



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE QUIXADÁ
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

NATÁLIA DA SILVA GUIMARÃES

**MONITORAMENTO AUTOMÁTICO PARA SISTEMAS DE ARREFECIMENTO EM
TRATORES AGRÍCOLAS UTILIZANDO LÓGICA FUZZY**

QUIXADÁ
2025

NATÁLIA DA SILVA GUIMARÃES

MONITORAMENTO AUTOMÁTICO PARA SISTEMAS DE ARREFECIMENTO EM
TRATORES AGRÍCOLAS UTILIZANDO LÓGICA FUZZY

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Engenharia de Computação da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação. Área de Concentração: Computação.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Bacelar de Oliveira

QUIXADÁ

2025

NATÁLIA DA SILVA GUIMARÃES

MONITORAMENTO AUTOMÁTICO PARA SISTEMAS DE ARREFECIMENTO EM
TRATORES AGRÍCOLAS UTILIZANDO LÓGICA FUZZY

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Engenharia de Computação da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação. Área de Concentração: Computação.

Aprovada em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cristiano Bacelar de Oliveira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Helder Candido dos Santos Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. André Ribeiro Braga
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Alessandro Marques Maia
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Ceará (IFCE)

Dedico este trabalho a todos que foram essenciais na minha jornada: a Deus, a Nossa Senhora, à minha família, aos amigos e aos professores.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus e a Nossa Senhora por me darem força e perseverança para lidar com os desafios da graduação. Sem eles, tenho certeza de que a caminhada teria sido mais difícil.

Também quero expressar minha profunda gratidão à minha família por todo o apoio nos mais diversos momentos da minha trajetória. Em especial, à minha mãe, Vânia, à minha tia, Natália, à minha irmã, Natany, e a minha avó, Maria, mulheres incríveis que sempre estiveram ao meu lado, guiando-me com amor, sabedoria e força, e ajudando-me a tomar as melhores decisões.

Agradeço imensamente a todos os meus amigos, companheiros de jornada, pelas incontáveis noites em claro estudando para as provas e finalizando trabalhos. Em especial, meu carinho e gratidão a Rafael Gonçalves, Larissa Matos e Robert Vinícius, que estiveram sempre por perto, tornando essa caminhada mais leve, com apoio incondicional, conversas enriquecedoras e momentos de descontração, que fizeram toda a diferença ao longo dessa trajetória.

Por fim, expresso minha gratidão ao meu orientador, professor Cristiano Bacelar, pela disponibilidade em desenvolver este trabalho comigo e pela dedicação em esclarecer todas as minhas dúvidas. Agradeço também ao professor Alessandro Marques pelos ensinamentos sobre a mecanização de tratores agrícolas e pelo seu empenho em me auxiliar na realização dos testes em laboratório. Além disso, sou grata ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) – Campus Tabuleiro do Norte por viabilizar a realização de testes reais no Bloco de Laboratórios Automotivos.

“Porque eu, o Senhor teu Deus, te tomo pela tua
mão direita, e te digo: Não temas, eu te ajudo.”

(Isaías 41:13)

RESUMO

Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma plataforma para monitorar o sistema de arrefecimento de tratores agrícolas, por meio da emissão de alertas sobre o seu estado. Com isso, espera-se evitar prejuízos financeiros para os agricultores, garantindo um monitoramento contínuo e eficiente do sistema de arrefecimento, fundamental para o resfriamento do motor. O trabalho destaca a importância dos tratores na agricultura brasileira e o papel dos sistemas embarcados na otimização de seu desempenho. Além disso, aborda a origem dos tratores agrícolas, seus principais sistemas, especialmente o de arrefecimento, e as tecnologias como microcontroladores e sensores. Adicionalmente, também é descrita a parte de processamento de sinais e sua importância para o desenvolvimento de sistemas. Nesse viés, são apresentados estudos que fundamentam o projeto, oferecendo uma base teórica sólida para o desenvolvimento do sistema proposto, juntamente com as etapas da pesquisa, os materiais utilizados na implementação e os critérios adotados para a análise, garantindo um processo de desenvolvimento bem fundamentado. Com isso, são apresentados os resultados da plataforma desenvolvida por meio das técnicas de processamento de sinais e raciocínio lógico, bem como as conclusões obtidas e sugestões para pesquisas futuras.

Palavras-chave: trator agrícola; plataforma; sistema de arrefecimento; monitoramento.

ABSTRACT

This work proposes the development of a platform to monitor the cooling system of agricultural tractors by issuing alerts about its status. With this, it is expected to prevent financial losses for farmers by ensuring continuous and efficient monitoring of the cooling system, which is essential for engine cooling. The study highlights the importance of tractors in Brazilian agriculture and the role of embedded systems in optimizing their performance. Additionally, it discusses the origin of agricultural tractors, their main systems—especially the cooling system—and technologies such as microcontrollers and sensors. Furthermore, the work describes signal processing and its importance for system development. In this context, studies that support the project are presented, providing a solid theoretical foundation for the proposed system's development, along with the research stages, materials used in implementation, and criteria adopted for analysis, ensuring a well-founded development process. As a result, the developed platform is presented through signal processing techniques and logical reasoning, along with the conclusions obtained and suggestions for future research.

Keywords: agricultural tractor; platform; cooling system; monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de um trator agrícola antigo.	18
Figura 2 – Ilustração das partes de um radiador.	20
Figura 3 – Modelo de ventilador axial de um trator.	21
Figura 4 – Representação de uma válvula termostática.	22
Figura 5 – Exemplo de uma bomba d'água.	22
Figura 6 – Detalhamento dos componentes de uma bomba d'água.	23
Figura 7 – Exemplo de um reservatório de expansão.	24
Figura 8 – Representação do funcionamento do sistema de arrefecimento.	25
Figura 9 – Modelo de sensor de temperatura analógico.	25
Figura 10 – Estrutura básica de um sistema com Fuzzy.	30
Figura 11 – Exemplo de uma representação gráfica da lógica Fuzzy.	30
Figura 12 – Diagrama de fluxo para identificar as condições de operação.	36
Figura 13 – Representação das partes do sistema de monitoramento.	37
Figura 14 – BPMN do sistema de monitoramento.	38
Figura 15 – Visão geral dos componentes do sistema.	39
Figura 16 – Modelo do Arduino Uno.	39
Figura 17 – Modelo do sensor de temperatura B3950.	40
Figura 18 – Montagem em bancada do divisor de tensão.	41
Figura 19 – Esquemático do divisor de tensão.	42
Figura 20 – Ilustração da distribuição dos sensores de temperatura no veículo.	43
Figura 21 – Sistema de arrefecimento usado para testes reais em laboratório.	43
Figura 22 – Sensores de temperatura usados para coletar os dados	44
Figura 23 – Intervalos de pertinência Fuzzy para o classificação do sensor do motor. . .	45
Figura 24 – Intervalos de pertinência Fuzzy para a classificação do sensor na entrada do radiador.	45
Figura 25 – Intervalos de pertinência Fuzzy para a classificação do sensor na saída do radiador.	46
Figura 26 – Ilustração da distribuição dos sensores de temperatura no veículo.	46
Figura 27 – Diagrama de fluxo do código do sistema de leitura.	49
Figura 28 – Exemplo de arquivo .txt processado pelo sistema de análise.	50
Figura 29 – Diagrama de fluxo do código de tratamento de dados.	51

Figura 30 – Interface web para subir o arquivo *.txt com os dados.	52
Figura 31 – Momento da coleta dos dados dos sensores de temperatura do sistema de arrefecimento real.	53
Figura 32 – Leitura dos valores dos sensores sendo coletadas em tempo real.	54
Figura 33 – Momento que capturou o esfriamento do motor.	55
Figura 34 – Gráfico das amostras originais dos dados coletados.	57
Figura 35 – Gráfico das amostras com filtro de Kalman dos dados coletados.	58
Figura 36 – Gráfico das amostras normalizadas.	58
Figura 37 – Arquivo <i>status_motor.txt</i> gerado pelo sistema de análise.	59
Figura 38 – Estrutura final da pasta do projeto.	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IBGE	<i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
TIC	<i>Tecnologia da Informação e Comunicações</i>
AP	<i>Agricultura de Precisão</i>
SICCAP	<i>Sistema de Informação Colisão e Capotamento</i>
IFCE	<i>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará</i>
ASABE	<i>American Society of Agricultural and Biological Engineers</i>
FIR	<i>Finite Impulse Response</i>
IIR	<i>Infinite Impulse Response</i>
PID	<i>Proportional-Integral-Derivative Controller</i>
BPMN	<i>Business Process Model and Notation</i>
AD	<i>Analógico-Digital</i>
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
CSV	<i>Comma-Separated Values</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

L_c	Comprimento do aleta
L_{ale}	Altura do aleta
H_{ale}	Espessura do aleta
$^{\circ}\text{C}$	Graus Célsius
x_k	Vetor de estado no instante k
A_k	Matriz de transição do estado
b_k	Matriz de controle
u_k	Vetor de entrada de controle
w_k	Ruído do processamento
Q_k	Covariância
$\mu_A(x)$	Função de pertinência
z_k	Vetor de medições no instante k
H_k	Matriz de observação
V_k	Ruido de medição

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	16
1.2	Organização do trabalho	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	O Trator agrícola	18
2.1.1	<i>Sistema de arrefecimento</i>	<i>19</i>
2.1.2	<i>Ciclo de funcionamento</i>	<i>24</i>
2.2	Processamento de Sinais	25
2.2.1	<i>Amostragem e Quantização</i>	<i>26</i>
2.2.2	<i>Filtragem de sinais</i>	<i>27</i>
2.2.2.1	<i>Filtro de Kalman</i>	<i>27</i>
2.3	Lógica Fuzzy	28
3	TRABALHOS RELACIONADOS	32
3.1	Adaptação do sistema de arrefecimento do trator Valtra S374: estudo de caso em propriedade rural	32
3.2	Modelagem e simulação de sistema de arrefecimento a água com controlador PID para implementação em processos industriais e sistemas embarcados aplicados ao ensino	32
3.3	Sistema de aquisição de dados em tratores: desenvolvimento de um protótipo de baixo custo usando a plataforma Arduino	33
3.4	Projeto do sistema de arrefecimento para um motor de um protótipo de fórmula SAE	33
3.5	Comparação entre os trabalhos	34
4	METODOLOGIA	35
4.1	Planejamento inicial	35
4.2	Requisitos do sistema	35
4.3	Fluxos principais do sistema	36
4.4	Componentes do sistema	37
4.5	Modelagem dos processos	37
4.6	Sistema de Leitura	39

4.6.1	<i>Componentes</i>	39
4.6.2	<i>Montagem e instalação</i>	42
4.7	Sistema de Análise	43
4.7.1	<i>Coleta de dados</i>	48
4.7.2	<i>Detecção de falhas mecânicas</i>	50
4.7.3	<i>Interface web provisória</i>	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5.1	Análise dos testes em laboratório do sistema de leitura	54
5.1.1	<i>Representações gráficas</i>	56
5.1.2	<i>Mensagens informadas pelo sistema de análise para cada amostra</i>	58
5.2	Funcionamento da interface web	59
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

A fabricação de tratores no Brasil teve início por volta de 1960, com o surgimento do Plano Nacional da Indústria de Tratores Agrícolas, em 1959. Antes disso, os tratores eram importados da América do Norte e da Europa. Ainda de acordo com o autor, várias marcas ganharam destaque no mercado, como Massey Ferguson, New Holland e John Deere. Além de promover um impacto positivo na economia do país, esse marco trouxe benefícios diretos para os produtores rurais, facilitando o acesso ao financiamento para a aquisição de tratores, especialmente para pequenos e médios agricultores (Mialhe, 1980).

Sabe-se que a agricultura é uma atividade de extrema importância para a economia brasileira. Tendo isso em vista, muitos produtores agrícolas têm investido em tecnologias para acelerar a produção e garantir a qualidade da colheita. Para isso, utiliza-se o processo de mecanização do campo já há algumas décadas, como visto em (Folle; Franz, 1990), que mostra dados do *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística* (IBGE) de 1987, quando o Brasil já apresentava um bom nível de mecanização em termos quantitativos na relação área de lavoura por trator. Isso indica que, desde cedo, os produtores utilizaram o trator agrícola no processo de automação da agricultura brasileira.

Segundo Aquino (2020) a partir da década de 1990 ocorreu também um grande avanço na incorporação da eletrônica em implementos e veículos agrícolas. Isso se deve ao fato do surgimento de microcontroladores com alto poder de processamento e sensores dos mais variados que monitoram e controlam esses maquinários.

Para Meneses *et al.* (2021), o trator agrícola é um equipamento presente na maioria das propriedades rurais atualmente. Assim, é possível afirmar que a mão de obra humana tem sido gradualmente substituída, gerando a necessidade de inovação tecnológica e de produção. No que se refere à tecnologia, o avanço da eletrônica possibilitou uma onda crescente de soluções poderosas, com alta capacidade de processamento. A *Tecnologia da Informação e Comunicações* (TIC) têm sido amplamente utilizadas em diversos campos da agricultura, promovendo a modernização agrícola em parceria com a *Agricultura de Precisão* (AP), que visa monitorar e otimizar os processos de produção em busca de resultados mais precisos e confiáveis (Barbosa *et al.*, 2020).

Nesse contexto, é possível encontrar vários projetos de sistemas que coletam informações sobre maquinários agrícolas com o objetivo de monitorar parâmetros de desempenho. Em (Oliveira *et al.*, 2023), por exemplo, analisa-se a vazão do combustível na entrada e saída do

tanque e a velocidade das rodas de um trator agrícola. Além disso, no trabalho de Gomides (2018) foi desenvolvido um carro de corrida real para medir os valores de temperatura na entrada e saída do radiador. Muitos desses trabalhos focam na eficiência energética e no monitoramento da temperatura dos motores, uma vez que o uso inadequado desses sistemas pode causar prejuízos significativos aos produtores. De acordo com Meneses *et al.* (2021), a implementação de tratores e outras máquinas representa de 20% a 40% do total gasto na produção. Na Seção 3 serão apresentados alguns desses projetos, bem como sua importância para o mercado agrícola.

Nesse contexto, este trabalho trata-se da criação de uma plataforma para o monitoramento do sistema de arrefecimento de tratores agrícolas. Isto se deu no contexto do projeto *Sistema de Informação Colisão e Capotamento* (SICCAP), uma pesquisa de doutorado em andamento, que tem como finalidade monitorar tratores agrícolas, principalmente no que se refere a colisões e capotamentos. O projeto SICCAP é de autoria do professor Alessandro Marques Maia, que atua na área de Mecânica Automotiva no *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará* (IFCE) de Tabuleiro do Norte. Assim, os dados foram coletados no Laboratório de Motores Automotivos do IFCE de Tabuleiro do Norte.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sistema para o monitoramento do sistema de arrefecimento de um trator agrícola. Espera-se que o sistema desenvolvido seja integrado ao projeto SICCAP, atualmente em desenvolvimento. Assim, os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Desenvolver um programa que permita a leitura de valores de sensores de temperatura localizados em diversos pontos do sistema de arrefecimento do motor.
- b) Identificar o estado do sistema de arrefecimento por meio das leituras coletadas.
- c) Permitir a parametrização para adequação a várias situações de operação, facilitando seu uso em diferentes modelos de motor.

1.2 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em várias seções. A Fundamentação Teórica (Seção 2), discute a origem dos tratores agrícolas e sua relevância para o setor primário. Nessa seção, também são explicadas as características de um trator agrícola e detalhados os seus principais

sistemas, com destaque para o de arrefecimento, foco do projeto, onde é explicado seu funcionamento, sua composição mecânica e o ciclo de operação desse sistema. Adicionalmente, são explorados alguns conceitos de processamentos de sinais que foram essenciais para este projeto.

Na Seção 3, são apresentados artigos científicos que fundamentaram as ideias desenvolvidas neste estudo, permitindo uma compreensão mais ampla dos pontos relevantes para a pesquisa e uma maior familiaridade com a área.

A Seção 4 detalha as etapas realizadas e apresenta os critérios de análise. Essa seção também especifica as técnicas utilizadas na implementação do projeto.

Ademais, a Seção 5 mostra o comportamento da plataforma implementada, destacando as suas principais funcionalidades e particularidades no processo de monitoramento do sistema de arrefecimento. Além disso, essa seção explora os testes feitos no motor mostrando a eficiência do sistema. Por fim, a Conclusão sintetiza os principais pontos desenvolvidos neste projeto, e, também, as possíveis melhorias a serem feitas futuramente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção se encarrega de explicar os conceitos necessários para compreender a constituição e a lógica do projeto. Aqui, encontram-se tópicos que exploram o funcionamento e as características do trator agrícola. Nesse viés, será apresentado como o sistema de arrefecimento opera, assim como a sua composição. Dessa forma, será possível se familiarizar mais com os termos técnicos utilizados ao longo do artigo.

2.1 O Trator agrícola

De acordo com Mialhe (1980), a *American Society of Agricultural and Biological Engineers* (ASABE) conceituou o trator como uma máquina de tração criada e recomendada para proporcionar potência às máquinas e implementos agrícolas. Em resumo, o trator é uma máquina capaz de tracionar, transportar e fornecer energia mecânica para movimentar mecanismos responsáveis pelo preparo do solo e reparação de insumos.

Antes do trator existir, todo o manejo do solo era feito por meio de tração animal juntamente com a mão de obra humana. Em 1784, Willian Murdock construiu o primeiro modelo de motor a vapor em alta pressão. Quando foi por volta do século XIX, iniciou-se tentativas de utilizar esse motor para mover um arado. Nesse momento, o veículo a vapor já ganhava o espaço do mercado. Porém, o termo *trator* só surgiu por volta de 1906 quando uma fabricante anunciou um modelo já com motor de combustão interna chamando de "*tractor machine*". Atualmente, ele tem um papel importante para o sucesso da produção. A Figura 1 mostra a representação de um dos primeiros modelos de trator.

Figura 1 – Representação de um trator agrícola antigo.



Fonte: Mialhe (1980).

Os tratores agrícolas podem ser classificados em três categorias: o de rodas, esteira e semi-esteira. Além dos sistemas de acoplamento e rodados, o trator possui as seguintes

composições auxiliares:

- a) *Sistema de alimentação*: responsável pelo suprimento de ar e combustível do motor.
- b) *Sistema de transmissão*: realiza a recepção, transformação e transmissão de potência do motor até os locais de sua utilização.
- c) *Sistema elétrico*: composto por bateria, alternador e motor de partida.
- d) *Sistema de lubrificação*: diminui atrito, proporciona limpeza, resfriamento auxiliar, vedação e redução de ruído.
- e) *Sistema de arrefecimento*: tem como função controlar a temperatura dos motores de combustão interna.

Monitorar esses sistemas são de extrema importância para garantir um bom uso do maquinário. Para Corrêa (2017), as informações obtidas são muito valiosas para auxiliar na tomada de decisões dos operadores, principalmente para fazer com que o trator trabalhe de forma econômica e eficiente.

2.1.1 Sistema de arrefecimento

Em (Gomides, 2018) é dito que o sistema de arrefecimento tem como objetivo impedir que elementos mecânicos do motor atinjam uma temperatura muito elevada. Isso é necessário para que o veículo funcione em boas condições e evite o superaquecimento. Muitas fabricantes consideram valores de temperatura entre 90°C a 110°C para uma faixa ideal de operação. Esse sistema pode ser classificado em dois tipos: a ar e a água. Em ambos os casos, o funcionamento é o mesmo, onde é forçada a circulação de um líquido através de um circuito interno para o bloco do motor.

O resfriamento por circulação de água é o processo mais utilizado para o arrefecimento, uma vez que permite o melhor controle de temperatura média dos componentes, proporcionando um bom desempenho (Incalado, 2021). O líquido que flui pelo sistema é conhecido como fluido de arrefecimento, popularmente conhecido como *água aditivada*. Segundo Quim (2007), ele proporciona a proteção ao sistema em casos de temperaturas adversas, impedindo que este congele no inverno e ferva no verão. Ademais, ele oferece proteção contra ferrugem e corrosão sem prejudicar as mangueiras de borracha e as peças plásticas. O sistema de arrefecimento é essencial para o funcionamento do motor e, quando não opera corretamente, pode causar danos ao seu desempenho e durabilidade. Outra causa comum é a oxidação do óleo lubrificante, que com o tempo pode aumentar o atrito entre as peças.

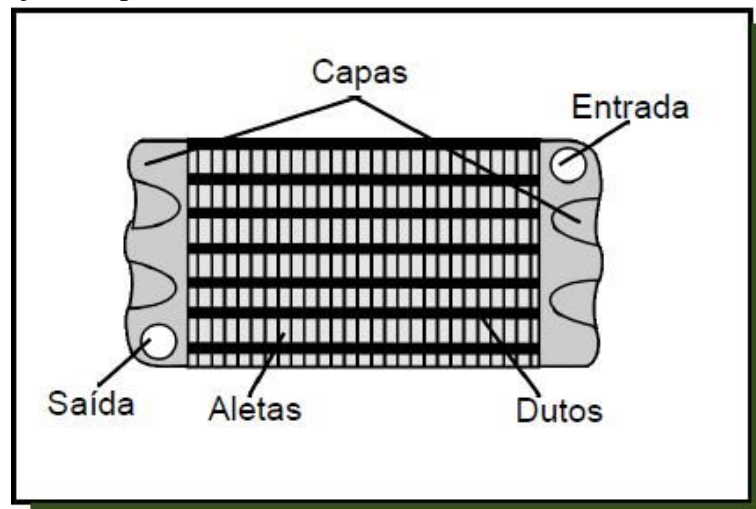
O sistema de arrefecimento é composto pelos seguintes componentes:

- a) Radiador.
- b) Ventilador.
- c) Válvula termostática.
- d) Bomba d'água.
- e) Reservatório de expansão.

Radiador

O radiador (Figura 2) é um componente do sistema de arrefecimento responsável por dissipar calor retirado do motor pelo fluido arrefecedor (Gomides, 2018). A sua estrutura é composta por tubos metálicos aletados onde o líquido atravessa. O fluido quente se acumula na parte superior do radiador e, à medida que esfria durante a troca de calor com a corrente de ar, ele desce para o reservatório inferior, direcionando-se em seguida para a bomba d'água.

Figura 2 – Ilustração das partes de um radiador.



Fonte: Mte-Thomson (2024).

De acordo com Muraro *et al.* (2022), as aletas são extensões acrescentadas aos tubos de passagem de água do radiador feito de alumínio. Sua eficiência é definida pelas suas peculiaridades, como comprimento, espessura, altura, condutividade térmica do material e número de aletas. O cálculo do comprimento das aletas é dado pelo Equação 2.1, onde L_c é o comprimento, L_{ale} é a altura e H_{ale} é a espessura da aleta:

$$L_c = L_{ale} + \frac{H_{ale}}{2} \quad (2.1)$$

As aletas podem ser retangulares ou triangulares. Em seus estudos, Incalado (2021) fez uma série de análises entre esses dois modelos e descobriu que as retangulares são mais efetivas do que as aletas triangulares, uma vez que retiram mais calor do sistema. Os radiadores são encontrados na parte dianteira do motor do trator.

Ventilador

De acordo com Quim (2007), os ventiladores (Figura 3) podem ser classificados em centrífugos e axiais, onde o primeiro tem seu fluxo axial de entrada expulsado radialmente pelas suas pás, enquanto o segundo é caracterizado pelo seu fluxo de ar aproximadamente paralelo ao eixo do rotor.

O ventilador fornece uma corrente de ar que, unida com àquela gerada pelo trator em movimento, passa pelo radiador e troca sua temperatura com o fluido de arrefecimento (Blanque, 2007). Ele é composto por um rotor propulsor e pás feitas de plástico distribuída de forma assétrica para evitar barulho durante altas rotações. O ventilador é acionado quando o sensor de temperatura indica altas temperaturas no fluido no sistema de arrefecimento.

Figura 3 – Modelo de ventilador axial de um trator.



Fonte: Tecfil (2024).

Válvula termostática

A válvula termostática (Figura 4) é um objeto mecânico que tem como função bloquear a circulação do fluido de arrefecimento do sistema até que uma determinada temperatura seja atingida (Gomides, 2018). No momento em que a temperatura esperada é atingida, a válvula

abre de forma gradativa para que o fluido passe pelo radiador. Sua composição contém um mecanismo sensível à temperatura que contrai ou expande de acordo com a temperatura do fluido arrefecedor.

Figura 4 – Representação de uma válvula termostática.



Fonte: Tecfil (2024).

Bomba d'água

O objetivo da bomba d'água (Figura 5) consiste em forçar a circulação do fluido de arrefecimento advindo do radiador para o interior do motor. Ela está ligada no eixo virabrequim do motor e ao eixo da bomba de óleo (Gomides, 2018).

Figura 5 – Exemplo de uma bomba d'água.

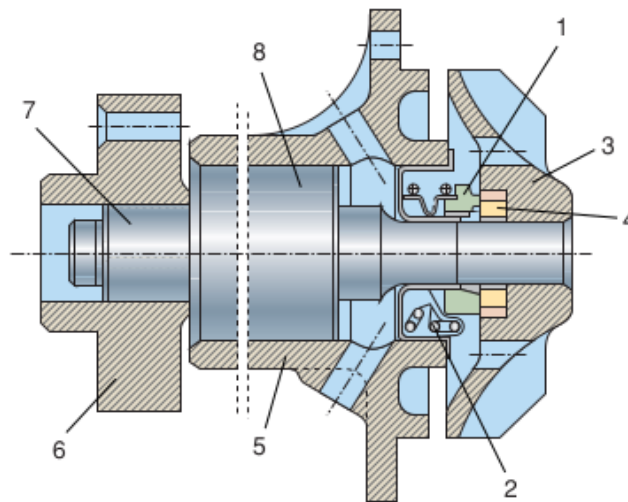


Fonte: Tecfil (2024).

A Figura 6 mostra os detalhes de uma bomba d'água. Segundo Blanque (2007), a

bomba d'água é constituída por um eixo de comando (7) que gira sobre rolamentos de esferas (8) e recebe movimento através da polia que se monta sobre o cubo (6). Na outra extremidade do eixo observa-se o rotor ou turbina (3), cujas aletas em espiral fazem circular o líquido. Assim, o conjunto é montado sobre o corpo da bomba (5). Para evitar fugas entre o corpo e o eixo, são dispostas juntas de estanqueidade (1) e (2).

Figura 6 – Detalhamento dos componentes de uma bomba d'água.



Fonte: Blanque (2007).

Reservatório de expansão

O objetivo do reservatório (Figura 7) de expansão é permitir que o volume do fluido de arrefecimento aumente com a temperatura, sem comprometer os componentes do motor (Gomides, 2018). Além disso, ele deve ser capaz de estocar todo o líquido do sistema de arrefecimento. Esse tanque contém indicadores para que o condutor saiba quando reabastecer o reservatório.

Figura 7 – Exemplo de um reservatório de expansão.



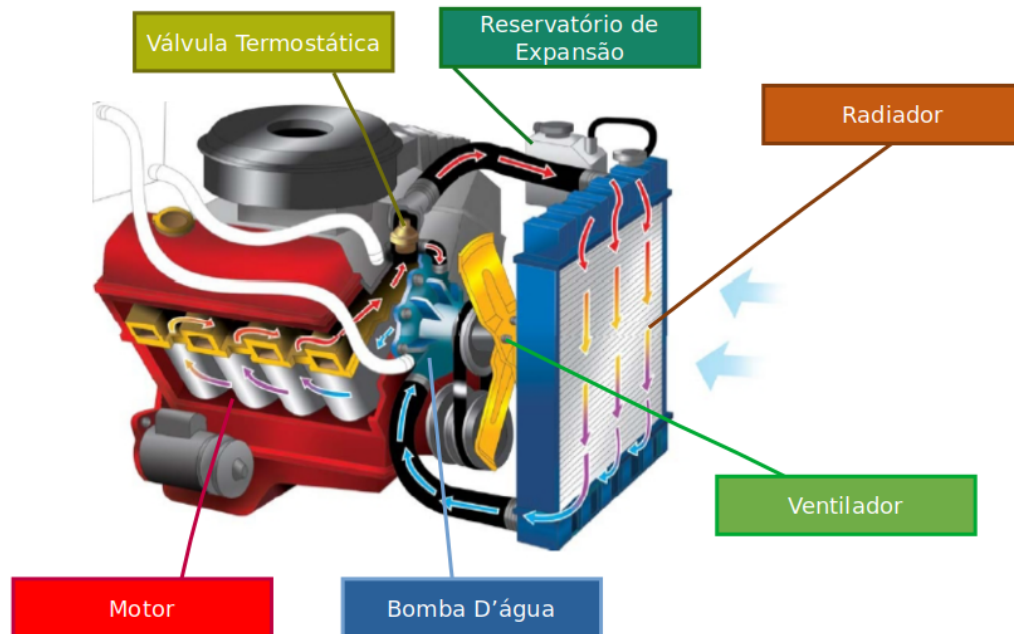
Fonte: Tecfil (2024).

2.1.2 Ciclo de funcionamento

A Figura 8 traz uma representação do funcionamento do sistema de arrefecimento. Percebe-se que o fluxo inicia com o fluido de arrefecimento concentrado no motor. Quando o fluido chega a uma temperatura elevada, a válvula termostática abre gradativamente para que a sua temperatura seja resfriada pelos aletas do radiador com o auxílio da corrente de ar gerada pelo movimento do trator e de seu ventilador. Na saída do radiador encontra-se o fluido em temperaturas menores. Feito isso, a bomba d'água se encarrega de forçar o fluxo da saída do trocador de calor para o motor (Blanche, 2007). Caso o fluido de arrefecimento que esteja voltando para o motor não esteja garantindo a estabilidade necessária, algum problema mecânico pode estar relacionado a válvula termostática ou ao próprio radiador.

Em tratores agrícolas, é possível que poeira ou pedaços de objetos possam se prender aos dutos do radiador gerando seu mau funcionamento. Em sua pesquisa, Rodrigues (2015) fez uma análise experimental do desempenho térmico de nanofluidos em trocadores de calor automotivo e concluiu que eles podem causar desgaste da bomba d'água e demais equipamentos. Desse maneira, fica evidente que é importante realizar manutenções no sistema de arrefecimento sempre que possível, a fim de prolongar a vida útil do maquinário.

Figura 8 – Representação do funcionamento do sistema de arrefecimento.



Fonte: Gomides (2018).

Como uma solução para diminuir os custos de manutenção, tem-se a opção do uso de sistemas para monitoramento das condições do sistema de arrefecimento. Isso pode ser feito através da obtenção e análise de dados operacionais lidos de sensores instalados no sistema de arrefecimento. Com isto é possível notificar os operadores para que possam tomar decisões e corrigir possíveis falhas e erros.

2.2 Processamento de Sinais

No contexto de Sistemas Embarcados, os sensores são componentes utilizados para obter sinais relacionados às variáveis físicas do ambiente a ser monitorado, sendo sensíveis a alguma condição da natureza, como a luz, calor, dentre outras (Wendling, 2010). Um exemplo de sensor de temperatura é mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Modelo de sensor de temperatura analógico.



Fonte: Tecfil (2024).

Os sensores podem produzir sinais analógicos ou digitais. Em sensores analógicos o sinal de saída pode variar continuamente dentro da faixa de operação ao longo do tempo, enquanto os valores de sensores digitais são discretos, com sua precisão variando de acordo com a quantidade de bits do sensor. Tipicamente, para se trabalhar com grandezas analógicas em sistemas discretos, é necessária a conversão de um sinal analógico para um sinal digital. Isto se dá por meio da amostragem, que transforma um sinal contínuo em uma sequência discreta de valores, e da quantização, que converte as amostras em números finitos. Dessa forma, é possível utilizar técnicas digitais para análise de frequências e remoção de ruídos, se necessário. O processamento de sinais é uma etapa fundamental em projetos que envolvem eletrônica e telecomunicações.

2.2.1 Amostragem e Quantização

Para Oppenheim A. V.; Willsky (2010), o processo de amostragem consiste na obtenção de valores discretos de um sinal contínuo em intervalos de tempo regulares. A taxa de amostragem trata-se da frequência com que as amostras são coletadas, devendo seguir o Teorema de Nyquist-Shannon¹, que determina que a frequência de amostragem deve ser pelo menos o dobro da maior frequência presente no sinal para evitar que as informações sejam perdidas. Por exemplo, para amostrar um sinal de áudio com frequências de até 20 kHz, que é a faixa de audição humana, a frequência de amostragem mínima seria 40 kHz. Contudo, para garantir uma boa qualidade de áudio e evitar perdas perceptíveis, muitos sistemas de áudio utilizam uma taxa de amostragem de 44,1 kHz, como é o caso do padrão de CDs de áudio.

Em Silva (2014), é dito que, após a amostragem, cada valor precisa ser representado digitalmente, uma vez que sistemas computacionais trabalham com dados discretos. Esse processo é conhecido como quantização e tem como objetivo aproximar os valores amostrados para o nível discreto mais próximo dentro de um conjunto finito de valores possíveis. O processo de quantização pode ser dividido em algumas etapas:

- a) *Divisão do intervalo de valores*: quebra do intervalo de valores do sinal analógico em partes menores.
- b) *Aproximação dos valores amostrados*: para cada valor amostrado, o valor contínuo do sinal é mapeado para o valor mais próximo dentro do intervalo de quantização.

Com isso, percebe-se que a amostragem e a quantização são essenciais para o

¹ <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/130833/1/844215546.pdf>

funcionamento de sistemas digitais, pois permitem que sinais analógicos sejam convertidos em dados discretos, passíveis de processamento. Esses processos são fundamentais para garantir a precisão e a eficiência na análise e controle em diversas aplicações tecnológicas.

2.2.2 Filtragem de sinais

Para Oppenheim A. V.; Willsky (2010), a filtragem é uma técnica fundamental no processamento de sinais, amplamente utilizada para reduzir os efeitos dos ruídos e melhorar a qualidade do sinal. O ruído é uma perturbação indesejada que pode comprometer a integridade do sinal, sendo introduzido em diferentes fases do processamento, como durante a captura, transmissão e armazenamento do sinal. A filtragem visa atenuar ou eliminar essas interferências, garantindo que o sinal útil seja preservado da melhor forma possível. A seguir, são apresentados dois exemplos de filtros amplamente utilizados em diversas aplicações:

- a) *Finite Impulse Response (FIR)*: são filtros com uma resposta ao impulso finita, ou seja, sua resposta ao impulso tem um número finito de amostras antes de se tornar zero. É conhecido por ser estável e causar distorção mínima na fase do sinal.
- b) *Infinite Impulse Response (IIR)*: são filtros com uma resposta ao impulso infinita, isto é, sua resposta ao impulso nunca chega a zero. Eles são eficientes em termos de recursos porque podem ser implementados com menos coeficientes do que os filtros FIR para atingir uma resposta similar.

A filtragem digital é amplamente utilizada nas áreas de processamento de áudio e vídeo, controle de sistemas e sistemas biomédicos. Existem diversos tipos de filtros digitais, e a escolha do filtro mais adequado depende das características do sinal, do ruído e dos requisitos específicos da aplicação. No contexto deste projeto, optou-se pelo filtro de Kalman devido à sua capacidade de estimar estados de sistemas dinâmicos com base em medições ruidosas. Esse filtro é particularmente eficaz em situações onde as medições do sistema estão sujeitas a incertezas, o que o torna ideal para melhorar a precisão do monitoramento, como é o caso do sistema proposto.

2.2.2.1 Filtro de Kalman

Em Cintra *et al.* (2010), o filtro de Kalman é definido como um algoritmo recursivo utilizado para estimar o estado de um sistema a partir de valores ruidosos. Ele é amplamente aplicado em sistemas de controle e robótica. Uma das principais vantagens do filtro de Kalman é sua capacidade de realizar estimativas mesmo quando as medições apresentam incertezas ou

ruídos.

O algoritmo assume que o sistema pode ser modelado como um processo estocástico linear e que tanto o ruído do processo quanto o das medições seguem uma distribuição normal. Para Bravo *et al.* (2013) as equações do filtro de Kalman são divididas em duas etapas: predição, na qual, com base na estimativa anterior, o próximo estado do sistema é previsto, e correção, que ajusta essa estimativa considerando a medição atual e o erro entre a predição e a medição. Além disso, os autores definiram que o estado de predição do sistema é definido em um instante k e representado por um vetor x_k que possui as variáveis a serem estimadas. Com isso, esse modelo matemático pôde ser descrito como na equação 2.3.

$$x_k = A_k x_{k-1} + B_k u_k + w_k \quad (2.2)$$

Sendo x_k o vetor de estado no instante k , A_k a matriz de transição do estado, B_k a matriz de controle, u_k o vetor de entrada de controle e w_k o ruído do processo assumindo o gaussiano com média zero e covariância Q_k . Além disso, apresenta-se também a equação do modelo de observação, derivada do modelo de predição. Essa equação é responsável por relacionar o estado do sistema com os valores disponíveis.

$$z_k = H_k x_k + V_k \quad (2.3)$$

Sendo z_k o vetor de medições no instante k , H_k a matriz de observação, que mapeia o estado x_k para o espaço das medições e V_k o ruído de medição que geralmente se assume como um ruído gaussiano. O filtro de Kalman é amplamente utilizado em diversas aplicações, como robótica e veículos autônomos, auxiliando na estimativa de variáveis como posição e velocidade. Uma de suas principais vantagens é a capacidade de atualizar estimativas em tempo real, exigindo um baixo armazenamento de dados anteriores, o que o torna eficiente para sistemas com recursos computacionais limitados.

2.3 Lógica Fuzzy

Em Marro *et al.* (2010), a lógica Fuzzy é definida como um ramo da matemática que trabalha com a ideia do raciocínio aproximado e da incerteza. Ela se diferencia da lógica booleana porque permite analisar graus de verdade que variam entre 0 e 1. Isso é crucial na modelagem de sistemas complexos e imprecisos.

Esse modelo foi introduzido em 1965 por Lotfi Zadeh para lidar com sistemas subjetivos. Sua criação surgiu da necessidade de obter classificações que não fossem apenas "sim" ou "não". Usando a lógica clássica, por exemplo, uma sala pode estar "quente" ou "fria", enquanto na lógica Fuzzy, ela pode estar "pouco quente", "muito quente" ou "moderadamente quente", com valores associados a cada uma dessas condições.

Em Gomide e Gudwin (1994), é abordado que um valor ou elemento pode pertencer parcialmente a um conjunto através da função de pertinência, conhecida como $\mu_A(x)$. A lógica Fuzzy permite as operações de união, interseção e complemento, semelhantes à teoria clássica dos conjuntos.

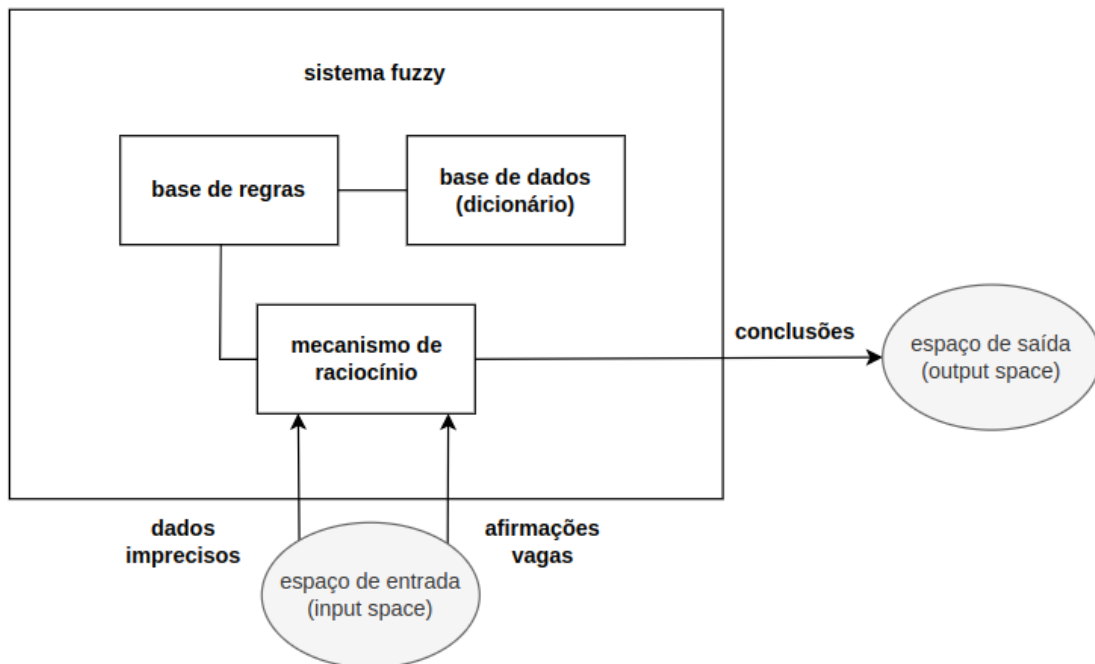
Ademais, a lógica Fuzzy trabalha com o processo de inferência para a tomada de decisões. Isso pode ser feito com base no formato de regras Fuzzy. Considerando o caso da temperatura de uma sala, um exemplo de regra seria: se a temperatura for baixa, então a velocidade do ventilador é baixa. Depois que o processo de inferência é aplicado, torna-se necessário realizar o processo de defuzzificação para obter um valor real a ser utilizado. Alguns métodos podem ser empregados, como, por exemplo, o do centro de gravidade, que calcula a média ponderada dos valores.

A Figura 10 mostra a estrutura básica de um sistema que utiliza a lógica Fuzzy. Inicialmente, são definidas as regras Fuzzy, que podem ser armazenadas em uma base de dados, dependendo da complexidade do sistema a ser desenvolvido. Com as regras estabelecidas, um mecanismo de raciocínio lógico é utilizado para a tomada de decisões, processando os dados provenientes da entrada, que podem ser advindos, por exemplo, de um sensor de temperatura. Após esse processamento, o sistema gera uma saída com as previsões obtidas a partir dos dados analisados.

O gráfico de Fuzzy é uma forma visual de representar os valores de entrada mapeados para diferentes categorias de classificação dentro de um sistema. Em um sistema de controle Fuzzy, as variáveis são convertidas em graus de pertinência para conjuntos Fuzzy. A função de pertinência descreve o grau em que um valor pertence a um determinado conjunto. Essas funções podem ser em formatos de triângulos, trapézios ou funções gaussianas. A escolha por uma delas depende do sistema e da aplicação a ser desenvolvida.

Em um gráfico Fuzzy, o eixo horizontal geralmente representa o valor da variável de entrada como, por exemplo, temperatura ou velocidade, enquanto o eixo vertical representa o grau de pertinência que varia de 0 a 1. O grau de pertinência é determinado pela forma da

Figura 10 – Estrutura básica de um sistema com Fuzzy.

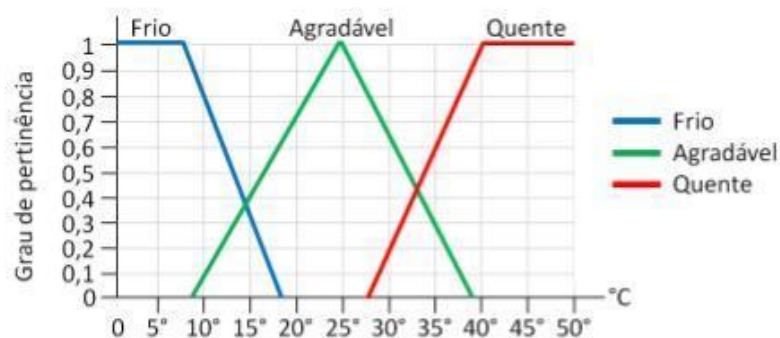


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

curva e pelo valor específico da variável de entrada. Quando a variável de entrada toma um valor específico, o gráfico mostra até que ponto esse valor se ajusta a cada conjunto fuzzy, indicando o grau de pertinência de cada categoria.

A representação gráfica é importante para observar o processo de fuzzificação, onde os valores são categorizados na lógica Fuzzy. Desse modo, é possível gerar decisões ou respostas em sistemas de controle. A Figura 11 mostra um exemplo de representação gráfica Fuzzy. Observando a imagem, percebe-se que os conjuntos Fuzzy são representados por funções de pertinência, as quais definem graus intermediários entre os estados (frio, agradável e quente), permitindo uma transição suave entre diferentes classificações em vez de limites rígidos.

Figura 11 – Exemplo de uma representação gráfica da lógica Fuzzy.



Fonte: Brainly (2025).

A lógica Fuzzy possui diversas aplicações na tomada de decisões. Na automação e controle, é amplamente utilizada em sistemas como, por exemplo, em freios automotivos, permitindo um ajuste mais preciso e eficiente. Já na Computação, pode ser implementada em diversas linguagens de programação para otimizar processos e melhorar a tomada de decisões em sistemas complexos (Marro *et al.*, 2010).

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção, serão apresentados os trabalhos acadêmicos que serviram de inspiração para este estudo. Durante as pesquisas, foram encontrados vários projetos que monitoravam os diferentes sistemas presentes em um trator, como, por exemplo, o sistema de arrefecimento que foi escolhido como foco deste trabalho. Nessa perspectiva, os artigos que mais se relacionavam com a ideia proposta foram os quatro que serão explicados a seguir.

3.1 Adaptação do sistema de arrefecimento do trator Valtra S374: estudo de caso em propriedade rural

O trabalho de Muraro *et al.* (2022) teve como finalidade aperfeiçoar o sistema de arrefecimento do trator Valtra Série S em condições climáticas e operacionais na região do Alto Paraná no Paraguai. Para isso, foi necessário recalcular alguns parâmetros do sistema de esfriamento, como, por exemplo as dimensões do radiador e seus componentes internos. Com isso, descobriu-se que a principal mudança que elevaria a eficiência do trocador é a diminuição da temperatura do ar na entrada do radiador.

Analizando esse projeto, nota-se que a principal conclusão foi a constatação de que as configurações originais do radiador e de outras peças não atendiam às demandas térmicas da região estudada. Desse modo, percebe-se que a introdução de um sistema para fins de monitoramento serviria não apenas para validar os estudos, mas também para detectar anomalias no sistema de arrefecimento desses tratores na região do Alto Paraná. Nesse contexto, uma contribuição interessante seria a possibilidade de realizar ajustes durante o funcionamento do sistema, como, por exemplo, ajustar a velocidade do ventilador ou a vazão do líquido de arrefecimento, a fim de evitar o desgaste e prolongar a vida útil dos componentes.

3.2 Modelagem e simulação de sistema de arrefecimento a água com controlador PID para implementação em processos industriais e sistemas embarcados aplicados ao ensino

Nesse projeto é construído um sistema de controle de temperatura d'água na saída de um trocador de calor. Para isso, utiliza-se um controlador *Proportional-Integral-Derivative Controller* (PID) com o intuito de calibrar o funcionamento do sistema de arrefecimento.

O trabalho de Filho *et al.* (2017) se destaca por facilitar a construção de controladores eficientes para sistemas de esfriamento que melhoram o desempenho térmico e operacional. A partir disso, o sistema proposto neste projeto aproveitou a ideia de medição de temperatura na saída do trocador de calor, mencionada pelo autor, para parametrizar o desempenho do radiador através da diferença entre as temperaturas do motor, da entrada e saída do radiador. Isso permite monitorar possíveis problemas que possam comprometer o bom funcionamento do trator, identificando anomalias e facilitando a manutenção.

3.3 Sistema de aquisição de dados em tratores: desenvolvimento de um protótipo de baixo custo usando a plataforma Arduino

Nesse projeto, é feito um sistema de monitoramento de um trator agrícola. Um grande diferencial desse trabalho é que o sistema foi testado em um maquinário real da marca John Deere, modelo 5603. Os parâmetros avaliados foram: temperatura e vazão do combustível na entrada e saída do tanque, velocidade dos rodados, a força realizada pelo trator para puxar um objeto e sua localização através de um GPS.

Apesar do trabalho ter obtido ótimos resultados nas medições de parâmetros, o sistema não possuía uma maneira de apresentar os resultados. Assim, surgiu a ideia de desenvolver uma plataforma que oferecesse representações visuais por meio de gráficos intuitivos, facilitando a análise da condição do trator pelos operadores de maneira rápida e eficiente.

3.4 Projeto do sistema de arrefecimento para um motor de um protótipo de fórmula SAE

Nesse trabalho é feito um projeto de um sistema de arrefecimento para um carro de corrida. Feito isso, é monitorado a relação entre a taxa de transferência de calor do motor e sua velocidade. Além disso, outro fato importante descrito no artigo foi o uso de sensores de temperatura de água na entrada e saída do radiador para monitorar o sistema de arrefecimento durante as competições. Assim, percebeu-se que a marcha lenta exigia mais do sistema de arrefecimento do carro de corrida.

A construção do carro de corrida relatado na obra de (Gomides, 2018) comprovou que é possível inserir sensores de temperatura na entrada e saída do radiador para analisar parâmetros de desempenho. Além disso, durante a leitura do trabalho, percebe-se que não foi mencionado nenhum painel automotivo que apresentasse os valores monitorados durante o funcionamento do veículo. Dessa maneira, observou-se durante as pesquisas que, na maioria dos projetos de monitoramento, não existia um sistema que apresentasse as informações de forma acessível para os operadores. Com isso, destaca-se a importância da integração de um sistema para visualização dos dados coletados.

3.5 Comparação entre os trabalhos

O quadro a seguir compara este trabalho com os estudos relatados anteriormente na mesma área de pesquisa. Essa comparação permite identificar as características que inspiraram o desenvolvimento do projeto proposto.

Quadro 1 – Análise comparativa dos trabalhos relacionados.

Trabalho	Placa	Sensor de Temperatura	Tipo de Análise	Visualização
Muraro <i>et al.</i> (2022)	Não especificado	Não especificado	Matemática e Prática	N/A
Filho <i>et al.</i> (2017)	Não especificado	Não especificado	Simulação	MATLAB
Oliveira <i>et al.</i> (2023)	Arduino Uno e Mega	PT100	Prática	Putty
Gomides (2018)	Não especificado	MTE 4053	Prática	Wave
Este trabalho	Arduino	NTC Fiat Fire	Prática	SICCAP

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4 METODOLOGIA

4.1 Planejamento inicial

Como previamente mencionado, este projeto é parte do escopo de um projeto de doutorado, conhecido como SICCAP. Assim, o requisitos levantados para este projeto buscam atender demandas de funcionalidades a serem incorporadas ao próprio SICCAP. Ademais, em reuniões com o autor do SICCAP, ocorreram várias trocas de conhecimentos com o intuito de compreender o funcionamento mecânico do trator agrícola e analisar as possibilidades para a construção do protótipo.

O planejamento inicial incluiu também um processo de busca por trabalhos acadêmicos para analisar diversos trabalhos desenvolvidos na área. Para encontrá-los, utilizou-se algumas palavras-chave na barra de pesquisa de diversos sites de conferências e periódicos científicos, conforme listados abaixo.

- a) "sistema de medição de temperatura para tratores agrícolas"
- b) "sistema embarcados para tratores"
- c) "monitoramento do sistema de arrefecimento de um trator"
- d) "monitoramento da eficiência do radiador"

Além disso, vários livros didáticos também foram utilizados para compreender conceitos relacionados à mecânica automotiva e tecnologia, principalmente no que diz respeito ao funcionamento de um sistema de arrefecimento e linguagens de programação, respectivamente. Eles podem ser encontrados nas referências deste trabalho.

4.2 Requisitos do sistema

A seguir, estão listados os requisitos definidos para alcançar os objetivos do sistema. A sigla *RF* significa requisito funcional, enquanto a sigla *RNF* significa requisito não funcional. A numeração a frente se trata do número do requisito.

RF01 - O sistema deve ser capaz de captar as leituras do conversor analógico-digital do Arduino conectado nos sensores de temperatura posicionados no motor, na entrada e saída do radiador.

RF02 - A aplicação deve registrar os valores medidos através do conversor analógico-digital ao longo do tempo para análises posteriores.

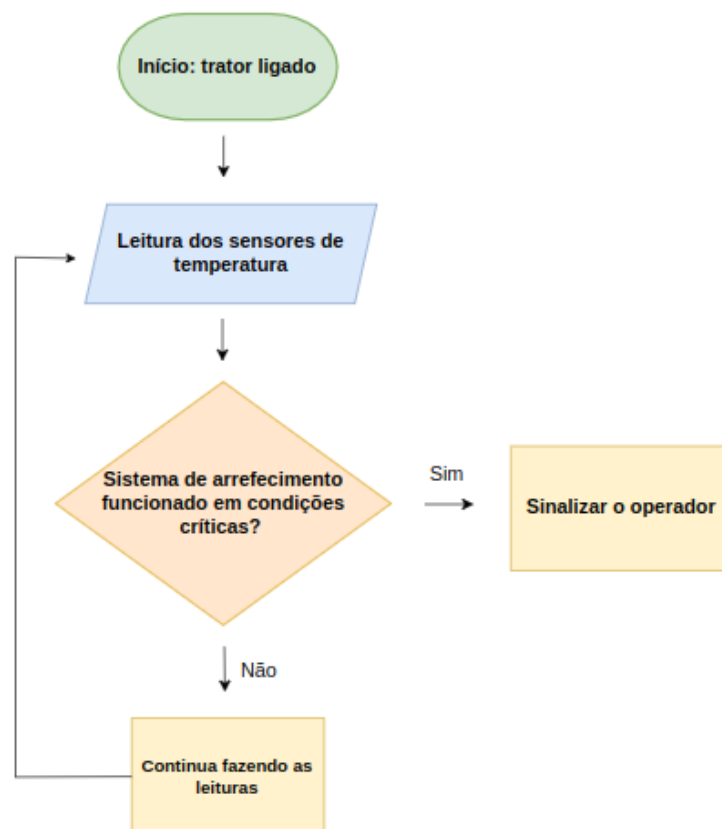
RNF01 - O sistema deve ser compatível com os modelos de tratores das marcas Massey Ferguson, New Holland e John Deere.

RNF02 - O sistema de diagnóstico dos estados deve ser desenvolvido em Python, devido à ampla disponibilidade de bibliotecas que facilitam sua implementação.

4.3 Fluxos principais do sistema

Após realizar o levantamento de requisitos, observou-se que as duas principais tarefas do sistema são: medir os valores dos sensores de temperatura do trator e tratá-los para reportar os possíveis estados do sistema de arrefecimento, como ilustrado na Figura 12, onde nota-se o fluxo do sistema em casos de detecção de condições críticas no sistema de arrefecimento do trator.

Figura 12 – Diagrama de fluxo para identificar as condições de operação.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Assim que o trator for ligado, o sistema deve coletar as medições. Se alguma anomalia acontecer, o operador deve ser sinalizado através de uma classificação do estado do sistema. Em caso negativo, o sistema deve continuar fazendo análises das medições normalmente. Assim, o sistema deve ser capaz de responder as seguintes perguntas:

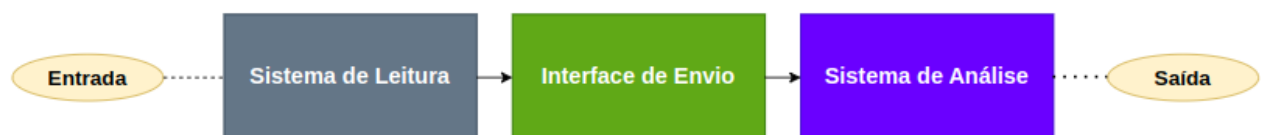
- a) O sistema de arrefecimento está trabalhando em boas condições?
- b) Qual o status de funcionamento dos 3 sensores de temperatura do sistema de arrefecimento?

Com base nisso, é possível desenvolver um sistema de monitoramento eficiente que detecte os estados do sistema de arrefecimento. Esse processo de modelagem preliminar é crucial para assegurar que o sistema a ser implementado responda adequadamente às necessidades específicas de monitoramento, garantindo a eficácia na operação e manutenção dos tratores agrícolas.

4.4 Componentes do sistema

Para facilitar a compreensão do sistema, foi decidido dividir o projeto em três partes, conforme mostrado na Figura 13. A primeira delas é o sistema de leituras, que será responsável por capturar os dados dos três sensores de temperatura conectados ao trator, coletando os valores na entrada e saída do radiador, e no próprio motor. A interface de envio consiste em um sistema web desenvolvido para encaminhar o arquivo com os dados lidos pelo sistema de leitura. Por fim, o sistema de análise é responsável por classificar as possíveis situações relacionados ao sistema de arrefecimento.

Figura 13 – Representação das partes do sistema de monitoramento.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

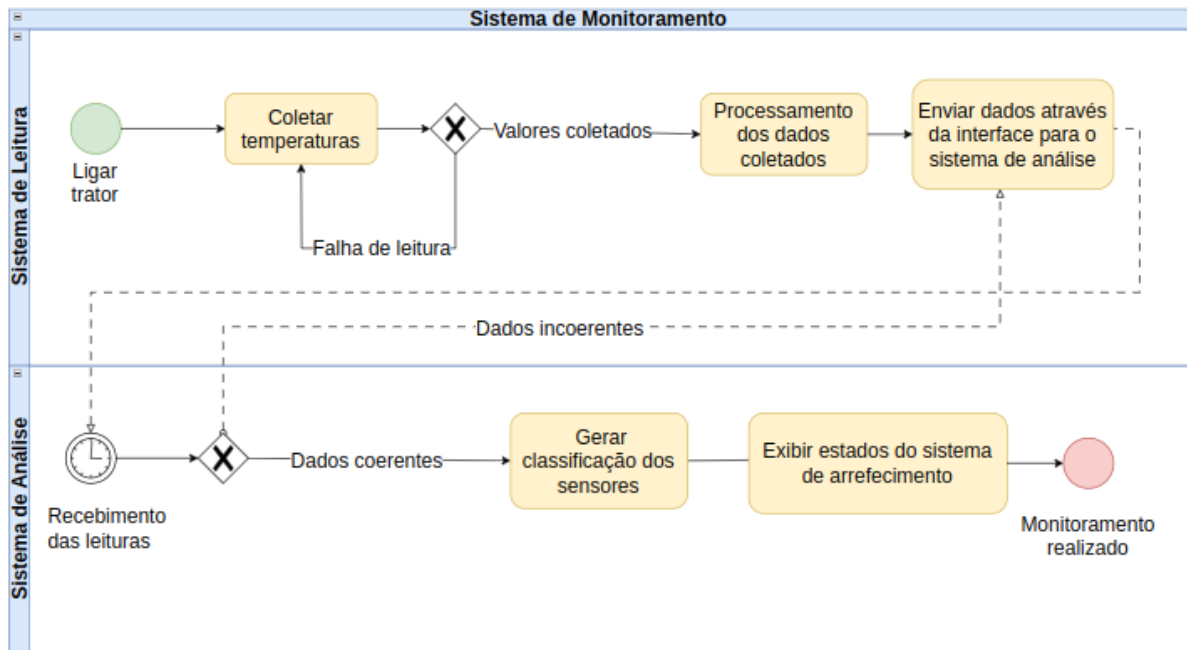
É importante destacar que o desenvolvimento do sistema web do SICCAP está em andamento, mas não é contemplado no escopo deste trabalho. Portanto, a responsabilidade deste projeto é coletar os dados, classificá-los e disponibilizar as informações obtidas, que, futuramente, serão inseridas no SICCAP.

4.5 Modelagem dos processos

A parte lógica do sistema de monitoramento é composto pelo sistema de leitura e o sistema de análise, cada um com suas responsabilidades específicas. A fim de detalhar as tarefas que precisam ser executadas para atingir os objetivos desejados, foi elaborado um *Business*

Process Model and Notation (BPMN) que ilustra o fluxo dos processos do sistema.

Figura 14 – BPMN do sistema de monitoramento.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Observando a Figura 14, percebe-se que o sistema de monitoramento é iniciado assim que o trator é ligado. Feito isso, a primeira atividade que deve acontecer é a coleta dos dados. Se ocorrer alguma falha durante as leituras, uma nova apuração deve ser feita, caso contrário, o sistema deve seguir para o próximo passo que é o de processar os valores lidos e enviá-los por meio da interface para o sistema de análise que se encontra na segunda raia. Esses dados, irão demandar algum tempo bem pequeno para serem recebidos.

Quando isso acontecer, o sistema de análise deve gerar os possíveis estados do sistema de arrefecimento baseado nos valores recebidos. Na situação em que ocorre a chegada de dados incoerentes por parte do sistema de leitura, será necessária a retransmissão das informações. Voltando ao caso de sucesso, a próxima etapa é classificar os três sensores de temperatura em: ambiente, normal, alta e superaquecido. Feito isso, o operador observa as mensagens sobre o estado de monitoramento. Elas ficarão sendo geradas enquanto o sistema estiver habilitado.

Com essa análise, fica mais nítido compreender os principais fluxos do sistema de monitoramento. Ademais, é uma forma de estruturar um encadeamento lógico para compreender as principais tarefas a serem realizadas. Vale ressaltar que essa é uma visão de alto nível.

4.6 Sistema de Leitura

A Figura 15 apresenta uma visão geral dos componentes do sistema. Ele foi integrado ao sistema de arrefecimento do veículo, onde os dados foram coletados pelo módulo de leitura e, posteriormente, enviados por meio da interface para o sistema de análise onde são classificados.

Figura 15 – Visão geral dos componentes do sistema.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.6.1 Componentes

Arduino Uno

O Arduino Uno¹ (Figura 16) é uma placa de microcontrolador que utiliza o chip ATmega328P. Devido a sua popularidade, o Arduino é amplamente usado em projetos de robótica, eletrônica e automação, devido a sua facilidade de uso com diversos modelos de módulos e sensores. Foi por esse motivo que ele foi escolhido para este projeto.

Figura 16 – Modelo do Arduino Uno.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

¹ <https://victorvision.com.br/blog/o-que-e-arduino/>

O Arduino possui uma série de periféricos, como pinos analógicos e digitais, interface USB tipo B, memória flash de 32 KB e velocidade de clock de 16MHz. Ademais, ele suporta comunicação serial com UART, I2C e SPI.

No que se refere a programação, o Arduino conta com uma IDE própria que suporta a linguagem C/C++. Essa possui muitas vantagens, dentre elas a grande comunidade que oferece suporte, custo acessível para projetos e a facilidade de uso e aprendizado.

Sensor de temperatura B3950

Para uma implementar o programa do sistema de leitura antes de testá-lo em um sistema de arrefecimento real, foi usado o sensor B3950² (Figura 17) para medição de temperatura. O B3950 é conhecido pela sua capacidade de atuar em projetos para medir temperaturas de líquidos, tendo em sua constituição um material impermeável e sua ponta feita de aço inoxidável. O B3950 tem seu princípio baseado na resistência elétrica que é alterada de acordo com o valor da temperatura medida. Sua faixa de medição varia de -20°C a 105°C, correspondendo a um intervalo analógico de 0 a 1023 no conversor analógico-digital.

Figura 17 – Modelo do sensor de temperatura B3950.



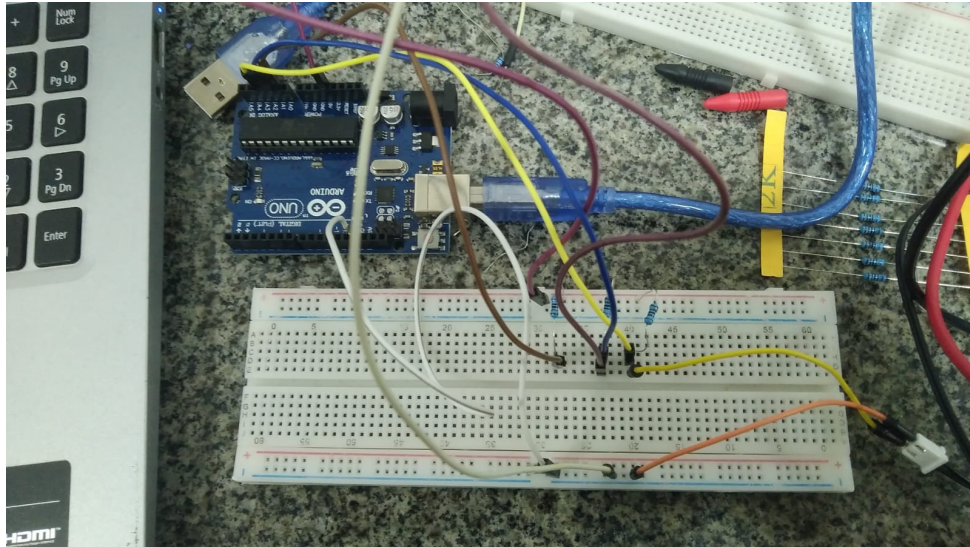
Fonte: Shop (2024).

Como mostrado na Figura 15, foram usados três sensores de temperatura para realizar as medições, sendo um para representar o sensor localizado antes da válvula termostática, um na entrada e outro na saída do radiador. A implementação consistiu no desenvolvimento do sistema

² <https://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/como-usar-com-arduino-sensor-de-temperatura-ntc-10k-3950-prova-dagua-do-tipo-sonda>

de leitura dos sensores de temperatura utilizando a placa Arduino Uno e um circuito divisor de tensão conforme mostrado nas Figuras 18 e 19. Observando a Figura 19, nota-se que foram utilizados três resistores de $2k\Omega$. Eles foram alimentados por uma fonte de 5V e conectados aos pinos analógicos do Arduino representados por A1 (motor), A2 (entrada do radiador) e A3 (saída do radiador) que estão conectados aos sensores de temperatura, consequentemente.

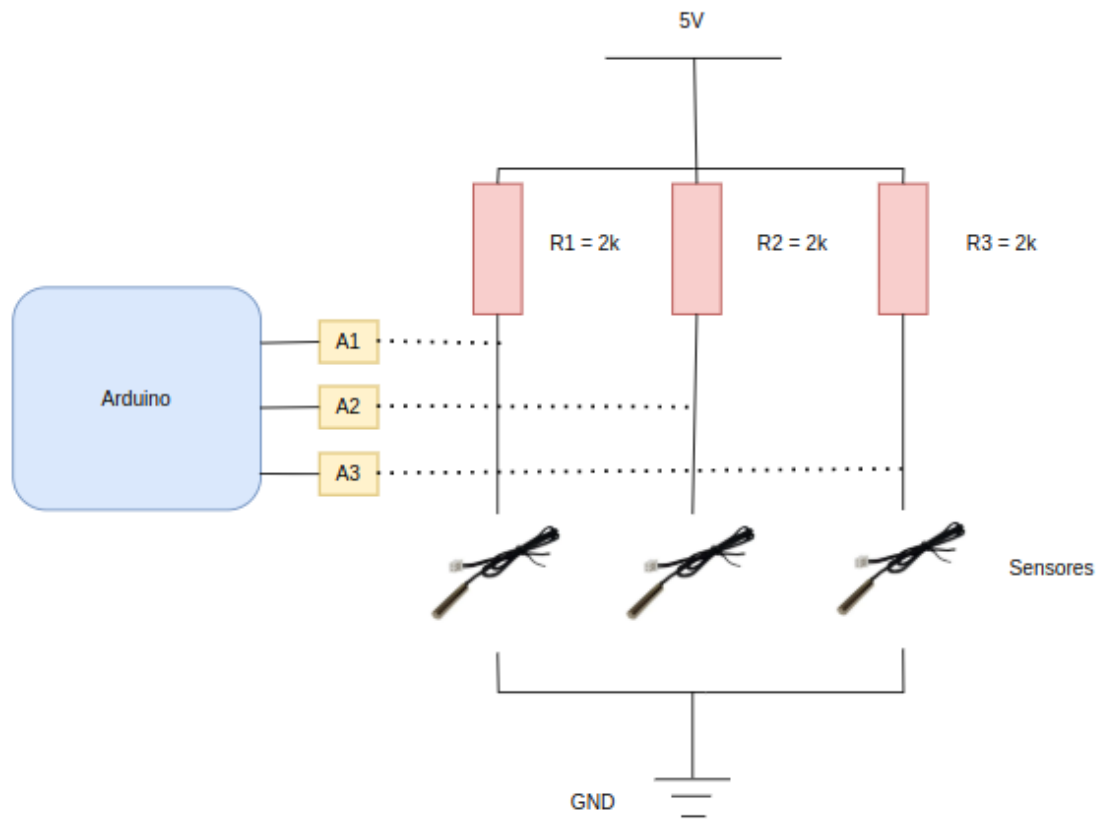
Figura 18 – Montagem em bancada do divisor de tensão.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Depois que foi verificado o funcionamento do código do sistema de leitura é que foram feitos os testes reais no motor de um veículo no Laboratório de Motores Automotivos do IFCE de Tabuleiro do Norte. Lá foi disponibilizado o motor de um Fiat Uno Fire 1.0. Embora este não seja o mesmo motor usado em tratores, o comportamento do seu sistema de arrefecimento é similar, o que não resulta em prejuízo para os fins deste trabalho. Assim, o sensor A1 foi ligado no motor, o A2 na entrada do radiador e o A3 na saída do radiador.

Figura 19 – Esquemático do divisor de tensão.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

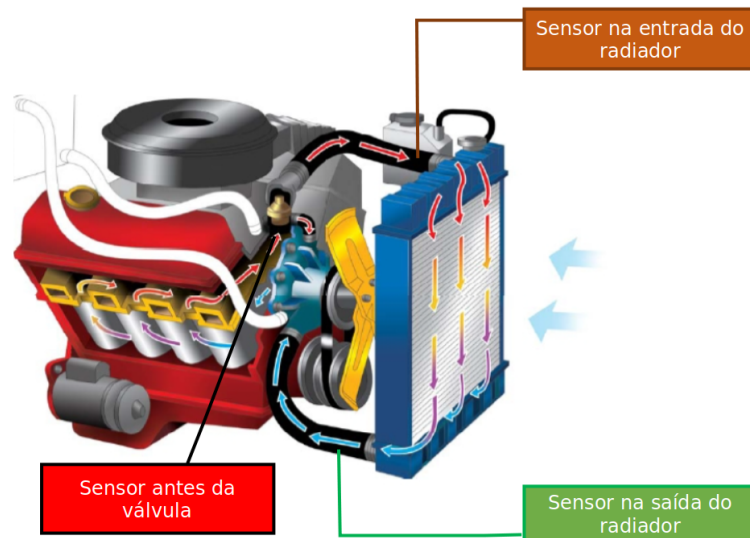
4.6.2 Montagem e instalação

A Figura 20 representa a localização dos sensores de temperatura que foram medidos no sistema de arrefecimento do veículo em laboratório. Primeiramente, o sistema de leitura foi integrado ao motor para coletar as informações reais durante o seu funcionamento. Feito isso, os dados apurados são processados pelo sistema de análise que contém o filtro de Kalman e a lógica de Fuzzy para tomada de decisões e possíveis diagnósticos.

Integração dos sensores com o motor

A Figura 21 mostra o sistema de arrefecimento onde foram coletados os dados. A Figura 22a mostra os dois sensores (de cor verde) dispostos na entrada e na saída do veículo. Já a Figura 22b mostra o outro sensor do mesmo modelo inserido no motor do veículo para monitorar a temperatura do motor antes da válvula termostática.

Figura 20 – Ilustração da distribuição dos sensores de temperatura no veículo.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Figura 21 – Sistema de arrefecimento usado para testes reais em laboratório.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.7 Sistema de Análise

A função principal do sistema de análise é categorizar o estado de funcionamento do sistema de arrefecimento. Tais falhas geralmente estão associadas ao mau funcionamento de algum componente mecânico. Nesse caso, é importante notificar o operador sobre a situação do motor para evitar prejuízos maiores. Para isso, foi necessário o sistema realizar a medição de três sensores de temperatura, referidos no Quadro 2 como:

- a) *Motor*: localizado no motor antes da válvula termostática.
- b) *Entrada*: localizado na entrada do radiador.
- c) *Saída*: localizado na saída do radiador.

Figura 22 – Sensores de temperatura usados para coletar os dados



(a) Sensores na entrada (superior) e saída (inferior) do radiador



(b) sensor do motor antes da válvula termostática

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Ainda no Quadro 2 são mostradas as 30 combinações possíveis feitas com os três sensores. Ademais, nota-se que cada sensor foi classificado de acordo com as leituras obtidas em:

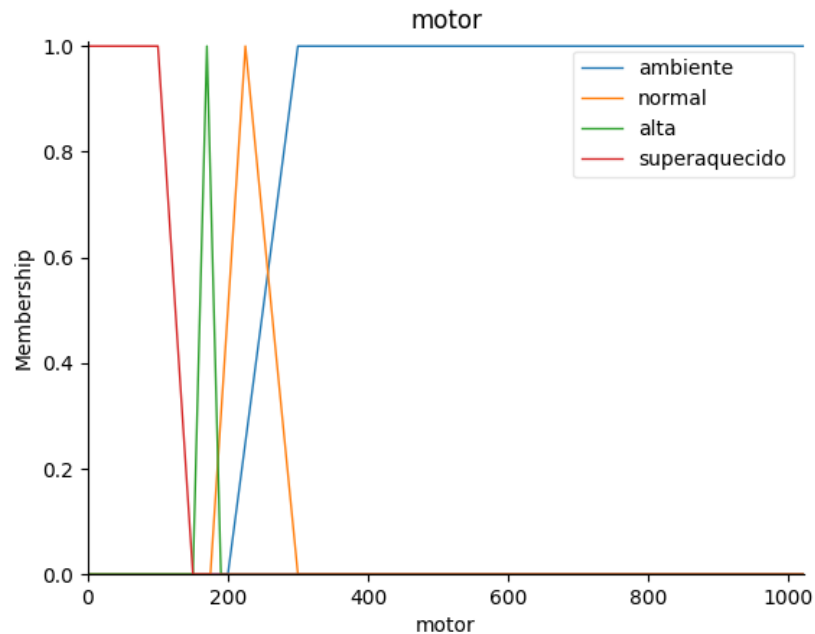
- a) *Ambiente*: temperatura baixa, sem risco de superaquecimento.
- b) *Normal*: funcionamento estável, dentro da faixa ideal de operação.
- c) *Alta*: o fluido de arrefecimento atinge temperaturas elevadas, porém ainda dentro de limites operacionais.
- d) *Superaquecido*: indica um nível crítico de temperatura no sistema de arrefecimento, exigindo o desligamento imediato para evitar danos ao motor.

A partir disso, conseguiu-se determinar o estado do sistema de arrefecimento a partir da análise das combinações, conforme mostrado no Quadro 2. Desse modo, o operador consegue ter uma visão do funcionamento do sistema. Os * representam estados indiferentes, isto é, se um dos sensores indicar superaquecimento, o estado do sistema já deve ser anomalia automaticamente e o trator deve ser desligado para manutenção.

A classificação mostrada no Quadro 2 foi implementada utilizando a lógica Fuzzy.

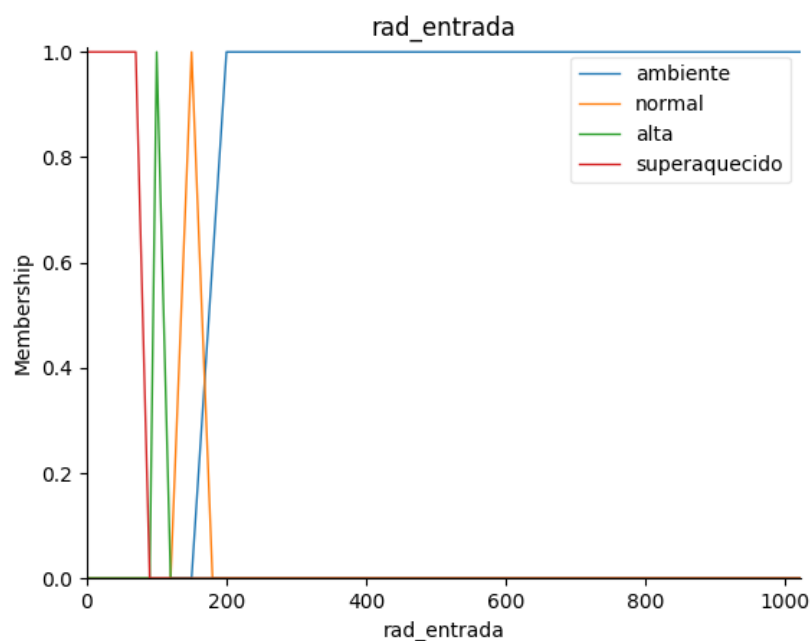
As Figuras 23, 24, 25 e 26 mostra os intervalos de pertinência definidos para fazer a classificação dos sensores e do estado do sistema.

Figura 23 – Intervalos de pertinência Fuzzy para o classificação do sensor do motor.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

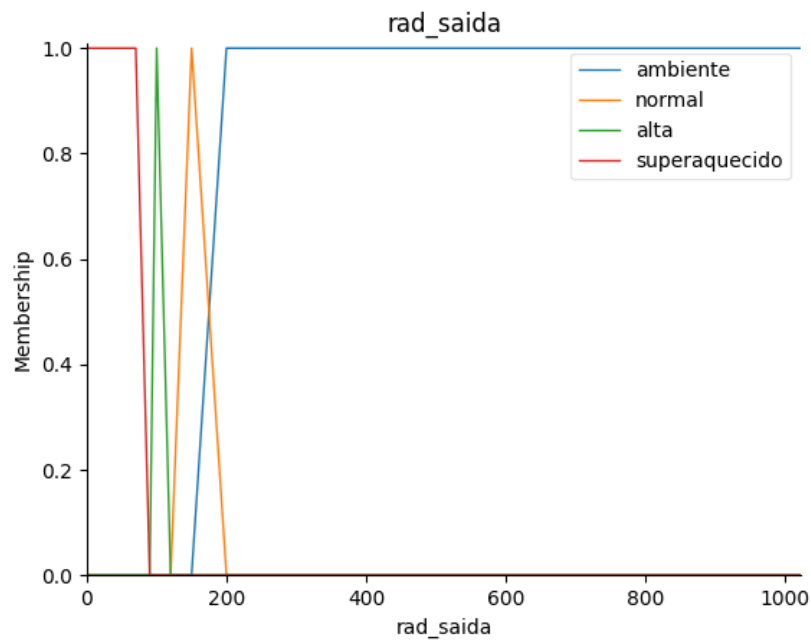
Figura 24 – Intervalos de pertinência Fuzzy para a classificação do sensor na entrada do radiador.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

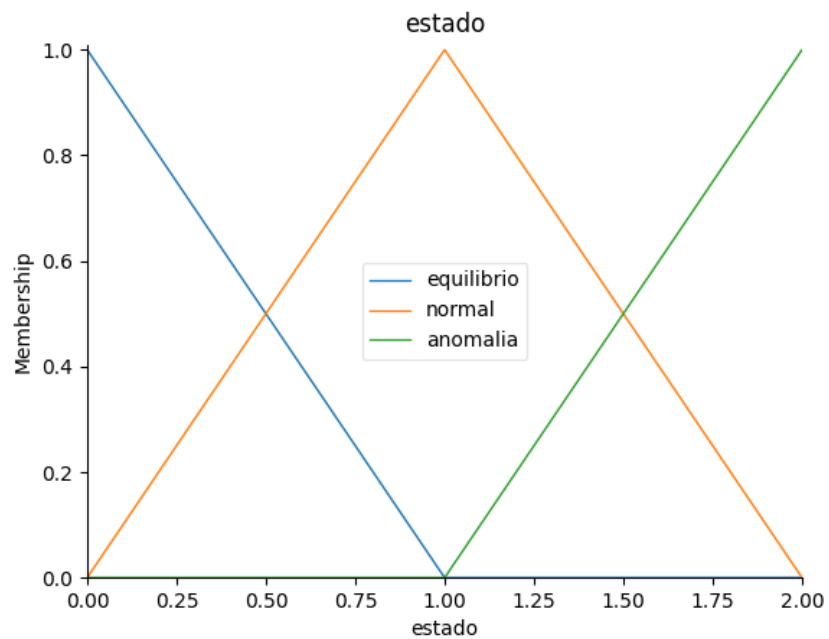
Os intervalos definidos nas Figuras 23, 24, 25 foram modelados usando as funções

Figura 25 – Intervalos de pertinência Fuzzy para a classificação do sensor na saída do radiador.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 26 – Ilustração da distribuição dos sensores de temperatura no veículo.



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Quadro 2 – Classificação dos estados do sistema.

Casos	Motor	Entrada	Saída	Status
1	Ambiente	Ambiente	Ambiente	Equilíbrio
2	Ambiente	Ambiente	Normal	Anomalia
3	Ambiente	Ambiente	Alta	Anomalia
4	Ambiente	Normal	Ambiente	Normal
5	Ambiente	Normal	Normal	Normal
6	Ambiente	Normal	Alta	Anomalia
7	Ambiente	Alta	Ambiente	Anomalia
8	Ambiente	Alta	Normal	Anomalia
9	Ambiente	Alta	Alta	Anomalia
10	Normal	Ambiente	Ambiente	Normal
11	Normal	Ambiente	Normal	Anomalia
12	Normal	Ambiente	Alta	Anomalia
13	Normal	Normal	Ambiente	Normal
14	Normal	Normal	Normal	Normal
15	Normal	Normal	Alta	Anomalia
16	Normal	Alta	Ambiente	Normal
17	Normal	Alta	Normal	Normal
18	Normal	Alta	Alta	Anomalia
19	Alta	Ambiente	Ambiente	Anomalia
20	Alta	Ambiente	Normal	Anomalia
21	Alta	Ambiente	Alta	Anomalia
22	Alta	Normal	Ambiente	Normal
23	Alta	Normal	Normal	Normal
24	Alta	Normal	Alta	Anomalia
25	Alta	Alta	Ambiente	Normal
26	Alta	Alta	Normal	Normal
27	Alta	Alta	Alta	Normal
28	Superaquecido	*	*	Anomalia
29	*	Superaquecido	*	Anomalia
30	*	*	Superaquecido	Anomalia

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

trapmf (trapezoidal) ou *trimf* (triangular), para garantir uma transição gradual entre as situações.

Os valores para cada classificação foram configurados da seguinte forma:

No caso do motor:

- Ambiente (azul) [200, 300, 1023, 1023]*: considera temperaturas elevadas, indicando que o motor opera em condições frias ou sem carga térmica significativa.
- Normal (laranja) [175, 225, 300]*: indica que a temperatura do motor está subindo e pode exigir atenção, mas ainda dentro de uma faixa operacional.

- c) *Alta (verde)* [150, 170, 190]: indica que a temperatura do motor está subindo e pode exigir atenção, mas ainda dentro de uma faixa operacional.
- d) *Superaquecido (vermelho)* [0, 0, 70, 90]: representa temperaturas críticas, onde o sistema deve ser desligado imediatamente para evitar danos ao motor.

No caso da entrada e saída do radiador:

- a) *Ambiente (azul)* [150, 200, 1023, 1023]: indica que o fluido na entrada ou saída do radiador está em temperatura baixa, sem risco de superaquecimento.
- b) *Normal (laranja)* [120, 150, 180]: refere-se à faixa ideal de funcionamento do fluido dentro do sistema de arrefecimento.
- c) *Alta (verde)* [90, 100, 120]: mostra que o fluido está com temperatura elevada, exigindo monitoramento para evitar falhas térmicas.
- d) *Superaquecido (vermelho)* [0, 0, 70, 90]: indica uma condição crítica, onde o fluido já atingiu temperaturas que comprometem o resfriamento adequado do motor.

Para a classificação do estado:

- a) *Equilíbrio*: a função triangular é definida por [0, 0, 1], onde o valor central (0) tem pertinência total, e à medida que os valores aumentam, a pertinência diminui.
- b) *Normal*: a função triangular [0, 1, 2] representa um estado de operação normal, com máxima pertinência no valor 1 e transições suaves entre 0 e 2.
- c) *Anomalia*: a função triangular [1, 2, 2] é usada para indicar um estado de anomalia, onde os valores próximos a 2 têm a maior pertinência, sinalizando que o sistema está fora dos parâmetros normais.

Vale ressaltar que essas faixas de valores foram definidas com base nos resultados coletados no sistema de arrefecimento testado em laboratório. Isso implica que tais intervalos podem não ser adequados para outros modelos de motores. Assim, poderá ser necessário realizar uma calibração do sistema para ajustar os parâmetros e garantir resultados mais precisos e específicos para diferentes condições de operação.

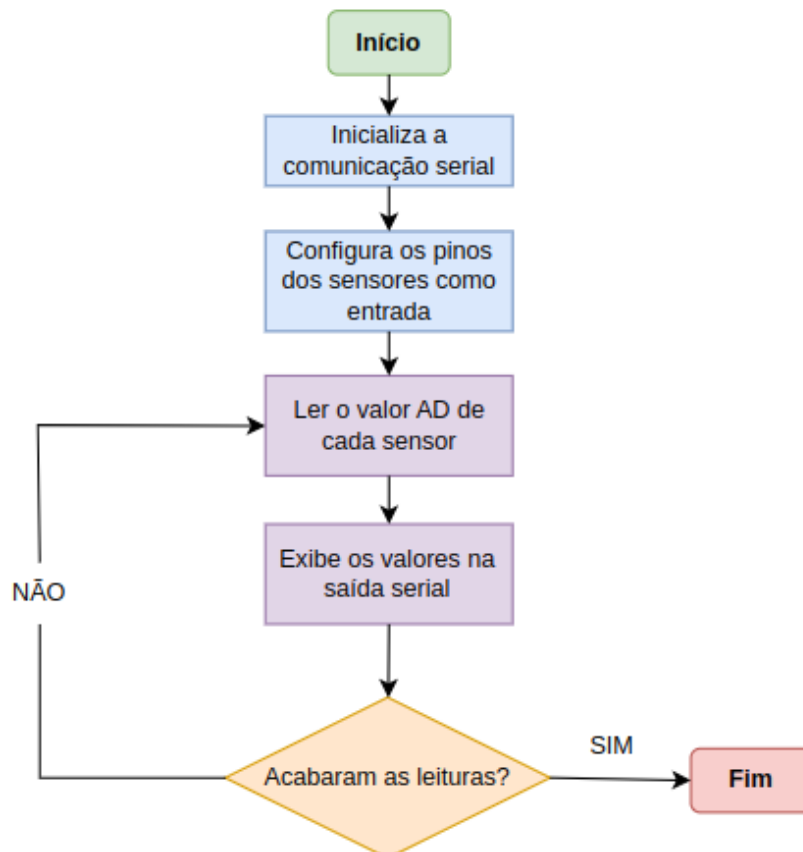
4.7.1 Coleta de dados

Para coleta dos dados dos sensores de temperatura, foi utilizado o Arduino Uno com a linguagem C/C++. O Arduino recebe os dados, faz a formatação e os disponibiliza para o sistema de análise. Já o sistema de análise, foi desenvolvida no ecossistema de desenvolvimento

do *Visual Studio Code*³.

A Figura 27 mostra o fluxo de funcionamento do código desenvolvido. Percebe-se que o processo começa com a inicialização da comunicação serial entre o Arduino e o computador. No código, a taxa de envio de dados foi de 9600 baud. Em seguida, foi feita a configuração dos pinos analógicos com os três sensores de temperatura. No programa, o pino A1 foi conectado ao sensor do motor, o A2 ao sensor da entrada do radiador e A3 ao sensor da saída do radiador. Desse modo, o próximo passo consistiu na exibição das leituras no monitor serial da IDE. Enquanto os sensores enviam dados, o sistema de leitura fica capturando os valores. Caso contrário, ele finaliza a execução. O programa foi estruturado para permitir a leitura dos conversores *Analógico-Digital* (AD) de cada sensor, que operam em um intervalo de 0 a 1023.

Figura 27 – Diagrama de fluxo do código do sistema de leitura.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

³ <https://code.visualstudio.com/>

4.7.2 Detecção de falhas mecânicas

O servidor que recebe os dados para análise foi desenvolvido utilizando o framework Flask⁴ em Python. Para que o sistema de análise processe os dados, um sistema web simples foi criado para subir um arquivo **.txt*, que aceita o formato mostrado na Figura 28, com as leituras dos sensores. Neste caso, os valores de AD1, AD2 e AD3 correspondem, respectivamente, aos sensores localizados no motor, entrada e saída do radiador.

Figura 28 – Exemplo de arquivo .txt processado pelo sistema de análise.

```
1 timestamp;counter;AD1;AD2;AD3;
2 0;0;0;483;490;
3 999;1;0;483;490;
4 1999;2;0;483;490;
5 2999;3;0;482;490;
6 3999;4;0;482;490;
7 5000;5;0;482;490;
8 5999;6;0;483;490;
9 7000;7;0;482;490;
10 7999;8;0;482;490;
11 8999;9;0;482;490;
12 10000;10;0;482;490;
13 10999;11;0;482;490;
14 12000;12;0;483;490;
15 12999;13;632;483;490;
16 13999;14;635;483;490;
17 14999;15;660;483;490;
18 15998;16;636;481;490;
19 16997;17;631;474;490;
20 17997;18;623;470;490;
21 18998;19;630;470;490;
22 19997;20;619;472;489;
23 20998;21;626;473;489;
```

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

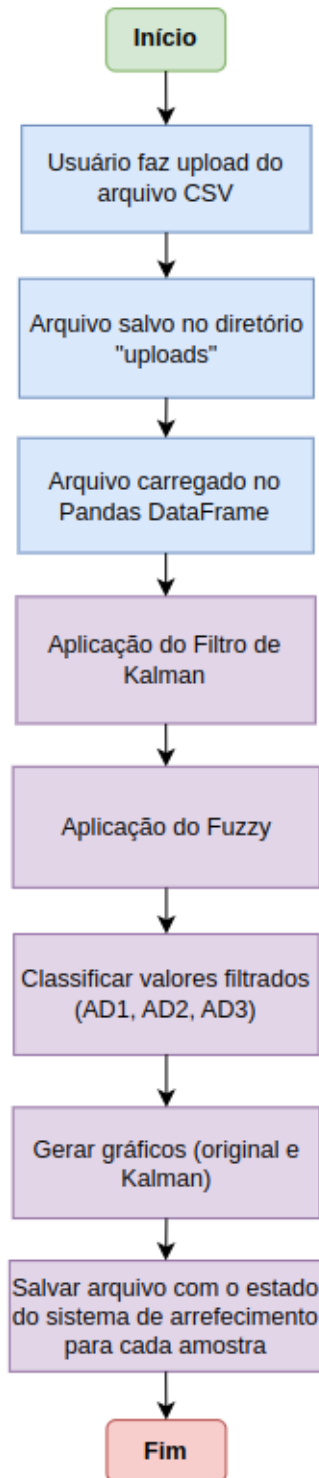
A estrutura do arquivo processado pelo sistema é composta por cinco campos. O primeiro campo corresponde ao *timestamp*, que representa numericamente um instante específico no tempo. Em seguida, há o campo *counter*, que indica a quantidade de amostras coletadas. Os três campos seguintes *AD1*, *AD2* e *AD3* armazenam os valores AD lidos pelos sensores de temperatura. À medida que novos dados são capturados pelos sensores, eles são adicionados ao final do arquivo, permitindo sua posterior análise.

A Figura 29 mostra as principais etapas realizadas pelo sistema de análise. Nesta versão, para os dados serem tratados é necessário fazer o *upload* de um arquivo CSV com os campos previamente definidos.

Depois disso, os dados dos sensores de temperatura são filtrados por uma função que implementa o filtro de Kalman. Em seguida, os dados filtrados são submetidos a uma função que utiliza a lógica Fuzzy. Ela é importante para classificar os valores de AD1, AD2 e AD3 em:

⁴ <https://flask.palletsprojects.com/en/stable/>

Figura 29 – Diagrama de fluxo do código de tratamento de dados.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

ambiente, normal, alta ou superaquecido. Assim, é possível analisar se o motor do trator está operando em condição de equilíbrio, anomalia ou normal.

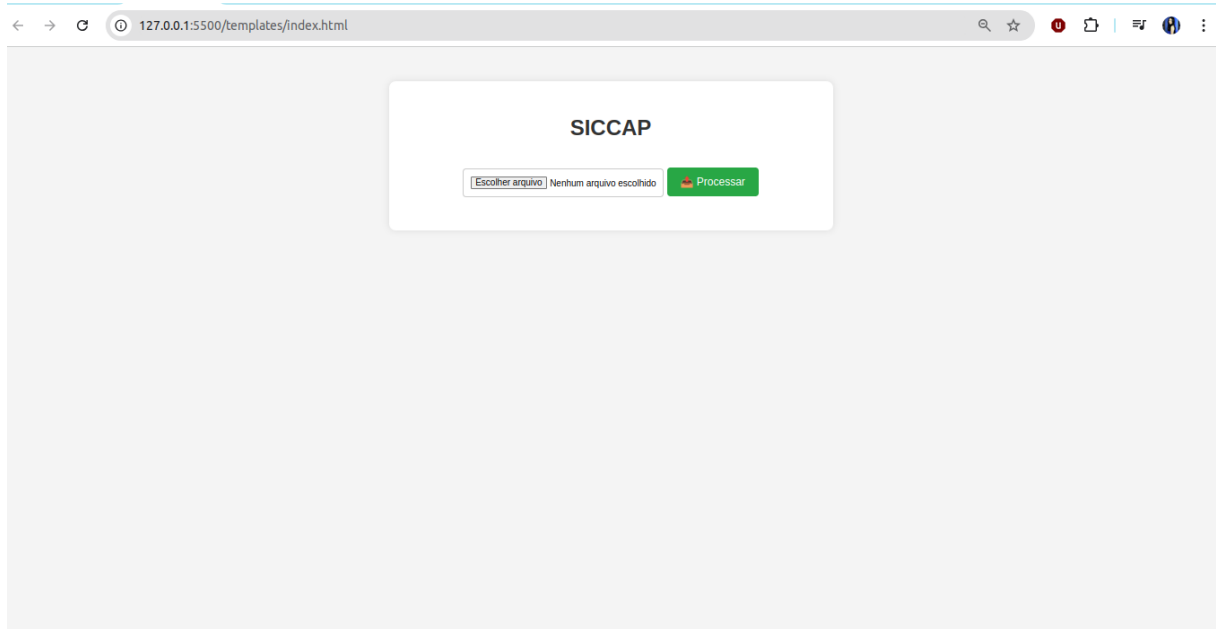
Feito tudo isso, o sistema armazena as informações do estado do trator, classificador de sensores e mensagens de alertas em arquivos **.txt*. Adicionalmente, o sistema também conse-

que gerar os gráficos das amostras em sua forma normal, com filtro de Kalman e classificação Fuzzy para os valores de AD.

4.7.3 Interface web provisória

A Figura 30 mostra um *frontend* simples utilizando HTML, CSS e JavaScript para o usuário realizar o *upload* do arquivo **.txt* a ser processado. Com o arquivo selecionado, basta clicar no botão verde de processar que o sistema de análise realiza todo o passo a passo que foi descrito na Figura 29.

Figura 30 – Interface web para subir o arquivo *.txt com os dados.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, serão apresentados os resultados das saídas do sistema de monitoramento desenvolvido. Serão mostrados os dados de leitura obtidos, os gráficos gerados e as tomadas de decisão do software. Desse modo, será possível discutir sobre os padrões encontrados, bem como a eficácia das técnicas aplicadas.

No ambiente real, foram coletados um total de 5423 amostras. O motor do carro funcionou por cerca de 30 minutos, o suficiente para se verificar o ciclo completo de funcionamento. A Figura 31 mostra o momento em que os valores de AD dos sensores estavam sendo coletados.

Figura 31 – Momento da coleta dos dados dos sensores de temperatura do sistema de arrefecimento real.

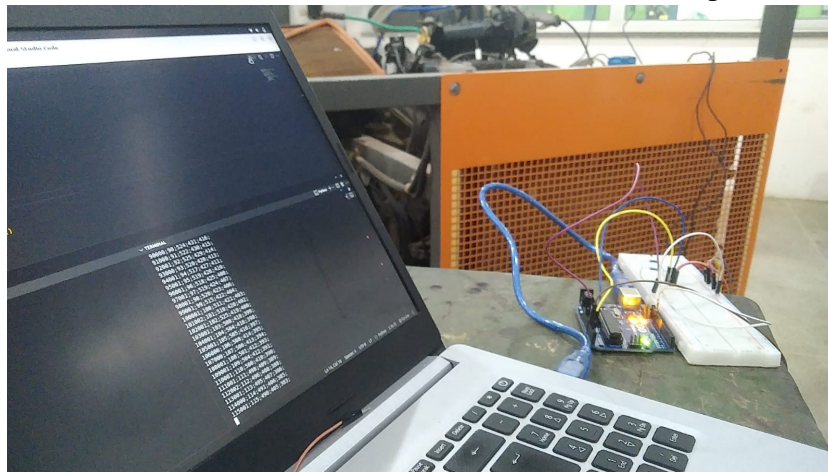


Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.1 Análise dos testes em laboratório do sistema de leitura

Os testes foram realizados no Laboratório de Motores Automotivos do IFCE de Tabuleiro do Norte. Primeiramente, o circuito divisor de tensão foi montado utilizando resistores de $2k\Omega$, apresentando um comportamento satisfatório. No entanto, ao testar outros valores de resistência na protoboard, percebeu-se que as medições analógicas variavam nos mesmos instantes. Isso ocorreu porque os sensores de temperatura utilizados são termistores *Negative Temperature Coefficient* (NTC), cujo valor de resistência diminui conforme a temperatura aumenta. Como esses termistores estavam conectados em um divisor de tensão, a troca dos resistores fixos alterou a relação de impedância do circuito, impactando diretamente a tensão de saída lida pelo microcontrolador. Com circuito do divisor de tensão já conectado nos sensores de temperatura do veículo, as coletas foram feitas normalmente e mostradas no monitor serial em tempo real, como mostrado na Figura 32.

Figura 32 – Leitura dos valores dos sensores sendo coletadas em tempo real.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Durante a leitura, foi possível capturar valores de AD em todos os momentos do ciclo de funcionamento de um sistema de arrefecimento. No dia em que os testes foram realizados, o motor do veículo ainda não tinha sido ligado, o que garantiu que o fluido de arrefecimento começou em sua temperatura ambiente. Antes de da partida, verificou-se que a temperatura do fluido era de 28°C . Com isso, foi dada a partida do motor e foi possível capturar os dados nos instantes de aquecimento do motor até o momento da abertura da válvula termostática, mas também do esfriamento do fluido no radiador que ativou o funcionamento do ventilador.

Durante esses momentos, o sistema de leitura apresentou um comportamento estável e continuou recebendo os dados corretamente. Chegando ao final da apuração dos valores de AD

dos três sensores de temperatura, foi gerado um arquivo *Comma-Separated Values* (CSV) para realizar o *upload* no sistema de análise.

Durante a leitura dos dados e observando o comportamento do funcionamento do motor do carro, notou-se que quanto menor eram os valores de AD, maiores eram as temperaturas, ou seja, um AD que lia 300 estava mais aquecido que um AD que lia 500. Depois que os testes foram finalizados, observou-se atentamente os arquivos. A Figura 33 mostra um trecho do CSV onde aconteceu um superaquecimento no motor. A medida que a válvula foi abrindo e o fluido foi esfriando, os valores de AD do motor começaram a aumentar simbolizando o equilíbrio do sistema de arrefecimento.

Figura 33 – Momento que capturou o esfriamento do motor.

```
166 81998;164;185;97;202;
167 82498;165;184;97;203;
168 82999;166;185;98;203;
169 83499;167;185;97;203;
170 83999;168;211;98;203;
171 84499;169;189;98;204;
172 84999;170;195;98;204;
173 85499;171;195;98;204;
174 85999;172;195;99;204;
175 86499;173;199;99;204;
176 86999;174;198;99;205;
177 87498;175;199;100;205;
178 87999;176;202;100;206;
179 88499;177;219;100;207;
180 88999;178;201;100;208;
181 89499;179;200;101;209;
182 89999;180;202;101;211;
183 90500;181;205;102;212;
184 90999;182;204;102;213;
185 91500;183;204;103;215;
186 92000;184;209;103;215;
187 92499;185;205;103;215;
188 93000;186;205;104;214;
189 93500;187;195;104;212;
190 94001;188;216;104;209;
191 94500;189;207;105;207;
```

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Analisando a Figura 33, o valor de AD no motor na linha 166 é 185. A medida que o fluido de arrefecimento vai esfriando, os valores tendem a aumentar nas outras amostras, mesmo com algumas oscilações. Isso mostra que foi possível a constatação de um ciclo de funcionamento completo do veículo em teste real e a eficiência do radiador usado.

5.1.1 Representações gráficas

Durante o processamento dos dados, dois gráficos foram gerados assim que foi feito o *upload* do arquivo através da interface web: o gráfico original e o gráfico do processamento através do filtro de Kalman.

Observando a Figura 34 nota-se a representação dos ADs coletados para cada sensor de temperatura. Pode-se notar que, a priori, o fluido de arrefecimento do motor começou frio e foi esquentando com passar do tempo. O mesmo pode ser dito para os sensores que da entrada e saída do radiador, porém em valores de AD menores. Depois, percebe-se que provavelmente a válvula termostática deve ter aberto e deixou o fluido de arrefecimento do motor chegar até a entrada do radiador. Isso pode ser notado observando que a curva vermelha que representa o sensor na entrada do radiador tende a ler valores de AD baixos que simbolizam o aquecimento nessa região. Ao mesmo tempo, os valores de AD do motor começam a estabilizar simbolizando o processo de esfriamento. Além disso, percebe-se também que a leitura do sensor que passa pela saída do radiador oscila marcando esse estado de transição para manter o motor do veículo frio.

Na Figura 35 é possível observar esses mesmos dados processados pelo filtro de Kalman. Fazendo um comparativo entre os gráficos das Figuras 34 e 35, percebe-se que o desempenho do filtro fez previsões bastante assertivas das próximas amostras eliminando boa parte dos ruídos obtidos. Isso é perceptível devido a semelhança entre os dois gráficos. Com o filtro de Kalman, os valores de AD passam por um procedimento de suavização.

Para implementá-lo, utilizou-se a biblioteca *filterpy*, operando com uma única variável de estado e uma única variável de medição. Inicialmente, foi feita uma estimativa do estado, definida como zero (ou seja, $x = 0$). A partir disso, o filtro começou a fazer previsões sobre o estado do sistema. O filtro implementado possui as fases de previsão e atualização. A matriz de transição de estado foi definida como identidade ($F = 1$), o que implica que o filtro assume que o estado do sistema permanece constante ao longo do tempo, sem dinâmica adicional entre as iterações.

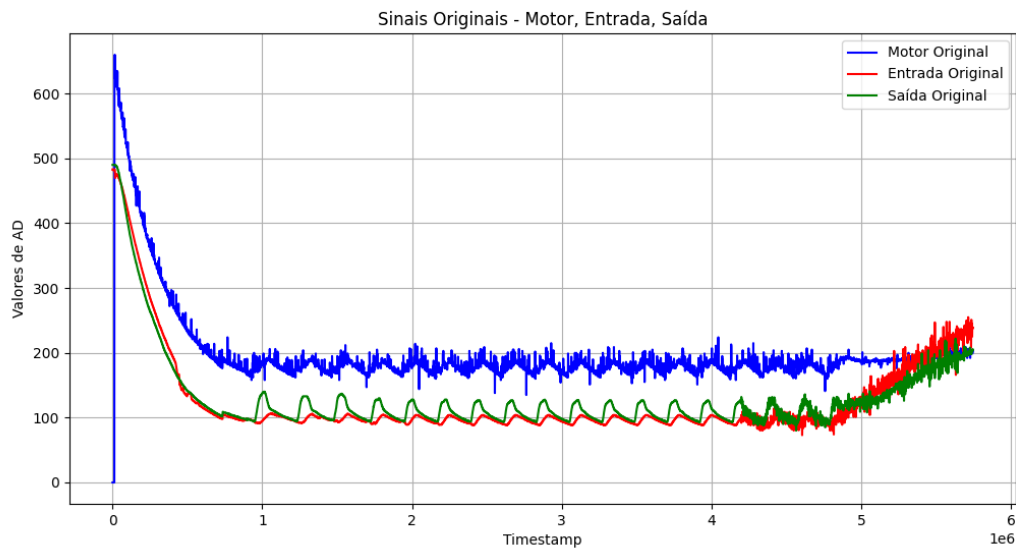
Durante a fase de atualização, o filtro ajusta a estimativa com base na nova medição recebida. A matriz de covariância inicial (P) foi configurada com um valor elevado de 1000, indicando uma grande incerteza sobre a estimativa inicial. O ruído do processo (Q) foi definido com um valor pequeno de 0.1 para refletir a suposição de que o sistema tem um comportamento estável e sem grandes variações além do ruído nas medições. O ruído de medição (R) foi

configurado com o valor de 5, representando a incerteza associada às medições.

Ao longo do processamento, para cada nova medição, o filtro realiza uma previsão seguida de uma atualização, ajustando continuamente a estimativa do estado com base nas medições recebidas. Os resultados da estimativa do estado após cada atualização são armazenados em uma lista, que é retornada ao final da execução. Vale ressaltar que os valores utilizados no filtro de Kalman foram escolhidos com base nas características do sistema e nas suposições sobre o comportamento do processo e das medições.

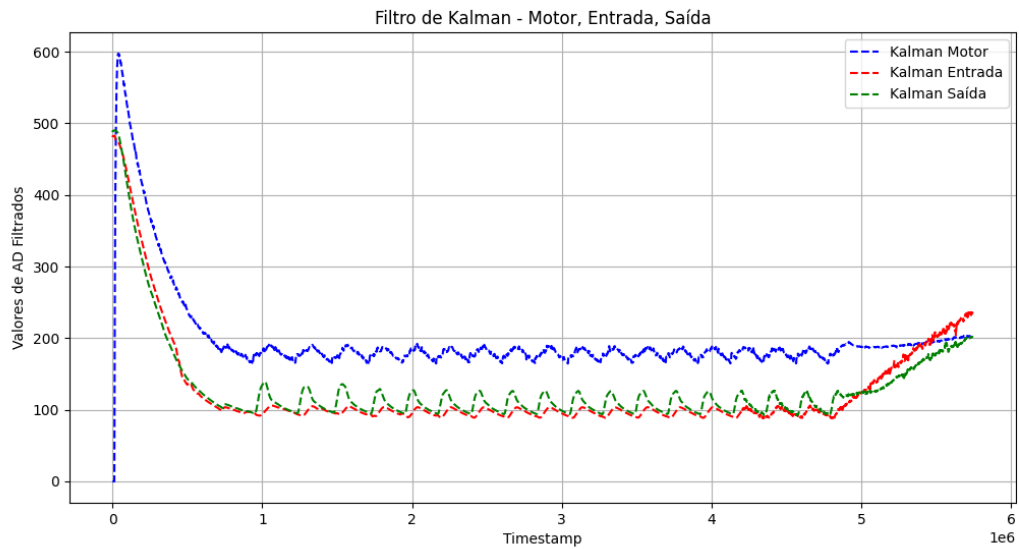
Na Figura 36 mostra o gráfico das amostras normalizadas. Isso ajuda a visualizar os dados sem as discrepâncias nas magnitudes causadas por diferenças entre os circuitos originais.

Figura 34 – Gráfico das amostras originais dos dados coletados.



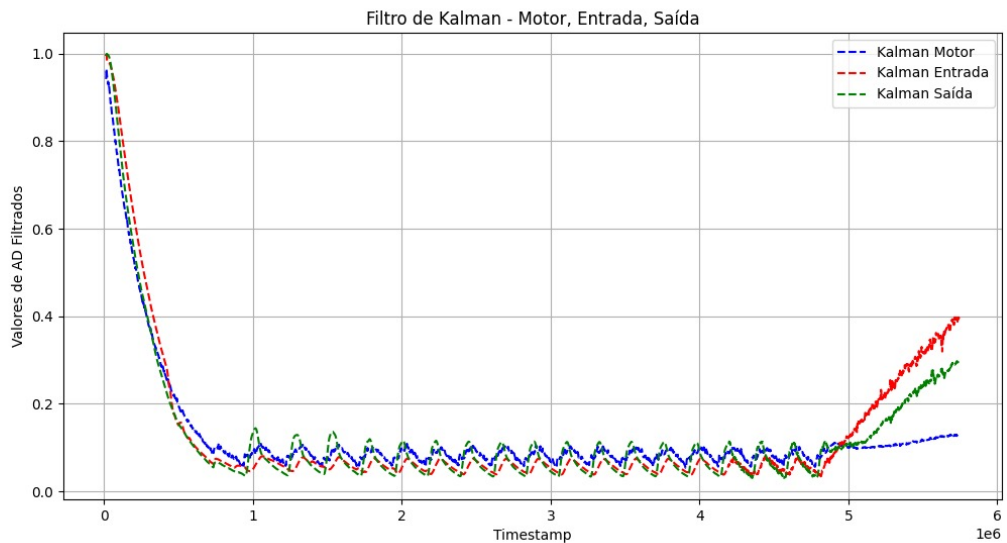
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 35 – Gráfico das amostras com filtro de Kalman dos dados coletados.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 36 – Gráfico das amostras normalizadas.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

5.1.2 Mensagens informadas pelo sistema de análise para cada amostra

Além da geração dos gráficos, o sistema de análise criou um arquivo de texto chamado *status_motor.txt*. Nele, o sistema armazena o estado do motor para cada amostra. Isso é feito para cada linha processada para que se obtenha uma observação mais precisa dos estágios que o sistema de arrefecimento passou durante o seu ciclo de funcionamento. A Figura 37 mostra um trecho com os 30 primeiros estados gerados desse arquivo. O primeiro valor se trata do *timestamp* de cada amostra e a mensagem do lado é o estado do sistema de arrefecimento que foi

definido conforme o Quadro 2.

Figura 37 – Arquivo *status_motor.txt* gerado pelo sistema de análise.

```

uploads > status_motor.txt
1 timestamp;Estado
2 0;Anomalia
3 999;Anomalia
4 1999;Anomalia
5 2999;Anomalia
6 3999;Anomalia
7 5000;Anomalia
8 5999;Anomalia
9 7000;Anomalia
10 7999;Anomalia
11 8999;Anomalia
12 10000;Anomalia
13 10999;Anomalia
14 12000;Anomalia
15 12999;Anomalia
16 13999;Anomalia
17 14999;Normal
18 15998;Normal
19 16997;Equilibrio
20 17997;Equilibrio
21 18998;Equilibrio
22 19997;Equilibrio
23 20998;Equilibrio
24 21998;Equilibrio
25 22998;Equilibrio
26 23998;Equilibrio
27 24998;Equilibrio
28 25998;Equilibrio
29 26998;Equilibrio
30 27999;Equilibrio

```

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

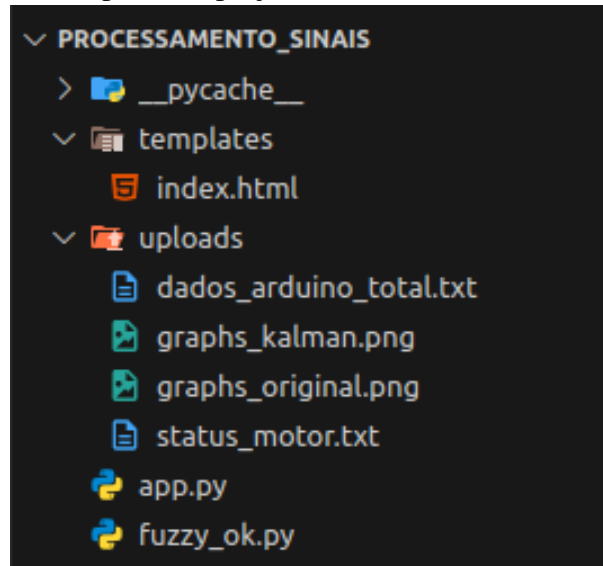
Observando a Figura 37, é possível identificar que as primeiras amostras coletadas detectaram os três tipos de estado definidos na lógica Fuzzy. Analisando a Figura 35, nota-se que os valores de AD do motor começam com 0, o que classifica o sensor do motor como "superaquecido". Conforme ilustrado no Quadro 2, essa leitura configura, de fato, uma situação de anomalia. Nesse contexto, vale ressaltar que essa leitura inicial pode ter sido influenciada por algum ruído gerado pelo sistema de arrefecimento durante a tentativa de capturar as primeiras leituras da coleta de dados, tanto que, posteriormente, o estado do sistema retorna à condições normais e de equilíbrio.

5.2 Funcionamento da interface web

É pela interface web que o arquivo de texto é enviado para o sistema de análise. A interface desenvolvida apresentou resultados estáveis e fez o envio do arquivo sem apresentar instabilidades. Desse modo, a estrutura final da pasta do projeto do sistema de análise ficou

conforme ilustrada na Figura 38. Além dos gráficos e do arquivo **.txt* que possui o modelo retratado na Figura 37, o sistema também salva os arquivos das coletas enviados que nesse caso é nomeado como *dados_arduino_total.txt*. No subdiretório *templates* ficam salvos os arquivos equivalentes ao *frontend* da interface web. É NO *index.html* que contém toda a lógica e estilização mostrado na Figura 30.

Figura 38 – Estrutura final da pasta do projeto.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

O arquivo *app.py* contém a lógica de recebimento do arquivo para processamento, a implementação do filtro de Kalman, bem como a chamada da lógica Fuzzy para o tratamento da classificação dos dados. É esse arquivo que é chamado pela aplicação web do sistema. Por fim, o arquivo *fuzzy_ok.py* contém as regras de pertinência Fuzzy de fato.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi realizada a implementação de um sistema que faz o monitoramento de um sistema de arrefecimento. Para isso, foi necessário realizar várias pesquisas com o objetivo de obter uma melhor familiarização com os termos da área da mecânica automotiva. A princípio, foram definidos os objetivos do projeto, bem como os materiais e métodos a serem utilizados.

Além de detalhar a fundo os componentes de um sistema de arrefecimento de um trator agrícola e compreender o seu ciclo de funcionamento básico, tornou-se necessária também a análise de dispositivos de hardware para fazer a conexão entre o sistema de leitura e o motor do carro durante os testes reais em laboratório. Essa etapa de integração foi de extrema importância para enxergar a interdisciplinaridade entre as áreas de computação e mecanização agrícola.

A lógica do sistema desenvolvido foi dividido em sistema de leitura para a captura dos valores analógicos dos sensores de temperatura, e a segunda consistiu em um sistema de análise de dados que possuía um filtro de Kalman e o raciocínio lógico de Fuzzy para obtenção do estado do motor, bem como a classificação dos sensores. Adicionalmente, também foi feita uma interface web básica utilizando HTML, CSS e JavaScript para permitir o envio de arquivos com os ADs das leituras dos sensores de temperatura.

O sistema de análise gerou dois gráficos, sendo o primeiro com os valores originais e o segundo com os dados filtrados por Kalman. Nesse contexto, o sistema também criou um arquivo de texto com o estado do sistema de arrefecimento para cada amostra de leitura. Dessa maneira, foi possível fazer uma análise minuciosa e observar o comportamento de um sistema de arrefecimento testado em laboratório e avaliar os resultados obtidos. Com isso, pode-se concluir que tanto o filtro de Kalman quanto a análise de Fuzzy obtiveram resultados satisfatórios diante do número de amostras enviadas.

No que diz respeito a trabalhos futuros, propõe-se a realização de mais experimentos com o sistema de análise, além de melhorias na interface web existente. Em relação aos experimentos, seria interessante realizar testes em outros modelos de veículos e analisar com mais detalhes como o sistema de análise se comporta durante todo o ciclo de funcionamento de um sistema de arrefecimento. Adicionalmente, uma outra contribuição seria fazer o sistema de leitura gerar o arquivo dos dados automaticamente sem a necessidade de copiar e colar os dados do monitor serial manualmente para o modelo **txt*. Já na parte da interface web, seria de extrema importância a geração de gráficos em tempo real sendo apresentados na tela, além

do estado do sistema, a classificação dos sensores e mensagens apontando as possíveis falhas mecânicas ou até mesmo a indicação do funcionamento normal do sistema de arrefecimento.

REFERÊNCIAS

- AQUINO, E. L. R. d. **Desenvolvimento de sistema eletrônico para detecção de entrada de poeira em protótipo para simular o sistema de admissão de ar de motores diesel**. 2020. Tese (Mestrado em Agronegócio e Desenvolvimento) – Faculdade de Ciências e Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Tupã, 2020.
- BARBOSA, B. H. G.; OLIVEIRA, S. de; JÚNIOR, E. L. L.; FONTES, G. H. d. O.; VOLPATO, C. E. S. *et al.* Utilização do protocolo mqtt e framework ros na instrumentação de tratores agrícolas. **Congresso Brasileiro de Automática-CBA**, v. 1, 2020.
- BLANQUE, J. E. **El Ventilador**. Madrid: Editorial Editex, S. A., 2007. ISBN 978-84-9771-479-2.
- BRAINLY. **Tarefa sobre lógica Fuzzy**. 2025. Disponível em: <https://brainly.com.br/tarefa/60924751>. Acesso em: 08 mar. 2025.
- BRAVO, V. A. O.; ARIAS, M. A. N.; CARDENAS, J. A. C. Análisis y aplicación del filtro de kalman a una señal con ruido aleatorio. **Scientia et technica**, v. 18, n. 1, p. 267–274, 2013.
- CINTRA, R. S.; VELHO, H. F. de C.; TODLING, R. Redes neurais artificiais na melhoria de desempenho de métodos de assimilação de dados: Filtro de kalman. **Trends in Computational and Applied Mathematics**, v. 11, n. 1, p. 29–39, 2010.
- CORRÊA, D. **Desenvolvimento e validação de um sistema embarcado para monitoramento de operações agrícolas com tratores** 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.
- FILHO, P. H.; AMICI, T. T.; CAMPO, A. B. Modelagem e simulação de sistema de arrefecimento a água com controlador pid para implementação em processos industriais e sistemas embarcados aplicados ao ensino. In: **8º Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica do IFSP**. [S. l.: s. n.], 2017.
- FOLLE, S. M.; FRANZ, C. A. B. **Trator agrícola: características e fundamentos para sua seleção**. Brasília: EMBRAPA-CPAC, 1990.
- GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy. **SBA controle & Automação**, v. 4, n. 3, p. 97–115, 1994.
- GOMIDES, I. M. **Projeto do sistema de arrefecimento para um motor de um protótipo de Fórmula SAE**. 2018. Tese (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2018.
- INCALADO, V. M. **Análise do desempenho de aletas de radiadores automotivos: estudo de caso de aletas retangulares e triangulares**. 2021. Tese (Graduação em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.
- MARRO, A. A.; SOUZA, A. d. C.; CAVALCANTE, E. d. S.; BEZERRA, G. S.; NUNES, R. O. **Lógica fuzzy: conceitos e aplicações**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), v. 2, 2010.

MENESES, M. D.; VALE, W. G. do; ARZE, B. J. C.; CHAVES, M. V. de S.; PACHECO, E. P. P. *et al.* **Desenvolvimento e validação de um sistema embarcado de baixo custo para monitoramento de patinagem em operações agrícolas mecanizadas.** Scientific Electronic Archives, v. 14, 2021.

MIALHE, L. G. **Máquinas motoras na agricultura.** [S. l.]: EPU/EDUSP, 1980.

MTE-THOMSON. **Aula 3 - Radiador.** 2024. Disponível em: <https://cursosonline.mte-thomson.com.br/unit/aula-3-radiador/>. Acesso em: 29 jul. 2024.

MURARO, M. A. Z.; TOALDO, W. C.; NEPOMUCENO, R. Adaptação do sistema de arrefecimento do trator valtra s374: Estudo de caso em propriedade rural. **Biblioteca Digital de TCC-UniAme rica**, v. 2, 2022.

OLIVEIRA, B. A. S.; RIBEIRO, M. R. L.; MORAIS, B. R.; FARIA, I. R. C. de; NOLLI, C. R. Sistema de aquisição de dados em tratores: Desenvolvimento de um protótipo de baixo custo usando a plataforma arduino. **Revista de Engenharia da Universidade Católica de Petrópolis**, v. 17, n. 1, p. 1–19, 2023.

OPPENHEIM A. V.; WILLSKY, A. S. **Sinais e Sistemas.** [S. l.]: Pearson Universidades, 2010. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=ZOg9bwAACAAJ>. Acesso em: 08 mar. 2025. ISBN 978-85-7605-504-4.

QUIM, N. **Desenvolvimento de uma metodologia de simulação aplicada ao sistema de arrefecimento veicular.** 2007. Tese (Doutorado em Mecânica Automotiva) – Faculdade de São Paulo, Universidade de São Paulo", São Paulo, 2007.

RODRIGUES, N. L. **Análise experimental de desempenho térmico de nanofluidos em radiador automotivo.** 2015. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia", Uberlândia, 2015.

SHOP, M. **Como usar com Arduino: Sensor de Temperatura NTC 10K 3950 Prova D'Água do Tipo Sonda.** 2024. Disponível em: <https://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/como-usar-com-arduino-sensor-de-temperatura-ntc-10k-3950-prova-dagua-do-tipo-sonda>. Acesso em: 20 ago. 2024.

SILVA, V. M. L. **Conversor A/D com amostragem não-uniforme e passo de quantização adaptativo.** 2014. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba", João Pessoa, 2014.

TECFIL. **Sistema de Arrefecimento: Entenda Seu Funcionamento no Veículo.** 2024. Disponível em: <https://www.tecfil.com.br/sistema-de-arrefecimento-entenda-seu-funcionamento-no-veiculo/>. Acesso em: 29 jul. 2024.

WENDLING, M. Sensores. **Universidade Estadual Paulista. São Paulo**, v. 2010, p. 20, 2010.