, enquanto o aparelho de ar condicionado estiver desligado, e desta forma, proporcionado a economia de energia.

## Capítulo 3

# Sistema de Controle de Temperatura e Velocidade do Ar Utilizando Controle *Fuzzy* e Rede sem fio *Zigbee*

### 3.1 Introdução

Neste trabalho, o sistema de controle proposto utilizou, primeiramente, a rede *Zigbee* contendo módulos *Xbee* e sensores DHT11 para medição e coleta de dados de temperatura e umidade relativa do ar ambiente interno e um módulo sensor de velocidade do ar do tipo concha (conhecido como anemômetro).

A rede *Zigbee* é composta por 04 (quatro) nós sensores e 01 (um) nó coordenador que é responsável pela coleta de todos os dados dos nós sensores. O nó coordenador após receber os dados dos módulos sensores, se comunica por meio da porta serial que se dá através da plataforma Arduíno com um computador, especificado na seção 4.1.

Ao inicializar o sistema, adotamos um valor de temperatura de ajuste do aparelho de ar condicionado de 22°C, onde as medições das temperaturas, umidade relativa do ar e velocidade do ar no interior do ambiente climatizado foram coletadas pelos módulos sensores e encaminhadas ao módulo coordenador, que por sua vez, envia as médias das temperaturas e umidades relativas medidas nos três pontos da sala, assim como o valor da velocidade do ar, para o controlador *fuzzy*.

Os dados recebidos pelo controlador *fuzzy* são processados com base no *PMV*, onde ao se atingir a temperatura de conforto térmico, toma a decisão de atuar no ajuste da temperatura e nas funções de *ON-OFF* do aparelho de ar condicionado através de um sinal infravermelho, bem como no ajuste da velocidade do ventilador de teto por meio de um sinal *PWM* (*Pulse Width Modulation*).

O desempenho energético do sistema em operação é medido por um wattímetro implementado em Arduíno, o qual é ligado ao aparelho de ar condicionado e ao ventilador de teto medindo as correntes elétricas e tensões destes equipamentos quando em operação, registrando a potência elétrica consumida ao longo do tempo de ambos os equipamentos.

A Figura 3.1 ilustra as disposições dos componentes da rede de *Zigbee* e a transmissão dos sinais entre eles.

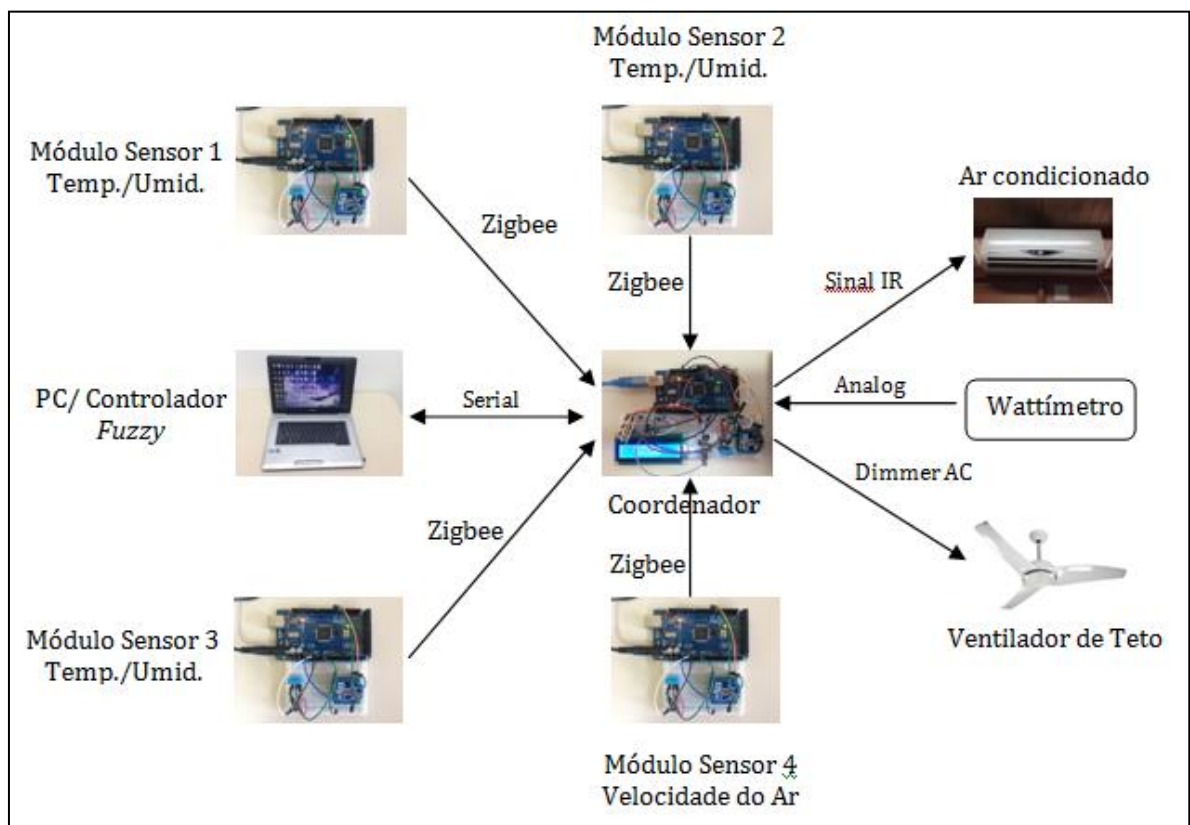


Figura 3.1 – Transmissão dos sinais entre os dispositivos da rede Zigbee

Vale ressaltar, que o controlador *fuzzy* além de utilizar a temperatura, velocidade do ar e umidade relativa do ar medidas pelos nós sensores no interior do ambiente, utiliza também outras variáveis relativas ao índice *PMV*, como índice de isolamento da roupa ( $I_{cl}$ ), temperatura média radiante ( $t_{mrt}$ ) e taxa metabólica ( $M$ ), para calcular a temperatura de conforto térmico visando garantir que o índice *PMV* permaneça na faixa aceitável de [+0.5 à -0.5].

A dinâmica do controlador *fuzzy* consiste em controlar o aparelho de ar condicionado durante o resfriamento do ambiente enquanto os módulos sensores coletam os dados de temperatura, umidade e velocidade do ar verificando se a temperatura de conforto foi atingida em torno dos ocupantes do recinto. Ao se registrar a temperatura de conforto térmico com base no *PMV* o controle *fuzzy* atua desligando o aparelho de ar condicionado e aciona o ventilador de teto a fim de manter a sensação térmica de conforto com a circulação controlada do vento no ambiente em torno dos usuários o maior tempo possível, com o aparelho de ar condicionado desligado, reduzindo desta forma, o consumo de energia.

A Figura 3.2 mostra o diagrama de blocos do sistema que utiliza os índices *PMV* calculados com base na temperatura, umidade e velocidades do ar medidas no ambiente, a taxa metabólica  $M$  adotada foi de  $70 \text{ W/m}^2$  ou 1,2 met – atividades sedentárias (escritório, residência, escola, laboratório) (RUAS, 1999), o índice de isolamento da roupa  $I_{cl}$  é de 0,70



clo – roupas de baixo, camisa, calças, meias e sapatos (RUAS, 1999), a umidade relativa foi medida pelos sensores no ambiente climatizado, a temperatura média radiante que para este experimento, adotou-se ser igual à temperatura do ar e a temperatura média externa mensal adotada foi de 32°C.

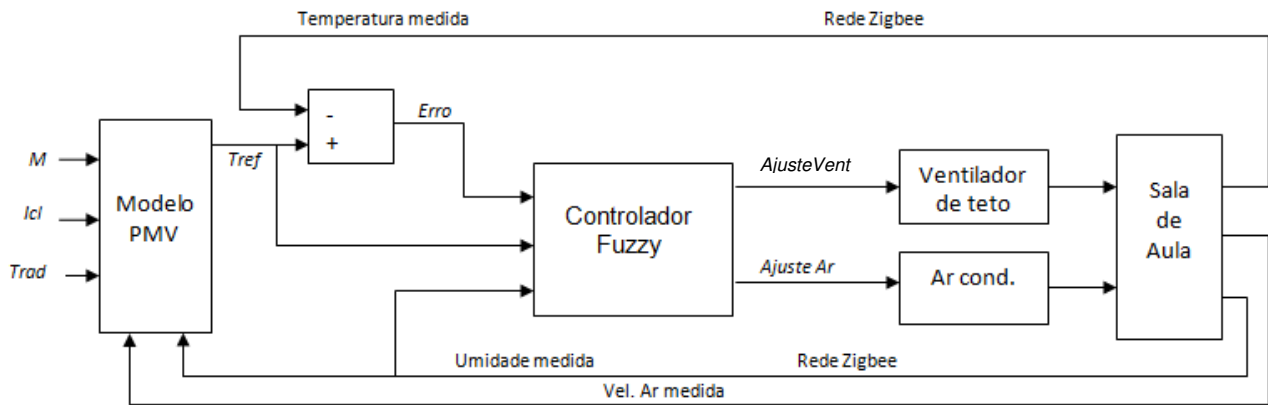


Figura 3.2 –Diagrama de blocos do sistema

### 3.2 O Controlador Fuzzy

A modelagem do controlador *fuzzy* para o controle da temperatura e da velocidade do ar no interior do ambiente, apresentada nas Figuras 3.2 e 3.3, utiliza-se de um ventilador e de um aparelho de ar condicionado, contendo três variáveis de entrada: a temperatura de referência ou temperatura desejada (*Tref*), uma variável de erro (*Erro*), uma variável de umidade e duas variáveis de saída: *AjusteVent* que controla a velocidade do ventilador e uma variável *AjusteAr* que controla o aparelho de ar condicionado. Cada variável de entrada e saída do modelo do controlador *fuzzy* apresentada na Figura 3.3 será abordada de forma mais detalhada nas subseções seguintes.

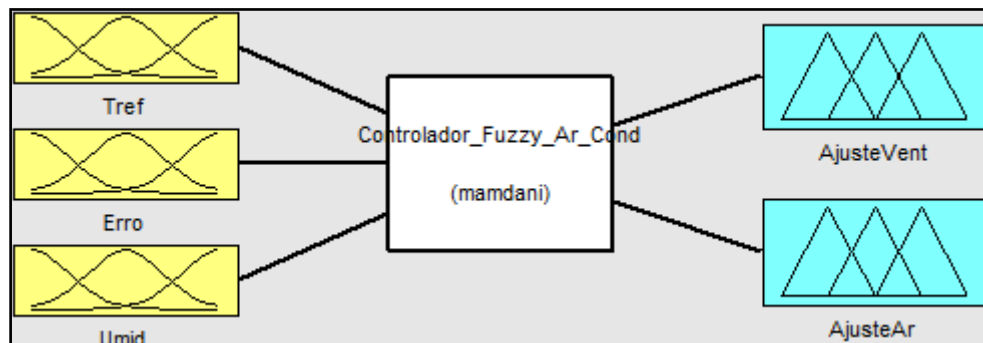


Figura 3.3 – Modelo do controlador fuzzy

O método de inferência *fuzzy* de Mandani (CAVALCANTI *et al.*, 2015) foi adotado e apresenta as seguintes características:

- Método de cálculo de AND: mínimo;
- Método de cálculo de OR: máximo;
- Método da Implicação: mínimo;
- Método da Agregação: máximo; e
- Método de *defuzzificação*: centróide

Estes métodos são utilizados para a avaliação de uma regra, onde os valores são computados baseados nos níveis de ativação alcançados. Estes valores são associados às regras *fuzzy* de saída (ARAÚJO, 2015).

Geralmente, uma função de minimização é utilizada para determinar o valor associado a cada variável de entrada quando mais de uma função de pertinência é ativada na mesma regra.

A aplicação dos operadores dos conjuntos *fuzzy* AND e OR, chamados de operadores de relação, são utilizados para definir o grau máximo e mínimo de pertinência do conjunto (ZADEH, 1965), conforme mostra as equações 7 e 8, respectivamente.

$$\mu(A \text{ AND } B) = \min(\mu_{A(X)}, \mu_{B(X)}) \quad (7)$$

$$\mu(A \text{ OR } B) = \max(\mu_{A(X)}, \mu_{B(X)}) \quad (8)$$

O Método da Implicação é responsável pela aplicação do operador de implicação, usado para definir o peso no resultado e remodelar a função, ou seja, consiste em criar a hipótese de implicação (ZADEH, 1965). Como no exemplo abaixo:

*If (Tref is Frio) and (Erro is MN) and (Umid is Alta) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is ON);*

No Método da Agregação ocorre a combinação de todas as saídas em um único conjunto *fuzzy*, algo semelhante ao processo de união e intersecção, na teoria dos conjuntos clássicos.

Já o Método de *Defuzzificação* verifica as regras que foram ativadas e realiza o processo de composição das regras disparadas. As áreas que representam o grau de ativação cada regra são compostas formando uma área resultante, onde se calcula o ponto central,

baseado no cálculo do centro de massa, assim, o nível de ativação de cada regra age como um nível de ponderação no cálculo final (ARAÚJO, 2015).

### 3.2.1 Variável de entrada temperatura de referência $T_{ref}$

A variável de entrada  $T_{ref}$  expressa a temperatura desejada ou a temperatura de referência para o controlador *fuzzy*. Na Figura 3.2,  $T_{ref}$  representa a temperatura de conforto térmico do modelo *PMV*. Os conjuntos *fuzzy* correspondentes à variável  $T_{ref}$  possuem quatro valores linguísticos definidos nos seguintes intervalos: Frio para  $16^{\circ}\text{C} < T_{ref} < 22^{\circ}\text{C}$ , Confort para  $21^{\circ}\text{C} < T_{ref} < 26^{\circ}\text{C}$ , Quente para  $25^{\circ}\text{C} < T_{ref} < 29^{\circ}\text{C}$  e Muito Quente para  $28^{\circ}\text{C} < T_{ref} < 39^{\circ}\text{C}$ .

Como as mudanças de temperatura são gradativas, as funções de pertinência adotadas para os valores linguísticos foram a trapezoidal e a triangular, conforme mostrado na Figura 3.4.

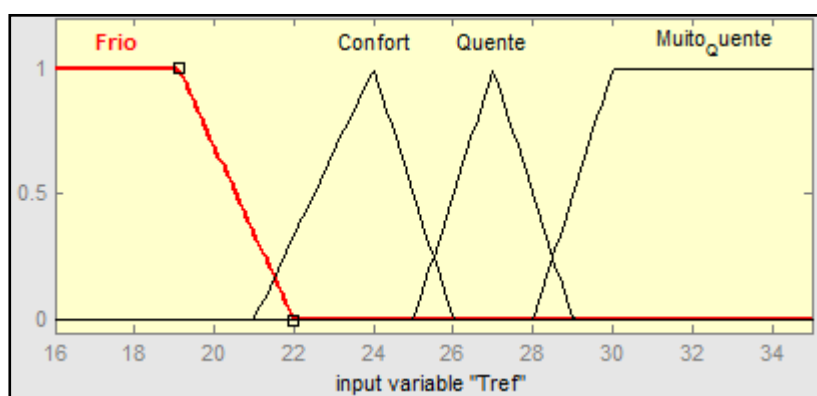


Figura 3.4 – Funções de pertinência da variável de entrada  $T_{ref}$

### 3.2.2 Variável de entrada Erro

A variável *Erro* consiste na diferença entre a temperatura desejada ou de referência e a temperatura medida pelos sensores conforme demonstrado na equação 9, e mostra o quão distante do valor desejado está a temperatura da sala controlada.

Para compreender melhor o seu significado, na Figura 3.5, como exemplo, temos uma temperatura de referência ou desejada de  $22^{\circ}\text{C}$  fornecida pelo modelo *PMV*, enquanto isso, os sensores medem as temperaturas no interior do recinto fornecendo estes dados para o controlador *fuzzy*, onde a diferença entre estas temperaturas gera a variável *Erro* calculada conforme a equação 9.

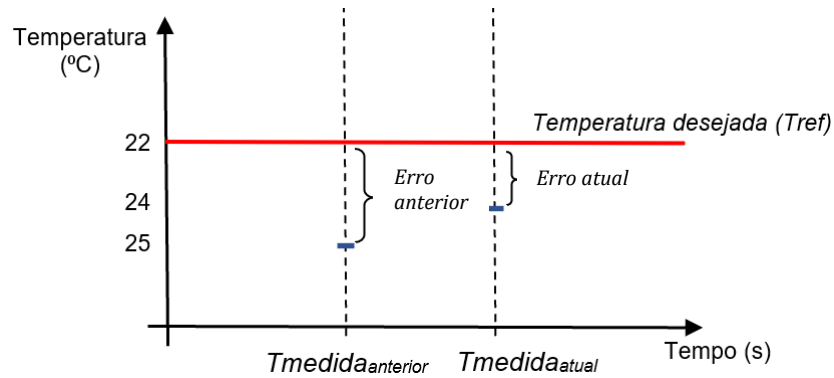


Figura 3.5 – Cálculo da variável de entrada Erro

$$Erro = T_{ref} - T_{medida} \quad (9)$$

O controlador *fuzzy* tomará como base o erro atual para a tomada da decisão, onde conforme a Figura 3.5, podemos observar que o valor da temperatura medida está se aproximando da temperatura desejada ( $T_{ref}$ ).

Temos então para o caso da Figura 3.5:

$$Erro_{atual} = 22^{\circ}\text{C} - 24^{\circ}\text{C} = -2^{\circ}\text{C}$$

$$Erro_{anterior} = 22^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C} = -3^{\circ}\text{C}$$

Com as simulações realizadas com as variações das temperaturas e umidade medidas pelos sensores comparadas com a temperatura definida pelo modelo *PMV*, a variável *Erro* foi adotada consistindo em duas funções de pertinência trapezoidais e três funções triangulares. Os valores linguísticos possíveis para esta variável, bem como os intervalos foram definidos como mostrado a seguir: MN (Muito Negativo) para  $-15 < Erro < -7$ , N (Negativo) para  $-8 < Erro < 0$ , Z (Zero) para  $-3 < Erro < 3$ , P (Positivo) para  $0 < Erro < 8$  e MP (Muito Positivo) para  $6 < Erro < 40$  como mostra a Figura 3.6.

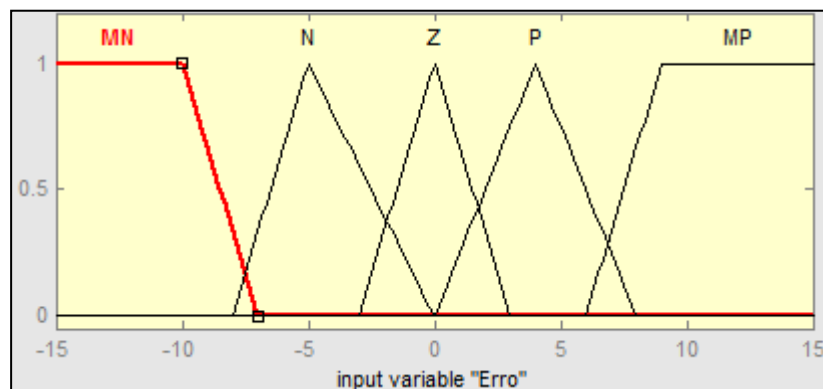


Figura 3.6 – Funções de pertinência da variável de entrada Erro

### 3.2.3 Variável de entrada Umidade

Neste trabalho, a variável umidade definida como *Umid* mesmo não sendo uma variável de controle, possui três funções de pertinência trapezoidais, onde foi considerado o valor mínimo de 15% e valor máximo de 100%. Os valores linguísticos definidos para esta variável são: Baixa para  $15\% < Umid < 33\%$ , Média para valores de umidade no intervalo  $33\% < Umid < 62\%$  e Alta para o intervalo  $62\% < Umid < 100\%$  como mostra a Figura 3.7.

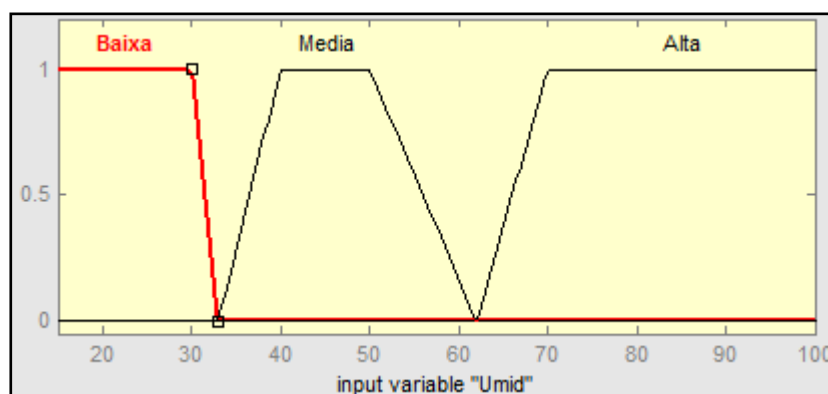


Figura 3.7 – Funções de pertinência da variável de entrada *Umid*

### 3.2.4 Base de regras

A base de regras do controlador *fuzzy* é composta por 42 combinações possíveis de regras baseadas nas variáveis de entrada e saída do controlador, e foram criadas considerando como antecedentes os valores linguísticos das variáveis de entrada temperatura de referência ou desejada (*Tref*), umidade (*Umid*) e *Erro*, e como consequentes foram atribuídos os valores linguísticos das variáveis de saída do controlador ajuste da velocidade do ventilador (*AjusteVent*) e ajuste dos estados do aparelho de ar condicionado nas condições de *ON* ou *OFF* (*AjusteAr*) conforme mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Base de Regras *Fuzzy* com os antecedentes e consequentes

- 
- 
1. If (*Tref* is Frio) and (*Erro* is MN) and (*Umid* is Alta) then (*AjusteVent* is Z)(*AjusteAr* is ON);
  2. If (*Tref* is Frio) and (*Erro* is N) and (*Umid* is Alta) then (*AjusteVent* is Z)(*AjusteAr* is ON);
  3. If (*Tref* is Frio) and (*Erro* is N) and (*Umid* is Alta) then (*AjusteVent* is Z)(*AjusteAr* is ON);
  4. If (*Tref* is Frio) and (*Erro* is N) and (*Umid* is Média) then (*AjusteVent* is VA)(*AjusteAr* is ON);
  5. If (*Tref* is Frio) and (*Erro* is MN) and (*Umid* is Média) then (*AjusteVent* is VB)(*AjusteAr* is OFF);
  6. If (*Tref* is Frio) and (*Erro* is MN) and (*Umid* is Média) then (*AjusteVent* is VM)(*AjusteAr* is OFF);
  7. If (*Tref* is Frio) and (*Erro* is N) and (*Umid* is Média) then (*AjusteVent* is VM)(*AjusteAr* is OFF);
  8. If (*Tref* is Frio) and (*Erro* is Z) and (*Umid* is Média) then (*AjusteVent* is Z)(*AjusteAr* is OFF);

9. If (Tref is Confort) and (Erro is MN) and (Umid is Alta) then (AjusteVent is Z);
  10. If (Tref is Confort) and (Erro is N) and (Umid is Alta) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is ON);
  11. If (Tref is Confort) and (Erro is N) and (Umid is Media) then (AjusteVent is VA)(AjusteAr is OFF);
  12. If (Tref is Confort) and (Erro is N) and (Umid is Media) then (AjusteVent is VA)(AjusteAr is ON);
  13. If (Tref is Confort) and (Erro is Z) and (Umid is Alta) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is ON);
  14. If (Tref is Confort) and (Erro is Z) and (Umid is Media) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is ON);
  15. If (Tref is Confort) and (Erro is P) and (Umid is Media) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is ON);
  16. If (Tref is Confort) and (Erro is P) and (Umid is Media) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is OFF);
  17. If (Tref is Confort) and (Erro is P) and (Umid is Media) then (AjusteVent is VB)(AjusteAr is OFF);
  18. If (Tref is Confort) and (Erro is N) and (Umid is Media) then (AjusteVent is VM)(AjusteAr is OFF);
  19. If (Tref is Confort) and (Erro is N) and (Umid is Media) then (AjusteVent is VA)(AjusteAr is OFF);
  20. If (Tref is Confort) and (Erro is N) and (Umid is Media) then (AjusteVent is VA)(AjusteAr is ON);
  21. If (Tref is Quente) and (Erro is MN) and (Umid is Alta) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is ON);
  22. If (Tref is Quente) and (Erro is N) and (Umid is Alta) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is ON);
  23. If (Tref is Quente) and (Erro is Z) and (Umid is Alta) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is ON);
  24. If (Tref is Quente) and (Erro is Z) and (Umid is Alta) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is ON);
  25. If (Tref is Quente) and (Erro is P) and (Umid is Alta) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is ON);
  26. If (Tref is Quente) and (Erro is P) and (Umid is Media) then (AjusteVent is VA)(AjusteAr is ON);
  27. If (Tref is Quente) and (Erro is P) and (Umid is Media) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is ON);
  28. If (Tref is Quente) and (Erro is MP) and (Umid is Media) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is OFF);
  29. If (Tref is Quente) and (Erro is MP) and (Umid is Baixa) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is OFF);
  30. If (Tref is Muito\_Quente) and (Erro is MN) and (Umid is Alta) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is ON);
  31. If (Tref is Muito\_Quente) and (Erro is N) and (Umid is Alta) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is ON);
  32. If (Tref is Muito\_Quente) and (Erro is Z) and (Umid is Alta) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is ON);
  33. If (Tref is Muito\_Quente) and (Erro is P) and (Umid is Alta) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is ON);
  34. If (Tref is Muito\_Quente) and (Erro is P) and (Umid is Media) then (AjusteVent is VA)(AjusteAr is ON);
  35. If (Tref is Muito\_Quente) and (Erro is P) and (Umid is Media) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is ON);
  36. If (Tref is Muito\_Quente) and (Erro is MP) and (Umid is Media) then (AjusteVent is VB)(AjusteAr is OFF);
  37. If (Tref is Muito\_Quente) and (Erro is P) and (Umid is Media) then (AjusteVent is VM)(AjusteAr is OFF);
  38. If (Tref is Muito\_Quente) and (Erro is P) and (Umid is Media) then (AjusteVent is VA)(AjusteAr is OFF);
  39. If (Tref is Muito\_Quente) and (Erro is P) and (Umid is Media) then (AjusteVent is VA)(AjusteAr is ON);
  40. If (Tref is Muito\_Quente) and (Erro is MP) and (Umid is Baixa) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is OFF);
  41. If (Tref is Muito\_Quente) and (Erro is MP) and (Umid is Baixa) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is ON);
  42. If (Tref is Muito\_Quente) and (Erro is MP) and (Umid is Media) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is ON)
- 
-

### 3.2.5 Variáveis de saída *AjusteVent* e *AjusteAr*

Baseados nos valores de entrada ocorrem a ativação das regras *fuzzy* formando um conjunto *fuzzy* de saída que após a *defuzzificação* geram resultados numéricos de saída (CAVALCANTI *et al.*, 2012), que no caso deste experimento, são os valores de ajuste da velocidade do ventilador de teto (*AjusteVent*) e o acionamento do aparelho de ar condicionado nos estados *ON* ou *OFF* (*AjusteAr*).

A variável *AjusteVent* possui quatro funções de pertinência trapezoidais, onde os valores linguísticos definidos para esta variável, bem como seus intervalos são: Z (Zero) para  $0 < AjusteVent < 0.2$ , VB (Velocidade Baixa) para  $0.1 < AjusteVent < 0.4$ , VM (Velocidade Média) para  $0.3 < AjusteVent < 0.7$ , VA (Velocidade Alta) para  $0.6 < AjusteVent < 1$  como mostra a Figura 3.8.

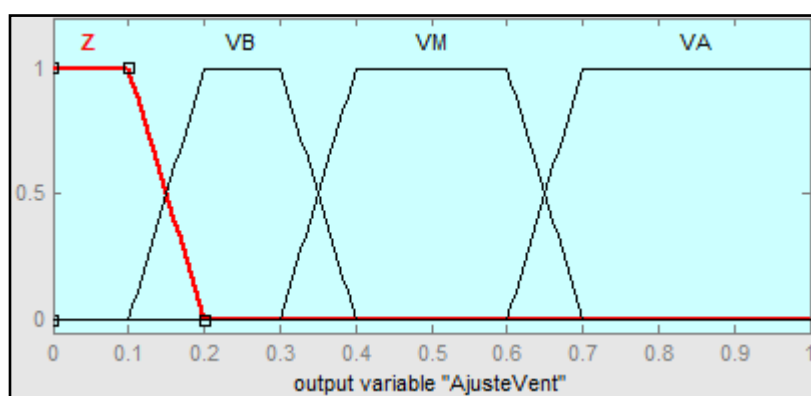


Figura 3.8 – Valores linguísticos da variável de saída *AjusteVent*

A variável de saída *AjusteAr* que controla os estados do aparelho de ar condicionado em *ON* ou *OFF* apresenta duas funções de pertinência triangulares com valores linguísticos: Desligado = 0 e Ligado = 1, conforme mostrado na Figura 3.9.

As funções triangulares no Matlab podem ser usadas para representar funções no universo discreto conforme mostrados nas Figuras 2.1a e 2.1b.

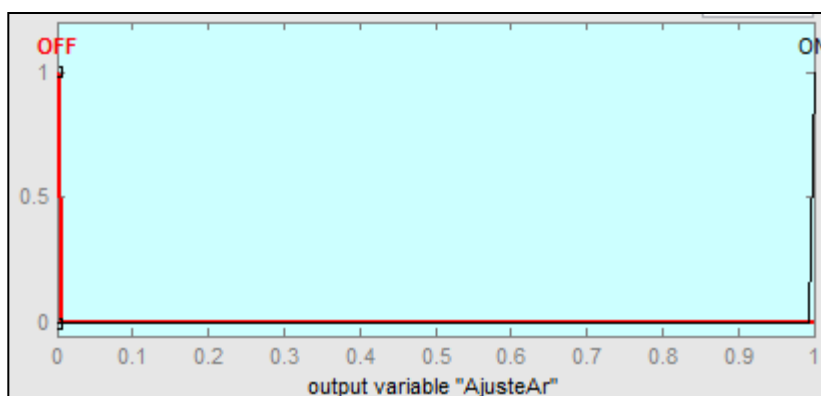


Figura 3.9 – Valores linguísticos da variável de saída *AjusteAr*

Com base nos resultados da *defuzzificação* o controlador *fuzzy* gera um sinal de pulso *ON* ou *OFF* para o aparelho de ar condicionado mediante um sinal infravermelho enviado ao equipamento.

Como exemplo, simulamos o controlador *fuzzy* com a utilização do software MatLab R2014, onde na Figura 3.10 podemos observar que as variáveis de entrada assumiram os valores de  $Tref = 23^{\circ} C$ ,  $Erro = 0$  e  $Umid = 35\%$ , e como resultado as variáveis de saída assumiram os valores de  $AjusteVent$  igual a 0,0904 e  $AjusteAr$  igual a 1 com a ativação da regra 14 – *If (Tref is Confort) and (Erro is Z) and (Umid is Media) then (AjusteVent is Z)(AjusteAr is ON) (1)*.

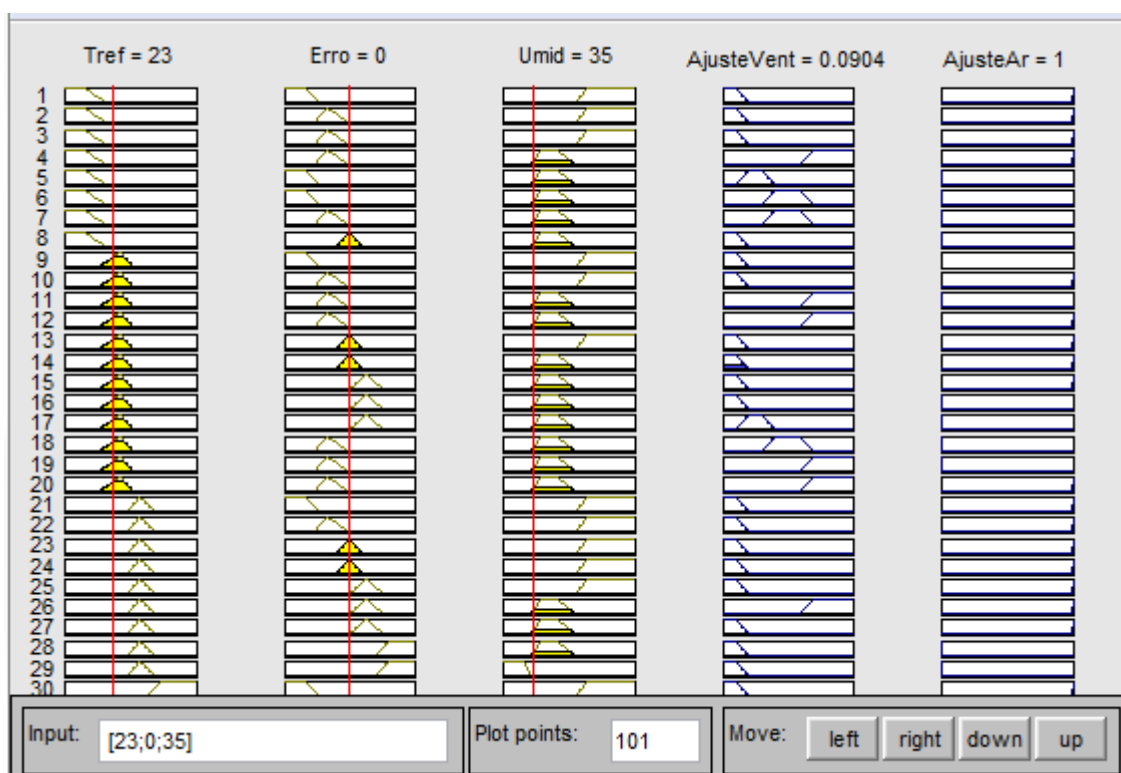


Figura 3.10 – Simulação do controle fuzzy com a visualização das regras

O controlador *fuzzy* através de seu algoritmo mostrado no Apêndice D, calcula os valores das variáveis de saída  $AjusteVent$  e  $AjusteAr$  com base nas regras definidas selecionando a melhor regra para disparo de acordo com os valores das variáveis de entrada do  $Tref$ ,  $Erro$ ,  $Umid$ .

Os gráficos de superfície 3D gerados pelo Sistema de Inferência Fuzzy (FIS), consistem em 03 (três) eixos apenas, e por isso não foi possível mostrar a relação de todas as variáveis de entrada e saída do controlador *fuzzy*, demonstramos a relação entre duas variáveis de entrada e uma variável de saída conforme visto na Figura 3.11, onde a variável



de saída *AjusteVent* esta em função das variáveis de entrada *Tref* e *Erro*, assim como as demais relações demonstradas nas Figuras 3.12, 3.12 e 3.14.

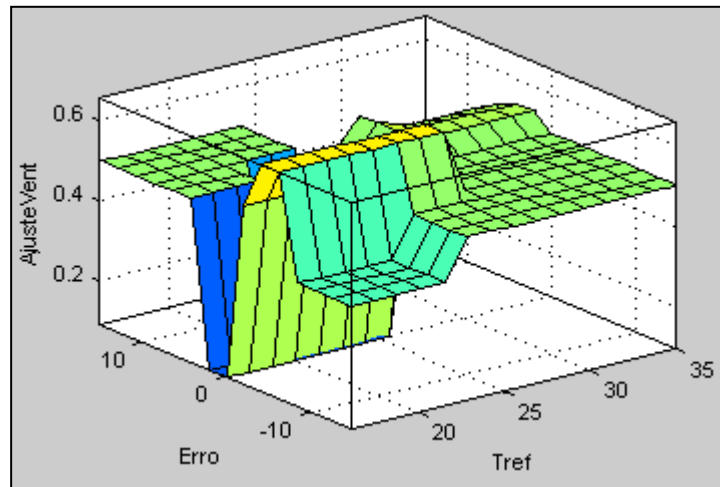


Figura 3.11 – Superfície 3D - Relação entre as variáveis de entrada *Tref*, *Erro* e a saída *AjusteVent*

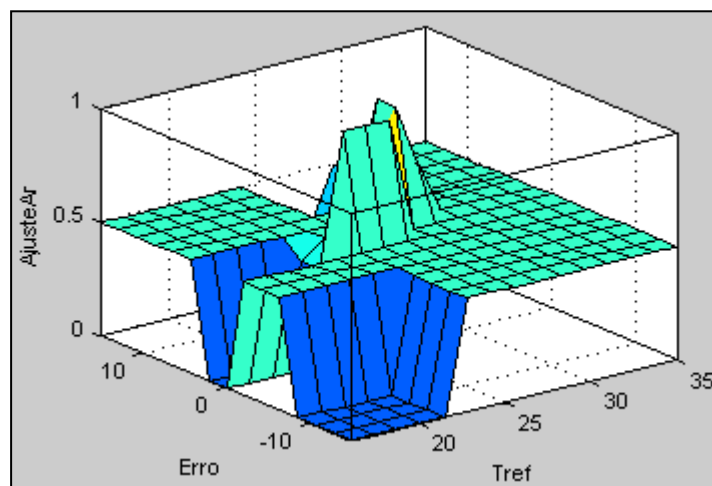


Figura 3.12 – Superfície 3D - Relação entre as variáveis de entrada *Tref*, *Erro* e a saída *AjusteAr*

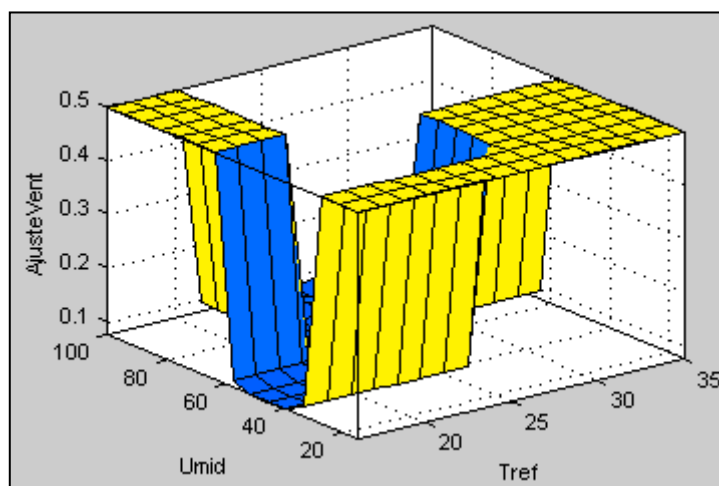


Figura 3.13 – Superfície 3D - Relação entre as variáveis de entrada *Tref*, *Umid* e a saída *AjusteVent*

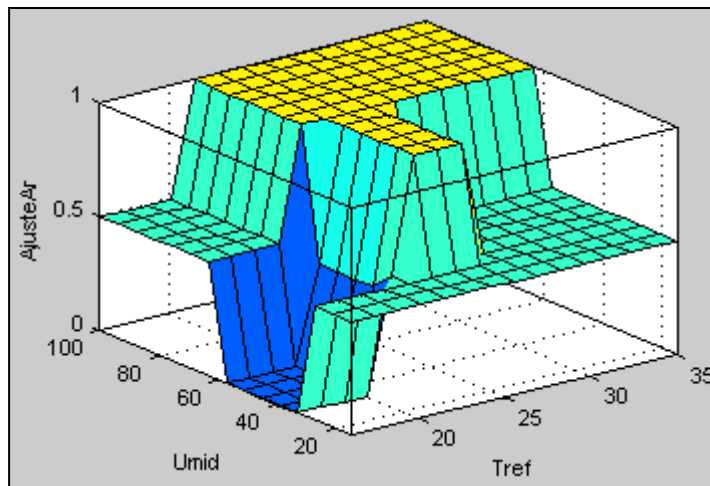


Figura 3.14 – Superfície 3D - Relação entre as variáveis de entrada  $T_{ref}$ ,  $U_{mid}$  e a saída  $AjusteAr$

## Capítulo 4

### Procedimentos Experimentais

Neste capítulo, mostramos os procedimentos experimentais do sistema de controle de temperatura e velocidade do ar utilizando controle *fuzzy* e rede sem fio *Zigbee*, apresentado no capítulo 3. Os procedimentos de medição e coleta de dados dos nós sensores de temperatura, umidade e velocidade do ar, bem como os ajustes no aparelho de ar condicionado e ventilador de teto foram realizados através de experimentação e o controle *fuzzy* foi feito por simulação no software Matlab R2014.

#### 4.1 Setup dos Experimentos

Para a execução dos experimentos usamos um computador com o sistema operacional Windows versão 7 Professional, processador Intel Core 2 Duo CPU T6570 @2,10 GHz e memória RAM de 2G, sistema operacional de 32 bits. O software utilizado para a implementação do controle *fuzzy* foi o Matlab versão 2014a.

As programações e configurações dos módulos sensores, bem como da rede *Zigbee* composta pelo coordenador e pelos nós sensores realizaram-se por meio do software XCTU.

O nó coordenador e cada nó sensor utilizado para a coleta dos dados de temperatura e umidade como mostrado na Figura 3.1, consiste de um módulo de RF (Rádio Frequência) *Xbee* que faz comunicação no padrão *Zigbee* IEEE 802.15.4, de um sensor de temperatura e umidade DHT 11 onde o elemento sensor de temperatura é um termistor do tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*) e o sensor de umidade é do tipo HR202 e de uma placa de microcontrolador baseada no ATmega2560 que usa a plataforma Arduíno.

A placa arduíno ATmega 2560 permitiu que os dados de temperatura, umidade e velocidade do ar fossem coletados e organizados habilitando-os para a transmissão por meio do módulo *Xbee* usando o padrão de rede sem fio *Zigbee*, assim como pela serial do computador.

Para a medição e coleta dos dados de velocidade do ar, posicionamos o sensor de velocidade no centro do ambiente, conforme demonstrado na Figura 4.2. Este sensor é composto de um rotor com conchas que aciona um mecanismo onde é instalado um sensor, este por sua vez, envia os sinais para as portas digitais da placa do Arduíno ATmega 2560

que após o processamento, os valores de velocidade do ar em *m/s* ou *km/h* foram enviados por comunicação serial do Arduíno para o computador.

Com as medições de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar coletadas no interior do ambiente pelos nós sensores, o nó coordenador enviou estes dados para o controlador *fuzzy* implementado em Matlab R2014 através de comunicação serial com a plataforma Arduíno.

Com base nos dados das variáveis ambientais temperatura, umidade e velocidade do ar medidas no ambiente e as variáveis pessoais como temperatura média radiante, taxa metabólica e índice de isolamento da roupa, o modelo *PMV* calculou a temperatura de conforto térmico, também definida como Temperatura de Referência (*Tref*), e com os dados de Umidade (*Umid*) e o Erro (*Erro*), variáveis de entrada do controlador *fuzzy*, as variáveis de saída *AjusteAr* e *AjusteVent* foram calculadas promovendo o acionamento do aparelho de ar condicionado e do ventilador de teto.

A temperatura de conforto térmico (*Tref*) calculada com base no modelo *PMV* durante o experimento foi de 23°C, ou seja, no início do experimento, o aparelho de ar condicionado foi ligado com a temperatura ajustada manualmente em 22°C, no entanto, assim que a média das temperaturas medidas no interior do ambiente atingiu 23°C, o controlador *fuzzy* enviou um valor numérico referente à variável de saída *AjusteAr* com ajuste em *OFF* desligando o aparelho de ar condicionado através de um sinal Infravermelho.

Usamos uma placa Arduíno Mega para a simulação do envio do sinal *IR* (*Infrared*) para o aparelho de ar condicionado, e para isso, utilizamos primeiramente, um CI receptor *IR* de controle remoto para a clonagem dos códigos *IR* do ar condicionado usando a biblioteca *IRremote* do Arduíno e o pino 2 de saída *PWM*. Assim, todos os códigos *IR* foram capturados a partir dos sinais transmitidos pelo controle remoto do aparelho de ar condicionado, conforme mostrado no Apêndice B.

Com os códigos *IR* gravados na *EPROM* do Arduíno, utilizamos um *LED* Infravermelho com o terminal positivo ligado no pino 3 da saída *PWM* da placa Arduíno Mega e o terminal negativo ligado no pino 8 (*GND*). A biblioteca *IRremote* foi utilizada para esta aplicação, onde controlador *fuzzy*, rodando no Matlab R2014, enviou o valor da variável de saída *AjusteAr* por comunicação serial para o circuito *IR* implementado na plataforma Arduíno, e este por sua vez, enviou o sinal *IR* de comando para o equipamento de ar condicionado.

No decorrer do experimento, o valor da temperatura de conforto térmico de 23° C foi medido pelos sensores no interior da sala, o que possibilitou que controlador *fuzzy* enviase um sinal de pulso *OFF* correspondente ao valor da variável de saída *AjusteAr* para o circuito *IR* implementado no Arduíno, e este por sua vez, efetuou o desligamento do ar condicionado através do sinal emitido pelo *LED* infravermelho.

Um ventilador de teto foi acionado pelo controlador *fuzzy* logo após o desligamento do ar condicionado para manter a sensação de conforto térmico com base no *PMV* por mais tempo utilizando-se da ação da velocidade do ar, com o aparelho de ar condicionado fora de operação. Para isso, o ajuste da velocidade do vento no interior do ambiente foi realizado por um circuito denominado de *Dimmer AC*, conforme mostrado na Figura 4.1, onde o sinal de saída do controlador *fuzzy* referente à variável *AjusteVent* foi enviado para o Arduíno através de comunicação serial e com o uso das portas de saídas *PWM*, o módulo *Dimmer AC* foi acionado ajustando a velocidade de rotação do motor do ventilador e com isso ajustando a velocidade do ar no interior do ambiente.

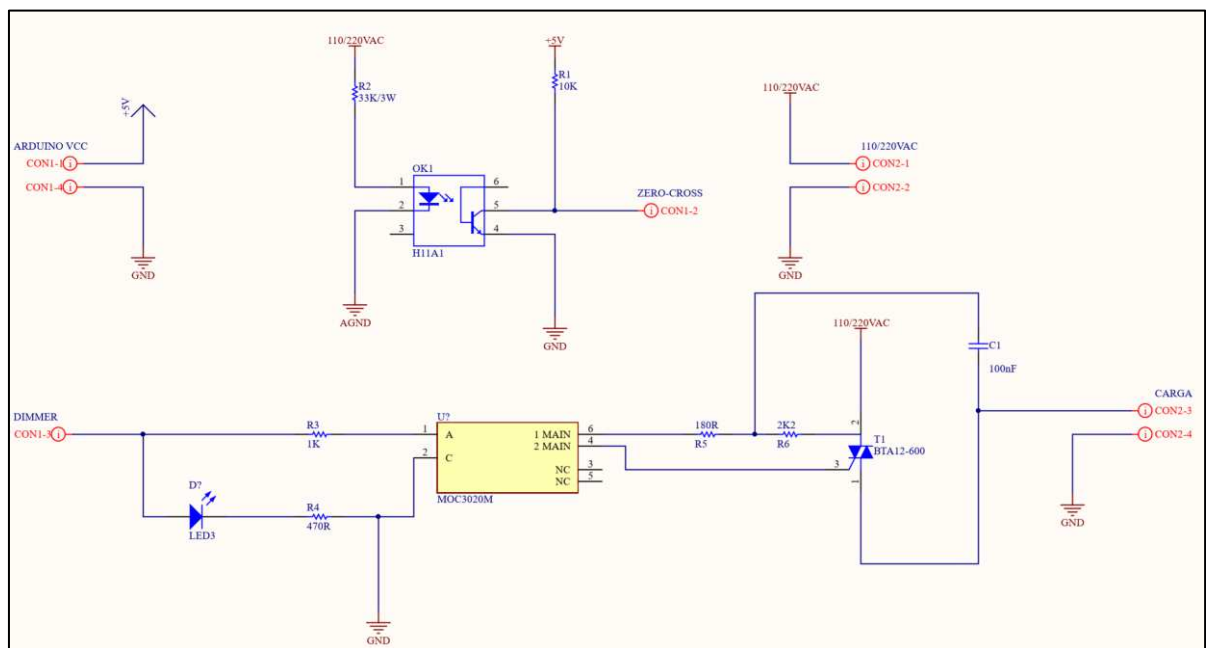


Figura 4.1 – Esquema do circuito Dimmer AC para ajuste da velocidade de rotação do ventilador de teto

Durante o experimento, foram medidos os consumos de energia do aparelho de ar condicionado e do ventilador de teto através de um wattímetro implementado na plataforma Arduíno, onde o código utilizado está demonstrado no Apêndice C.

O cenário escolhido para a realização dos experimentos foi uma sala de estudos da UFAM, localizado no pavilhão do mestrado no bloco do CETELI, contendo um equipamento de ar condicionado tipo *split* de 9.000 BTU/h, potência de 968 W e um

ventilador de teto com potências médias absorvidas de 58,94 W para a velocidade alta, 35,80 W para a velocidade média e 20,18 W para a velocidade baixa.

No momento do experimento, havia duas pessoas na sala realizando atividades sedentárias (escritório, residência, escola, laboratório) (RUAS, 1999). O dia estava parcialmente nublado no período da manhã, apresentando uma temperatura externa de 29° C e umidade relativa do ar de 81 %. No período da tarde, o dia permanecia parcialmente nublado, a temperatura externa era de 27° C e a umidade relativa do ar era de 82%.

Os pontos de medição estão localizados próximos da janela, porta de acesso e no centro da zona ocupada [34], conforme Figura 4.2.

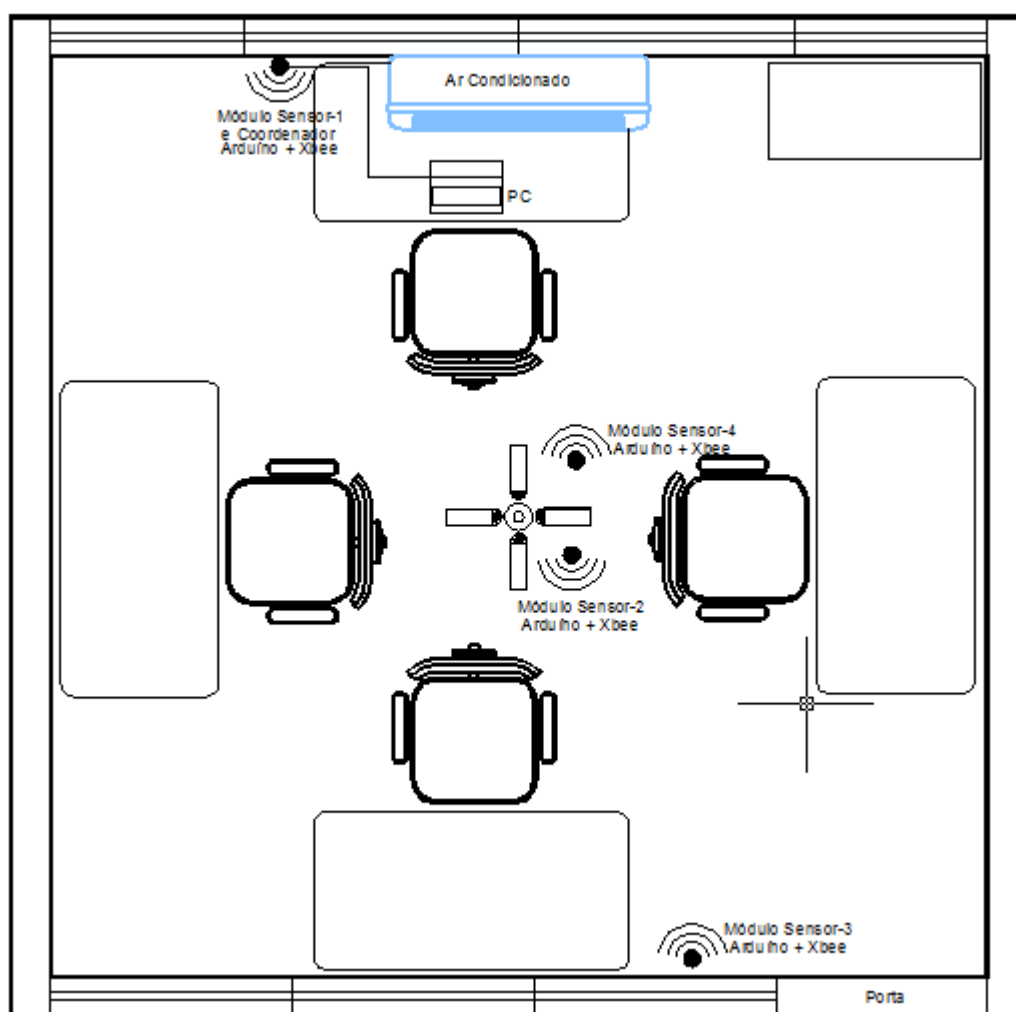


Figura 4.2 – Disposição dos módulos sensores, coordenador e dispositivos na sala

Vale ressaltar, que a localização dos pontos de medição está em conformidade com a norma NBR 16401-2/2008, Item 6.2.1, onde os valores mais desfavoráveis dos parâmetros são suscetíveis de ocorrer, como janela, porta e centro da sala.

## 4.2 Base de Dados

Para este experimento, utilizamos cinco bases de dados com medições de temperaturas do ar, umidade relativa e velocidade do ar do ambiente, consumo de energia do aparelho de ar condicionado existente no local do experimento e consumo de energia de um ventilador de teto.

As bases de dados referentes aos dados de temperatura, umidade e velocidade do ar foram criadas com o intuito de apresentar um conjunto de valores do índice de conforto térmico *Predicted Mean Vote – PMV* e também como variáveis para o controlador *fuzzy*.

As bases de dados do consumo de energia do aparelho de ar condicionado e do ventilador de teto foram concebidas para comparar os consumos de energia do sistema convencional e do sistema proposto descrito no capítulo 3, a fim de verificar a economia de energia.

As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam exemplos das bases de dados de temperatura, umidade e velocidade do ar medidos durante o experimento que estão disponíveis no link <https://www.dropbox.com/sh/7ugjc3uqss0zmn5/AABXefnbIPOK3BCLXdnFQfZJa?dl=0>

```
COORDENADOR - Umid: 44.00% Temp: 23.00°C
MOD 1 - Umid: 49.00% Temp: 26.00°C
MOD 2 - Umid: 53.00% Temp: 28.00°C
COORDENADOR - Umid: 44.00% Temp: 23.00°C
MOD 1 - Umid: 49.00% Temp: 26.00°C
MOD 2 - Umid: 53.00% Temp: 27.00°C
COORDENADOR - Umid: 43.00% Temp: 23.00°C
MOD 1 - Umid: 49.00% Temp: 26.00°C
MOD 2 - Umid: 53.00% Temp: 27.00°C
COORDENADOR - Umid: 43.00% Temp: 23.00°C
MOD 1 - Umid: 49.00% Temp: 26.00°C
MOD 2 - Umid: 52.00% Temp: 28.00°C
COORDENADOR - Umid: 44.00% Temp: 23.00°C
MOD 1 - Umid: 49.00% Temp: 26.00°C
MOD 2 - Umid: 52.00% Temp: 28.00°C
COORDENADOR - Umid: 44.00% Temp: 23.00°C
MOD 1 - Umid: 49.00% Temp: 26.00°C
MOD 2 - Umid: 52.00% Temp: 27.00°C
COORDENADOR - Umid: 43.00% Temp: 23.00°C
MOD 1 - Umid: 49.00% Temp: 26.00°C
MOD 2 - Umid: 52.00% Temp: 27.00°C
```

Figura 4.3 – Dados de temperatura e umidade coletados no nó coordenador e nós sensores trafegados pela rede Zigbee e capturados pela serial do arduíno

```

1: Start measurement... finished.
Counter: 2; RPM: 24; Wind speed: 0.74 [m/s] 2.66 [km/h]
2: Start measurement... finished.
Counter: 2; RPM: 24; Wind speed: 0.74 [m/s] 2.66 [km/h]
3: Start measurement... finished.
Counter: 2; RPM: 24; Wind speed: 0.74 [m/s] 2.66 [km/h]
4: Start measurement... finished.
Counter: 2; RPM: 24; Wind speed: 0.74 [m/s] 2.66 [km/h]
5: Start measurement... finished.

```

Figura 4.4 – Dados de velocidade do ar medidos no ambiente

### 4.3 Descrição das Métricas de Desempenho

As métricas utilizadas para avaliar o desempenho do sistema proposto no capítulo 3 foram:

- Índice de conforto térmico Voto Médio Estimado (*Predicted Mean Vote – PMV*) (FANGER, 1970): a combinação das variáveis Temperatura, Umidade Relativa e Velocidade do Ar medidas pelos sensores com as variáveis Temperatura Média Radiante, Taxa Metabólica e Índice de Isolação da Roupas conferiu o cálculo do *PMV* conforme a equação 10 citada no capítulo 2.

$$PMV = (0,028 + 0,3033 \cdot e^{(-0,036 \cdot M)}) \cdot L \quad (10)$$

- Economia de Energia: são realizados dois tipos de medição, primeiramente são feitas as medições da potência elétrica média do sistema através do método convencional, que utiliza apenas o aparelho de ar condicionado, onde os valores de tensão e corrente foram medidos por meio de um wattímetro implementado usando um microcontrolador Arduino Mega 2560 e o sensor de corrente tipo invasivo ACS 712, conectado no circuito de alimentação do ar condicionado, onde a transmissão dos dados de medição foi realizada pela porta serial.

Pelo método com controle *fuzzy*, onde o aparelho de ar condicionado e o ventilador de teto operam por meio do controlador *fuzzy*, foram medidas as potências médias do aparelho de ar condicionado e do ventilador de teto utilizando o wattímetro já mencionado, com isso, são calculados os consumos de energia de ambos os métodos, por meio da Equação 11:

$$Potência\ média = E \times \Delta t \quad (11)$$



Onde  $E$  é o consumo de energia expresso em kWh e  $\Delta t$  é o tempo médio de utilização expresso em hora do sistema em operação, tanto pelo método convencional como pelo método de controle *fuzzy*.

Após realizados os cálculos dos consumos de energia dos dois métodos, temos a economia de energia dada pela Equação 12 (KU *et al.*, 2015).

$$\eta = \frac{E_{conv} - E_{ctrl}}{E_{conv}} \times 100\% \quad (12)$$

Onde  $E_{conv}$  é a energia consumida pelo método convencional e  $E_{ctrl}$  é a energia consumida pelo método usando o controle *fuzzy*.

#### 4.4 Resultados

Nesta seção, apresentamos os resultados obtidos com a utilização do sistema de controle proposto no capítulo 3, onde primeiramente, é descrito o procedimento experimental, em seguida, são mostrados os resultados obtidos e na sequência, é realizada uma análise dos resultados.

Os testes realizados tiveram como objetivo, avaliar o comportamento da Temperatura e Umidade Relativa com a influência da Velocidade do Ar no conforto térmico de um ambiente com a utilização de um ventilador de teto, a fim de manter o *PMV* na faixa aceitável de [+0,5 à -0,5] mesmo após o desligamento do aparelho de ar condicionado.

Os dados coletados de umidade relativa e velocidade do ar (Seção 4.2), bem como as demais variáveis como a Taxa Metabólica  $M$ , Índice de Isolação da Roupas  $I_{cl}$  e Temperatura Média Radiante  $T_{mrt}$  são usados pelo modelo *PMV* para gerar por simulação, o valor de  $T_{ref}$  ou da temperatura de conforto desejada.

Com as variáveis de entrada do controlador *fuzzy*  $T_{ref}$ ,  $Umid$  e  $Erro$ , sendo esta última, definida conforme Equação 9, foi realizada a simulação do sistema de controle proposto onde pudemos verificar o seu comportamento pelo método convencional e pelo método usando o controle *fuzzy*.

Apresentamos na Figura 4.5, o gráfico com as variações das temperaturas nos três módulos sensores posicionados na sala, conforme Figura 4.2, utilizando o método convencional, onde apenas o aparelho de ar condicionado está ligado com temperatura ajustada manualmente em 22° C.

Podemos verificar que de acordo com as posições dos módulos sensores apresentados na Figura 4.2, as temperaturas medidas em cada ponto são diferentes em virtude de fatores como a posição do aparelho de ar condicionado e a direção e sentido do fluxo do vento insuflado no interior da sala como demonstrado na Figura 4.5.

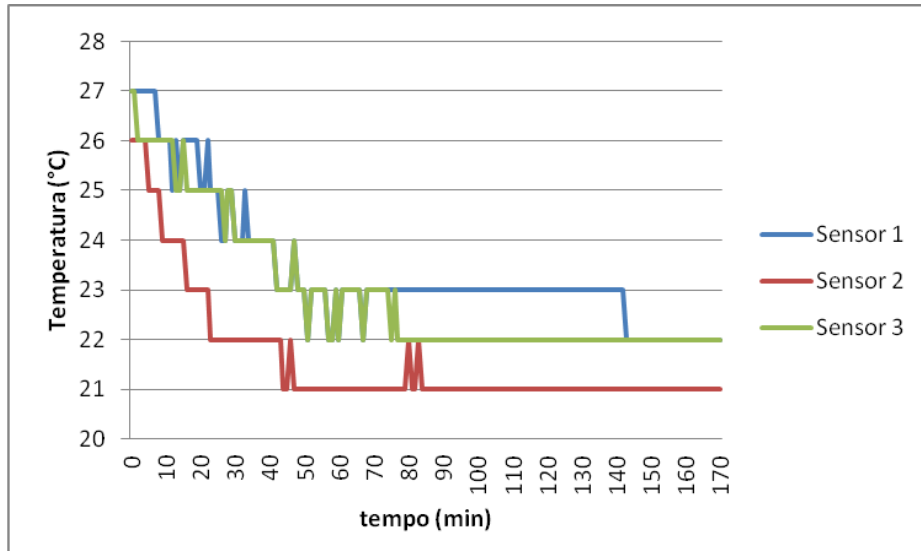


Figura 4.5 – Variação das temperaturas nos nós sensores pelo método convencional

Usando a métrica de desempenho apresentada na seção 4.3 os índices *PMV* foram obtidos pelo método convencional por simulação conforme mostrado na Figura 4.6. Podemos observar que boa parte do tempo, o índice *PMV* está fora do intervalo de  $[-0.5$  à  $+0.5]$  que expressa a sensação térmica de conforto sentida pelos usuários do recinto.

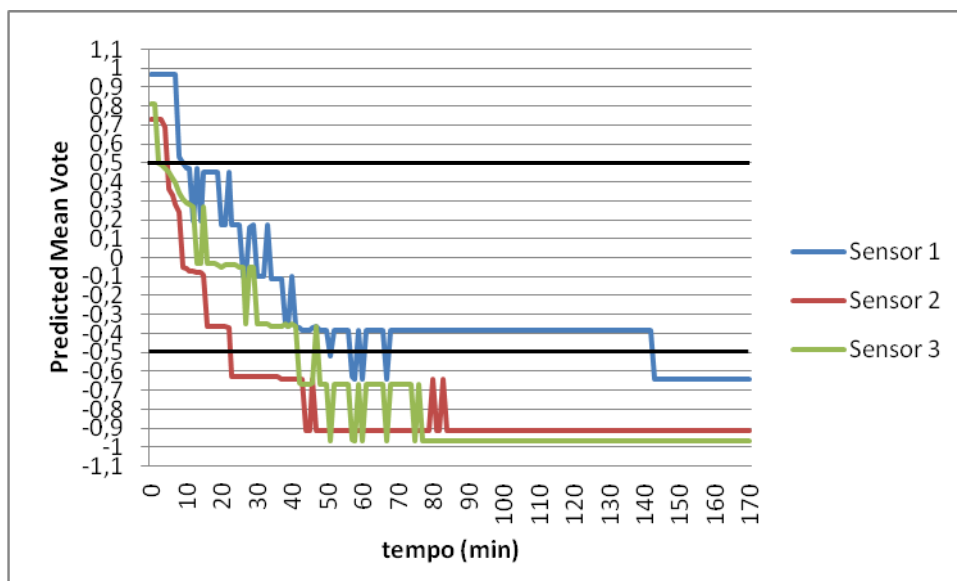


Figura 4.6 – Variação do PMV nos nós sensores pelo método convencional

Apresentamos agora, os resultados obtidos utilizando o método de controle *fuzzy* - onde observamos nos três pontos de medição as variações da temperatura, que estão diretamente relacionadas aos fatores já mencionados relativos aos posicionamentos dos módulos sensores e do aparelho de ar condicionado. Já o índice *PMV* se mantém dentro dos intervalos aceitáveis de conforto térmico, conforme demonstrado nas Figuras 4.7 e 4.8, respectivamente.

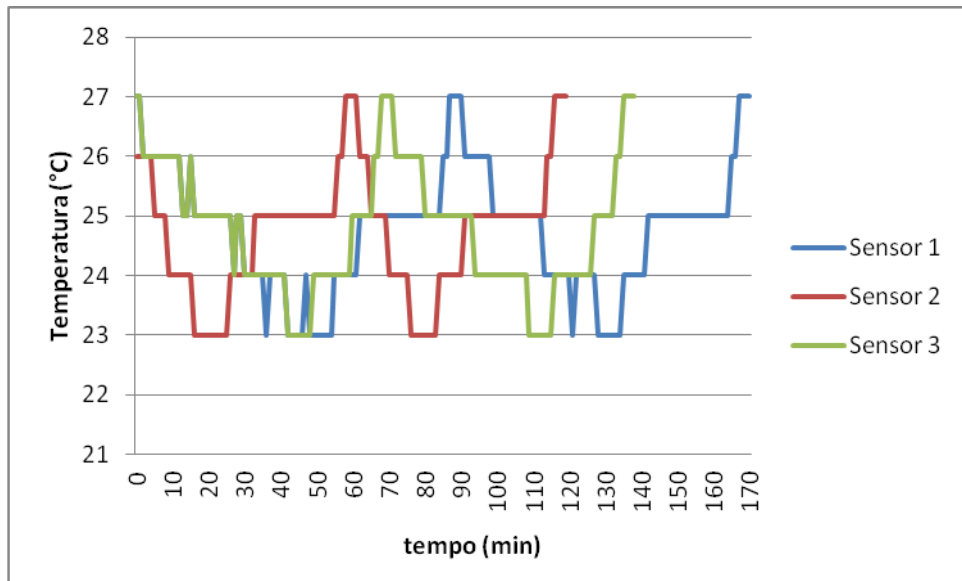


Figura 4.7 – Variação da temperatura nos nós sensores pelo método de controle fuzzy

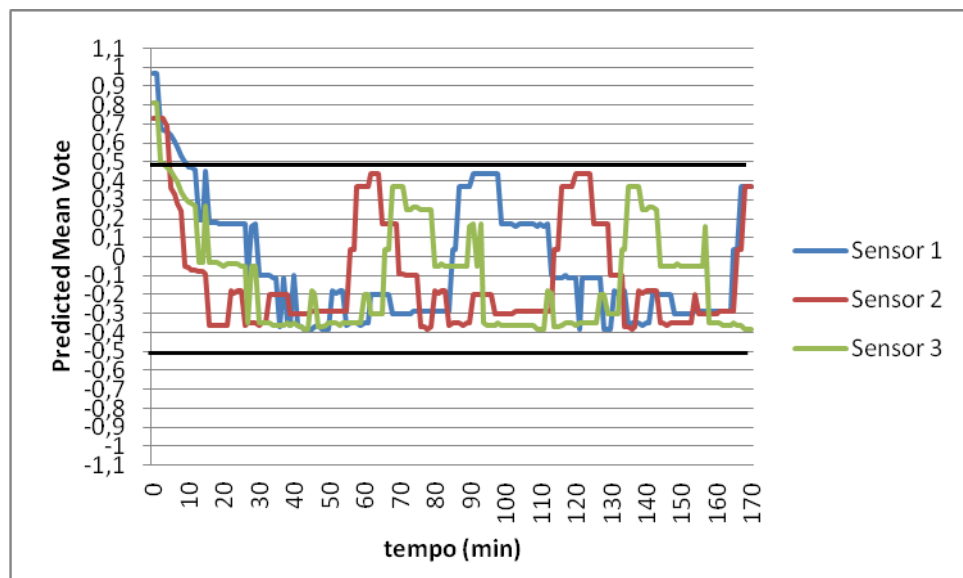


Figura 4.8 – Variação do índice PMV nos nós sensores pelo método de controle fuzzy

O fator qualidade do ar no ambiente climatizado é importante, pois o nível da umidade relativa do ar está diretamente relacionado com este fator, contudo, a umidade não é variável de controle, pois o sistema de climatização instalado no local do experimento não permite que se atue no controle da umidade.

No entanto, fizemos o monitoramento da variação da umidade do ar durante o experimento, a fim avaliar a qualidade do ar no ambiente. As variações da umidade nos três pontos dos módulos sensores usando o método convencional e o método utilizando o controle *fuzzy* são mostrados nas Figuras 4.9 e 4.10, respectivamente.

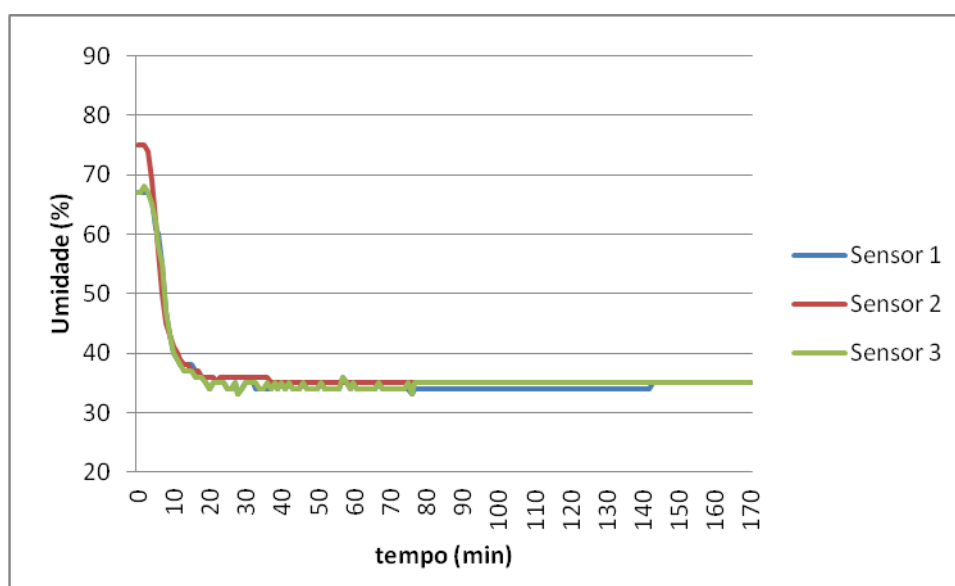


Figura 4.9 – Variação da umidade nos nós sensores pelo método convencional

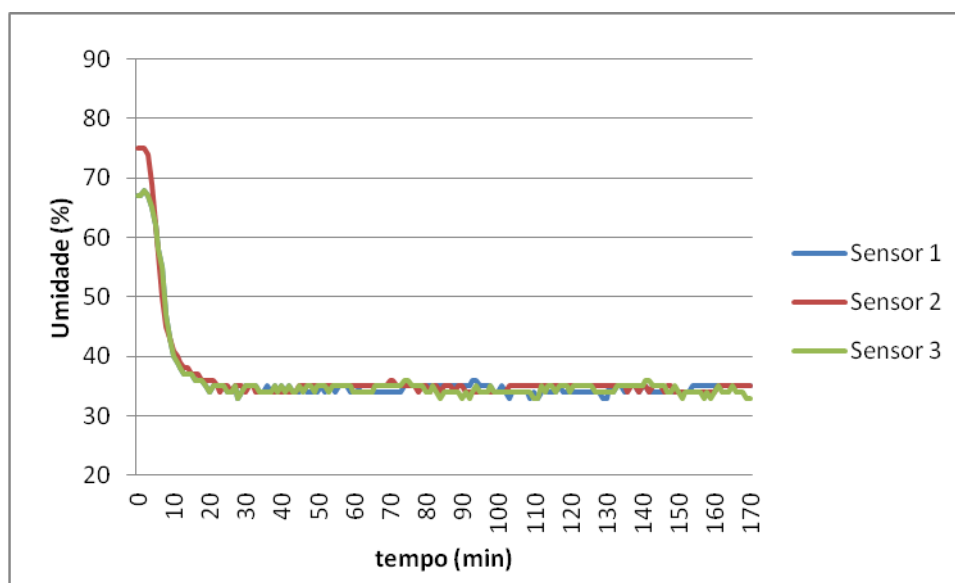


Figura 4.10 – Variação da umidade nos nós sensores pelo método de controle fuzzy

Ao longo dos experimentos pelos métodos convencional e com controle *fuzzy*, foram realizadas as medições das potências absorvidas do sistema ao longo do tempo de ambos os métodos.

Na Figura 4.11 mostramos a variação da potência média do sistema pelo método convencional, que utiliza apenas o aparelho de ar condicionado em funcionamento. A potência nominal do equipamento é de 968 W, no entanto, com as variações de tensão e corrente durante a sua operação, as potências médias absorvidas variam na mesma proporção.

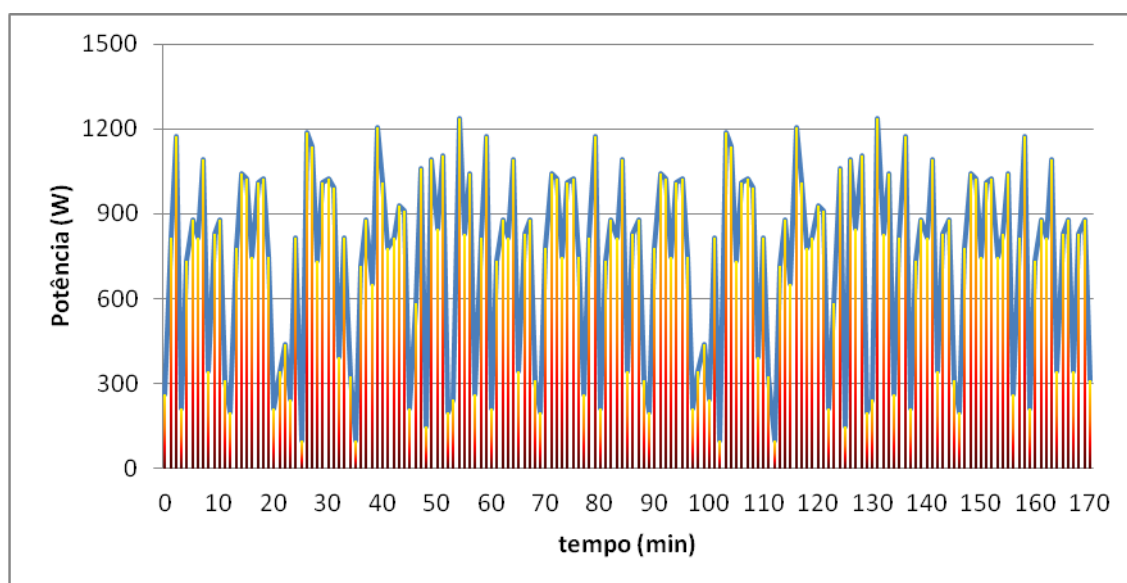


Figura 4.11 – Variação da potência média do sistema pelo método convencional

O desempenho do sistema de controle proposto no capítulo 3 consiste em manter o aparelho de ar condicionado desligado o maior tempo possível, enquanto o ventilador de teto fornece a velocidade do ar necessária para manter o *PMV* dentro da faixa de conforto térmico de [+0,5 à -0,5].

A Figura 4.12 demonstra o comportamento do sistema pelo método com controle *fuzzy*, onde apresentamos os instantes em que o aparelho de ar condicionado e o ventilador de teto operam para resfriar o ambiente e com base nas temperaturas, umidades e na velocidade do ar medidas, manter o *PMV* em condições aceitáveis promovendo a sensação térmica de conforto em torno dos ocupantes da sala.

Ao atingir a temperatura de conforto térmico de 23° C fornecida pelo modelo *PMV*, o controlador *fuzzy* atuou desligando o aparelho de ar condicionado, e ligou o ventilador de teto fornecendo a velocidade do vento necessária para manter a temperatura de conforto

( $T_{ref}$ ) e a umidade relativa do ar em valores aceitáveis de sensação térmica em torno dos usuários do recinto mantendo o ar condicionado desligado o máximo de tempo possível.

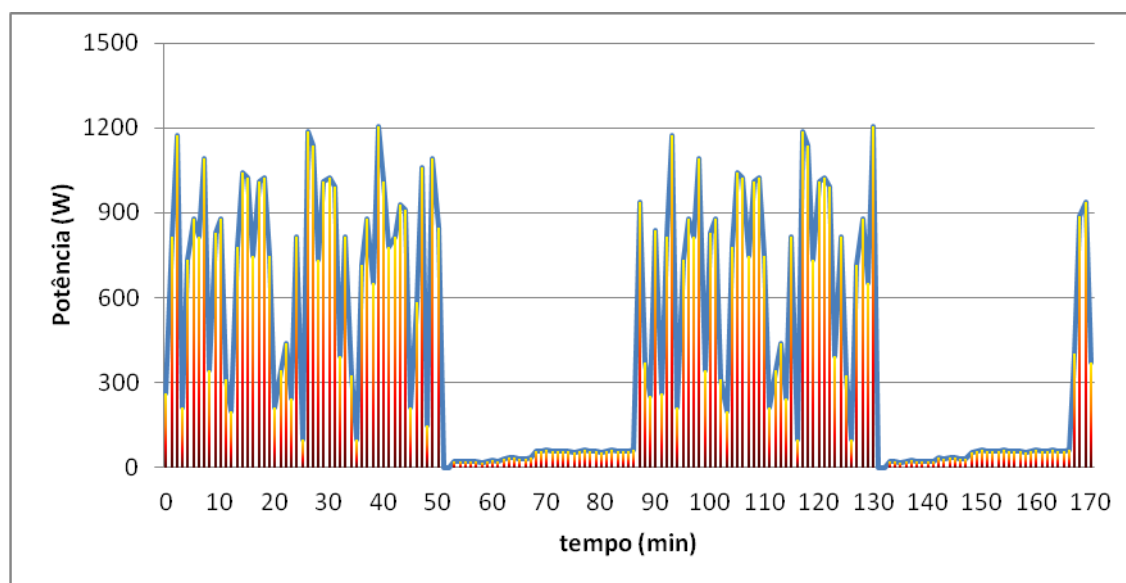


Figura 4.12 – Variação da potência média do sistema pelo método com controle fuzzy

## 4.5 Análise dos Resultados

Ao analisarmos o gráfico da Figura 4.6, o índice  $PMV$  nos três pontos dos sensores estão fora da faixa de conforto térmico de  $[-0,5$  à  $+0,5]$  na maior parte do tempo, pois pelo método convencional o aparelho de ar condicionado apenas trabalha para alcançar a temperatura ajustada em  $22^{\circ} C$ .

Pelo método com controle *fuzzy*, o índice  $PMV$  permanece no intervalo de conforto térmico aceitável de  $[-0,5$  à  $+0,5]$  nos três pontos dos nós sensores, como demonstra a Figura 4.8, isto se deve à atuação do controlador *fuzzy* em manter a temperatura de conforto térmico e a velocidade do ar dentro de valores aceitáveis de modo a manter o  $PMV$  dentro dos limites de conforto térmico.

Nos dois métodos, observamos que a umidade relativa do ar decresce ao longo do tempo à medida que a temperatura decresce e se mantém constante quando a temperatura se estabiliza, conforme observado nas Figuras 4.9 e 4.10. Em ambos os métodos, a umidade não alcançou patamares críticos que pudesse comprometer a qualidade do ar.

Com o sistema de controle proposto, alcançamos uma economia de energia de 41,74% com relação ao método convencional, conforme mostrado na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Comparação dos Consumos de Energia entre os Métodos

Método	Consumo de Energia (kWh)	Economia de Energia (%)
Convencional	2,06	-----
Controle <i>Fuzzy</i>	1,20	41,74

Neste trabalho, utilizamos pontos de medição de temperatura e umidade e um ponto de medição central da velocidade do vento no recinto, onde pudemos observar as variações nos diferentes pontos dispostos na sala conforme Figura 4.2.

A observação destes dados serviu como suporte para a decisão de implementar um controlador *fuzzy* que pudesse atuar proporcionando o conforto térmico com base no *PMV* em torno dos ocupantes nos pontos onde se localizam os módulos sensores.

Comparado com outros trabalhos da literatura como o de Ku, Liaw, Tsai e Liu (2015), Yun e Won (2012), este alcançou o melhor resultado em termos de economia de energia, com um valor de 41,74% a menos de consumo de energia.

## Capítulo 5

### Conclusões

Neste trabalho de pesquisa, verificamos que a velocidade do ar proporcionado por um ventilador em um ambiente climatizado com o aparelho de ar condicionado desligado por um determinado intervalo de tempo, pode oferecer uma significativa economia de energia sem comprometer o conforto térmico dos usuários de um recinto fechado.

Observamos que durante os experimentos, as temperaturas e umidades medidas nos diferentes pontos de medição variaram em virtude do posicionamento destes sensores e da posição do aparelho de ar condicionado, com isso, alguns pontos do recinto encontravam-se mais quentes ou mais frios, isto nos levou a desenvolver um controlador *fuzzy* que possibilitasse atuar na velocidade do ar, nas temperaturas e consequentemente na umidade proporcionando o conforto térmico a todos os ocupantes do ambiente.

Como contribuição, este trabalho mostrou que se pode usar a energia de forma racional, utilizando-se de sistemas de controles inteligentes e redes de sensores sem fio que permitiram que as temperaturas e velocidades do ar em torno dos usuários de um recinto fossem devidamente controladas, e a umidade pudesse se manter em valores aceitáveis sem comprometer a qualidade do ar, mantendo o índice de conforto térmico *PMV* dentro dos valores padronizados de sensação térmica e com isso, proporcionado uma economia de energia de 41,74%.

#### 5.1 Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros destacamos:

- Com a presença e movimentação de pessoas no interior do recinto as variações de temperatura e umidade são maiores, portanto, as condições de conforto térmico devem ser avaliadas levando em consideração a presença de mais pessoas.
- Podem ser considerados outras opções de controladores *fuzzy* com os ajustes da base regras a fim de adequar melhor às condições de conforto térmico.
- Aplicação de técnicas de reconhecimento de imagens a fim de detectar as partes do corpo de uma pessoa sem vestimenta ao adentrar em um recinto, e desta forma, definir qual tipo de vestimenta está sendo usado, bem como o tipo de atividade que



a pessoa está realizando. Isto poderia definir com precisão o índice de isolamento da roupa e a taxa metabólica, proporcionando mais acurácia na determinação do *PMV*.

## Referências Bibliográficas

K. L. Ku, J. S. Liaw, M. Y. Tsai e T. S. Liu: **Automatic Control System for Thermal Comfort Based on Predicted Mean Vote and Energy Saving**. In: IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 12, N° 1, January 2015.

Jaeseok Yun e Kwang-Ho Won: **Building Environment Analysis based on Temperature and Humidity for Smart Energy System**. In: Sensors, 2012.

SANTOS, R. L. (2011). **Modelagem de um sensor virtual para controle do conforto térmico**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM – 433/11, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF, 107 p.

RUAS, A. C: **Conforto Térmico nos Ambientes de Trabalho**. Fundacentro, 1999.

LUO Yifan, LI Ning, LI Shaoyuan: **ANFIS Modeling of the PMV Thermal Comfort Index Based on Prior Knowledge**. In: IEEE 9th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2014.

BAUCHSPIESS, Adolfo: **Introdução aos Sistemas Inteligentes: Aplicações em Engenharia de Redes Neurais, Lógica Fuzzy e Sistemas Neuro-Fuzzy**. Universidade de Brasília, 2008.

CRUZ, Oliveira Adriano: **ANFIS Adaptive Neuro – Fuzzy Inference System**. PPGI, IM-NCE, UFRJ.

S.N Sivanandam, S. Sumathi e S.N Deepa: **Introduction to Fuzzy Logic using Matlab** . In: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.

MathWorks® - **Fuzzy Logic Toolbox** - User .

Moraes, Professor: **Apostila de Inteligência Artificial** – parte 02 – Lógica *Fuzzy* – 2010.

Cavalcanti, José Homero Feitosa, Mônica Tejo Cavalcanti, Cícero Rocha Souto, Hiran de Melo: **Lógica Fuzzy aplicada às Engenharias** – João Pessoa – PB – 2012.

Voracek, Jan: **ANFIS – Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System**. In: Negnevitsk, Person Education - 2002.

Souza, Thales Ruano Barros de: **Eficiência energética de redes de sensores sem fio aplicada ao conforto térmico em ambientes fechados**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Amazonas – 2014.

DE VECCHI, R.; CÂNDIDO, C.; LAMBERTS, R. **O efeito da utilização de ventiladores de teto no conforto térmico em salas de aulas com condicionamento híbrido em um local de clima quente e úmido.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 189-202, jul./set. 2013.

Caetano, Jordan. In: **Tutorial Laboratório de Redes sem Fio.** Faculdade de Tecnologia – Universidade Federal do Amazonas – 2016.

Chenxu Duan, Xudong Ding, Fenggang Shi, Xianhua Xiao, Peiyong Duan: **PMV - based Fuzzy Algorithms for Controlling indoor Temperature.** In: School of Information and Electrical Engineering - Shandong Jianzhu University - Jinan 250101, China. In: IEEE 2011.

Lucio Ciabattoni, Gionata Cimini, Francesco Ferracuti, Massimo Grisostomi, Gianluca Ippoliti, Matteo Pirro: **Indoor thermal comfort control through fuzzy logic PMV optimization.** In: Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Universita' Politecnica delle Marche, Ancona, Italy. In: IEEE 2015.

Ju-Kyung Lee, Suk Lee, Hyun-Hee Kim, Kyung-Chang Lee: **PMV Calculation and Intelligent Control Algorithm for Location – based Human Adaptive Air – conditioner.** In: School of Mechanical Eng. - Pusan National University - Busan, Korea. In: Dept. of Control and Instrumentation Eng. - Pukyong National University - Busan, Korea. In: IEEE 2013.

**Rede Zigbee**, 2011. Disponível em: <<http://www.zigbee.ind.br>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

**Sensores com Arduino**, 2013. Disponível em: <[blog.filipeflop.com/sensors/monitorando-temperatura-e-umidade-com-o-sensor-dht11.html](http://blog.filipeflop.com/sensors/monitorando-temperatura-e-umidade-com-o-sensor-dht11.html)>. Acesso em: 24 abr. 2017.

**INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION**, Geneva. ISO 7730; moderate thermal environments-determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. Geneva, 1994.

**IEEE Standard 802.11.** “The IEEE 802.11 Standard”. U.S.A., 1997.

**MathWorks SOM Toolbox for MATLAB**, 2015. Disponível em: <<http://www.cis.hut.fi/somtoolbox>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

Theodoridis, S. e Koutroumbas, K. (2006). **Pattern Recognition**, Terceira edição, pp. 635. Elsevier.

Souza, Bruno Rodrigues de; Nuss, Henrique Rocha: **Controlador Automático Remoto para Ar condicionado via Arduino, aplicando a Lógica Fuzzy**. In: Revista Interdisciplinar do Pensamento Científico, N° 2, artigo n° 15, 2014.

Rezende, Oscar Luis Teixeira; Lorenzoni, Luciano Lessa; Kulitz, Hans Rolf: **Uso do Sistema Lógico Fuzzy no controle da potência aplicada ao motor do sistema de ventilação de um gaseificador/combustor para produção de calor**. In: Revista Ifes Ciência, n° 1, V.1, 2015 – Instituto Federal do Espírito Santo.

Barg, Eduardo Klaus: **Protótipo de um Controlador de Temperatura baseado em Lógica Fuzzy utilizando um Microcontrolador**. Trabalho de conclusão do curso de Engenharia da Computação – Universidade Regional de Blumenau – 2002.

Prado, Luis Antonio; Masselli, Yvo Marcelo Chiaradia: **Aplicação de Lógica Fuzzy e Arduino em controle de processos**. Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Nacional de Telecomunicações – 2014.

Gomide, Fernando Antonio Campos; Gudwin, Ricardo Ribeiro: **Modelagem, Controle, Sistemas e Lógica Fuzzy**. In: SBA Controle e Automação/Vol. 4 n° 3/setembro-outubro – 1994.

Lima, Gustavo Fernandes de; Maniçoba, Glauco George Cipriano: **Controle de Temperatura de uma Tocha de Plasma Térmico com Acoplamento Indutivo Utilizando a Placa Arduino**. In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente – XI SBAI 2013.

Posselt, Ederson Luis: **Infuzzy - Ferramenta para Desenvolvimento de Aplicações de Sistemas Difusos**. Dissertação de Mestrado em Sistemas e Processos Industriais - Universidade de Santa Cruz do Sul, SC – 2011.

Pilatti, Lauro Antônio Drehmer: **Controle de Temperatura e Vazão de um Chuveiro Usando a Lógica Fuzzy**. Departamento de Automação e Sistemas – Universidade Federal de Santa Catarina – 2012.

Fabro, João Alberto; Oliveira, André Schneider de: **Aula 4 – Lógica Fuzzy**. Universidade Federal de Santa Catarina – 2012.

NORMA BRASILEIRA ABNT NBR 16401-2: **Instalações de ar condicionado – Sistemas centrais e unitários** – Parte 2: Parâmetros de conforto térmico – 2008.

FANGER, P. O: **Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering**. United States: McGraw-Hill Book Company, 1970. 244 p.

ARAÚJO, Joseana Macedo Fechine Régis de: Inteligência Artificial, Representação do Conhecimento (Lógica Fuzzy), 2015. Disponível em: <[http://www.dsc.ufcg.edu.br/~joseana/IAPos\\_NA14.pdf](http://www.dsc.ufcg.edu.br/~joseana/IAPos_NA14.pdf)>. Acesso em: 03 set. 2018.

ZADEH, L.A.: Fuzzy Sets - 1965. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Lógica\\_difusa](https://pt.wikipedia.org/wiki/Lógica_difusa)>. Acesso em: 12 fev. 2018.

## Apêndice A

### Códigos implementados em arduíno para coleta de dados de temperatura e umidade.

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include <LiquidCrystal.h>
#include <Thread.h>
#include <ThreadController.h>
#include "DHT.h"
#define DHTPIN A0 // pino que estamos conectado
// #define LDRPIN A15 // Pino do sensor LDR de luminosidade
#define DHTTYPE DHT11 // DHT 11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
LiquidCrystal lcd(12, 9, 5, 4, 3, 2);
SoftwareSerial mySerial(10, 11); // RX, TX
Thread threadDaCentral;
void setup() {
    threadDaCentral.setInterval(1500);
    threadDaCentral.onRun(coletaDado);
    dht.begin();
    lcd.begin(16, 2);
    lcd.clear();
    // Posiciona o cursor na coluna 3, linha 0;
    lcd.setCursor(3, 0);
    // Envia o texto entre aspas para o LCD
    lcd.print("SENSORES");
    lcd.setCursor(3, 1);
    lcd.print(" GAUTAMA");
    // Open serial communications and wait for port to open
    Serial.begin(57600);
    while (!Serial) {
        ; // wait for serial port to connect. Needed for native USB port only
    }
    // set the data rate for the SoftwareSerial port
    Serial1.begin(9600);
}

void loop() { // run over and over
    if (Serial1.available() >= 62) {
        int i = 0;
        if (Serial1.read() == 0x7E) {
            byte a = Serial1.read();
            while (a != 0x41) {
                a = Serial1.read();
            }
            while (a != 0x5A) {
                a = Serial1.read();
                if (a != 0x5A) {
                    Serial.write(a);
                }
            }
            Serial.println();
        }
    }
    if (threadDaCentral.shouldRun()) {
```

```

        threadDaCentral.run();
    }
}

void coletaDados() {
    //delay(500);
    //float Vout=analogRead(LDRPIN)*0.0048828125;
    //int lux = (2500/Vout-500)/10;
    float h = dht.readHumidity();
    float t = dht.readTemperature();
    // testa se retorno é valido, caso contrário algo está errado.
    if (isnan(t) || isnan(h))
    {
        //Serial.println("Failed to read from DHT");
    }
    else
    {
        Serial.print("COORDENADOR - ");
        Serial.print("Umid: ");
        Serial.print(h);
        Serial.print("% ");
        Serial.print("Temp: ");
        Serial.print(t);
        Serial.write(176);
        Serial.println("C");
        //Serial.print(" Lum: ");
        //Serial.print(lux);
        //Serial.println(" Lux");
    }
}
}

```

## Apêndice B

# Códigos IR do Aparelho de Ar Condicionado capturados em Arduíno

### AR COND DA SALA UFAM

Code : E9789799 (32 bits)

Tecla OFF

```
unsigned int rawData[227] = {3750,1400, 650,1100, 600,1200, 500,500,
550,450, 550,500, 500,1200, 600,450, 550,450, 550,1200, 550,1200,
550,450, 550,1200, 550,450, 600,450, 550,1200, 500,1250, 550,400,
600,1200, 500,1200, 600,450, 550,450, 550,1200, 550,450, 550,500,
550,1250, 500,450, 550,450, 600,450, 550,450, 550,500, 550,450, 550,500,
550,450, 550,500, 500,500, 550,450, 600,450, 550,450, 550,500, 550,450,
550,500, 550,450, 550,500, 550,450, 550,500, 500,1200, 550,500, 550,450,
600,1150, 550,1200, 550,500, 500,500, 500,500, 550,450, 550,450, 600,450,
550,500, 550,500, 500,500, 550,1200, 500,500, 550,450, 550,500, 550,450,
550,1200, 550,500, 500,1200, 600,1150, 550,450, 550,500, 550,450,
550,450, 600,450, 600,450, 550,500, 500,500, 550,450, 550,450, 600,450,
550,450, 600,450, 550,450, 600,450, 550,500, 500,500, 550,500, 500,500,
500,500, 500,1200, 600,500, 500,500, 500,500, 550,500, 500,550, 500,500,
500,500, 550,450, 550,500, 550,1150, 550,500, 550,500, 500,500, 550,450,
550,450, 600,450, 600,1150, 550,500, 500,500, 550,1200, 550,500,
500,1200, 550,450, 600};
```

Code : E3F67798 (32 bits) Tecla ON

```
unsigned int rawData[227] = {3800,1400, 550,1200, 550,1200, 550,500,
500,500, 500,500, 550,1200, 500,500, 550,550, 450,1200, 550,1250,
500,500, 500,1250, 500,500, 500,550, 500,1150, 600,1200, 550,500,
500,1200, 550,1150, 550,550, 500,450, 550,1250, 500,500, 500,500,
550,1200, 550,500, 550,450, 550,500, 500,500, 500,550, 500,500, 500,500,
550,450, 550,550, 500,500, 500,500, 550,500, 500,500, 500,550, 500,500,
500,500, 550,500, 550,1200, 500,550, 450,550, 450,1250, 500,500, 600,400,
600,1200, 500,1200, 550,500, 550,450, 550,500, 500,550, 500,500, 500,500,
550,500, 550,450, 500,550, 500,1200, 550,450, 600,400, 600,450, 600,450,
550,1150, 600,450, 550,1200, 550,1200, 500,500, 550,500, 500,500,
550,450, 550,500, 550,500, 500,550, 450,550, 500,500, 500,550, 500,450,
```



```
550,500, 550,500, 500,500, 550,500, 550,450, 550,500, 500,500, 550,450,
550,500, 500,1200, 600,450, 550,450, 600,450, 500,500, 550,500, 500,500,
550,450, 550,500, 550,450, 600,1150, 550,500, 500,450, 600,450, 550,500,
550,500, 550,450, 550,1150, 550,1200, 550,500, 550,1200, 550,450,
550,1200, 500,550, 500};
```

Code : CC9FE5EA (32 bits)

Tecla 23 graus Celsius

```
unsigned int rawData[189] = {100,250, 100,500, 600,400, 150,300,
100,250, 150,1500, 200,100, 200,4000, 200,800, 200,950, 300,1600,
100,2000, 100,3350, 150,550, 100,250, 200,1300, 400,700, 300,2500,
250,1350, 250,1050, 150,3200, 250,950, 100,2300, 200,900, 200,900,
300,1500, 200,750, 250,1650, 200,150, 150,450, 250,1000, 300,700,
200,700, 100,1200, 150,1900, 100,750, 100,1100, 150,600, 200,1800,
450,750, 150,900, 300,1350, 200,900, 200,750, 300,1300, 500,3650,
50,1350, 450,600, 200,850, 300,850, 250,750, 100,800, 100,1150, 100,800,
300,600, 500,750, 200,1250, 500,1700, 100,900, 300,900, 150,2600,
150,1450, 350,1500, 250,750, 250,700, 250,900, 250,600, 300,900, 200,850,
150,1800, 150,900, 200,3750, 200,750, 300,900, 250,750, 300,850, 50,1700,
200,1000, 300,1400, 350,2850, 200,900, 100,1650, 350,700, 150,950,
350,450, 250,1750, 300,800, 100,1350, 200,200, 100,1650, 300,3650,
100,2500, 250,700, 150,4500, 150};
```

Code : 3FDF3EAA (32 bits) Tecla 22 graus Celsius

```
unsigned int rawData[227] = {3750,1450, 550,1200, 550,1150, 550,500,
550,500, 500,500, 550,1200, 550,450, 550,450, 550,1200, 550,1150,
600,500, 550,1150, 550,500, 500,500, 550,1200, 550,1200, 500,500,
550,1200, 550,1150, 550,500, 550,500, 500,1200, 500,550, 550,500,
500,1200, 550,500, 450,600, 450,550, 500,500, 550,500, 500,500, 500,500,
550,450, 550,500, 550,450, 600,450, 500,500, 600,500, 500,450, 550,500,
500,550, 500,550, 450,1200, 550,500, 500,550, 500,1200, 550,500, 500,500,
550,1200, 500,1200, 550,450, 600,500, 500,500, 500,550, 500,500, 500,500,
550,1200, 550,500, 500,500, 500,1200, 550,500, 550,500, 500,500, 500,500,
550,1250, 450,500, 550,1200, 550,1200, 550,450, 600,450, 550,500,
500,500, 550,450, 600,450, 550,450, 550,500, 500,500, 550,500, 550,450,
550,500, 550,450, 550,500, 500,500, 550,500, 500,450, 550,500, 550,500,
500,500, 550,1200, 550,450, 600,450, 550,450, 550,500, 500,550, 500,500,
550,450, 550,500, 550,450, 550,1200, 550,500, 500,1200, 550,450, 600,450,
```

```
500,550, 500,1200, 550,1200, 500,1250, 550,450, 550,500, 500,1200,  
550,1200, 500,500, 600};
```

Code : EF5E646D (32 bits) Tecla 24 graus Celsius

```
unsigned int rawData[241] = {300,100, 300,100, 100,100, 100,100,  
300,450, 200,350, 100,2600, 250,1400, 350,1400, 150,1950, 200,850,  
300,1550, 150,750, 150,2450, 250,1550, 350,900, 100,1400, 50,1050,  
300,750, 200,1300, 100,200, 200,1300, 500,600, 400,1300, 450,1600,  
100,550, 200,900, 350,1350, 450,650, 400,600, 400,1350, 400,550, 450,550,  
250,100, 150,550, 200,700, 300,900, 350,700, 350,650, 400,650, 350,750,  
250,750, 250,850, 250,550, 400,700, 400,600, 400,700, 300,750, 250,550,  
200,1550, 50,200, 250,1700, 350,1300, 450,650, 300,750, 250,1500,  
300,1300, 300,800, 400,600, 400,650, 400,700, 300,600, 450,700, 300,1550,  
250,1300, 400,1350, 300,650, 400,600, 400,550, 200,950, 300,750,  
350,1350, 400,650, 350,1350, 300,1550, 300,500, 150,150, 250,1600,  
450,650, 350,700, 350,600, 400,600, 350,550, 350,800, 350,650, 400,750,  
250,650, 400,700, 350,600, 350,600, 100,200, 200,750, 250,850, 150,750,  
250,600, 450,650, 450,1500, 200,550, 500,1500, 550,500, 500,550, 450,700,  
300,700, 300,650, 450,600, 400,1250, 500,550, 250,150, 50,1300, 450,600,  
450,600, 100,150, 200,600, 400,2250, 500,1250, 300,950, 100,750,  
400,1300, 450,1600, 100,700, 300};
```

Code : CE9F550A (32 bits) Tecla 25 graus Celsius

```
unsigned int rawData[227] = {3750,1450, 500,1200, 550,1200, 550,500,  
450,700, 350,500, 550,1250, 500,550, 450,500, 500,1350, 450,1200,  
500,500, 550,1200, 500,500, 550,500, 500,1300, 450,1400, 350,750,  
250,1250, 500,1250, 500,550, 350,600, 550,1250, 500,500, 450,550,  
500,1250, 500,500, 500,600, 450,550, 450,550, 450,650, 300,650, 500,500,  
500,500, 550,500, 550,600, 350,500, 550,500, 500,550, 500,550, 450,550,  
500,550, 450,500, 550,1250, 450,600, 450,650, 400,1250, 450,500, 550,500,  
500,1200, 550,1200, 500,550, 500,500, 500,550, 500,500, 500,550, 500,500,  
500,600, 450,1200, 600,1100, 550,550, 500,500, 500,550, 450,650, 400,450,  
600,1200, 500,500, 550,1200, 500,1250, 550,550, 450,500, 500,500,  
500,650, 350,550, 500,550, 500,500, 500,500, 550,450, 550,450, 500,600,  
500,500, 550,500, 500,550, 500,500, 500,550, 450,550, 500,500, 500,550,
```

```
500,550, 500,1200, 500,500, 500,550, 500,600, 400,600, 450,550, 450,550,  
500,550, 450,500, 550,500, 500,1250, 450,600, 450,1250, 500,700, 300,600,  
450,500, 500,550, 450,550, 500,1350, 400,600, 350,650, 450,1250,  
500,1250, 450,550, 500};
```

Code : DBF84655 (32 bits) Tecla 26 graus Celsius

```
unsigned int rawData[217] = {750,200, 200,150, 200,250, 350,650,  
350,1650, 100,1600, 350,1450, 350,600, 400,3550, 200,750, 350,2650,  
50,1300, 500,500, 150,200, 100,1450, 250,750, 100,950, 250,1650,  
150,1600, 100,2600, 150,1550, 100,750, 200,950, 150,1350, 200,850,  
200,100, 200,950, 50,2550, 200,550, 200,150, 150,800, 200,700, 150,2900,  
300,950, 150,900, 150,700, 250,750, 150,900, 300,850, 150,800, 150,800,  
100,950, 300,600, 400,1550, 150,600, 400,800, 250,2550, 200,950,  
100,3200, 150,1800, 400,750, 200,850, 200,900, 150,600, 300,1400,  
200,1000, 250,1650, 100,800, 250,2600, 200,900, 150,1400, 600,600,  
400,1400, 100,1750, 200,1650, 250,800, 400,550, 200,1100, 150,700,  
200,900, 300,900, 100,600, 400,900, 150,500, 200,250, 150,850, 100,650,  
400,700, 200,1800, 350,1750, 200,700, 50,100, 150,700, 200,1600, 150,900,  
300,850, 150,800, 300,600, 100,100, 200,600, 150,150, 150,1550, 500,700,  
100,950, 250,1500, 250,500, 550,1400, 200,650, 500,1650, 100,1750,  
250,1300, 350,700, 200,850, 400,700, 300,1500, 50,1550, 400,500, 250,200,  
150};
```

## Apêndice C

### Código do Wattímetro Implementado no Arduíno Mega

```
//Programa: Wattímetro com sensor ACS712

//int valor = 0;
String str;
int tamanho;

const int analogIn = A0;
int mVperAmp = 66;
int RawValue = 0;
int ACSoffset = 2500;
double Voltage = 0;
double Potencia = 0;
double Amps = 0;

int LABEL = 1; // número da linha onde vão ficar os titulos das colunas
int linha = 0; // número da linha em que começam as medições

void setup(void)
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Sensor de Corrente ACS712"); Serial.println("");
  Serial.println("");

  Serial.println("CLEARDATA"); //apaga a data que estiver no excell
  Serial.println("LABEL,Data,Hora,Voltage,Corrente,Potencia,linha");
  //cria os títulos das colunas
}

void loop(void)
{
  Calcula_corrente();
  //Chama a rotina de desenho na tela
  delay(150);
}

void Calcula_corrente()
```

```

{
  RawValue = analogRead(analogIn);
  Voltage = (RawValue / 1024.0) * 5000; // Gets you mV
  Amps = ((Voltage - ACSoffset) / mVperAmp);
  Potencia = Voltage * Amps;

  Serial.println("Voltagem V: ");
  Serial.println(Voltage);

  Serial.println("Corrente Amps: ");
  Serial.println(Amps);

  Serial.println("Potencia watts: ");
  Serial.println(Potencia);

  //Serial.print ("DATA, TIME, TIMER,"); // escreve o tempo na primeira
coluna A e o tempo desde que as medidas começaram na coluna B

  linha++; //incremento do número de linhas

  Serial.print ("DATA, DATE, TIME,"); // escreve o tempo na primeira
coluna A e o tempo desde que as medidas começaram na coluna B
  Serial.print(Voltage); //imprime a umidade na coluna respectva
  Serial.print(",");
  Serial.print(Amps); //imprime a umidade na coluna respectva
  Serial.print(",");
  Serial.print(Potencia); //imprime a umidade na coluna respectva
  Serial.print(",");
  Serial.println(linha); //imprime o número de medições na coluna
respectva

  //Serial.print("DATA,"); //dá instruções para imprimir a informação
  //Serial.print("DATE"); //imprime a data da coluna respectiva
  //Serial.print("TIME"); //imprime a hora na coluna respectva
  //Serial.println(Amps); //imprime a umidade na coluna respectva
  //Serial.println(linha); //imprime o número de medições na coluna
respectva

  if (linha > 60) { //ao chegar a 60 linhas
    linha = 0; //inicia na linha 0 outra vez
    Serial.println("ROW,SET,2");
  }
}

```

```
    delay(2000);  
  }  
  delay(1000); //aguardar 10 segundos para fazer nova leitura  
  //Serial.print (Adata);  
  //Serial.print (Bdata);  
  
  delay(2000);  
}
```

# Apêndice D

## Algoritmo do Controlador *Fuzzy* Extraído do MatLab

### R2014

```
[System]
Name='Controlador_Fuzzy_Ar_Cond'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=3
NumOutputs=2
NumRules=42
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'

[Input1]
Name='Tref'
Range=[16 35]
NumMFs=4
MF1='Frio':'trapmf',[11.8 12.7 19.1 22]
MF2='Confort':'trimf',[21 24 26]
MF3='Quente':'trimf',[25 27 29]
MF4='Muito_Quente':'trapmf',[28 30 36.9 37.3]

[Input2]
Name='Erro'
Range=[-15 15]
NumMFs=5
MF1='MN':'trapmf],[-15.4 -15.4 -10 -7]
MF2='N':'trimf],[-8 -5 0]
MF3='Z':'trimf],[-3 0 3]
MF4='P':'trimf',[0 4 8]
MF5='MP':'trapmf',[6 9 35 40]

[Input3]
Name='Umid'
Range=[15 100]
NumMFs=3
MF1='Baixa':'trapmf',[0 0 30 33]
MF2='Media':'trapmf',[33 40 50 62]
MF3='Alta':'trapmf',[62 70 100 100]

[Output1]
Name='AjusteVent'
Range=[0 1]
NumMFs=4
MF1='Z':'trapmf',[0 0 0.1 0.2]
MF2='VB':'trapmf',[0.1 0.2 0.3 0.4]
MF3='VM':'trapmf',[0.3 0.4 0.6 0.7]
MF4='VA':'trapmf',[0.6 0.7 1 1]

[Output2]
Name='AjusteAr'
Range=[0 1]
```

```
NumMFs=2
MF1='OFF': 'trimf', [0 0 0]
MF2='ON': 'trimf', [1 1 1]
```

```
[Rules]
1 1 3, 1 2 (1) : 1
1 2 3, 1 2 (1) : 1
1 2 3, 1 2 (1) : 1
1 2 2, 4 2 (1) : 1
1 1 2, 2 1 (1) : 1
1 1 2, 3 1 (1) : 1
1 2 2, 3 1 (1) : 1
1 3 2, 1 1 (1) : 1
2 1 3, 1 0 (1) : 1
2 2 3, 1 2 (1) : 1
2 2 2, 4 1 (1) : 1
2 2 2, 4 2 (1) : 1
2 3 3, 1 2 (1) : 1
2 3 2, 1 2 (1) : 1
2 4 2, 1 2 (1) : 1
2 4 2, 1 1 (1) : 1
2 4 2, 2 1 (1) : 1
2 2 2, 3 1 (1) : 1
2 2 2, 4 1 (1) : 1
2 2 2, 4 2 (1) : 1
3 1 3, 1 2 (1) : 1
3 2 3, 1 2 (1) : 1
3 3 3, 1 2 (1) : 1
3 3 3, 1 2 (1) : 1
3 4 3, 1 2 (1) : 1
3 4 2, 4 2 (1) : 1
3 4 2, 1 2 (1) : 1
3 5 2, 1 1 (1) : 1
3 5 1, 1 1 (1) : 1
4 1 3, 1 2 (1) : 1
4 2 3, 1 2 (1) : 1
4 3 3, 1 2 (1) : 1
4 4 3, 1 2 (1) : 1
4 4 2, 4 2 (1) : 1
4 4 2, 1 2 (1) : 1
4 5 2, 2 1 (1) : 1
4 4 2, 3 1 (1) : 1
4 4 2, 4 1 (1) : 1
4 4 2, 4 2 (1) : 1
4 5 1, 1 1 (1) : 1
4 5 1, 1 2 (1) : 1
4 5 2, 1 2 (1) : 1
```