

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS GUARAPUAVA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

JOÃO FELIPE CECÍLIO DOBROWOLSKI

**Monitoramento da Temperatura em Discos de Freio por meio do
Microcontrolador ESP8266**

GUARAPUAVA
2021

JOÃO FELIPE CECÍLIO DOBROWOLSKI

**Monitoramento da Temperatura em Discos de Freio por meio do
Microcontrolador ESP8266**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à
Coordenação de Engenharia Mecânica, como
requisito parcial à obtenção do Título de Bacharel
em Engenharia Mecânica, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. David Lira Nunez

GUARAPUAVA
2021



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Guarapuava
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Coordenação de Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

MONITORAMENTO DA TEMPERATURA EM DISCOS DE FREIO POR MEIO DO MICROCONTROLADOR ESP8266

por

JOÃO FELIPE CECÍLIO DOBROWOLSKI

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 30 de agosto de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados.

Professor Dr. David Lira Nunez
(Professor Orientador)

Professor Dr. Marcelo Henrique Granza
(Membro da banca)

Professor Dr. Sérgio Dalmás
(Membro da banca)
(Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica)

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

DOBROWOLSKI, JOÃO F. C. **Monitoramento da Temperatura em Discos de Freio por meio do Microcontrolador ESP8266**. 2021. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

RESUMO

O sistema de freio de um veículo é essencial para o seu funcionamento e responsável pela sua desaceleração, resultando na transformação de energia cinética em térmica em decorrência do atrito entre a pastilha e o disco de freio. Componentes desajustados ou com defeito deste conjunto podem ocasionar em um pressionamento excêntrico sob o disco, resultando em um aquecimento anormal. Este evento pode ser detectado por um sensor de temperatura atuando no disco e acoplado na roda e ainda ser comparado com o do outro lado que esteja em funcionamento adequado. Para que os dados adquiridos possam ser repassados ao usuário em tempo real, devem ser enviados remotamente devido à rotação do eixo. Os recentes avanços tecnológicos possibilitam a otimização de processos com o auxílio da internet, favorecendo ainda mais o aumento de eficiência para acréscimo de qualidade ou redução de custos. A Internet das Coisas, também conhecida por IoT (do inglês *Internet of Things*), um dos pilares da Indústria 4.0, apresenta fundamental relevância neste incremento, tornando possível a comunicação entre sistemas físicos com o usuário de forma simultânea e para qualquer lugar do mundo que disponha de conexão WiFi. Em virtude do exposto, propôs-se a criação de dois dispositivos portáteis compostos por microcontroladores ESP8266 e sensores infravermelhos capazes de medir a temperatura dos discos de freio do eixo de um veículo e apresentar estes dados ao usuário em tempo real pela internet, possibilitando um monitoramento inteligente, além de permitir a antecipação na tomada de decisões e torná-las mais assertivas. Estudos térmicos por simulação computacional, tanto pelo Método dos Elementos Finitos, como pelo Método dos Volumes Finitos foram efetuados, a fim de contribuir para a fabricação do protótipo e discorrer sobre a comparação física e virtual de fenômenos de transferência de calor, como a influência da convecção natural e forçada no arrefecimento dos discos de freio.

Palavras-chave: Disco de Freio. Internet das Coisas. Microcontrolador. Sensor de Temperatura Infravermelho. Monitoramento Inteligente. Simulação Computacional.

DOBROWOLSKI, JOÃO F. C. **Temperature Monitoring in Brake Discs through ESP8266 Microcontroller.** 2021. 66 f. Completion of coursework to obtain a bachelor's degree in Mechanical Engineering - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

ABSTRACT

A vehicle's brake system is essential for its operation and responsible for its deceleration, resulting in the transformation of kinetic energy into thermal energy due to the friction between the brake pad and the brake disc. Misfit or defective components of this assembly can cause eccentric pressure under the disc, resulting in abnormal heating. This event can be detected by a temperature sensor acting on the disk and coupled to the wheel and further be compared with the one on the other side that is in proper working order. In order for the acquired data to be transferred to the user in real time, they must be sent remotely due to the axis rotation. Recent technological advances make it possible to optimize processes with the help of the internet, further favoring increased efficiency to increase quality or reduce costs. The Internet of Things (IoT), one of the pillars of Industry 4.0, is of fundamental importance in this increment, making it possible to communicate between physical systems with the user simultaneously and to any place in the world that has a WiFi connection. It was proposed to create two portable devices composed of ESP8266 microcontrollers and infrared sensors capable of measuring the temperature of the brake discs of a vehicle's axle and presenting these data to the user in real time over the internet, enabling intelligent monitoring, in addition to allowing for anticipation in decision-making and make them more assertive. Thermal studies by computational simulation, both by the Finite Element Method and by the Finite Volume Method, were carried out in order to contribute to the fabrication of the prototype and discuss the physical and virtual comparison of heat transfer phenomena, such as the influence of natural and forced convection in the cooling of the brake discs.

Keywords: Brake Disc. Internet of Things. Microcontroller. Infrared Temperature Sensor. Intelligent Monitoring. Computacional Simulation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 - Composição do sistema IoT | 10 |
| Figura 1.2 - Pirâmide DIKW | 11 |
| Figura 2.1 - Componentes do freio a disco | 16 |
| Figura 2.2 - Disco de freio sólido | 18 |
| Figura 2.3 - Disco de freio ventilado | 18 |
| Figura 2.4 - Disco de freio perfurado e ranhurado | 19 |
| Figura 2.5 - Coeficiente de atrito e temperatura | 23 |
| Figura 2.6 - Sensor de Temperatura IR MLX90614 | 24 |
| Figura 2.7 - Estrutura de um DSP | 25 |
| Figura 2.8 - Arquitetura interna do microcontrolador ESP8266 | 26 |
| Figura 2.9 - Comparação visual entre os microcontroladores | 28 |
| Figura 2.10 - Comunicação do Protocolo MQTT | 29 |
| Figura 3.1 - Fluxograma da concepção do projeto | 32 |
| Figura 3.2 - Componentes para a aquisição de dados | 33 |
| Figura 3.3 - Espaçamento entre as fendas da calota | 34 |
| Figura 4.1 - Protótipo digital do disco de freio ventilado | 36 |
| Figura 4.2 - Painel “Simulação” do Solid Edge | 37 |
| Figura 4.3 - Zona de fluxo de calor no disco de freio | 37 |
| Figura 4.4 - Painel “ <i>Flow Analysis</i> ” do Solid Edge | 39 |
| Figura 4.5 – Distribuição de temperatura no disco de freio | 40 |
| Figura 4.6 - CFD disco estático | 41 |
| Figura 4.7 - CFD disco dinâmico | 42 |
| Figura 4.8 - Comparação entre disco estático e em movimento no CFD | 43 |
| Figura 4.9 - Deslocamento de ar no interior do disco de freio (CFD) | 44 |
| Figura 4.10 - Circuito instrutivo módulo-sensor | 45 |
| Figura 4.11 - Circuito módulo-sensor | 46 |
| Figura 4.12 - Configuração da IDE do Arduino | 47 |
| Figura 4.13 – Instalação do pacote ESP8266 na IDE do Arduino | 48 |
| Figura 4.14 - Seleção da placa Wemos D1 R2 na IDE do Arduino | 48 |
| Figura 4.15 - Bibliotecas necessárias | 49 |
| Figura 4.16 - Interface do aplicativo Blynk | 50 |
| Figura 4.17 - Compatibilidade das fendas para o sensor atuar | 52 |
| Figura 4.18 - Sistema fixado na roda | 53 |
| Figura 4.19 - Temperatura no teste de frenagem | 55 |
| Figura 4.20 - Diferença térmica com veículo parado e em movimento | 56 |
| Figura 4.21 - Temperatura nos dois discos | 57 |
| Figura 4.22 - Desbalanços térmicos | 58 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1.1 - Os carros com disco nas 4 rodas mais vendidos em 2020 | 14 |
| Tabela 2.1 - Comparativo entre os Hardwares ESP8266 e Arduino | 27 |
| Tabela 3.1 - Custos | 33 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------------|---|
| CAD | Projeto Assistido por Computador (do inglês - <i>Computer-Aided Design</i>) |
| CAE | Engenharia Assistida por Computador (do inglês - <i>Computer-Aided Engineering</i>) |
| CFD | Fluidodinâmica Computacional (do inglês - <i>Computational Fluid Dynamics</i>) |
| CPS | Sistemas Ciberfísicos (do inglês - <i>Cyber-Physical Systems</i>) |
| DIKW | Pirâmide do Conhecimento (do inglês - <i>Data-Information-Knowledge-Wisdom</i>) |
| DSP | Diodo Sensível à Posição |
| GPIO | Entrada/Saída de Uso Geral (do inglês - <i>General Purpose Input/Output</i>) |
| IDE | Ambiente de Desenvolvimento Integrado (do inglês - <i>Integrated Development Environment</i>) |
| IoT | Internet das Coisas (do inglês - <i>Internet of Things</i>) |
| MEF | Método dos Elementos Finitos |
| MQTT | Transporte de Telemetria de Enfileiramento de Mensagens (do inglês - <i>Message Queuing Telemetry Transport</i>) |
| MVF | Método dos Volumes Finitos |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| RTOS | Sistema Operacional de Tempo Real (do inglês - <i>Real Time Operating Systems</i>) |
| SoC | Sistema-em-um-Chip (do inglês - <i>System-on-a-Chip</i>) |
| TCP | Protocolo de Controle de Transmissão (do inglês - <i>Transmission Control Protocol</i>) |
| A | Área |
| F | Força |
| h | Coefficiente de transferência de calor convectivo |
| k | Condutividade térmica |
| K | Kelvin |
| L | Distância |
| m | Metro |
| N | Newton |
| Q | Calor |
| rad | Radiano |
| s | Segundo |
| T | Temperatura |
| W | Watts |
| \dot{Q} | Taxa de transferência de calor |
| q'' | Fluxo de calor |
| μ | Coefficiente de atrito |
| σ | Constante de Stefan-Boltzmann |
| ε | Emissividade |

SUMÁRIO

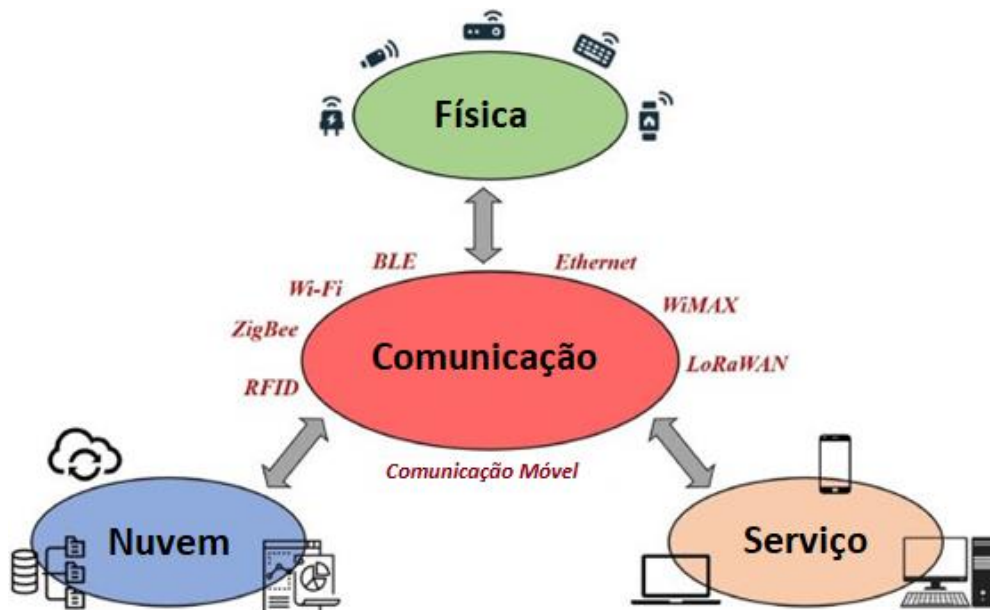
| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | INTRODUÇÃO | 10 |
| 1.1 | JUSTIFICATIVA | 13 |
| 1.2 | OBJETIVOS | 14 |
| 1.2.1 | Objetivo Geral | 14 |
| 1.2.2 | Objetivos Específicos | 15 |
| 2. | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 16 |
| 2.1 | FREIO A DISCO | 16 |
| 2.2 | DISCO DE FREIO | 17 |
| 2.2.1 | Disco Sólido | 17 |
| 2.2.2 | Disco Ventilado | 18 |
| 2.2.3 | Discos Perfurados e Ranhurados | 19 |
| 2.3 | PASTILHA DE FREIO | 19 |
| 2.4 | MODELAGEM DE UM DISCO DE FREIO | 20 |
| 2.5 | CONSIDERAÇÕES E EQUAÇÕES RELEVANTES | 21 |
| 2.6 | SENSOR INFRAVERMELHO | 23 |
| 2.7 | MICROCONTROLADORES | 25 |
| 2.8 | PROTOCOLO MQTT | 28 |
| 3. | ASPECTOS METODOLÓGICOS | 31 |
| 4. | CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO | 36 |
| 4.1 | SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL | 36 |
| 4.2 | AQUISIÇÃO DE DADOS | 45 |
| 4.3 | ACOPLAMENTO DO SISTEMA NO VEÍCULO | 51 |
| 4.4 | TESTES DE VALIDAÇÃO | 53 |
| 4.5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 55 |
| 5. | CONCLUSÃO | 59 |
| | REFERÊNCIAS | 61 |
| | APÊNDICES | 65 |
| | APÊNDICE A - CÓDIGO PROGRAMADO NO MÓDULO ESP8266 WEMOS D1 R2 | 66 |

1. INTRODUÇÃO

A Internet das Coisas, também conhecida por IoT (do inglês *Internet of Things*), pode ser definida como uma rede de objetos que possuem a capacidade de se auto organizar, reagir e agir diante de situações específicas, como mudanças no ambiente, por meio do compartilhamento de informações, dados e recursos (MADAKAM, 2015). Nesse contexto, é concebível a obtenção e transmissão de dados em tempo real por meio de sensores e pelo processamento desse conjunto de informações adquirido para tomar uma decisão após essa análise.

A arquitetura geral de um sistema IoT é composta por quatro camadas, sendo elas: física; nuvem; comunicação e camada de serviço, conforme a Figura 1.1. Essas camadas são integradas por *hardware*, *software*, rede e aspectos de integração (LAWAL et al., 2021).

Figura 1.1 - Composição do sistema IoT

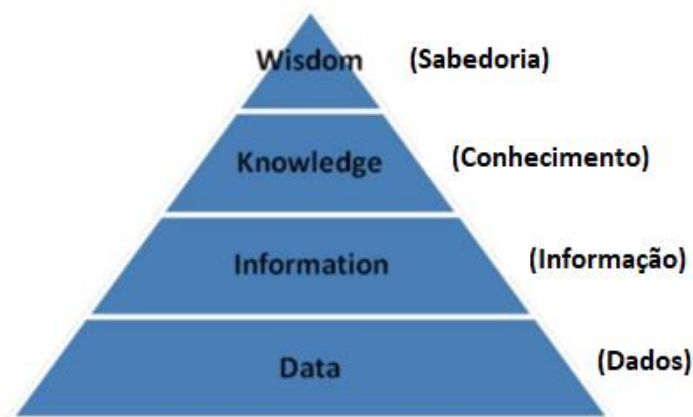


Fonte: Adaptado de LAWAL et al. (2021)

O resultado da evolução tecnológica dos computadores, sensores e das Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) tornou possível a implementação desse sistema, sendo este um dos grandes pilares da indústria 4.0, originado do conceito de Sistemas Ciberfísicos (CPS - do inglês *Cyber-Physical Systems*), que é a sistematização entre computadores, redes de

comunicação e processos físicos que interagem entre si. O terceiro pilar é o conceito de *Big Data*, também oriundo dos CPS, que se refere a uma grande quantidade de dados armazenados a cada instante por meio da internet, provando-se muito útil na geração de informações, que por sua vez, possibilitam a formação de conhecimento (COELHO, 2016). A Figura 1.2 exibe a pirâmide DIKW, salientando que a base para a geração de sabedoria são os dados.

Figura 1.2 - Pirâmide DIKW



Fonte: Adaptado de BERNSTEIN (2009)

A mutabilidade da triagem desses recursos computacionais, controle e tomada de decisões para as extremidades da rede é uma área em ascensão da engenharia, provendo o gerenciamento e a composição de serviços para uma ampla diversidade de aplicações, além de proporcionar o desenvolvimento de projetos inovadores (COUTINHO et al., 2016). Esse gerenciamento pode ser feito por meio de um protocolo de comunicação e transferência de dados.

Além disso, segundo Amorim et al. (2019), o uso de IoT integrado à automação dispõe de vantagens como: conforto, devido ao uso de microcontroladores; praticidade, por poder ser controlado e monitorado à distância; aumento de produtividade, trocando aplicações manuais por autômatas; melhor controle de qualidade, devido à programação e automatização, diminuindo assim o erro grosseiro causado por falhas humanas e melhor custo-benefício, graças ao baixo custo de microcontroladores e microprocessadores.

A incorporação de um sistema IoT no ramo automotivo é um mercado muito promissor - à primeira instância - para situações consideradas não críticas em segurança, como é o caso de processos de controle de qualidade (CARIGNANI et al., 2015).

Em uma aplicação mais específica, a implementação de um sistema IoT, considerando os conceitos de CPS, pode contribuir de forma a auxiliar o controle de temperatura do sistema de freio de um veículo, de maneira que essa esquematização não atuará de forma direta sobre a frenagem, mas sim como um processo de indicação de propriedades térmicas por meio de sensores infravermelhos que realizarão o monitoramento diretamente sobre o disco de freio.

O sistema de freio de um automóvel é responsável pela sua desaceleração, convertendo energia cinética em térmica como resultado da dissipação de energia (LIMPERT, 1999).

Podem existir múltiplos modelos que se adequam a diversas variedades de meio de transporte. Dentre estas diversas opções, existem algumas que se qualificam melhor à veículos de uso pessoal de quatro rodas: os freios a disco e a tambor.

O modelo de freio a disco possui consideráveis vantagens em comparação ao sistema de freio a tambor, como: melhor desempenho em relação à temperatura, diminuindo o *fade*, que é a perda da eficácia dos freios por consequência do superaquecimento do sistema; mais conforto ao usar o pedal de freio; maior eficiência na frenagem em altas velocidades; torque de frenagem mais uniforme e maior capacidade dissipativa de energia em frenagens durante a aplicação do sistema de freio. Estas vantagens estão relacionadas com a exposição ao fluxo de ar, menor acúmulo de sujeira e menor dilatação. Sua desvantagem se deve ao preço, possuindo um valor mais elevado em relação aos freios a tambor. Na América Latina essa diferença de preços se sobressai em virtude do baixo nível de produção de veículos e freios comerciais no continente (ALVES, 2015).

Foi determinado que, para um sistema específico de freio a disco, 93% do calor gerado durante as frenagens iam para o disco, 5% para a pastilha e 2% dissipado para o ambiente (INFANTINI, 2008).

Tendo em vista a proporção de calor que o disco de freio recebe durante frenagens, é preciso ficar atento a situações ocasionais que podem potencializar o aumento da temperatura sobre o mesmo. Flexíveis do freio, que tem a finalidade de permitir a passagem de fluido de freio, podem obstruir ou entupir, o que não permitirá o alívio da pressão hidráulica após desaplicar o pedal, mantendo as pastilhas acionadas. Elementos na pinça de freio com defeito, como pistões presos e pinos deslizantes travados, com folga excessiva ou com desgaste no conjunto podem fazer com que ela também permaneça pressionada contra o disco, desperdiçando energia cinética pela sua conversão em energia térmica, gerando assim um superaquecimento no disco de freio da roda que se situa com algum desses empecilhos (FREMAX, 2017).

Durante a utilização do freio, a maior parte da energia é transferida para a parte dianteiro do veículo, devido ao torque proporcionado por causa da altura do centro de massa (INFANTINI, 2008). Em um procedimento de manutenção incorreto ou incompleto, pode ser possível que a manutenção incorreta em um dos eixos, por exemplo, leve a sua baixa eficiência, o que ocasiona na maior exigência do eixo dianteiro, gerando excesso de temperatura (FREMAX, 2017).

O presente trabalho propõe a criação, dentro do conceito de IoT, de um elemento físico e portátil para um medidor de temperatura infravermelho, que possa ser acoplado à roda de um determinado veículo que possua sistema de freio à disco, para fins de monitoramento térmico em tempo real. Os resultados deste modelo serão comparados com simulações computacionais a fim de se obter maior confiabilidade nos dados.

1.1 JUSTIFICATIVA

A economia brasileira vem sendo repercutida de forma positiva pela influência da indústria 4.0 e, de acordo com o ministro da Indústria, Comércio Exterior e Serviços, é previsto um considerável aumento do seu impacto diretamente sobre o Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil. Levando em consideração que a utilização dessa classe de tecnologia influenciou cerca de 5% do PIB brasileiro em 2018, poderá chegar a até 28% em 2030. Devido à redução de custos com reparos, menor utilização de energia e melhoria da eficiência, a adoção desse método tem potencial de gerar uma economia de 73 bilhões ao ano. São por esses motivos que o governo incentiva essa metodologia industrial, tornando isento o imposto sobre bens tecnológicos necessários para a modernização das empresas (Gonçalves, 2018).

Embora mais caro, a tendência mundial é de produzir veículos cada vez mais seguros para o cliente. Dentre os 50 carros mais vendidos no Brasil em 2020, todos apresentavam freio a disco nas rodas dianteiras e 13 deles em todas as rodas (Tabela 1.1). Como em 2020 foram emplacadas 1.950.889 unidades, o percentual somente dos 50 veículos mais vendidos desse ano que possuem disco nas quatro rodas é de 19% em relação ao total emplacado (SHAUN, 2021).

Tabela 1.1 - Os carros com disco nas 4 rodas mais vendidos em 2020

| Classificação | Modelo do Veículo | Nº de vendas (unidades) | Relação ao Total (%) | Freios Dianteiros | Freios Traseiros |
|---------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------|------------------|
| 8 | VW T-Cross | 60.119 | 3,082 | Disco Ventilado | Disco Sólido |
| 9 | Jeep Renegade | 56.865 | 2,915 | Disco Ventilado | Disco Sólido |
| 11 | Jeep Compass | 52.966 | 2,715 | Disco Ventilado | Disco Sólido |
| 17 | Toyota Corolla | 41.072 | 2,105 | Disco Ventilado | Disco Sólido |
| 19 | Honda HR-V | 32.511 | 1,666 | Disco Ventilado | Disco Sólido |
| 21 | VW Saveiro | 30.965 | 1,587 | Disco Ventilado | Disco Sólido |
| 31 | Honda Civic | 20.447 | 1,048 | Disco Ventilado | Disco Sólido |
| 36 | VW Nivus | 16.278 | 0,834 | Disco Ventilado | Disco Sólido |
| 40 | Renault Logan | 13.785 | 0,707 | Disco Ventilado | Disco Sólido |
| 46 | Citroën C4 Cactus (THP) | 9.526 | 0,488 | Disco Ventilado | Disco Sólido |
| 49 | Chevrolet Cruze Sedan | 8.802 | 0,451 | Disco Ventilado | Disco Sólido |
| 50 | Caoa Chery Tiggo 5X | 8.768 | 0,449 | Disco Ventilado | Disco Sólido |

Fonte: Adaptado de SHAUN (2021)

Considerando que a IoT está em ampla evolução e que o mercado de sistemas de freio a disco situa-se em ascensão, a integração desses temas em um projeto para fins de controle de qualidade e eficiência na sua manutenção fornece redução de custo e incremento na segurança do usuário.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é, conforme os conceitos da IoT, desenvolver um dispositivo portátil, com o auxílio de simulações computacionais, capaz de analisar em tempo real a diferença térmica entre discos de freio de veículos por meio de um sensor de temperatura infravermelho, com o propósito de coletar e monitorar dados para análise de possíveis falhas técnicas. A validação do protótipo será por meio da comparação de diferentes cenários entre o modelo físico e virtual.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar a estrutura e as necessidades especiais que um sistema IoT apresenta;
- Desenvolver estudos computacionais para o auxílio da produção e validação do protótipo, além de elucidar as aplicabilidades de diferentes métodos;
- Apresentar a atuação de microcontroladores interconectados entre si de forma mútua através da internet e sua comunicação com o usuário;
- Discorrer do funcionamento e desempenho de um sensor de temperatura infravermelho;
- Analisar a comparação entre simulações computacionais de transferência de calor em estado transiente com dados obtidos pelo protótipo em diferentes cenários.

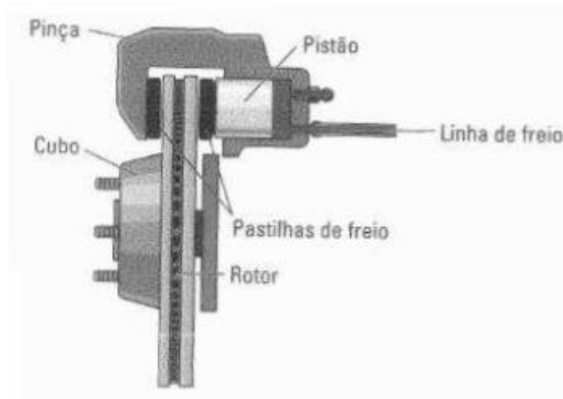
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FREIO A DISCO

O funcionamento básico de um freio a disco pode ser interpretado pelo pressionamento do material de fricção contra as duas faces do disco (SHIGLEY, 2005), que na maioria dos casos é feito por um par de pastilhas de freio em um movimento axial.

O sistema principal é constituído pela pinça de freio, disco, pastilha e fluido hidráulico, como a Figura 2.1 apresenta (LIVRAMENTO, 2017).

Figura 2.1 - Componentes do freio a disco



Fonte: Sclar (2015)

A temperatura de operação do freio a disco possui vantagem em relação ao freio a tambor. Uma dessas vantagens é que, mesmo com a dilatação, não há folga entre o disco e a pastilha, não ocasionando aumento no curso do pedal do freio (LIVRAMENTO, 2017). Sem perder as propriedades mecânicas de forma permanente, este tipo de freio pode chegar a temperaturas de operação em torno de 800°C , mas seu desempenho é afetado muito antes de alcançar este valor (LIMPERT, 1999).

2.2 DISCO DE FREIO

O disco de freio pode variar sua forma e composição para atender às diversas necessidades dos veículos, proporcionando diferentes desempenhos para determinadas necessidades.

Existem 4 principais características que definem o formato do disco do freio, podendo ser sólido, ventilado, perfurado, ranhurado ou qualquer combinação entre eles (LIVRAMENTO, 2017).

A necessidade do projeto de um disco de freio ser exigente e requintado é pelo fato deste componente girar. Massas desbalanceadas tendem a produzir forças que induzem vibrações indesejadas. O preço elevado tem relação ao demorado controle de qualidade deste produto (RAO, 2008).

O material mais comumente utilizado na fabricação dos discos de freio é o ferro fundido cinzento, por ser confiável, possuir um preço relativamente baixo e fácil produção em massa, além de possuir uma propriedade em que seu calor específico diminui conforme a temperatura aumenta, expandindo sua capacidade de absorver energia térmica (GUESSER, 2019).

2.2.1 Disco Sólido

Segundo Livramento (2017), os discos de freio sólidos são os que possuem uma distribuição mais uniforme de massa dentre os modelos mencionados, como expõe a Figura 2.2. Isso ocorre pois é o que possui um modelo mais simplificado, por ser inteiriço e maciço. O benefício é que apresentará menos vibrações, contudo terá uma menor dissipação de calor com o ambiente, pois dispõe de uma menor área de contato com o ar. Geralmente é utilizado em automóveis de menor valor agregado por ser mais barato que os outros discos e por não haver a necessidade de uma grande fonte dissipadora de calor nesses tipos de veículos, pois não chegam a zonas tão altas de velocidade e são mais leves, não obtendo tanta energia cinética que se converterá em térmica durante a frenagem. Geralmente esses tipos de discos são mais usados nos eixos dianteiros de veículos compactos 1.0 e no eixo traseiro de carros um pouco maiores, como sedãs e SUVs (RODRIGUEZ, 2017).

Figura 2.2 - Disco de freio sólido



Fonte: RODRIGUEZ (2017)

2.2.2 Disco Ventilado

Os discos de freio ventilados, exibidos na Figura 2.3, são formados por dois discos um pouco mais finos e unidos por uma câmara interna portadora de aletas, que proporcionam refrigeração devido à ventilação interna e, de acordo com Heisler (2002), tal resfriamento é incrementado graças às forças centrífugas proporcionadas pela rotação do disco. São comumente utilizados nos eixos dianteiros de automóveis populares e de compactos mais potentes, assim percebido na Tabela 1.1.

Figura 2.3 - Disco de freio ventilado



Fonte: RODRIGUEZ (2017)

2.2.3 Discos Perfurados e Ranhurados

Os discos de freio perfurados e/ou ranhurados podem ser visualizados na Figura 2.4. Permitem uma maior área de contato com o ar comparados aos modelos anteriores e também possibilitam a limpeza da superfície do par de atrito. Estes discos, por serem mais bem confeccionados e possuírem uma geometria mais complexa, são ainda mais difíceis de obter o balanço de massa de forma correta. São utilizados em veículos de alta performance (LIVRAMENTO, 2017).

Figura 2.4 - Disco de freio perfurado e ranhurado



Fonte: BREMBO (2021)

2.3 PASTILHA DE FREIO

A pastilha de freio é composta fundamentalmente pela plaqueta, que tem a função de distribuir uniformemente a força que o pistão exerce sobre a superfície do material de atrito contra o disco, e o próprio material de atrito, que influencia relevantemente na eficiência em frenagens. Esse elemento de atrito pode ser composto de aglomerantes, materiais estruturais e modificadores de atrito (KRUMMEL, 2014).

O elemento atritante deve atender a requisitos de propriedades mecânicas a fim de garantir determinada resistência térmica, à fadiga mecânica, à compressão e capacidade de cisalhamento e isolamento térmico, para transmitir o mínimo possível de energia térmica para a placa metálica de fixação. Ainda, segundo Livramento (2017), estas exigências despertam interesse, pois o material de atrito da pastilha é o elemento principal no desgaste do rotor (disco).

2.4 MODELAGEM DE UM DISCO DE FREIO

É de fundamental importância que um engenheiro mecânico possua a habilidade e competência para criar e utilizar modelos para a concepção e análise de produtos e processos, além de dominar técnicas computacionais (UFSM, 2021).

De acordo com Lee (2005), é crucial integrar as plataformas de Projeto Assistido por Computador (CAD - do inglês *Computer Aided Design*) e Engenharia Assistida por Computador (CAE - do inglês *Computer Aided Engineering*) de forma estreita para melhorar o processo de desenvolvimento e entendimento de projetos.

Para efetuar o estudo na plataforma CAE, é necessário escolher um método de discretização apropriado, que aproxime as equações diferenciais por um sistema de equações algébricas para as variáveis do problema, cujos valores serão obtidos em localizações discretas no espaço e tempo (GONÇALVES et al., 2007).

Com uma análise CAE por Método dos Elementos Finitos (MEF), é possível discretizar um meio contínuo em elementos que contém as propriedades originais. Esse método foi desenvolvido por Gauss no final do século XVIII, porém o desenvolvimento prático iniciou-se apenas na metade do século XX com os avanços computacionais, devido às dificuldades e limitações no processamento das equações algébricas. Além de ser capaz de realizar uma análise estrutural, também é possível o desenvolvimento de um estudo de transferência de calor, que será o foco neste trabalho (LOTTI et al., 2006).

Um estudo por Fluidodinâmica Computacional, também conhecido por CFD (do inglês *Computational Fluid Dynamics*), é uma simulação numérica para escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos relacionados. Este estudo é uma evolução do MEF e é realizado através do Método dos Volumes Finitos (MVF). Este método utiliza como ponto de partida a forma integral da equação da conservação. O domínio de solução é dividido em um número finito de volumes de controle contíguos, e a equação da conservação é aplicada a cada um desses volumes de controle. Este método é utilizado em diversas aplicações industriais por conseguir reproduzir os resultados esperados de testes empírico físicos, fornecendo os campos de fluxo de fluidos de velocidade, pressão, temperatura, entre outros (ALIZADEHDAKHEL et al., 2010).

Segundo Santoro (2021), o *software* Solid Edge da Siemens é ideal para projetos e simulações computacionais, possuindo um portfólio de ferramentas acessíveis a fins acadêmicos, fáceis de usar e que trata de todos os aspectos do processo de desenvolvimento de produtos, utilizando a tecnologia de forma síncrona para combinar a velocidade e simplicidade da modelagem direta com o controle do projeto.

2.5 CONSIDERAÇÕES E EQUAÇÕES RELEVANTES

Em um sistema de frenagem, o coeficiente de atrito depende principalmente da velocidade de escorregamento, pressão de contato e da temperatura, sendo a última consequência dos parâmetros anteriores, não podendo ser controlada diretamente (PINTO et al., 2020).

A força de atrito deve-se principalmente a pequenas rugosidades nas superfícies de contato de dois corpos. Essas superfícies podem estar em movimento entre si ou não, categorizando a força de atrito como cinética ou estática. A força de atrito estático pode variar de zero até um valor máximo, podendo ser calculada através do produto do coeficiente de atrito pela força normal (COSTA, 2010).

$$F_{eMAX} = \mu_e \cdot N \quad (1)$$

$$F_c = \mu_e \cdot N \quad (2)$$

O coeficiente de atrito é adimensional e depende das propriedades dos materiais que estão com suas superfícies em contato. De acordo com Pinto et al. (2020), pode ocorrer uma redução nesse coeficiente quando um sistema fica submetido a temperaturas mais elevadas.

Sempre que existir diferenças de temperatura em um meio, obrigatoriamente haverá transferência de calor, seja ela por condução, convecção ou radiação. Um engenheiro necessita entender os mecanismos físicos que fundamentam esses três modos de energia térmica em trânsito, assim como ser capaz de manipular as equações das taxas de quantidade de energia sendo transferida sobre o tempo (INCROPERA et al., 2008).

A troca de calor por radiação é emitida por todas as formas de matéria e seu transporte não necessita de nenhum meio físico. Em gases e sólidos semi-transparentes, a emissão é um fenômeno volumétrico. Na maioria dos líquidos e sólidos é um fenômeno de superfície. Pode ser vista como a propagação de ondas eletromagnéticas. A energia que um corpo emite por radiação é dada pela lei de Stefan-Boltzmann e é o produto entre a constante de Stefan-

Boltzmann, a emissividade da superfície emissora, sua área e a sua temperatura absoluta elevada à quarta potência (INCROPERA et al., 2008).

$$Q = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot T_s^4 \quad (3)$$

Na convecção de calor, quando um fluido é aquecido, suas porções mais quentes sofrem dilatação térmica, expandindo-se e diminuindo sua densidade. Como a porção mais quente possui menor densidade, ela tende a subir em relação às porções mais frias. Para qualquer situação em que seja necessário o cálculo de um escoamento, pode-se fazer um passo a passo para facilitar os cálculos. Para a realização desse cálculo, primeiro é necessário identificar qual tipo de geometria está havendo o escoamento. Em seguida, determinar as propriedades do fluido na temperatura em que se encontra. Após isto, leva-se em conta as propriedades do fluido para a transferência de massa e se tratará apenas como mistura binária diluída. Só então seria calculado o número de Reynolds, e assim determinaria se o escoamento é laminar ou turbulento. Ainda seria necessário decidir entre um coeficiente local ou médio na superfície, ou seja, num ponto específico ou em toda ela. Após todas essas etapas é que se selecionaria uma correlação apropriada. Quando a velocidade do fluido tende a zero, a transferência é dada pelo produto do coeficiente da transferência de calor convectivo pela área e diferença de temperatura (INCROPERA et al., 2008).

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (4)$$

Ainda de acordo com Incropera et al. (2008), a condução de calor ocorre no nível molecular. As partículas mais energéticas transferem parte de sua energia por contato com outras partículas menos energéticas. O fluxo térmico pode ser expresso pela Lei de Fourier, em que é igual ao produto da condutividade térmica de alguns materiais pela diferença de temperatura deles sobre a distância da espessura do objeto.

$$q_x'' = k \cdot \Delta T / L \quad (5)$$

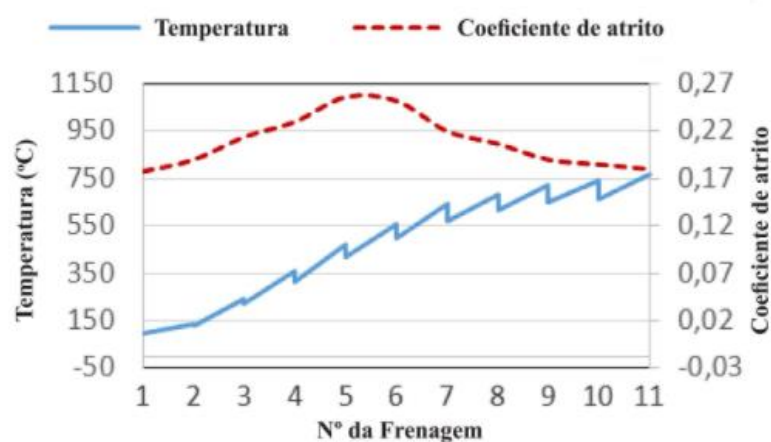
Quanto maior o coeficiente de atrito, mais efetiva será a frenagem. Para a temperatura, quanto menor for seu valor, mais preferível, em razão da diminuição de perdas de eficiência devido a efeitos térmicos, como por exemplo o *fade* (PINTO et al., 2017).

Segundo Pinto et al. (2020), o *fade* é mais comum para temperaturas acima de 300°C, mas tudo depende de qual material está sendo utilizado. Materiais orgânicos apresentam menor custo, porém são mais sensíveis ao fenômeno. Materiais semi-metálicos são mais caros, apresentam baixo coeficiente de atrito a frio e são mais resistentes ao efeito.

A Figura 2.5 a seguir representa o gráfico de temperatura e coeficiente de atrito em relação às frenagens realizadas em um ensaio. É possível observar que a partir da quinta

frenagem o coeficiente de atrito começou a diminuir, em razão do aumento de temperatura, caracterizando o efeito *fade*.

Figura 2.5 - Coeficiente de atrito e temperatura



Fonte: PINTO et al. (2020)

Tendo em vista que o sensor de temperatura infravermelha utilizado possui faixa de medição máxima em torno de 380°C, uma análise abrangente e completa de efeito *fade* para diversos tipos de sistemas de freio acaba se tornando ineficaz pela limitação térmica que este estudo de caso possui.

2.6 SENSOR INFRAVERMELHO

Os sensores constituem toda a base da automação industrial, doméstica ou comercial. São capazes de aumentar a eficiência dos meios produtivos por possibilitarem o controle e monitoramento de processos automatizados e informar ao seu controlador as grandezas físicas medidas, a fim de que sejam tomadas as providências necessárias para a tomada de decisões com um nível de segurança adequado (SILVA, 2011).

O sensor de temperatura utilizado não poderá estar em contato físico com o disco do freio, devido ao fato de ambos estarem em rotação e a pastilha de freio não os acompanhar. Conseqüentemente se torna explícita a exigência de um sensor capaz de examinar de forma óptica a radiação infravermelha que está sendo emitida pelo rotor. Uma vantagem desse tipo de sensor é que a medição de temperatura não recebe a influência térmica do dispositivo de

medição, pois a luz infravermelha é convertida em um sinal elétrico por meio de um transdutor optoeletrônico (RIPKA et al., 2007).

O módulo eletrônico utilizado neste estudo de caso para o sensoriamento de temperatura sem contato é o sensor de temperatura infravermelho IR MLX90614, exibido na Figura 2.6. Este modelo consegue medir temperaturas na faixa de -70°C até 380°C . Também dispõe de um medidor interno para temperaturas de operação de -40°C até 125°C . Possui uma precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ para temperaturas próximas à ambiente com uma resolução de $0,02^{\circ}\text{C}$ e tempo de resposta de 150 milissegundos (USINAINFO, 2021).

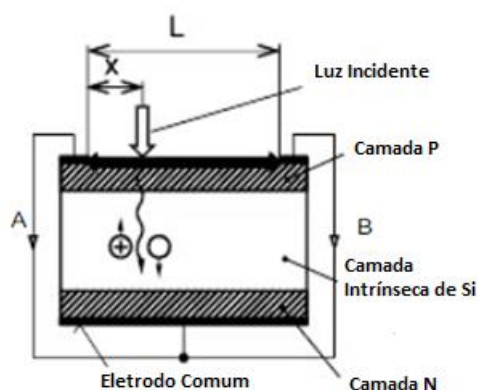
Figura 2.6 - Sensor de Temperatura IR MLX90614



Fonte: Autoria própria

A medição é feita através de um Diodo Sensível à Posição (DSP), mostrado na Figura 2.7, que é composto por uma camada de alta resistência e duas camadas externas de silício: a inferior “N” e a superior “P”. As correntes “A” e “B” são proporcionais à condutância da distância “x” de incidência. Dessa maneira, a corrente é diretamente proporcional à posição da área ativa do detector do feixe de luz e o sinal luminoso é convertido em um sinal elétrico, que conseguirá ser processado por um circuito eletrônico (SOUZA, 2011).

Figura 2.7 - Estrutura de um DSP



Fonte: Adaptado de RIPKA et al. (2007)

2.7 MICROCONTROLADORES

O início da produção da linha de microprocessadores de baixo custo começou por volta de 1970 pela Intel, aumentando assim a automação em geral, por ocupar tarefas que antes eram feitas de forma manual. O componente desses circuitos integrados que mais teve destaque foi o Sistema-em-um-Chip, também conhecido por SoC (do inglês *System-on-a-Chip*), agregando a si cada vez mais funcionalidades. Esse constituinte passou a ser chamado de microcontrolador, por seu frequente uso na função de controle e automação, que da indústria, passou a se propagar nas diversas áreas da atividade humana (OLIVEIRA, 2017).

Os microcontroladores que mais se destacaram nas décadas de 70 e 80 foram os 8085 e Z80. Nos anos 90 foi a vez do Microchip PIC entrar em evidência e seu sucesso continuou até o início do século XXI. Em 2005 entrou no mercado a plataforma de desenvolvimento de sistemas embarcados de baixo custo aberta e livre, o Arduino, tendo como seu maior legado o ambiente de desenvolvimento, com diversas bibliotecas de desenvolvimento com linguagem C++ e diversos tipos de módulos de sensores, atuadores e comunicação, possuindo um sistema de desenvolvimento considerado acessível. Não está vinculado a nenhum fabricante em específico, contudo a maioria dos seus módulos utilizam microcontroladores da Atmel (OLIVEIRA, 2017).

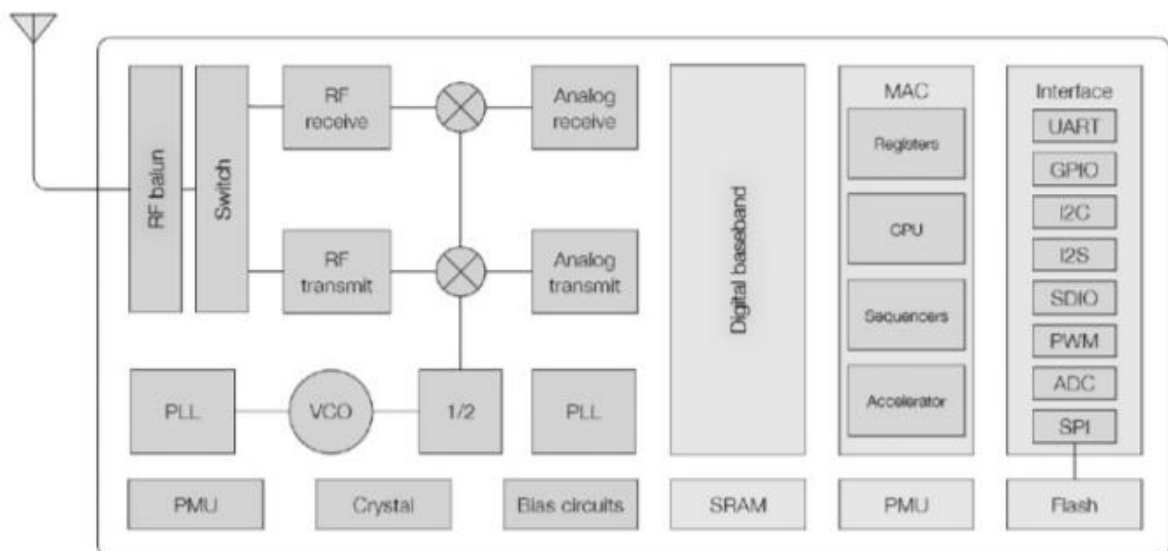
Ainda segundo Oliveira (2017), as aplicações dos microcontroladores no início se resumiam em interfaces de entrada e saída (I/O) e com o passar do tempo foi integrando-se com memória RAM; memória EPROM para programas, dados e circuito de oscilador (*clock*);

interfaces de comunicação, como a USB, e o mais recente são as interfaces de redes, como WiFi, Bluetooth e Ethernet. Apesar de possuir todas essas funcionalidades, são classificados como de baixíssimo consumo de energia, podendo manter-se em funcionamento por muito tempo antes de ser necessário a substituição de carga. Essa inclusão permitiu aos microcontroladores atenderem a um número de aplicações sem precedentes.

A fabricante chinesa Espressif Systems projetou o SoC ESP8266, que integra todas as funcionalidades de um Arduino ou PIC, com a vantagem de possuir um módulo WiFi em um mesmo circuito e também ser capaz de executar aplicações de maneira independente (SILVA et al., 2017).

O ESP8266 possui 17 interfaces de Entradas/Saídas de Uso Geral, também conhecidas por GPIO (do inglês *General Purpose Input/Output*) e é integrado com um processador Tensilica de 32 bits, velocidade de *clock* de 80 MHz e velocidade máxima de *clock* de 160 MHz, interfaces periféricas digitais padrão, interruptores de antena, RF balun, amplificador de potência, amplificador de recepção de baixo ruído, filtros e módulos de gerenciamento de energia, sendo eles o ativo, hibernação e hibernação profunda, permitindo que projetos alimentados à bateria durem mais (ESPRESSIF, 2021). A Figura 2.8 apresenta o diagrama funcional desse microcontrolador, juntamente com o conjunto completo de seus componentes.

Figura 2.8 - Arquitetura interna do microcontrolador ESP8266



Fonte: OLIVEIRA (2017)

A Tabela 2.1 faz uma comparação entre os microcontroladores da Atmel, que utilizam a plataforma Arduino e do microcontrolador ESP8266.

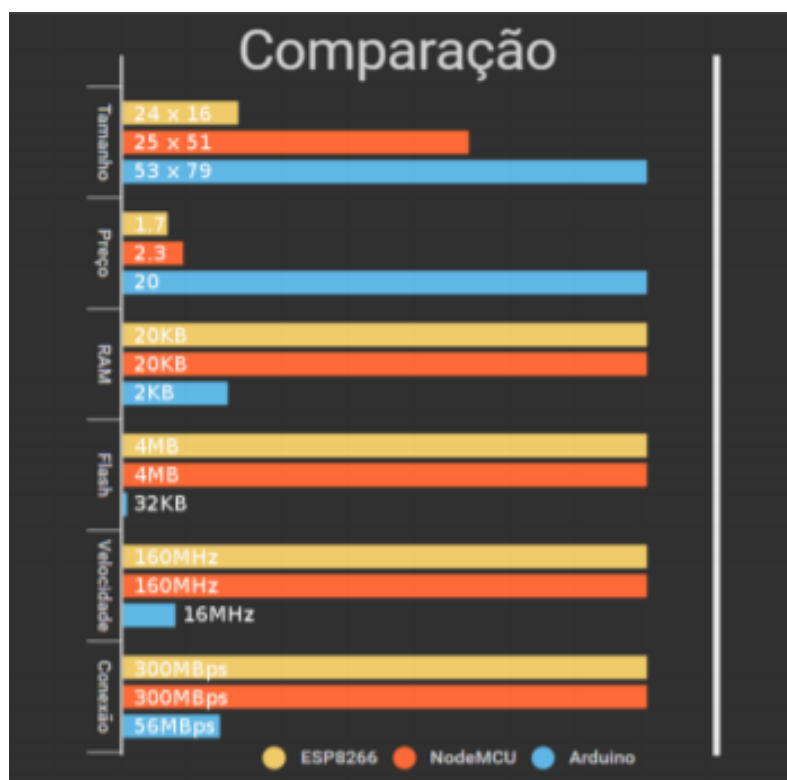
Tabela 2.1 - Comparativo entre os Hardwares ESP8266 e Arduino

| | ESP8266 | Arduino |
|-------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| GPIOs | 17 (Menos geralmente estão expostas) | 14 (20 incluindo analógicas) |
| Canais PWM | 8 | 6 |
| Velocidade do Clock | 80 MHz | 16 MHz |
| Processador | Tensilica | Atmel |
| SRAM | 45 kBytes | 2 kBytes |
| Flash | 512 kB ou mais | 32 kB (no chip) |
| Tensão | 3.3 V | 5 V |
| Corrente Máxima por I/O | 12 mA | 40 mA |
| UART | 1 1/2 | 1 |
| Networking | Incluso | Separado |
| Maturidade | Recente | Maduro |

Fonte: Adaptado de R. R. OLIVEIRA (2017)

A Figura 2.9 a seguir apresenta uma comparação entre essas duas plataformas, com o adicional do NodeMCU, que é um tipo de ESP8266 mais completo.

Figura 2.9 - Comparação visual entre os microcontroladores



Fonte: R. R. OLIVEIRA (2017)

Para a realização do estudo de caso, torna-se evidente a escolha do *Hardware* ESP8266 para a consumação do que é proposto. Além disso, seu preço - cerca de 3 dólares em sites chineses - torna possível aplicações de baixo custo, como é esperado de IoT. Possui três ambientes de desenvolvimento: em linguagem Lua; Arduino (incluindo as bibliotecas e interfaces) e Sistema Operacional de Tempo Real (RTOS - do inglês *Real Time Operating Systems*) para aplicações profissionais utilizando todo o seu potencial. Além dessas vantagens, todos os módulos periféricos da Arduino são compatíveis com esse microcontrolador, propiciando o desenvolvimento de forma rápida e barata àqueles que queiram se envolver com os procedimentos da indústria 4.0 (OLIVEIRA, 2017).

2.8 PROTOCOLO MQTT

Há diversos protocolos de comunicação que auxiliam na transferência de dados em uma rede que conecta vários dispositivos. Esse amparo é feito por meio de um gerenciamento

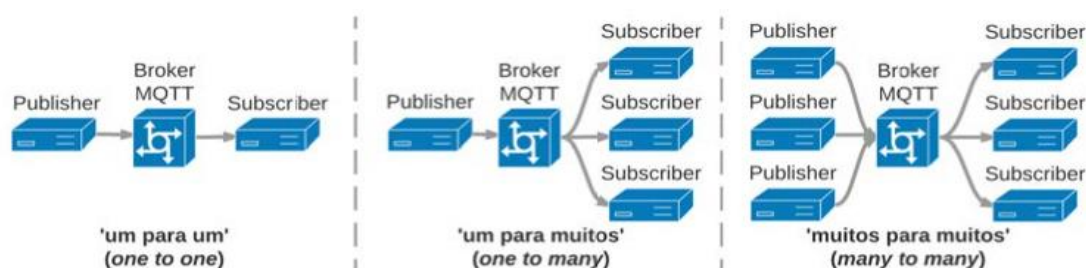
de interconexões de forma inteligente e eficiente, dando importância para as características impostas pelo ambiente, assim como suas limitações (MARTINS et al., 2015).

A IoT está em constante evolução, conseqüentemente ainda não há um único protocolo para essa estabilidade no mercado. Diante a diversos outros qualificados a gerenciar este tipo de aplicação, o protocolo MQTT (do inglês *Message Queuing Telemetry Transport*) ganha destaque por ter sido utilizado em diversas empresas que fizeram o uso da IoT ou somente como um protocolo de comunicação, como Facebook e Amazon, tornando-se relevante à nível mundial (TORRES et al., 2016).

O MQTT foi criado em 1999 pela IBM e Eurotech, sendo ideal para conectar dispositivos remotos com uma pequena área de cobertura de código e banda de rede com largura mínima, se responsabilizando também com alta latência e instabilidade na comunicação. Além de ser leve e eficiente, possui comunicação bidirecional, permitindo o envio de mensagens do dispositivo para a nuvem e nuvem para dispositivo, também podendo ser dimensionado para se conectar a milhões de dispositivos IoT. Na questão de segurança é bastante confiável, possuindo modernos autenticadores de clientes e suporte para redes não confiáveis (MQTT, 2021).

Este protocolo faz uso de TCP (do inglês *Transmission Control Protocol*) para fornecer conectividade e adota o padrão de mensagens *publisher/subscriber* (publicador/assinante), mediado através de um *broker* (intermediário), que é o servidor responsável pela comunicação de um-para-um, um-para-muitos e muitos-para-muitos, como pode ser observado na Figura 2.10. O cliente pode ser qualquer coisa que possa interagir com o *broker* e receber mensagens, podendo ser um sensor ou aplicativo (TORRES et al., 2016).

Figura 2.10 - Comunicação do Protocolo MQTT



Fonte: TORRES et al. (2016)

De acordo com Serrano (2018), o surgimento de dispositivos que se conectam à internet ampliou as possibilidades de projetos e, de forma paralela, a sua necessidade aumentou a demanda por dispositivos que possuam conectividade. Dessa maneira, faz-se útil serviços que

possam facilitar a comunicação dos dados com o usuário. Há aplicativos, como o Blynk por exemplo, que permitem o controle de módulos que se conectam à rede WiFi e o reportamento de dados do *hardware* para o aplicativo, além de também possuírem servidores com a função do *Broker*, facilitando ainda mais a comunicação *publisher/subscriber*.

3. ASPECTOS METODOLÓGICOS

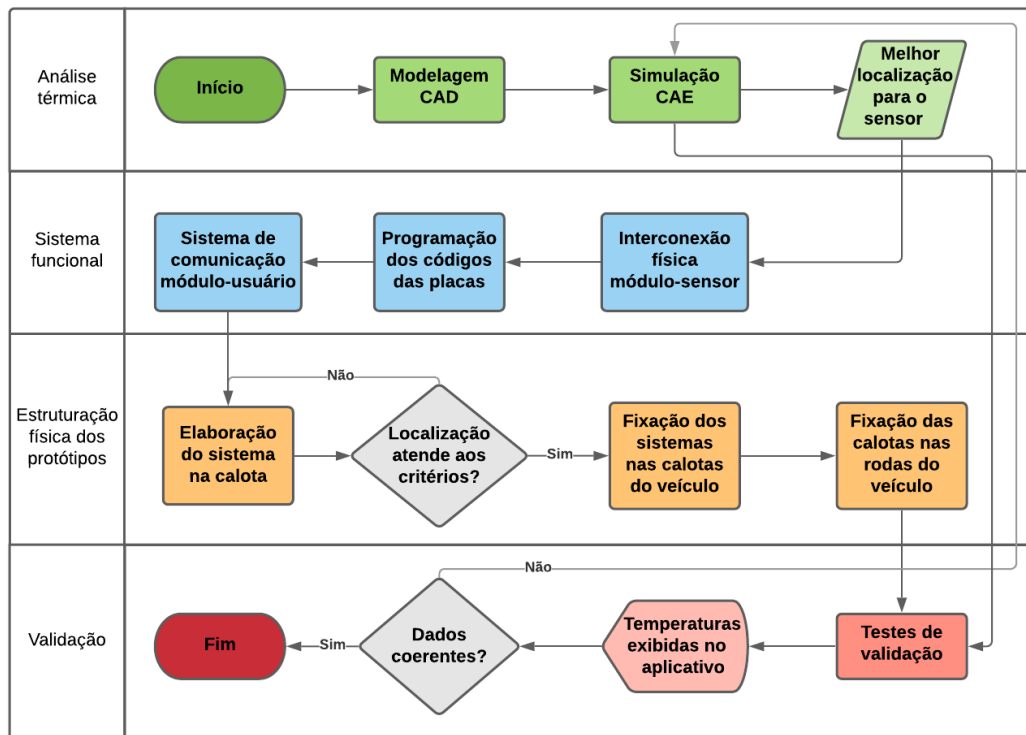
O presente trabalho constitui-se de um estudo de caso no qual será realizada a confecção de um protótipo portátil que poderá ser acoplado nas rodas dos veículos para que o sensor infravermelho consiga medir a temperatura dos discos de freio. Serão produzidos dois modelos para o acoplamento, tornando-se necessário o uso de dois sensores e microcontroladores.

A localização mais adequada da captação de dados do sensor deverá ser na área em que ocorre a maior temperatura do disco de freio. Para a aquisição desta informação, serão feitos estudos nas plataformas CAD e CAE.

O motivo para a fabricação de mais de um exemplar físico é a possibilidade de captar um desbalanceamento térmico entre os discos de freio. Levando em consideração que a resolução do sensor é de 0,02 °C e que a precisão é de 0,5 °C, a probabilidade de haver desequilíbrio térmico mínimo observável é alta. Dessa maneira, poderá ser constatado: a integração entre microcontroladores pelo uso de internet (via WiFi), apresentando maior abrangência nos estudos de IoT; a relação mútua e interdependente dos microcontroladores e sensores, com uma coleta de dados de rápida assimilação da informação obtida, demonstrando um paradigma dos CPS.

Para ser possível realizar a coleta de dados, é necessário dividir a elaboração do trabalho em quatro etapas para o seu desenvolvimento de forma satisfatória, sendo elas: modelagem da geometria do disco via CAD/CAE para análise térmica do disco de freio; elaboração do sistema de funcionamento dos sensores e microcontroladores; desenvolvimento da estrutura dos protótipos e testes para a validação. A Figura 3.1 apresenta o fluxograma do método utilizado neste trabalho.

Figura 3.1 - Fluxograma da concepção do projeto

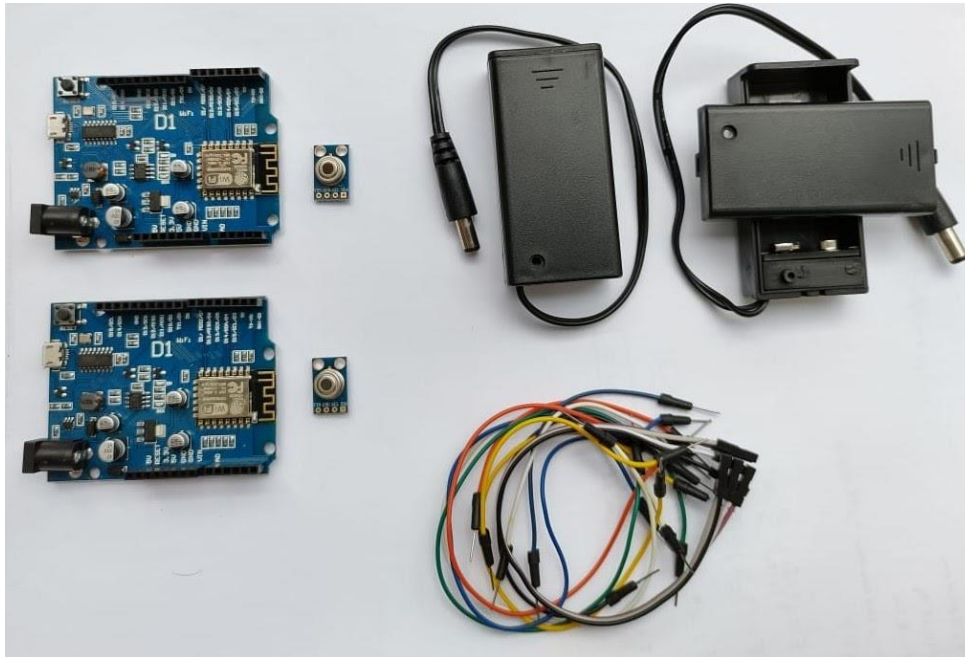


Fonte: Autoria própria

Para a realização da primeira etapa, simulação computacional, faz-se uso do *software* Solid Edge 2019 versão acadêmica e a extensão FloEFD, modelando por meio da sua plataforma CAD um modelo simplificado de disco de freio ventilado para a análise e observação do fluxo de calor quando aplicada uma carga térmica na região de atrito entre a pastilha e o rotor.

Para a concepção da segunda etapa, são necessários os constituintes mostrados na Figura 3.2, sendo eles: microcontroladores ESP8266; sensores de temperatura infravermelho; suportes para bateria 9 Volts e *jumpers* para a transferência de dados e energia entre o microcontrolador e sensor.

Figura 3.2 - Componentes para a aquisição de dados



Fonte: Autoria própria

O preço deles é importante para considerar a viabilidade do projeto. A seguir é apresentada a Tabela 3.1, com o valor de cada componente no Brasil, desconsiderando o preço de frete.

Tabela 3.1 - Custos

| Componente | Quantia | Valor Individual (R\$) | Valor Total do Componente (R\$) |
|--------------------------------|---------|------------------------|---------------------------------|
| Microcontrolador ESP8266 D1 R2 | 2 | 43,00 | 86,00 |
| Sensor IR MLX90614 | 2 | 65,00 | 130,00 |
| Suporte de bateria | 2 | 23,00 | 46,00 |
| Jumper | 8 | 0,50 | 4,00 |
| Calota para base da estrutura | 2 | 25,00 | 50,00 |
| Componentes de fixação | - | - | 10,00 |

Fonte: Autoria Própria

Os componentes de fixação serão feitos com abraçadeiras de nylon, fita adesiva e parafuso para apoio do sensor. Somando o total de cada componente, o preço do protótipo fica avaliado em torno de R\$ 326,00. Tendo em vista da função idealizada para este modelo, que é de projetar um protótipo físico para um controle que vise o aumento de segurança para o

público, esse valor pode ser considerado como atraente e instigar interesse para o mercado, devido às exigências cada vez maiores de segurança da população.

Ainda neste estágio, será indispensável a configuração e programação do módulo, fazendo-se uso do protocolo MQTT. Completando esse procedimento implicará na possibilidade de adquirir e monitorar os dados obtidos em tempo real via internet.

A terceira etapa, que se caracteriza pelo desenvolvimento da estrutura do protótipo, terá como principal objetivo o acoplamento dos componentes da segunda etapa com as rodas do veículo. O protótipo será instalado sobre a estrutura de uma calota para facilitar a sua fixação e fornecer a segurança necessária.

O microcontrolador ficará disposto sobre a parte lateral do eixo. A localização do sensor deverá ser no ponto onde seja possível que a luz infravermelha atinja o disco onde ele apresente uma temperatura mais elevada. Por meio da análise prévia no CAE, podemos considerar que será onde o disco e a pastilha atritam entre si. Caso comprovado isto durante a etapa de modelagem do disco de freio, o sensor se localizará em um dos espaçamentos das fendas da calota, que coincidirá com a fenda da roda do veículo, as opções são demonstradas na Figura 3.3 com a cor vermelha.

Figura 3.3 - Espaçamento entre as fendas da calota



Fonte: Autoria própria

É importante observar que haverá uma força centrífuga no sistema, pois esses componentes estarão sujeitos a uma velocidade angular. A velocidade linear de cada componente irá depender da sua distância até o centro da roda, pois a velocidade linear é o produto da velocidade angular com o raio do círculo. Dessa forma, é essencial que todo o protótipo esteja devidamente bem estruturado e que possua a resistência necessária para que consiga suportar altas velocidades de rotação.

O protótipo terá limitações preventivas a fim de preservar a sua estrutura. Como o modelo será portátil, não é indicado seu uso em dias chuvosos ou em estradas molhadas, para uma melhor vida útil dos componentes. Além disso, não deverá estar acoplado ao veículo quando o mesmo se situa em uma velocidade superior a 80 km/h. Também há limitação exclusivamente deste modelo no quesito da diversidade de veículos em que poderá ser implementado, devido ao estudo ter disponível um veículo com rodas aro 14. Além disso, existe uma pequena probabilidade de haver automóveis com um dimensionamento da estrutura das fendas das rodas inusitadas para esse modelo, que no caso não iriam coincidir com nenhuma fenda da calota. Este fator pode ser solucionado realizando uma abertura parcial na calota, ou até mesmo verificando outros modelos de calota disponíveis no mercado.

Os testes para a validação devem ser feitos para as etapas anteriores, com embasamento na primeira etapa. Para o estágio da elaboração do sistema funcional será mais simples, podendo utilizar o sensor em objetos quaisquer e observar a geração de dados e aquisição de informação. Para o estágio do desenvolvimento da estrutura, o teste será feito por um veículo com a velocidade máxima de 80 km/h, que é a velocidade transitável em vias de trânsito rápido. Caso não haja falhas na implementação dos testes, o projeto poderá ser validado.

Um fator importante a se destacar no momento de obtenção de dados do disco é que a seção em que o sensor captará a temperatura também faz parte da seção em que a pastilha se localiza. Como o sistema de captação de dados irá rotacionar enquanto que a pastilha se manterá fixa, uma parcela dos dados obtidos não irá representar fielmente a temperatura do disco, mas sim à da parte posterior da pastilha. Embora estes valores possam ser próximos, isso irá tornar a avaliação dos dados inexata. Sendo assim, no momento de verificação dos dados, caso haja alguns deles com quedas notáveis de temperatura em comparação entre as duas rodas, essas medidas alteradas serão descartadas.

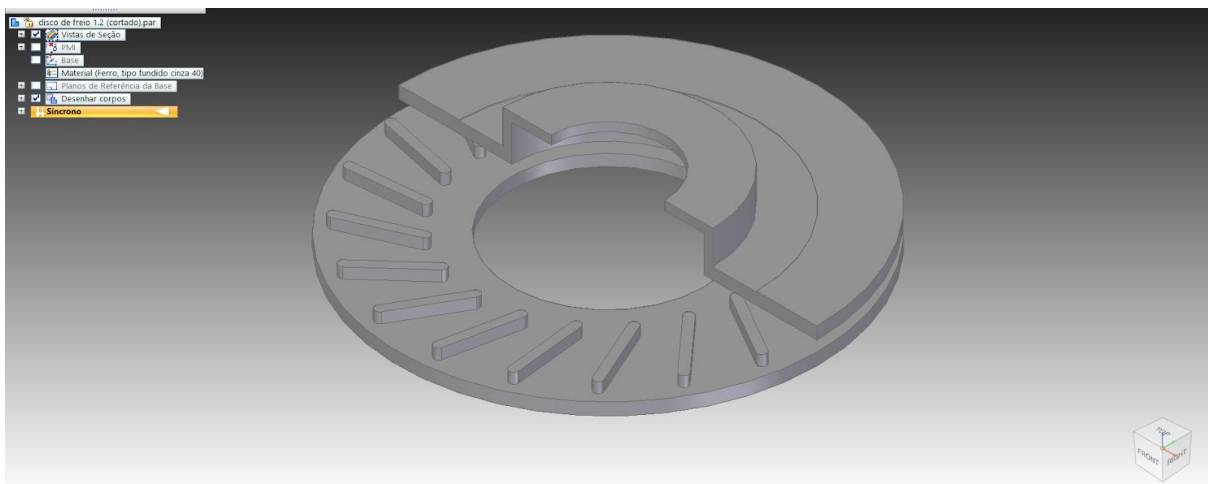
4. CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

4.1 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Na interface do Solid Edge deve-se criar um novo documento de peça usando o modelo padrão, para assim efetuar a criação do protótipo digital.

A modelagem do disco de freio ventilado foi baseada em uma configuração real, porém sua produção foi feita de forma simplificada para tornar possível os cálculos que o programa realiza. O material usado foi aço fundido cinzento. A Figura 4.1 apresenta o disco de freio com uma seção parcial invisível, para um melhor entendimento da distribuição das aletas.

Figura 4.1 - Protótipo digital do disco de freio ventilado

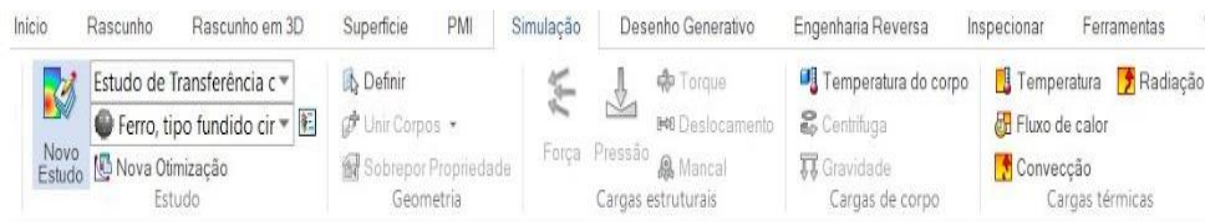


Fonte: Autoria própria

Com o projeto 3D pronto, a análise e observação do fluxo de calor desenvolvido durante a frenagem no disco de freio podem ser feitas, inicialmente, na plataforma CAE utilizando o Método de Análise de Elementos Finitos (MEF), com um estudo de calor em estado transiente.

O próximo passo é criar um novo estudo de caso na aba “Simulação”. Este estudo será de transferência de calor transiente, conforme a Figura 4.2, com tempo de duração de 5 segundos e temperatura inicial do sólido de 22 °C.

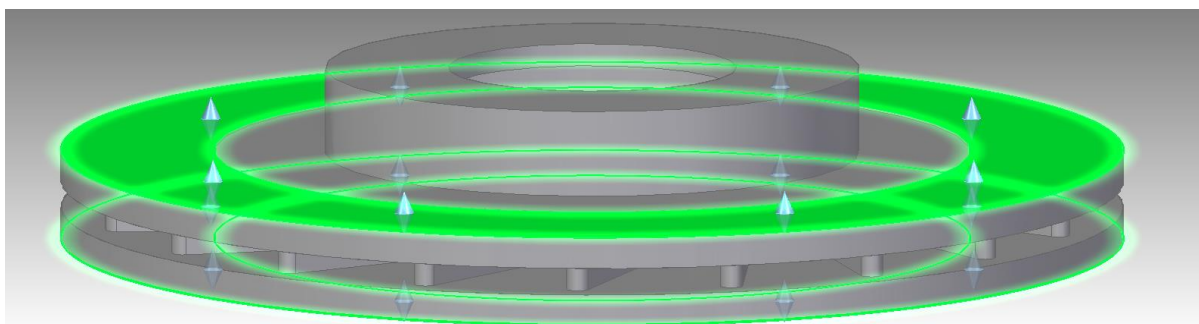
Figura 4.2 - Painel “Simulação” do Solid Edge



Fonte: Autoria própria

Em seguida é necessário seleccionar as duas regiões exibidas na Figura 4.3 (superior e inferior) onde ocorrem o atrito entre a pastilha e o disco, pois é nessa área onde ocorre a conversão de energia cinética em térmica. Nessas zonas será aplicado um fluxo de calor. O valor pode variar em função da massa do veículo, velocidade antes e depois da frenagem e do tempo que o sistema de freio estava ativo. Como estimativa, o peso do veículo será em torno de uma tonelada, que é próximo do peso real do veículo de testes. Também será estimado a velocidade inicial e final da frenagem e o tempo em que será efetuada, que serão respectivamente 60 km/h, 0 km/h e 5 segundos.

Figura 4.3 - Zona de fluxo de calor no disco de freio



Fonte: Autoria própria

Tendo em vista que a energia cinética é igual ao produto da massa pela velocidade ao quadrado dividido por dois, considerando a eficiência de frenagem e um tempo de cinco segundos, o fluxo de calor fica próximo de 5000 Watts para aquela seção de 0,0075 m² de contato entre disco e pastilha. Como esse fluxo será distribuído entre as quatro rodas do veículo, este valor fica em torno de 1200 Watts.

Para a dispersão desse calor, é usada uma carga de convecção em todo o modelo, inclusive nas regiões em que o fluxo de calor está sendo aplicado, pois apenas uma parte dela

fica em contato com a pastilha. O disco estará em rotação até o final da frenagem e essa parte dele que ficará em contato com a pastilha estará constantemente mudando de posição. Como há diversos parâmetros para estipular o coeficiente convectivo, ele será homogêneo para fins de simplificação de cálculo. Na simulação de Belhocine et al. (2013), muito semelhante com esta, a carga convectiva no disco de freio variava entre 1 a $295 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Já na simulação de Silva (2016), também muito semelhante, o valor escolhido para simular a dispersão pela convecção no disco de freio foi de $49 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, que será, então, adotado para este trabalho.

A priori, a finalidade desta modelagem tem como objetivo a análise da dispersão de energia térmica ao longo da superfície do disco de freio, juntamente com o propósito de fornecer a localização da área do disco de freio em que há a maior temperatura. Além da relevância da temperatura máxima, a temperatura média no volume do disco também será importante para a análise. Vale ressaltar que algumas simplificações foram feitas e que o método por elementos finitos não manifesta o deslocamento do fluxo do ar, que é o principal meio de dissipação de temperatura dos discos de freio. Sendo assim, o ideal seria uma simulação que leve em conta a convecção forçada devido à movimentação do disco de freio, ou até mesmo a convecção natural, nos casos em que o veículo se encontra de forma estacionária.

A maneira mais assertiva dentre as simulações para adquirir este conhecimento térmico é por um estudo CFD, por possuir algumas vantagens em relação à primeira análise de MEF. Este estudo também é feito pela plataforma CAE, porém desempenhado pelo MVF, por meio do programa FloEFD que é uma extensão do Solid Edge capaz de realizar análises de fluido por CFD. Aproveitando a geometria 3D já modelada na plataforma CAD, foi possível realizar este método de estudo para incluir o fenômeno de deslocamento de fluxo de ar - incapaz de ser concebível pelo MEF.

É necessário ter o FloEFD instalado e vinculado com o Solid Edge para essa análise e, neste caso, foi efetuada pela sua versão acadêmica. Para iniciar o estudo, foi preciso ir para a aba “*Flow Analysis*” e clicar em “*Wizard*”, assim como a Figura 4.4 exemplifica.

Figura 4.4 - Painel “Flow Analysis” do Solid Edge



Fonte: Autoria própria

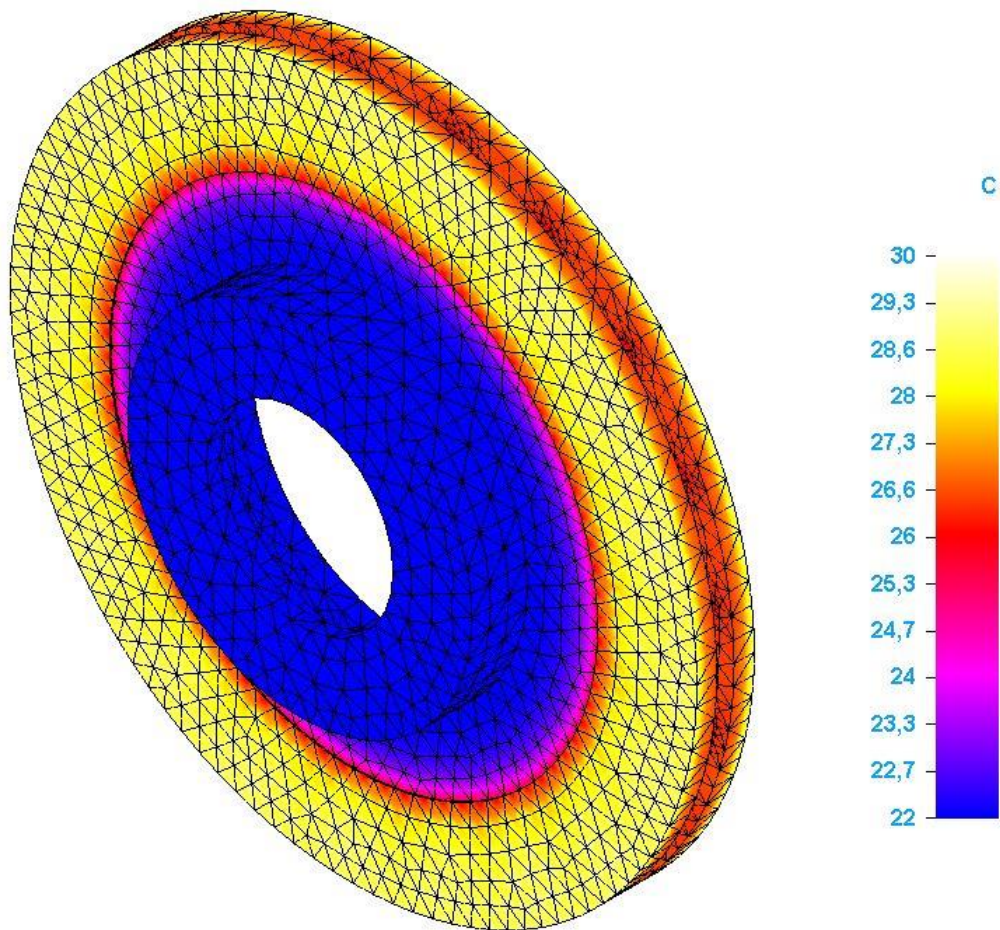
Assim que escolher o nome para o estudo, é arbitrário escolher as unidades de medida. A única alterada foi Kelvin para grau Celsius. É necessário selecionar as opções: condução de calor em sólidos; radiação; absorção em sólidos; características de espectro e gravidade. Será feita uma análise simulando o eixo estático e outra de forma dinâmica (rotação e translação), simulando o movimento da roda e do veículo. No caso de estar em rotação, é necessário selecionar esta opção. Assim foi escolhida uma rotação de 60 rad/s, simulando uma velocidade de veículo por volta de 60 km/h, pois o diâmetro da roda do automóvel de teste é em torno de 55 cm. Foi selecionada a velocidade de fluido axial de 16,7 m/s, demonstrando no estudo o deslocamento de ar devido à movimentação do veículo. Em seguida, deve-se selecionar o fluido em torno do objeto de estudo e o material do disco, que no caso é ar e ferro fundido, respectivamente. A temperatura inicial do sólido será de 22 °C e a ambiente de 20 °C, para simular um caso mais realista.

Com os parâmetros iniciais prontos, deve-se aplicar as condições da análise. Foi aplicado um fluxo de calor de 1200 W nas superfícies que o disco atrita com a pastilha, assim como na primeira análise no MEF, tornando possível uma comparação entre esses dois métodos. Também é possível alterar o domínio computacional envolvido no processo, reduzindo ou aumentando o volume que será analisado. Por fim, aplica-se uma malha e para iniciar o estudo seleciona-se a opção “Run”.

A vantagem do estudo CFD é que por esse método é possível realizar uma estimativa do comportamento térmico de forma mais realista, com o acréscimo dos desempenhos fluidodinâmicos em discos de freio ventilados. Com essa possibilidade do estudo CFD simular o disco em translação e rotação, a percepção do que a convecção forçada altera no disco de freio fica evidente.

Ao resolver o estudo pelo MEF, pôde-se observar as regiões de maior energia térmica no disco de freio, conforme a Figura 4.5.

Figura 4.5 – Distribuição de temperatura no disco de freio

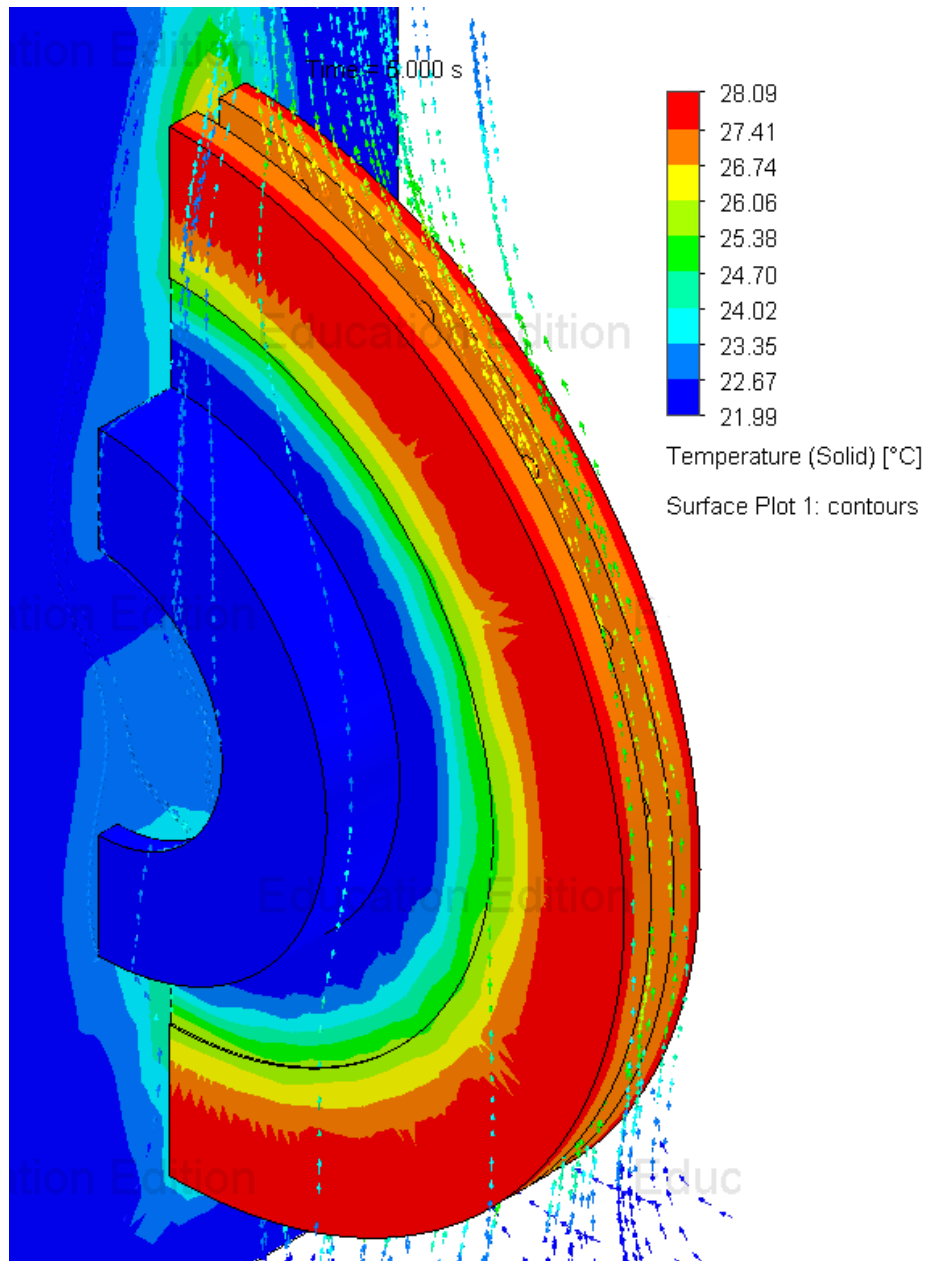


Fonte: Autoria própria

Torna-se explícito observando a Figura 4.5 que a região onde a temperatura é mais alta no disco de freio é onde ocorre o contato do material de atrito da pastilha de freio.

A Figura 4.6 abaixo demonstra o resultado da análise CAE por mecânica dos fluidos, simulando o eixo em estado estático. Comparando com o MEF, os resultados do estudo CFD pelo MVF são bem similares, podendo observar uma temperatura máxima semelhante nos dois casos. Isso ocorre devido às condições de deslocamento de ar não envolverem alterações por movimentação física do disco de freio. Dessa forma, houve uma diferença térmica de 6,09 °C ao final da simulação.

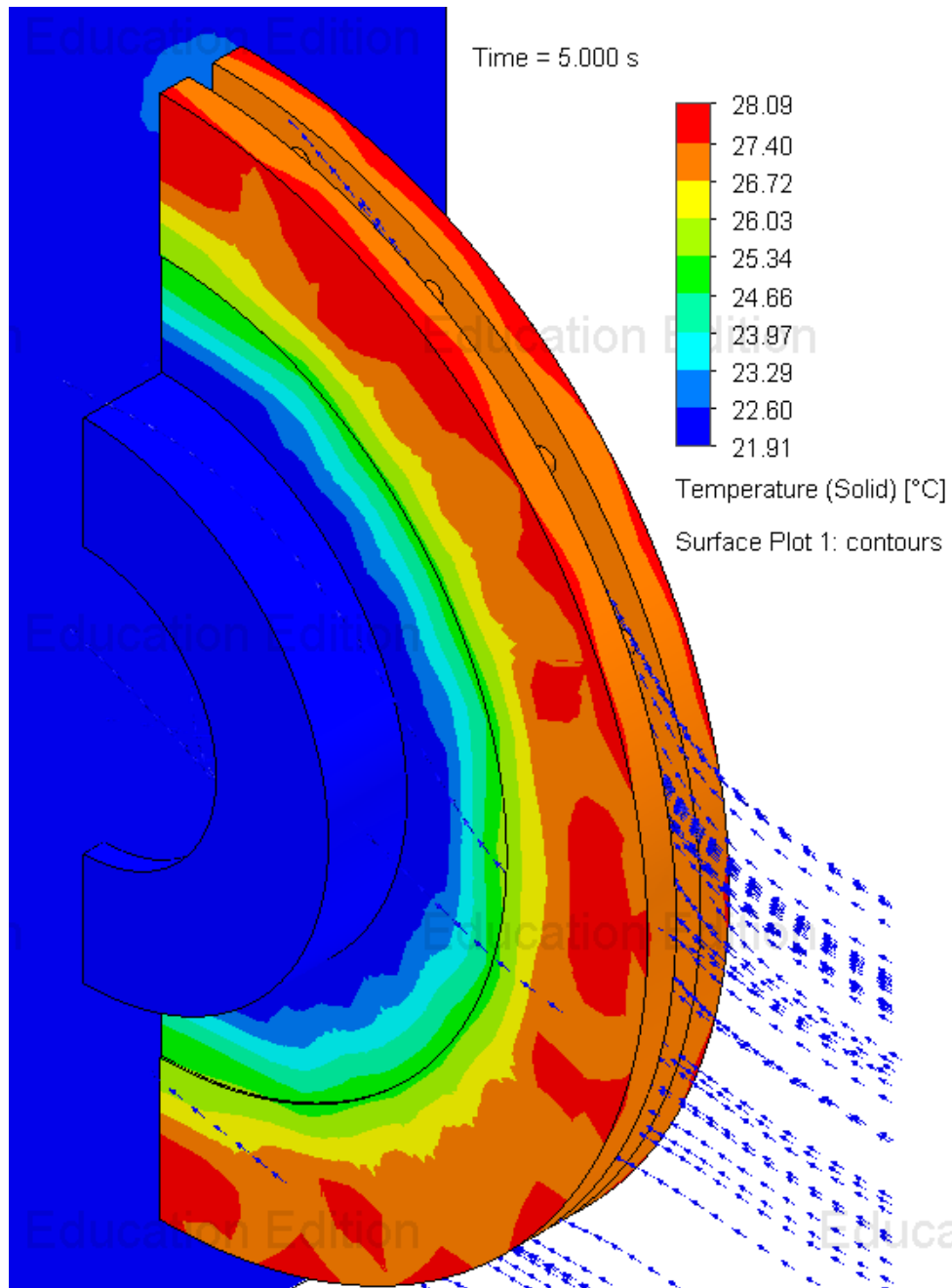
Figura 4.6 - CFD disco estático



Fonte: Autoria própria

A simulação CAE por MVF no disco em estado dinâmico, isto é, em rotação e translação, pode ser analisada de acordo com a Figura 4.7. O sentido das aletas foi devidamente respeitado, o que significa que o disco rotaciona no sentido em que o deslocamento de ar é superior em relação ao outro sentido, como ocorre em uma situação real. A direção do deslocamento de ar relacionada à movimentação do veículo também se correlaciona corretamente com um caso verídico.

Figura 4.7 - CFD disco dinâmico



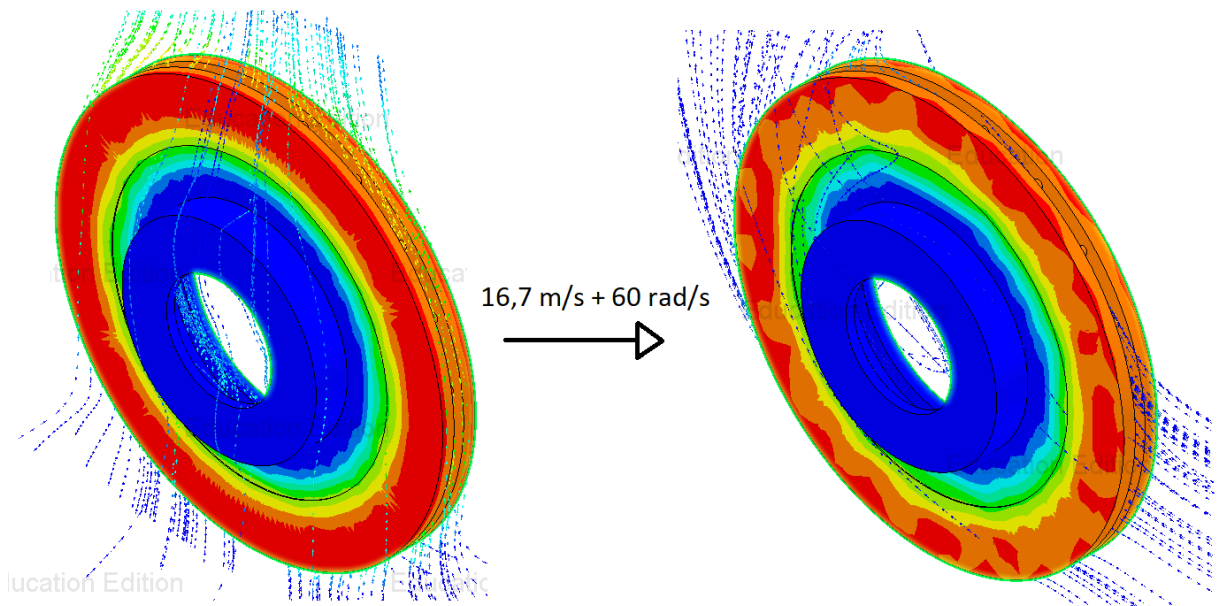
Fonte: Autoria própria

A confrontação entre a análise do disco de freio estático e dinâmico é observável pela Figura 4.8. Fica explícito que o deslocamento de ar por convecção forçada é de fundamental importância para a dissipação térmica nos discos de freio, tornando as aletas internas necessárias para uma melhor ventilação.

O fato de ambos os estados desenvolverem uma temperatura máxima muito semelhante, mas uma temperatura média divergente, é devido à simulação apresentar o instante imediato de tempo após a liberação das pastilhas no disco. Se o sistema fosse analisado algum tempo depois deste momento, a tendência do disco seria homogeneizar a temperatura, tornando assim a diferença entre as temperaturas máximas evidente.

Um outro fator importante a ser considerado é que a malha do disco em estado estático possui uma resolução melhor do que a do disco em estado dinâmico. O fato de haver deslocamentos por rotação e translação na simulação promovem uma exigência muito grande no processamento do computador, impossibilitando a simulação de ser concluída. Em outros testes com o mesmo disco, foi constatado que quanto mais grosseira a malha, maior a temperatura. Então pode-se concluir que há possibilidade de a temperatura ser um pouco menor do que aparenta no caso da simulação com translação e rotação do disco. Testes com o disco recebendo quantidades maiores de energia conseguiram se diferenciar de forma significativa neste quesito de temperatura máxima entre os dois estados.

Figura 4.8 - Comparação entre disco estático e em movimento no CFD

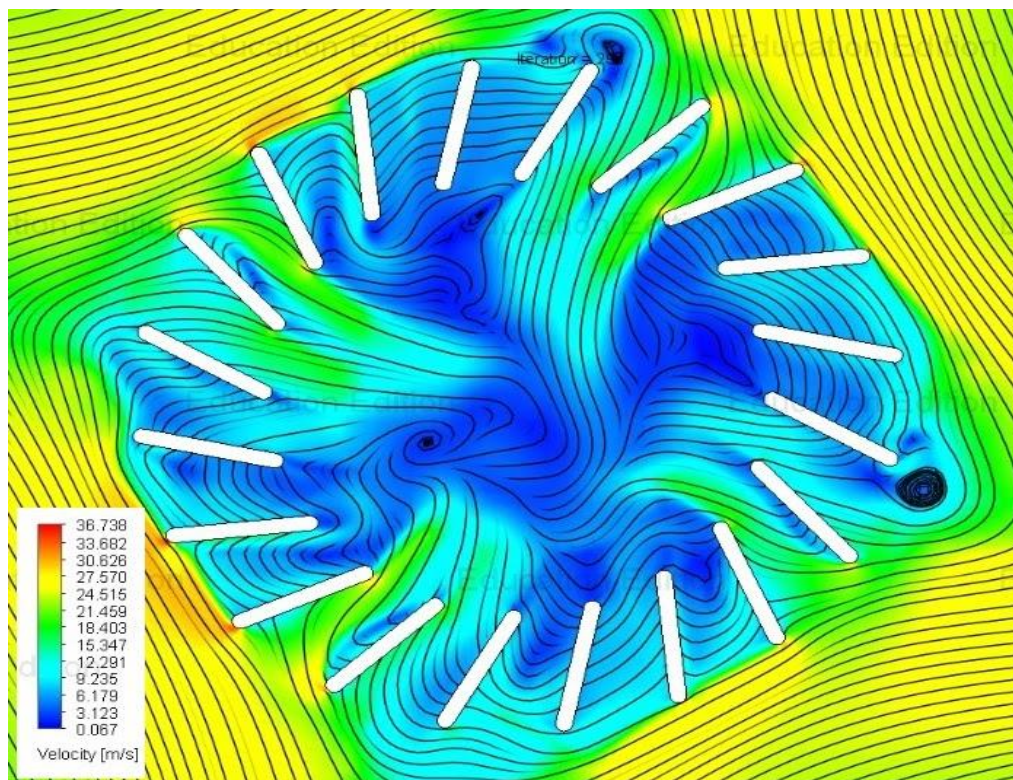


Fonte: Autoria própria

O deslocamento de ar no interior do disco de freio ventilado à 60 rad/s pode ser observado pela Figura 4.9 a seguir. A evidência de formação de vórtices revela um estado de

escoamento turbulento no interior do disco, fator este que influencia na dissipação de energia para o ambiente.

Figura 4.9 - Deslocamento de ar no interior do disco de freio (CFD)



Fonte: Autoria própria

A principal diferença que ocorre entre a simulação estática e dinâmica é a convecção forçada. De forma estática, a convecção ocorre apenas da forma natural. Todavia, ao rotacionar ou transladar o disco, o fluxo de ar ao redor dele é deslocado perante sua referência espacial. Isso ocasiona na movimentação e dispersão das partículas de ar que estão mais próximas ao disco - e por consequência que sofreram transferência de calor do rotor - por partículas de ar mais afastadas e mais frias, que por sua vez irão se aproximar e esquentar para depois se afastar e serem substituídas novamente. Como haverá transferência de calor para o ar de forma mais significativa na forma dinâmica, ocorrerá uma diminuição na temperatura do disco de freio também mais significativa, devido à lei de conservação de energia.

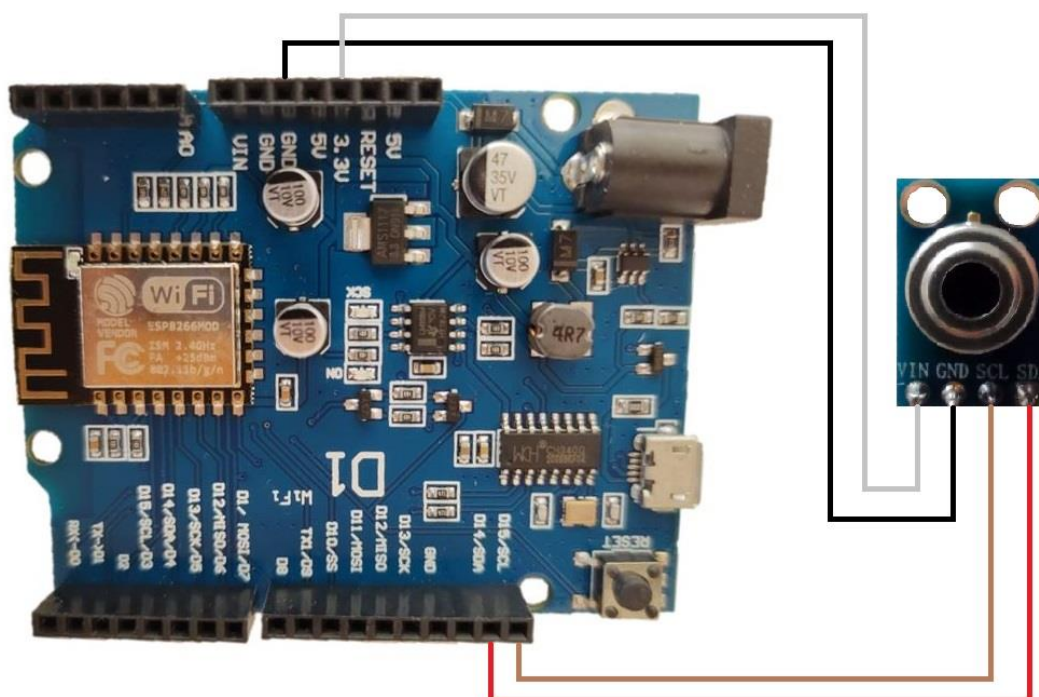
Dessa maneira, é possível concluir que a localização de captação de temperatura do sensor deverá preferencialmente ocorrer na região de atrito entre o disco e a pastilha de freio. Coincidentemente, essa localidade abre caminho para implementar o sensor nas fendas da

calota da roda e, desta forma, os próximos passos serão a elaboração do sistema funcional dos sensores e microcontroladores, desenvolvimento da estrutura do protótipo e testes de validação.

4.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

O esquema de conexão entre o módulo e o sensor é demonstrado na Figura 4.10. É preciso interligar as conexões “VIN” com a “3,3V” para fornecer energia para o sensor; “GND” com “GND”, que é o filtro de densidade neutra, responsável pelo aterramento; “SCL” com “D15/SCL” (GPIO 5) e “DAS” com “D14/SDA” (GPIO 4) para a comunicação de dados.

Figura 4.10 - Circuito instrutivo módulo-sensor

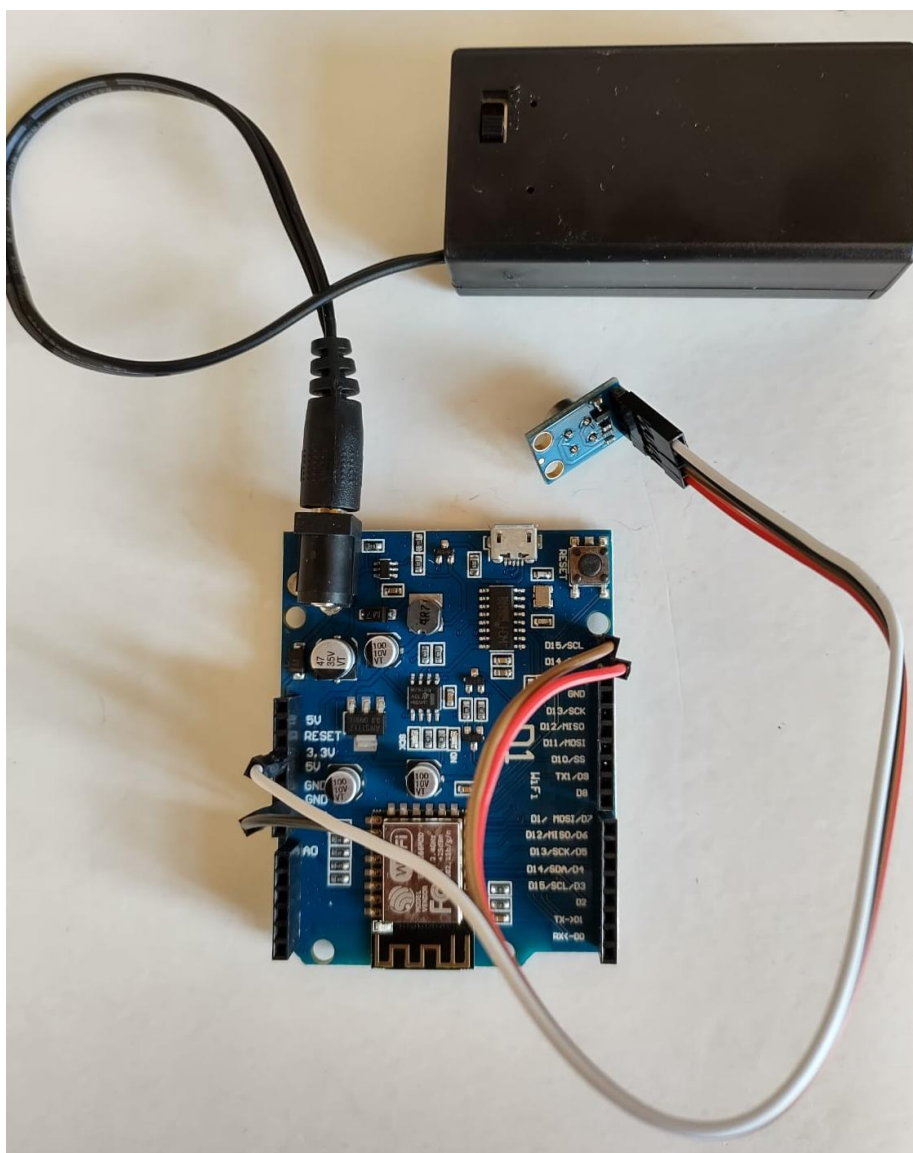


Fonte: Autoria própria

O sensor de temperatura IR MLX90614 possui faixa de operação de 3,3 a 6V, sendo assim, torna-se facultativa a escolha entre as portas de 3,3 e 5V que existem neste módulo. Outra vantagem é que não importam as entradas digitais que se conectará, pois possui reconhecimento inteligente, não necessitando alterar sua programação caso haja modificação das conexões das GPIO do microcontrolador.

O circuito real entre eles é exibido na Figura 4.11, juntamente com o suporte de bateria para o auxílio na alimentação. Por já possuir uma chave “*On/Off*” embutida, não há obrigação de um botão para este fim, tornando o sistema ainda mais simples.

Figura 4.11 - Circuito módulo-sensor



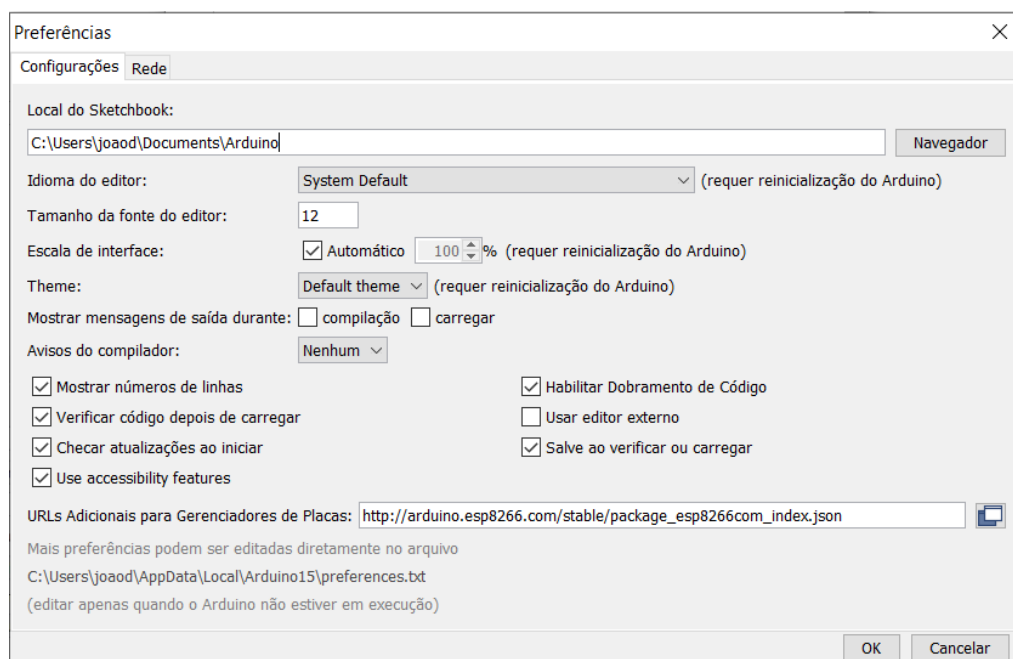
Fonte: Autoria própria

A placa Wemos D1 R2 pode ser programada no *software* de código aberto da Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE – *Integrated Development Environment*) do Arduino, disponível para *download* em <https://www.arduino.cc/en/software>.

Para a utilização de qualquer ESP8266 nesta IDE, é preciso ir até a aba de “Preferências” e adicionar o endereço

http://arduino.esp8266.com/stable/package_esp8266com_index.json em “URLs Adicionais para Gerenciadores de Placas”, assim como a Figura 4.12 demonstra.

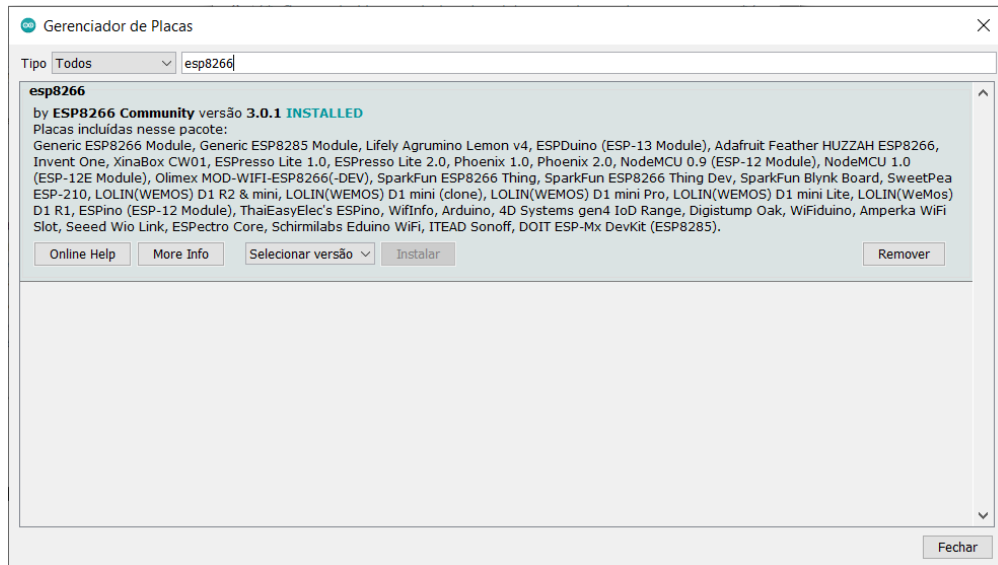
Figura 4.12 - Configuração da IDE do Arduino



Fonte: Autoria própria

Após o procedimento anterior, torna-se possível instalar o pacote de placas da ESP8266. Deve-se ir para “Ferramentas”, “Placa”, “Gerenciador de Placas” e procurar por “esp8266”, desenvolvido por “ESP8266 *Community*” e ir na opção “Instalar”, exibido na Figura 4.13.

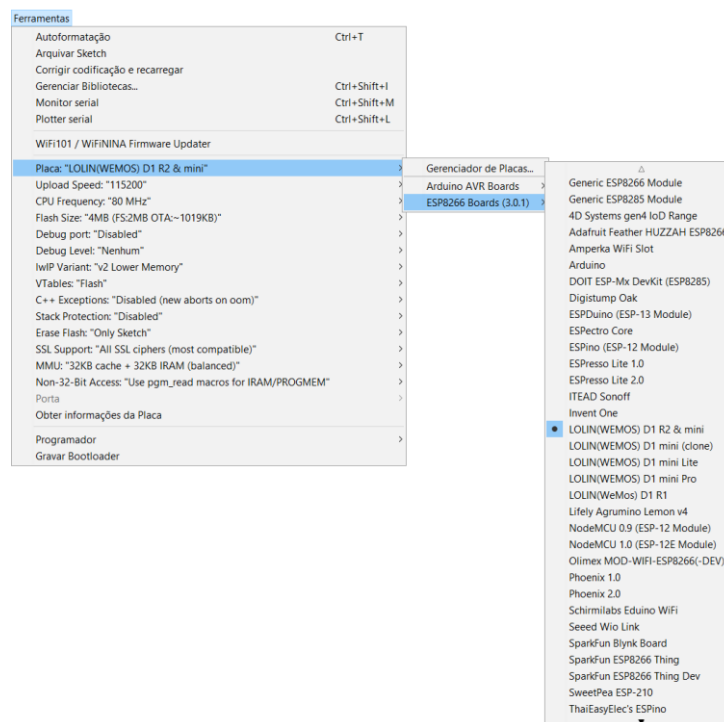
Figura 4.13 – Instalação do pacote ESP8266 na IDE do Arduino



Fonte: Autoria própria

Para selecionar a placa, que neste caso é a Wemos D1 R2, é preciso ir para “Ferramentas”, “ESP8266 Boards” e “LOLIN(WEMOS) D1 R2 & mini”, conforme a Figura 4.14.

Figura 4.14 - Seleção da placa Wemos D1 R2 na IDE do Arduino



Fonte: Autoria própria

A implementação do código pode ser efetuada após instalar as bibliotecas “Adafruit MLX90614 Library” para o recebimento de dados do sensor e “Blynk” para a comunicação do aplicativo com o módulo, exibidas na Figura 4.15. É preciso ir até “Ferramentas”, “Gerenciador de Bibliotecas”, pesquisar por esses nomes e instalá-las.

Figura 4.15 - Bibliotecas necessárias



Fonte: Autoria própria

O sistema de comunicação para o fornecimento dos dados é feito através do aplicativo Blynk, disponível para Android e IOS. Sua interface é de fácil compreensão e há a possibilidade de inserir *Widgets* com funções de controle, notificação e leitura de dados. O aplicativo é gratuito, porém há uma limitação da quantidade de funções que o usuário pode instalar. Se for além do limite permitido, deve-se pagar uma quantia equivalente.

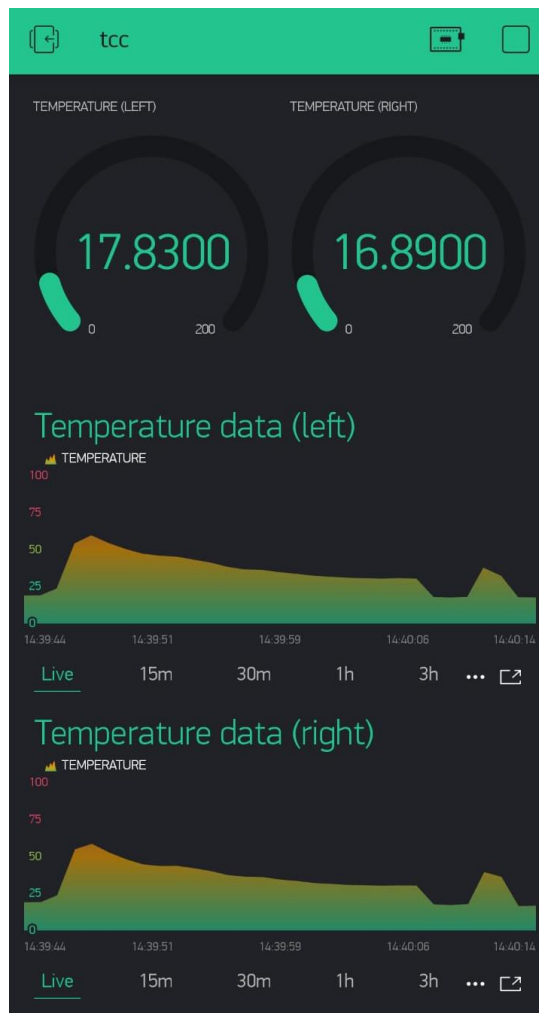
O aplicativo permite configurar as funções do projeto sem a necessidade de implantar códigos na programação do módulo, sendo apenas necessário informar qual entrada virtual o *Widget* irá se conectar.

O código utilizado na programação foi baseado no exemplo básico da Blynk, disponível na aba “Exemplos” da IDE do Arduino após adicionar a biblioteca “Blynk”, acessível em Apêndice A – Código Programado no Módulo ESP8266 Wemos D1 R2. A internet usada nos testes será o roteador Wi-Fi disponível em *smartphones*, pois assim será possível o deslocamento dos módulos em vias públicas, contanto que o celular esteja acompanhando.

Dentro do aplicativo o usuário deve cadastrar o e-mail e criar um novo projeto. Após isto, deve informar qual o tipo da placa que será usada, que no caso é o ESP8266. Também há a possibilidade de adicionar mais de uma placa de diferentes tipos. Para cada módulo adicionado, o usuário recebe um *token* de autenticação para colocar no código da programação do microcontrolador. Desta forma, o servidor da Blynk reconhece a placa, caso esteja conectada na internet, e é feita a conexão entre ela e o usuário.

Para a leitura de dados em tempo real foram instalados quatro *Widgets*, sendo dois para os medidores e dois para os gráficos do lado esquerdo e direito do veículo. Os gráficos já disponibilizam o valor em tempo real da temperatura, porém para a melhor visualização, os medidores também foram instalados, necessitando pagar R\$10,00 para este fim. Contudo, como a opção é facultativa, este valor não será computado no preço final do projeto. A Figura 4.16 exibe a captura de tela de como ficou a interface do aplicativo para este projeto com os dois sensores em funcionamento apontando para objetos aleatórios.

Figura 4.16 - Interface do aplicativo Blynk



Fonte: Autoria própria

As temperaturas máximas e mínimas são customizáveis. Uma boa escala para este projeto seria entre 0 e 100 °C para testes com frenagens moderadas. Para testes mais intensos,

a temperatura máxima poderá estar entre 0 a 380 °C, respeitando as condições do sensor MLX90614.

Os gráficos possuem opções de exibição do tempo da leitura de dados, sendo mais ideal para o projeto os últimos trinta segundos, que é a opção “*live*” e também os últimos quinze minutos. Acima disso, a leitura visual se torna mais ineficaz.

A partir do momento em que são ligados os módulos e a conexão com a internet é estabelecida, todas as leituras são gravadas no aplicativo com um intervalo de um minuto entre elas. Esses dados podem ser enviados para o usuário com a opção “*Export to CSV*”, então um documento em formato CSV será enviado para o e-mail cadastrado com todas as medições em formato de tabela. A partir daí torna-se possível a manipulação da exibição desses valores pelo excel.

4.3 ACOPLAMENTO DO SISTEMA NO VEÍCULO

O primeiro passo para o acoplamento do sistema no veículo é fixar os componentes necessários na calota. Contudo, antes de realizar esta ação, é preciso localizar a melhor fenda para coincidir os furos da calota e da roda para assim o sensor conseguir atuar. A Figura 4.17 demonstra um espaçamento ideal de aberturas, juntamente com a “visão” que o sensor conseguiria captar. Como o raio da fenda é superior ao raio do disco de freio, inclinar o sensor supriria este desfalque dimensional.

Figura 4.17 - Compatibilidade das fendas para o sensor atuar

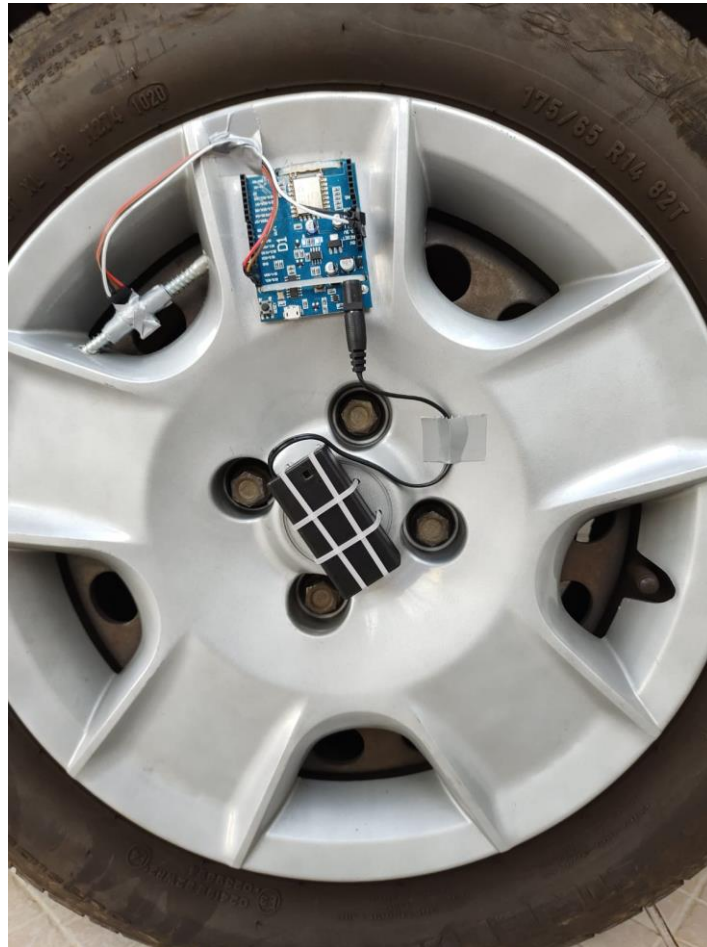


Fonte: Autoria própria

Após a noção dimensional necessária, retira-se a calota da roda para fixar o sistema. Deve-se efetuar pequenos furos na estrutura para as abraçadeiras de nylon estabilizarem o suporte de bateria e o microcontrolador. Furos maiores são necessários para inserir um parafuso que atuará na estabilidade do sensor, em companhia de fita adesiva de boa aderência.

A localização do suporte de bateria fica no centro do eixo, pois é o componente com maior massa. Dessa maneira haverá menor instabilidade na rotação. O parafuso que dará a sustentação para o sensor deverá estar fixo tanto na translação, quanto na rotação, para o ângulo de ação da medição de temperatura ficar sempre imóvel. A Figura 4.18 apresenta o sistema concluído, com a calota acoplada na roda.

Figura 4.18 - Sistema fixado na roda



Fonte: Autoria própria

Para as trocas de calota, deve-se utilizar a chave de roda que dispõe junto do estepe nos veículos. Antes de retirar os pinos, é importante que o veículo esteja desligado, engatado e com o freio de mão puxado para a segurança de quem estiver operando. Apenas três dos quatro pinos devem ser retirados. O único que ficará fixo é o que o espaçamento da calota haja a folga necessária para a retirada da mesma sem que seja necessário a retirada do pino. Após o acoplamento, todos os pinos devem ser bem fixados novamente.

4.4 TESTES DE VALIDAÇÃO

Para esta etapa final do projeto, alguns testes foram efetuados com o modelo físico no intuito da realização da coleta de dados de temperatura para a aquisição da informação pertinente ao propósito de validação do protótipo.

As condições climáticas no dia de teste devem estar favoráveis, sem previsão de chuva e, de preferência, com temperatura ambiente similar à simulação. Caso este último fator não seja atendido, necessita-se refazer a simulação com a temperatura real ou próxima dela.

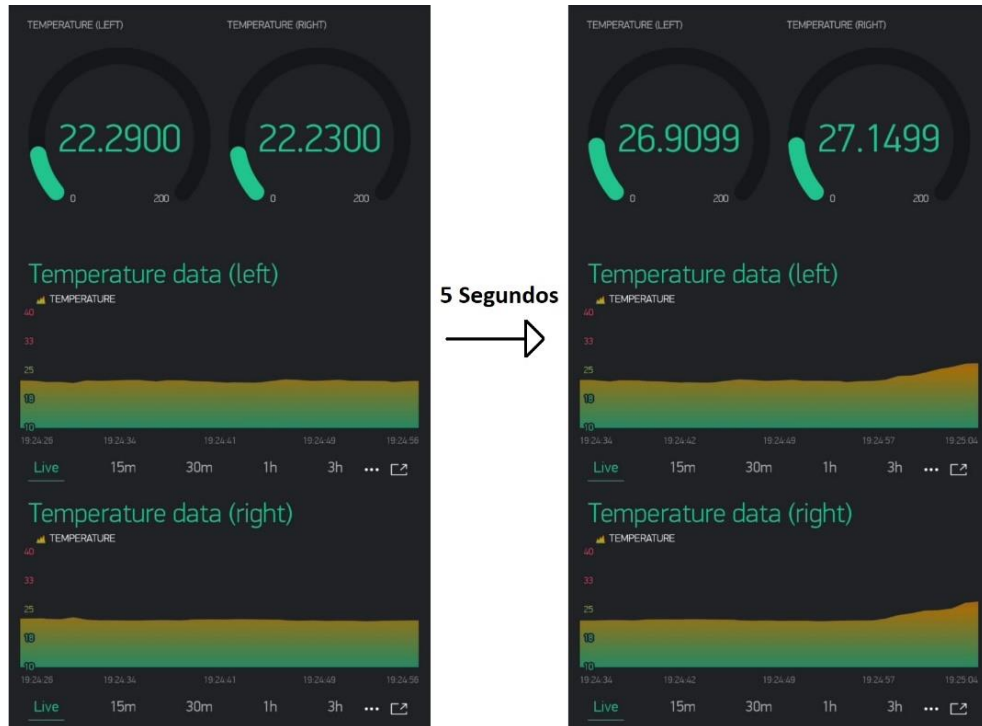
Não foi necessário alterar os valores da simulação, pois no dia de teste a temperatura ambiente estava próxima de 20 °C. A temperatura do disco de freio estava um pouco acima, pois na maioria dos casos de frenagens reais, o disco estará mais quente que o ambiente, devido às frenagens anteriores.

Não há necessidade, nesta fase do projeto, de acoplar os componentes dos dois lados do veículo. Todavia, para garantir maior confiabilidade nos dados, é interessante que ambos estejam em funcionamento.

O teste de frenagem não deve ser realizado em vias públicas com perigo em potencial, para a segurança em geral. Após a chegada na área segura e os componentes já se apresentarem em funcionamento, caso a temperatura esteja um pouco acima de 22 °C, deve-se esperar até que fique próxima disso. Se estiver muito distante, uma nova simulação deve ser efetuada para conciliar os dados entre o teste físico e a simulação.

O teste foi realizado com a temperatura ambiente próxima de 20 °C e a temperatura do disco de freio a 22 °C. Com o veículo a 60 km/h, foi executada a frenagem em 5 segundos até a sua parada. Constata-se, de acordo com a Figura 4.19, que a temperatura no final da execução do teste é de 27,15 °C, resultando em um aumento de 5,15 °C.

Figura 4.19 - Temperatura no teste de frenagem



Fonte: Autoria própria

Autores como Infantini (2008) revelam que aproximadamente 93% do calor gerado em frenagens em veículos convencionais encaminha-se para os discos de freio. Como a diferença térmica no resultado da simulação foi de 6,09 °C, para se adequar nesta proporção este valor passará a valer 5,66 °C, tornando o resultado final em uma temperatura de 27,66 °C.

Considerando que a temperatura do teste físico se enquadra muito próxima do valor observado nas simulações, ambas se validam e comprovam que os modelos físico e virtual foram bem-sucedidos.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

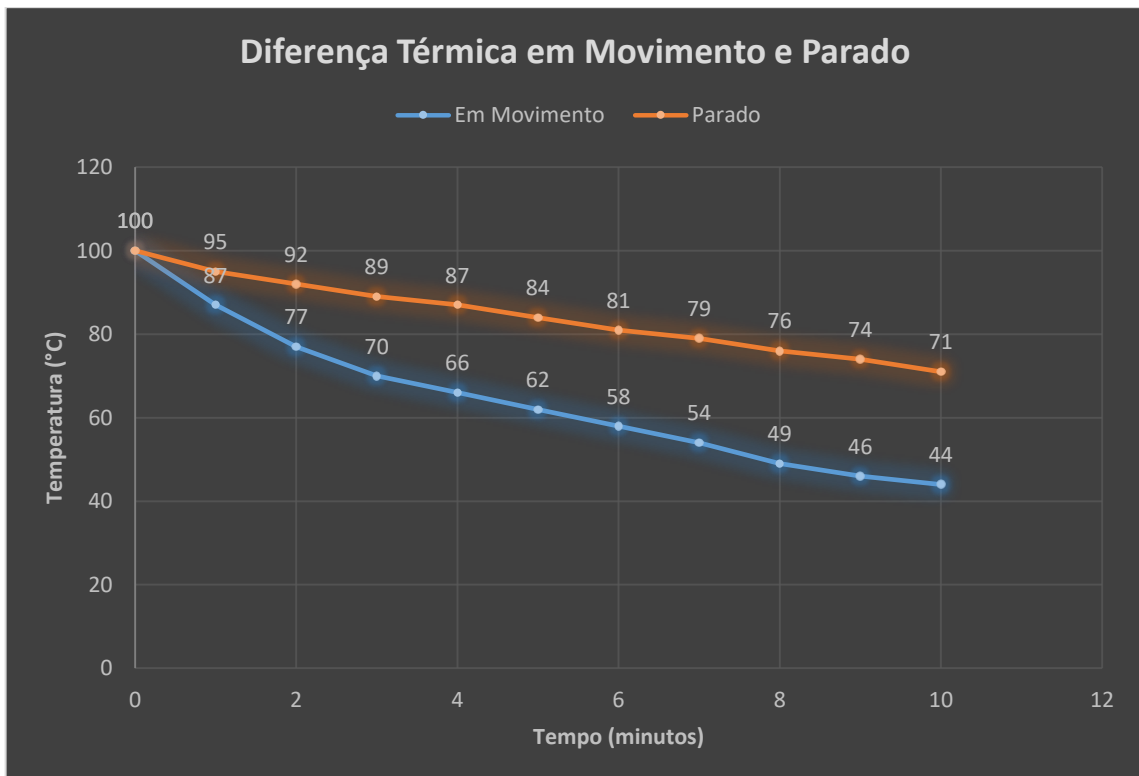
De uma maneira geral, a comutação entre a simulação e o teste real teve êxito. Ao considerarmos que algumas simplificações foram tomadas nos testes virtuais, como a área de contato da pastilha não ser exata, a carga convectiva ser constante, o fluxo térmico e a proporção de calor que irá para o disco serem um valor aproximado e a malha do disco em estado dinâmico poder apresentar uma pequena variação no resultado, os resultados estão excepcionalmente dentro do previsto.

Além deste teste físico, outros foram efetuados, mas vale ressaltar que alguns deles tiveram de ser descartados, pelo fato do sensor captar a temperatura na região da pastilha, variando assim o seu valor.

Ainda para destacar a importância de realizar a simulação de maneira em que o disco se apresente em movimento, foram executados dois experimentos. Em ambos se fez necessário elevar propositalmente a temperatura dos discos até um valor considerável, que no caso foi de 100 °C. Em seguida, foi contado um intervalo de 10 minutos sem mais frenagens para avaliar o decrescimento térmico. Contudo, no primeiro teste isto foi realizado com o veículo em movimento, enquanto que no outro com o automóvel parado ao ar livre, porém ao redor de paredes, para evitar a circulação de ar.

A Figura 4.20 demonstra os dois casos por meio da confecção dos dados passados pelo aplicativo em um gráfico no Excel. Isso torna evidente que a convecção forçada possui um papel de extrema relevância para a transferência de temperatura, diferenciando-se em 27 °C ao decorrer desses 10 minutos.

Figura 4.20 - Diferença térmica com veículo parado e em movimento

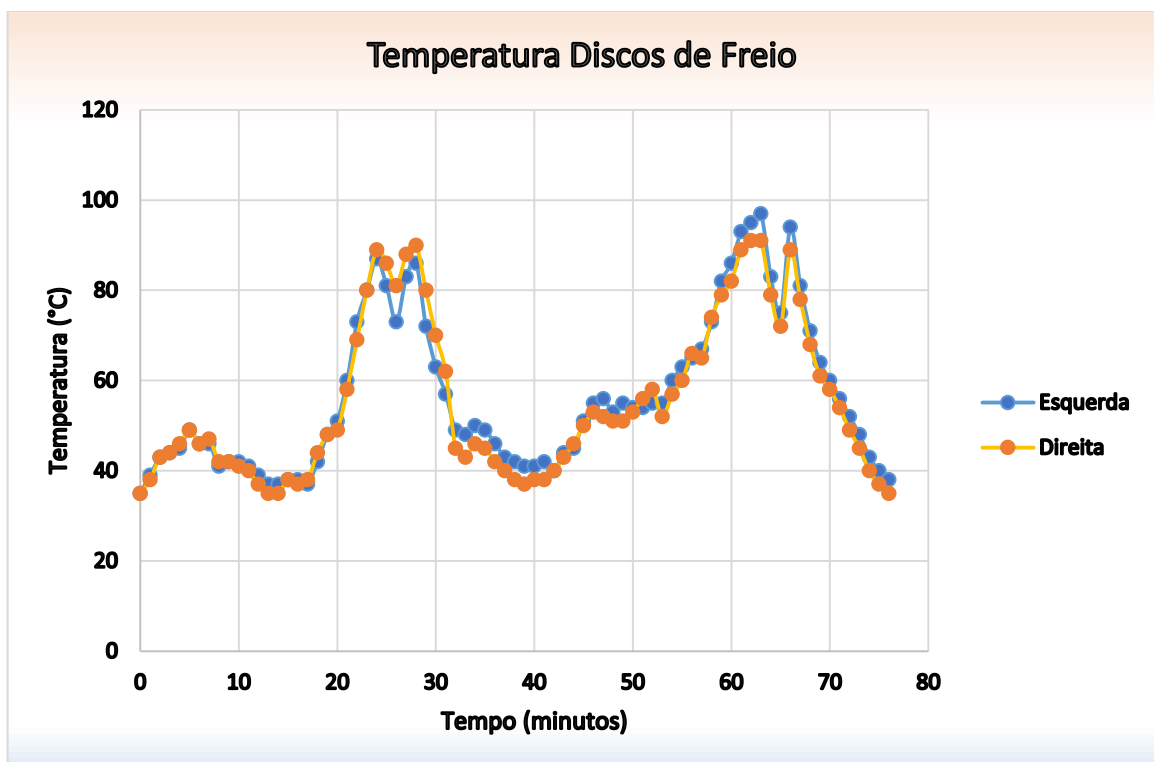


Fonte: Autoria própria

Para o último teste, que se faz necessário o uso dos dois protótipos, a intenção é de receber a temperatura dos dois discos de freio, obtendo e gravando esses dados. Dessa maneira é possível destacar se há ou não desconformidade térmica entre eles.

A Figura 4.21 evidencia o ocorrido por meio de um gráfico gerado no Excel com os dados que o aplicativo envia ao usuário. O veículo transitou em vias urbanas coletoras, arteriais e de trânsito rápido, não ultrapassando 80 km/h. Antes de atingir os dois picos de temperatura, o veículo se encontrava em uma via coletora e eram realizadas frenagens acima do moderado de forma proposital. Nesta via a velocidade máxima permitida é de 40 km/h e há muitas paradas obrigatórias. O decaimento de temperatura do primeiro pico se dá devido à circulação por vias arteriais de velocidade máxima de 60 km/h e frenagens abaixo do moderado. Nessas vias ainda há paradas obrigatórias, mas com muito menor frequência. O decaimento do segundo pico se deve por circular em vias de trânsito rápido, em que a velocidade máxima é de 80 km/h, porém a média feita pelo veículo foi de 60 km/h, além de que não foram efetuadas frenagens.

Figura 4.21 - Temperatura nos dois discos

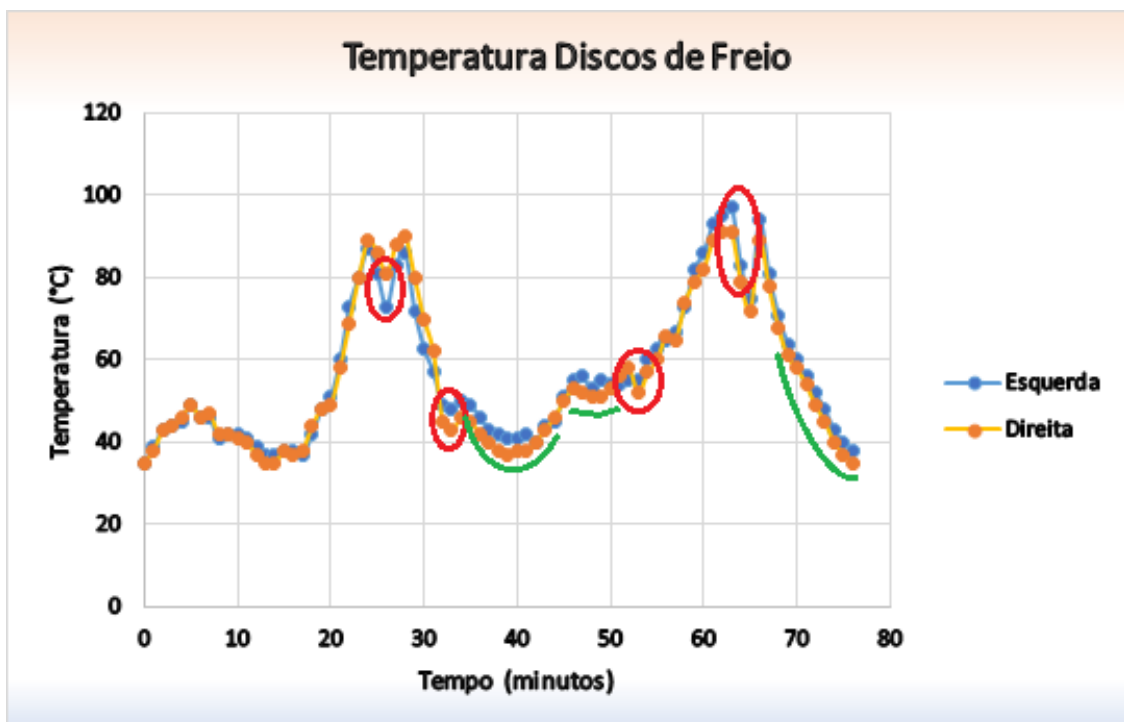


Fonte: Autoria própria

Observando a Figura 4.22, torna-se evidente que as diferenças térmicas entre os dois discos não são significativas a ponto de julgar que algum componente dos sistemas de freio

esteja com defeito ou desregulado. Um fato importante a ser ressaltado é que nenhum dado foi descartado no decorrer desses 76 minutos, justamente para evidenciar alguns pontos em que a temperatura se encontra um pouco diferente nas duas rodas, mas logo em seguida volta ao padrão, devido à captação na pastilha, ao invés do disco. Esses pontos são destacados com círculos vermelhos. Os intervalos destacados por uma linha verde estão um pouco divergentes, porém com continuidade. Isso se deve a algum fator externo como a posição em que o sol se encontra, ou até mesmo a carga de ar quente que veículos ao redor geram pelo motor à combustão. Há muitos fatores a serem levados em conta quando se trata de obtenção de temperatura fora de um ambiente controlado. Outra possibilidade é que o veículo possa estar exigindo um pouco mais do lado esquerdo, mas não suficientemente relevante para haver preocupação.

Figura 4.22 - Desbalanços térmicos



Fonte: Autoria própria

Ao final dos testes o protótipo físico não demonstrou nenhuma alteração, tornando como evidência a boa fixação dos componentes na calota.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram realizados protótipos físicos capazes de medir a temperatura de discos de freio de veículos a fim de se obter dados de ambas as rodas para a assimilação da informação de diferença térmica entre elas visando o conceito de IoT. Com o desenvolvimento deste conhecimento, é concebível presumir se há ou não alguma disfunção dos sistemas de freio de modo que a pastilha solicite um lado mais que o outro.

Os componentes principais para o cumprimento desta função são os microcontroladores ESP8266, por conseguirem se comunicar com o usuário via internet e sensores de temperatura infravermelhos MLX90614, capazes de obter a temperatura do objeto sem a necessidade de estar em contato físico. O estudo teve auxílio de simulações computacionais e de um aplicativo que faz a comunicação entre o módulo e o usuário por meio de um servidor.

A relevância do tema pode ser verificada primeiramente por envolver uma nova ferramenta para a análise de componentes com deformidades no sistema de freio do veículo, o que ocasiona em um acréscimo para a segurança, podendo evitar acidentes ocasionados por esta condição irregular. Outra questão importante a ser abordada é a atuação da IoT, um importante fundamento da Indústria 4.0, que vem induzindo positivamente a economia mundial.

A produção de um protótipo, juntamente com a realização de simulações computacionais, evidencia a perspicácia que um Engenheiro Mecânico deve possuir na busca por dados verídicos, conciliando metodologias diferentes para o auxílio mútuo entre elas.

A simulação computacional pelo Métodos dos Volumes Finitos harmoniza-se melhor para este trabalho do que pelo Método dos Elementos Finitos, por retratar mais fidedignamente de uma situação real. Além de auxiliar na confecção do protótipo, foi muito similar ao caso real, comprovando assim a sua autenticidade. O modelo físico também apresentou resultados apropriados, não demonstrando defeito em nenhum momento, apenas com o empecilho de que uma parcela dos dados obtidos é proveniente da temperatura da parte posterior da pastilha de freio, e não do disco em si.

A partir dos dados do modelo físico é possível concluir que há condições de verificar se possui urgência da necessidade da manutenção dos sistemas de freio do veículo, mas não descarta a sua revisão de maneira periódica. Além disso, os testes puderam destacar a importância de simular por meio de CFD, devido à grande influência na dissipação térmica da temperatura para o ambiente pela convecção forçada.

É possível afirmar que os objetivos foram cumpridos. A IoT ganhou seu destaque neste trabalho por possuir fundamental importância para o estudo de caso real, interconectando os módulos e o usuário à distância para qualquer lugar do mundo que possua conexão de internet e em tempo real. Também foi demonstrada a aplicação de simulações computacionais e a comparação de dados com o caso real por meio de um sensor de temperatura infravermelho.

É importante destacar que o foco do dispositivo portátil neste trabalho não é sua configuração sobre a roda, mas sim a sua função de coleta de dados. Por mais que sua estrutura improvisada atende aos critérios, há a possibilidade de um melhor estudo para acoplamento dos componentes na calota, ou até mesmo o uso de impressora 3D para o aperfeiçoamento desta questão.

Desta maneira, o protótipo físico pode ser melhorado em dois aspectos: a sua impermeabilização e imobilidade. A partir do momento em que se torne impermeável, sua necessidade de desacoplamento na roda torna-se facultativa, contanto que o usuário preserve sua estrutura, não a danificando por meio de forças externas. Se o sistema passar a ser imóvel, haverá melhor qualidade nos dados obtidos, pois o sensor irá captar apenas a temperatura do disco, além de que não haverá a força centrífuga proveniente da rotação da roda. Unindo estes dois fatores, o sistema poderá ficar fixo e localizado na parte inferior do veículo, ao invés de acoplado na calota, diminuindo consideravelmente suas limitações.

Trabalhos futuros podem ser desempenhados a fim de realizar: a pesquisa da influência da umidade relativa do ar na dissipação térmica do disco de freio; os efeitos do *fading* nos discos de freio em uma área de testes sem riscos para o usuário e a população e com um sensor que consiga captar temperatura elevada; a diferença térmica entre os diferentes modelos de disco de freio e no caso do veículo possuir freio a disco nas quatro rodas, analisar a diferença da solicitação de frenagem traseira e dianteira do veículo, necessitando assim de quatro dispositivos, ao invés de apenas dois.

REFERÊNCIAS

- ALIZADEHDAKHEL, A.; RAHIMI, M.; ALSAIRAFI, A. A. **CFD Modeling of Flow and Heat Transfer in a Thermosyphon**. International Communications in Heat and Mass Transfer, v. 37, 3 ed, p. 312-318, 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0735193309002188/>>. Acesso em: 24 abr. 2021.
- ALVES, R. H. **Análise de Desgaste em Materiais Aplicados em Discos de Freio**, p. 48. UNESP, 2015.
- AMORIM, JR. J. P.; RIBEIRO, C. M.; COLISTETE, JR. R. **Medição Remota de Parâmetros Elétricos Usando IoT Baseada no Microcontrolador ESP32**. In Blucher Physics Proceedings, Espírito Santo: Editora Blucher, p. 109–116, 2019. Disponível em: <<http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/33237/>>. Acesso em: 11 mar. 2021.
- BELHOCINE, A.; BOUCHETARA, M. **Temperature and Thermal Stresses of Vehicles Gray Cast Brake**. Journal of Applied Research and Technology, v. 11, p. 674-682, 2013.
- BERNSTEIN, J. H. **The Data-information-knowledge-wisdom Hierarchy and its Antithesis**. Nasko, v. 2, n. 1, p. 68-75, 2009.
- BREMBO. **Qual Disco de Freio Escolher? Melhor Perfurado ou Ranhurado?** Disponível em: <<https://www.brembo.com/en/company/news/disco-perfurado-ranhurado-brembo/>>. Acesso em: 3 mar. 2021.
- CARIGNANI, M.; FERRINI, S.; PETRACCA, M.; FALCITELLI, M.; PAGANO, P. **A Prototype Bridge Between Automotive and the IoT**. IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Milan, Italy, p. 12-17, 2015.
- COELHO, P. M. N. **Rumo à Indústria 4.0**. Tese de Mestrado - Universidade de Coimbra, 2016. Disponível em: <<https://estudogeral.sib.uc.pt/handle/10316/36992/>>. Acesso em: 11 mar. 2021.
- COSTA, E. V.; LEITE, C. A. F. **Deslocamento da Força Normal à Superfície de Apoio a um Corpo em Equilíbrio na Presença da Força de Atrito**. Rev. Bras. Ensino Fís, São Paulo, v. 32, n. 4, p. 4301-1-4301-3, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172010000400001&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 7 abr. 2021.
- COUTINHO, A. A.; CARNEIRO, E.; GREVE, F. **Computação em Névoa: Conceitos, Aplicações e Desafios**. p. 266–315, 2016.
- ESPRESSIF. **ESP8266. A Cost-effective and Highly Integrated Wi-Fi MCU for IoT Applications**. Disponível em: <<https://www.espressif.com/en/products/socs/esp8266/>>. Acesso em: 27 mar. 2021.

FREMAX. **Conheça as 10 Principais Causas de Superaquecimento do Disco de Freio.** 2017. Disponível em: <<https://www.fremax.com.br/br/artigo/39/conheca-as-10-principais-causas-de-superaquecimento-do-disco-de-freio/>>. Acesso em: 12 mar. 2021.

GONÇALVES, E. **Indústria 4.0 e o Impacto Positivo na Economia do Brasil.** 2018. Disponível em: <<https://avozdaindustria.com.br/ind-stria-40-totvs/ind-stria-40-e-o-impacto-positivo-na-economia-do-brasil/>>. Acesso em: 12 mar. 2021.

GONÇALVES, N. D. F. et al. **Método dos Volumes Finitos em Malhas não estruturadas.** 2007.

GUESSER, W. L. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos.** 2ª edição. Blucher, 2019.

HEISLER, H. **Advanced Vehicle Technology.** p. 656. Warrendale: Butterworth-Heinemann, 2002.

INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P.; BERGMAN, T. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa.** 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, p. 664, 2008.

INFANTINI, M. B. **Variáveis de Desempenho dos Sistemas de Freio.** 2008. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/13947/>>. Acesso em: 12 mar. 2021.

KOHUT, J. C. **Monitoramento Inteligente do Fluxo de Ar em Motores à Combustão Interna.** p. 69, 2018.

KRUMMEL, D. C. **Análise de Desempenho entre Pastilhas de Freio do Mercado de Reposição e Original.** p. 20, 2014.

LAWAL; KEHINDE; RAFSANJANI, H. N. **Trends, Benefits, Risks, and Challenges of IoT Implementation in Residential and Commercial Buildings.** Energy and Built Environment. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666123321000167/>>. Acesso em: 9 mar. 2021.

LEE, S. H. **A CAD–CAE Integration Approach Using Feature-based Multi-resolution and Multi-abstraction Modelling Techniques.** Computer-Aided Design, v. 37, 9 ed, p. 941-955, 2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448504002611/>>. Acesso em: 22 abr. 2021.

LIMPERT, R. **Brake Design and Safety.** 2 ed. Warrendale, US: Society of Automotive Engineers. Elsevier Ltd., 1999.

LIVRAMENTO, L. V. P. **Análise de Propriedades Mecânicas e Composição Química de Discos de Freio de Veículos de Passeio.** p. 68, 2017.

LOTTI, Raquel S. et al. **Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos.** Rev. Dent. Press Ortodon. Ortop. Facial, Maringá, v. 11, n. 2, p. 35-43, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-54192006000200006&lng=en&nrm=iso/>. Acesso em: 3 Maio 2021.

MADAKAM, S.; RAMASWAMY, R.; TRIPATHI, S. **Internet of Things (IoT): A Literature Review**. Journal of Computer and Communications. 3 ed. p. 164-173, 2015.

MARTINS, I. R.; ZEM, J. L. **Estudo dos Protocolos de Comunicação MQTT e COaP para Aplicações Machine-to-machine e Internet das Coisas**. *Revista Tecnológica da Fatec Americana* 3(1): p. 64-87, 2015.

MQTT. **MQTT - O Padrão Para Mensagens IoT**. Disponível em: <<https://mqtt.org/>>. Acesso em: 12 abr. 2021.

OLIVEIRA, R. R. **Uso do Microcontrolador ESP8266 para Automação Residencial**. p. 55, 2017.

OLIVEIRA, S. **Internet das Coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry Pi**. 1 ed. São Paulo: Novatec Editora, 2017.

PINTO, R. L. M. et al. **Análise Comparativa do Efeito Térmico e do Desgaste Sofrido por um Material de Fricção de Freio a Disco Submetido a Ensaio em Bancada Krauss com Variações de Potência Motora e Condições Operacionais**. *Matéria (Rio J.)*, Rio de Janeiro, v. 25, n. 3, e-12809, 2020. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762020000300328&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 7 abr. 2021.

PINTO, R. L. M. et al. **Aplicação de Técnicas de Planejamento de Experimentos para Otimização do Comportamento Tribológico e Térmico de Materiais de Atrito Durante o Processo de Frenagem**. *Matéria (Rio J.)*, Rio de Janeiro, v. 22, supl. 1, e11911, 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762017000500405&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 7 abr. 2021.

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

RIPKA, P.; TIPEK, A. **Modern Sensors Handbook**: Instrumentation and Measurement Series. London, UK: Editora ISTE, 2007.

RODRIGUEZ, H. **Qual a Diferença entre Freios Ventilados, Perfurados e Sólidos?** 2017. Disponível em: <<https://quatorrodas.abril.com.br/auto-servico/qual-a-diferenca-entre-os-freios-ventilados-perfurados-e-solidos/>>. Acesso em: 3 mar. 2021.

SANTORO, D. **Solid Edge. Siemens. Projeto 3D, Simulação, Manufatura**. Disponível em: <<https://solidedge.siemens.com/pt-br/>>. Acesso em: 22 abr. 2021.

SCLAR, D. **Mecânica de Automóveis**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Alta Books, 2015.

SERRANO, T. M. **Introdução ao Blynk App**. 2018. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/introducao-ao-blynk-app/>>. Acesso em: 25 jul. 2021.

SCHAUN, A. **Os 50 Carros Mais Vendidos de 2020**. 2021. Disponível em: <<https://autoesporte.globo.com/mercado/noticia/2021/01/os-50-carros-mais-vendidos-de-2020.ghtml/>>. Acesso em: 3 mar. 2021.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, Richard G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. p. 960. Porto Alegre: Bookman, 2005.

SILVA, F. O. F. 2016. **Dinâmica de Frenagem e Análise Térmica de Freio a Disco Ventilado Automotivo**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2016. Disponível em: <http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=30614@1>. Acesso em: 9 ago. 2021.

SILVA, R. F. A. **Projeto e Desenvolvimento de um Sistema de Medição sem Contato Aplicado ao Processo de Torneamento**. 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/>>. Acesso em: 22 mar. 2021.

SILVA, R. T. G., & SALES, A. K. M. **Desenvolvimento de um Sistema de Domótica sem Fio de Baixo Custo Utilizando o Microcontrolador ESP8266**. 2017.

SOUZA, E. L. **Fabricação e Caracterização de um Sensor Múltiplo Sensível à Posição**. 2011. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/49066/>>. Acesso em: 22 mar. 2021.

TORRES, A. B. B.; ROCHA, A. R.; DE SOUZA, J. N. **Análise de Desempenho de Brokers MQTT em Sistema de Baixo Custo**. In: WORKSHOP EM DESEMPENHO DE SISTEMAS COMPUTACIONAIS E DE COMUNICAÇÃO (WPERFORMANCE), 15, Anais do XV Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação. p. 47-58, 2016.

UFSM. **Competências e Habilidades**. Engenharia Mecânica. Disponível em: <<https://www.ufsm.br/cursos/graduacao/santa-maria/engenharia-mecanica/competencias-e-habilidades/>> Acesso em: 22 abr. 2021.

USINAINFO. **Sensor de Temperatura Infravermelho IR MLX90614 / MLX90615**. Disponível em: <<https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-temperatura/sensor-de-temperatura-infravermelho-ir-mlx90614-para-medicoes-sem-contato-4471.html/>>. Acesso em: 22 mar. 2021.

APÊNDICES

APÊNDICE A - CÓDIGO PROGRAMADO NO MÓDULO ESP8266 WEMOS D1 R2

```
#include <ESP8266WiFi.h> //Biblioteca do ESP8266
#include <BlynkSimpleEsp8266.h> //Biblioteca do app "Blynk"
#include <Adafruit_MLX90614.h> //Biblioteca do sensor MLX90614

Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();

char auth[] = "e*****"; //Token de autenticação obtido pelo app

char ssid[] = "J***"; //Nome da rede
char pass[] = "a*****"; //Senha da rede

BLYNK_READ(V0) //Leitor de pino virtual
{
  Blynk.virtualWrite(V0, mlx.readObjectTempC()); //Leitura da temperatura do sensor
}

void setup()
{
  Serial.begin(9600); //Iniciar porta serial com taxa de dados de 9600 bps

  Blynk.begin(auth, ssid, pass); //Iniciar autenticador, nome da rede e senha

  mlx.begin(); //Iniciar o sensor
}

void loop()
{
  Blynk.run(); //Comunicação com o aplicativo sempre em execução
}
```