

**DAS** Departamento de Automação e Sistemas  
**CTC** **Centro Tecnológico**  
**UFSC** Universidade Federal de Santa Catarina

# **Controle da Temperatura e Vazão de um Chuveiro Usando Lógica Fuzzy**

*Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina  
como requisito para a aprovação da disciplina:*

***DAS 5501: Estágio em Controle e Automação Industrial***

***Lauro Antônio Drehmer Pilatti***

*Florianópolis, agosto de 2012*

# **Controle da Temperatura e Vazão de um Chuveiro Usando Lógica Fuzzy**

***Lauro Antônio Drehmer Pilatti***

**Orientadores:**

***Líbni da Silva, Eng. Eletricista***

---

Assinatura do Orientador

***Prof. Júlio Elias Normey-Rico***

---

Assinatura do Orientador

Este relatório foi julgado no contexto da disciplina  
**DAS 5501: Estágio e Controle e Automação Industrial**  
e aprovado na sua forma final pelo  
**Curso de Engenharia de Controle e Automação**

# AGRADECIMENTOS

Dedico meus sinceros agradecimentos para:

- Os meus pais Elice e José por sempre me guiarem por caminhos corretos, mesmo quando não foi possível percorrê-los comigo. Sem vocês nada disso seria possível.
- O professor Júlio por me acolher sob sua valorosa orientação, compartilhando seus conhecimentos na área de controle que decididamente foram importantes para minha trajetória.
- O engenheiro Líbni, pela orientação dentro da Thermosystem e por sua dedicação em transmitir seu conhecimento na área de eletrônica,
- O diretor industrial Francimar, por dar a oportunidade de realizar esse trabalho em sua empresa.
- Os meus colegas de trabalho, em especial para André, Lucas, Kaio, Gabriel e Carlaine, pela amizade e acolhimento dentro da empresa.

## RESUMO

Este trabalho propõe um sistema de controle para a temperatura e vazão de banho de um chuveiro elétrico. O local em que ele foi realizado é a empresa Thermosystem, localizada na cidade de Tubarão, Santa Catarina.

A estratégia usada para tal objetivo foi uma técnica de controle moderno, a lógica fuzzy. Esse tipo de controle já foi implementado com sucesso em sistemas não lineares e multivariáveis, como é o caso desse trabalho. Ele baseia-se em um conjunto de regras do tipo SE <condição> ENTÃO <ação>. O modelo de inferência utilizado foi o proposto por Takagi-Sugeno.

O chuveiro a ser controlado possui, além da entrada de água tradicional da rede hidráulica, uma segunda entrada de água, proveniente de um sistema de aquecimento auxiliar de energia solar. O grande desafio do projeto é então fazer com que essa mistura de águas, que possuem temperaturas e pressões diferentes, atinja a temperatura e vazão desejadas pelo usuário.

Para o controle da entrada de água o sistema possui duas servoválvulas e para o aquecimento da água possui uma resistência elétrica como nos chuveiros tradicionais. A lógica de controle é implementada em um microcontrolador de oito bits.

Os resultados obtidos são apresentados de forma gráfica, os quais permitem avaliar o desempenho do controlador projetado.

# ABSTRACT

This work proposes a control system for temperature and flow of an electric shower bath. The place where it was done is Thermosystem company, located in Tubarão, Santa Catarina.

The strategy used for this purpose was a modern control techniques, the fuzzy logic. This type of control has been successfully implemented in nonlinear and multivariable systems, such as this work. It is based on a set of rules such as IF <condition> THEN <action>. The inference model used was proposed by Takagi-Sugeno.

The shower of this project has, besides the traditional water inlet supply line, a second input of water from an auxiliary heating system of solar energy. The principal challenge of this project is to make this mixture of water, which have different temperatures and pressures, reaches the temperature and flow desired by the user.

To control the water intake, the system has two servo valves and to control the water heating, the system has an electrical resistance as in traditional showers. The control logic is implemented in an eight-bit microcontroller.

The results are presented in graphical form, which allow to evaluate the performance of the controller designed.

# SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	3
RESUMO .....	4
ABSTRACT .....	5
SUMÁRIO.....	6
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	11
1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1: Apresentação.....	12
1.2: Objetivo .....	13
1.3: Motivação.....	13
1.4: Organização do Trabalho.....	14
2. A EMPRESA E OS SISTEMAS TRADICIONAIS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA.....	15
2.1: A Thermosystem .....	15
2.2: Funcionamento de um Chuveiro Elétrico .....	16
2.2.1: Componentes básicos de um chuveiro elétrico .....	17
2.3: Considerações Finais.....	20
3. O SISTEMA PROPOSTO .....	22
3.1: Objetivos de controle e condições de operação .....	23
3.2: Desenvolvimento do Hardware .....	26
3.2.1: Módulo de disparo do TRIAC .....	26
3.2.2: Fonte de Tensão .....	31

3.2.3: Módulo IR .....	32
3.2.4: Servomotores .....	33
3.2.5: Sensores .....	35
3.2.6: Placa de Desenvolvimento Discovery STML-8.....	39
3.2.7: Esquema eletrônico.....	40
3.2.8: Protótipo completo.....	41
3.3: Desenvolvimento do Software.....	43
3.4: Aquisição de dados.....	44
3.5: Considerações Finais.....	45
4. FUNDAMENTOS DA LÓGICA FUZZY .....	46
4.1: Teoria de Conjuntos Fuzzy .....	47
4.1.1: Conjuntos Fuzzy.....	47
4.1.2: Variáveis Linguísticas.....	49
4.1.3: Operações com conjuntos Fuzzy .....	51
4.2: Estrutura do Controlador Fuzzy .....	53
4.2.1: Fuzzificação das Variáveis de entrada .....	54
4.2.2: Base de Regras Fuzzy .....	54
4.2.3: Máquina de Inferência .....	55
4.3: Considerações Finais.....	58
5. PROJETO DO CONTROLADOR.....	60
5.1: Parâmetros do projeto.....	61
5.1.1: Conjuntos Fuzzy para o Erro da Temperatura de banho.....	62
5.1.2: Conjuntos Fuzzy para o Erro da Vazão de Banho.....	62
5.1.3: A Variação do Erro da Temperatura.....	63
5.1.4: Conjunto Fuzzy para a abertura dos registros.....	65
5.1.5: Conjunto Fuzzy para o acionamento da resistência elétrica ..	65

5.1.6: Base de Regras.....	66
5.1.7: Inferência.....	68
5.2: Funcionamento do controle: Um exemplo.....	68
5.3: Considerações Finais.....	76
6. RESULTADOS .....	77
6.1: Situação 1 .....	79
6.2: Situação 2 .....	80
6.3: Situação 3 .....	82
6.4: Situação 4 .....	83
6.5: Considerações Gerais.....	84
7. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....	86
BIBLIOGRAFIA.....	87



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - A Thermosystem .....	15
Figura 2 – Diafragma.....	18
Figura 3 - Câmara Quente .....	19
Figura 4 - Resistência Elétrica.....	19
Figura 5 - Espalhador .....	20
Figura 6 - Controle manual dos registros .....	21
Figura 7 - Esquema do Sistema Proposto.....	22
Figura 8 - Símbolo do Triac.....	26
Figura 9 - Disparo do Triac.....	27
Figura 10 - Esquema elétrico do Optoacoplador .....	28
Figura 11 - Sinais do Optoacoplador .....	29
Figura 12 - Esquema elétrico do MOC3021 .....	29
Figura 13 - Triac usado do protótipo .....	30
Figura 14 - Fonte de Tensão.....	31
Figura 15 - Receptor Infravermelho.....	32
Figura 16 - Transmissor .....	33
Figura 17 – Servomotor.....	33
Figura 18 - Funcionamento do Servomotor .....	35
Figura 19 - Sensor de Temperatura LM35 .....	36
Figura 20 - Sensor de Pressão.....	37
Figura 21 - Funcionamento do Sensor de Pressão .....	37
Figura 22 - Gráfico Pressão X Vazão .....	38
Figura 23 - Placa de Desenvolvimento Discovery STM8L .....	39
Figura 24 - Esquema Eletrônico .....	41
Figura 25 - Protótipo Completo ângulo 1 .....	42
Figura 26 - Protótipo Completo ângulo 2.....	42
Figura 27 - Protótipo completo ângulo 3 .....	43
Figura 28 - Interface do STVD.....	43
Figura 29 - Interface do STMStudio .....	44

Figura 30 - Funções de Pertinência .....	48
Figura 31 - Variáveis Linguísticas .....	49
Figura 32 - Conjunto Fuzzy A.....	51
Figura 33 - Conjunto Fuzzy B.....	51
Figura 34 - Operação União .....	52
Figura 35 - Operação Interseção.....	53
Figura 36 - Estrutura do Controlador Fuzzy .....	54
Figura 37 - Inferência Fuzzy.....	57
Figura 38 - Composição das Regras.....	57
Figura 39 - Saída Fuzzy .....	58
Figura 40 - Diagrama de Blocos do Sistema .....	60
Figura 41 - Conjuntos Fuzzy para o Erro da Temperatura .....	62
Figura 42 - Conjuntos Fuzzy para o Erro da Vazão .....	63
Figura 43 - Variação do Erro da Temperatura.....	63
Figura 44 - Matriz de Regras.....	67
Figura 45 – Valores das Variáveis do Sistema.....	69
Figura 46 - Graus de Pertinência para o Erro da Temperatura .....	70
Figura 47 - Graus de Pertinência para o Erro da Vazão .....	70
Figura 48 - Regras ativadas - exemplo .....	72
Figura 49 - Mecanismo de Inferência do exemplo.....	74
Figura 50 - Resposta em Malha Aberta variando a Potência .....	77
Figura 51 - Análise da Resposta em Malha Aberta variando a Potência .....	78
Figura 52 - Resposta em Malha Aberta variando a abertura dos Registros... ..	78
Figura 53 - Análise da Resposta em Malha Aberta para os Registros .....	79
Figura 54 - Resposta do Sistema para Cenário 1 .....	80
Figura 55 - Resposta do Sistema para Cenário 2 .....	81
Figura 56 - Resposta do Sistema para Cenário 3 .....	82
Figura 57 - Resposta do Sistema para Cenário 4 .....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação Pressão X Vazão.....	38
Tabela 2 - Portas utilizadas na Placa .....	40
Tabela 3 - Variáveis do Sistema.....	61
Tabela 4 - Conjuntos Fuzzy para Abertura dos Registros .....	65
Tabela 5 - Conjuntos Fuzzy para Potência Elétrica.....	66
Tabela 6 - Saídas do controlador .....	67
Tabela 7 - Grau de Pertinência das Regras Ativadas.....	75

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1: Apresentação

O atual mercado nacional de chuveiros elétricos encontra-se bastante aquecido e a variedade de produtos existentes é grande. Aspectos como conforto no banho e baixo consumo de energia elétrica podem ser considerados os principais a serem levados em consideração quando uma pessoa compra um chuveiro.

Devido ao apelo ecológico e também pelo fator econômico, é cada vez maior o uso de sistemas auxiliares de aquecimento, como o solar e o a gás.

É exatamente nesse cenário que surgiu a ideia da empresa em projetar um chuveiro no qual o usuário escolherá a vazão e temperatura desejada através de um controle remoto.

Esse modelo contará com uma fonte auxiliar de água quente, ou seja, teremos duas entradas de água no chuveiro. O principal desafio é desenvolver um sistema que misture essas águas que vêm com temperaturas e pressões diferentes para atingir as condições desejadas para o banho.

Um dos maiores problemas encontrados nesses chuveiros com duas fontes de água é o tempo que se perde para o ajuste de temperatura, desperdiçando assim uma grande quantidade de água. Esse desperdício ocorre, sobretudo ao fato de que quando é aberto o registro de água quente do chuveiro, certo tempo é levado até que toda a água fria presente na tubulação seja eliminada até que comece chegar a água quente presente no boiler. Tendo em vista esse detalhe, um pré-aquecimento da água com a resistência do chuveiro será necessário.

Como teremos mais de uma variável a ser controlada (temperatura e vazão) e mais de uma variável de atuação (abertura dos registros de água fria/quente e resistência do chuveiro), trata-se de um sistema multivariável. A

partir do modelo matemático do processo observa-se também que é um sistema não linear.

Vários sistemas de controle são empregados hoje nas indústrias e estudados em meios acadêmicos. Os mais comuns são: controle ON/OFF, controle proporcional (P), controle proporcional derivativo (PD), controle proporcional integrativo (PI) e o mais utilizado hoje em dia, que é a junção dos três anteriores, o controle proporcional integrativo e derivativo (PID). Entretanto estes controladores clássicos possuem seu emprego quase que limitado ao controle de sistemas SISO (*Single Input Single Output*) e lineares.

Baseado na pesquisa de trabalhos anteriores, verificou-se que a lógica fuzzy já foi implementada com sucesso em sistemas multivariáveis e não lineares. Outra grande vantagem do controle fuzzy é o fato dele ser facilmente implementado em um microcontrolador de baixo custo, que será utilizado no projeto por determinação da empresa. Tendo isso em vista, o controle fuzzy foi a estratégia adotada para solucionar o problema.

## **1.2: Objetivo**

Este trabalho tem como objetivo principal projetar e implementar um controlador fuzzy para a temperatura e a vazão da água de um chuveiro elétrico que conta com sistema auxiliar de aquecimento (energia solar).

## **1.3: Motivação**

As principais motivações para a realização desse trabalho são as seguintes:

- Englobar vários assuntos relevantes estudados ao longo de todo o curso, como microcontroladores, processos multivariáveis e inteligência artificial;

- Projetar um produto inovador no atual mercado nacional de chuveiros elétricos;
- Otimizar o uso de água e da energia elétrica do chuveiro, minimizando assim seus desperdícios;

## **1.4: Organização do Trabalho**

A estrutura desse trabalho é organizada da seguinte forma:

No capítulo 2 será apresentada a empresa onde foi realizado esse projeto e também explicado os princípios básicos de funcionamento de um chuveiro elétrico.

No capítulo 3 será detalhado o sistema proposto no trabalho. Esse detalhamento engloba aspectos como objetivos e especificações de controle, sensores e atuadores utilizados, e também será apresentado o protótipo em que foram realizados os experimentos.

No capítulo 4 será apresentada uma visão geral da lógica fuzzy e seus conceitos básicos, bem como a estrutura e o funcionamento de um controlador que trabalha com esse princípio.

No capítulo 5 será apresentada a metodologia e os parâmetros usados para projetar o controlador.

No capítulo 6 serão apresentados e analisados, através de diversos cenários típicos de um banho, os resultados de experimentos realizados em uma bancada de testes.

## 2. A EMPRESA E OS SISTEMAS TRADICIONAIS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA

### 2.1: A Thermosystem

A empresa onde foi desenvolvido esse projeto é a Thermosystem Indústria Eletro Eletrônica, localizada na cidade de Tubarão-SC.

Ela se destaca principalmente pelo fato de ser a pioneira no ramo de duchas eletrônicas.



*Figura 1 - A Thermosystem*

A história da Thermosystem teve início em 1990, quando o engenheiro eletricitista Francimar Ghizoni Pereira, hoje diretor industrial da empresa, construiu e instalou no banheiro de sua casa um protótipo de regulador

eletrônico. Com o aparelho, bastava girar um botão para controlar com precisão a temperatura da água.

A empresa conta com um mix variado de produtos para controlar a temperatura da água, que inclui duchas multitemperaturas, eletrônicas e digitais, além de aquecedores solares, bebedouros e purificadores eletrônicos de água e uma torneira eletrônica.

Além de ter sido a primeira empresa do Brasil a disponibilizar uma ducha eletrônica, foi também a primeira a lançar uma ducha com oito regulagens de temperatura, a primeira a lançar uma ducha digital totalmente operada por controle remoto e lançou a primeira torneira eletrônica do país.

Atualmente sua produção de chuveiros elétricos/eletrônicos a coloca entre as três maiores fabricantes do setor no país. Em épocas de maior produção, durante o inverno, chega a produzir cerca de 150.000 chuveiros por mês. O número de colaboradores na empresa é no momento em torno de 700.

## **2.2: Funcionamento de um Chuveiro Elétrico**

Embora existam diversos modelos de chuveiros elétricos no mercado nacional, todos eles possuem um princípio de funcionamento e alguns componentes em comum.

No momento em que você abre o registro para que a água comece a sair pelo chuveiro, o diafragma, que é uma peça que funciona como uma mola, empurra e fecha os contatos que fornecem a energia proveniente da rede elétrica para a resistência do chuveiro. Esse mecanismo impede que a resistência seja ligada sem água passando pelo chuveiro e consequentemente que ela queime. Ele também deve ser bem calibrado para que os contatos permaneçam estabelecidos mesmo com uma vazão baixa. Isso geralmente ocorre em invernos mais rigorosos, quando para atingir a temperatura da água desejada o usuário é obrigado a limitar bastante a vazão de água. Esse é um detalhe importante e no manual do chuveiro é



especificado o mínimo de pressão (em m.c.a) para que o contato seja estabelecido.

A resistência, que é o componente que transforma energia elétrica em calor através do efeito joule, é localizada dentro do que chamamos de câmara quente. Como a água que nos molha no banho tem uma vazão menor do que a água que sai do cano, parte da água acumula-se nessa câmara e ali ela é aquecida antes de sair.

A potência dissipada pela resistência é determinada pela fórmula (1) e a energia é a integral de (1). O controle dessa energia que é entregue a carga determina a temperatura da água e para esse controle utiliza-se um TRIAC BTA41. Esse componente é utilizado somente nas duchas eletrônicas, onde temos um controle linear da temperatura. Nas duchas mais antigas costumamos ter posições de temperatura, e isso é feito através de uma chave seletora que associa várias resistências ou que delimita certo comprimento da resistência que será acionada. Mais detalhes de como funciona o controle eletrônico da temperatura serão explicados nos capítulos seguintes.

$$P = V^2 / R = I^2 \cdot R \quad (1)$$

A água então aquecida sai pelo chuveiro através do espalhador, que é a peça que contém os inúmeros orifícios que fazem com que a água saia da forma que conhecemos.

### **2.2.1: Componentes básicos de um chuveiro elétrico**

Os componentes principais de um chuveiro elétrico são o diafragma, a câmara quente, a resistência elétrica e o espalhador.

Temos também componentes adicionais, que não entraremos em detalhes, como o pressurizador, utilizado para aumentar a pressão de água

em locais onde ela é baixa, e o redutor de pressão, que serve para reduzir a pressão de entrada de água no chuveiro onde ela é elevada.

### **2.2.1.1: Diafragma**

No momento que o registro é aberto, a câmara quente enche de água fazendo com que a pressão aumente. O diafragma, que é uma chave que responde a pressão, fecha os contatos fazendo com que a corrente elétrica circule. Já no momento em que o registro é fechado, a pressão interna da câmara quente é reduzida e o diafragma abre os contatos, cortando assim a alimentação para a resistência. Na Figura 2 temos a foto do diafragma utilizado.



*Figura 2 – Diafragma*

### **2.2.1.2: Câmara quente**

A câmara quente é como se fosse uma caixa d'água onde fica submersa a resistência elétrica. Tem basicamente duas funções: acionar o diafragma por pressão e armazenar a água para a troca de calor entre a água fria e a resistência. Na Figura 3 pode ser observada uma câmara quente.



*Figura 3 - Câmara Quente*

### **2.2.1.3: Resistência elétrica**

A resistência elétrica é um fio de metal enrolado por onde circula a corrente elétrica. Essa resistência fica dentro da câmara quente do chuveiro e é a responsável por aquecer a água.

A resistência utilizada pode ser observada na Figura 4.



*Figura 4 - Resistência Elétrica*

### **2.2.1.4: Espalhador**

O espalhador é a parte geralmente circular e possui pequenos orifícios que são responsáveis por limitar a vazão da água, fazendo com que o

diafragma suba e também proporciona uma sensação agradável ao banho. O modelo de espalhador utilizado no projeto pode ser observado na Figura 5.



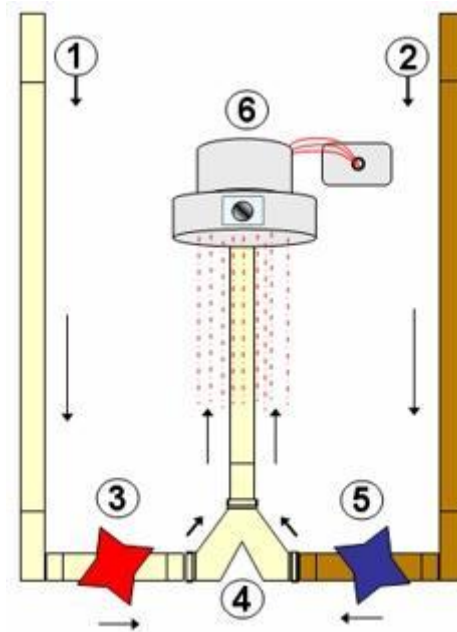
*Figura 5 - Espalhador*

### **2.3: Considerações Finais**

Neste capítulo foi apresentada a empresa onde foi realizado esse trabalho e também os componentes básicos de um chuveiro.

O diafragma, a câmara quente, a resistência elétrica e o espalhador estão, portanto, presentes em todos os chuveiros elétricos existentes. Entretanto, para o objetivo desse trabalho, somente esses componentes não seriam suficientes. Isso porque precisamos encontrar alguma maneira para medir a temperatura e a vazão da água e também alguma maneira de controlar, de forma precisa, a entrada de água e a potência elétrica dissipada pelo sistema.

Outro ponto importante é que, nos atuais chuveiros com sistemas auxiliares de aquecimento, o controle da temperatura é feito manualmente abrindo e fechando os registros de água quente e de água fria, conforme apresentado na Figura 6, onde os registros são representados pelas legendas 3 e 5. O tempo necessário para fazer esse ajuste implica em um grande desperdício de água.



*Figura 6 - Controle manual dos registros*

Para que o usuário não perca esse tempo, os registros permanecerão sempre abertos e o é o próprio chuveiro que controlará a quantidade de água que entrará de cada tubulação.

No próximo capítulo será detalhado cada componente do sistema e como foi feito o projeto completo.

### 3. O SISTEMA PROPOSTO

Visando contornar os problemas citados no capítulo anterior e atingir o objetivo principal citado na seção 1.2., foi proposto um esquema para o sistema, que pode ser visualizado na Figura 7.

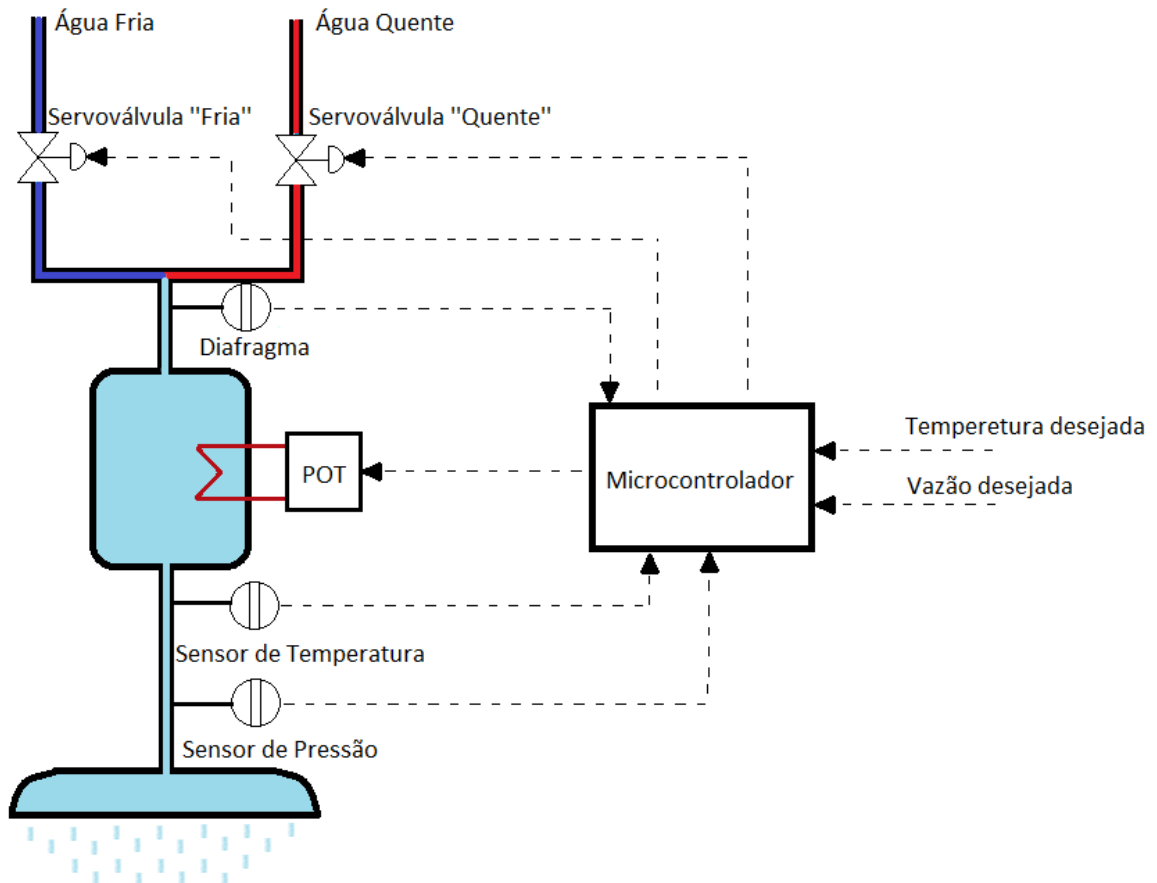


Figura 7 - Esquema do Sistema Proposto

O primeiro passo executado pelo microcontrolador é a leitura da temperatura e da vazão desejada pelo usuário. Isso será feito através de um controle remoto.

Os sensores de pressão e de temperatura medirão então os valores atuais de vazão e de temperatura da água de saída. O usuário evidentemente

pode alterar os valores desejados durante o banho, ou seja, o microcontrolador ficará o tempo todo à espera de um sinal vindo do controle remoto para as devidas alterações. Com esses dados (temperatura desejada, temperatura medida, vazão desejada e vazão medida), o microcontrolador terá que ser capaz de levar o sistema a atingir os valores desejados pelo usuário.

Para controlar a vazão, podemos atuar somente nas servoválvulas. Isso significa que se a vazão lida pelo sensor está abaixo da desejada o controle terá que abrir os registros e se estiver acima terá que fechá-los.

O controle da temperatura é mais complexo, pois posso atuar tanto nas servoválvulas, para que a água quente se misture com a água fria e atinja a temperatura desejada, como também posso atuar na potência dissipada pela resistência elétrica para aquecer a água.

O fato de o sistema possuir mais de uma variável de controle (temperatura e vazão) e mais de uma variável manipulada (servoválvulas e resistência elétrica) faz dele um sistema multivariável, que é chamado na literatura de MIMO (Multiple Input, Multiple Output).

O diafragma presente no esquema, que foi mostrado na Figura 2, tem a função de informar ao microcontrolador que ele pode acionar a resistência, pois nesse caso a câmara quente está cheia de água. Esse sistema é um pouco diferente do tradicional, pois temos um microcontrolador para acionar a resistência. Ele funciona basicamente como uma chave, que fecha os contatos quando uma pressão de água suficiente passa pela tubulação e então envia um sinal de 5V ao microcontrolador.

### **3.1: Objetivos de controle e condições de operação**

A definição dos objetivos de controle é um procedimento muito importante, pois são eles que serão avaliados nos resultados finais. Os critérios estabelecidos são explicados a seguir:

- O controle da temperatura terá prioridade sobre o controle da vazão. A justificativa para isso é que normalmente a temperatura da água é a prioridade quando alguém toma banho.
- Uma tolerância de erro de 1°C na temperatura e de 0.3 l/min na vazão serão aceitáveis.
- Período de amostragem de 2 segundos.
- Respostas transitórias sem oscilação com o menor tempo de resposta possível.

O principal desafio do projeto é conciliar o conforto do banho com a economia de energia elétrica. A economia está diretamente relacionada com o uso otimizado da resistência elétrica, ou seja, acioná-la somente quando necessário. Algumas considerações foram feitas visando esse objetivo:

- A entrada de água fria será utilizada somente em duas situações:
  - Quando desejo aumentar a vazão de água e o registro de água quente estiver totalmente aberto. Isso significa que a vazão máxima da entrada de água quente é inferior à desejada pelo usuário.
  - Quando a temperatura da água estiver acima da desejada e a potência for igual à zero. Isso significa que a temperatura da água proveniente do aquecedor solar é superior à desejada pelo usuário e a única maneira de esfriá-la é abrindo o registro de água fria.
- Para o caso que seja necessário aquecer a água, a potência elétrica somente será acionada se o registro de água quente estiver pelo menos um valor  $V_{\min}$  aberto ou o registro de água fria estiver no máximo um valor  $V_{\max}$  aberto. Com isso, é evitado o desperdício de energia elétrica, pois o sistema tentará ajustar a temperatura primeiramente com a mistura de água quente e fria.
- Para o caso que seja necessário esfriar a água, o sistema primeiramente diminuirá a potência elétrica e, somente quando



ela for igual a um valor  $P_{\max}$  ou menos, o controle atuará nos registros para atingir a temperatura desejada. Assim como no caso acima, esse procedimento proporciona a economia de energia elétrica.

É importante salientar que o sistema não conseguirá atingir qualquer valor de temperatura e de vazão, devido às limitações naturais do próprio processo. Para contornar situações desse tipo, foram adotadas algumas estratégias:

- Caso o sistema esteja com a potência máxima, o registro de água quente esteja aberto totalmente por mais de um tempo  $T_{\min}$  e a temperatura medida seja menor que a desejada, a vazão desejada será decrementada em um valor  $V_{\text{dec}}$ . Com isso, o registro de água fria fechará um pouco e, com menos água passando pela câmara quente, o sistema deverá atingir a temperatura desejada. Esse procedimento será feito até alcançar esse objetivo. Nos chuveiros tradicionais, isso é feito manualmente pelo usuário, que muitas vezes controla a temperatura variando a abertura do registro.
- A temperatura mínima para o banho é, evidentemente, a temperatura da entrada de água fria, pois o sistema poderá somente aquecer essa água e não esfria-la.
- A vazão máxima para o banho depende unicamente da pressão da rede hidráulica.
- A vazão mínima será a aquela que possua pressão suficiente para acionar o diafragma e conseqüentemente fechar os contatos para que a potência seja acionada.

Todas essas considerações e estratégias trabalharam em conjunto com o controlador fuzzy que será apresentado no Capítulo 5.

## 3.2: Desenvolvimento do Hardware

Nessa seção será especificado e detalhado o funcionamento de cada componente presente no sistema.

### 3.2.1: Módulo de disparo do TRIAC

O TRIAC é um dispositivo que pode conduzir a corrente elétrica nos dois sentidos e atualmente é largamente utilizado quando se deseja controlar a potência aplicada a uma carga CA. Ele também está presente em todas as duchas eletrônicas do mercado nacional.

Ele é composto pelos terminais MT1, MT2 e Gate, que podem ser visualizados na Figura 8.

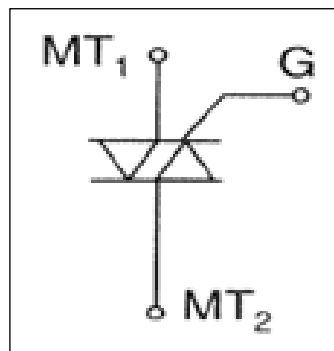


Figura 8 - Símbolo do Triac

O princípio de funcionamento do TRIAC é demonstrado na Figura 9 e ocorre da seguinte forma:

Ele pode ser disparado tanto com um sinal negativo entre o Gate e MT1 se MT2 for negativo, e também pode ser disparado se MT2 for positivo e um sinal positivo entre o G e MT1 for aplicado. No módulo de controle do TRIAC é necessário isolamento, uso de um comparador que faz a detecção do cruzamento por zero, e também o aumento do nível da corrente do pulso para o Gate do TRIAC. Isso é feito com o uso de optoacopladores.

O tipo de controle utilizado é o de onda completa ou bidirecional, onde o que se controla é o ângulo da fase. O ângulo de disparo é mudado variando-se o ângulo de disparo do TRIAC com T1 para o semiciclo positivo e T2 para o semiciclo negativo. É importante ressaltar que T1 e T2 estão defasados em  $180^\circ$ .

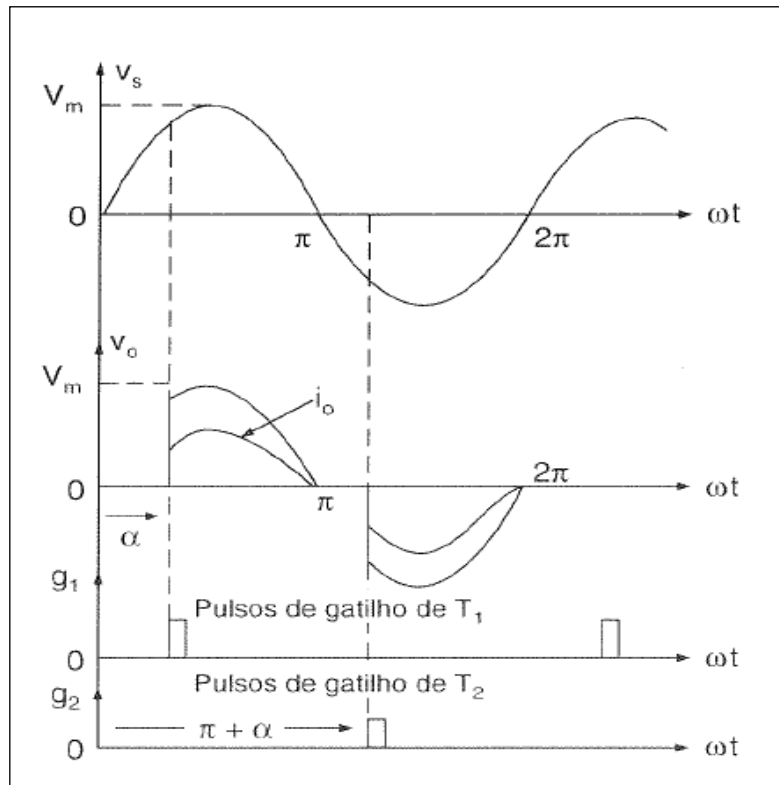


Figura 9 - Disparo do Triac

Na Figura 9 podemos observar o conceito de controle de onda completa. Temos primeiro a senoide inteira da rede elétrica com seu período variando de  $0$  a  $2\pi$ . Logo abaixo temos a corrente elétrica que é efetivamente entregue a carga após o disparo do gatilho T1 no ângulo  $\alpha$  e o do gatilho T2 no ângulo  $\alpha + \pi$ , chaveando assim o semiciclo positivo e negativo.

### 3.2.1.1: Optoacoplador 4N25

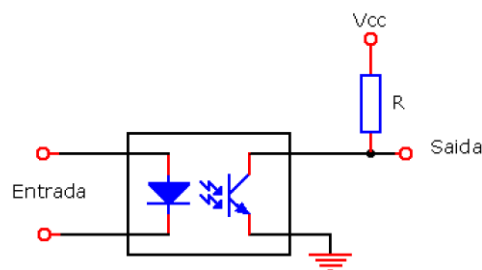
Os optoacopladores 4N25 fornecem um isolamento e são constituídos de um diodo emissor de luz infravermelho e um foto transistor de silício NPN.

A função dele é ser um zero cross, ou seja, determinar a passagem do semiciclo por zero. O seu sinal de saída é alto quando o semiciclo é positivo e baixo quando o semiciclo é negativo.

Essa característica é de extrema importância para realizar o sincronismo com a rede elétrica para que não ocorram disparos aleatórios do TRIAC. Seu sinal de saída é a referência para manter o sincronismo do pulso toda vez que a tensão da rede passa por zero volt.

O pino 1 do opto acoplador 4N25 é um diodo emissor de luz que recebe o sinal alternado e envia um sinal luminoso para o gate do foto transistor. Esse gate é então chaveado e o sinal de zero-crossing é enviado para o microcontrolador.

O esquema elétrico do optoacoplador pode ser visualizado na Figura 10.



*Figura 10 - Esquema elétrico do Optoacoplador*

Na Figura 11, observamos o sinal de entrada no optoacoplador, que é a tensão alternada de 220V da rede elétrica, e o sinal de saída, que é o trem de pulsos do zero-cross enviados ao microcontrolador.

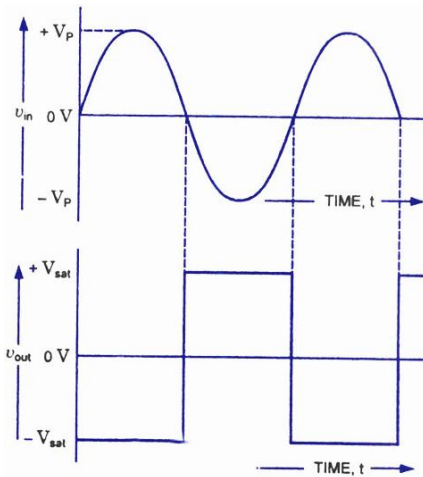


Figura 11 - Sinais do Optoacoplador

### 3.2.1.2: MOC 3021

O sinal proveniente do microcontrolador possui uma corrente muito baixa para disparar o TRIAC. Para aumentá-lo foi usado outro tipo de optoacoplador, o MOC3021, que está presente em circuitos de corrente alternada, como no controle de motores e dimmers. Além dessa função, ele também realiza o isolamento do circuito de alta tensão do circuito microcontrolado.

Assim como o 4N25, seu funcionamento também é através de um diodo emissor de luz.

O esquema de seu funcionamento é mostrado na Figura 12.

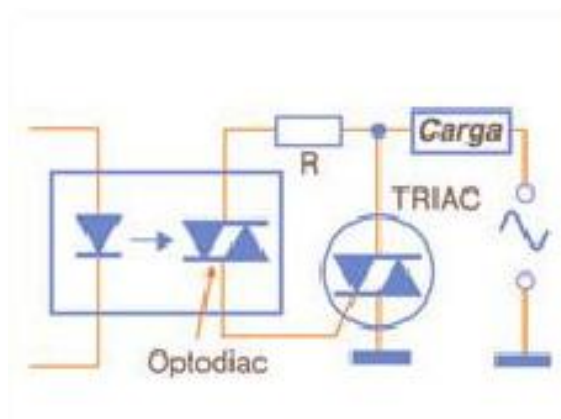


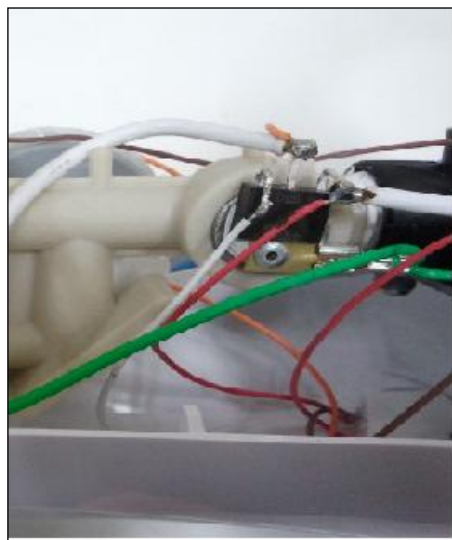
Figura 12 - Esquema elétrico do MOC3021

No caso desse projeto, a carga é a resistência elétrica do chuveiro e o sinal de entrada é proveniente do microcontrolador para o disparo do TRIAC.

### 3.2.1.3: Triac BTA41

O TRIAC utilizado no projeto foi o TRIAC BTA41 do fornecedor STMicroelectronics, que já está presente em outras duchas eletrônicas da empresa. A corrente máxima que ele suporta é de 40A e a frequência de comutação é de 120 Hz. Como a corrente máxima que passará pelo chuveiro é de 35A, ele não corre riscos de queimar. Esse modelo é largamente utilizado em controle por ângulo de fase onde sua capacidade é requerida.

Com a operação do gate ocorre o aquecimento do TRIAC, sendo necessário o uso de dissipador de calor. O dissipador de calor no caso é um metal colocado no cano do chuveiro. Ele é resfriado pela água que vem do cano e garante assim a integridade do TRIAC, como pode ser observado na Figura 13.



*Figura 13 - Triac usado do protótipo*

### 3.2.2: Fonte de Tensão

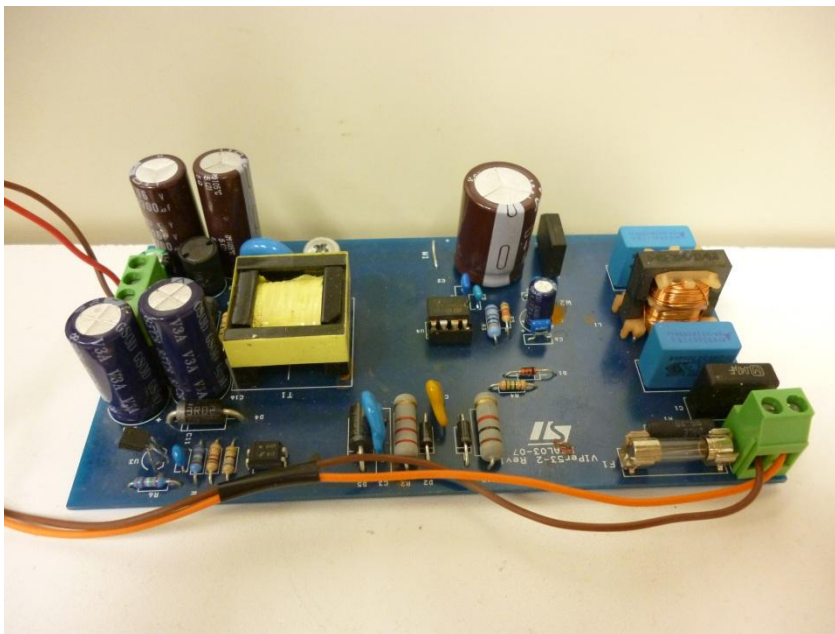
É a responsável por alimentar o microcontrolador, os sensores e os servomotores.

A fonte escolhida foi a PSAL03-07, da STMicroelectronics, e possui as seguintes características:

- Entrada: 85 até 264Vac @ 50/60Hz
- Saída: 12V @ 1A & 5V @ 2.4A , 24W

Para utilizá-la basta conectar o fase e o neutro da rede elétrica em suas entradas e conectar as saídas de 5V e GND na placa eletrônica para alimentar o circuito.

Essa fonte será usada somente nessa fase de protótipo. Futuramente uma nova fonte será projetada e ficará presente na mesma placa que o restante do circuito.



*Figura 14 - Fonte de Tensão*

### **3.2.3: Módulo IR**

A comunicação entre o usuário e o chuveiro é realizada através de um controle remoto. Como já existe no mercado uma ducha da Thermosystem que faz uso dessa interface, a Délus Digital, foi aproveitado o controle remoto já produzido, adaptando ele as necessidades do projeto. Futuramente será projetado um novo controle exclusivo para a ducha desse trabalho.

O controle remoto possui 5 botões sendo que 2 foram usado para o incremento e decremento da temperatura, 2 para o incremento e decremento da vazão e 1 para ligar e desligar a ducha.

O sistema de comunicação é constituído pelo receptor infravermelho e pelo transmissor.

#### **3.2.3.1: Receptor Infravermelho de controle remoto**

É um dispositivo pequeno presente na placa eletrônica do chuveiro para recebimento de infravermelho do controle remoto. Ele trabalha com uma tensão de alimentação de 2,7V até 5,5V e possui uma baixa perturbação a ruídos e luz.



*Figura 15 - Receptor Infravermelho*



### 3.2.3.2: Transmissor

O transmissor utilizado foi o controle remoto já produzido na empresa Thermosystem. Ele é composto por um microcontrolador que interpreta os comandos, por 5 botões e uma pilha que fornece energia para o circuito. A

A comunicação é realizada pelo protocolo Sony. Podemos observar o transmissor na Figura 16.



*Figura 16 - Transmissor*

### 3.2.4: Servomotores

Para o controle da vazão de água foram utilizados dois servomotores, um para a entrada de água fria e outro para a entrada de água quente.



*Figura 17 – Servomotor*

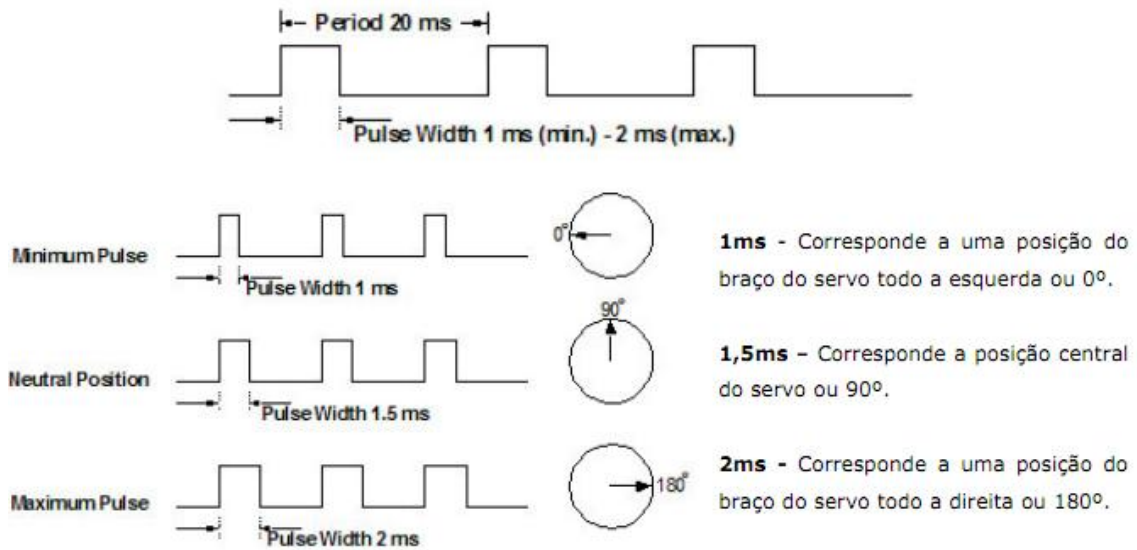
O servomotor é um dispositivo eletromecânico que, a partir de um sinal elétrico em sua entrada, pode ter seu eixo posicionado em uma determinada posição angular. Por serem pequenos e compactos, além de permitir um posicionamento preciso de seu eixo, os servomotores são largamente utilizados em robótica e aeromodelismo [9].

A seguir será descrito seu funcionamento.

Um servomotor possui um sistema eletrônico de controle e um potenciômetro que está ligado ao eixo de saída. Este potenciômetro possibilita ao circuito de controle monitorar o ângulo do eixo do servomotor. Se o eixo estiver no ângulo correto, o motor para. Se o circuito detecta que o ângulo está incorreto, o motor é ativada até que o ângulo seja o desejado. Nas engrenagens de um servomotor existe um limitador que atua no ângulo de giro do eixo, fazendo com que este varie de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  [9].

O ângulo do eixo é determinado a partir da duração da largura de pulso (PWM – Pulse Width Modulation) enviado à entrada do servomotor. Este sinal pode ter 0V ou 5V. O circuito de controle do servo fica monitorando este sinal em intervalos de 20ms, se dentro deste intervalo ele percebe uma alteração do sinal de 0V para 5V durante 1ms até 2ms ele altera a posição do seu eixo para coincidir com o sinal que recebeu [9].

O seu funcionamento é ilustrado na Figura 18.



*Figura 18 - Funcionamento do Servomotor*

Os eixos desses servomotores foram acoplados aos eixos de dois registros. Os registros utilizados são usados em torneiras já fabricadas pela empresa.

Dessa forma é possível ter um controle da abertura do registro de totalmente fechado a totalmente aberto, bastando para isso variar a largura do pulso e conseqüentemente a posição do servomotor.

O servomotor possui três fios, sendo dois para a alimentação com uma tensão de 5V e GND e um para o sinal PWM proveniente do microcontrolador.

### **3.2.5: Sensores**

#### **3.2.5.1: Sensor de Temperatura**

O sensor escolhido para medir a temperatura de saída da água foi o LM35, que é um sensor de precisão, fabricado pela National Semiconductor. Ele apresenta uma saída de tensão linear relativa à temperatura em que ele se encontrar no momento em que for alimentado por uma tensão de 4-20Vdc e GND, tendo em sua saída um sinal de 10mV para cada Grau Celsius de

temperatura. Dessa forma ele apresenta uma boa vantagem com relação aos demais sensores de temperatura calibrados em “KELVIN”, não necessitando nenhuma subtração de variáveis para que se obtenha uma escala de temperatura em Graus Celsius [17].

O LM35 não necessita de qualquer calibração externa ou “trimming” para fornecer com exatidão, valores temperatura com variações de  $\frac{1}{4}^{\circ}\text{C}$  ou até mesmo  $\frac{3}{4}^{\circ}\text{C}$  dentro da faixa de temperatura de  $-55^{\circ}\text{C}$  à  $150^{\circ}\text{C}$ . Este sensor tem saída com baixa impedância, tensão linear e calibração inerente precisa, fazendo com que o interfaceamento de leitura seja especificamente simples, barateando todo o sistema em função disto [17].



*Figura 19 - Sensor de Temperatura LM35*

Devido a problemas de ruído na medição de temperatura, foi colocado um capacitor eletrolítico de  $10\mu\text{C}$  entre os pinos da saída e do terra do sensor. Com isso o ruído foi eliminado com sucesso.

### **3.2.5.2: Sensor de pressão**

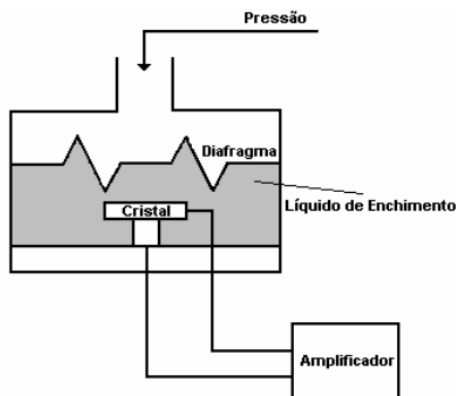
Devido à exigência da empresa, foi usado um sensor de pressão para a medição de vazão. Essa escolha foi feita devido basicamente ao baixo custo e robustez do sensor. O modelo utilizado foi do tipo piezoresistivo da fabricante Honeywell.



*Figura 20 - Sensor de Pressão*

A medição de pressão utilizando este tipo de sensor se baseia no fato dos cristais assimétricos ao sofrerem uma deformação elástica ao longo do seu eixo axial, produzirem internamente um potencial elétrico causando um fluxo de carga elétrica em um circuito externo [11].

A quantidade elétrica produzida é proporcional à pressão aplicada, sendo então essa relação linear o que facilita sua utilização. Outro fator importante para sua utilização está no fato de se utilizar o efeito piezoelétrico de semicondutores, como o quartzo, reduzindo assim o tamanho e peso do transmissor, sem perda de precisão [11]. Um desenho demonstrando seu funcionamento pode ser visto na Figura 21.



*Figura 21 - Funcionamento do Sensor de Pressão*

Como o que se quer medir é a vazão de água e não a pressão, foi feita uma relação das duas variáveis.

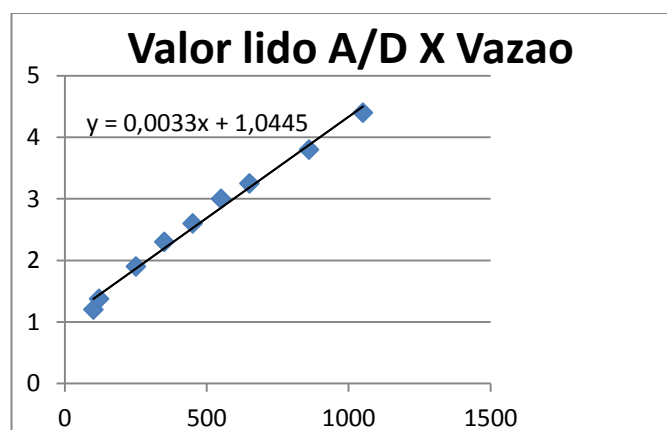
O procedimento para isso foi feito medindo a vazão (com um recipiente com medidas de volume) e lendo o valor do conversor A/D do microcontrolador para o sinal de pressão. Variou-se a abertura do registro em

alguns valores e a Tabela 1 - Relação Pressão X Vazão Tabela 1 foi elaborada com os dados obtidos.

*Tabela 1 - Relação Pressão X Vazão*

Valor lido pelo conversor A/D	Vazão medida (l/min)
100	1,2
120	1,375
250	1,9
350	2,3
450	2,6
550	3
650	3,25
860	3,8
1050	4,4

A partir dos dados foi feita uma regressão linear e encontrada uma relação entre a pressão e a vazão de água. A Figura 22 mostra o gráfico e a equação que relaciona as variáveis.



*Figura 22 - Gráfico Pressão X Vazão*

Para saber a vazão de água em certo instante basta então fazer o seguinte cálculo:

$$\text{Vazão} = 0.0033 * (\text{ValorLidoA/D}) + 1,0445$$

### 3.2.6: Placa de Desenvolvimento Discovery STML-8

Essa placa fornecida pela STMicroelectronics foi escolhida por exigência da própria empresa para ser a unidade de processamento do sistema. Esta placa de desenvolvimento possui como principais componentes o microcontrolador STM8L152C6T6, um display LCD 24 segmentos, botões e LEDs.

Como ela possui entrada USB, facilita muito tanto a programação do microcontrolador quanto a aquisição de dados.



*Figura 23 - Placa de Desenvolvimento Discovery STM8L*

Ela é integrada pelo microcontrolador STM8L152C6T6 que possui 8bits, 32Kb de memória flash, 2 Kb de Ram, 1 KB EEPROM de dados, RTC, LCD, timers, USART, I2C, SPI, ADC, DAC e comparadores.

A placa Discovery possui uma finalidade mais didática e será usada somente nessa fase de projeto. Futuramente, somente o microcontrolador será usado na placa eletrônica da versão final.

Na Tabela 2 podemos visualizar as portas utilizadas na placa.

*Tabela 2 - Portas utilizadas na Placa*

<b>Porta</b>	<b>Função</b>
<b>PC0</b>	Controle Remoto (Entrada)
<b>PC4</b>	Sensor de Pressão (Entrada)
<b>PC5</b>	Servomotor Registro Frio (Saída)
<b>PC6</b>	Servomotor Registro Quente (Saída)
<b>PC7</b>	Sensor de Temperatura (Entrada)
<b>PE6</b>	Optoacoplador (Entrada)
<b>PE7</b>	Triac (Saída)
<b>PF0</b>	Diafragma (Entrada)

### **3.2.7: Esquema eletrônico**

O esquema eletrônico foi desenvolvido no software EAGLE e é mostrado na Figura 24. Esse esquema foi enviado para uma empresa que produz placas eletrônicas. Com a placa pronta, os componentes foram devidamente soldados e a placa de desenvolvimento Discovery STM8L foi plugada nela.



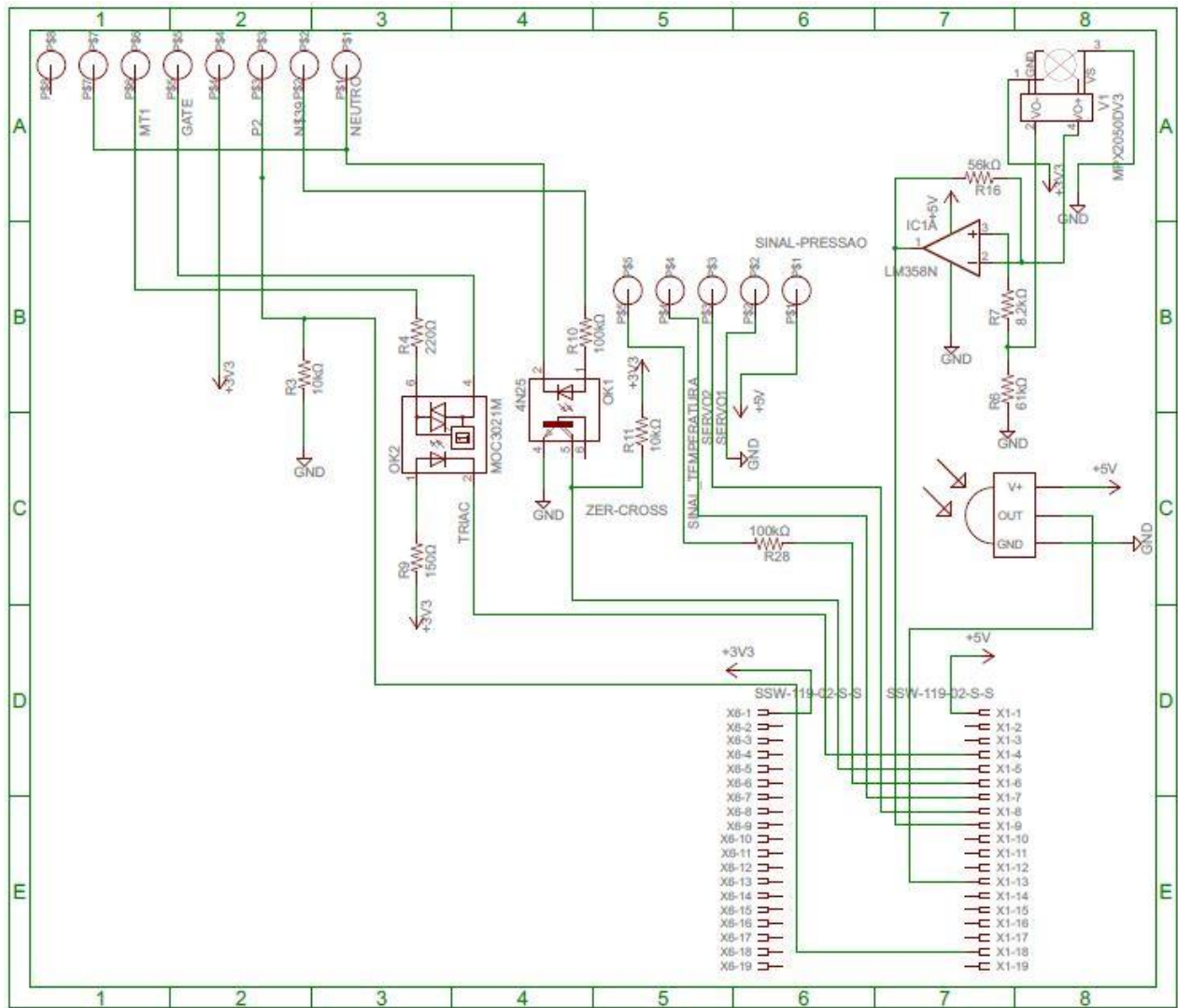


Figura 24 - Esquema Eletrônico

### 3.2.8: Protótipo completo

O protótipo completo pode ser visualizado nas Figuras Figura 25, Figura 26 e Figura 27.

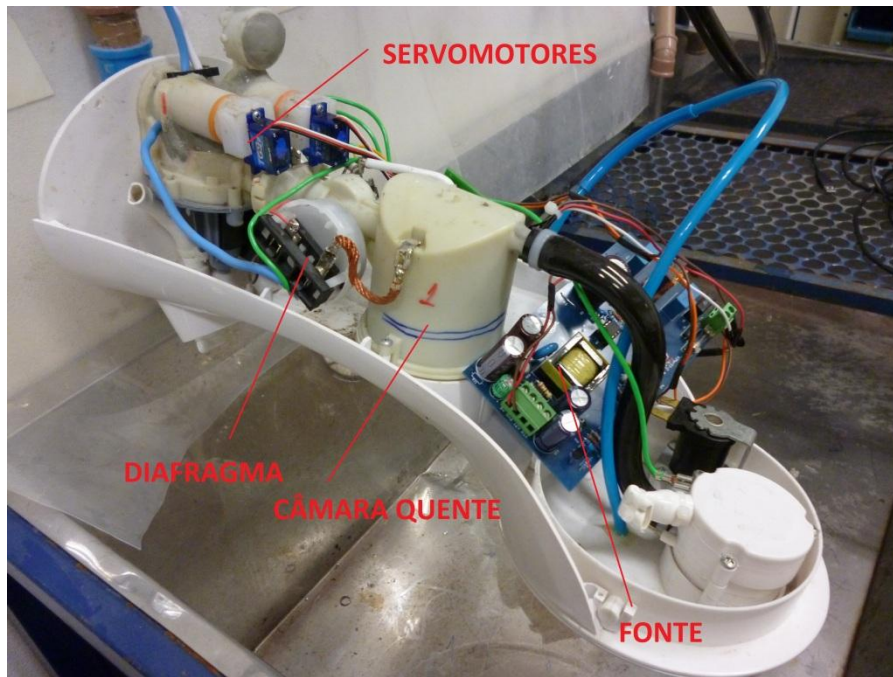


Figura 25 - Protótipo Completo ângulo 1

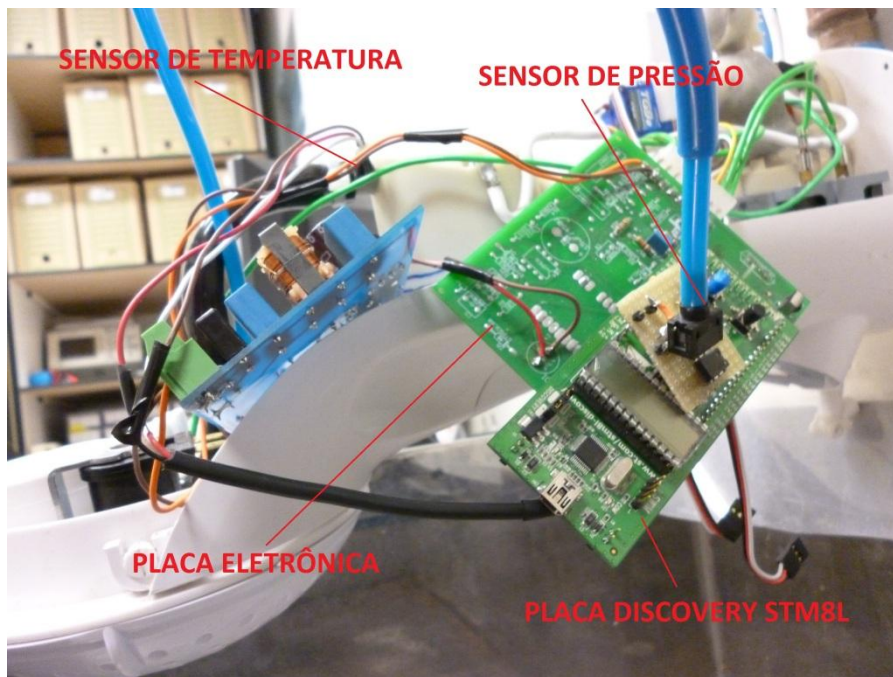


Figura 26 - Protótipo Completo ângulo 2



Figura 27 - Protótipo completo ângulo 3

### 3.3: Desenvolvimento do Software

O ambiente de programação utilizado é o ST Visual Develop 4.2.0 e a programação foi implementada usando a linguagem C. Pode-se observar na Figura 28 a interface deste compilador.

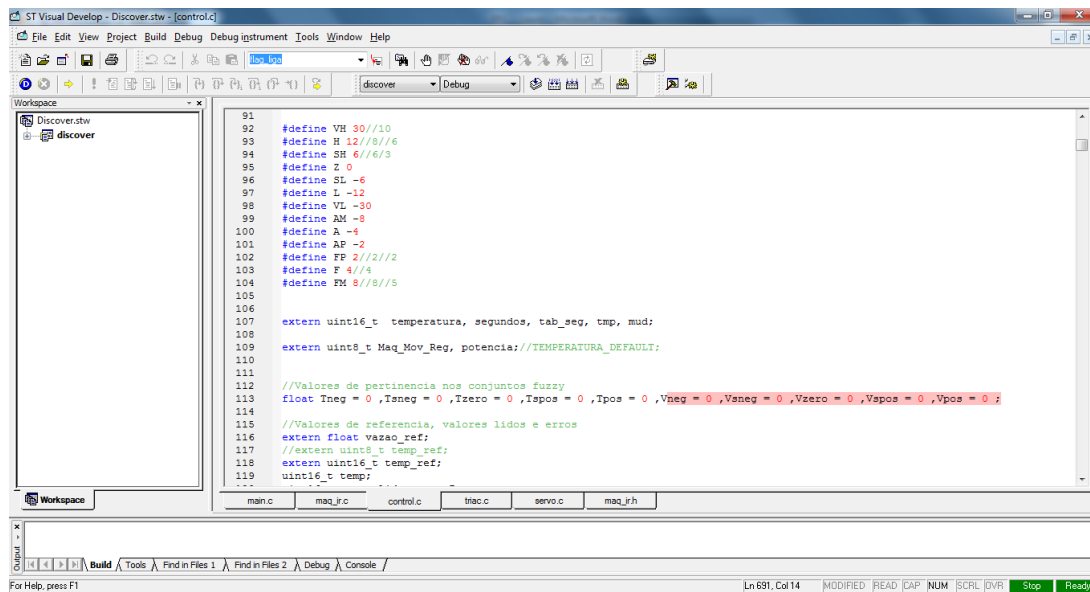


Figura 28 - Interface do STVD

### 3.4: Aquisição de dados

Para o monitoramento e aquisição dos dados foi utilizado o software STM Studio, que é desenvolvido pela STMicroelectronics e portanto compatível com a placa Discovery STM8-L.

Esse software permite a visualização em tempo real das variáveis presentes no código implementado e também a criação de logs com os dados armazenados. Isso é feito de forma não invasiva, ou seja, não altera o funcionamento do microcontrolador, apenas acessa as variáveis escolhidas pelo usuário.

Podemos também definir a taxa de amostragem para a leitura das variáveis. Como o tempo de amostragem definido para o controle foi de 2 segundos, a taxa de amostragem do software também será de 2 segundos.

O STM Studio foi de extrema importância no desenvolvimento do controlador, pois com ele é possível analisar tanto a dinâmica da resposta do sistema como também os sinais de controle.

A interface desse software pode ser visualizada na Figura 29.

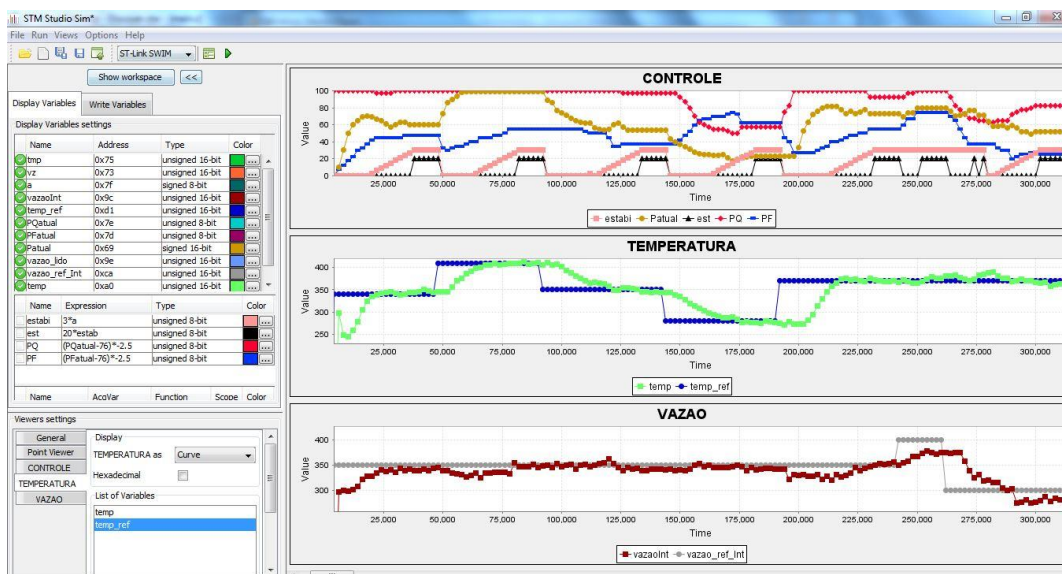


Figura 29 - Interface do STMStudio

### **3.5: Considerações Finais**

Todos os componentes e ferramentas computacionais utilizados nesse projeto foram apresentados no decorrer desse capítulo. Como foi comentado, muitos deles foram escolhidos devido ao seu baixo custo e por exigência da própria empresa. Outros componentes foram adaptados de produtos já fabricados pela Thermosystem e serão utilizados somente nessa fase de desenvolvimento. Futuramente eles serão substituídos por componentes projetados com exclusividade para a versão final do produto.

Algumas considerações sobre o funcionamento e condições de operação do sistema também foram detalhadas. Elas foram especificadas de acordo com o conhecimento empírico de como seria a maneira mais agradável de uma pessoa tomar um banho.

A próxima fase desse trabalho é o projeto da lógica que controlará todos os dispositivos apresentados. Essa lógica será então implementada na Placa Discovery STM8L.

## 4. FUNDAMENTOS DA LÓGICA FUZZY

Esse capítulo aborda os principais conceitos da teoria dos conjuntos fuzzy para o entendimento do projeto realizado nesse trabalho.

O conceito de lógica fuzzy foi introduzido em meados de 1960, quando Zadeh pesquisava sobre formas de modelar alguns sistemas de natureza industrial, biológica ou química, que compreendessem situações ambíguas, não passíveis de processamento através da lógica computacional tradicional [12].

A Lógica Fuzzy desenvolvida por ele é baseada na teoria dos Conjuntos Fuzzy. Tradicionalmente, uma proposição lógica tem dois extremos: ou é “completamente verdadeiro” ou é “completamente falso”. Entretanto, na lógica Fuzzy, uma premissa varia em grau de verdade de 0 a 1, o que leva a ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa [6].

A lógica nebulosa objetiva fazer com decisões tomadas pela máquina se aproxime cada vez mais das decisões humanas, principalmente ao trabalhar com uma grande variedade de informações vagas e incertas. Os conjuntos nebulosos são o caminho para aproximar o raciocínio humano à forma de interpretação da máquina. Desta forma, os conjuntos nebulosos são na verdade uma “ponte” que permite ainda o emprego de quantitativas, como por exemplo “muito quente” e “muito frio” [3].

A ideia básica da lógica fuzzy é transformar o conhecimento heurístico em um conjunto de regras linguísticas do tipo SE<condição> ENTÃO<ação>, onde as expressões “condição” e “ação” não são números ou equações exatas, mas são descritas por palavras ou frase como: baixo, alto, muito alto [2].

Originalmente a lógica nebulosa encontrou aplicabilidade imediata no campo de Controladores de Processos Industriais. Entretanto seu uso já é feito nas mais diversas aplicações e existe um interesse crescente em se

utilizar a Lógica Nebulosa em sistemas especialistas para torna-los mais flexíveis [3].

Como principais vantagens da lógica fuzzy podemos destacar [6]:

- Robustez por não requerer entradas precisas.
- Modificada facilmente por ser baseada em regras.
- Controle de sistemas não lineares sem modelo matemático.
- Solução mais rápida e barata em alguns casos.
- Implementável facilmente em microprocessadores.

## 4.1: Teoria de Conjuntos Fuzzy

### 4.1.1: Conjuntos Fuzzy

Na teoria clássica, os conjuntos são denominados "crisp" e um dado elemento do universo em discurso (domínio) pertence ou não pertence ao referido conjunto. Dado um universo  $U$  e um elemento particular  $x \in U$ , o grau de pertinência  $\mu_A(x)$  com respeito a um conjunto  $A \subseteq U$  é dado por:

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

Já na teoria dos conjuntos "fuzzy" existe um grau de pertinência no intervalo  $[0,1]$  de cada elemento a um determinado conjunto, permitindo dessa forma uma transição gradual da falsidade para a verdade.

Formalmente, seja  $U$  uma coleção de objetos denominados genericamente por  $\{u\}$ .  $U$  é chamado de universo de discurso, podendo ser contínuo ou discreto [1]. Um conjunto fuzzy  $A$  em um universo de discurso  $U$  é definido por uma função de pertinência  $\mu_A$  que assume valores em um intervalo  $[0,1]$ :

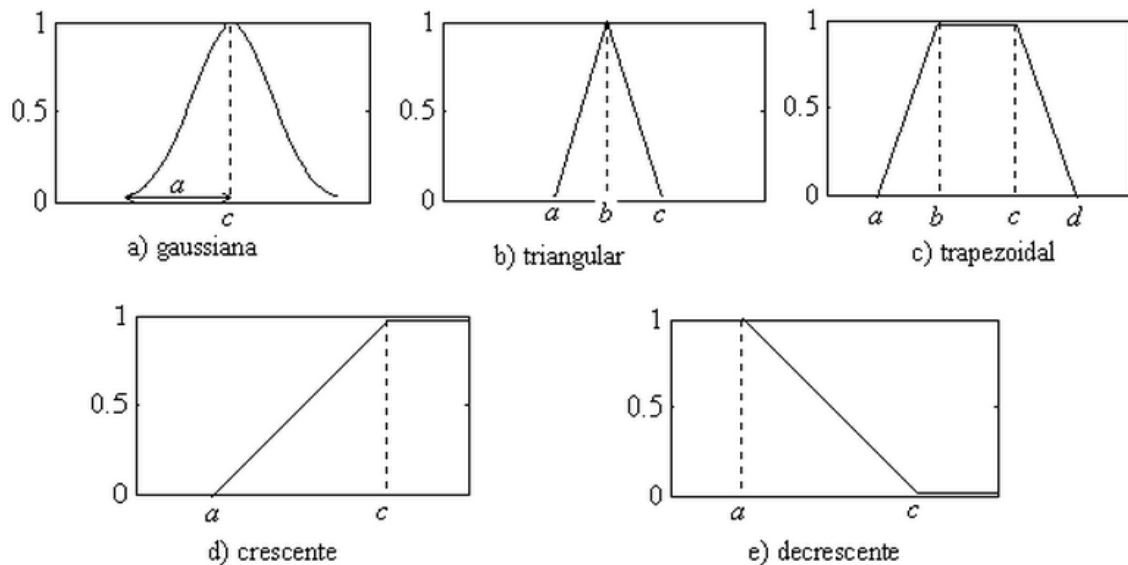
$$\mu_A: U \rightarrow [0,1]$$

O conjunto fuzzy A em U é, então, um conjunto de pares ordenados.

$$A = \{\mu_A(u)/u\}, u \in U$$

O conjunto suporte de um conjunto fuzzy A é o subconjunto dos pontos  $u$  de  $U$  tal que  $\mu_A(u) > 0$ . Um conjunto fuzzy cujo conjunto suporte é um único ponto de  $U$  com  $\mu_A = 1$  é chamado de um conjunto unitário fuzzy [1].

Na maioria das aplicações práticas, as funções de pertinência são do tipo: gaussiana, triangulares, trapezoidais, crescentes ou decrescentes. A Figura 30 mostra estes cinco tipos de funções de pertinência.



*Figura 30 - Funções de Pertinência*

A função de pertinência triangular pode ser representada pela seguinte equação:



$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{se } b < x < c \end{cases}$$

A função de pertinência crescente pode ser representada pela seguinte equação:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{c-a} & \text{se } a < x < c \\ 1 & \text{se } x > c \end{cases}$$

Essas duas funções são as que serão utilizadas no projeto.

#### 4.1.2: Variáveis Linguísticas

Uma variável linguística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos fuzzy. Por exemplo, a temperatura de um dado processo poderia ser uma variável linguística assumindo valores baixa, média, alta, etc [1]. Estes valores são descritos por intermédio de conjuntos fuzzy e representados na Figura 31.

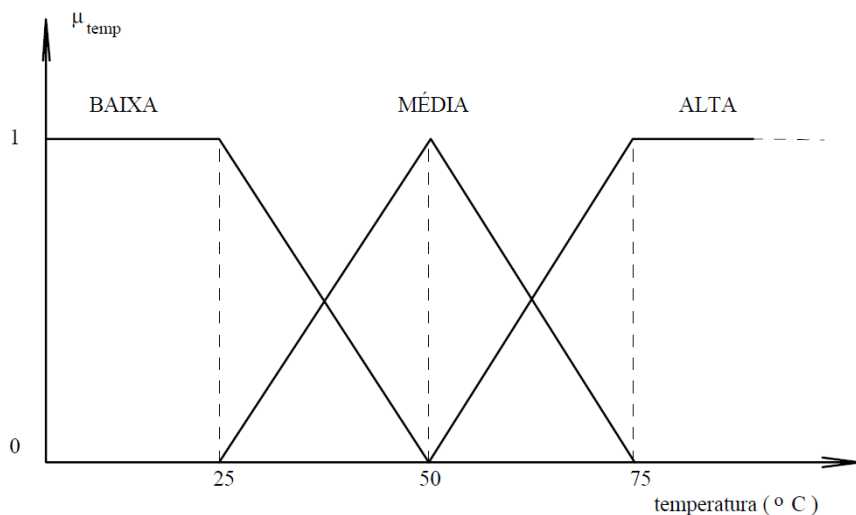


Figura 31 - Variáveis Linguísticas

Nesse exemplo, se o valor a temperatura for de 60°C, ele pertencerá ao conjunto MÉDIA e ALTA com as seguintes pertinências:

$$\mu_{MÉDIA}(60^{\circ}C) = \frac{75 - 60}{75 - 50} = 0.6$$

$$\mu_{ALTA}(60^{\circ}C) = \frac{60 - 50}{75 - 50} = 0.4$$

Isso significa que a temperatura de 60°C tem maior grau de pertinência no conjunto fuzzy MÉDIA do que no conjunto ALTA.

Formalmente, uma variável linguística é caracterizada por uma quintupla  $(X, T(X), U, G, M)$ , onde:

X : Nome da variável

T(X) : Conjunto de termos de X, ou seja, o conjunto de nomes dos valores linguísticos de X.

U : Universo de discurso

G : Regra sintática (geralmente uma gramática) para gerar os valores de X como uma composição de termos de T(X), conectivos lógicos (negação, interseção e união), modificadores e delimitadores.

M : Regra semântica, para associar a cada valor gerado por G um conjunto fuzzy em U.

Para o caso da variável temperatura apresentada anteriormente, teríamos:

X: temperatura

T(X): {baixa, média, alta}

U: 0°C a 100°C (por exemplo)

G: temperatura não baixa e não muito alta (por exemplo)

M: associa o valor acima a um conjunto fuzzy cuja função de pertinência exprime o seu significado.

### 4.1.3: Operações com conjuntos Fuzzy

Sejam A e B dois conjuntos fuzzy em U com suas funções de pertinência  $\mu(A)$  e  $\mu(B)$ , respectivamente. As operações como união e intersecção para conjuntos fuzzy são definidas através de suas funções de pertinência.

Para esclarecer isso, serão mostrados alguns exemplos.

Seja A um intervalo fuzzy entre 5 e 8, e B um número fuzzy “em torno de 4”. As figuras correspondentes ilustram o exemplo [15]:

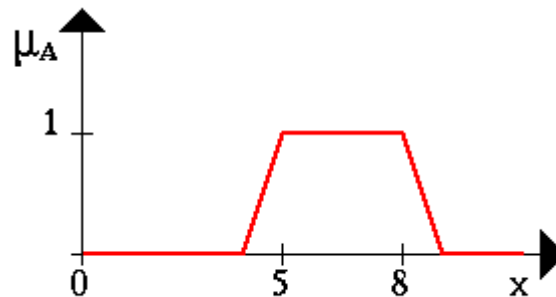


Figura 32 - Conjunto Fuzzy A

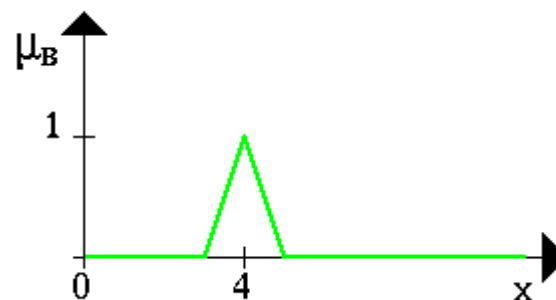


Figura 33 - Conjunto Fuzzy B

No caso da operação união, a função de pertinência  $\mu(A) \cup \mu(B)$  é definida ponto a ponto para todo  $x \in U$  por:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \} \text{ para todo } x \in U$$

É o grau de pertinência de A ou o grau de pertinência a B, o que for maior.

A operação união do conjunto fuzzy A e o conjunto fuzzy B está na Figura 34 em azul e compreende os valores máximos.

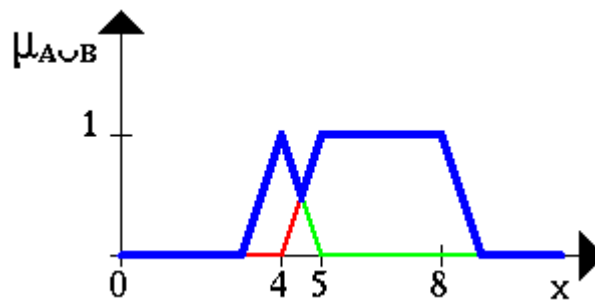


Figura 34 - Operação União

A interseção de dois conjuntos fuzzy A e B é um conjunto fuzzy  $A \cap B$  tal que:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \} \text{ para todo } x \in U$$

É o grau de pertinência a A ou o grau de pertinência a B, o que for menor.

A Figura 35 mostra a operação interseção do conjunto fuzzy A e o conjunto fuzzy B. O resultado está em azul e compreende os valores mínimos.

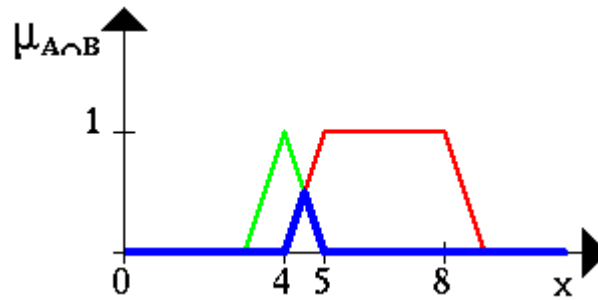


Figura 35 - Operação Interseção

## 4.2: Estrutura do Controlador Fuzzy

A lógica fuzzy é muito usada em sistemas de controle que exigem respostas a erros ou a mudanças mais satisfatórias de acordo com os problemas. A ideia básica em controle fuzzy é modelar as ações a partir de conhecimento especialista, isto é, casos onde o conhecimento seja disponível, sejam pelo operador ou projetista. Sistemas de controle fuzzy são denominados closed-loop system, que controlam processos fuzzificando as entradas vindas do sistema e enviando ao mecanismo de inferência, que tomará as decisões com base nos conhecimento de decisões a serem tomadas para cada situação. Após a tomada de decisão ocorre a defuzzificação, que transforma as decisões fuzzy em valores reais para a máquina, valores esses mais próximos da necessidade [5].

O desenvolvimento de um sistema de controle fuzzy é basicamente construir uma base de regras de decisões com base no conhecimento do problema que tornará o sistema mais confiável, tomando decisões mais precisas de acordo com o problema encontrado.

A arquitetura de um controlador fuzzy é representada na forma de blocos na Figura 36.

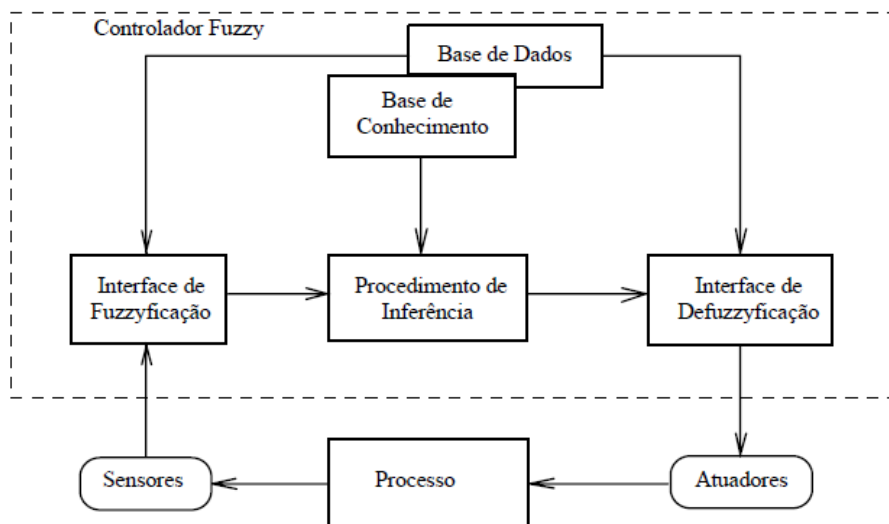


Figura 36 - Estrutura do Controlador Fuzzy

#### 4.2.1: Fuzzificação das Variáveis de entrada

O primeiro passo do controle é a fuzzificação das variáveis de entrada. No caso do controle de processos esses valores são obtidos geralmente através de sensores.

Esse passo é a conversão de cada entrada precisa (crisp) em uma variável nebulosa usando funções de pertinência armazenadas na base nebulosa de conhecimento.

Na seção 4.1.2, foi demonstrada a fuzzificação de um valor preciso de temperatura (60°C) em variáveis nebulosas com o devido grau de pertinência em cada conjunto (0.6 no conjunto fuzzy Média e 0.4 no conjunto fuzzy Alta).

#### 4.2.2: Base de Regras Fuzzy

Consiste na base do conhecimento, caracterizando a estratégia de controle e suas metas.

É constituída por uma série de regras do tipo:

SE <antecedente> ENTÃO <consequente>

O antecedente é composto por um conjunto de condições que, quando satisfeitas (mesmo parcialmente), determinam o processamento do consequente da regra por um mecanismo de inferência fuzzy. O processo acima descrito denomina-se disparo de uma regra [9].

Por sua vez, o consequente é composto de um conjunto de ações ou diagnósticos que são gerados com o disparo da regra. Os consequentes das regras disparadas são processados em conjunto, para gerar uma resposta determinística, para cada variável de saída do sistema [9].

O número de regras que requer um controlador difuso é encontrado multiplicando-se o número de termos difusos das variáveis de entrada. Deste modo, as regras cobrirão todas as possíveis combinações provenientes das distintas entradas. Por exemplo, para um sistema com duas variáveis de entrada, cada uma com 3 termos difusos, existem  $3 \times 3 = 9$  combinações de entrada e, portanto, 9 regras de controle.

Para desenhar uma base de regras, utiliza-se uma matriz que cubra todas as possíveis combinações das entradas. Para um sistema com duas entradas, atribui-se uma para cada eixo da matriz. Em cada célula da matriz, escreve-se a ação de controle sugerida pela regra que possua essa combinação de entradas como premissa. Da matriz podem derivar-se todas as regras que formarão uma base completa. Se o sistema conta com três entradas, utiliza-se uma matriz para cada termo linguístico da terceira variável [9].

Na seção 5.1.6 é demonstrada a base de regras usada no projeto.

### **4.2.3: Máquina de Inferência**

É a responsável por processar os dados fuzzy de entrada, junto com as regras, de modo a inferir as ações de controle fuzzy, aplicando o operador de implicação fuzzy e as regras de inferência da lógica fuzzy.

Os dois métodos mais conhecidos de inferência são o proposto por Mandani e o proposto por Takagi-Sugeno. Apresentaremos aqui o método de Takagi-Sugeno, que será usado no projeto.

Esse método visa empregar um spike único, um singleton, como a função de pertinência do consequente da regra.

Um singleton nebuloso é um conjunto nebuloso cuja função de pertinência é igual à unidade em um ponto particular e zero no restante (função impulso unitário discreta) [10].

A forma da regra nebulosa de Takagi-Sugeno é “SE  $x$  é  $A$  E  $y$  é  $B$  ENTÃO  $z = f(x, y)$ ”:

- $x$ ,  $y$  e  $z$  são variáveis linguísticas;
- $A$  e  $B$  são conjuntos nebulosos no antecedente da regra;
- $z = f(x, y)$  é uma função firme no consequente, muito frequentemente

um polinômio.

O modelo nebuloso Takagi-Sugeno de ordem zero mais comumente empregado tem a forma “SE  $x$  é  $A$  &  $y$  é  $B$  ENTÃO  $z = k$ ”:

- $k$  é uma constante.
- A saída de cada regra nebulosa é uma constante, logo, todas as funções de pertinência dos consequentes são representadas por spikes singleton.

A interpretação das regras SE-ENTÃO envolvem as seguintes partes:

- Avaliação do antecedente:
  - Fuzzificação da entrada;
  - Aplicação de operadores fuzzy, se necessário;
  - Geração do grau de pertinência para cada regra;
- Aplicação do resultado ao consequente, ou implicação:
  - Grau de pertinência será ponderado sobre a saída;

A Figura 37 ilustra esse procedimento.



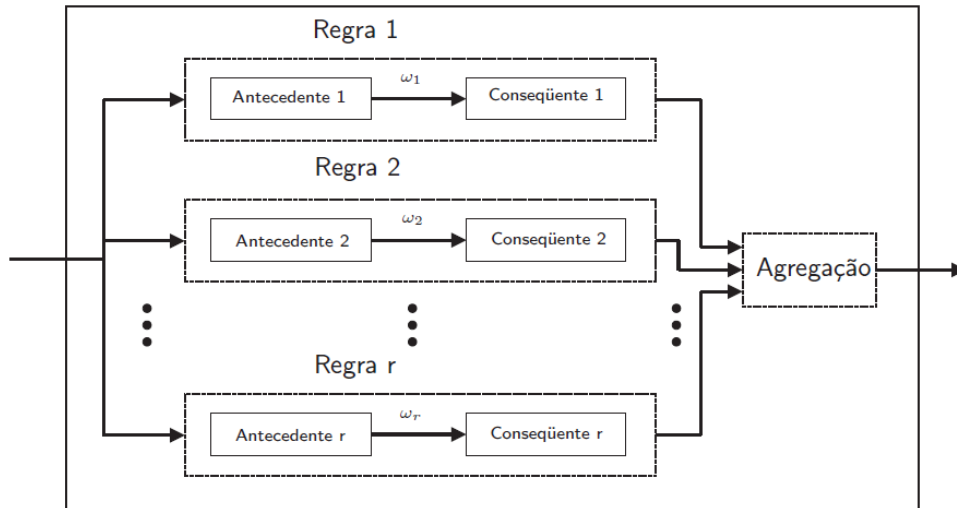


Figura 37 - Inferência Fuzzy

Quando temos mais de um antecedente em uma regra, o grau de pertinência resultante para a regra será:

- $\min(\mu_A(x), \mu_B(x))$  se o operador for E;
- $\max(\mu_A(x), \mu_B(x))$  se o operador for OU;

A Figura 38 demonstra o funcionamento da máquina de inferência.

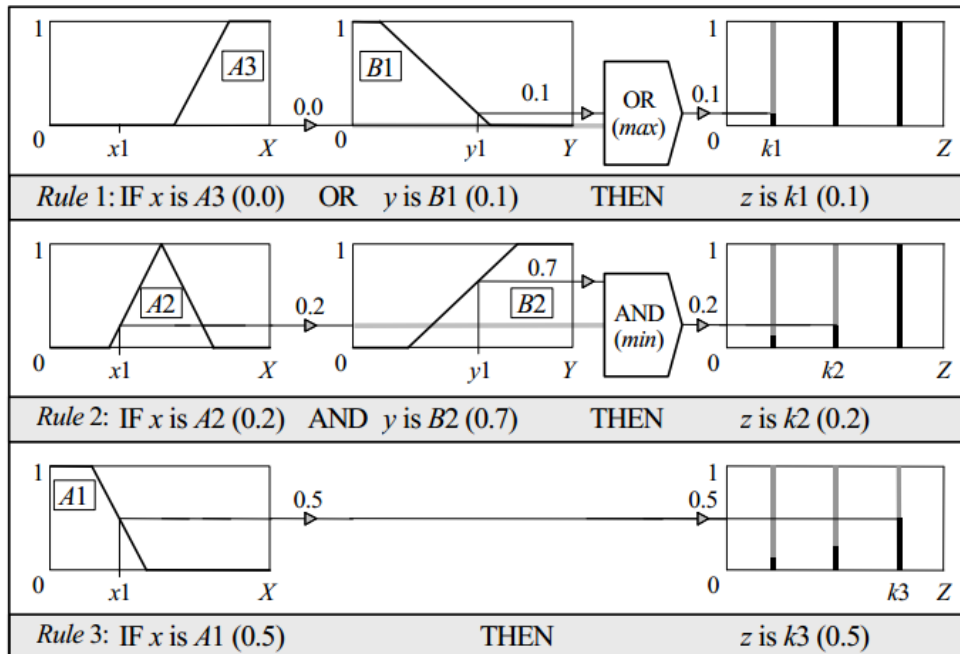


Figura 38 - Composição das Regras

O passo final é a agregação da saída das regras, que é o processo de unificação das saídas de todas as regras. Toma-se as funções de pertinência de todos os consequentes das regras previamente clipadas ou escalonadas e combina-as em um único conjunto nebuloso.

A saída numérica é calculada diretamente pela soma das saídas das regras, ponderada pelos valores de ativação de cada uma delas, como mostrado na Figura 39.

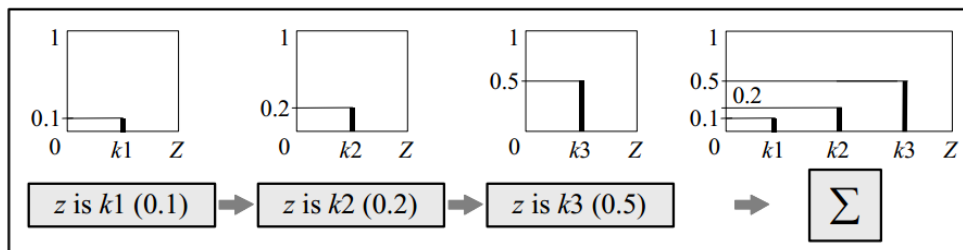


Figura 39 - Saída Fuzzy

A saída será, portanto:

$$\text{Saída} = \frac{k_1 \cdot \mu_{k1} + k_2 \cdot \mu_{k2} + k_3 \cdot \mu_{k3}}{\mu_{k1} + \mu_{k2} + \mu_{k3}}$$

O funcionamento da inferência de Takagi-Sugeno será mais bem compreendido na seção 5.2 com um exemplo do próprio projeto.

### 4.3: Considerações Finais

Esse capítulo deu uma visão geral de como funciona a lógica fuzzy. Entretanto, muitos conceitos e detalhes não foram demonstrados por não serem considerados de relevância para esse trabalho.

Com essa noção adquirida sobre os controladores fuzzy, podemos agora definir os parâmetros e regras que serão utilizados no projeto. Essas definições é que serão abordadas no próximo capítulo.

## 5. PROJETO DO CONTROLADOR

Neste capítulo serão detalhados todos os parâmetros adotados para o desenvolvimento do projeto. Também será demonstrado o funcionamento do controlador fuzzy.

O projeto de um controle fuzzy pode ser dividido nos seguintes passos:

1. Selecionar as entradas e saídas de controle;
2. Definir as funções de pertinência das entradas e saídas;
3. Especificar as regras de controle;
4. Selecionar o método de inferência associado às regras de controle;
5. Selecionar o método de fuzzificação e defuzzificação;
6. Avaliar o controlador;

Na Figura 40 é mostrado o diagrama de blocos em malha fechada do sistema de controle proposto.

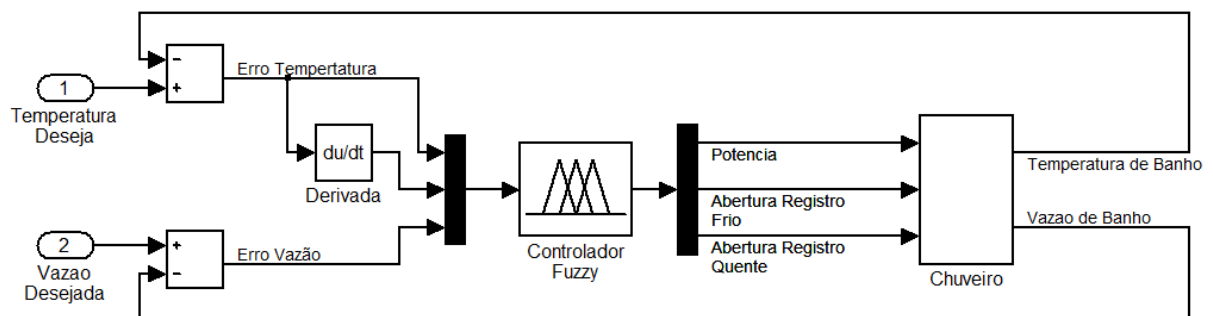


Figura 40 - Diagrama de Blocos do Sistema

Podemos classificar as variáveis do sistema de acordo com a Tabela 3.

*Tabela 3 - Variáveis do Sistema*

<b>Entradas do Controlador Fuzzy</b>	<b>Saídas do Controlador Fuzzy</b>	<b>Variáveis de Controle</b>
<b>Erro da Temperatura</b>	<b>Potência</b>	<b>Vazão de banho</b>
<b>Derivada do erro da temperatura</b>	<b>Abertura do Registro Frio</b>	<b>Temperatura de banho</b>
<b>Erro da vazão</b>	<b>Abertura do Registro Quente</b>	

## 5.1: Parâmetros do projeto

Para determinar os parâmetros não existe um procedimento padrão e isso depende basicamente do conhecimento do processo por parte do projetista, ou seja, ocorre de forma empírica.

Na seção 3.1, onde foram apresentadas as condições de operação do sistema, alguns parâmetros foram mencionados. Após diversos experimentos e ajustes seus valores foram definidos da seguinte forma:

- $V_{\min} = 80\%$ .
- $V_{\max} = 20\%$ .
- $P_{\max} = 20\%$ .
- $T_{\min} = 20$  segundos.
- $V_{\text{dec}} = 0.5$  l/min.

A seguir serão apresentados os conjuntos fuzzy e as regras definidas para o controlador. Da mesma forma que os parâmetros acima, eles foram definidos após sucessivos ajustes.

### 5.1.1: Conjuntos Fuzzy para o Erro da Temperatura de banho

Esses conjuntos representam a diferença entre o valor de temperatura desejado pelo usuário e o valor medido pelo sensor, que pode ser representada pela equação abaixo.

$$E_{temp} = T_{desejada} - T_{medida}$$

Isso significa que se o erro for positivo o controle terá que aquecer a água e se for negativo terá que esfriar a água.

As funções de pertinência e as variáveis linguísticas desses conjuntos são representadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

*Figura 41 - Conjuntos Fuzzy para o Erro da Temperatura*

### 5.1.2: Conjuntos Fuzzy para o Erro da Vazão de Banho

Esses conjuntos representam a diferença entre o valor de vazão desejado pelo usuário e o valor medido pelo sensor, que pode ser representada pela equação abaixo.

$$E_{vazao} = V_{desejada} - V_{medida}$$

Isso significa que se o erro for positivo o controle terá que aumentar a vazão da água e se for negativo terá que diminuir a vazão da água.

As funções de pertinência e as variáveis linguísticas desses conjuntos são representadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Figura 42 - Conjuntos Fuzzy para o Erro da Vazão

### 5.1.3: A Variação do Erro da Temperatura

Um parâmetro importante para o projeto é a variação do erro da temperatura. Para entender o seu significado, a Figura 43 mostra duas situações.

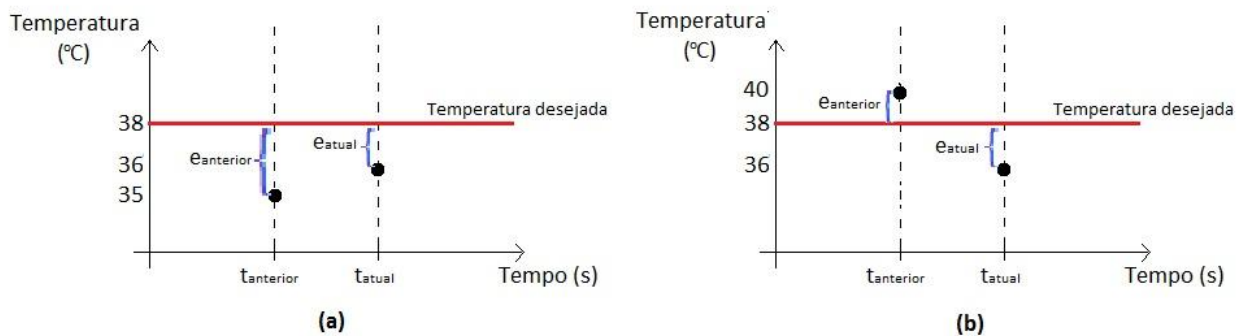


Figura 43 - Variação do Erro da Temperatura

O controlador fuzzy tomará sua decisão baseado no erro<sub>atual</sub>. Entretanto, se analisarmos a Figura 43, percebemos que, para o mesmo valor de erro<sub>atual</sub>, temos situações distintas. No caso da Figura 43(a), o valor da temperatura medida está se aproximando do valor desejado. Já no caso da Figura 43(b), o valor da temperatura medida está se distanciando do valor desejado. Deveremos então tomar decisões diferentes para cada caso.

Como já foi mencionado, o erro da temperatura é dado por:

$$E = \text{temp}_{\text{desejada}} - \text{temp}_{\text{medida}}$$

A variação do erro da temperatura é dada por:

$$\Delta E = \text{erro}_{\text{atual}} - \text{erro}_{\text{anterior}}$$

Temos então para o caso da Figura 43(a):

- $\text{erro}_{\text{atual}} = 38^{\circ}\text{C} - 36^{\circ}\text{C} = 2^{\circ}\text{C}$
- $\text{erro}_{\text{anterior}} = 38^{\circ}\text{C} - 35^{\circ}\text{C} = 3^{\circ}\text{C}$
- $\Delta E = 2^{\circ}\text{C} - 3^{\circ}\text{C} = -1^{\circ}\text{C}$

E para o caso da Figura 43(b):

- $\text{erro}_{\text{atual}} = 38^{\circ}\text{C} - 36^{\circ}\text{C} = 2^{\circ}\text{C}$
- $\text{erro}_{\text{anterior}} = 38^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C} = -2^{\circ}\text{C}$
- $\Delta E = 2^{\circ}\text{C} - (-2^{\circ}\text{C}) = 4^{\circ}\text{C}$

Podemos concluir então que se  $\Delta E < 0$  e  $\text{erro}_{\text{atual}} > 0$ , a temperatura está se aproximando do valor desejado. Já se  $\Delta E > 0$  e  $\text{erro}_{\text{atual}} > 0$ , a temperatura está se afastando do valor desejado.

A ação do controle deverá ser, para o mesmo erro<sub>atual</sub>, maior se  $\Delta E > 0$  e menor se  $\Delta E < 0$ .

Podemos exemplificar para o valor da potência, que deverá ser incrementado nos dois casos, mas no segundo terá um valor maior.



Se fizermos a mesma dedução para o caso de  $\text{erro}_{\text{atual}} < 0$ , perceberemos que o comportamento é o inverso, ou seja, se  $\Delta E < 0$ , a temperatura está se afastando do valor desejado e se  $\Delta E > 0$  a temperatura está se aproximando do valor desejado.

O valor da variação do erro não será usado pelo controle. O importante é se ele é positivo, negativo ou igual à zero.

#### 5.1.4: Conjunto Fuzzy para a abertura dos registros

Na Tabela 4 são descritas as variáveis linguísticas e seus valores para a abertura dos registros.

*Tabela 4 - Conjuntos Fuzzy para Abertura dos Registros*

Nome da variável	Incremento na abertura do registro
<b>Fecha Muito (FM)</b>	-20%
<b>Fecha (F)</b>	-10%
<b>Fecha Pouco (FP)</b>	-5%
<b>Zero (Z)</b>	0
<b>Abre Pouco (AP)</b>	+5%
<b>Abre (A)</b>	+10%
<b>Abre Muito (AM)</b>	+20%

#### 5.1.5: Conjunto Fuzzy para o acionamento da resistência elétrica

Na Tabela 5 são descritas as variáveis linguísticas e seus valores para o acionamento da potência.

Tabela 5 - Conjuntos Fuzzy para Potência Elétrica

Nome da variável	Incremento na potência
Decrementa Muito (DM)	-20%
Decrementa (D)	-8%
Decrementa Pouco (DP)	-4%
Zero (Z)	0
Incrementa Pouco (IP)	+4%
Incrementa (I)	+8%
Incrementa Muito (IM)	+20%

### 5.1.6: Base de Regras

A base de regras é uma matriz com 55 regras do tipo:

**SE** ErroTemperatura é  $\alpha$  E ErroVazão é  $\beta$  E VariçãoErroTemperatura é  $\omega$  **ENTÃO** IncrementoPotência é  $\mu$  E IncrementoAberturaRegistroQuente é  $\lambda$  E IncrementoAberturaRegistroFrio é  $\theta$ .

Onde  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\omega$ ,  $\mu$ ,  $\lambda$  e  $\theta$  são as variáveis linguísticas apresentadas anteriormente.

A matriz com todas as combinações possíveis é mostrada na Figura 44.

A saída de cada regra está de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Saídas do controlador

Incremento na Potencia
Incremento na Abertura do Registro Quente
Incremento na Abertura do Registro Frio

ErroT ErroV	Muito Negativo		Negativo		Zero			Positivo		Muito Positivo	
	Muito Negativo	DM	D	D	DP	DP	Z	IP	IP	I	I
FM		FM	F	F	FM	F	F	FP	FP	FP	FP
FP		FP	FP	FP	F	F	FM	F	F	FM	FM
Negativo	DM	D	D	DP	DP	Z	IP	IP	I	I	IM
	FM	F	F	FP	F	FP	FP	Z	AP	AP	A
	A	AP	AP	Z	FP	FP	F	FP	F	F	FM
Zero	DM	D	D	DP	DP	Z	IP	IP	I	I	IM
	FM	F	F	FP	FP	Z	AP	AP	A	A	AM
	AM	A	A	AP	AP	Z	FP	FP	F	F	FM
Positivo	DM	D	D	DP	DP	Z	IP	IP	I	I	IM
	F	FP	FP	Z	AP	AP	A	AP	A	A	AM
	AM	A	A	AP	A	AP	AP	Z	FP	FP	F
Muito Positivo	DM	D	D	DP	DP	Z	IP	IP	I	I	IM
	AP	AP	AP	AP	A	A	AM	FP	FP	FP	FP
	AM	AM	A	A	AM	A	A	F	F	FM	FM
$\Delta$ ErroTemp	$\leq 0$	$> 0$	$\leq 0$	$> 0$	$< 0$	$= 0$	$> 0$	$< 0$	$\geq 0$	$< 0$	$\geq 0$

Figura 44 - Matriz de Regras

### 5.1.7: Inferência

Como já foi mencionado na seção 4.2.3, temos dois principais métodos de inferência: o de Mandani e o de Takagi-Sugeno.

O método de Mamdani é largamente aceito para capturar conhecimento de especialista. Ele consegue representar e armazenar o conhecimento do especialista de modo intuitivo, apresentando similaridades com os seres humanos. Contudo, este método é em geral computacionalmente custoso [10].

O método de Takagi-Sugeno é computacionalmente mais barato e funciona bem com técnicas de otimização e adaptivas. Estes fatores tornam esta opção atrativa para problemas de controle, particularmente para sistemas dinâmicos não-lineares [10].

Tendo em vista que o projeto será implementado em um microcontrolador de 8 bits, o custo computacional foi o fator decisivo para a escolha de Takagi-Sugeno como método de inferência.

## 5.2: Funcionamento do controle: Um exemplo.

Para entender o funcionamento do controle vamos supor que o usuário definiu as seguintes condições para seu banho:

- Vazão desejada = 4.0 l/min.
- Temperatura desejada = 38°C.

Agora vamos analisar quais serão as saídas do controlador fuzzy no tempo  $t_{\text{atual}}$  sendo que:

- A temperatura medida no instante  $t_{\text{atual}}$  é de 36°C.
- A temperatura medida no instante  $t_{\text{anterior}}$  é de 35°C.
- A vazão medida no instante  $t_{\text{atual}}$  é de 3.8 l/min.
- $t_{\text{anterior}} = t_{\text{atual}} - 2$ , pois o período de amostragem é de 2 segundos.

A Figura 45 ilustra essa situação.

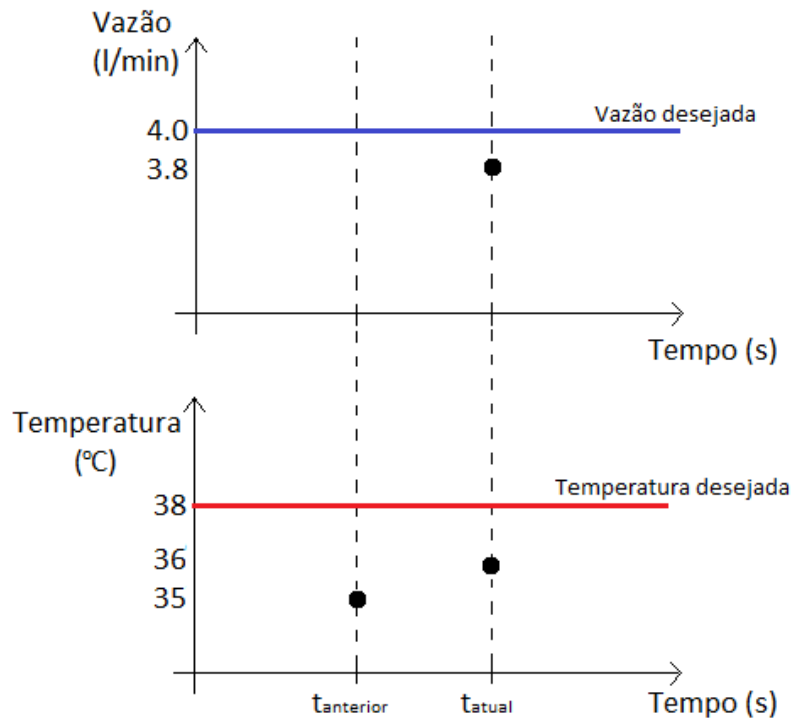


Figura 45 – Valores das Variáveis do Sistema

Agora será demonstrada a sequência de eventos que o controlador fuzzy executará, de acordo com a metodologia apresentada no capítulo 4.

O primeiro passo é a fuzzificação das entradas do controlador, que são:

- Erro da temperatura = Temperatura desejada – Temperatura medida

$$\text{Erro Temperatura} = 38^{\circ}\text{C} - 36^{\circ}\text{C} = 2^{\circ}\text{C}$$

- Erro da vazão = Vazão desejada – Vazão medida.

$$\text{Erro Vazão} = 4.0 \text{ l/min} - 3.8 \text{ l/min} = 0.2 \text{ l/min}$$

- Variação do erro da temperatura = Erro atual – Erro anterior

$$\Delta\text{ErroTemp} = 2^{\circ}\text{C} - 3^{\circ}\text{C} = -1^{\circ}\text{C}$$

Devemos então encontrar o grau de pertinência desses valores em cada conjunto fuzzy. Isso é feito como foi explicado na seção 4.1.2.

Para o erro da temperatura temos:

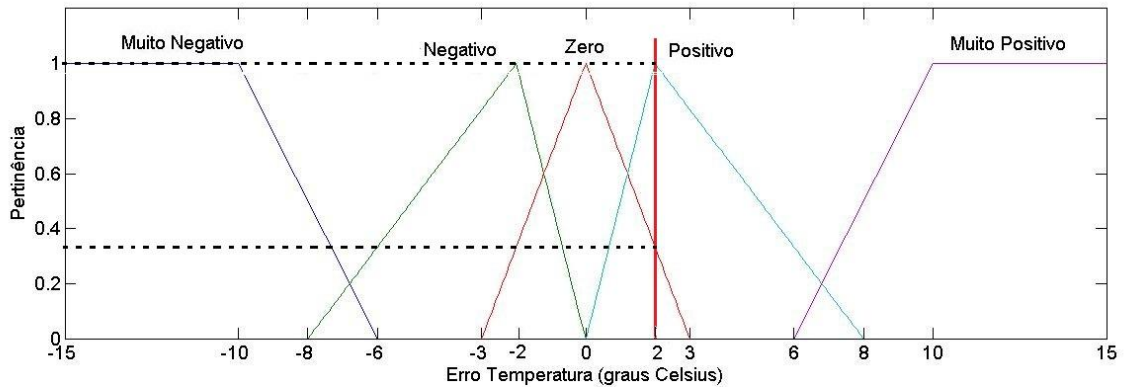


Figura 46 - Graus de Pertinência para o Erro da Temperatura

$$\mu_{MUITO NEGATIVO}(2^{\circ}C) = \mu_{NEGATIVO}(2^{\circ}C) = \mu_{MUITO POSITIVO}(2^{\circ}C) = 0$$

$$\mu_{ZERO}(2^{\circ}C) = \frac{3 - 2}{3 - 0} = 0.33$$

$$\mu_{POSITIVO}(2^{\circ}C) = \frac{2 - 0}{2 - 0} = 1$$

Para o erro da vazão temos:

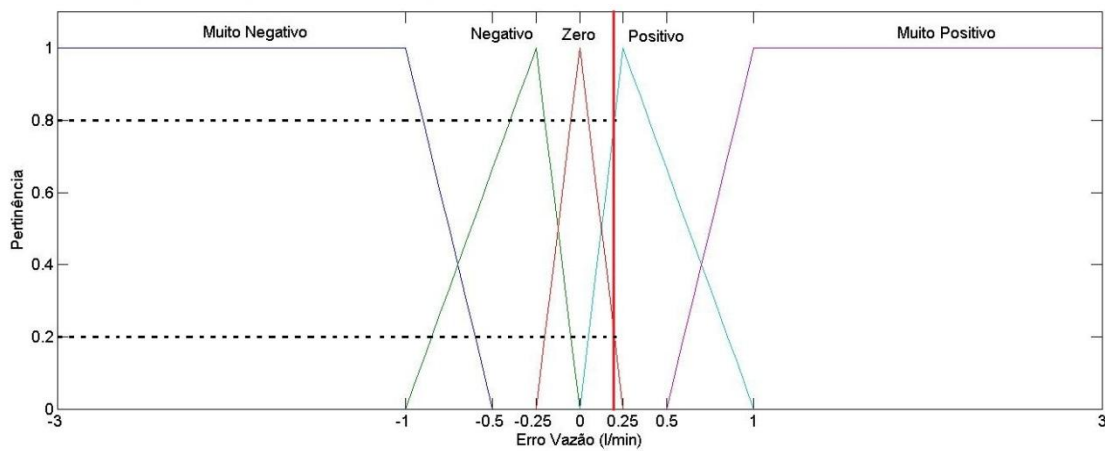


Figura 47 - Graus de Pertinência para o Erro da Vazão

$$\mu_{MUITO\ NEGATIVO}(2^{\circ}C) = \mu_{NEGATIVO}(2^{\circ}C) = \mu_{MUITO\ POSITIVO}(2^{\circ}C) = 0$$

$$\mu_{ZERO}(0.2l/min) = \frac{0.25 - 0.2}{0.25 - 0} = 0.2$$

$$\mu_{POSITIVO}(0.2l/min) = \frac{0.2 - 0}{0.25 - 0} = 0.8$$

Para a variação do erro da temperatura, somente o sinal é necessário para o controle. No caso o sinal é negativo.

O próximo passo é verificar quais regras da matriz de regras são ativadas para esse caso, ou seja, onde:

- *ErroTemperatura = zero* **E** *ErroVazão = zero* **E**  $\Delta\text{ErroTemp} \leq 0$
- *ErroTemperatura = zero* **E** *ErroVazão = positivo* **E**  $\Delta\text{ErroTemp} \leq 0$
- *ErroTemperatura = positivo* **E** *ErroVazão = zero* **E**  $\Delta\text{ErroTemp} \leq 0$
- *ErroTemperatura = positivo* **E** *ErroVazão = positivo* **E**  $\Delta\text{ErroTemp} \leq 0$

Observando a Figura 48 percebemos que as 4 regras ativadas são :

ErroT \ ErroV	Muito Negativo		Negativo		Zero			Positivo		Muito Positivo	
	DM	D	D	DP	DP	Z	IP	IP	I	I	IM
<b>Muito negativo</b>	DM	D	D	DP	DP	Z	IP	IP	I	I	IM
	FM	FM	F	F	FM	F	F	FP	FP	FP	FP
	FP	FP	FP	FP	F	F	FM	F	F	FM	FM
<b>Negativo</b>	DM	D	D	DP	DP	Z	IP	IP	I	I	IM
	FM	F	F	FP	F	FP	FP	Z	AP	AP	A
	A	AP	AP	Z	FP	FP	F	FP	F	F	FM
<b>Zero</b>	DM	D	D	DP	DP	Z	IP	IP	I	I	IM
	FM	F	F	FP	FP	Z	AP	AP	A	A	AM
	AM	A	A	AP	AP	Z	FP	FP	F	F	FM
<b>Positivo</b>	DM	D	D	DP	DP	Z	IP	IP	I	I	IM
	F	FP	FP	Z	AP	AP	A	AP	A	A	AM
	AM	A	A	AP	A	AP	AP	Z	FP	FP	F
<b>Muito Positivo</b>	DM	D	D	DP	DP	Z	IP	IP	I	I	IM
	AP	AP	AP	AP	A	A	AM	FP	FP	FP	FP
	AM	AM	A	A	AM	A	A	F	F	FM	FM
$\Delta\text{ErroTemp}$	$\leq 0$	$> 0$	$\leq 0$	$> 0$	$< 0$	$= 0$	$> 0$	$< 0$	$\geq 0$	$< 0$	$\geq 0$

Figura 48 - Regras ativadas - exemplo



E possuem os seguintes significados:

1. **SE** ErroTemperatura é zero E ErroVazão zero E VariçãoErroTemperatura é negativa **ENTÃO** IncrementoPotência é DP E IncrementoAberturaRegistroQuente é FP E IncrementoAberturaRegistroFrio é AP.
2. **SE** ErroTemperatura é zero E ErroVazão é positivo E VariçãoErroTemperatura é negativa **ENTÃO** IncrementoPotência é DP E IncrementoAberturaRegistroQuente é AP E IncrementoAberturaRegistroFrio é A.
3. **SE** ErroTemperatura é positivo E ErroVazão zero E VariçãoErroTemperatura é negativa **ENTÃO** IncrementoPotência é IP E IncrementoAberturaRegistroQuente é AP E IncrementoAberturaRegistroFrio é FP.
4. **SE** ErroTemperatura é positivo E ErroVazão positivo E VariçãoErroTemperatura é negativa **ENTÃO** IncrementoPotência é IP E IncrementoAberturaRegistroQuente é AP E IncrementoAberturaRegistroFrio é Z.

Sabendo quais regras foram ativadas, basta então o sistema de inferência calcular a saída do controlador.

O mecanismo de inferência pode ser visualizado na figura Figura 49.

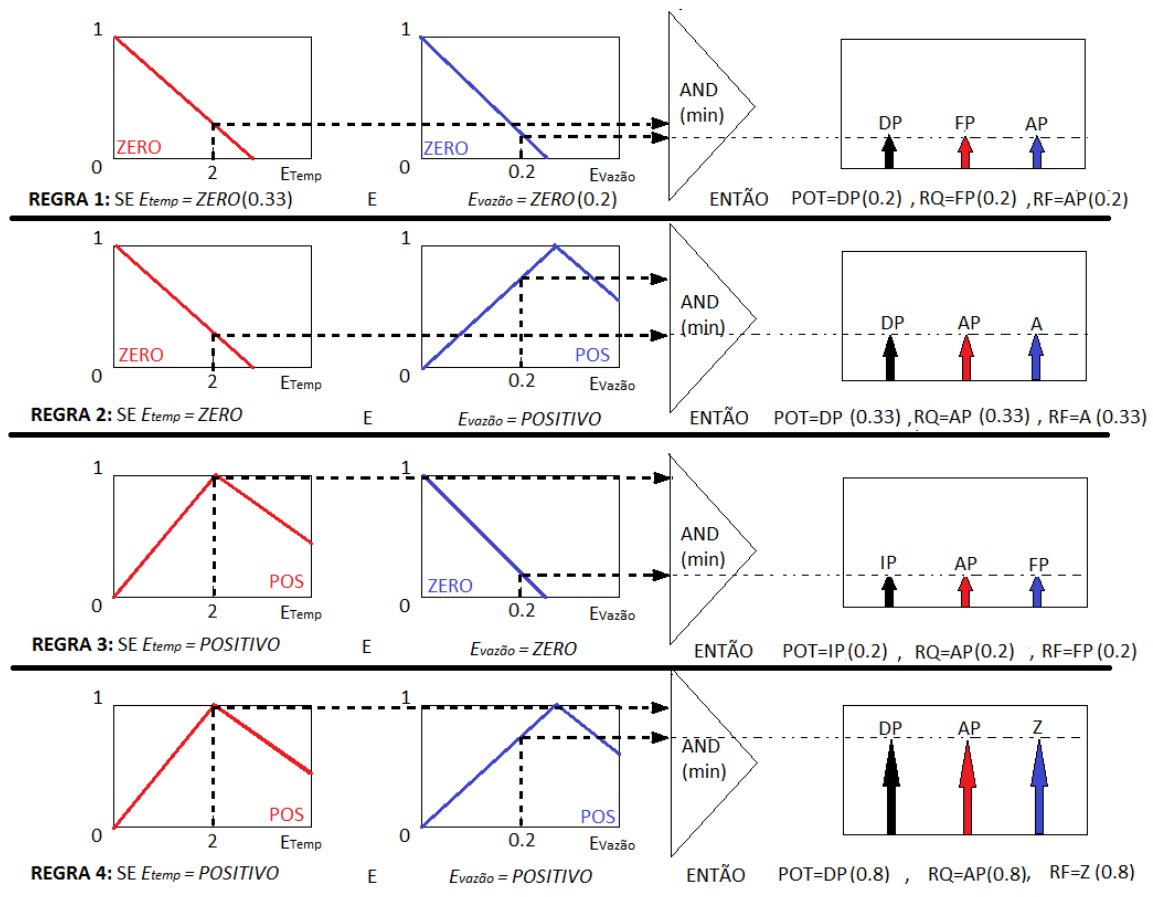


Figura 49 - Mecanismo de Inferência do exemplo

Como foi definido na seção 4.2.3, calculamos o grau de pertinência de cada regra com o operador *min* entre os graus de pertinência dos antecedentes das proposições de cada regra:

$$\mu_1 = \min\{0.33, 0.2\} = 0.2$$

$$\mu_2 = \min\{0.33, 0.8\} = 0.33$$

$$\mu_3 = \min\{1, 0.2\} = 0.2$$

$$\mu_4 = \min\{1, 0.8\} = 0.8$$

A Tabela 7 mostra o grau de pertinência e também o valor para cada saída de cada regra.

Tabela 7 - Grau de Pertinência das Regras Ativadas

	$\mu$	Potência	Registro Quente	Registro Frio
<b>Regra 1</b>	$\mu_1 = 0.2$	$P_1 = DP$	$RQ_1 = FP$	$RF_1 = AP$
<b>Regra 2</b>	$\mu_2 = 0.33$	$P_2 = DP$	$RQ_2 = AP$	$RF_2 = A$
<b>Regra 3</b>	$\mu_3 = 0.2$	$P_3 = IP$	$RQ_3 = AP$	$RF_3 = FP$
<b>Regra 4</b>	$\mu_4 = 0.8$	$P_4 = IP$	$RQ_4 = AP$	$RF_4 = Z$

O último passo é então a agregação das saídas, que é feita através da média ponderada das saídas de cada regra com os graus de pertinência de cada uma delas. Esses cálculos são demonstrados a seguir:

$$\text{Potência} = \frac{P_1 \cdot \mu_1 + P_2 \cdot \mu_2 + P_3 \cdot \mu_3 + P_4 \cdot \mu_4}{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4}$$

$$\text{Abertura Registro Quente} = \frac{RQ_1 \cdot \mu_1 + RQ_2 \cdot \mu_2 + RQ_3 \cdot \mu_3 + RQ_4 \cdot \mu_4}{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4}$$

$$\text{Abertura Registro Frio} = \frac{RF_1 \cdot \mu_1 + RF_2 \cdot \mu_2 + RF_3 \cdot \mu_3 + RF_4 \cdot \mu_4}{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4}$$

Substituindo as saídas pelos valores das tabelas Tabela 4 e Tabela 5, temos que:

$$\text{Potência} = \frac{-4 \cdot (0.2) - 4 \cdot (0.33) + 4 \cdot (0.2) + 4 \cdot (0.8)}{0.2 + 0.33 + 0.2 + 0.8} = 1.22$$

$$\text{Abertura Registro Quente} = \frac{-5 \cdot (0.2) + 5 \cdot (0.33) + 5 \cdot (0.2) + 5 \cdot (0.8)}{0.2 + 0.33 + 0.2 + 0.8} = 3.69$$

$$\text{Abertura Registro Frio} = \frac{5 \cdot (0.2) + 10 \cdot (0.33) - 5 \cdot (0.2) + 0 \cdot (0.8)}{0.2 + 0.33 + 0.2 + 0.8} = 2.17$$

Isso significa que teremos as seguintes saídas do controlador no instante  $t_{\text{atual}}$ :

- Incremento de 1.22% na potência dissipada pela resistência elétrica.
- Abertura de 3.69% no registro da entrada de água quente.
- Abertura de 2.17% no registro da entrada de água fria.

Esses resultados são coerentes, visto que o usuário deseja aumentar a temperatura e também a vazão de banho.

### **5.3: Considerações Finais**

Nesse capítulo pode-se entender como que o sistema irá calcular um valor para a potência elétrica dissipada pela resistência e para as aberturas dos registros a partir dos valores de temperatura e de vazão medidos pelos sensores.

Explicou-se como foi projetada a inteligência artificial que o sistema possui e com certeza essa fase do projeto foi a mais trabalhosa e a que demandou mais tempo de desenvolvimento.

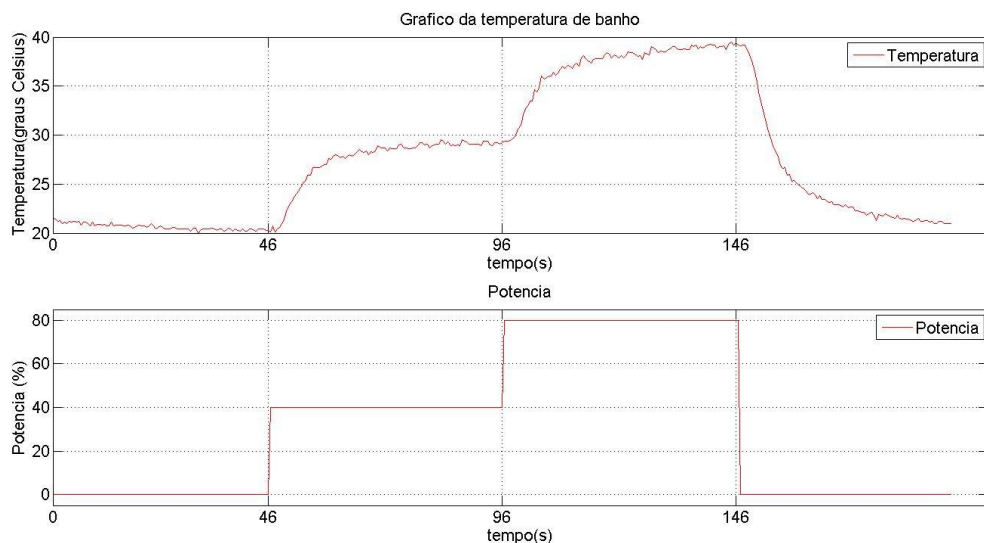
No próximo capítulo os objetivos e especificações de controle serão avaliados através de experimentos.

## 6. RESULTADOS

Nesse capítulo serão demonstrados os resultados do trabalho, através de gráficos contendo as variáveis controladas e as variáveis de controle. Eles foram obtidos com experimentos realizados no protótipo apresentado na seção 3.2.8. O objetivo da análise desses resultados é validar e avaliar o controle projetado.

Antes de analisar a resposta em malha fechada com o controle implementado, serão apresentadas as respostas do sistema em malha aberta para verificar a sua dinâmica.

A primeira relação estudada é como varia a temperatura da água com a variação da potência da resistência elétrica. Na Figura 50 pode-se visualizar o comportamento do sistema nessa situação. A vazão foi mantida constante em 3 l/min durante o experimento.



*Figura 50 - Resposta em Malha Aberta variando a Potência*

Ampliando esse gráfico entre os instantes de 96 e 146 segundos podemos analisar mais detalhadamente a dinâmica da resposta, conforme é mostrado na Figura 51.

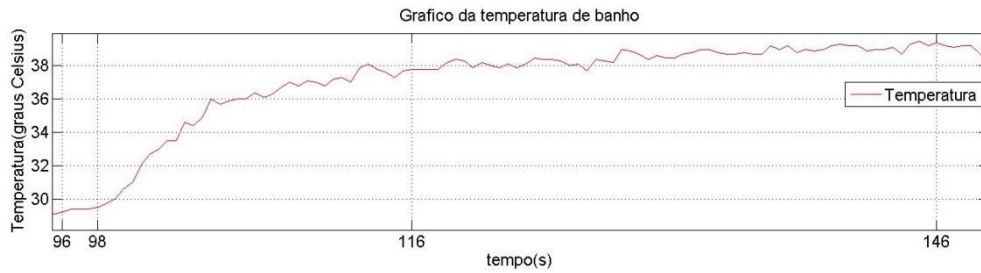


Figura 51 - Análise da Resposta em Malha Aberta variando a Potência

Verifica-se a presença de um atraso de transporte de 2 segundos, ou seja, a temperatura de saída modificará seu valor somente 2 segundos após uma mudança na potência. O tempo para o sistema atingir o regime permanente é de cerca de 20 segundos.

Já na Figura 52 pode-se visualizar como varia a temperatura da água com a variação da abertura dos registros. A potência da resistência não foi acionada, a temperatura da água fria é de 22°C e a da água quente é de 40°C durante esse experimento.

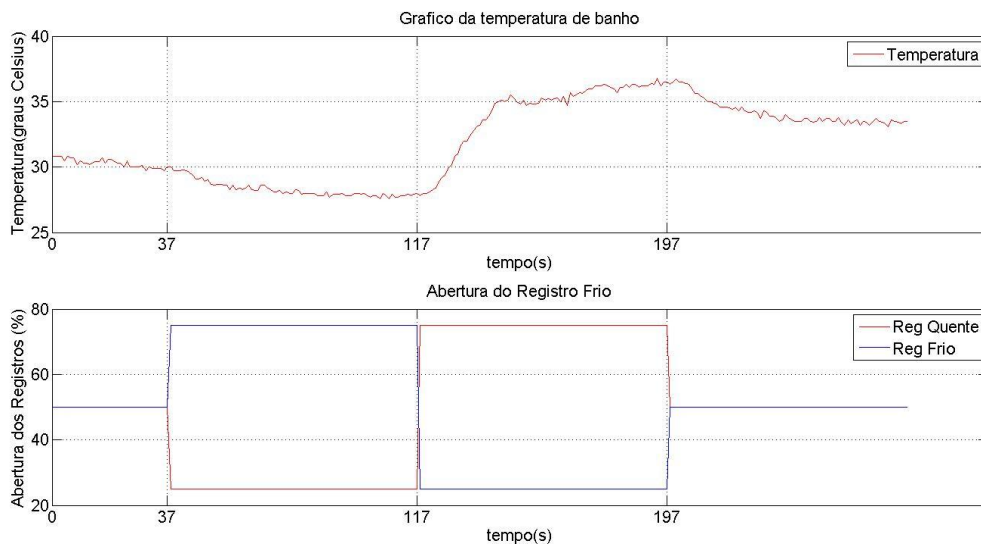


Figura 52 - Resposta em Malha Aberta variando a abertura dos Registros

Ampliando esse gráfico entre os instantes de 117 e 144 segundos é possível analisar mais detalhadamente a dinâmica da resposta, conforme a Figura 53.



*Figura 53 - Análise da Resposta em Malha Aberta variando a abertura dos Registros*

Verifica-se um atraso de transporte de 4 segundos, ou seja, a temperatura de saída alterará seu valor somente 4 segundos após uma mudança na abertura dos registros. Esse atraso ocorre devido à distância que existe entre os registros e o sensor de temperatura. Na Figura 7 pode-se entender melhor essa ideia. O tempo para o sistema atingir o regime permanente é de cerca de 30 segundos.

Com a análise do comportamento do sistema em malha aberta abordada, serão apresentados a seguir alguns cenários para avaliar o desempenho do controlador.

## 6.1: Situação 1

As seguintes considerações foram feitas para o primeiro cenário experimentado:

- A temperatura da água proveniente do aquecedor solar é baixa, ou seja, simulando um dia nublado onde a radiação solar seria insuficiente para o aquecimento da água.
- A temperatura desejada é inicialmente de 34°C e a vazão desejada é de 3.5 l/min.
- No decorrer do tempo foram feitas alterações no valor da temperatura desejada. Isso ocorreu da seguinte forma:
  - No instante de 40 segundos o valor passou para 41°C.
  - No instante de 84 segundos o valor passou para 35°C.
  - No instante de 136 segundos o valor passou para 28°C.
  - No instante de 184 segundos o valor passou para 37°C.

A resposta do sistema para essas condições pode ser visualizada na Figura 54.

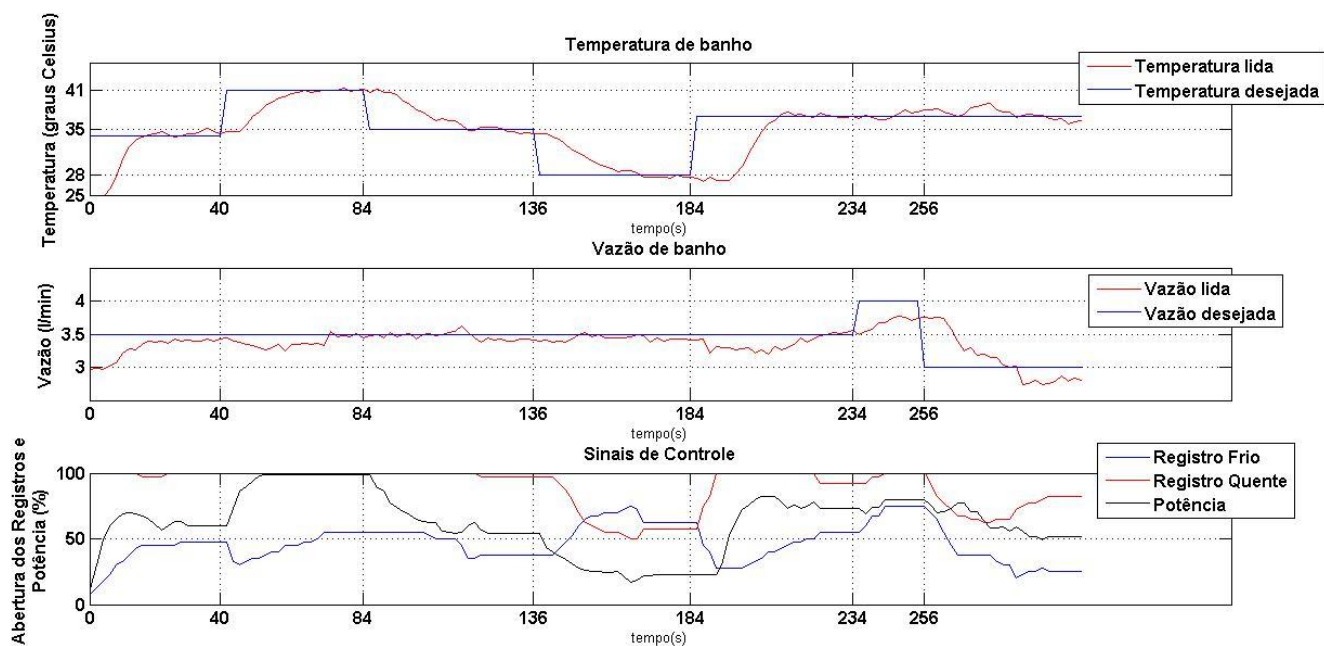


Figura 54 - Resposta do Sistema para Cenário 1

Analisando a resposta para essa situação, verifica-se que o tempo de resposta para a temperatura é em média de 20 segundos e os sobressinais são praticamente nulos. É possível observar também pequenas variações na vazão de saída, mesmo que o valor da vazão desejada não se altere. Isso ocorre porque o sistema tenta ajustar a temperatura através de modificações simultâneas na potência e na abertura dos registros, pois o controlador não possui a informação do valor da temperatura da água proveniente do boiler.

## 6.2: Situação 2

O segundo cenário a ser experimentado foi o seguinte:

- A temperatura da água proveniente do aquecedor solar é alta, ou seja, simulando um dia ensolarado onde a radiação solar seria alta e o aquecimento da água do boiler ocorreria de maneira eficiente.



- A temperatura desejada é inicialmente de 34°C e a vazão desejada é mantida constante no valor de 3.5 l/min.
- No decorrer do tempo foram feitas alterações no valor da temperatura desejada. Isso ocorreu da seguinte forma:
  - No instante de 38 segundos o valor passou para 41°C.
  - No instante de 86 segundos o valor passou para 35°C.
  - No instante de 136 segundos o valor passou para 28°C.
  - No instante de 192 segundos o valor passou para 37°C.

A resposta do sistema para essas condições pode ser visualizada na Figura 55.

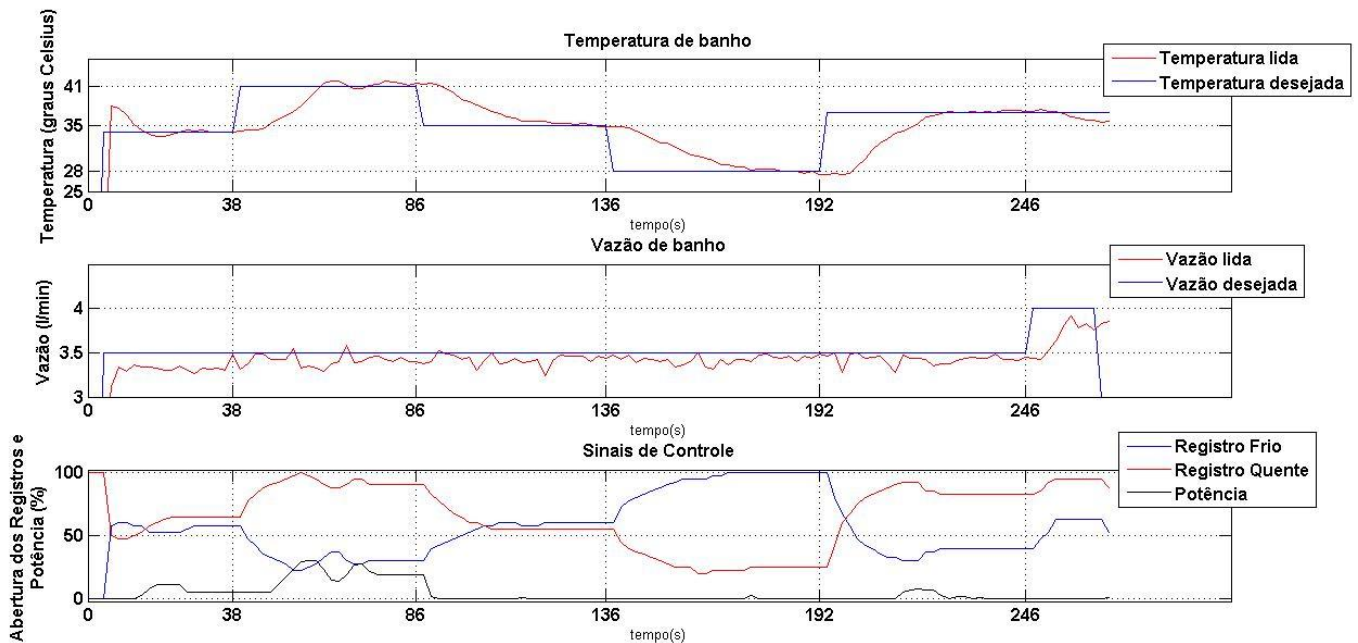


Figura 55 - Resposta do Sistema para Cenário 2

Analisando os sinais de controle da resposta desse cenário, é possível observar que a potência elétrica é muito pouco utilizada, ao contrário da situação 1. Isso atende ao critério estabelecido de economia de energia e prova que o sistema é capaz de ajustar a temperatura de saída variando as aberturas dos registros de entrada.

Comparando essa resposta com a da situação 1, percebe-se que ela é um pouco mais lenta. Isso é coerente se analisarmos as respostas em malha aberta para a variação da potência e para a variação das aberturas dos registros apresentadas no início desse capítulo.

### 6.3: Situação 3

O terceiro cenário a ser experimentado foi o seguinte:

- A temperatura da água proveniente do aquecedor solar é baixa.
- A temperatura desejada é mantida constante no valor de 36°C e a vazão desejada inicialmente é de 3.5 l/min.
- No decorrer do tempo foram feitas alterações no valor da vazão desejada. Isso ocorreu da seguinte forma:
  - No instante de 45 segundos o valor passou para 4 l/min.
  - No instante de 67 segundos o valor passou para 3 l/min.
  - No instante de 91 segundos o valor passou para 5 l/min.
  - No instante de 139 segundos o valor passou para 2.5 l/min.

A resposta do sistema para essas condições é visualizada na Figura 56.

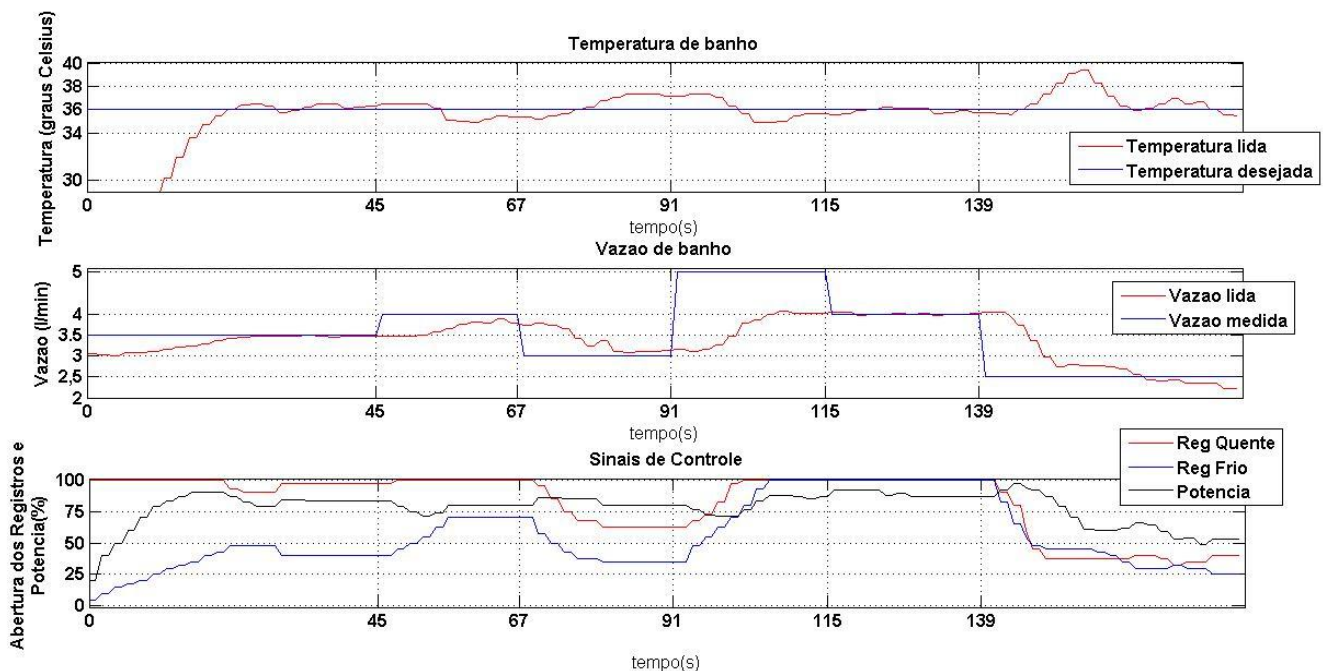


Figura 56 - Resposta do Sistema para Cenário 3

Apesar desse cenário não ser muito usual na prática, pois geralmente o usuário irá se preocupar mais em ajustar a temperatura da água, o sistema consegue atender de forma satisfatória as mudanças no valor de vazão desejada. A resposta da vazão é de certa forma lenta para evitar grandes oscilações na temperatura. Entretanto, observa-se que a temperatura aumenta um pouco quando reduzimos muito a vazão de água, no instante de 139 segundos. O motivo de isso acontecer será mais bem entendido na análise do próximo cenário.

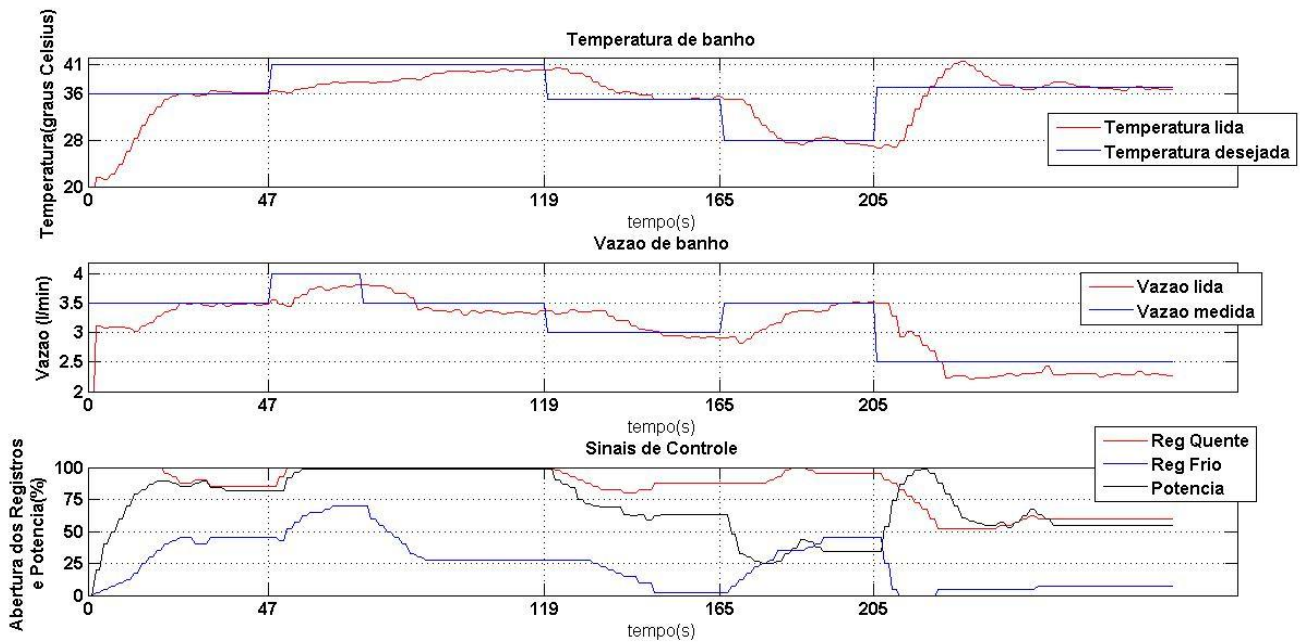
Outro ponto a ser observado é que no instante de 91 segundos a vazão desejada passa para 5 l/min, mas o sistema não consegue atingir essa vazão mesmo com os dois registros abertos completamente. O controlador mudará então, automaticamente, o valor da vazão desejada para o valor da vazão medida, que é a máxima que o sistema consegue proporcionar.

#### **6.4: Situação 4**

Nesse cenário as seguintes considerações são adotadas:

- A temperatura da água proveniente do aquecedor solar é baixa.
- A temperatura desejada é inicialmente de 36°C e a vazão desejada é de 3.5 l/min.
- No decorrer do tempo foram feitas alterações nos valores da temperatura desejada e da vazão desejada simultaneamente. Isso ocorreu da seguinte forma:
  - No instante de 47 segundos o valor da temperatura desejada passou para 41°C e a vazão desejada passou para 4 l/min.
  - No instante de 119 segundos o valor da temperatura desejada passou para 35°C e a vazão desejada passou para 3 l/min.
  - No instante de 165 segundos o valor da temperatura desejada passou para 28°C e a vazão desejada passou para 3.5 l/min.
  - No instante de 205 segundos o valor da temperatura desejada passou para 37°C e a vazão desejada passou para 2.5 l/min.

A resposta do sistema para essas condições pode ser visualizada na Figura 57.



*Figura 57 - Resposta do Sistema para Cenário 4*

Com base no gráfico apresentado, percebe-se que o sistema não consegue atingir a temperatura de 41°C para uma vazão de 4 l/min. Como a temperatura tem prioridade sobre a vazão, o sistema decrementa a vazão desejada em 0.5 l/min e, com uma vazão de 3.5 l/min, a temperatura de 41°C é então atingida.

Observa-se também que no instante de 205 segundos, quando a temperatura desejada aumenta e a vazão desejada diminui, ocorre um sobressinal na resposta da temperatura. Esse comportamento indesejado ocorre devido ao tempo de resposta da temperatura ser maior que o da vazão. Para eliminá-lo, teria que alterar alguns parâmetros do controlador fuzzy. Entretanto, essa modificação iria piorar a resposta do sistema em outras situações mais usuais e importantes.

## 6.5: Considerações Gerais

Analisando os experimentos demonstrados, podem-se destacar algumas considerações gerais:

- O controlador não conseguirá eliminar os atrasos de transporte mencionados, pois eles são intrínsecos do próprio sistema.

- As respostas para todos os casos apresentam valores baixos de sobressinais e poucas oscilações. Isso é muito importante se pensar no conforto do banho, visto que oscilações de temperatura seriam sentidas pelo usuário. Para que isso fosse possível, os valores das variáveis fuzzy de saída não puderam ser muito altos e o tempo para que o sistema atingisse o regime permanente não pôde ser muito minimizado.
- Os ruídos observados tanto no sinal de temperatura como no sinal de pressão não são significativos para prejudicar o desempenho do controlador.

## 7. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

O desenvolvimento do sistema de controle fuzzy para a temperatura e vazão de um chuveiro elétrico foi realizado com êxito. Com isso, os grandes desperdícios de água e energia elétrica que acontecem nos chuveiros com sistemas auxiliares de aquecimento poderão ser minimizados com o uso desse controlador.

Além da economia que ele proporcionará, o conforto e a praticidade do banho também serão grandes atrativos para o consumidor.

Os resultados de experimentos simulando típicas situações de banho foram apresentados de forma gráfica. Eles permitiram verificar o desempenho do controlador fuzzy e provar que ele é capaz de manter as variáveis controladas (temperatura e vazão) próximas aos valores desejados.

A maior dificuldade em realizar esse projeto foi definir as regras e os parâmetros do controlador. Isso porque, além de ser em grande quantidade, a alteração em um deles muitas vezes melhora a resposta do sistema em um aspecto ou cenário e piora em outro. Fazer a ponderação entre o conforto e a economia foi o principal desafio.

Como sugestão para trabalhos futuros pode-se destacar:

- Aperfeiçoamento do controlador fuzzy para que melhore seu desempenho tanto no tempo de resposta como na redução do erro em regime permanente;
- Desenvolvimento da placa eletrônica com a fonte de 5V integrada nela;
- Implantação de um sensor de temperatura na entrada de água quente do chuveiro, visando antecipar a ação do controlador quando a temperatura dela variar.
- Desenvolvimento do projeto mecânico do chuveiro, visando seu melhor funcionamento e também a produção em larga escala do produto;
- Desenvolvimento da interface do chuveiro, ou seja, o controle remoto onde o usuário entrará com os valores desejados e o visor LCD onde o usuário visualizará os valores presentes.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Gomide, F. A. C. - Conceitos Fundamentais da Teoria de Conjuntos Fuzzy, Lógica Fuzzy e Aplicações.
- [2] Pereira, V. G. – Controle Automático de Adição de  $AlF_3$  em Cubas de Redução de Alumínio, usando Lógica Fuzzy.
- [3] Lógica Nebulosa. Disponível em:  
< <http://www.ele.ita.cta.br/~janilson/sinteseFuzzy.html> >. Acesso em: 5 jul. 2012.
- [4] Servomotores. Disponível em:  
< <http://www.pictronics.com.br/downloads/apostilas/servomotores.pdf> >. Acesso em: 5 mai. 2012.
- [5] Lógica Fuzzy . Disponível em:  
< <http://dc432.4shared.com/doc/Ltwlef4i/preview.html> >. Acesso em: 8 mai. 2012.
- [6] Lógica Fuzzy . Disponível em:  
< <http://s2i.das.ufsc.br/tikiwiki/apresentacoes/logica-fuzzy.pdf> >. Acesso em: 15 mai. 2012.
- [7] STMICROELECTRONICS. Reference Manual STM8L-Discovery. Disponível em:  
< [www.st.com](http://www.st.com) >. Acesso em: 22 abr. 2012).
- [8] Lógica Fuzzy . Disponível em: < <http://www.pucsp.br/~logica/Fuzzy.htm> >. Acesso em: 05 jun. 2012.
- [9] Miranda, P. - Sistema de Controle Difuso de Mamdani Aplicações: Pêndulo Invertido e outras.
- [10] Sistemas Nebulosos . Disponível em: < <http://www.cin.ufpe.br/~aluizioa/Aut-Int/Aut-Int-06-sistemas-nebulosos-02.pdf> >. Acesso em: 8 abr. 2012.
- [11] Técnicas de medição de pressão . Disponível em:  
<<http://www.dca.ufrn.br/~acari/Sistemas%20de%20Medida/SLIDES%20INSTRUMENTACAO%20PRESSAO.pdf> >. Acesso em: 8 jul. 2012.

[12] Lógica Fuzzy . Disponível em:

< [http://www.lps.usp.br/neo/fuzzy/fuzzy\\_historico.html](http://www.lps.usp.br/neo/fuzzy/fuzzy_historico.html) >. Acesso em: Acesso em: 8 jul. 2012.

[13] STMICROELECTRONICS. User Manual Developing and debugging your STM8L -DISCOVERY application code. Disponível em: < [www.st.com](http://www.st.com) >. Acesso em: 22 abr. 2012).

[14] STMICROELECTRONICS. Reference Manual STM8L15x and STM8L16x microcontroller family. Disponível em: < [www.st.com](http://www.st.com) >. Acesso em: 22 abr. 2012).

[15] Lógica Fuzzy . Disponível em: < [http://api.adm.br/evalforum/?page\\_id=48](http://api.adm.br/evalforum/?page_id=48) >. Acesso em: Acesso em: 12 jun. 2012.

[16] STMICROELECTRONICS. BTA40 and BTA/BTB41 Series Datasheet. Disponível em: < [www.st.com](http://www.st.com) >. Acesso em: 22 abr. 2012).

[17] Sensor de Temperatura LM35 . Disponível em:

< <http://www.webtronico.com/lm35-sensor-de-temperatura.html> >. Acesso em: Acesso em: 10 jun. 2012.