



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELECTRÓNICA

Trabalho de Licenciatura

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLO DE VARIÁVEIS
FÍSICAS EM INCUBADORAS NEONATAIS COM RECURSO A TECNOLOGIA
FUZZY**

Autor: Amelai, Pedro Estefene

Supervisor: Prof. Eng. Omar Anlaue

Supervisor da Disciplina: Engº. Hélder Baloi

Maputo, Dezembro de 2024



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

CURSO DE ENGENHARIA ELECTRÓNICA

Trabalho de Licenciatura

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLO DE VARIÁVEIS FÍSICAS
EM INCUBADORAS NEONATAIS COM RECURSO A TECNOLOGIA FUZZY**

Autor: Amelai, Pedro Estefene

Supervisor: Prof. Eng. Omar Anlaue

Supervisor da Disciplina: MSc. Hélder Baloi Eng^o

Maputo, Dezembro de 2024



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉNICA

AVALIAÇÃO DOS SUPERVISORES

Autor: Amelai, Pedro Estefene

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLO DE VARIÁVEIS FÍSICAS
EM INCUBADORAS NEONATAIS COM RECURSO A TECNOLOGIA FUZZY**

Supervisor

Nota

(Prof. Eng. Omar Anlaue)



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTRÓNICA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELECTRÓNICA

TERMO DE ENTREGA DE RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o estudante **Pedro Estefene Amelai** entregou no dia 12/12/2024 as **3** cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com referência: **2024TLCD13**.

Intitulado: **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLO DE VARIÁVEIS FÍSICAS EM INCUBADORAS NEONATAIS COM RECURSO A TECNOLOGIA FUZZY**

Maputo, 12 de Dezembro de 2024

A chefe da Secretaria

(Arlete Chiconela)

DEDICATÓRIAS

Quero dedicar este trabalho primeiramente aos meus progenitores, em particular ao meu Pai que em vida tudo fez para a minha formação como pessoa e profissional se tronasse uma realidade, a minha Mãe pelas sábias palavras de incentivo e aos puxões de orelhas, mas com um propósito único da que era a minha educação.

Dedico também aos meus irmãos, que dia e noite trabalharam para o meu sustento material na faculdade, me ajudando financeiramente para aquisição de fichas e material informático para auxiliar a minha formação, pois se mostraram verdadeiros irmãos, e espero um dia poder retribuí-lo em dobro.

A minha esposa Teresa Paulo e a minha filha Estefânia Estefene Amilai, quero endereçar também a minha dedicatória pelo suporte e pela espera, nas minhas ausências académicas.

Não vou deixar de fora todo elenco do Departamento de Engenharia Electrotécnica, particularmente aos docentes, e em modo especial ao meu Supervisor Prof. Eng. Omar Anlaue

A vocês dedico esse trabalho!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer à Deus pelo dom da vida, pois se há vida há esperança, esperança essa que me manteve firme em continuar a estudar com vista a alcançar os meus objectivos.

Dedico também aos meus pais, irmãos, familiares e aos demais amigos, mas gostaria de sublinhar Belchior Conde, José Santos, Morais Maurício Donaldo João Moiane, Manuel Sota, e Ladino Zunguze, vocês são mais que simples amigos.

RESUMO

O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de controle de variáveis físicas em incubadoras neonatais utilizando tecnologia fuzzy. O objectivo principal é otimizar o controle da temperatura e humidade dentro da incubadora, garantindo um ambiente adequado para o recém-nascido. O sistema utiliza a lógica fuzzy para lidar com a imprecisão e a variabilidade dos parâmetros, proporcionando ajustes contínuos e suaves, em contraste com sistemas de controle tradicionais baseados em limites fixos. O controle fuzzy permite a definição de regras baseadas em conhecimento humano e experiência. O sistema foi desenvolvido com base em modelos matemáticos de controle fuzzy, implementado em uma plataforma computacional, e avaliado em cenários simulados de operação da incubadora. Os resultados demonstram que o sistema fuzzy melhora significativamente a estabilidade do ambiente controlado, mantendo a temperatura e a humidade dentro dos níveis desejados, mesmo em situações de variação das condições externas. O estudo contribui para a área de automação hospitalar, proporcionando uma alternativa eficiente e adaptativa para o controle de variáveis críticas em incubadoras neonatais.

Palavras-chave: Incubadoras Neonatais. Controle da Temperatura e Humidade. Lógica Fuzzy.

ABSTRACT

The present work proposes the development of a system for controlling physical variables in neonatal incubators using fuzzy technology. The main objective is to optimize the control of temperature and humidity inside the incubator, ensuring an adequate environment for the newborn. The system uses fuzzy logic to handle the imprecision and variability of the parameters, providing continuous and smooth adjustments, in contrast to traditional control systems based on fixed thresholds. Fuzzy control allows the definition of rules based on human knowledge and experience. The system was developed based on fuzzy control mathematical models, implemented on a computational platform, and evaluated in simulated scenarios of incubator operation. The results show that the fuzzy system significantly improves the stability of the controlled environment, maintaining temperature and humidity within desired levels, even in situations of external condition variation. This study contributes to the field of hospital automation, providing an efficient and adaptive alternative for controlling critical variables in neonatal incubators.

Keywords: Neonatal Incubators. Temperature and Humidity Control. Fuzzy Logic.

ÍNDICE

DEDICATÓRIAS	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	2
1.3. JUSTIFICATIVA	4
1.4. OBJECTIVOS	5
1.4.1. Objectivo geral	5
1.4.2. Objectivos específicos	5
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO	5
CAPÍTULO II – REVISÃO DE LITERATURA	6
2.1. ASPECTOS HISTÓRICOS E CONCEITUAIS	6
2.2. PREMATURIDADE	7
2.3. METABOLISMO DOS RECÉM-NASCIDOS	7
2.3.1. Termorregulação dos recém-nascidos	8
2.3.2. Transferência de calor entre os recém-nascidos e o ambiente	10
2.4. INCUBADORA NEONATAL	13
2.4.1. Controlo de temperatura	15
2.4.2. Sistema de humificação	17
2.4.2.1. Sistema de humificação passivo	17
2.4.2.2. Sistema de humificação activo	18
2.4.3. Sistema de circulação de ar	19
2.5. LÓGICA FUZZY	19
2.5.1. Fundamentação	19
2.5.2. Definição	19
2.5.3. Características Principais da Lógica Fuzzy	20
2.5.3.1. Graus de Verdade	20
2.5.3.2. Conjuntos Fuzzy	20
2.5.3.3. Funções de Pertinência	20
2.5.4. Sistema de Inferência Fuzzy	21

2.5.4.1.	Componentes de um Sistema de Inferência Fuzzy	21
2.5.5.	Vantagens dos Sistemas de Inferência Fuzzy	23
CAPÍTULO III – MATERIAIS E METODOLOGIAS DO TRABALHO.....		24
3.1.	Metodologia.....	24
3.1.1.	Definição dos Requisitos do Sistema	24
3.1.2.	Projecto do Sistema de Controle Fuzzy.....	24
3.1.3.	Implementação do Sistema de Controle	25
3.1.4.	Validação e Testes do Sistema	25
3.1.5.	Comparação com Controladores Convencionais.....	26
3.1.6.	Ajustes e Optimizações	26
3.1.7.	Documentação e Conclusão	26
CAPÍTULO IV – DESENVOLVIMENTO DO PROJECTO – INCUBADORA NEONATAL		27
4.1.	DIMENSIONAMENTO DO HARDWARE.....	27
4.1.1.	Fonte de Alimentação.....	29
a)	Dimensionamento do capacitor de filtro (electrolítico).....	31
b)	Regulador de tensão LM7805	32
4.1.2.	ARDUÍNO MEGA 2560.....	33
4.1.3.	DISPLAY LCD16X2	35
a)	Definição	35
b)	Características principais.....	35
c)	Pinagem e função de cada pino	36
d)	Funcionamento	37
e)	Conexão arduino-display LCD 16x2.....	37
f)	Código de conexão	38
4.1.4.	TRANSÍSTOR 2N2222A.....	39
a)	Definição	39
b)	Características Básicas.	39
c)	Estrutura Interna e Terminais	39
d)	Funcionamento Básico	40
4.1.5.	TRANSÍSTOR IRF530	40
a)	Definição	40
b)	Principais Características do IRF530	41
4.1.6.	SENSOR DE TEMPERATURA E HUMIDADE DHT11.....	41
a)	Definição	41
b)	Características	42
c)	Estrutura do Sensor	42
d)	Pinagem do DHT11	43

e) Funcionamento	43
f) Conexão Arduino – Sensor DHT11	44
g) Código Arduino	45
4.2. DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE – SISTEMA DE CONTROLE FUZZY	46
4.2.1. SISTEMA FUZZY	46
a) Problema em estudo	46
b) Fuzzificação.....	47
c) Defuzzificação.....	54
4.2.2. Fluxograma de funcionamento	59
4.2.3. Diagrama de blocos	60
4.2.4. Princípio de Funcionamento do Sistema	60
4.2.5. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	62
a) Variáveis de entrada	62
b) Variáveis de Saída	62
4.2.6. COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMA FUZZY E OUTRAS TECNOLOGIAS	63
a) Fuzzy vs Proporcional (P) e Proporcional Integrativo (PI) e PID	63
4.2.7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	67
a) Desempenho do Controle Fuzzy	67
b) Impacto na Saúde Neonatal	67
c) Eficiência e Confiabilidade	68
CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
5.1. Considerações finais.....	69
5.2. Recomendações	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
APÊNDICES.....	74
1. Código MATLAB	74
2. Resultados de Simulações	76

LISTA DE SÍMBOLOS

ATC – Incubadoras com Temperatura do ar Controlada

BJT – *Bipolar Junction Transistor* (Transístores Bipolares De Junção)

CC – Corrente Contínua

°C – Unidade de medida da temperatura, graus Celsius

LF – Lógica Fuzzy

FIS – *Fuzzy Inference System*

GND – *Ground* (Conector Terra)

ITC – Incubadoras com Temperatura do RN Controlada

K – Unidade de medida da temperatura no Sistema Internacional, Kelvin

kJ – Unidade de medida de Energia, kilo Joules

LCD – *Liquid Crystal Display* (Tela de Cristal Líquido)

LED – *Light-Emitting Diode* (Díodo Emissor De Luz)

LM7805 – Regulador de tensão de 5 V

MATLAB – *MATrix LABoratory*

MOSFET – *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*

NBR IEC – Comissão Electrotécnica Internacional

PID – Controlador Proporcional Integral Derivativo

RNs – Recém-nascido

UARTs – Portas seriais de hardware

µm – Unidade de medida de comprimento, micrómetro

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização do hipotálamo no cérebro humano.	9
Figura 2: Incubadora comercial típica.	14
Figura 3: Controle proporcional de temperatura.	15
Figura 4: Diagrama do controle ATC de temperatura em INs.	16
Figura 5: Diagrama do controle ITC de temperatura em INs.	17
Figura 6: Sistema de humidificação passivo usado em incubadoras neonatais.	17
Figura 7: Sistema de humidificação activo usado em INs.	18
Figura 8: Exemplos de funções de pertinência fuzzy.	20
Figura 9: Esquema de um sistema de controlo fuzzy.	21
Figura 10: Estrutura logica de regras fuzzy.	22
Figura 11: Esquema do protótipo.	29
Figura 12: Etapas de rectificação linear.	30
Figura 13: Diagrama esquemático de um rectificador de onda completa com regulador de tensão.	30
Figura 14: Efeito ripple no capacitor.	31
Figura 15: Características de Arduino Mega2560.	34
Figura 16: 16x2 LCD display.	35
Figura 17: Conexão arduino-display LCD 16x2.	37
Figura 18: Circuito esquemático da conexão.	38
Figura 19: Código de conexão.	38
Figura 20: Estrutura Interna e Terminais.	40
Figura 21: Estrutura do transistor IRF530.	41
Figura 22: Módulo do sensor de temperatura e humidade DHT11.	42
Figura 23: Pinagem do sensor DHT11.	43
Figura 24: Conexão dos pinos do sensor no Arduino.	44
Figura 25: Sistema pull-up do sensor DHT11.	44
Figura 26: Código arduino do DHT11.	45
Figura 27: Painel do sistema fuzzy do MATLAB.	46
Figura 28: Funções de pertinência da temperatura.	51
Figura 28: Funções de pertinência da humidade.	52
Figura 30: Funções de pertinência da luminosidade.	52
Figura 31: Funções de pertinência do humidificador.	52
Figura 32: Funções de pertinência do ventilador.	53

Figura 33: Regras do sistema fuzzy do sistema.	53
Figura 34: Regras do sistema MATLAB.	54
Figura 35: Fluxograma do sistema.	59
Figura 36: Diagrama de blocos do sistema.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações do regulador de tensão LM7805.....	32
Tabela 2: Tabela de materiais para retificador.	32
Tabela 3: Especificações técnicas.	33
Tabela 4: Características principais do LCD 16x2.....	35
Tabela 5: Pinagem e função de cada pino.	36
Tabela 6: Características do sensor DHT11.	42
Tabela 7: Conexão e pinagem do sensor DHT11.....	43

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Conjunto fuzzy de temperatura.	48
Gráfico 2: Conjunto fuzzy de humidade.	48
Gráfico 3: Variável de saída luz.	49
Gráfico 4: Variável de saída humidificador.	50
Gráfico 5: Variável de saída ventilador.....	51
Gráfico 6: Saída da luminosidade.	54
Gráfico 7: Saída do ventilador.	56
Gráfico 8: Saída do Humidificador.	57
Gráfico 9: Defuzzificação das variáveis.....	58
Gráfico 10: Análise dos dados do Controlador P.	65
Gráfico 11: Análise dos dados do Controlador PI.....	66

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A Academia Americana de Pediatria afirma que os bebés prematuros são bebés nascidos à 37ª semana de gestação com um peso corporal inferior a 2500 gramas. Os recém-nascidos prematuros requerem cuidados especiais e devem ser completamente isolados, uma vez que são mais susceptíveis de contrair infecções em locais públicos. Por conseguinte, é necessária uma incubadora. Uma incubadora neonatal é um recipiente selado com controlos ambientais ajustáveis que pode ser regulado para proporcionar as condições ideais para o desenvolvimento do bebé.

Um dos equipamentos electromédicos que se insere na categoria “suporte de vida” é a incubadora neonatal. Para cuidar dos bebés nascidos prematuramente ou com baixo peso, mantendo a temperatura e a humidade constantes, é muito importante utilizar uma incubadora neonatal cujo princípio de funcionamento é semelhante ao do útero. Quando a temperatura do corpo do bebé ultrapassa os limites normais, ocorre a hipertermia.

Os bebés têm pouca massa corporal para funcionar como dissipador de calor, um isolamento térmico limitado e uma área de superfície muito grande. Devido à sua regulação térmica imatura, os neonatos são incapazes de controlar a temperatura do seu ambiente ou de gerar calor. A regulação da temperatura é realizada de modo a que a temperatura corporal do bebé, o ambiente circundante e outros factores permaneçam constantes.

Normalmente, as incubadoras de bebés são concebidas para ajudar a cuidar e a vigiar os bebés de uma forma transparente, limpa (estéril), equipada com o material electrónico necessário e insonorizada. Para conceber uma incubadora de bebés, é necessário utilizar um sistema de controlo que permita estabilizar a temperatura da incubadora.

Podem ser utilizados vários tipos de controlo nas incubadoras, um dos quais é o controlo Fuzzy, a tecnologia que foi adoptada nesse estudo.

O método a ser utilizado é o controlador Fuzzy que consiste na fuzzificação da entrada e da saída utilizando a função de associação. A temperatura e a humidade da incubadora são medidas utilizando um sensor DHT11. De seguida, utiliza-se o regulador de luz AC para ajustar o brilho das luzes e o controlador para ajustar a ventoinha.

1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Um nascimento prematuro é aquele que ocorre antes da 37ª semana de gravidez. Nascimentos prematuros de alto risco são aqueles que ocorrem com 32 semanas de gestação, ou menos, de bebês com peso inferior a 1.500 g. Os neonatos representam cerca de 10 % dos nascimentos vivos, podem necessitar de atendimento em unidades de cuidados neonatais intensivos durante aproximadamente três meses.

Crianças bebês Recém-nascidos de Muito Baixo Peso (RNMBP), são clinicamente frágeis e podem sofrer de diversas complicações, entre as quais a síndrome de sofrimento respiratório, a hemorragia intraventricular (sangramentos no cérebro) e a retinopatia do prematuro (crescimento anormal dos vasos sanguíneos do olho).

E sob forma de melhor se adequar a temperatura externa, os neonatos, são colocados em incubadoras neonatais durante 3 meses (ou mais, dependendo da evolução do quadro clínico da criança), cuja função é proporcionar ao neonato um ambiente termicamente confortável. Pois, para um bebê, cujo nascimento ocorreu de forma prematura, necessita-se de um ambiente termicamente neutro, semelhante ao útero materno. Esse ambiente térmico é realizado através de um sistema de controlo de temperatura e humidade, pode-se garantir para o neonato um ambiente favorável ao crescimento e à resistência contra doenças devido ao desequilíbrio térmico.

Portanto, aos longos dos anos, vários estudos foram levados à cabo, sob forma de reduzir a dimensão desse fenómeno, que assola as famílias, principalmente os das zonas mais vulneráveis, sem mínimos serviços básicos de saúde. Diversas técnicas de controlo têm sido estudadas, testadas e comprovadas com sucesso na incubadora neonatal.

A interdependência entre a temperatura e a humidade relativa interna permite, por exemplo, o estudo de sistemas em que são controladas múltiplas variáveis e o atraso de transporte existente faz necessário a utilização de técnicas de compensação de atraso, nesses estudos destacaram-se os seguintes autores Nestor Agostinho (2003), Mário Anderson de Oliveira (2007), Daniel Kolm (2006), Fábio Lione (1999) e Arone (1995), onde todos eles convergem em suas teses dizendo que para melhor controlo das variáveis físicas em incubadoras neonatais só é possível através de tecnologias específicas para melhor monitoramento, destacam-se Bluetooth, Wifi, Infravermelho e Wi-Max.

De acordo com Fábio Laione (1999), afirma que

Um sistema de controlo de variáveis físicas em incubadoras neonatais, realiza a colecta dos dados dos transdutores que posteriormente, são enviados a um computador através da porta serial para análise (Laione, 1999).

A incubadora pode ser entendida como um ambiente fechado onde o neonato permanece. Ali são encontrados os sensores que medem a temperatura e a humidade relativa. Estas variáveis são controladas com o uso de sinais modulados em largura de pulso (PWM) aplicados à um resistor de aquecimento e a um humidificador ultrassónico. Estes dispositivos são utilizados para realizar a circulação de ar dentro da incubadora e assim é possível controlar a temperatura e a humidade relativa.

Segundo os dados do MISAU (2016) sobre a prematuridade revelaram que em Moçambique cerca de 128 000 bebés prematuros nascem anualmente, correspondendo a uma prevalência de 12% em relação a todos os partos realizados no País. Com uma taxa de 2% acima da média mundial, a prematuridade e suas complicações possuem um grande peso na mortalidade das crianças menores de 5 anos, pois são responsáveis por cerca de 10 200 mortes anuais (MCEE, 2015).

Os neonatos precisam de incubadoras para manter os seus corpos quentes, pelo que é necessário um controlador de temperatura. As incubadoras trabalham para aumentar a sobrevivência dos bebés, proporcionando um ambiente favorável. O problema actual é que o preço das incubadoras importadas com a tecnologia necessária para cuidar de bebés prematuros tem um custo relativamente elevado. No entanto, também existem incubadoras que têm preços mais acessíveis, mas com tecnologia inadequada, e visto que muitos produtos locais de berçário ainda são controlados manualmente. Por conseguinte, esta investigação visa conceber uma incubadora de bebés económica, mas com um sistema de controlo automático.

Face aos expostos nos parágrafos anteriores, levanta-se a seguinte questão pesquisa:

- **Qual é a eficácia da tecnologia FUZZY desenvolvimento de sistema de controlos de variáveis físicas para a redução de mortes prematuras?**

1.3. JUSTIFICATIVA

Desde os primórdios da humanidade, o mundo deparou-se com a problemática de Crianças Prematuras (CP), onde muitas das vezes, esses casos eram associados a um castigo divino, e os médicos da época (Século XVIII), negligenciavam esses casos. Entretanto, devido a prevalência desses casos, alguns pediatras (XIX), começaram a prestar mais atenção nesses casos, e notaram que esses casos se devem a má formação do bebê no ventre da mãe, dessa forma, começaram a ser evidenciados esforços para ultrapassar esses casos, que mesmo com todos os aparatos científicos as mortes prematuras ainda prevalecem.

O Parto prematuro é uma das três causas principais de mortes de recém-nascidos porque os prematuros têm dificuldades em respirar, em se alimentarem e são vulneráveis ao frio, levantando assim, vários estudos e debates televisivos e radiofônicos em diversos canais de mídia.

A prevalência de bebês prematuros que nascem com baixo peso corporal tem vindo a aumentar nos últimos tempos, o que também acarreta vários riscos para estes bebês. Os bebês com muito baixo peso à nascença correm um risco elevado, especialmente quando sentem frio. Quando o calor do bebê é perdido, cria-se uma resposta fisiológica que excede a do bebê normal; o equilíbrio fisiológico será terrivelmente perturbado.

Isto acontece porque o bebê precisa de gastar energia e metabolizar oxigénio para gerar o seu próprio calor. A disparidade de temperatura pode provocar a perda de calor e uma condição em cascata no corpo do bebê durante um longo período de tempo, causando um efeito como a hipotermia.

Portanto, mesmo assim, há uma preocupação cada vez maior com possíveis problemas de desenvolvimento associados à prematuridade. Pois, os bebês prematuros correm maior risco de apresentar problemas de desenvolvimento. Esses problemas estão ligados ao facto de funções biológicas – como as ligadas ao sistema nervoso central e ao sistema respiratório – não terem atingido sua plena maturidade durante a gravidez. Após o nascimento, a interação que envolve essa imaturidade biológica e o ambiente físico e social da criança desempenha um papel decisivo em seu desenvolvimento.

Neste cenário, pretende-se apontar para a viabilidade técnica para o desenvolvimento de um sistema de controlo de variáveis físicas, que permita uma simulação, que atenda parte das necessidades de um bebê prematuro na incubadora neonatal.

1.4. OBJECTIVOS

1.4.1. Objectivo geral

- Desenvolver um sistema de controle que utilize tecnologia fuzzy para regular automaticamente as variáveis físicas em incubadoras neonatais, garantindo um ambiente seguro e adequado para o cuidado de recém-nascidos.

1.4.2. Objectivos específicos

- Identificar e analisar as principais variáveis físicas (temperatura, humidade) que devem ser monitoradas e controladas em incubadoras neonatais.
- Investigar os princípios da lógica fuzzy e como ela pode ser aplicada em sistemas de controle, destacando suas vantagens em relação a métodos de controle tradicionais.
- Criar funções de pertinência e um conjunto de regras fuzzy, adequadas para as variáveis de entrada e saída do sistema, permitindo a representação dos estados fuzzy das variáveis de controle.
- Conduzir simulações para avaliar a eficácia do sistema de controle fuzzy sob diferentes cenários e condições operacionais, colectando dados sobre seu desempenho.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

- Capítulo I contextualiza o tema em estudo, abordando sobre o controlo de temperatura em neonatos e em incubadoras, e sua automatização, bem como os tipos e benefícios da incubadora em neonatos.
- Capítulo II aborda todo referencial teórico, na área da electrónica, contendo os assuntos e temas relacionados no desenvolvimento do projecto e suas esferas do conhecimento.
- Capítulo III desenrola sobre a metodologia que foi usada para o desenvolvimento do projecto, bem como a colheita de dados e seus respectivos tratamentos.
- O Capítulo IV é reservado para o desenvolvimento do projecto e resultados obtidos a partir de simulações.
- Capítulo V apresenta a conclusão apontando os resultados possíveis e trabalhos futuros.

CAPÍTULO II – REVISÃO DE LITERATURA

2.1. ASPECTOS HISTÓRICOS E CONCEITUAIS

A utilização das primeiras IN teve início no ano 300 na China e no Egipto, com base na utilização do método de aquecer para gerar a vida. O despertar científico para o respectivo meio de conservação da vida aconteceu em 1835 pelo Russo, Johan Georg, que confeccionou um berço com paredes duplas de ferro e onde a água quente ficava depositada (Calil, 2002).

A primeira arquitetura de incubadora como conhecemos hoje, foi produzida pelo Francês Stephane Etienne Tarnier, em 1880 e utilizada na Maternidade de Paris. Foi construída em material de madeira com dois pavimentos: pavimento superior, onde a criança descansava e outro inferior; onde ficava as bolsas com água aquecida (Calil, 2002).

No século XX, a incubadora passou por modificações ao passo que estava sendo estudada para encontrar a melhor performance e protocolo adequado na correção dos erros que estavam sendo identificados. No transcorrer desses estudos surgiram as mais variadas inovações: a câmara da incubadora formada por parede de plástico e o aquecimento por convecção, sendo controlado pela temperatura do ar ou pela temperatura da pele. Além desse modelo, outra incubadora surgiu.

Essa, por sua vez, era totalmente fechada, com ventilação controlada por convecção e o aquecimento por radiação, inclusive, era empregado o uso de microprocessador e somado a isto, algoritmos para realizar o controle e a regulação dos parâmetros necessários na ambientação da incubadora (Calil, 2002).

A Incubadora neonatal constitui-se de um equipamento médico revolucionário na Neonatologia, com o objectivo de reduzir o número de óbitos e ao mesmo tempo, proporcionar sobrevida ao RNP. Actualmente, é constituída de um compartimento capaz de controlar o aquecimento do ar dentro dele (Rodrigues, 2019, p.15).

Segundo Coutinho (2019), incubadora é um ambiente fechado e transparente, onde o RNP é mantido em local seguro, sendo possível controlar temperatura, umidade, circulação do ar, luz e oxigénio, tornando-se assim, um ambiente propício para seu desenvolvimento.

2.2. PREMATURIDADE

Quando falamos em bebê prematuro referimo-nos àquele que nasce antes de terminar o tempo normal de gestação, ou seja entre as trinta e sete semanas e quarenta e uma semanas (Linhares, 2000). A Organização Mundial de saúde (2016) entende a prematuridade como o nascimento de um bebê antes das 37 semanas. Estes prematuros enquadram-se em três categorias relativamente ao tempo de gestação:

- Extremamente prematuros (< 28 semanas);
- Muito prematuros (28 a < 32 semanas);
- Prematuros moderados (32 a < 37 semanas).

De acordo com a classificação de Beckwith e Rodning (1991) os recém-nascidos podem ser agrupados em categorias consoante o seu peso, ou seja, prematuros com peso inferior a 1500 g são considerados prematuros de baixo peso, enquanto aqueles que nascem com um peso menor que 1000 g são chamados de recém-nascidos de extremo baixo peso.

De acordo com o Instituto Nacional de Estatística (2007), existem três tipos de prematuridade, sendo que 87,8% dos prematuros correspondem a pré-termos limiares (nascem entre as 33 e as 36 semanas de gestação), 9,3% designam-se por prematuros moderados (o parto acontece entre as 28 e as 32 semanas de idade gestacional) e 2,9% são os prematuros extremos (nascem antes das 28 semanas gestacionais).

Bebés que preencham estes parâmetros são considerados de risco, uma vez que a prematuridade destes bebés associada ao baixo peso acarreta riscos para o seu desenvolvimento (Cuman & Ramos, 2009).

2.3. METABOLISMO DOS RECÉM-NASCIDOS

RNs prematuros lactantes ou com lento crescimento podem apresentar uma regulação inadequada de sua temperatura. Vários factores interferem na regulação térmica, como a falta de mecanismos de produção de suor, de vasoconstrição e de exercícios musculares para equilibrar a temperatura.

O gasto de glicogénio hepático, que gera a queima dos tecidos gordurosos, juntamente com o esforço energético do neonato para elevar a temperatura, são factores que agravam a situação metabólica e nutricional da criança, muitas vezes incapaz de se alimentar de forma satisfatória (Schimitz, 1998).

Segundo o Ministério da Saúde (2002a), a fadiga provocada pelo esforço para manter a temperatura corporal pode ocasionar problemas, tais como:

- Falta de oxigénio;
- Hipoglicemia (nível baixo de açúcar no sangue);
- Acidose metabólica (diminuição do ph do sangue);
- Queda nos níveis de glicogénio (polissacarídeo de reserva).

Diversos equipamentos vêm sendo desenvolvidos para proporcionar um ambiente óptimo para o crescimento destes RNs. O desenvolvimento desses equipamentos baseia-se na compreensão do sistema de controlo da temperatura dos RNs, bem como nas influências do meio ambiente na termorregulação. Esses conceitos são apresentados nas próximas secções.

2.3.1. Termorregulação dos recém-nascidos

O RN de baixo peso tem dificuldade em manter a temperatura corporal constante, ganhando e cedendo calor com facilidade. Tal dificuldade é provocada, principalmente, por deficiências decorrentes da não activação do centro de controlo térmico localizado no hipotálamo (Figura 1). Isto pode ocorrer devido à imaturidade do centro de controlo, efeitos de drogas e, principalmente, por alterações patológicas, tais como hemorragia intracraniana, má formação cerebral e traumas (Ministério da Saúde, 2002b).

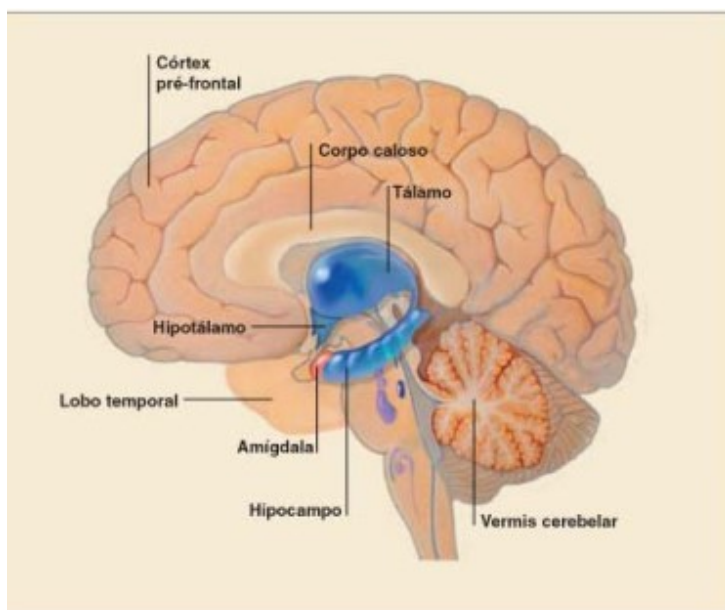


Figura 1: Localização do hipotálamo no cérebro humano.

Fonte: Ministério da Saúde (2002b).

Em geral, o hipotálamo pode ser dividido em duas regiões de controlo de calor. A parte anterior apresenta função parassimpática, controlando a redução da temperatura corporal quando estimulada. A parte posterior actua por meio do sistema nervoso simpático, controlando a produção de calor. Assim, quando estimulada, aumenta a temperatura corporal (Pinheiro, 2006).

O hipotálamo recebe informações sobre a temperatura ambiente por meio de estímulos oriundos dos receptores térmicos periféricos (localizados por toda a pele) e sobre a temperatura central do corpo por meio de termorreceptores hipotalâmicos. Os termorreceptores hipotalâmicos localizam-se na área pré-óptica do hipotálamo e são tão sensíveis que respondem a aumentos e decréscimos de temperatura na ordem de 1 a 2° C (Nishida, 2006).

O hipotálamo compara a temperatura central com a periférica e determina se organismo deve perder, produzir ou conservar calor. Portanto, todas as informações sobre o estado térmico corporal são processadas e comparadas com um valor ótimo pré-estabelecido pelo sistema de controlo da temperatura (Karen, 1994).

Quando o sangue com temperatura mais baixa que a normal passa pela região pré-óptica do hipotálamo, as células pré-ópticas termossensíveis responsáveis pelo resfriamento são inibidas, activando células do centro hipotalâmico de produção de calor. A activação desse centro desencadeia diversos mecanismos para aumentar a temperatura corporal, sendo os mais importantes a vasoconstrição e activação do tónus muscular (Pinheiro, 2006).

Caso a temperatura esteja acima do valor pré-estabelecido, as células pré-ópticas responsáveis pela diminuição da temperatura corporal são activadas. Os principais mecanismos responsáveis pela diminuição da temperatura corporal são a vasodilatação e a produção de sudorese (Karen, 1994).

O desafio do neonato em controlar a temperatura inicia-se ao nascer, por estar habituado à temperatura uterina, praticamente constante em torno dos 37,9°C. A variação da temperatura no meio externo dificulta a termorregulação (González, 2001).

Devido à alta taxa energética necessária para o seu crescimento e à elevada razão superfície/massa corporal, os recém-nascidos de baixo peso possuem uma taxa metabólica maior que os recém-nascidos normais e adultos (González, 2001).

O RN de baixo peso apresenta ainda, incapacidade para conservar calor por mudanças de postura em resposta ao estresse térmico (Ministério da Saúde, 2002b).

2.3.2. Transferência de calor entre os recém-nascidos e o ambiente

A hipotermia é uma das principais causas no aumento da taxa de mortalidade neonatal (Ministério da Saúde, 2002b). Assim, torna-se necessário entender as formas de troca de calor entre os RNs e o meio ambiente.

O calor transfere-se do RN para o ambiente através dos mesmos princípios físicos descritos pela termodinâmica e termometria (Incropera e Witt, 1992):

- a) Convecção;
- b) Condução;
- c) Radiação e;
- d) Evaporação.

a) Convecção: a perda de calor por convecção ocorre através da transferência do calor entre a superfície do RN e o ar ou líquido (Lamberts et al., 1997). Os principais factores que determinam a perda por convecção são:

- A alta relação entre a área superficial (A) e a massa do corpo do RN. Isto provoca um aumento significativo na perda de calor por convecção (Incropera e Witt, 1992). Para diminuir estas perdas, deve-se reduzir as áreas expostas ao ambiente.
- A velocidade (v), da turbulência do fluxo de ar e da viscosidade (Lamberts et al., 1997). O factor que relaciona estas três variáveis é conhecido como coeficiente de troca por convecção (h_c). Este coeficiente para superfícies expostas ao fluxo de ar é dado através da Eq. 01 (Lamberts et al., 1997).

$$h_c = 5,8 + 4,1 \cdot v \quad \text{Eq. 01}$$

O movimento de pessoas no berçário provoca turbulência no ar, aumentando assim a perda por convecção, isso interfere directamente no sistema de regulação térmica do neonato.

- A diferença de temperatura (ΔT) entre a pele e o ar. Em um ambiente estável, com baixa velocidade do ar (v), a perda de calor por convecção (Q_c) ocorre principalmente devido diferença de temperatura conforme pode notar na Eq. 02 (Lamberts et al., 1997).

$$Q_c = h_c \cdot A \cdot \Delta T \quad \text{Eq. 02}$$

b) Condução: a perda de calor por condução é resultante da transferência de calor entre o corpo do RN e objectos em contacto (Lamberts et al., 1997).

Segundo Incropera e Witt (1992), os factores que mais influenciam este processo são:

- Coeficiente de condutibilidade (λ);
- Tamanho da área (A) de contacto entre o neonato e a superfície;
- A diferença de temperatura (ΔT) entre as superfícies e a espessura (L).

O coeficiente de condutibilidade quantifica a facilidade da superfície em conduzir calor, sendo que os metais possuem alta condutibilidade térmica quando comparados à madeira e aos plásticos. A perda de calor por condução (Q) através de uma área plana é dada pela Eq. 03 (Incropera e Witt, 1992).

$$Q = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{L} \cdot A$$

Eq. 03

A transferência de calor através da condução na IN, pode ser reduzida caso as superfícies de contacto estejam à mesma temperatura. Portanto, é importante manter a menor diferença de temperatura possível entre estas superfícies.

Segundo Karen (2004), na prática clínica, deve-se aquecer as superfícies que entram em contato com o RN, ou ainda, isolar o RN das superfícies para minimizar as perdas por condução.

- c) **Radiação:** a perda por radiação ocorre pela emissão de energia através das moléculas que estão a uma distância aproximada de 1 µm da superfície exposta, para os sólidos ou líquidos (Incropera e Witt, 1992).

Essa emissão se dá através de ondas eletromagnéticas infravermelhas com comprimentos de ondas em torno de 0,1 µm a 100 µm (Incropera e Witt, 1992). Essa emissão origina-se durante as transições dos electrões entre as camadas de energia dos átomos tendo, como resultado, a liberação de energia radiante suprida pelo calor do corpo.

Se a temperatura de um objecto for zero absoluto (0 K ou – 273,16 °C), o material deixa de emitir energia radiante. Se a temperatura do objecto for superior à temperatura do meio externo, uma maior quantidade de calor será irradiada (Magalhães et al., 2002).

Segundo Incropera e Witt (1992), este tipo de transferência de calor depende principalmente da emissividade dos materiais, da diferença de temperatura entre as superfícies emissora e absorvente e do factor de forma. O factor de forma é definido como sendo a fracção de radiação que sai de uma certa superfície A, e é interceptada por uma outra superfície B. O factor de forma entre superfícies depende do ângulo de visada, da área das mesmas e da distância entre as superfícies (Incropera e Witt, 1992).

Dependendo da temperatura do invólucro, a taxa de emissão de calor através da pele de um RN é relativamente constante. A temperatura da pele do RN é tipicamente aquecida em relação às superfícies vizinhas. Assim, o sentido de transferência de calor radiante é da superfície do RN para as superfícies próximas (Karen, 2004).

d) Evaporação: a perda de calor por evaporação é baseada na energia necessária para a mudança de estado físico da água de estado líquido para vapor (González, 2001).

A evaporação de um litro de água requer cerca de 2230 kJ de calor (a 100°C), denominado calor latente de vaporização (Karen, 2004). A perda de calor por evaporação pode acontecer através do suor, respiração e da pele. A perda de água através da pele está relacionada com a idade do RN e o grau de queratina do estrato córneo da epiderme. Influenciado pelo ambiente extrauterino, a queratina aumenta em excesso nas primeiras três a quatro semanas da vida pós-natal, contribuindo para uma redução na perda por evaporação. A perda por evaporação é maior que o calor produzido pelo RN de baixo peso. Os factores que afectam as perdas por evaporação são: área superficial, pressão de vapor e velocidade do ar (Karen, 2004).

Quanto maior a área superficial disponível para a evaporação, maior será a perda de calor. A pressão de vapor influencia directamente na perda de calor, sendo que quanto maior a pressão do ar ambiente, menor é a perda por evaporação. Devido a evaporação e a temperatura estarem directamente relacionados, aumentos na temperatura diminuem a pressão de vapor e aumentam a evaporação. A perda de calor por evaporação, assim como a perda por convecção, acentua-se com o aumento da velocidade do ar e do turbilhonamento do fluxo de ar.

2.4. INCUBADORA NEONATAL

A incubadora neonatal é um equipamento médico assistencial que serve para manter a vida de bebés prematuros onde estes encontram condições semelhantes às existentes no útero materno. O avanço tecnológico proporcionou o desenvolvimento das INs microprocessadas que permitem o controlo de temperatura na cúpula onde são colocados os RNs.

As INs actuais são alimentadas através de corrente alternada e devem possuir uma bateria para manter sua operação, no caso de falta de energia. Elas possuem diversos sensores para controlar, por exemplo, concentração de O₂, temperatura e humidade (Costa et al., 1993).

As INs possuem também sistemas de alarme visual e sonoro para alertar o corpo clínico em caso de situações prejudiciais ao bebê, tais como excesso de temperatura, interrupção de energia eléctrica, falha de funcionamento do ventilador de circulação de ar, sensor de pele desconectado (em incubadoras com temperatura do RN controlada) ou ainda, para o caso de obstrução do escape de ar (NBR IEC 601-2-19, 1999).

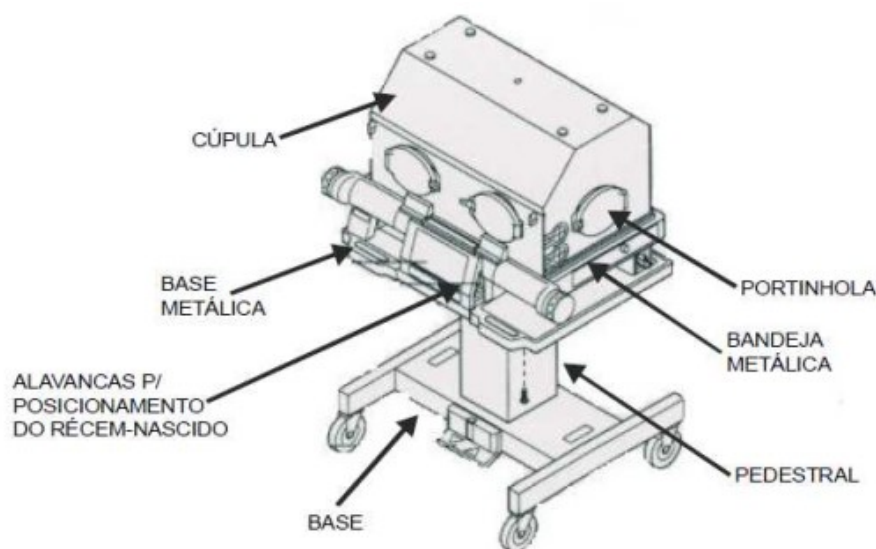


Figura 2: Incubadora comercial típica.

Fonte: Agostini (2003).

Dentre as vantagens do uso de INs, pode-se citar (Schimitz, 1998):

- Proporcionar um ambiente termoneutro;
- Actuar como barreira preventiva contra infecção;
- Prevenir contra perdas hídricas excessivas por evaporação.

As paredes e a cúpula da IN contêm uma ou duas camadas de acrílico para realizar a isolamento térmica entre o ambiente interno e o meio ambiente. Outro factor importante é a sua transparência, pois permite a observação do RN à distância. As INs possuem portinholas para permitir o acesso manual ao RN, evitando a abertura da cúpula para reduzir o estresse ambiental. O colchão da incubadora é confeccionado com isolante térmico (Arone, 1995).

As grandezas que devem ser controladas na IN para propiciar um ambiente adequado à manutenção da vida dos RNs são: humidade, temperatura e fluxo de ar. A seguir, os principais métodos de controlo dessas grandezas físicas são apresentados.

2.4.1. Controlo de temperatura

Controlo proporcional é a técnica mais utilizada para manter a temperatura da IN (Webster, 1995). No controlo proporcional de temperatura, utiliza-se um termistor em um braço de uma ponte resistiva cujo valor é comparado a um valor de referência (correspondente a uma dada temperatura de referência) no outro do braço da ponte. A resistência do termistor varia com alterações da temperatura da IN. A saída da ponte é amplificada, e a tensão resultante é proporcional à diferença de temperatura monitorada pelo termistor e a temperatura de referência.

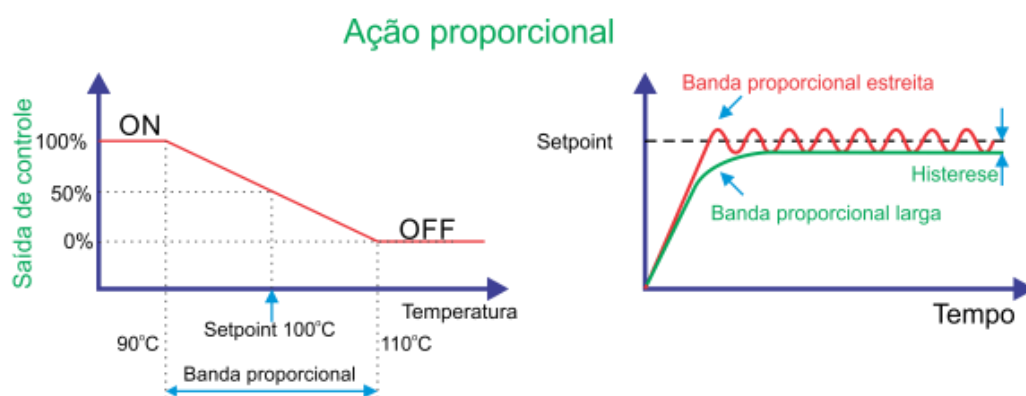


Figura 3: Controlo proporcional de temperatura.

Fonte: <https://alfacomp.net/portfolio-item/controle-de-temperatura/>

Se a temperatura na câmara do RN estiver abaixo da desejada, o aquecedor da IN é accionado para corrigir esta diferença. O elemento aquecedor é constituído por uma resistência eléctrica que converte energia eléctrica em calor (Efeito Joule).

A potência característica dos aquecedores é de aproximadamente de 500 W (Dräger Medical, 2007). No sistema proporcional, a quantidade de potência aplicada ao aquecedor corresponde à diferença entre a temperatura do ar e a temperatura desejada. Isto significa que a quantidade de potência decresce à medida que a temperatura se aproxima do valor desejado, uma característica importante para se ter um controlo mais preciso e minimizar o risco de sobre aquecimento (Webster, 1995).

Os Sistemas de Controlo de Temperatura (SCT) mais utilizados nas incubadoras são o de temperatura do ar controlada e de temperatura do RN controlada (NBR IEC 601- 2-19, 1999).

- a) **Incubadoras com Temperatura do ar Controlada (ATC):** o operador determina uma dada temperatura para o ar no interior da cúpula. O SCT utiliza um aquecedor e Sensores de Monitoramento de Temperatura (SMT) para manter a temperatura do ar constante (Figura 3).

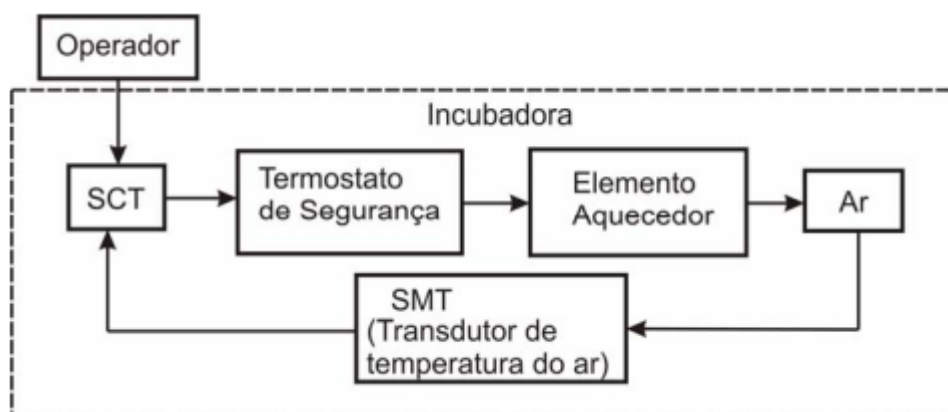


Figura 4: Diagrama do controle ATC de temperatura em INs.

Fonte: NBR IEC 601- 2-19 (1999).

- b) **Incubadoras com Temperatura do RN Controlada (ITC):** o operador determina uma dada temperatura para a pele do neonato. O SCT utiliza o aquecedor resistivo e os SMT para manter a temperatura da pele do neonato constante (Figura 5). O aquecedor responde directamente às alterações monitoradas pelo sensor.

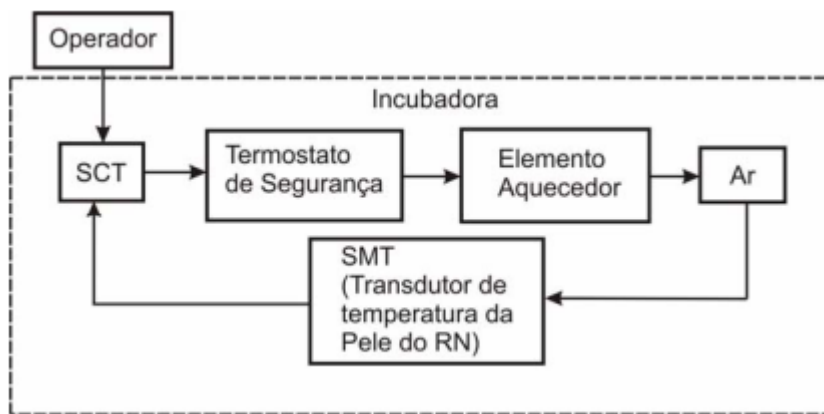


Figura 5: Diagrama do controle ITC de temperatura em INs.

Fonte: NBR IEC 601- 2-19 (1999).

Além dos dispositivos de controlo, todas as INs possuem termostatos de segurança que a desligam automaticamente e accionam alarmes de segurança, sempre que sua temperatura atingir 38 °C.

2.4.2. Sistema de humidificação

2.4.2.1. Sistema de humidificação passivo

Actualmente, as INs possuem sistemas de controlo de humidade activo. Modelos mais antigos utilizam sistema passivo de humidificação. O sistema de humidificação passivo constitui-se de um reservatório com água cuja superfície se encontra no trajecto percorrido pelo fluxo de ar gerado por uma ventoinha (Figura 6).

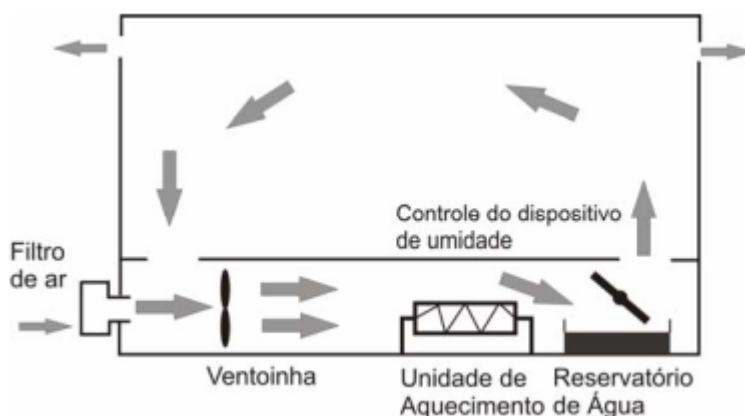


Figura 6: Sistema de humidificação passivo usado em incubadoras neonatais.

Fonte: Bouattoura (1998).

A humidade é suprida através do fluxo de ar que percorre o reservatório (Bouattoura, 1998). INs com sistema passivo de controlo de humidade estão deixando de ser fabricadas devido à dificuldade de se atingir um nível de humidade superior a 40% para uma escala de temperatura de 28 a 39 °C (Bouattoura, 1998).

2.4.2.2. Sistema de humificação activo

O sistema de humificação activo constituiu-se de um sistema de controlo que actua sobre vaporizador ultrassónico (Figura 7). A vaporização da água ocorre por energia acústica gerada por cristal piezoeléctrico que vibra a uma taxa aproximada de 2 MHz (Bouattoura, 1998).

A agitação intensa da água presente no nebulizador gera uma fina névoa de partículas de água. Cada gota possui cerca de 2 a 5 µm (Bouattoura, 1998). A evaporação da água ocorre quando suas partículas são injectadas no sistema de circulação de ar da incubadora.

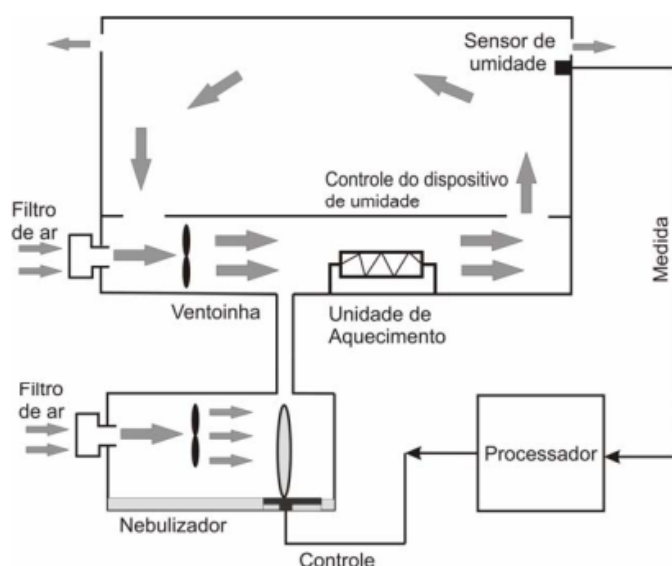


Figura 7: Sistema de humificação activo usado em INs.

Fonte: Bouattoura (1998).

O nebulizador é ajustado por meio de uma chave de quatro posições que permite seleccionar a taxa de nebulização da água. As quatro posições são denominadas de zero, ponto baixo, meio e elevado (Bouattoura, 1998).

O valor da humidade no interior do compartimento do RN é medida através de um sensor. O sistema de controlo compara o valor lido ao valor ajustado através da chave do nebulizador, aumentando ou diminuindo a umidade para suprir o valor ajustado.

2.4.3. Sistema de circulação de ar

O sistema de circulação de ar é constituído por um motor eléctrico acoplado a uma ventoinha, tendo como função, aspirar ar do ambiente externo a uma taxa de aproximadamente 30 litros/min (Dräger Medical, 2007). O fluxo de ar passa através de um filtro que admite partículas de até 0,5 μm . O fluxo de ar no interior da IN proporciona a distribuição de temperatura e humidade. É recomendado que o ar entre no compartimento do RN através da região mais próxima aos pés do RN (Dräger Medical, 2007).

2.5. LÓGICA FUZZY

2.5.1. Fundamentação

A Lógica Fuzzy (LF) foi inicialmente proposta por Lotfi A. Zadeh em 1965, com o objectivo de criar um sistema de lógica que pudesse lidar com a ambiguidade intrínseca da linguagem natural.

Segundo Zadeh (1965), “a lógica difusa permite representar o conhecimento de forma mais flexível e imprecisa, refletindo melhor o modo como os humanos pensam e tomam decisões”.

Isso contrasta com a lógica clássica binária, na qual uma proposição é sempre verdadeira ou falsa.

2.5.2. Definição

A lógica Fuzzy (ou lógica difusa) é um ramo da inteligência artificial que lida com a incerteza e a imprecisão de informações, permitindo a modelagem de raciocínios que estão entre o “verdadeiro” e o “falso” (Bilobrovec, 2005).

A lógica fuzzy (ou lógica difusa) é uma extensão da lógica clássica que lida com a incerteza e a imprecisão. Enquanto na lógica clássica os valores são binários (verdadeiro ou falso, 0 ou 1), na lógica fuzzy os valores podem ser qualquer número entre 0 e 1, permitindo assim modelar problemas mais complexos e incertos, como a tomada de decisões em ambientes dinâmicos ou incertos (Bilobrovec, 2005).

2.5.3. Características Principais da Lógica Fuzzy

2.5.3.1. Graus de Verdade

Em vez de trabalhar com verdadeiro ou falso, a lógica fuzzy trabalha com graus de verdade. Por exemplo, em vez de dizer que a temperatura é “alta” ou “baixa”, a lógica fuzzy permite que ela seja “um pouco alta”, “muito alta”, ou “moderada”, atribuindo valores contínuos entre 0 e 1 para representar essa incerteza (Silva, 2005).

2.5.3.2. Conjuntos Fuzzy

Um conjunto fuzzy é definido por uma função de pertinência, que atribui um valor de 0 a 1 para cada elemento, indicando seu grau de pertencimento ao conjunto. Por exemplo, a função de pertinência para “temperatura alta” pode atribuir (Mukaidono, 2001):

- 0.8 para 30°C (um pouco alta),
- 1.0 para 35°C (totalmente alta),
- 0.2 para 25°C (quase alta).

2.5.3.3. Funções de Pertinência

São funções matemáticas que mapeiam os valores de entrada para um valor de pertinência entre 0 e 1. Exemplos comuns de funções de pertinência são (Mukaidono, 2001):

- **Triangular (NS)**,
- **Trapezoidal (ZE)**,
- **Gaussiana (PS)**.

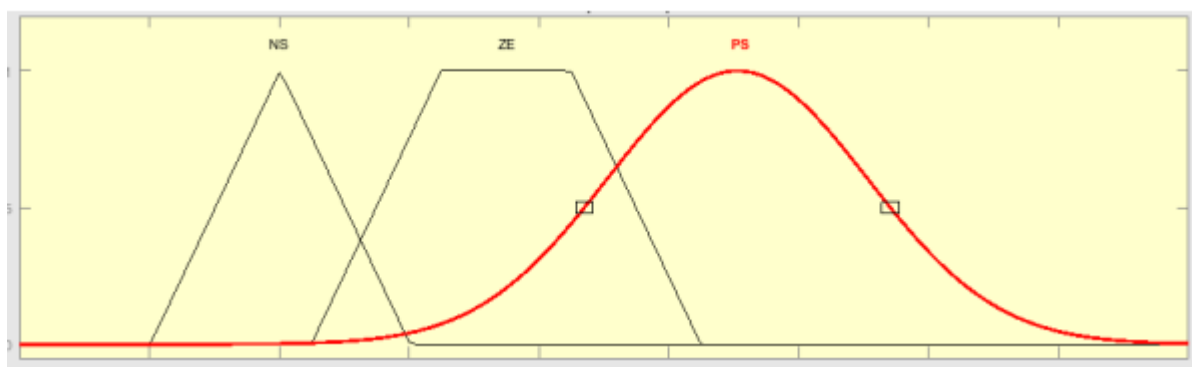


Figura 8: Exemplos de funções de pertinência fuzzy.

Fonte: O Autor (2024).

2.5.4. Sistema de Inferência Fuzzy

Um Sistema de Inferência Fuzzy (FIS, do inglês *Fuzzy Inference System*) é um modelo matemático que usa a lógica fuzzy para mapear entradas a saídas, em um processo que imita o raciocínio humano ao lidar com incertezas e ambiguidade (Barros, 2006).

A lógica fuzzy permite a modelagem de situações onde a transição entre os estados não é nítida, como “quente”, “frio”, “rápido”, ou “devagar”, representados por graus de pertinência em vez de valores exactos.

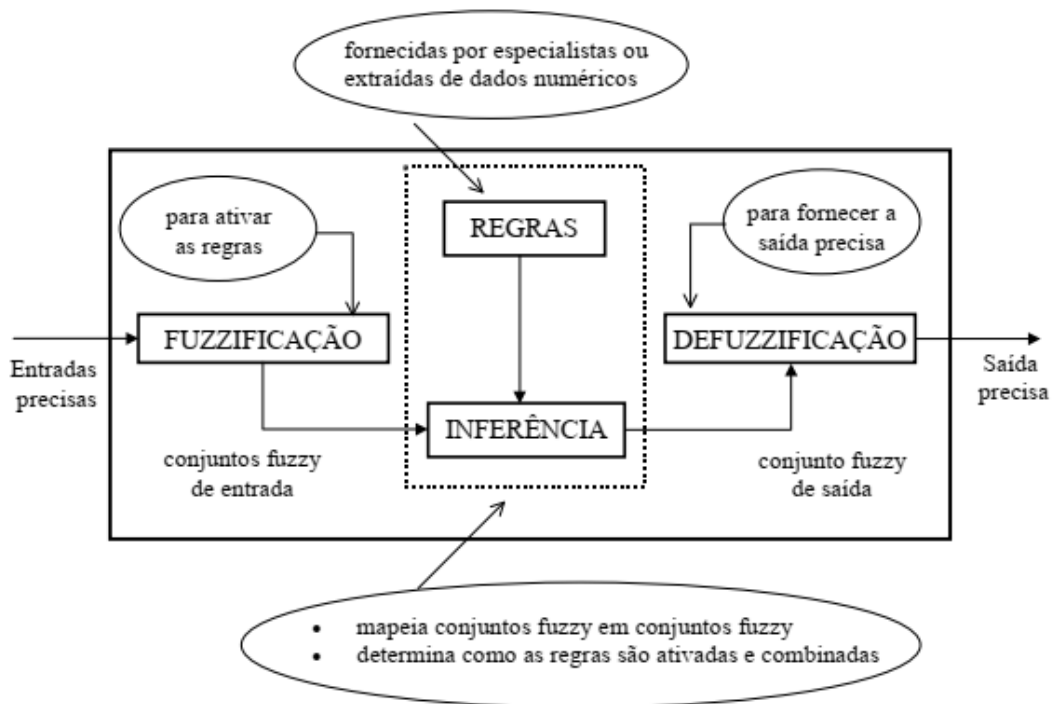


Figura 9: Esquema de um sistema de controlo fuzzy.

Fonte: Barros (2006).

2.5.4.1. Componentes de um Sistema de Inferência Fuzzy

1. Fuzzificação

A primeira etapa do sistema de inferência fuzzy é a fuzzificação, que converte as entradas numéricas ou “crisp” (exactas) em conjuntos fuzzy. As entradas são comparadas com as funções de pertinência predefinidas para cada variável fuzzy, e a partir daí é determinado um grau de pertencimento entre 0 e 1 (Bilobrovec, 2005).

- Exemplo: Se a temperatura é 30°C, a fuzzificação poderia determinar que isso corresponde a “0.8 no conjunto fuzzy Alta” e “0.2 no conjunto fuzzy Moderada”.

2. Base de Regras

A base de regras é um conjunto de regras **Se-Então** que define a lógica fuzzy. As regras são derivadas do conhecimento humano ou da experiência e conectam as variáveis fuzzy de entrada com as variáveis fuzzy de saída (Barros, 2006).

- Exemplo de regra fuzzy: “**Se** a temperatura é alta e a humidade é baixa, **então** o sistema deve resfriar.”

As regras podem combinar várias variáveis de entrada (AND, OR, etc.) para tomar decisões mais precisas.

Se	x_1 é A_1	e	x_2 é A_2	e ... e	x_n é A_n
Então	u_1 é B_1	e	u_2 é B_2	e ... e	u_m é B_m

Figura 10: Estrutura lógica de regras fuzzy.

Fonte: Barros, (2006).

3. Mecanismo de Inferência

O mecanismo de inferência é o “cérebro” do sistema fuzzy. Ele aplica as regras fuzzy para gerar conclusões a partir das entradas fuzzy. As variáveis fuzzy de entrada são processadas com base nas regras para determinar os resultados fuzzy correspondentes.

Existem dois tipos principais de mecanismos de inferência (Barros, 2006):

- **Inferência de Mamdani:** Muito utilizada em sistemas de controle, é baseada em regras lógicas que conectam variáveis de entrada e saída.
- **Inferência de Sugeno:** As saídas são geralmente funções lineares das entradas. Sugeno é frequentemente usado quando o sistema precisa de uma resposta crisp mais rápida e eficiente.

4. Agregação de Saídas

Quando várias regras são activadas simultaneamente, suas saídas são agregadas (combinadas) em um conjunto fuzzy único. Isso cria um resultado geral considerando todas as regras aplicáveis. A agregação é feita combinando os conjuntos fuzzy das regras activadas (Barros, 2006).

5. Defuzzificação

A última etapa é a defuzzificação, que converte a saída fuzzy agregada em um valor exacto ou “crisp”. O método de defuzzificação mais comum é o Centroide, onde a média ponderada de todos os resultados fuzzy é calculada para fornecer uma única saída numérica (Barros, 2006).

- **Exemplo:** *Se o ajuste da temperatura resulta em um conjunto fuzzy que combina “aumentar ligeiramente” e “manter”, a defuzzificação pode calcular um valor exacto como +2°C.*

2.5.5. Vantagens dos Sistemas de Inferência Fuzzy

- **Capacidade de lidar com incertezas:** Como a maioria dos problemas do mundo real envolve incerteza ou falta de precisão, a lógica fuzzy é útil para modelar esses cenários.
- **Adaptabilidade:** Pode ser facilmente ajustado para diferentes sistemas e ambientes, uma vez que as regras podem ser modificadas conforme necessário (Barros, 2006).
- **Simples de entender e implementar:** Comparado com métodos mais complexos de controle ou decisão, a lógica fuzzy permite que especialistas humanos descrevam o sistema usando regras simples (Barros, 2006).

Os sistemas de inferência fuzzy fornecem uma maneira poderosa e flexível de lidar com problemas complexos que envolvem incerteza ou imprecisão. Através da fuzzificação, aplicação de regras fuzzy, agregação e defuzzificação, esses sistemas podem gerar saídas robustas para controlar uma variedade de processos, desde sistemas de controle industrial até aplicações de inteligência artificial.

CAPÍTULO III – MATERIAIS E METODOLOGIAS DO TRABALHO

3.1. Metodologia

O desenvolvimento de um Sistema de Controlo de Variáveis Físicas em Incubadoras Neonatais com Recurso à Tecnologia Fuzzy exige uma abordagem estruturada, com várias etapas que vão desde a análise dos requisitos até a implementação e validação do sistema de controle.

A metodologia descrita a seguir divide o projecto em fases para garantir o desenvolvimento eficaz do sistema fuzzy.

3.1.1. Definição dos Requisitos do Sistema

Na fase inicial, serão identificados os parâmetros críticos que precisam ser controlados nas incubadoras neonatais. Esses parâmetros incluem:

- **Temperatura:** Manter uma faixa de 36,5°C a 37,5°C, replicando a temperatura uterina ideal para recém-nascidos.
- **Humidade:** Manter níveis de humidade entre 50% e 70%, necessários para garantir a hidratação adequada e a respiração do bebê.

Nesta fase, foram consultados especialistas médicos e analisados estudos sobre as condições ideais para recém-nascidos em unidades neonatais.

3.1.2. Projecto do Sistema de Controle Fuzzy

Com os parâmetros identificados, o próximo passo foi desenvolver um sistema fuzzy para controlar a temperatura e a humidade. O projecto do sistema fuzzy envolveu as seguintes etapas:

- **Variáveis de Entrada:** As variáveis de entrada para o sistema fuzzy foram a Temperatura e a Humidade dentro da incubadora.
- **Variáveis de Saída:** As variáveis de saída foram o Ajuste de Temperatura (resfriar ou aquecer), Ajuste de Humidade (humidificar ou desumidificar) e Luminosidade.
- **Funções de Pertinência:** Foram definidas funções de pertinência para cada uma das variáveis de entrada e saída.

Por exemplo, a temperatura será classificada como "Baixa", "Ideal" ou "Alta", enquanto a humidade será classificada como "Baixa", "Ideal" ou "Alta".

- **Regras Fuzzy:** As regras fuzzy foram baseadas em conhecimento médico e científico.

Exemplo de regra:

- *Se a Temperatura está Baixa e a Humidade está Baixa, então deve-se Aquecer e Humidificar.*

Essas regras foram implementadas em software de simulação, MATLAB.

3.1.3. Implementação do Sistema de Controle

O sistema de controle foi implementado utilizando ferramentas de simulação baseadas em lógica fuzzy.

Nesta fase, foi desenvolvido um algoritmo (**Apêndice 1**) que integra as funções de pertinência e as regras fuzzy. A implementação envolveu:

- **Simulação das condições da incubadora:** Foram simulados diferentes cenários de temperatura e humidade para testar a resposta do sistema fuzzy.
- **Uso do MATLAB:** O algoritmo foi implementado em MATLAB, utilizando as bibliotecas disponíveis para lógica fuzzy (como o Fuzzy Logic Toolbox no MATLAB).
- **Definição de controladores fuzzy:** Controladores fuzzy para temperatura e humidade foram desenvolvidos e interligados, para garantir a interação eficiente entre as variáveis.

3.1.4. Validação e Testes do Sistema

Após a implementação, o sistema foi submetido a testes rigorosos para validar seu desempenho em diferentes cenários. O processo de validação incluiu:

- **Simulações em diferentes condições:** O sistema será testado para diferentes condições ambientais, incluindo variações rápidas de temperatura e humidade. O comportamento do sistema fuzzy será comparado com métodos de controle tradicionais, como o controle PID.
- **Análise de Resposta:** A resposta do sistema fuzzy será avaliada quanto à precisão e estabilidade, medindo o tempo de resposta, a oscilação e a capacidade de manter as variáveis em faixas seguras.
- **Avaliação de eficiência:** O sistema será avaliado para verificar se consegue manter as condições ideais sem causar variações bruscas que possam comprometer o conforto do recém-nascido.

3.1.5. Comparação com Controladores Convencionais

Para validação dos resultados do sistema fuzzy, ele foi comparado com controladores PID convencionais. Serão analisadas métricas como:

- Tempo de resposta.
- Precisão no controle das variáveis.
- Estabilidade do sistema em diferentes condições.

Essa comparação serviu para verificar as vantagens do uso da lógica fuzzy em relação aos métodos tradicionais.

3.1.6. Ajustes e Optimizações

Com base nos resultados obtidos na fase de testes, foram realizados ajustes no sistema para melhorar sua performance. Em alguns casos necessário, foram redefinidas as funções de pertinência e ajustadas as regras fuzzy para otimizar o controle das variáveis.

3.1.7. Documentação e Conclusão

Por fim, todo o processo de desenvolvimento, implementação e validação foi documentado. Foram elaboradas recomendações para futuras melhorias no sistema, como a inclusão de sensores mais avançados ou a integração com outras tecnologias emergentes.

CAPÍTULO IV – DESENVOLVIMENTO DO PROJECTO – INCUBADORA NEONATAL

4.1. DIMENSIONAMENTO DO HARDWARE

O desenvolvimento do hardware do sistema de controle de temperatura e humidade envolve a escolha e integração de componentes que garantam o monitoramento, processamento e actuação no ambiente controlado. Abaixo está um guia para estruturar o desenvolvimento do hardware:

a) Componentes Principais

Sensor de Entrada

- **Sensor de Temperatura e Humidade DHT11:** Mede a temperatura e é responsável pelo monitoramento da humidade relativa do ar no ambiente da incubadora com alta precisão e confiabilidade.

b) Unidade de Processamento

- **Microcontrolador Arduíno MEGA2560:** Processa os sinais do sensor e executa o algoritmo fuzzy. O microcontrolador escolhido tem memória e capacidade de processamento suficientes para lidar com a lógica fuzzy e a comunicação com outros componentes.

c) Actuadores (Saídas)

- Ventilador: Reduz a temperatura e melhora a circulação do ar.
- Humidificador: Controla os níveis de humidade, aumentando quando necessário.
- Luz: Podem ser usadas para aquecimento auxiliar ou controle adicional.

d) Fonte de Alimentação

- Um módulo de alimentação confiável que forneça energia para todos os componentes (geralmente 5V e 12V, dependendo dos dispositivos).

e) Circuito de Controle

- MOSFETs (IRF530): Usados para activar os actuadores com segurança, isolando o circuito de alta potência do microcontrolador.

f) Estrutura do Circuito

- Conectar os sensores aos pinos de entrada analógica ou digital do microcontrolador.
- Conectar os actuadores aos pinos de saída através de drivers.
- Garantir que todos os componentes compartilhem um aterramento comum para evitar interferências no circuito.
- Usar resistores *pull-up/pull-down* conforme necessário para evitar leituras falsas dos sensores.

g) Design Físico

- Placa de Circuito: Utilizar uma placa de prototipagem (protoboard) para os testes iniciais e depois transferir para uma PCB projetada especificamente para o sistema.
- Gabinete: Construir ou adquirir um gabinete para proteger o hardware, garantindo a segurança dos componentes e evitando interferências externas.

h) Software de Integração

- Programar o microcontrolador para:
 - Capturar os dados dos sensores.
 - Processar os dados usando o sistema de inferência fuzzy.
 - Controlar os actuadores com base nas saídas do sistema fuzzy.

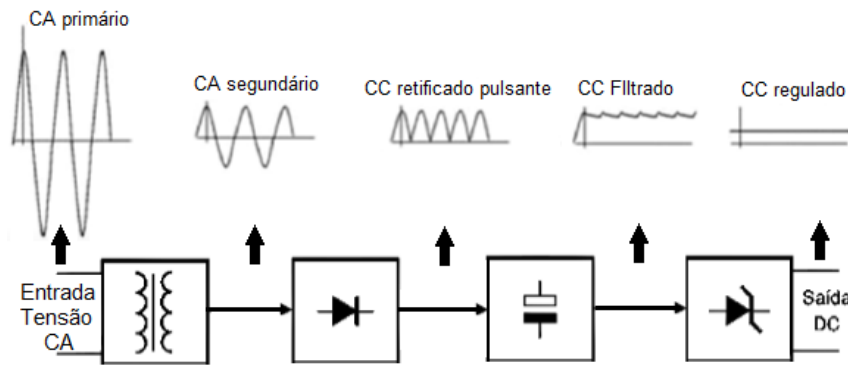


Figura 12: Etapas de rectificação linear.

Fonte: <https://sanusb.blogspot.com/2020/10/fonte-linear-e-fonte-chaveada.html>

- **Transformador:** tem a função de variar os níveis de tensão e corrente, mantendo constante a potencia, em projectos electrónicos, geralmente usam-se transformadores abaixadores, cuja finalidade é de reduzir a tensão no secundário de acordo com às necessidades da fonte e realiza o isolamento galvânico entre a rede e a carga (segurança).
- **Rectificador:** constituído por diodo(s) comum (rectificador), cuja a função é de transformar a tensão alternada em contínua.
- **Filtro:** reduz o conteúdo de harmónicos (tensões de *ripple*) presentes na saída do rectificador, proporcionando uma tensão contínua mais pura.
- **Regulador:** mantém a tensão contínua de saída fixa, mesmo com variações da corrente na carga, da tensão de linha ou da temperatura.

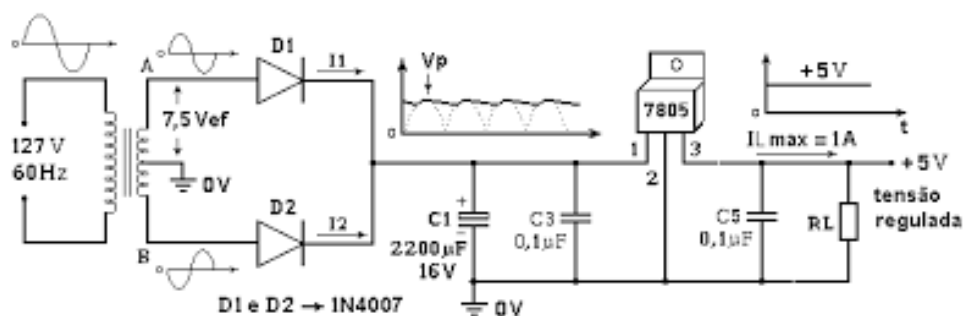


Figura 13: Diagrama esquemático de um rectificador de onda completa com regulador de tensão.

Fonte: <https://blog.novaeletronica.com.br/fonte-regulavel-estabilizada-de-bancada/>

As figuras 12 e 13, representam a etapa de transformação (CA – CC) e fonte de alimentação respectivamente, para o microcontrolador, uma vez que o microcontrolador tem como requisito de alimentação de 5 V CC, então pautou-se pelo dimensionamento de uma fonte de tensão CC, para alimentar o microcontrolador, bem como outros componentes de baixa alimentação que estarão acoplados no sistema, conforme nas páginas a seguir serão esclarecidas.

a) Dimensionamento do capacitor de filtro (electrolítico)

O transformador no secundário, terá uma tensão de 12 V e uma frequência de 50 Hz, de acordo com a rede nacional, assim sendo, o período em cada semiciclo será dado por:

$$T = \frac{1}{f} \Rightarrow T = \frac{1}{50\text{Hz}} \Rightarrow T = 0,02\text{s}$$

Uma vez que o tempo para carga e descarga do capacitor é metade do período, então fica:

$$t = \frac{T}{2} \Rightarrow t = \frac{0,02\text{s}}{2} \Rightarrow t = 0,01\text{s}$$

A variação de tensão do capacitor, é igual a tensão ripple, que é dada pela variação da tensão máxima e mínima.

$$V_C = V_{\text{ripple}} = V_{\text{máx}} - V_{\text{mín}}$$

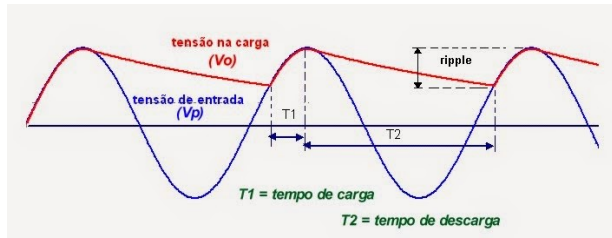


Figura 14: Efeito ripple no capacitor.

Fonte: <https://eletronica-analogica2015.blogspot.com/2015/04/>

A tensão máxima do capacitor, é dada pelo produto entre a tensão nos terminais do secundário e raiz de 2, subtraído pela queda de tensão dos dois díodos (1,4 V) que estarão conduzidos em cada semiciclo, daí tem-se:

$$V_{\text{máx}} = V_S \cdot \sqrt{2} \Rightarrow V_{\text{máx}} = 12 \cdot \sqrt{2} \Rightarrow V_{\text{máx}} = 16,971\text{V} \Rightarrow V_{\text{máx}} \approx 17\text{V}$$

$$V_{\text{máx}} = V_{\text{máx}} - V_D \Rightarrow V_{\text{máx}} = 17 - 1,4 \Rightarrow V_{\text{máx}} = 15,6\text{V}$$

Em regra, a tensão mínima no capacitor, que será a tensão na entrada do regulador, deve ser de até no máximo 2 V superior em relação a tensão de saída, uma vez que a tensão de saída do regulador deve ser de 5 V, então a tensão mínima do capacitor deverá ser de 7 V, isto é, $V_{\min} = 7V$

b) Regulador de tensão LM7805

O regulador de tensão LM7805 pode ser usado em fontes de alimentação, carregadores e circuitos em geral, fornecendo uma tensão fixa de 5 V na saída. O Regulador de Tensão 7805 pode receber tensão de 7 V a 20 V em seu terminal de entrada, entretanto, oferecerá em seu terminal de saída 5 V estabilizado com corrente máxima de 1.5 A.

Tabela 1: Especificações do regulador de tensão LM7805.

Item	Valor
Tensão de entrada	DC 7~20 V
Tensão de saída:	5 V DC
Corrente máxima:	1.5 A
Encapsulamento:	TO-220
Dimensões (AxLxE) (ignorando-se os pinos)	15,4 x 10 x 4,5 mm
Protecção térmica contra sobrecarga	

Fonte: Adaptado do datasheet.

Tabela 2: Tabela de materiais para rectificador.

Item	Componentes	Descrição
1	Transformador	220 AC to 12 V AC
2	2 Díodos	1N4001
4	CI	LM7805
7	3 Capacitores	22200 μ F; 2x0,1 μ F

Fonte: O Autor (2024).

4.1.2. ARDUÍNO MEGA 2560

O Arduino que será utilizado no projecto é o Arduino Mega 2560 R3, é uma placa baseada no ATMEGA2560. Possui 54 pinos de entrada/saída digital (dos quais 15 podem ser usados como saídas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (portas seriais de hardware), um oscilador de cristal de 16 MHz, uma conexão USB, um conector de alimentação, um conector ICSP, e um botão de *reset*. Ele contém tudo o que é necessário para dar suporte ao microcontrolador; basta conectá-lo a um computador com um cabo USB ou alimentá-lo com um adaptador AC-to-DC ou bateria (Silva, 2000).

Tabela 3: Especificações técnicas.

Microcontrolador	ATMEGA2560
Tensão operacional	5 V
Tensão de entrada (recomendados)	7 – 12 V
Tensão de entrada (limite)	6 – 20 V
Pinos de E/S digitais	54 (dos quais 15 fornecem saída PWM)
Pinos de entrada analógica	16
Corrente CC por pino de E/S	20 mA
Corrente CC para pino de 3,3 v	50 mA
Memória FLASH	256 kB dos quais 8 kB usados pelo bootloader
SRAM	8 kB
EEPROM	4 kB
Frequência	16 MHz

Fonte: <https://embarcados.com.br/arduino-mega-2560/>

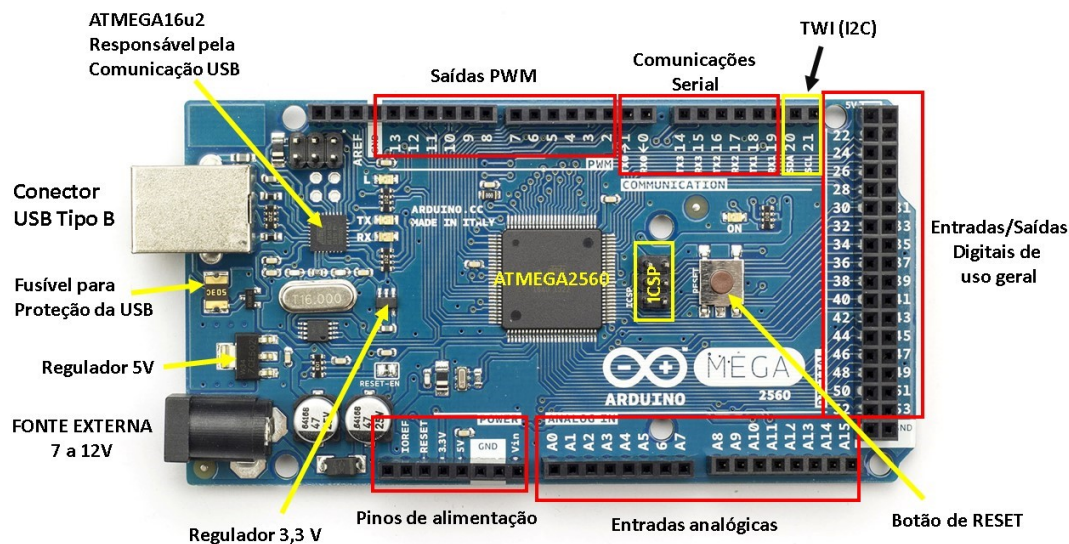


Figura 15: Características de Arduino Mega2560.

Fonte: <https://embarcados.com.br/arduino-mega-2560/>

- **IOREF** – fornece uma tensão de referência para que *shields* (escudo – elemento de protecção), possam seleccionar o tipo de interface apropriada, dessa forma *shields* que funcionam com a placas Arduino que são alimentadas com 3,3V podem ser adaptar para ser utilizados em 5V e vice-versa.
- **RESET** – pino conectado a pino de RESET do microcontrolador. Pode ser utilizado para um *reset* externo da placa Arduino.
- **3,3 V** – fornece tensão de 3,3V para alimentação de *shield* e módulos externos. Corrente máxima de 50 mA.
- **5 V** – fornece tensão de 5 V para alimentação de *shields* e circuitos externos.
- **GND** – pinos de referência, *ground*, terra.
- **VIN** – pino para alimentar a placa através de *shield* ou bateria externa. Quando a placa é alimentada através do conector *jack* a tensão da fonte estará nesse pino.

4.1.3. DISPLAY LCD16X2

a) Definição

O display LCD 16x2 é um tipo de display de cristal líquido amplamente utilizado em projectos electrónicos para exibir informações alfanuméricas. Ele é chamado de 16x2 porque possui duas linhas de 16 caracteres, permitindo exibir um total de 32 caracteres simultaneamente.

Esse display é será usado para mostrar os valores das grandezas de entrada e saída em tempo real.



Figura 16: 16x2 LCD display.

Fonte: <https://www.circuits-diy.com/arduino-lcd-display-module-16x2-character/>

b) Características principais

Tabela 4: Características principais do LCD 16x2.

Característica	Descrição
Resolução	16 caracteres por linha, 2 linhas no total.
Tensão de operação	Tipicamente 5V (alguns modelos podem funcionar com 3,3V).
Interface	O display pode ser controlado via uma interface paralela de 8 bits, ou de maneira mais comum com 4 bits, usando menos pinos do microcontrolador.
Backlight	A maioria dos modelos possui luz de fundo (backlight) que pode ser ligada ou desligada para facilitar a leitura em ambientes com pouca luz.
Controlador HD44780	A maioria dos displays 16x2 é compatível com o controlador HD44780, o que facilita a integração com bibliotecas padrão, como a LiquidCrystal do Arduino.

Fonte: Adaptado do datasheet.

c) Pinagem e função de cada pino

Tabela 5: Pinagem e função de cada pino.

Pino	Função	Ligação
Pino 1	VSS	Pino de alimentação (zero volts – GND)
Pino 2	VDD	Pino de alimentação de +5 V
Pino 3	VO	Pino de ajuste do contraste do LCD
Pino 4	RS	Seleção de Comandos (nível 0) ou Dados (nível 1)
Pino 5	R/W	Read (leitura – nível 1) / Write (escrita – nível 0)
Pino 6	E	Enable (Activa o display com nível 1 ou Desactiva com nível 0)
Pino 7	D0	Data bit 0 (usado na interface de 8 bits)
Pino 8	D1	Data bit 1 (usado na interface de 8 bits)
Pino 9	D2	Data bit 2 (usado na interface de 8 bits)
Pino 10	D3	Data bit 3 (usado na interface de 8 bits)
Pino 11	D4	Data bit 4 (usado na interface de 4 e 8 bits)
Pino 12	D5	Data bit 5 (usado na interface de 4 e 8 bits)
Pino 13	D6	Data bit 6 (usado na interface de 4 e 8 bits)
Pino 14	D7	Data bit 7 (usado na interface de 4 e 8 bits)
Pino 15	A	Ânodo do LED de iluminação (+5V CC)
Pino 16	K	Cátodo do LED de iluminação (GND)

Fonte: <https://blog.eletragate.com/guia-completo-do-display-lcd-arduino/>

A iluminação do LCD é feita pelo LED. O pino 15 (Ânodo do LED) pode ser conectado directamente em +5 V e o pino 16 (cátodo do LED) deve ser conectado na terra (GND).

Dessa forma, o LED vai consumir aproximadamente 22 mA.

O consumo total de corrente (LCD + LED) do LCD 16×2 Azul é de aproximadamente 23 mA (sem considerar o *backlight*, que pode levar o consumo para entre 40 e 120 mA). Para ajuste do contraste do LCD, a tensão no pino 3 (VO) deve ser ajustada.

d) Funcionamento

Para exibir informações no display, o microcontrolador envia comandos e dados ao LCD. O modo de operação mais comum utiliza 4 pinos de dados (D4 a D7), economizando pinos do microcontrolador. O comando de controle define como o texto será exibido, como o cursor e o deslocamento da tela.

e) Conexão arduino-display LCD 16×2

O com I2C pode ser conectado ao arduino por meio de um barramento Paralelo (4 ou 8 bits) ou serial (I2C). Para realizar a conexão paralela, é preciso contar com um maior número de ligações e conectores, para a tal conexão é preciso:

- Placa arduino;
- Protoboard;
- Potenciômetro 20 k Ω ;
- Jumpers;
- Display.

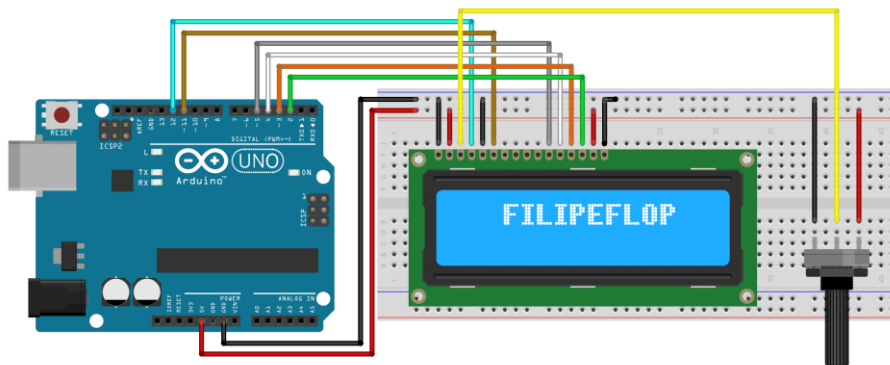


Figura 17: Conexão arduino-display LCD 16×2.

Fonte: O Autor. (2024).

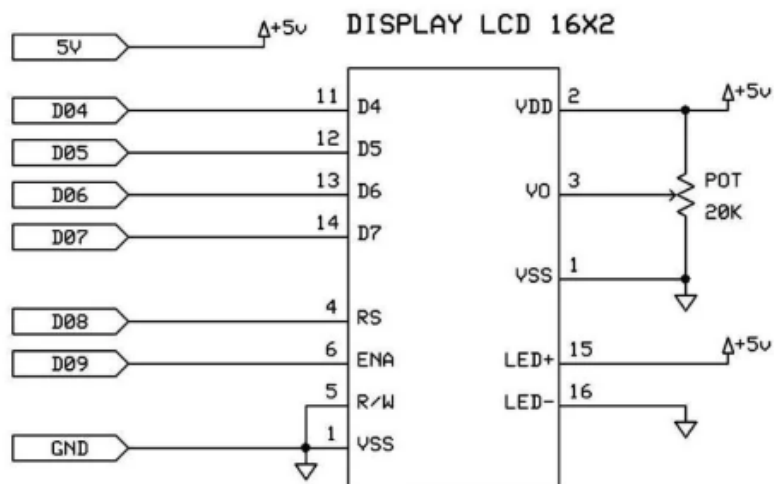


Figura 18: Circuito esquemático da conexão.

Fonte: <https://blog.eletrogate.com/guia-completo-do-display-lcd-arduino/>

f) Código de conexão

```
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda
sketch_oct24a$
1 #include <LiquidCrystal.h>
2
3 // Define os pinos para RS, E, D4, D5, D6 e D7
4 LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);
5
6 void setup() {
7   // Inicializa o LCD, definindo o número de colunas e linhas
8   lcd.begin(16, 2);
9
10  // Exibe uma mensagem na primeira linha
11  lcd.print("Hello, World!");
12
13  // Move o cursor para a segunda linha
14  lcd.setCursor(0, 1);
15
16  // Exibe uma mensagem na segunda linha
17  lcd.print("Arduino & LCD");
18 }
19
20 void loop() {
21   // O loop não faz nada neste exemplo
22 }
```

Figura 19: Código de conexão.

Fonte: O Autor. (2024).

4.1.4. TRANSÍSTOR 2N2222A

a) Definição

O transistor 2N2222A é um dos transistores bipolares de junção (BJT) mais populares e amplamente usados para aplicações de uso geral em circuitos de baixa e média potência. Ele é conhecido por sua robustez, alta capacidade de amplificação e versatilidade, sendo uma escolha comum para protótipos e circuitos de controle.

O transistor 2N2222A, será acoplado ao ventilador para poder modular a saída do ventilador numa variável discreta por PWM, em um sinal que o arduíno possa interpretar.

b) Características Básicas.

Tabela 6: Características Básicas.

Item	Descrição
Tipo	NPN (o colector e o emissor permitem a condução quando uma corrente é aplicada à base).
Encapsulamento	TO-92 (plástico) e TO-18 (metálico).
Corrente Colector-Emissor Máxima (I_c)	800 mA, ideal para aplicações que exigem uma corrente relativamente alta.
Tensão Coletor-Emissor Máxima (V_{ce})	40 V, permitindo que ele seja usado em circuitos de baixa e média tensão.
Ganho de Corrente (h_{FE})	Geralmente varia entre 100 e 300, dependendo das condições de operação e da corrente de base.
Dissipação de Potência	Até 500 mW, permitindo que ele lide com uma potência considerável sem aquecer excessivamente em circuitos de baixa tensão.

Fonte: Adaptada do datasheet.

c) Estrutura Interna e Terminais

O 2N2222A possui três terminais:

1. **Emissor (E):** Terminal de saída de corrente.
2. **Base (B):** Controla o fluxo de corrente entre o coletor e o emissor.
3. **Colector (C):** Terminal de entrada de corrente.

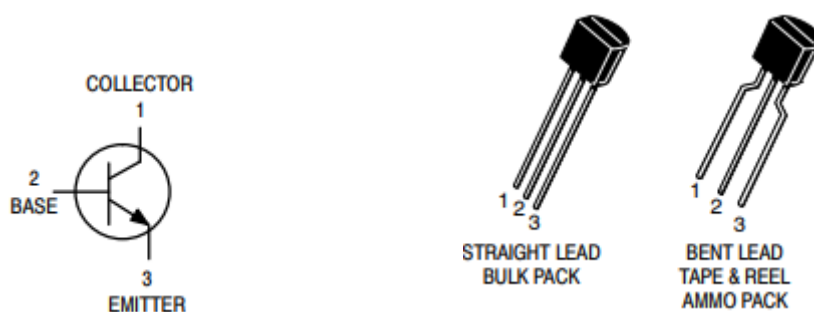


Figura 20: Estrutura Interna e Terminais.

Fonte: Adaptada do datasheet.

d) Funcionamento Básico

O transistor 2N2222A actua como um interruptor ou amplificador, controlando a passagem de corrente entre o colector e o emissor com uma pequena corrente aplicada à base. Em um transistor NPN, como o 2N2222A:

- Quando a tensão na base é maior que a do emissor, o transistor entra em condução.
- Quando a tensão na base é removida ou está abaixo do nível de condução, o transistor é bloqueado e não permite a passagem de corrente entre o colector e o emissor.

4.1.5. TRANSÍSTOR IRF530

a) Definição

O transistor IRF530 é um tipo de MOSFET (*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*) de potência, amplamente utilizado em circuitos de comutação e aplicações onde é necessário controlar altas correntes e tensões. Ele é um MOSFET de canal N com características que o tornam ideal para aplicações em que são exigidas altas velocidades de chaveamento, como em fontes de alimentação, inversores e circuitos de controle de motores.

Este transistor será acoplado a uma lâmpada de halogénio de 12V CC, uma vez que esse transistor é usado para accionamento de cargas, dessa forma a intensidade da luz, será convertido num valor discreto PWM.

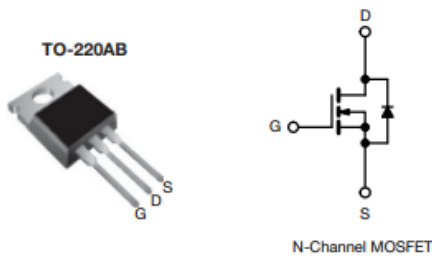


Figura 21: Estrutura do transístor IRF530.

Fonte: Adaptado do datasheet.

b) Principais Características do IRF530

- **Configuração de Canal:** Canal N, o que significa que ele conduz quando a tensão no terminal Gate (G) é positiva em relação ao Source (S).
- **Tensão e Corrente:**
 - **Tensão de Dreno-Fonte (V_{DS}):** Até 100 V, o que permite que seja usado em aplicações com tensões relativamente altas.
 - **Corrente de Dreno (I_D):** Até 14 A em condições ideais, possibilitando o controle de cargas com correntes moderadamente altas.
- **Resistência Dreno-Fonte ($R_{DS(ON)}$):** Baixa resistência quando em condução, com um valor típico de cerca de 0,16 Ω . Isso reduz a dissipação de energia e o aquecimento, tornando-o eficiente para aplicações de comutação.
- **Tensão de Gate (V_{GS}):** O transístor é normalmente activado com tensões de 10 V no gate, mas começa a conduzir a partir de aproximadamente 4 V, facilitando o uso em circuitos com microcontroladores que fornecem níveis lógicos comuns (5 V).

4.1.6. SENSOR DE TEMPERATURA E HUMIDADE DHT11

a) Definição

O DHT11 é um sensor amplamente utilizado para medir temperatura e humidade relativa do ambiente. Ele é muito popular em projectos de electrónica, como automação residencial e sistemas de controle ambiental, devido à sua simplicidade de uso, baixo custo e integração fácil com microcontroladores, como o Arduino, ESP32 e Raspberry Pi.

Este sensor será acoplado logo na entrada do sistema, para realizar a medição da temperatura e humidade, para posterior processamento de decisão, em função das regras.

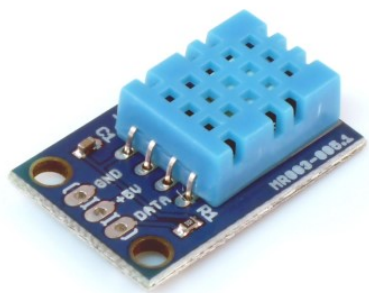


Figura 22: Módulo do sensor de temperatura e humidade DHT11.

Fonte: <https://www.electrofun.pt/sensores-arduino/sensor-temperatura-humidade-dht11>.

b) Características

Tabela 7: Características do sensor DHT11.

Características	Descrição
Tensão de operação	3 – 5 V (5,5 V máximo)
Corrente máxima durante o uso	500 mA
Corrente máxima em modo de espera	100 μ A a 150 μ A
Faixa de medição de temperatura	0 – 50°C; $\pm 2^\circ$ C
Faixa de medição de humidade	20 – 90% RH; $\pm 5\%$ RH
Interface	Digital
Dimensões	23 mm x 12 mm x 5 mm (sem terminais)
Peso	(2.7g)
Tempo de resposta	2 Segundos

Fonte: Adaptado. Datasheet do sensor DHT11.

c) Estrutura do Sensor

O DHT11 é composto de dois componentes principais:

- **Sensor de humidade capacitivo:** Mede a humidade relativa do ar com base nas mudanças de capacitância de um material sensível à humidade.
- **Termistor NTC:** Um resistor cuja resistência varia de acordo com a temperatura, usado para medir a temperatura do ambiente.

d) Pinagem do DHT11

O sensor de humidade e temperatura DHT11 possui quatro pinos: VCC, DADOS, N.C e GND. O pino VCC é conectado à alimentação, o pino DADOS é usado para enviar os dados do sensor para o microcontrolador (geralmente um Arduino) e o pino GND é conectado à terra. O pino NC não deve ser conectado.



Figura 23: Pinagem do sensor DHT11.

Fonte: <https://www.electrofun.pt/sensores-arduino/sensor-temperatura-humidade-dht11>.

Tabela 8: Conexão e pinagem do sensor DHT11.

Pino		Funcionalidade
1	VCC	Tensão de alimentação VCC (+5V)
2	DATA	Saída serial de dados (sinal)
3	NC	Sem conexão
4	GND	Ground (Terra)

Fonte: Adaptado do datasheet.

e) Funcionamento

O DHT11 usa um protocolo serial para enviar as leituras de temperatura e humidade através de um único pino de dados. O sensor colecta os dados e os envia ao microcontrolador em um formato digital pré-processado, o que elimina a necessidade de cálculos adicionais do lado do microcontrolador. Isso simplifica sua implementação em sistemas embarcados.

f) Conexão Arduino – Sensor DHT11

Conectar o sensor de humidade e temperatura DHT11 ao Arduino é relativamente simples e requer apenas alguns passos. Aqui está um guia passo a passo para fazer isso:

- VCC do DHT11 → 5V do Arduino.
- GND do DHT11 → GND do Arduino.
- DATA do DHT11 → Pino digital 2 do Arduino (ou outro pino digital disponível).

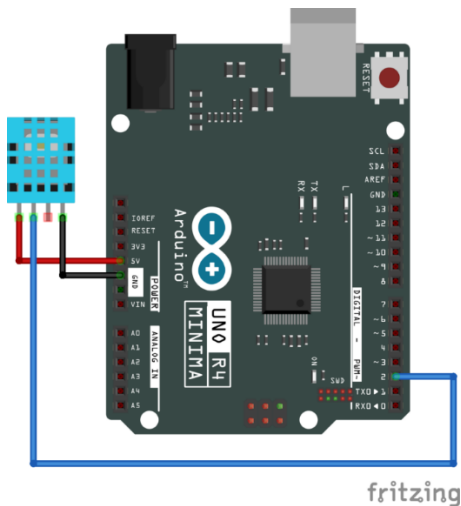


Figura 24: Conexão dos pinos do sensor no Arduino.

Fonte: O Autor (2024).

O barramento precisa de uma resistência de *pull-up* de $5k\Omega$ e a ligação com o sistema é realizada como mostrado abaixo.

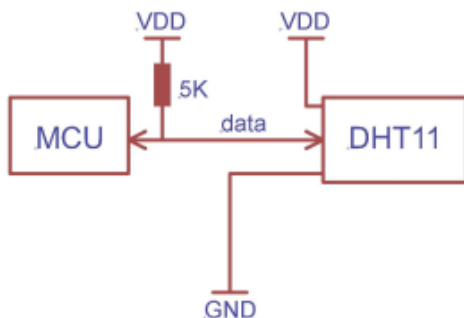


Figura 25: Sistema pull-up do sensor DHT11.

Fonte: O Autor. (2024).

g) Código Arduíno



The image shows the Arduino IDE interface with a sketch named 'DHT11_LT'. The code is as follows:

```
Arquivo Editar Sketch Ferramentas Ajuda

DHT11_LT$

1 #include <DHT.h>
2
3 #define DHTPIN 2      // Pino digital conectado ao sensor
4 #define DHTTYPE DHT11 // Define o tipo de sensor DHT (neste caso, DHT11)
5
6 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE); // Inicializa o sensor DHT11
7
8 void setup() {
9   Serial.begin(9600);
10  dht.begin();
11 }
12
13 void loop() {
14   // Aguarda 2 segundos entre as leituras
15   delay(2000);
16
17   // Lê a humidade
18   float humidade = dht.readHumidity();
19
20   // Lê a temperatura em Celsius
21   float temperatura = dht.readTemperature();
22
23   // Verifica se a leitura falhou
24   if (isnan(humidade) || isnan(temperatura)) {
25     Serial.println("Falha ao ler o sensor!");
26     return;
27   }
28
29   // Exibe as leituras no monitor serial
30   Serial.print("Humidade: ");
31   Serial.print(humidade);
32   Serial.print(" %\t");
33   Serial.print("Temperatura: ");
34   Serial.print(temperatura);
35   Serial.println(" °C");
36 }
```

Figura 26: Código arduíno do DHT11.

Fonte: Adaptado do software arduíno.

4.2. DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE – SISTEMA DE CONTROLE FUZZY

4.2.1. SISTEMA FUZZY

O sistema fuzzy, ou sistema de lógica difusa, é uma abordagem que permite lidar com incertezas e imprecisões na tomada de decisões. Ao contrário da lógica clássica, que trabalha com valores binários (verdadeiro ou falso), a lógica difusa permite graus de verdade, representando informações de maneira mais próxima da forma como os humanos raciocinam.

Entretanto, sistemas são desenvolvidos para resolver problemas. Assim, uma vez que precisamos resolver a questão sob ambiente e sensação térmica em uma incubadora neonatal, obedeceremos os seguintes passos:

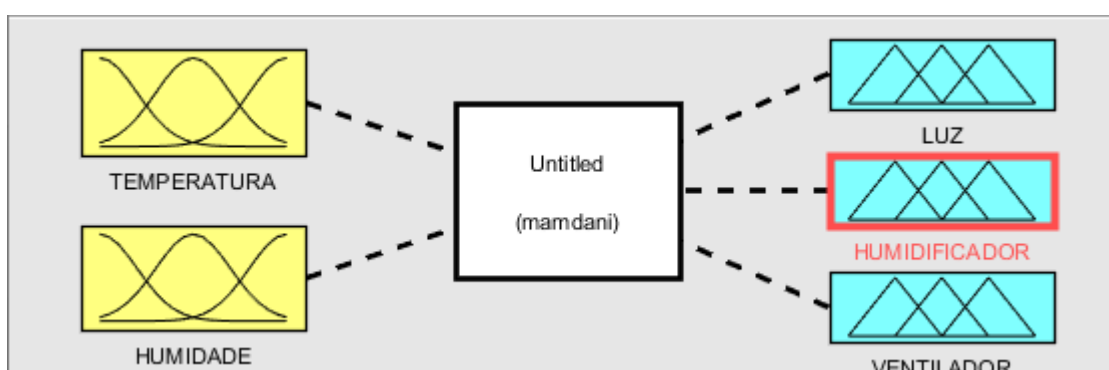


Figura 27: Painel do sistema fuzzy do MATLAB.

Fonte: O Autor (2024).

a) Problema em estudo

Pretende-se criar um sistema de controlo, de temperatura e humidade, para poder controlar a sensação térmica dentro de uma incubadora neonatal com recurso a logica fuzzy.

O projecto do Sistema Fuzzy será organizado conforme as três etapas do raciocínio fuzzy:

- Fuzzificação;
- Inferência Fuzzy;
- Defuzzificação.

b) Fuzzificação

Etapas na qual as variáveis linguísticas são definidas de forma subjectiva, bem como as funções membro (funções de pertinência).

- **Engloba:**

- i. **Análise do Problema**

Uma vez que a temperatura no ambiente uterino é, em geral, ligeiramente superior à temperatura corporal da mãe. Ela gira em torno de 37,5°C a 38°C, então valores aproximados serão processados no sistema de controlo e posteriormente fuzzificados. Pois a essa temperatura estável é essencial para o desenvolvimento fetal, pois mantém um ambiente constante, protegido das variações externas de temperatura.

Embora não haja uma medição directa da humidade relativa como em ambientes externos, o útero é considerado um ambiente de humidade extremamente alta, próximo de 98%. Esse alto nível de humidade é garantido pelo líquido amniótico, que envolve o feto e o protege contra a desidratação, além de proporcionar um meio de suporte e amortecimento contra choques externos.

- ii. **Definição das Variáveis**

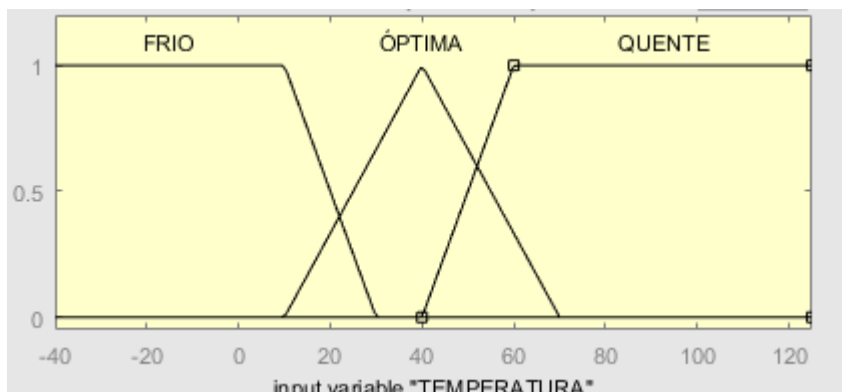
Na lógica fuzzy, as variáveis são fundamentais para modelar sistemas imprecisos e lidar com a incerteza. Uma variável fuzzy é uma extensão da variável clássica, que pode assumir valores não apenas em um intervalo definido, mas em graus de pertencimento a diferentes conjuntos fuzzy.

Para o controle fuzzy de temperatura e humidade em uma incubadora neonatal, as variáveis de entrada são:

Variáveis de entrada

- **Temperatura:** A faixa de temperatura representa a condição térmica dentro da incubadora. Esta variável é crucial, pois manter uma temperatura adequada é essencial para o bem-estar do recém-nascido.
 - **Faixa:** Geralmente entre – 40°C e 120°C, dependendo dos requisitos do ambiente controlado.
 - **Conjuntos Fuzzy:** Tipicamente categorizados como “Frio”, “Óptima” e “Quente”.

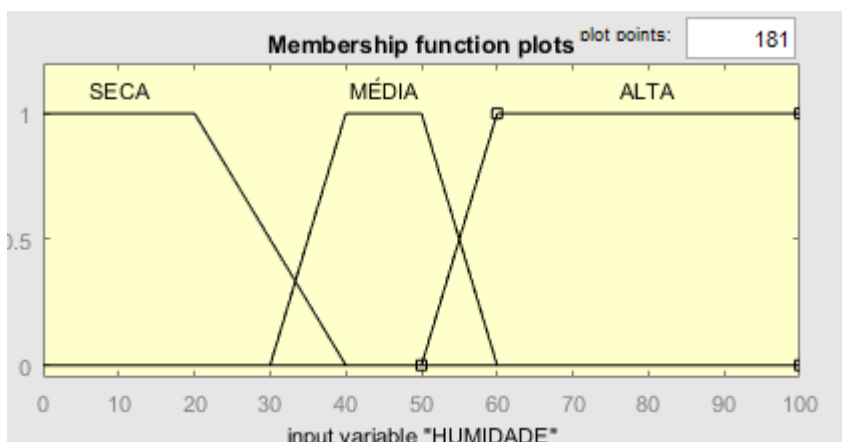
Gráfico 1: Conjunto fuzzy de temperatura.



Fonte: O Autor (2024).

- **Humidade:** A faixa de humidade indica o nível de vapor de água no ambiente da incubadora, afectando a hidratação e o conforto do recém-nascido.
 - **Faixa:** Geralmente entre 0% e 100%.
 - **Conjuntos Fuzzy:** Com categorias como “Seca”, “Média” e “Alta”.

Gráfico 2: Conjunto fuzzy de humidade.



Fonte: O Autor (2024).

Essas variáveis de entrada fornecem informações ao sistema fuzzy, que, por meio das regras de inferência, determina os ajustes necessários para manter um ambiente estável na incubadora.

Variáveis de saída

Essas variáveis de saída controlam os mecanismos de ajuste de temperatura e humidade da incubadora, com o objectivo de manter condições ideais para o recém-nascido.

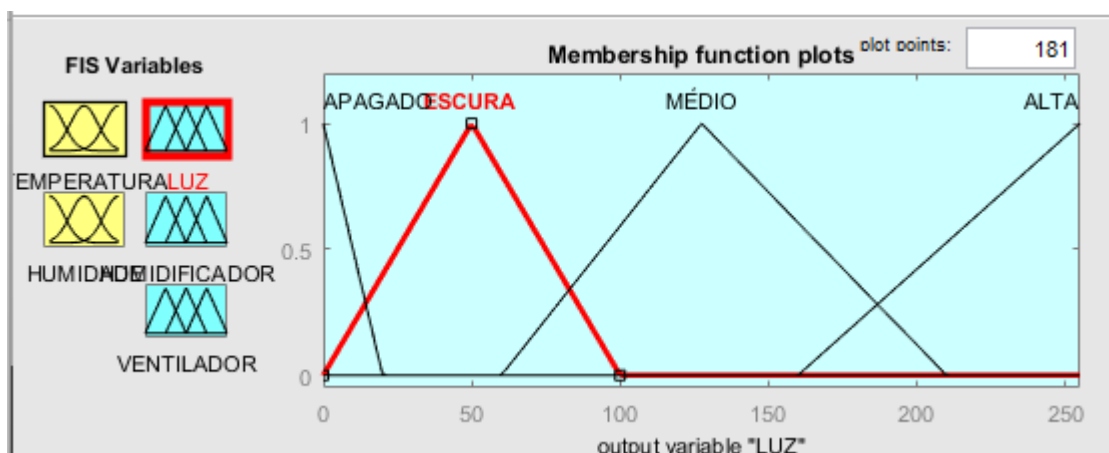
Para o sistema de controle de uma incubadora neonatal com lógica fuzzy, onde as saídas são **luz**, **humidificador** e **ventilador**, podemos definir conjuntos fuzzy para cada uma dessas variáveis de saída. Os conjuntos fuzzy representam diferentes intensidades de actuação para cada saída. Vamos definir os conjuntos fuzzy comuns para esses dispositivos:

Conjunto Fuzzy da Luz

A variável de saída luz controla a intensidade da iluminação dentro da incubadora para manter um ambiente adequado. Os conjuntos fuzzy para a luz podem ser:

- **Apagado:** Ausência da luz.
- **Escuro:** Baixa intensidade, adequada para evitar estímulos excessivos.
- **Média:** Intensidade moderada, usada para condições padrões.
- **Alta:** Alta intensidade, para casos em que mais iluminação é necessária (por exemplo, em condições de pouca luz externa).

Gráfico 3: Variável de saída luz.



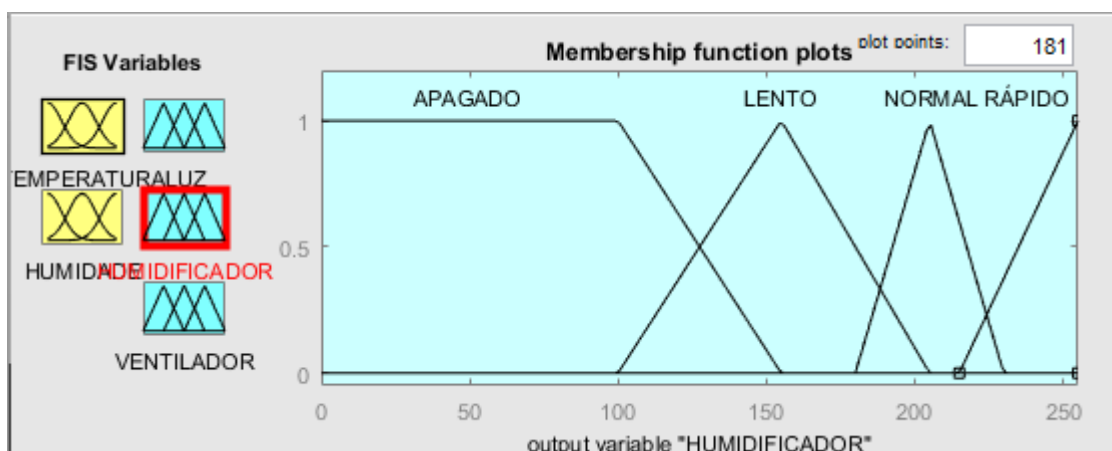
Fonte: O Autor (2024).

Conjunto Fuzzy do Humidificador

O humidificador ajusta o nível de humidade para garantir que o ar da incubadora esteja no nível ideal para o recém-nascido. Os conjuntos fuzzy podem incluir:

- **Apagado:** Humidificador desligado.
- **Lento:** Baixa humidificação, para ambientes que já estão húmidos.
- **Normal:** Humidificação moderada, para níveis de humidade dentro do intervalo ideal.
- **Rápido:** Alta humidificação, para condições muito secas onde é necessário um nível de humidade mais elevado.

Gráfico 4: Variável de saída humidificador.



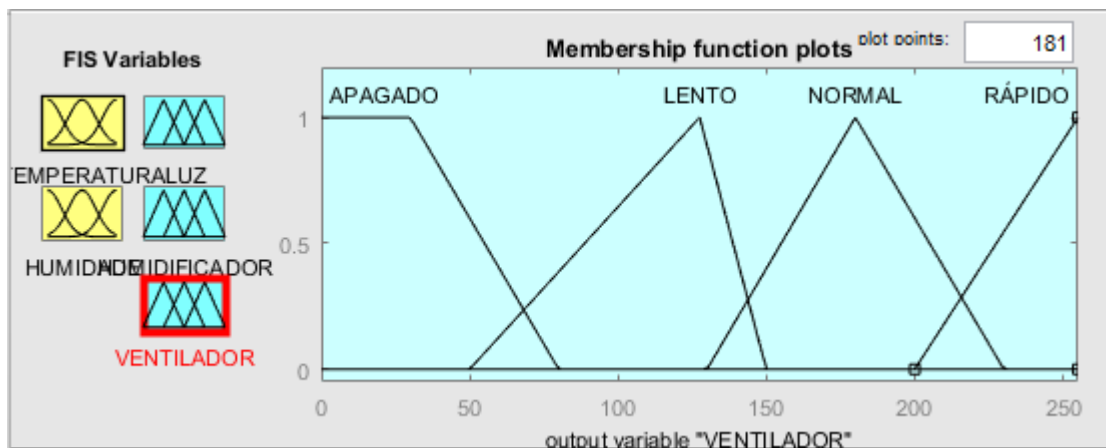
Fonte: O Autor (2024).

Conjunto Fuzzy do Ventilador

O ventilador controla a circulação de ar para manter a temperatura e renovar o ar na incubadora. Os conjuntos fuzzy são:

- **Baixo:** Baixa circulação, utilizada para manter um ambiente de temperatura estável.
- **Médio:** Circulação média, adequada para ventilação normal e leve controle de temperatura.
- **Alto:** Alta circulação, utilizada para resfriamento rápido ou em condições de alta temperatura.

Gráfico 5: Variável de saída ventilador.



Fonte: O Autor (2024).

iii. Definição das Funções de pertinência

Para o sistema de controle fuzzy em uma incubadora neonatal, as funções de pertinência são definidas para as variáveis de entrada (temperatura e humidade) e de saída (ajustes de temperatura e humidade). Essas funções de pertinência categorizam os valores em níveis qualitativos, como “Baixa”, “Média” e “Alta”.

Vamos detalhar a definição dessas funções usando funções triangulares e trapezoidais comuns em controle fuzzy.

Temperatura (Variável de Entrada)

A variável temperatura é categorizada para facilitar o controle do sistema com base em níveis apropriados para recém-nascidos. Considerando uma faixa de -40°C a 125°C :

```
14 [Input1]
15 Name='TEMPERATURA'
16 Range=[-40 125]
17 NumMFs=3
18 MF1='FRIO': 'trapmf', [-40 -40 10 30]
19 MF2='OPTIMA': 'trimf', [10 37.5 65]
20 MF3='QUENTE': 'trapmf', [45 55 125 125]
```

Figura 28: Funções de pertinência da temperatura.

Fonte: O Autor (2024).

Humidade (Variável de Entrada)

A variável humidade define o nível de vapor de água no ambiente da incubadora, com uma faixa de 0 a 100%:

```
22 [Input2]
23 Name='HUMIDADE'
24 Range=[0 100]
25 NumMFs=3
26 MF1='SECO':'trapmf',[0 0 20 40]
27 MF2='MEDIA':'trapmf',[30 40 50 60]
28 MF3='ALTA':'trapmf',[50 60 100 100]
```

Figura 29: Funções de pertinência da humidade.

Fonte: O Autor (2024).

Luz

A variável de saída luz controla a intensidade de iluminação, e os conjuntos de pertinência podem ser:

```
30 [Output1]
31 Name='LUZ'
32 Range=[0 255]
33 NumMFs=4
34 MF1='ALTO':'trimf',[160 255 255]
35 MF2='MEDIO':'trimf',[60 127.5 210]
36 MF3='ESCURO':'trimf',[0 50 100]
37 MF4='APAGADO':'trimf',[0 0 20]
```

Figura 30: Funções de pertinência da luminosidade.

Fonte: O Autor (2024).

Humidificador

A variável humidificador controla o nível de humidade e pode ter conjuntos fuzzy como:

```
39 [Output2]
40 Name='HUMIDIFICADOR'
41 Range=[0 255]
42 NumMFs=4
43 MF1='LENTO':'trimf',[100 155 205]
44 MF2='NORMAL':'trimf',[180 205 230]
45 MF3='RAPIDO':'trimf',[215 255 255]
46 MF4='APAGADO':'trapmf',[0 0 100 155]
```

Figura 31: Funções de pertinência do humidificador.

Fonte: O Autor (2024).

Ventilador

A variável ventilador regula a circulação de ar e mantém a temperatura. Os conjuntos fuzzy podem ser:

```
48 [Output3]
49 Name='VENTILADOR'
50 Range=[0 255]
51 NumMFs=4
52 MF1='APAGADO': 'trapmf',[0 0 30 80]
53 MF2='LENTO': 'trimf',[50 100 150]
54 MF3='NORMAL': 'trimf',[125 177.5 230]
55 MF4='RAPIDO': 'trimf',[200 255 255]
```

Figura 32: Funções de pertinência do ventilador.

Fonte: O Autor (2024).

Essas funções de pertinência permitem que o sistema fuzzy interprete os valores contínuos das variáveis de entrada, para ajustar a temperatura e a humidade de forma contínua e precisa.

iv. Regras

No contexto de sistemas de lógica fuzzy, regras são declarações que definem como as variáveis de entrada se relacionam com as variáveis de saída. Elas são a base para o processo de inferência fuzzy, onde as condições e acções são formuladas de maneira similar ao raciocínio humano. Essas regras ajudam a transformar entradas (como temperatura e umidade) em saídas (como intensidade da luz, nível do humidificador e velocidade do ventilador) de maneira adaptativa.

```
57 [Rules]
58 1 1, 1 3 1 (1) : 1
59 1 2, 1 2 2 (1) : 1
60 1 3, 1 1 4 (1) : 1
61 2 1, 3 3 1 (1) : 1
62 2 2, 2 2 3 (1) : 1
63 2 3, 1 1 4 (1) : 1
64 3 1, 4 3 2 (1) : 1
65 3 2, 4 2 3 (1) : 1
66 3 3, 3 4 4 (1) : 1
```

Figura 33: Regras do sistema fuzzy do sistema.

Fonte: O Autor (2024).

```

1. If (TEMPERATURA is FRIJO) and (HUMIDADE is SECA) then (LUZ is ALTA)(HUMIDIFICADOR is RÁPIDO)(VENTILADOR is APAGADO) (1)
2. If (TEMPERATURA is FRIJO) and (HUMIDADE is MÉDIA) then (LUZ is ALTA)(HUMIDIFICADOR is NORMAL)(VENTILADOR is LENTO) (1)
3. If (TEMPERATURA is FRIJO) and (HUMIDADE is ALTA) then (LUZ is ALTA)(HUMIDIFICADOR is LENTO)(VENTILADOR is RÁPIDO) (1)
4. If (TEMPERATURA is ÓPTIMA) and (HUMIDADE is SECA) then (LUZ is ESCURA)(HUMIDIFICADOR is RÁPIDO)(VENTILADOR is APAGADO) (1)
5. If (TEMPERATURA is ÓPTIMA) and (HUMIDADE is MÉDIA) then (LUZ is MÉDIO)(HUMIDIFICADOR is NORMAL)(VENTILADOR is NORMAL) (1)
6. If (TEMPERATURA is ÓPTIMA) and (HUMIDADE is ALTA) then (LUZ is ALTA)(HUMIDIFICADOR is LENTO)(VENTILADOR is RÁPIDO) (1)
7. If (TEMPERATURA is QUENTE) and (HUMIDADE is SECA) then (LUZ is APAGADO)(HUMIDIFICADOR is RÁPIDO)(VENTILADOR is LENTO) (1)
8. If (TEMPERATURA is QUENTE) and (HUMIDADE is MÉDIA) then (LUZ is APAGADO)(HUMIDIFICADOR is NORMAL)(VENTILADOR is NORMAL) (1)
9. If (TEMPERATURA is QUENTE) and (HUMIDADE is ALTA) then (LUZ is ESCURA)(HUMIDIFICADOR is APAGADO)(VENTILADOR is RÁPIDO) (1)

```

TEMPERATURA is	and	HUMIDADE is	Then	and	HUMIDIFICADOR is	and	VENTILADOR is
FRIJO ÓPTIMA QUENTE none		SECA MÉDIA ALTA none	ESCURA MÉDIO ALTA APAGADO none		LENTO NORMAL RÁPIDO APAGADO none		APAGADO NORMAL RÁPIDO LENTO none
☐ not		☐ not	☐ not		☐ not		☐ not

Connection: ☐ or ☒ and

Weight: 1

Buttons: Delete rule, Add rule, Change rule, <<, >>

Figura 34: Regras do sistema MATLAB.

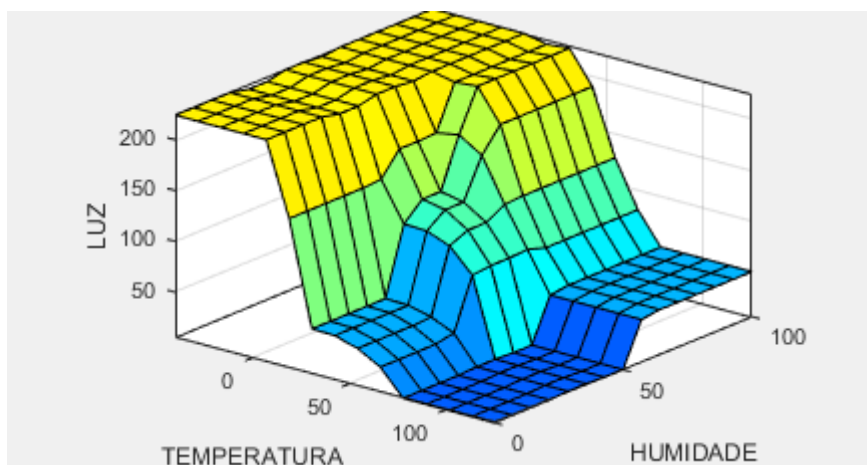
Fonte: O Autor (2024).

c) Defuzzificação

A última etapa é a defuzzificação, que converte a saída fuzzy agregada em um valor exacto ou “crisp”. O método de defuzzificação mais comum é o Centroide, onde a média ponderada de todos os resultados fuzzy é calculada para fornecer uma única saída numérica.

- **Exemplo:** Se o ajuste da temperatura resulta em um conjunto fuzzy que combina “aumentar ligeiramente” e “manter”, a defuzzificação pode calcular um valor exacto como $+2^{\circ}\text{C}$.

Gráfico 6: Saída da luminosidade.



Fonte: O Autor (2024).

A imagem apresentada mostra uma matriz de valores onde as entradas são temperatura em Celcius e humidade em percentagem, (indicada nos eixos X e Y). A saída, que é luminosidade medida em lumens, numa escala de 0 – 255 em PWM, está representada pelas cores na matriz.

Eixo X e Y:

- Representam os níveis de humidade, variando de 0 a 100%. Isso sugere que tanto a entrada no eixo horizontal (X) quanto no vertical (Y) são relacionadas a medições de humidade.

Cores Representadas:

- **Azul escuro:** Indica níveis mais baixos de luminosidade.
- **Azul claro/Ciano:** Indica um aumento intermediário de luminosidade.
- **Amarelo:** Indica altos níveis de luminosidade.

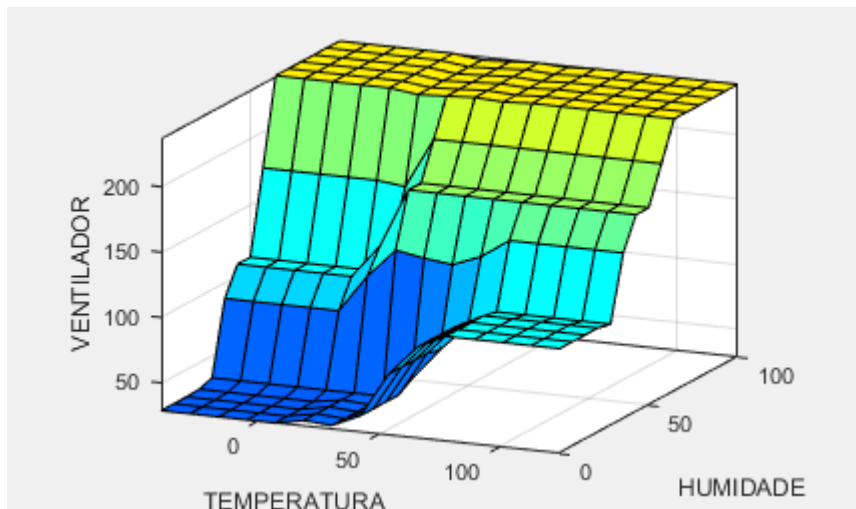
Relação entre Entradas e Saída:

- Quando os níveis de humidade estão baixos (regiões superiores da matriz), a saída de luminosidade é representada pelo azul escuro (baixa intensidade de luz).
- À medida que a humidade aumenta (regiões inferiores), a saída de luminosidade vai para o amarelo (alta intensidade de luz).
- A luminosidade aumenta com o aumento da humidade.

Aplicação no Sistema de Controle:

- O gráfico demonstra como a saída do sistema (luminosidade) é ajustada com base nos níveis de entrada (humidade).
- Em situações de baixa humidade, o sistema fornece menor luminosidade, enquanto em alta humidade, a luminosidade aumenta.

Gráfico 7: Saída do ventilador.



Fonte: O Autor (2024).

A imagem apresenta um gráfico que relaciona as variáveis de temperatura e humidade com a saída do sistema, que neste caso é a intensidade do ventilador. As cores representam a resposta do ventilador ao comportamento das variáveis de entrada.

Eixos de Entrada:

- **Temperatura:** Varia de -40 a 120 °C.
Refere-se aos diferentes níveis de temperatura que afetam o controle do ventilador.
- **Humidade:** Varia de 0 a 100%.
Refere-se aos níveis de humidade no ambiente.

Saída: Ventilador (rpm – PWM – Representado pelas cores):

- **Azul escuro:** Indica que o ventilador está desligado ou funcionando em baixa intensidade.
- **Azul claro/Ciano:** Indica um nível intermediário de funcionamento do ventilador.
- **Amarelo:** Representa o ventilador operando em alta intensidade.

Relação entre Entradas e Saída:

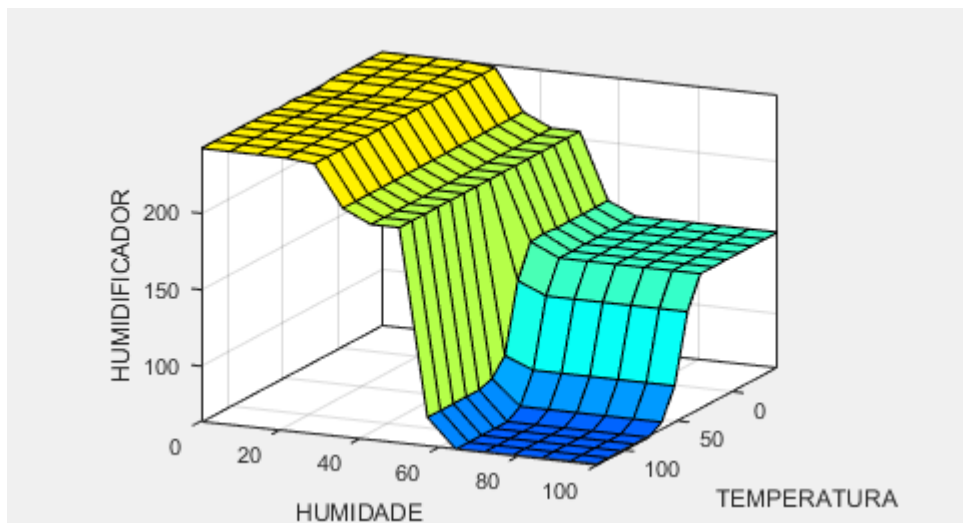
- Em baixas temperaturas e em níveis variados de humidade, o ventilador opera com baixa intensidade (azul escuro).
- À medida que a temperatura aumenta, especialmente combinada com humidade média a alta, o ventilador aumenta gradativamente sua intensidade (ciano e amarelo).

- Regiões com alta temperatura e alta humidade acionam o ventilador na máxima intensidade (amarelo).

Comportamento Notável:

- O ventilador responde mais às mudanças de temperatura do que às mudanças de humidade.
- Humidade elevada, combinada com temperaturas altas, maximiza a actuação do ventilador.

Gráfico 8: Saída do Humidificador.



Fonte: O Autor (2024).

A imagem apresentada mostra um gráfico que relaciona as variáveis de temperatura e humidade com a saída do sistema, que neste caso é o humidificador. As cores representam os diferentes níveis de actuação do humidificador em função das condições de entrada.

Eixos de Entrada:

- **Temperatura:** Varia de -40 a 120 °C. Refere-se aos níveis de temperatura que afetam o acionamento do humidificador.
- **Humidade:** Varia de 0 a 100%. Refere-se aos níveis de umidade do ambiente.

Saída: Humidificador (PWM – Representado pelas cores):

- **Amarelo:** Indica que o humidificador está desligado ou em baixa intensidade (não há necessidade de actuação).

- **Verde claro:** Representa um nível intermediário de actuação do humidificador.
- **Ciano:** Indica que o humidificador está funcionando em intensidade moderada.
- **Azul:** Indica que o humidificador está em alta intensidade, com máxima actuação.

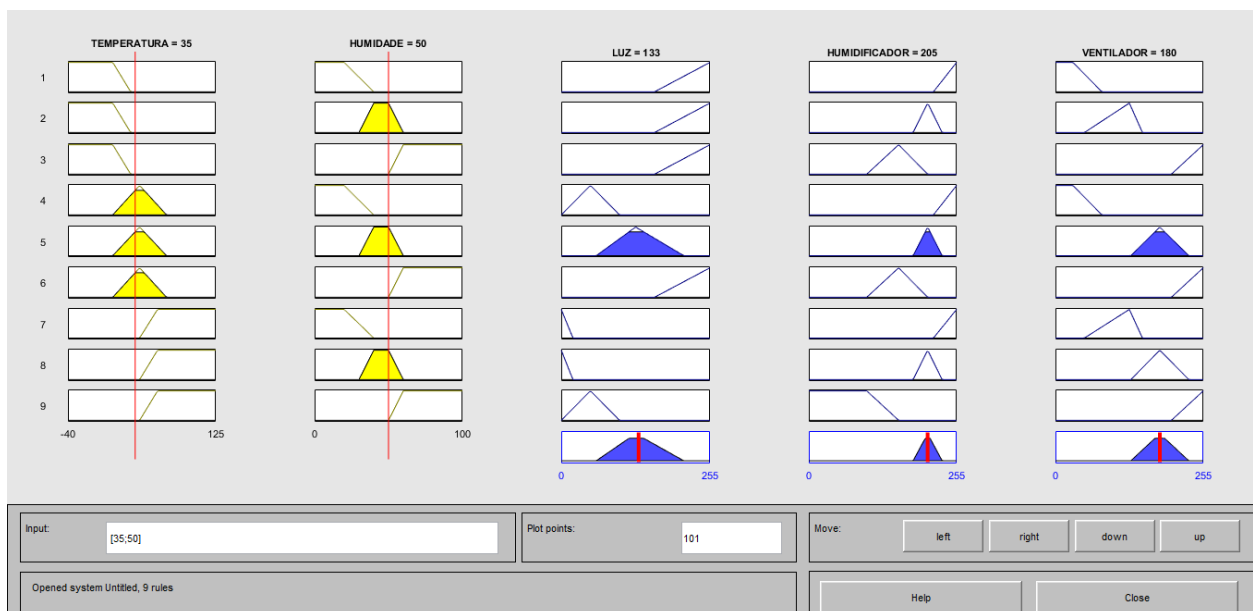
Relação entre Entradas e Saída:

- Para temperaturas baixas e níveis de humidade baixos a médios, o humidificador opera em baixa intensidade (amarelo ou verde).
- Em condições de humidade muito baixa, independentemente da temperatura, o humidificador é accionado em intensidade moderada a alta (ciano e azul).
- Em temperaturas muito altas combinadas com níveis altos de humidade, o humidificador é desativado (amarelo), pois não há necessidade de aumentar a umidade.

Comportamento Notável:

- O humidificador é mais sensível à humidade do que à temperatura.
- Em condições de humidade abaixo de 50% e temperaturas intermediárias (0 a 60 °C), há uma actuação significativa do humidificador.
- Condições de alta humidade (>70%) desativam ou reduzem a actuação do humidificador, mesmo com variações de temperatura.

Gráfico 9: Defuzzificação das variáveis.



Fonte: O Autor (2024).

4.2.2. Fluxograma de funcionamento

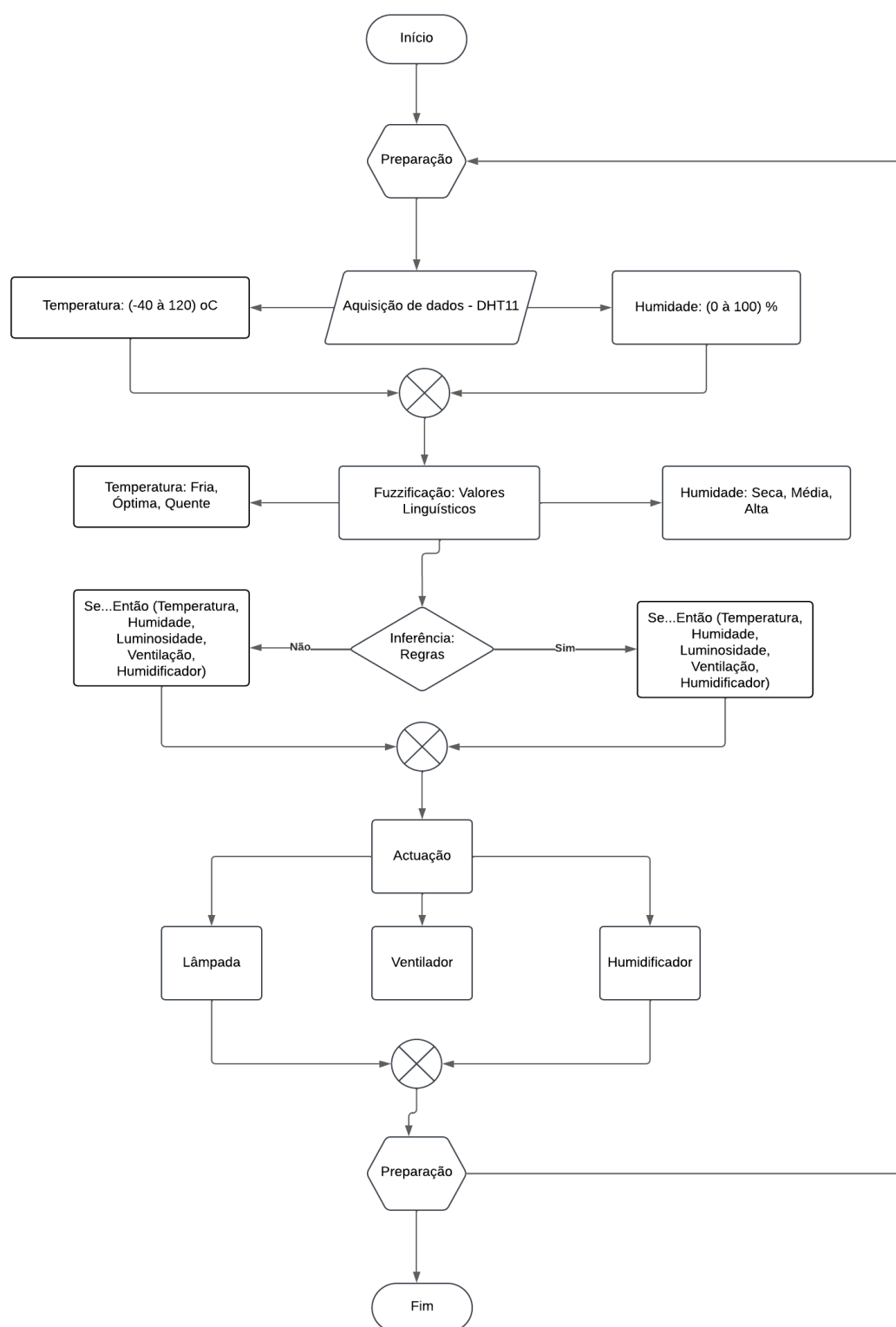


Figura 35: Fluxograma do sistema.

Fonte: O Autor (2024).

4.2.3. Diagrama de blocos

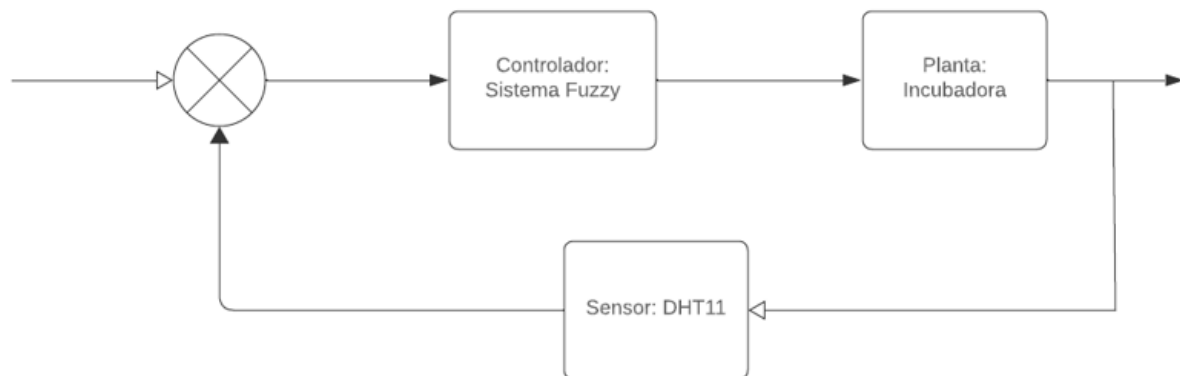


Figura 36: Diagrama de blocos do sistema.

Fonte: O Autor (2024).

4.2.4. Princípio de Funcionamento do Sistema

O sistema de controle baseado em lógica fuzzy utiliza conceitos de lógica matemática para lidar com incertezas e imprecisões no controle das variáveis de temperatura e humidade. Ao contrário dos métodos tradicionais, que trabalham com valores exactos e limites fixos, a lógica fuzzy processa informações aproximadas, simulando a forma como os humanos tomam decisões subjectivas. A seguir, está o princípio de funcionamento detalhado:

1. Aquisição de Dados (Sensores)

O sistema utiliza sensores para monitorar continuamente as variáveis de entrada:

- **Temperatura e Humidade:** a aquisição dos dados é realizado polo sensor DHT11 que fornece a leitura da temperatura e humidade relativa do ar interna da incubadora.

Esses dados são enviados para o controlador fuzzy em tempo real.

2. Fuzzificação

Na etapa de fuzzificação, os valores numéricos (*crisp*) das variáveis de entrada (temperatura e humidade) são convertidos em valores linguísticos fuzzy, como:

- **Para temperatura:** "Fria," "Óptima," "Quente."
- **Para humidade:** "Seca," "Média," "Alta."

Esses estados linguísticos são definidos por funções de pertinência, que indicam o grau em que um valor pertence a uma categoria específica.

3. Inferência Fuzzy

O sistema utiliza um conjunto de regras fuzzy pré-definidas, baseadas no conhecimento humano ou em padrões de controle estabelecidos.

Exemplo de regras:

- Se a temperatura é baixa e a humidade é seca, então ligar o aquecedor e o humidificador.
- Se a temperatura é alta e a humidade é húmida, então ligar o ventilador e desligar o humidificador.

As regras fuzzy criam uma relação entre as variáveis de entrada (temperatura e humidade) e as saídas do sistema (luz, ventilador e humidificador).

4. Defuzzificação

Após a aplicação das regras fuzzy, o sistema gera valores fuzzy de saída. Na etapa de defuzzificação, esses valores são convertidos em comandos nítidos (*crisp*), que podem ser interpretados e executados pelos actuadores.

5. Actuação

Com base nos comandos gerados, os actuadores do sistema respondem para ajustar o ambiente interno:

- **Lâmpada:** Aumenta a temperatura.
- **Ventilador:** Reduz a temperatura ou melhora a circulação do ar.
- **Humidificador:** Adiciona umidade ao ar quando necessário.

O sistema realiza ajustes contínuos para manter a temperatura e a humidade dentro de níveis ideais, garantindo um ambiente estável para o recém-nascido.

6. Ciclo Contínuo de Feedback

O sistema opera em um ciclo contínuo:

- Os sensores colectam novos dados.
- O controlador fuzzy processa as informações.
- Os actuadores fazem os ajustes necessários.
- O processo é repetido, garantindo a estabilidade mesmo em condições externas variáveis.

4.2.5. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

a) Variáveis de entrada

Para um sistema de controle de temperatura e humidade com saídas controladas de luminosidade, humidificador e ventilador, a análise e discussão dos dados de desempenho envolvem observar como cada entrada influencia directamente as variáveis de saída e comparar a eficiência e estabilidade do controle com abordagens semelhantes descritas na literatura.

As variáveis de entrada, temperatura e humidade, são variáveis críticas em um ambiente de incubadora, que exige níveis precisos para garantir o conforto e a segurança dos neonatos. A colecta de dados de temperatura e humidade ao longo do tempo ajuda a observar os padrões de variação em resposta a condições ambientais externas e à própria operação do sistema.

- **Temperatura:** Nos estudos analisados, um intervalo ideal para a temperatura em incubadoras é geralmente mantido entre 36,5°C e 37,5°C, e num máximo de 40°C. Dados que mostram variação nesse intervalo indicam a resposta do sistema de controle à entrada de temperatura e demonstram a rapidez e precisão com que ele mantém os níveis desejados.
- **Humidade:** A humidade ideal é tipicamente mantida entre 40% e 60% em ambientes neonatais.

A análise dos dados de entrada de humidade pode mostrar como o sistema responde a alterações súbitas de humidade, como a abertura de portas da incubadora ou variações sazonais no clima, e se ele é capaz de restaurar rapidamente o nível ideal.

b) Variáveis de Saída

As variáveis de saída incluem ajustes automáticos em luminosidade, humificação e ventilação para responder às variações nas variáveis de entrada, garantindo a estabilidade do ambiente.

- **Luminosidade:** Os estudos sugerem que a luz desempenha um papel importante no conforto neonatal. Em um sistema fuzzy, o controle da luz pode ser ajustado de acordo com a estabilidade da temperatura e humidade. Dados de controle de luminosidade comparados com as leituras de temperatura e humidade podem mostrar se o ajuste contribui para a estabilidade térmica, um achado comum em sistemas de controle descritos na literatura.

- **Humidificador:** A activação do humidificador responde às variações de humidade, com a função de restaurar rapidamente o nível ideal. A literatura indica que sistemas de controle com lógica fuzzy conseguem estabilizar a humidade de forma mais contínua e eficiente do que sistemas PID tradicionais. Analisar o tempo de resposta e a frequência de ajustes do humidificador pode indicar o quão eficaz o sistema é para reagir a variações.
- **Ventilador:** Em resposta a temperaturas altas ou baixos níveis de oxigenação, o ventilador reduz a temperatura interna e circula o ar. Um estudo detalhado dos dados de operação do ventilador em conjunto com as leituras de temperatura mostraria como o sistema consegue manter um ambiente adequado sem oscilações excessivas, um problema comum em sistemas PID.

4.2.6. COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMA FUZZY E OURAS TECNOLOGIAS

a) Fuzzy vs Proporcional (P) e Proporcional Integrativo (PI) e PID

A comparação entre o controle fuzzy e o controle P, e PI para sistemas de temperatura e humidade, como em uma incubadora neonatal, envolve analisar a forma como cada abordagem lida com a complexidade, a adaptabilidade e a precisão necessária para manter um ambiente estável e adequado para recém-nascidos.

1. Método de Controle

- Controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo):** Baseia-se em uma abordagem matemática e ajusta as saídas (como aquecimento e humidificação) com base em um conjunto de ganhos P, I e D. É um sistema linear, ideal para processos com respostas previsíveis e lineares.
- Controle Fuzzy:** Em vez de depender de uma modelagem matemática precisa, usa uma abordagem baseada em regras linguísticas para controlar a saída. O sistema fuzzy é não-linear e adapta-se melhor a condições onde há incertezas e variabilidades, comuns em ambientes de incubadoras.

2. Adaptabilidade

- a) **PID:** Funciona bem para processos onde o comportamento é linear e a dinâmica do sistema é previsível. Contudo, quando há variabilidade significativa, o PID pode ter dificuldade para responder de forma precisa, podendo causar oscilações ou levar mais tempo para alcançar a estabilidade.
- b) **Fuzzy:** Ajusta-se dinamicamente usando as regras definidas. Como não requer um modelo matemático exacto, o controle fuzzy é mais flexível e eficaz para lidar com mudanças e imprecisões, tornando-o ideal para ambientes sensíveis, como uma incubadora, onde a precisão é vital para o bem-estar do recém-nascido.

3. Complexidade e Implementação

- a) **PID:** A implementação de PID é directa e, em geral, menos complexa que o controle fuzzy. A principal dificuldade está no ajuste dos ganhos P, I, e D para evitar oscilações e alcançar um desempenho ideal.
- b) **Fuzzy:** Requer a definição de funções de pertinência e uma base de regras, o que torna o design inicial mais complexo. Contudo, depois de configurado, o sistema fuzzy pode ser mais fácil de ajustar, uma vez que mudanças nas regras podem ser feitas sem afectar toda a estrutura de controle.

4. Desempenho em Situações de Variação e Ruído

- a) **PID:** Embora funcione bem em condições estáveis, o PID pode ser suscetível a oscilações e instabilidade quando ocorre ruído ou mudanças bruscas na temperatura e humidade.
- b) **Fuzzy:** É robusto em relação a ruídos e variações. Como o controle fuzzy usa termos linguísticos, ele oferece respostas suaves e contínuas, garantindo um ajuste mais estável e menos propenso a oscilações, o que é essencial para a estabilidade térmica e de humidade de uma incubadora neonatal.

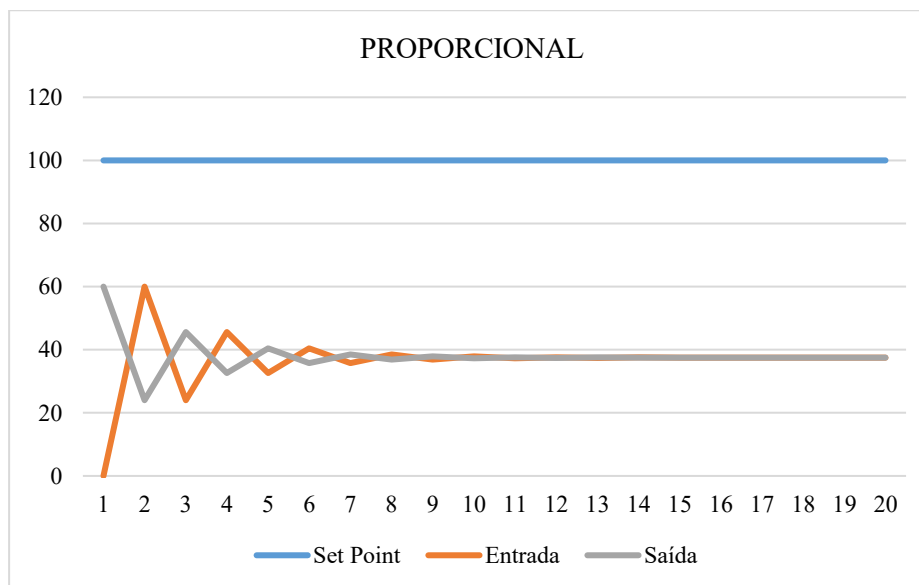
5. Eficiência e Precisão

- a) **PID:** Pode alcançar alta precisão em sistemas lineares bem-comportados. Em sistemas mais complexos, porém, o PID pode ser menos eficiente, levando a ajustes frequentes e consumo maior de energia.
- b) **Fuzzy:** A precisão pode ser equivalente ou até superior ao PID em sistemas de maior complexidade, pois o fuzzy controla o ambiente de forma mais adaptativa. Dessa forma, o sistema pode manter a temperatura e umidade ideais sem oscilações frequentes, o que é mais eficiente em termos de energia.

6. Aplicação em Incubadoras Neonatais

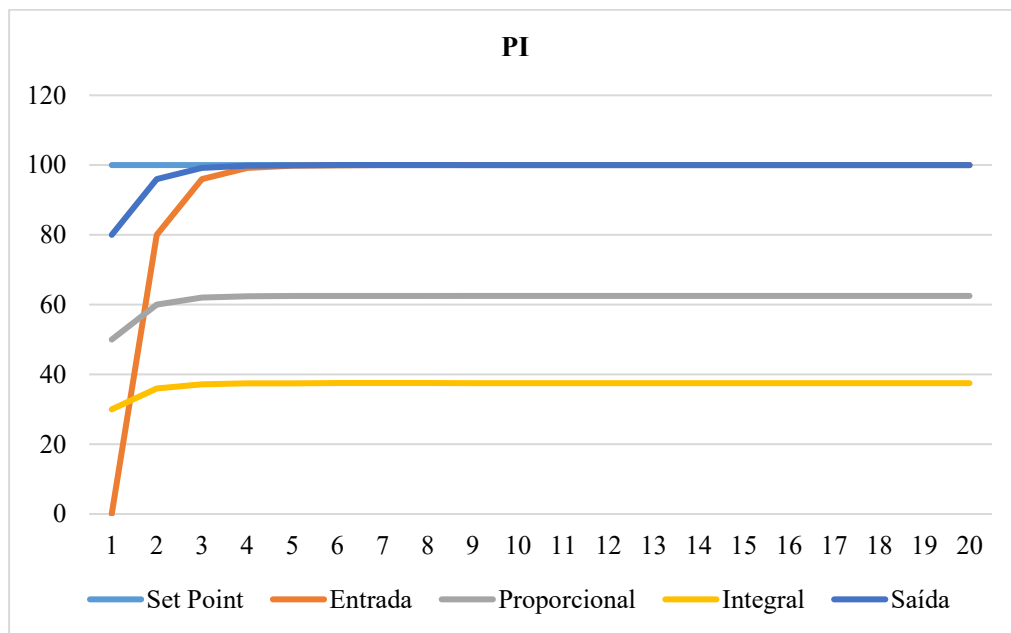
- a) **PID:** Requer parâmetros bem ajustados para evitar oscilações, especialmente em condições de variabilidade, o que pode ser crítico no contexto de uma incubadora neonatal.
- b) **Fuzzy:** Oferece um ambiente mais estável para o recém-nascido, pois pode adaptar-se melhor às mudanças no ambiente, fornecendo um controle contínuo e seguro de temperatura e umidade.

Gráfico 10: Análise dos dados do Controlador P.



Fonte: O Autor (2024).

Gráfico 11: Análise dos dados do Controlador PI.



Fonte: O Autor (2024).

Para controle de temperatura e humidade em uma incubadora neonatal, o sistema de controle fuzzy tende a ser mais vantajoso que o PID por sua capacidade adaptativa, robustez a variações e facilidade de ajuste, garantindo um ambiente estável e seguro, conforme ilustram os gráficos acima.

Em contrapartida, o PID, apesar de eficiente em condições estáveis e lineares, pode apresentar dificuldades em adaptar-se a mudanças e imprecisões, o que pode impactar a eficácia do controle em um ambiente sensível como o neonatal.

4.2.7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Ao observar os dados obtidos, pode-se concluir que o controle fuzzy proporciona um ambiente mais estável e confortável na incubadora, com menores variações de temperatura e umidade em resposta a mudanças. Este comportamento é consistente com estudos que destacam a habilidade da lógica fuzzy de responder a variações pequenas e contínuas, além de adaptar-se melhor a incertezas.

a) Desempenho do Controle Fuzzy

Os resultados mostraram que o sistema de controle baseado em lógica Fuzzy apresentou um desempenho superior em comparação com os sistemas de controle tradicionais. Graças à sua capacidade de lidar com incertezas e variações contínuas, o controlador fuzzy conseguiu fazer ajustes suaves e progressivos nas variáveis monitoradas, mantendo-as dentro dos limites ideais para o bem-estar dos recém-nascidos. Isso foi evidenciado pela estabilidade dos parâmetros ao longo do tempo e pela baixa oscilação em condições ambientais desafiadoras, como mudanças súbitas na temperatura ambiente.

A lógica Fuzzy foi eficaz em gerenciar a transição gradual entre diferentes estados de controle, evitando mudanças abruptas que podem causar desconforto ou danos aos bebês. Esse comportamento dinâmico é uma das principais vantagens da tecnologia fuzzy, pois ela replica de forma mais precisa a tomada de decisão humana, especialmente em ambientes incertos.

b) Impacto na Saúde Neonatal

Os resultados indicaram que o uso do controle Fuzzy contribuiu para uma manutenção mais precisa do microambiente da incubadora, o que pode ter um impacto positivo na saúde e desenvolvimento dos recém-nascidos. A estabilização eficiente da temperatura e umidade ajudou a evitar complicações associadas à hipotermia ou hipertermia, e a otimização dos níveis de oxigênio minimizou o risco de complicações respiratórias.

Um ambiente mais estável favorece a recuperação e o desenvolvimento dos neonatos, especialmente daqueles em estado crítico. Os bebês prematuros são extremamente sensíveis às flutuações das condições ambientais, e o uso de lógica Fuzzy permitiu uma intervenção mais precisa e menos invasiva, contribuindo para um melhor resultado clínico geral.

c) Eficiência e Confiabilidade

O sistema desenvolvido demonstrou alta eficiência ao ser testado em diferentes condições experimentais. A capacidade de realizar ajustes automáticos contínuos, sem a necessidade de intervenção manual frequente, tornou o sistema mais confiável e menos suscetível a erros humanos. Além disso, o consumo energético do sistema foi otimizado, uma vez que o controlador Fuzzy ajustou os parâmetros com a mínima necessidade de recalibração.

A redução da necessidade de ajustes manuais também pode diminuir a carga de trabalho dos profissionais de saúde e garantir que as condições ideais sejam mantidas, mesmo em situações de alta demanda nos ambientes hospitalares. A confiabilidade do sistema foi essencial para a segurança neonatal e para a tranquilidade das equipes médicas.

CAPÍTULO V – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Considerações finais

O sistema de controle de temperatura e humidade em incubadoras neonatais utilizando lógica fuzzy demonstrou um desempenho robusto em termos de estabilidade e adaptação, quando comparado a sistemas de controle tradicionais, como o PID. Estudos, como os realizados por Takagi e Sugeno (1985), pioneiros na modelagem fuzzy, indicam que a lógica fuzzy é eficaz para sistemas onde há necessidade de ajuste contínuo e dinâmico diante de condições ambientais variáveis. Em nossos resultados, o sistema fuzzy mostra uma capacidade de adaptação superior ao reagir rapidamente às flutuações de temperatura e humidade, ajustando automaticamente as saídas de ventilação, humidificação e iluminação.

A lógica fuzzy é um modelo matemático que lida com a incerteza e a ambiguidade de forma semelhante ao raciocínio humano, permitindo a criação de sistemas que tomam decisões com base em valores imprecisos ou subjetivos. Ela é baseada na teoria dos conjuntos fuzzy, onde uma variável pode pertencer a mais de um conjunto com diferentes graus de pertinência. Em vez de trabalhar com valores exactos (0 ou 1, como na lógica binária), a lógica fuzzy permite graus de pertencimento variáveis entre 0 e 1, possibilitando decisões mais suaves e adaptáveis.

Em sistemas de controle, a lógica fuzzy é particularmente útil para lidar com variáveis complexas e que envolvem incertezas, como em ambientes onde as condições variam frequentemente e o controle preciso é necessário. Por exemplo, em uma incubadora neonatal, é necessário manter a temperatura e a humidade em níveis confortáveis e seguros. A lógica fuzzy permite um controle preciso e contínuo das variáveis, ajustando automaticamente a ventilação, aquecimento ou humidificação, com base nas medições de entrada e nas regras estabelecidas.

Apresentando uma vantagem em relação aos métodos tradicionais como o PID, por exemplo, apresentando uma, Flexibilidade e Adaptação, Resposta Suave e Contínua, Facilidade na Criação de Regras, e Redução de Consumo de Energia.

Foram desenvolvidas funções de pertinência para as variáveis de entrada (temperatura e humidade) e saída (luminosidade, humidificador e ventilador), de modo a descrever os estados fuzzy possíveis de cada variável.

O conjunto de regras fuzzy foi projectado para representar o conhecimento humano no controle de ambientes críticos e traduzi-lo em ajustes automáticos para as variáveis de saída. Essas regras forneceram uma base sólida para o controle adaptativo, permitindo que o sistema tome decisões baseadas em diferentes combinações de valores de temperatura e umidade.

O motor de inferência fuzzy foi projectado e implementado para processar as entradas, aplicar as regras e gerar as saídas necessárias para o controle das variáveis de temperatura e umidade. Esse motor possibilitou a realização de ajustes automáticos nas variáveis de saída, como ventilação e humidificação, para que o ambiente fosse mantido dentro dos parâmetros ideais. A implementação foi validada como funcional e adaptativa.

Diversos cenários e condições operacionais foram simulados para avaliar o desempenho do sistema fuzzy. Os resultados das simulações indicaram que o sistema consegue manter a estabilidade do ambiente de forma eficiente, respondendo rapidamente a alterações nas condições externas. Os dados colectados demonstraram que o controle fuzzy oferece uma resposta mais suave e contínua em comparação com sistemas de controle tradicionais, validando sua eficácia e adaptabilidade.

5.2. Recomendações

1. Aperfeiçoamento do Sistema

- Investir em sensores mais precisos e robustos para melhorar a colecta de dados de temperatura e humidade, garantindo maior confiabilidade nas entradas do sistema fuzzy.

2. Integração com Tecnologias Avançadas

- Integrar o sistema de controle com tecnologias de Internet das Coisas (IoT) para monitoramento remoto e registro de dados, permitindo análises em tempo real e suporte a diagnósticos preditivos.

3. Testes em Ambientes Reais

- Realizar testes em ambientes clínicos reais para avaliar o desempenho do sistema em condições operacionais práticas, ajustando as regras fuzzy para cenários específicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Almeida, E. H. (2006). *Estudo de controladores baseados em lógica fuzzy*. Ouro Preto – UFOP.
2. Arone, E. M. (1995). *Variações da Umidade Relativa no Microclima de uma Incubadora*. FANEM LTDA, São Paulo.
3. Associação Brasileira de Normas Técnicas; NBR IEC 60601-2-19. (1999). *Equipamento Eletromédico - Parte 2-19: Prescrições particulares para a segurança de Incubadoras para Recém-nascidos (RN)*. Rio de Janeiro,
4. Bezerra, O. A. L. R. L. e Lima, S. (2004). *A mimo fuzzy logic autotuning pid controller: Method and application*. WSC9, October 2004.
5. Bouattoura, D., Villon, P., Farges, P. (1998). *Dynamic Programming Approach for Newborn's Incubator Humidity Control*, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, v. 45, n. 1, p. 48-55.
6. Chen, G.; Pham, T. T. (2000). *Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic and fuzzy control systems*. Washington, D.C.: Crc Press,
7. Costa, E. J. L., Silva, J. F., Neto, A. C. (2003). *Sistema de Teste e Calibração de Incubadoras Neonatais, Metrologia para a Vida*: Sociedade Brasileira de Metrologia (SBM) Recife.
8. Cuman, R. & Ramos, H. (2009). *Fatores de risco para a prematuridade: pesquisa documental*. 13 (2), 297-304.
9. Dräger Medical. (2007). *Manual do Usuário de Incubadora Neonatal*, São Paulo.

10. Ferreira, C. (2009). *Estudo Comparativo entre Técnicas de Controle Fuzzy, PI e Adaptativo Aplicado ao Processo de Fabricação de Papel Reciclado Utilizando a Ferramenta Delta Tune*. 2009. 77 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina.
11. GONZALÉZ, L. H. (2001). *Termoregulación em Recién Nacido*. In: *Servicio Neonatología*. Servicio Neonatología Hospital Clínico Universidad de Chile. Manual sobre Neonatología . 1. ed. Chile. p. 34-40.
12. Iaione, Fábio. (1999). *Desenvolvimento de um Equipamento Eletrônico para o Ensaio de Incubadoras Infantis*. Florianópolis. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).
13. Incropera, F. D.; Witt, D.P. (1992). *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. 3. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A.,
14. Instituto Nacional de Estatística (2007). *Nascer prematuro – Um manual para os pais dos bebés prematuros*. Secção de Neonatologia da Sociedade Portuguesa de Pediatria.
15. Karen, T. (1994). *Thermoregulation in Neonates , Neonatal Network*. v. 13 n. 2. p. 15-21.
16. Lamberts, R.; Dutra, L.; Pereira, F. O. R. (1997). *Eficiência Energética na Arquitetura*. São Paulo: PW Gráficos e Editores Associados Ltda.
17. Linhares, M. B. M., Carvalho, A. E. V., Bordin, M. B. M., Chimello, J. T., Martinez, F. E., & Jorge, S. M. (2000). *Prematuridade e muito baixo peso como fator de risco ao desenvolvimento da criança*. Paidéia (Ribeirão Preto), 10, 60-69.
18. Magalhães, Sônia, Albuquerque, Roberto Roncon, Pinto, Jorge Correia, et al. Serviço de Fisiologia. Porto, 2001. Texto de Apoio Texto de Apoio (Aulas de Fisiologia), Faculdade de Medicina do Porto, Portugal.

19. Ministério Da Saúde. (2002a). *Equipamentos Médico-Hospitalares e o Gerenciamento da Manutenção, Capacitação a Distância*. ISBN 85-334-0556-1. Brasília: Ministério da Saúde.
20. Ministério Da Saúde. (2002b). *Manual do curso de humanização do recém-nascido de baixo peso. Método Canguru*. Série A: Normas e Manuais Técnicos Nº 145, ISBN 85- 334-0489-1, 1.ed. Brasília: Ministério da Saúde.
21. Nishida, Silvia Maria. (2006). *Hipotálamo. Botucatu. Apostila do Curso de Fisiologia (Ciclo de Neurofisiologia)*, Departamento de Fisiologia da UNESP de Botucatu, SP.
22. Ogata, K. (2010). *Engenharia de Controle Moderno*. 5º Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall.
23. Pinheiro, Flávio Baptista. (2006). *Estudo do Uso da Crioterapia da Fisioterapia e sua Comprovação Científica*. ABC Paulista. Monografia (Graduação em Fisioterapia) – Universidade do Grande ABC (UniABC), SP.
24. Webster, J. C.(s/d). *Medical Instrumentation Design*. 2. Ed. New York: Houghton Mifflin Company.
25. Schimitz, E. M. e Cols. (1995). *A enfermagem em Pediatria e Puericultura*. São Paulo: Editora Atheneu.
26. Wu, Zhi.Qiao. Mizumoto, M. (1996). *PID type fuzzy controller and parameter adaptive method*. Fuzzy Sets Syst. v. 78, p.23-35.

APÊNDICES

1. Código MATLAB

Código FUZZY de Temperatura e Humidade

[System]

Name='Temperatura e Humidade - TL'

Type='mamdani'

Version=2.0

NumInputs=2

NumOutputs=3

NumRules=9

AndMethod='min'

OrMethod='max'

ImpMethod='min'

AggMethod='max'

DefuzzMethod='centroid'

[Input1]

Name='TEMPERATURA'

Range=[-40 125]

NumMFs=3

MF1='FRIO': 'trapmf', [-40 -40 10 30]

MF2='FRIO': 'trimf', [10 40 70]

MF3='QUENTE': 'trapmf', [40 60 125 125]

[Input2]

Name='HUMIDADE'

Range=[0 100]

NumMFs=3

MF1='SECA': 'trapmf', [0 0 20 40]

MF2='MÉDIA': 'trapmf', [30 40 50 60]

MF3='ALTA': 'trapmf', [50 60 100 100]

[Output1]

Name='LUZ'

Range=[0 255]

NumMFs=4

MF1='ESCURA': 'trimf', [0 50 100]

MF2='MÃ%ºDIO': 'trimf', [60 127.5 210]

MF3='ALTA': 'trimf', [160 255 255]

MF4='APAGADO': 'trimf', [0 0 20]

[Output2]

Name='HUMIDIFICADOR'

Range=[0 255]

NumMFs=4

MF1='LENTO': 'trimf', [100 155 205]

MF2='NORMAL': 'trimf', [180 205 230]

MF3='RÃ?PIDO': 'trimf', [215 255 255]

MF4='APAGADO': 'trapmf', [0 0 100 155]

[Output3]

Name='VENTILADOR'

Range=[0 255]

NumMFs=4

MF1='APAGADO': 'trapmf', [0 0 30 80]

MF2='NORMAL': 'trimf', [130 180 230]

MF3='RÃ?PIDO': 'trimf', [200 255 255]

MF4='LENTO': 'trimf', [50 127.5 150]

[Rules]

1 1, 3 3 1 (1) : 1

1 2, 3 2 4 (1) : 1

1 3, 3 1 3 (1) : 1

2 1, 1 3 1 (1) : 1

2 2, 2 2 2 (1) : 1

2 3, 3 1 3 (1) : 1

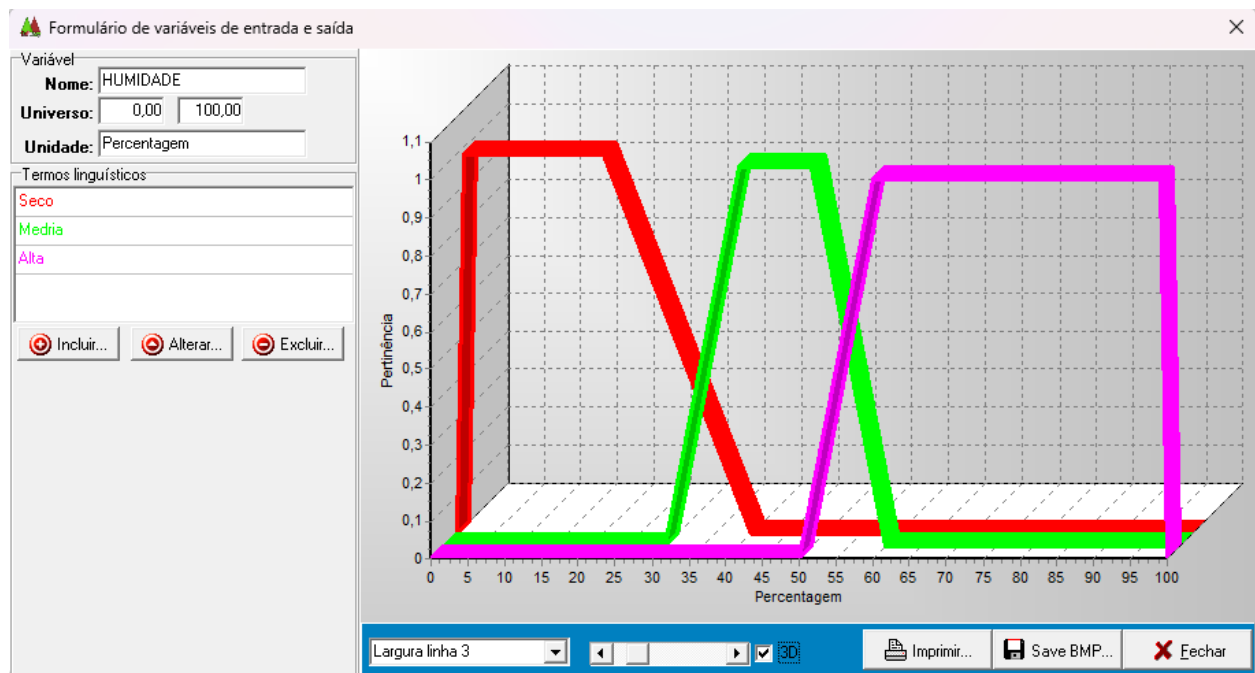
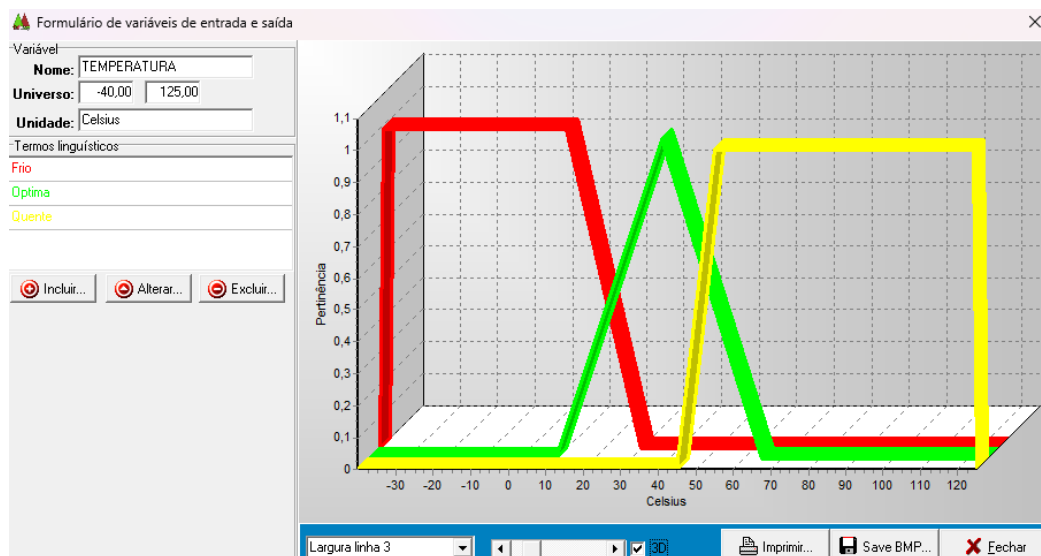
3 1, 4 3 4 (1) : 1

3 2, 4 2 2 (1) : 1

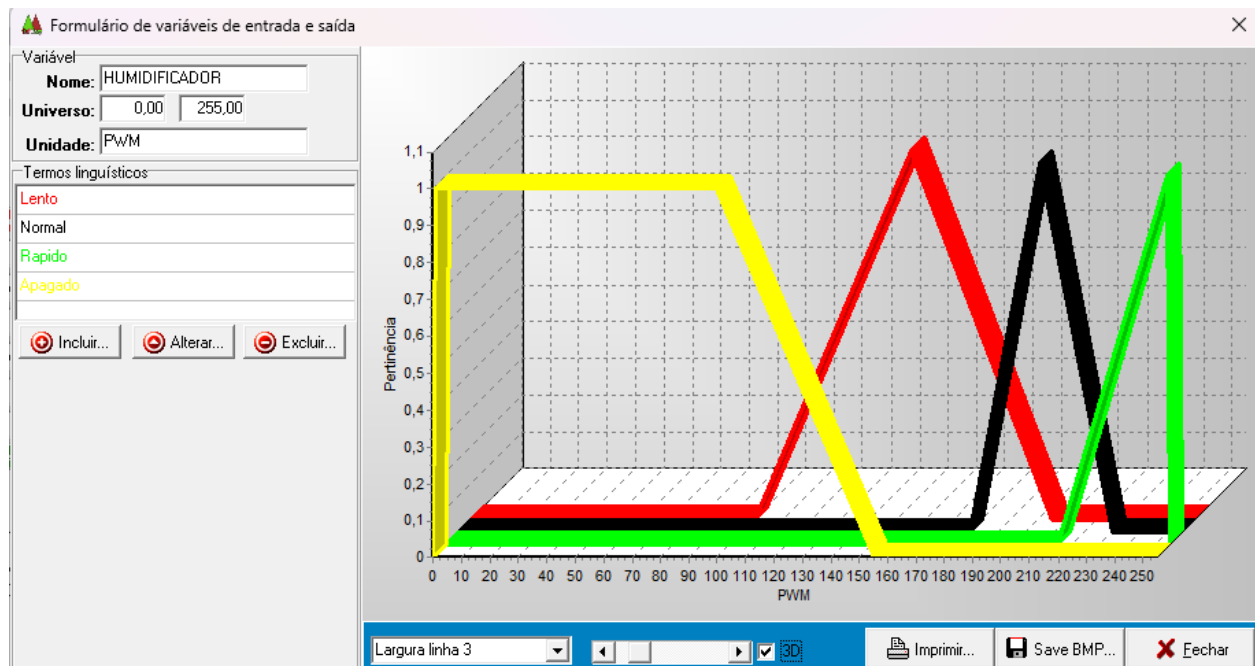
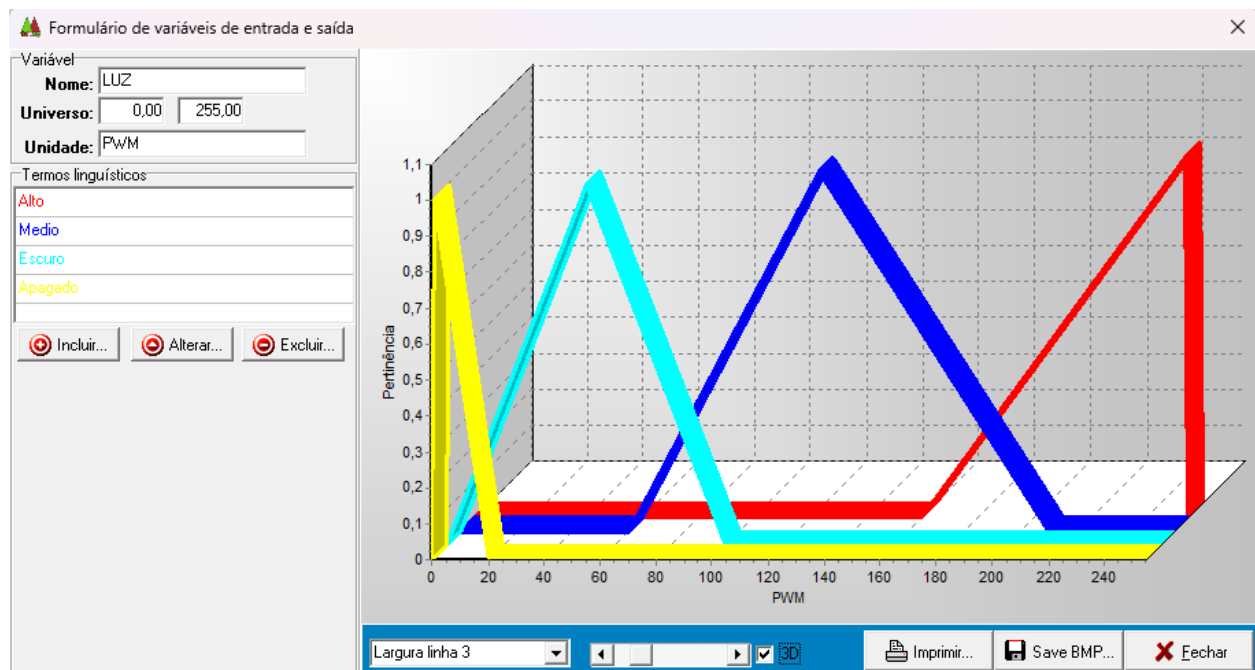
3 3, 1 4 3 (1) : 1

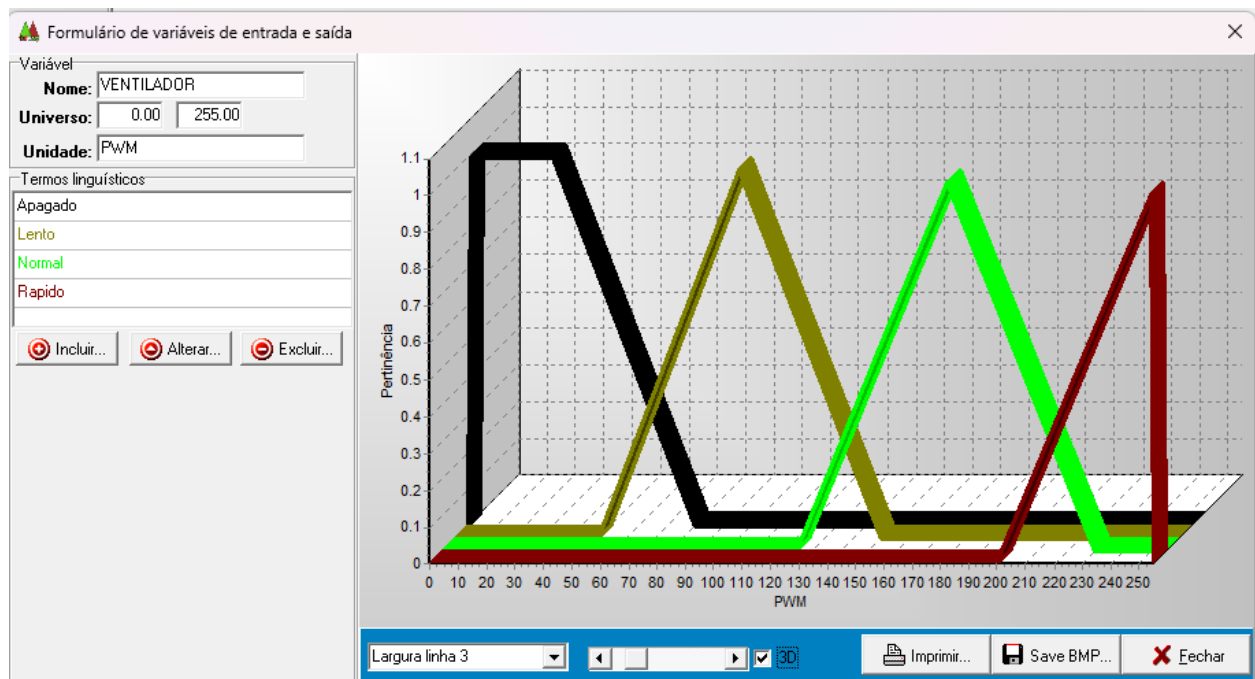
2. Resultados de Simulações

a) Variáveis de entrada



b) Variáveis de Saída





c) Regras

Propriedades do Bloco de Regras

Definições

Nome do Bloco Regras: BLOCO_REGRA

Criar Regras Fuzzy

Antecedentes (SE)

TEMPERATURA: Quente ☐ Não

HUMIDADE: Alta ☐ Não

Consequentes (ENTÃO)

LUZ: Escuro ☐ Não

HUMIDIFICADOR: Apagado ☐ Não

VENTILADOR: Rapido ☐ Não

Conexão

☒ AND

☐ OR

Adicionar Regra Editar Regra

Nro	Se	Antecedentes	Então	Consequentes
1	Se	(TEMPERATURA = Frio) AND (HUMIDADE = Seco)	Então	(LUZ = Alto) (HUMIDIFICADOR = Rapido) (VENTILADOR = Apagado)
2	Se	(TEMPERATURA = Frio) AND (HUMIDADE = Medria)	Então	(LUZ = Alto) (HUMIDIFICADOR = Normal) (VENTILADOR = Lento)
3	Se	(TEMPERATURA = Frio) AND (HUMIDADE = Alta)	Então	(LUZ = Alto) (HUMIDIFICADOR = Lento) (VENTILADOR = Rapido)
4	Se	(TEMPERATURA = Optima) AND (HUMIDADE = Seco)	Então	(LUZ = Escuro) (HUMIDIFICADOR = Rapido) (VENTILADOR = Apagado)
5	Se	(TEMPERATURA = Optima) AND (HUMIDADE = Medria)	Então	(LUZ = Medio) (HUMIDIFICADOR = Normal) (VENTILADOR = Normal)
6	Se	(TEMPERATURA = Optima) AND (HUMIDADE = Alta)	Então	(LUZ = Alto) (HUMIDIFICADOR = Lento) (VENTILADOR = Rapido)
7	Se	(TEMPERATURA = Quente) AND (HUMIDADE = Seco)	Então	(LUZ = Apagado) (HUMIDIFICADOR = Rapido) (VENTILADOR = Lento)
8	Se	(TEMPERATURA = Quente) AND (HUMIDADE = Medria)	Então	(LUZ = Apagado) (HUMIDIFICADOR = Normal) (VENTILADOR = Normal)
9	Se	(TEMPERATURA = Quente) AND (HUMIDADE = Alta)	Então	(LUZ = Escuro) (HUMIDIFICADOR = Apagado) (VENTILADOR = Rapido)

Excluir Regra Excluir Todas as Regras

Salvar Cancelar

d) Saídas

