

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS DOS SANTOS SCHURT

BRUNO WECKERLIN BOSCHINI

**SISTEMA DE TELEMETRIA AUTOMOTIVA E ANÁLISE DE DADOS EM TEMPO
REAL APLICADO AO FORMULA SAE**

CURITIBA

2025

**LUCAS DOS SANTOS SCHURT
BRUNO WECKERLIN BOSCHINI**

**SISTEMA DE TELEMETRIA AUTOMOTIVA E ANÁLISE DE DADOS EM TEMPO
REAL APLICADO AO FORMULA SAE**

**Automotive Telemetry and Data Analysis System in Real Time for Formula
SAE**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica do
curso de Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Prof. Dr. Narco Afonso Ravazzoli
Maciejewski

**CURITIBA
2025**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**LUCAS DOS SANTOS SCHURT
BRUNO WECKERLIN BOSCHINI**

**SISTEMA DE TELEMETRIA AUTOMOTIVA E ANÁLISE DE DADOS EM TEMPO
REAL APLICADO AO FORMULA SAE**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica do
curso de Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 26/novembro/2025

Narco Afonso Ravazzoli Maciejewski
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Juan Camilo Castellanos Rodriguez
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Hebert Douglas Pereira
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA
2025**

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente às nossas famílias, pelo apoio incondicional ao longo de toda a nossa jornada acadêmica. Sua compreensão, incentivo e paciência foram fundamentais para que este trabalho se concretizasse. Cada palavra de estímulo, cada gesto de carinho e cada momento de suporte contribuíram para que pudéssemos avançar mesmo diante dos maiores desafios.

Expressamos também nossa sincera gratidão ao Prof. Dr. Narco Afonso Ravazzoli Maciejewski, cuja orientação dedicada e rigor científico foram essenciais para o desenvolvimento deste projeto. Sua disponibilidade, expertise e comprometimento tiveram impacto direto neste trabalho e no nosso crescimento como engenheiros.

Estendemos nossos agradecimentos a todos os professores que nos acompanharam ao longo da graduação. Cada disciplina, conselho e desafio proposto contribuiu de forma significativa para nossa formação técnica e humana. Somos gratos a todos que, direta ou indiretamente, participaram dessa trajetória, transmitindo conhecimento, valores e profissionalismo.

Por fim, agradecemos a todos que colaboraram de alguma forma com este projeto — colegas de laboratório, equipes de competições, amigos e demais colaboradores que estiveram presentes compartilhando experiências, sugestões e apoio. Este trabalho é resultado de um esforço coletivo e de uma jornada marcada por aprendizado, dedicação e colaboração.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema de telemetria automotiva voltado à coleta e transmissão de dados em tempo real para o monitoramento do desempenho de veículos de competição na Formula SAE Brasil. A competição Formula SAE desafia equipes de estudantes a projetarem, construírem e competirem com carros de fórmula, exigindo a aplicação de tecnologias inovadoras e multidisciplinares, especialmente no que se refere ao monitoramento e análise de dados veiculares. O sistema de telemetria desenvolvido neste estudo integrou sensores para o monitoramento de variáveis críticas e realizou a transmissão em tempo real das informações à equipe técnica durante os testes, por meio de protocolos de comunicação eficientes que garantiram a integridade dos dados mesmo em condições adversas. O trabalho concentrou-se no desenvolvimento e validação do hardware e do software embarcados, com ênfase na confiabilidade, precisão e eficiência da aquisição e transmissão de dados. Os resultados experimentais demonstraram que o sistema foi capaz de adquirir e transmitir, em tempo real, parâmetros como rotação do motor, pressão no coletor de admissão, posição da borboleta de aceleração, temperatura e aceleração lateral. Os testes em pista, incluindo o ensaio de *SkidPad*, confirmaram a precisão das medições e a estabilidade da comunicação 4G, permitindo à equipe identificar variações dinâmicas de aceleração e resposta do motor durante curvas e retomadas. Como principais contribuições, destacam-se o desenvolvimento de uma arquitetura embarcada modular e de baixo custo, a implementação de uma comunicação robusta entre os módulos de aquisição e transmissão e a validação experimental em ambiente competitivo, demonstrando a viabilidade da aplicação em veículos de alto desempenho. O sistema proposto mostrou-se uma alternativa prática e eficiente para equipes de Formula SAE, contribuindo para a melhoria do processo de análise de dados e para o avanço das pesquisas em telemetria automotiva.

Palavras-chave: telemetria; formula sae; sistema 4g; rede can; microcontroladores.

ABSTRACT

This work aimed to develop an automotive telemetry system focused on real-time data collection and transmission for monitoring the performance of competition vehicles in Formula SAE Brazil. The Formula SAE competition challenges student teams to design, build, and compete with formula-style cars, requiring the application of innovative and multidisciplinary technologies, particularly regarding vehicle data monitoring and analysis. The telemetry system developed in this study integrated sensors for monitoring critical variables and performed real-time transmission of information to the technical team during testing through efficient communication protocols that ensured data integrity, even under adverse conditions. The work focused on the development and validation of embedded hardware and software, emphasizing the reliability, accuracy, and efficiency of data acquisition and transmission. Experimental results demonstrated that the system was capable of acquiring and transmitting, in real time, parameters such as engine speed, intake manifold pressure, throttle position, temperature, and lateral acceleration. On-track tests, including the *SkidPad* event, confirmed the accuracy of measurements and the stability of 4G communication, allowing the team to identify dynamic variations in acceleration and engine response during cornering and acceleration phases. The main contributions include the development of a modular and low-cost embedded architecture, the implementation of a robust communication interface between acquisition and transmission modules, and the experimental validation in a competitive environment, demonstrating the feasibility of applying the system to high-performance vehicles. The proposed system proved to be a practical and efficient alternative for Formula SAE teams, contributing to the improvement of data analysis processes and advancing research in automotive telemetry.

Keywords: telemetry; formula student; 4g communication; can network; microcontrollers.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Elementos básicos de um sistema de telemetria	17
Figura 2 – Estrutura interna de um microcontrolador	21
Gráfico 1 – Relação entre transmissão de dados e o comprimento da rede	26
Gráfico 2 – Níveis de sinal do barramento CAN	26
Figura 3 – Estrutura de uma mensagem de dados	27
Figura 4 – Sensor de posição TPS	32
Figura 5 – Utilização de um sensor de efeito Hall em um motor de combustão interna	32
Gráfico 3 – Comparação entre termistores PTC e NTC	33
Figura 6 – Sensor MAP	34
Figura 7 – Fluxograma dos esquemas funcionais do sistema de telemetria	40
Figura 8 – Renderização da placa de telemetria	41
Fotografia 1 – Fotografia da placa de telemetria construída	41
Figura 9 – Proteção do sistema de alimentação da placa de telemetria	42
Figura 10 – Regulador de tensão empregado no projeto do sistema de telemetria	42
Figura 11 – Multiplexador <i>CD74HC4067</i>	43
Figura 12 – Conversor de nível das portas digitais	43
Figura 13 – Divisor de tensão entre multiplexador e conversor digital-analógico	44
Figura 14 – Amplificador operacional funcionando em modo <i>buffer</i>	44
Figura 15 – Porta lógica de monitoramento de tensão	44
Figura 16 – Sensor de tensão da bateria	45
Figura 17 – Sensor de temperatura interna da placa	45
Figura 18 – Sistema de sensoreamento de marchas	45
Figura 19 – Sistema de sensoreamento de aceleração	46
Figura 20 – Circuito com amplificador operacional em modo comparador para leitura de RPM	46
Figura 21 – Topologia do filtro passa-baixa	47
Figura 22 – Microcontrolador STM32F103 <i>Blue-Pill</i>	47
Figura 23 – Circuito de comunicação com a rede CAN	48
Figura 24 – Microcontrolador ESP32	48
Figura 25 – Circuito Real-Time-Clock	49
Figura 26 – Módulo SIM7600G para transmissão de dados via 4G	49
Figura 27 – Módulo de cartão SD	50
Figura 28 – Renderização do módulo do display LCD	51
Figura 29 – Renderização do circuito do módulo do display LCD	51
Figura 30 – Fluxo geral das funções implementadas no STM32, incluindo aquisição CAN e processamento inicial dos sensores	52
Figura 31 – Fluxo das rotinas do ESP32, abrangendo leitura filtrada, armazenamento e envio dos dados via MQTT	53
Figura 32 – Interface do Visual Studio Code	54
Figura 33 – Interface gráfica do STM32CubeMX	55
Figura 34 – Diagrama de casos de uso do Sistema de Telemetria	58
Figura 35 – Estrutura de comunicação baseada no modelo publisher/subscriber do protocolo MQTT	60
Figura 36 – Traçado em formato de “oito” utilizado na competição de <i>SkidPad</i>	63
Fotografia 2 – Veículo Formula SAE da UTFPR realizando o teste de <i>skidpad</i> no Campus Neville, equipado com o sistema de telemetria desenvolvido	63

Gráfico 4 – Sinais de pressão no coletor, vazão mássica de ar, rotação do motor e posição da borboleta coletados durante a volta de teste	70
Gráfico 5 – Correlação entre o ângulo de direção e a rotação do motor durante o teste de <i>SkidPad</i>	71
Gráfico 5 – Representação dos diferentes tipos de traçado e comportamento de <i>oversteer</i>	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre os microcontroladores <i>STM32F103</i> , <i>ESP32</i> e <i>NXP S32K144</i>	24
Tabela 2 – Dados experimentais utilizados na calibração do termistor NTC.	61
Tabela 3 – Coeficientes ajustados da equação de Steinhart–Hart.	61
Tabela 4 – Trechos dos dados armazenados no cartão SD.	67
Tabela 5 – Sequência de comandos AT utilizados no envio de dados via MQTT.....	68
Tabela 6 – Exemplo de mensagem recebida via MQTT em regime de marcha lenta (<i>Idle</i>).....	69
Tabela 7 – Mensagem recebida via MQTT em regime de alta rotação.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3G	Terceira Geração de Comunicação Móvel
4G	Quarta Geração de Comunicação Móvel
5G	Quinta Geração de Comunicação Móvel
ABS	Sistema de Freios Antitravamento, do inglês <i>Anti-lock Braking System</i>
ACK	Sinal de reconhecimento, do inglês <i>Acknowledgment</i>
ADC	Conversor Analógico–Digital, do inglês <i>Analog-to-Digital Converter</i>
ADAS	Sistemas Avançados de Assistência ao Motorista, do inglês <i>Advanced Driver Assistance Systems</i>
AT	Conjunto de comandos de controle para modems, conhecidos como comandos <i>AT (Attention)</i>
ASCII	Código Padrão Americano para Intercâmbio de Informação, do inglês <i>American Standard Code for Information Interchange</i>
BMS	Sistema de Gerenciamento de Bateria, do inglês <i>Battery Management System</i>
CAD	Desenho Assistido por Computador, do inglês <i>Computer Aided Design</i>
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CSV	<i>Comma-Separated Values</i>
DPF	Filtro de Particulados de Diesel, do inglês <i>Diesel Particulate Filter</i>
ECU	Unidade de Controle Eletrônica, do inglês <i>Electronic Control Unit</i>
ESP	Programa Eletrônico de Estabilidade, do inglês <i>Electronic Stability Program</i>
FAT32	<i>File Allocation Table 32 bits</i>
FreeRTOS	Sistema operacional de tempo real de código aberto, do inglês <i>Free Real-Time Operating System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GND	Referência de terra elétrica, do inglês <i>Ground</i>
GPIO	Pinos de Entrada/Saída de Uso Geral, do inglês <i>General Purpose Input/Output</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSM	Sistema Global para Comunicações Móveis, do inglês <i>Global System for Mobile Communications</i>
HAL	<i>Hardware Abstraction Layer</i>
HTTP	Protocolo de Transferência de Hipertexto, do inglês <i>Hypertext Transfer Protocol</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
I/O	Entrada e Saída, do inglês <i>Input/Output</i>
ID	Identificador, do inglês <i>Identifier</i>
IMU	Unidade de Medição Inercial, do inglês <i>Inertial Measurement Unit</i>
IoT	Internet das Coisas, do inglês <i>Internet of Things</i>
IP	Protocolo de Internet, do inglês <i>Internet Protocol</i>
LED	Diodo Emissor de Luz, do inglês <i>Light-Emitting Diode</i>

LTE	<i>Long Term Evolution</i>
M2M	Comunicação Máquina-a-Máquina, do inglês <i>Machine to Machine</i>
MAF	Vazão Mássica de Ar, do inglês <i>Mass Air Flow</i>
MAP	Pressão Absoluta do Coletor, do inglês <i>Manifold Absolute Pressure</i>
MCU	Unidade de Microcontrolador, do inglês <i>Microcontroller Unit</i>
MISO	Linha de dados Mestre-Entrada Escravo-Saída, do inglês <i>Master In Slave Out</i>
MOSI	Linha de dados Mestre-Saída Escravo-Entrada, do inglês <i>Master Out Slave In</i>
MQTT	Protocolo de Transporte de Telemetria via Fila de Mensagens, do inglês <i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
NTP	Protocolo de Tempo de Rede, do inglês <i>Network Time Protocol</i>
NTC	Termistor de Coeficiente Negativo de Temperatura, do inglês <i>Negative Temperature Coefficient</i>
NRZ	Codificação <i>Non-Return to Zero</i>
OBD	Diagnóstico a Bordo, do inglês <i>On-Board Diagnostics</i>
PCB	Placa de Circuito Impresso, do inglês <i>Printed Circuit Board</i>
PTC	Coeficiente de Temperatura Positivo, do inglês <i>Positive Temperature Coefficient</i>
PWM	Modulação por Largura de Pulso, do inglês <i>Pulse Width Modulation</i>
QoS	Qualidade de Serviço, do inglês <i>Quality of Service</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RTC	Relógio de Tempo Real, do inglês <i>Real-Time Clock</i>
RTOS	Sistema Operacional em Tempo Real, do inglês <i>Real-Time Operating System</i>
SCK	Linha de clock serial, do inglês <i>Serial Clock</i>
SD	<i>Secure Digital</i>
SCR	Sistema de Redução Catalítica, do inglês <i>Selective Catalytic Reduction</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TCP/IP	Conjunto de protocolos <i>Transmission Control Protocol / Internet Protocol</i>
TPS	Sensor de Posição da Borboleta, do inglês <i>Throttle Position Sensor</i>
TWAI	Interface Automotiva de Área de Controle (CAN nativo do ESP32)
UART	Transmissor-Receptor Assíncrono Universal, do inglês <i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
USB	Barramento Serial Universal, do inglês <i>Universal Serial Bus</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WCDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Código em Banda Larga, do inglês <i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
WEC	<i>World Endurance Championship</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
1.2	Enquadramento Metodológico e Metodologia de Pesquisa	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Aquisição e Processamento de Dados	19
2.2	Microcontroladores	20
2.2.1	Microcontrolador <i>STM32F103</i>	22
2.2.2	Microcontrolador ESP32	23
2.3	Sistemas de Comunicação	24
2.3.1	Sistema de Comunicação Serial	25
2.3.1.1	Protocolo CAN de Comunicação	25
2.3.1.2	Sistema de Conexão USB	27
2.3.2	Protocolo de Comunicação de Telefonia Móvel	28
2.3.2.1	Tecnologia 4G de Comunicação	28
2.3.3	Protocolo de Rede MQTT	29
2.4	Métodos de Sensoriamento Automobilístico	30
2.4.1	Métodos de Sensoriamento de Posição	31
2.4.1.1	Métodos Resistivos para Medição de Posição	31
2.4.1.2	Uso de Efeito Hall para Medição de Posição	31
2.4.2	Métodos de Medição de Temperatura	32
2.4.3	Métodos de Medição de Pressão	34
2.4.4	Métodos de Medição de Aceleração	34
2.4.5	Medição de Variáveis da Combustão	35
2.4.6	Métodos de Calibração	36
2.4.6.1	Calibração Estática	37
2.4.6.2	Calibração Dinâmica	37
2.4.6.3	Calibração por Referência	38
2.4.6.4	Calibração Multivariada	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	Hardware de Telemetria	40
3.1.1	Alimentação	41
3.1.2	Aquisição de Dados	43
3.1.3	Comunicação	47
3.1.4	Processamento	47
3.1.5	Saída de Dados	49
3.1.6	<i>Display LCD</i>	50
3.2	Software de Telemetria	52
3.2.1	Ambientes de Desenvolvimento	53
3.2.1.1	<i>Visual Studio Code</i>	53
3.2.1.2	<i>STM32CubeMX</i>	54
3.2.2	Software de Aquisição de Dados	54
3.2.3	Envio de Dados do STM32 para a Rede CAN	56
3.2.4	Software de Processamento de Dados no ESP32	57
3.2.5	Software de Envio de Dados via Rede 4G	58
3.2.6	Recebimento de Dados via <i>Broker</i> MQTT	59

3.3	Procedimentos de Calibração do Sistema.....	61
3.3.1	Calibração do Sensor de Temperatura	61
3.3.2	Calibração dos Sensores de Aceleração	62
3.4	Procedimento de Validação do Sistema	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1	Resultado de Uso de Recursos do Sistema Embarcado.....	65
4.1.1	Uso de Memória no ESP32.....	65
4.1.2	Taxa de Ocupação do Barramento CAN	65
4.1.3	Latência do Sistema	66
4.2	Resultados Adquiridos e Armazenados via Cartão SD	66
4.3	Resultados Enviados via Telemetria	67
4.3.1	Estrutura das Mensagens MQTT Enviadas pelo SIM7600G	68
4.3.2	Resultados dos Primeiros Testes Estáticos (Marcha Lenta e Alta Rotação)	69
4.3.3	Resultados Dinâmicos e Análise dos Gráficos de Telemetria	69
5	CONCLUSÃO	73
	REFERÊNCIAS.....	74
	APÊNDICE A – Circuito projetado de potência e leitura de sensores	79
	APÊNDICE B – Circuito projetado para o STM32	81
	APÊNDICE C – Circuito projetado para o ESP32	83
	APÊNDICE D – Circuito projetado dos periféricos do ESP32	85
	APÊNDICE E – Circuito projetado do acelerômetro	87
	APÊNDICE F – Circuito projetado dos conectores	89
	APÊNDICE G – Circuito projetado do <i>Display LCD</i>	91
	APÊNDICE H – Repositório <i>Github</i> para o código do <i>ESP32</i>	93
	APÊNDICE I – Repositório <i>Github</i> para o código do <i>STM32</i>	95
	APÊNDICE J – Repositório <i>Github</i> para o código do <i>Display LCD</i>	97

1 INTRODUÇÃO

A Formula SAE é uma competição acadêmica que reúne estudantes de engenharia de diversas instituições de ensino superior, desafiando-os a projetar, construir e competir com veículos automotivos de alta performance. Essa competição, que simula as condições de um ambiente profissional, oferece uma experiência prática valiosa, permitindo que os participantes apliquem conceitos teóricos em um contexto realista. A Formula SAE não apenas testa as habilidades técnicas dos estudantes, mas também promove o trabalho em equipe, a gestão de projetos e a inovação, preparando-os para enfrentar os desafios da indústria automobilística (SAE BRASIL, 2025). A competição ocorre anualmente, e as equipes devem apresentar um protótipo desenvolvido durante esse período. Para os estudantes que precisam planejar, projetar e construir seu veículo, é fundamental uma eficiência no cronograma de cada etapa para que seja possível testar e validar o projeto. Esses testes não apenas servem como base para o desenvolvimento do veículo atual, mas também fornecem dados valiosos que podem ser utilizados em projetos futuros.

Dentro desse cenário competitivo, uma das ferramentas mais cruciais que uma equipe de corrida pode utilizar é a informação. Quanto maior a quantidade de dados que uma equipe consegue reunir e processar, mais eficaz será seu julgamento na tomada de decisões estratégicas. A aquisição de dados fornece aos engenheiros as informações essenciais para avaliar o desempenho do veículo (Segers, 2008). A telemetria automotiva, nesse contexto, emerge como uma tecnologia fundamental para o monitoramento contínuo e a otimização do desempenho dos veículos. A implementação eficaz de um sistema de telemetria pode resultar em melhorias significativas na performance do veículo, permitindo que as equipes façam ajustes em tempo real baseados em dados precisos. Por exemplo, na Fórmula 1, a telemetria fornece *insights* em tempo real sobre o desempenho do carro, permitindo ajustes imediatos que melhoram significativamente o desempenho durante as corridas (Catapult, 2025). Isso possibilita que os engenheiros identifiquem áreas de melhoria, ajustem a calibração dos sistemas e respondam rapidamente a quaisquer problemas que possam surgir durante a corrida. Com base nisso, o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados em tempo real tem o potencial de possibilitar uma maior dinâmica na coleta das informações durante os testes. Isso permite que os dados sejam analisados em campo e remotamente, por meio da Internet, possibilitando inclusive o planejamento em paralelo do projeto seguinte, caso haja pessoas trabalhando nele.

Com o avanço de novas políticas ambientais, normas de segurança e a crescente conscientização do consumidor em relação a essas questões, os sistemas eletrônicos embarcados têm se tornado cada vez mais comuns na indústria automobilística global. A introdução de novas funcionalidades — como direção elétrica, freios ABS e sistemas avançados de assistência ao motorista — levou à necessidade de unidades de controle eletrônico (ECUs) dedicadas para cada uma dessas funções. Para gerenciar o número crescente de ECUs — que em alguns veículos já ultrapassa 100 — a rede CAN (Controller Area Network) foi desenvolvida, permitindo uma comunicação eficiente e integrada entre esses sistemas (Amend, 2017).

Na Europa, regulamentações rigorosas, como a Euro 6, estabeleceram limites de emissões de poluentes para veículos comerciais pesados, exigindo níveis de NOx e materiais particulados que só foram alcançados com a implementação de sistemas complexos, como o Sistema de Redução Catalítica (SCR) e o Filtro de Particulados de Diesel (DPF). Esses sistemas demandam um alto nível de eletrônica embarcada para o controle e a operação eficaz (ICCT, 2016). Desde a década de 1990, o setor de eletrônica embarcada tem crescido a uma taxa de 10% ao ano (Navet; Simonot-lion, 2009a). Além disso, com o surgimento da tecnologia de veículos autônomos e sistemas de comunicação entre veículos, espera-se que o número de sistemas eletrônicos embarcados continue a aumentar nos próximos anos (Brummelen *et al.*, 2018).

A integração e a comunicação entre diversos sistemas são cada vez mais necessárias, demandando uma rede de comunicação robusta e modular, capaz de atender às exigências de alta velocidade e precisão (Hermann; Pentek; Otto, 2015b). Dentro da Formula SAE, a telemetria não apenas possibilita a coleta de dados do veículo, mas também facilita a calibração dos sistemas, o diagnóstico de falhas e a validação de teorias de engenharia. Esse recurso tem sido amplamente utilizado em esportes automotivos, especialmente na Fórmula 1, que implementa essa tecnologia desde os anos 80, assim como nas competições organizadas pela World Endurance Challenge (WEC), que incluem eventos como as 24 Horas de *Le Mans*. Assim, a telemetria se torna uma aliada indispensável para o aprimoramento da performance dos veículos de competição, contribuindo para um avanço significativo na arquitetura eletrônica e na eficiência dos carros, ao mesmo tempo em que promove um ambiente de aprendizado prático e inovador para os estudantes de engenharia. A capacidade de coletar e analisar dados em tempo real não apenas enriquece a experiência dos participantes, mas também os prepara para um futuro em uma indústria automobilística em constante evolução, onde a tecnologia e a inovação são fundamentais para o desempenho.

Com base no exposto, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados em tempo real que seja remoto, robusto, confiável e de baixo custo. Esse sistema deve ser capaz de transmitir dados do veículo de maneira eficiente e permitir que uma equipe técnica visualize essas informações em tempo real, proporcionando *feedback* imediato ao piloto. Além disso, será possível analisar dados históricos para identificar falhas no veículo, possibilitando o diagnóstico e a implementação de soluções para problemas futuros. A precisão e confiabilidade do sistema são fundamentais, pois os dados coletados servirão como base para o desenvolvimento de projetos subsequentes e para a validação de testes. O sistema também precisa ser robusto o suficiente para garantir a confiabilidade das informações, mesmo em condições adversas, como poeira, vibração e altas temperaturas, assegurando a continuidade do monitoramento nesses cenários.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema embarcado de comunicação de baixo custo que possibilite a aquisição de dados em tempo real de forma remota para um veículo automotor em movimento participante da competição Formula SAE Brasil, visando validar teorias de engenharia aplicadas ao automobilismo.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para realização dos objetivos principais deste trabalho, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- Investigar os conceitos relacionados ao projeto de um sistema de telemetria em tempo real e ferramentas para análise de dados;
- Desenvolver e implementar sistemas auxiliares ao sistema de telemetria veicular em tempo real;
- Elaborar e validar sistema de telemetria veicular em tempo real;

1.2 Enquadramento Metodológico e Metodologia de Pesquisa

O estudo foi realizado seguindo a classificação de Azevedo e Ensslin (2020). Os procedimentos metodológicos empregados nesta pesquisa foram elencados em cinco etapas.

- Etapa 1 - Etapa de Pesquisa: Para a primeira etapa, será realizada uma pesquisa de componentes, utilizando-se de datasheets e referências bibliográficas para determinar quais melhor atenderão os requisitos de um veículo Formula SAE, considerando sensores e funcionalidades, além de custos de projeto.
- Etapa 2 - Etapa de Desenvolvimento de Hardware: Posteriormente, o desenvolvimento de uma Placa de Circuito Impresso (PCB) utilizando os componentes escolhidos durante a Etapa de Pesquisa, juntamente com uma estrutura para isolamento dos componentes, que atuarão em ambientes externos.
- Etapa 3 - Etapa de Desenvolvimento de *Software*: Prosseguindo com a etapa de *Software*, quando são desenvolvidos os códigos de programação para o sistema embarcado em C++, com as partes de aquisição e transmissão de dados, assim como para a leitura desses dados em computador, requisitando através do protocolo de comunicação (*Message Queuing Telemetry Transport*) via Internet.

- Etapa 4 - Etapa de Análise/Validação de Dados: Por fim, ocorre a análise e validação dos dados, onde a informação adquirida pelo sistema passa por um estudo e uma verificação de sua funcionalidade, testando propriamente no veículo em conjunto com o sistema de sensores, com o objetivo de envio e recepção das informações coletadas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A telemetria automotiva tem se mostrado essencial em competições de alto nível, como a Formula 1, *IndyCar* e, mais recentemente, no cenário estudantil da Formula SAE. Esses eventos exigem que as equipes coletem e analisem dados em tempo real para otimizar o desempenho dos veículos e tomar decisões estratégicas durante as provas. A coleta e a análise de dados ajudam engenheiros e técnicos a melhorar o desempenho dos veículos, ajustando estratégias de corrida e fazendo mudanças nos carros com base nas informações obtidas. Na Figura 1 é ilustrado o funcionamento básico de um sistema de telemetria, destacando seus principais componentes, como os transmissores, sensores, os meios de comunicação dos dados, os receptores, servidores e bancos de dados.



Fonte: (Alencar; Naves, 2023).

No contexto de veículos autônomos, o trabalho de Silva (2020) apresentou o desenvolvimento de um sistema de navegação projetado para conduzir veículos entre diferentes pontos de interesse em um ambiente aberto restrito, como pátios industriais. Esse estudo focou no cálculo de trajetórias e na prevenção de colisões, com validação em ambiente de simulação, demonstrando a viabilidade do uso da telemetria para monitoramento e controle de veículos autônomos. A pesquisa ressaltou a importância da telemetria na automação de veículos, permitindo que decisões precisas sejam tomadas com base nos dados coletados durante o percurso.

Além disso, a telemetria aplicada a veículos de competição também é abordada por Queirós (2011), que desenvolveu um sistema para monitoramento do desempenho de veículos elétricos de competição. Esse sistema de telemetria foi projetado para fornecer dados em tempo real para a equipe técnica, com o objetivo de otimizar o desempenho do veículo durante as provas. O trabalho demonstrou como a telemetria pode ser aplicada em veículos de alta performance, oferecendo informações cruciais para ajustes rápidos e eficientes.

Outra abordagem relevante foi apresentada por Sá (2007), que explorou sistemas distribuídos de aquisição de dados, destacando a importância da coleta simultânea de múltiplas variáveis e a precisão na análise desses dados. Esse conceito é fundamental para o desenvol-

vimento de sistemas de telemetria em competições como a Formula SAE, onde a velocidade e a confiabilidade na transmissão de dados são fatores decisivos para o desempenho do veículo.

Em relação aos sistemas de comunicação, Rocha (2019) analisou a utilização do protocolo CAN em aplicações off-road, destacando os benefícios dessa tecnologia, como a maior confiabilidade na transmissão e a preservação da integridade dos dados, mesmo em condições adversas. O estudo demonstrou que o protocolo CAN é particularmente relevante para competições como a Formula SAE, onde a comunicação eficiente entre sensores e módulos eletrônicos é essencial para o monitoramento em tempo real do veículo e para a realização de ajustes rápidos.

Além disso, um dos principais focos de pesquisa tem sido o desenvolvimento de sistemas de telemetria que utilizam redes de comunicação robustas, como a Controller Area Network (CAN). Segundo (Navet; Simonot-lion, 2009b), a rede CAN é amplamente utilizada para interligar diversos sistemas eletrônicos em veículos, permitindo a troca de informações entre diferentes unidades de controle. Essa arquitetura é essencial para garantir a eficiência e a confiabilidade dos dados coletados, uma vez que os veículos modernos possuem um número crescente de ECUs.

Em um contexto mais amplo, Brummelen e al. (2018) destacam a importância da integração de sistemas de telemetria com tecnologias de comunicação sem fio, como o 4G e o 5G. Essas tecnologias permitem a transmissão de dados em tempo real para servidores na nuvem, possibilitando que engenheiros e técnicos analisem as informações remotamente. Essa abordagem não apenas melhora a eficiência da coleta de dados, mas também permite que as equipes façam ajustes em tempo real, mesmo quando não estão fisicamente presentes no veículo.

O trabalho de Neto (2021) propôs a implementação de um sistema de sensoriamento e telemetria para o veículo Baja da equipe Cerrado, utilizando módulos de comunicação LoRa. Esse sistema foi projetado para monitorar variáveis como temperatura do motor, nível de combustível e inclinação do veículo, transmitindo os dados coletados para uma interface que permite a visualização em tempo real do desempenho do veículo. A escolha do módulo LoRa se deu pela sua maior eficiência em termos de distância de comunicação, confiabilidade e custo-benefício, aspectos essenciais para o sucesso de sistemas de telemetria em ambientes de competição.

A telemetria tem sido amplamente aplicada em competições automotivas, onde o desempenho do veículo é crucial. Em um estudo realizado por Hermann, Pentek e Otto (2015a), os autores analisam como a telemetria pode ser utilizada para otimizar o desempenho em corridas. Eles argumentam que a coleta de dados em tempo real permite que as equipes identifiquem rapidamente problemas de desempenho, como superaquecimento do motor ou desgaste excessivo dos pneus, e realizem ajustes imediatos para mitigar esses problemas.

Além disso, a pesquisa de Amaro e al. (2020) demonstra que a análise de dados de telemetria pode ser utilizada para prever falhas mecânicas antes que elas ocorram. Ao monitorar continuamente parâmetros críticos, como pressão do óleo e temperatura do motor, os sistemas de telemetria podem identificar padrões que indicam a necessidade de manutenção. Essa capa-

cidade preditiva não só melhora a segurança do veículo, mas também contribui para a eficiência operacional, reduzindo custos com manutenção e prolongando a vida útil dos componentes.

A seguir, será apresentado o referencial teórico. O conteúdo será dividido em tópicos que abordam as principais tecnologias utilizadas em sistemas de telemetria para veículos de competição. Serão tratados os métodos de aquisição e processamento inicial dos dados. Também será abordado o uso de microcontroladores no processo de coleta dos dados enviados por telemetria. Além disso, serão apresentados os sistemas de comunicação, responsáveis pela conexão com servidores remotos e redes internas do carro. Por fim, serão discutidos os métodos de sensoriamento aplicados ao ambiente automobilístico. Esses tópicos fornecem o embasamento necessário para o desenvolvimento do sistema de telemetria proposto, abordando desde a coleta de dados até a transmissão e visualização das informações, fundamentais para a otimização do desempenho de veículos em competições como a Formula SAE.

2.1 Aquisição e Processamento de Dados

A aquisição de dados para sistemas automotivos desempenha um papel crucial no desempenho dos veículos, especialmente em competições como a Formula SAE. A coleta e análise de dados em tempo real são essenciais para o ajuste do carro durante as provas, possibilitando decisões rápidas que impactam diretamente os resultados. No contexto de corridas, a aquisição de dados pode ser classificada em diversas categorias, conforme identificado por Emilio (2014), que destacam as áreas mais relevantes para o impacto do desempenho do veículo e do piloto. Essas categorias incluem:

1. **Análise de desempenho do veículo:** A medição do comportamento dinâmico do veículo, como aceleração, estabilidade e velocidade, é fundamental para entender como o carro se comporta em diferentes condições de pista e durante a corrida.
2. **Análise de performance do piloto:** A avaliação da interação entre o piloto e o veículo, incluindo variáveis como tempo de volta e decisões estratégicas durante a corrida, é crucial para aprimorar a performance total do conjunto.
3. **Desenvolvimento do veículo:** A aquisição de dados auxilia no processo contínuo de aprimoramento do design do veículo, oferecendo informações sobre componentes-chave, como suspensão e aerodinâmica, que podem ser ajustados para otimizar o desempenho.
4. **Segurança e confiabilidade:** Sensores que monitoram a temperatura, pressão e níveis de combustível são essenciais para garantir que o veículo funcione de forma segura, evitando falhas mecânicas e aumentando a confiabilidade nas condições adversas da competição.

5. Parâmetros determinantes do veículo: Medições que envolvem a potência do motor, eficiência de combustível e consumo de energia são fundamentais para entender a eficiência e a estratégia de performance do veículo em um ambiente de alta competição.
6. Registros de rodagem: A coleta de dados sobre as condições de pista e o comportamento do veículo ao longo das corridas fornece informações valiosas para a equipe técnica, que podem ser usadas em testes e melhorias posteriores.

Essas categorias de dados são essenciais para o desenvolvimento de um sistema de telemetria eficaz, que seja capaz de coletar e transmitir informações cruciais para a equipe técnica em tempo real. O sistema de telemetria proposto neste trabalho visa integrar essas diferentes variáveis, garantindo que a equipe tenha acesso a dados precisos para otimizar o desempenho e a segurança do veículo durante as provas da Formula SAE.

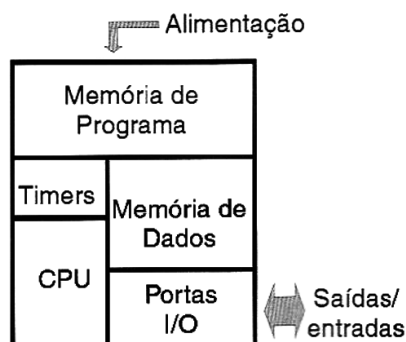
2.2 Microcontroladores

Os microcontroladores são responsáveis pela aquisição, processamento e transmissão dos dados coletados pelos sensores do veículo. Uma unidade de microcontrolador (MCU) é, essencialmente, um pequeno computador em um único chip, projetado para gerenciar tarefas específicas dentro de um sistema embarcado, sem a necessidade de um sistema operacional complexo (Schneider; Smalley, 2024). No contexto deste projeto, os microcontroladores são utilizados para gerenciar a comunicação entre os sensores e o sistema de telemetria, processando as informações em tempo real e enviando-as para a equipe técnica. A escolha adequada do microcontrolador é crucial para garantir que o sistema seja eficiente, confiável e capaz de operar sob as condições exigentes de competições como a Formula SAE. Além disso, os microcontroladores oferecem flexibilidade e escalabilidade, permitindo a integração de diversos sensores e módulos de comunicação no sistema, o que é essencial para otimizar o desempenho do veículo e melhorar a tomada de decisões durante as provas.

A maioria dos dispositivos eletrônicos que são empregados atualmente possui um microcontrolador em seu núcleo. Microcontroladores são projetados para otimizar o controle de entradas e saídas físicas. Geralmente, eles possuem menos capacidade de processamento do que os processadores utilizados em computadores multimídia ou servidores, por exemplo. Consomem menos energia em comparação com esses processadores e oferecem maior facilidade para se conectar ao mundo físico, por meio de circuitos de entrada chamados sensores e circuitos de saída chamados atuadores. Além disso, eles podem se comunicar com outros processadores por meio de diversas interfaces de comunicação. Com relação à arquitetura básica de um microcontrolador, a Figura 2 fornece um panorama útil.

O componente mais relevante de um microcontrolador é a Unidade Central de Processamento (CPU - Central Processing Unit), vide Figura 2. Esse bloco principal é responsável por realizar cálculos, processar informações e executar operações lógicas com sinais digitais. A CPU realiza essas funções por meio de um programa específico que foi previamente carregado.

Figura 2 – Estrutura interna de um microcontrolador



Fonte: (Instituto Newton C. Braga, 2018).

Os microcontroladores interpretam e processam dados utilizando um conjunto de instruções pré-definidas, reconhecendo as informações à medida que chegam. Essas informações precisam ser enviadas em formato digital para que a CPU possa compreendê-las e executar as ações programadas.

Os microcontroladores possuem dois tipos principais de memória. A primeira é a memória de programa, utilizada para armazenar o conjunto de instruções que define o que o microcontrolador deve fazer. Esse tipo de memória retém as informações mesmo quando o dispositivo está desligado e pode ser reprogramada ao conectar o microcontrolador a um computador para novas aplicações. A segunda é a memória de dados, que armazena informações recebidas durante o funcionamento do microcontrolador, como leituras de sensores.

Outro componente essencial é o bloco de temporizadores (timers), vide Figura 2. Muitos dos processos realizados por um microcontrolador demandam intervalos de tempo precisos. Para isso, existe um módulo específico de temporização que permite criar esses intervalos, mesmo que o processamento do microcontrolador seja extremamente rápido, controlado pelo *clock*. Esse *clock* é responsável por sincronizar as operações do dispositivo, que podem alcançar milhares ou até milhões de ciclos por segundo. Com o auxílio dos temporizadores, é possível gerar ciclos de controle mais lentos e precisos.

O próximo bloco importante são as portas de entrada e saída (I/O - Input/Output), vide Figura 2, que permitem ao microcontrolador interagir com o ambiente externo. Essas portas são acessadas por meio de pinos no circuito integrado do microcontrolador e, em placas de desenvolvimento, através de conectores que possibilitam a ligação com circuitos externos. As portas de I/O são a interface fundamental para a comunicação do microcontrolador com outros dispositivos e sensores (Instituto Newton C. Braga, 2018).

As subseções seguintes abordam dois microcontroladores amplamente utilizados por equipes da competição Formula SAE: o *STM32F103* e o *ESP32*. Esses microcontroladores são amplamente utilizados devido ao seu equilíbrio entre custo e desempenho. O *STM32F103*, baseado na arquitetura *ARM Cortex-M3*, oferece alta confiabilidade e desempenho estável, sendo ideal para aplicações industriais e automotivas que exigem robustez e precisão. Por outro lado, o *ESP32*, com processador dual-core e conectividade integrada, destaca-se em projetos de

Internet das Coisas (IoT) que demandam comunicação sem fio e processamento eficiente. A escolha desses microcontroladores se justifica por diversos fatores, como seu baixo custo e bom desempenho, o que torna sua análise relevante para este trabalho.

2.2.1 Microcontrolador *STM32F103*

O *STM32F103* é um microcontrolador desenvolvido pela *STMicroelectronics*, pertencente à família STM32 de microcontroladores integrados de 32 bits. A série F1 indica a utilização do processador *ARM Cortex-M3*, enquanto a linha F103 identifica os modelos de desempenho dessa série. O *STM32F103* possui um processador com frequência de operação de 72 MHz, memória *Flash* de 64 ou 128 kbytes, além de suporte a periféricos motorizados, interface via Barramento Serial Universal (USB) de alta velocidade e comunicação via rede CAN (STMICROELECTRONICS, 2023).

Para sua utilização, o microcontrolador pode ser programado em linguagem C. Inicialmente, sua configuração pode ser facilitada através do ambiente de desenvolvimento integrado *STM32CubeMX*, que permite definir parâmetros como frequência de *clock*, configurações de Conversores Analógico-Digitais (ADC) e o comportamento das portas de entrada e saída.

Outro modelo amplamente empregado em sistemas embarcados é o *STM32F411*, também da família STM32 da *STMicroelectronics*. Baseado em um núcleo *ARM Cortex-M4* de 32 bits, o *STM32F411* combina alta capacidade de processamento com eficiência energética, sendo ideal para aplicações que demandam desempenho superior.

De acordo com STMicroelectronics (2023):

O *STM32F411* é projetado para atender às necessidades de sistemas embarcados de alto desempenho, oferecendo até 100 MHz de frequência de operação e periféricos avançados, como ADCs de alta resolução, interfaces SPI e I2C, e suporte à comunicação Transmissor-Receptor Assíncrono Universal (UART).

Essas características tornam o *STM32F411* especialmente adequado para a coleta, processamento e transmissão de dados provenientes de sensores instalados em veículos da Fórmula SAE.

Um dos principais destaques do *STM32F411* é sua elevada capacidade de processamento, que possibilita a realização de análises locais dos dados obtidos por sensores. Essa funcionalidade é essencial para o monitoramento de variáveis críticas do veículo, como temperatura, pressão e desempenho do motor.

Além disso, o microcontrolador oferece suporte a interfaces de comunicação avançadas, como o protocolo *Controller Area Network* (CAN), amplamente utilizado em aplicações automotivas. A compatibilidade com a rede CAN permite ao *STM32F411* integrar-se de forma eficiente aos sistemas eletrônicos do veículo, assegurando uma comunicação rápida e confiável entre os módulos embarcados.

Outro diferencial relevante do *STM32F411* é sua eficiência energética. O microcontrolador é capaz de operar em modos de baixo consumo de energia, característica essencial em sistemas embarcados que exigem alta autonomia. Em competições como a Fórmula SAE, onde a otimização do peso e do consumo energético impacta diretamente no desempenho geral do veículo, essa eficiência torna-se um fator estratégico.

Enquanto microcontroladores automotivos tradicionais, como os das famílias *NXP S32*, *Infineon Tricore* e *Renesas RH850*, oferecem recursos avançados e certificações específicas para a indústria, seu custo elevado e maior complexidade de desenvolvimento tornam seu uso pouco viável em projetos acadêmicos e de prototipagem. Dessa forma, o *STM32F411* apresenta-se como uma solução de bom custo-benefício para o desenvolvimento de sistemas de telemetria, combinando alta capacidade de processamento, integração avançada com sensores, baixo consumo de energia e baixo custo, aspectos fundamentais para atender às exigências do projeto.

2.2.2 Microcontrolador ESP32

O *ESP32*, um microcontrolador de alta performance desenvolvido pela Espressif Systems, é amplamente reconhecido por suas capacidades de conectividade e processamento de dados em aplicações embarcadas. Este dispositivo combina um processador dual-core de 32 bits, Wi-Fi integrado e *Bluetooth*, características que o tornam ideal para sistemas que exigem transmissão e processamento de dados em tempo real, como a telemetria automotiva.

De acordo com a documentação oficial da Systems (2025):

O *ESP32* é projetado para ser uma solução versátil e de alta eficiência energética para dispositivos embarcados conectados.

Essa versatilidade permite que o microcontrolador seja utilizado tanto para capturar quanto para processar os dados provenientes dos sensores instalados em veículos do Formula SAE.

Uma das principais vantagens do *ESP32* no contexto de telemetria é sua capacidade de realizar comunicação sem fio via Wi-Fi. Isso possibilita a transmissão dos dados processados diretamente para servidores ou dispositivos móveis, eliminando a necessidade de cabos físicos e reduzindo o peso e a complexidade do sistema. Além disso, o suporte ao protocolo Bluetooth permite integração com dispositivos locais para diagnósticos e monitoramento.

A arquitetura do *ESP32* também é um ponto crucial no desenvolvimento do sistema. Com suporte a múltiplas interfaces periféricas, como ADCs (Conversores Analógico-Digital), UARTs e SPIs, o microcontrolador facilita a integração de sensores de diferentes naturezas, como sonda lambda, acelerômetros e termômetros.

Na Tabela 1 encontra-se um comparativo entre os microcontroladores *ESP32*, *STM32F103*, utilizados no projeto e o microcontrolador *NXP S32K144* certificado para indústria automotiva.

Tabela 1 – Comparativo entre os microcontroladores *STM32F103*, *ESP32* e *NXP S32K144*

Característica	STM32F103	ESP32	NXP S32K144
Fabricante	STMicroelectronics	Espressif Systems	NXP Semiconductors
Arquitetura	ARM Cortex-M3 (32 bits)	Tensilica Xtensa LX6 dual-core (32 bits)	ARM Cortex-M4F (32 bits, automotivo)
Frequência de Operação	Até 72 MHz	Até 240 MHz	Até 112 MHz
Memória Flash	16 kB a 128 kB	Até 4 MB (externa)	256 kB
Memória RAM	6 kB a 20 kB	Até 520 kB	32 kB + 4 kB EEPROM emulada
Periféricos de Comunicação	UART, SPI, I2C, CAN, USB (alguns modelos)	UART, SPI, I2C, CAN (via software), Wi-Fi, Bluetooth	CAN FD, LIN, UART, SPI, I2C, FlexIO
Conectividade Sem Fio	Não possui	Wi-Fi e Bluetooth	Não possui
ADC / DAC	ADC 12 bits, até 16 canais	ADC 12 bits, até 18 canais	ADC 12 bits, 24 canais (SAR rápido)
Temperatura de Operação	-40°C a +85°C	-40°C a +125°C	-40°C a +125°C (AEC-Q100)
Certificação Automotiva	Não possui	Não possui	AEC-Q100
Preço (Novembro/2025)	US\$3,00	US\$8,00	US\$ 111,90
Aplicação no Projeto	Processamento local e integração via rede CAN com sensores embarcados	Transmissão remota de dados e conectividade com dispositivos móveis	Não utilizado

2.3 Sistemas de Comunicação

A comunicação eficiente entre os componentes do sistema de telemetria é essencial para garantir que os dados coletados pelos sensores do veículo sejam transmitidos de maneira rápida, confiável e precisa. Esta seção aborda as principais tecnologias de comunicação utilizadas em sistemas de telemetria automotiva, detalhando os sistemas de comunicação serial e os protocolos de telefonia móvel. A comunicação serial, por exemplo, é amplamente utilizada para interligar sensores e módulos eletrônicos, sendo essencial para garantir que as informações do veículo sejam transmitidas de forma eficiente. Neste contexto, serão apresentados o protocolo CAN, usado em veículos para garantir a integridade dos dados (Smith, 2024), o protocolo MQTT, comum em aplicações de internet das coisas (IoT), e a conexão USB, que permite uma transmissão de dados rápida e prática.

Além disso, a comunicação móvel também desempenha um papel importante em sistemas de telemetria modernos, especialmente em competições como a Formula SAE, onde a comunicação em tempo real entre o veículo e a equipe técnica é fundamental. Dentro dessa categoria, será discutida a tecnologia 4G, que oferece uma solução robusta para transmissão de dados em larga escala e de alta velocidade, permitindo a comunicação sem fio com uma cobertura abrangente e confiável (Trackplusgps, 2024).

2.3.1 Sistema de Comunicação Serial

Um sistema de comunicação serial se refere àquele que transmite informação um bit por vez por meio de um único condutor, em contra-partida com o sistema de transmissão de dados paralelo que transmite vários bits por vez por meio de diversos condutores. A transmissão de dados serial é preferível em relação à transmissão de dados paralela pelos seguintes fatores. Em primeiro lugar, o sistema serial custa menos, porque menos fios são necessários para a implementação. Em segundo lugar, os sistemas paralelos são extremamente sensíveis a diferenças no comprimento dos fios, onde milímetros de diferença podem causar distorção da informação enviada. Em terceiro lugar, o sistema paralelo também é suscetível à perturbações eletromagnéticas devido aos diversos condutores empregados, causando distorções nos dados (Comer, 2016).

A transmissão de dados serial pode ser realizada por dois métodos distintos: síncrono e assíncrono. No método síncrono, a comunicação é sincronizada por um sinal de *clock*, o que significa que cada bit ou grupo de bits enviado é regulado por pulsos do *clock*. A principal vantagem desse método é a alta velocidade na transmissão dos dados. No entanto, ele exige a utilização de um condutor adicional dedicado ao sinal de *clock*.

2.3.1.1 Protocolo CAN de Comunicação

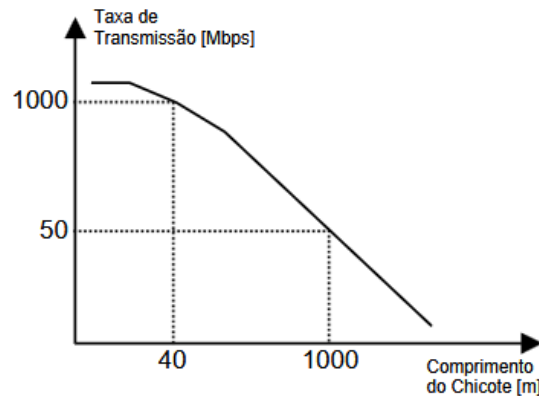
A rede CAN é um padrão de comunicação serial síncrono que utiliza uma topologia de rede do tipo barramento (*CANbus*). A rede CAN funciona utilizando o conceito de multi-mestre, onde todos seus módulos podem se tornar mestres e escravos da rede em determinados momentos, além de trabalhar com *multicast*, mandando mensagens para diferentes módulos ao mesmo tempo.

Outro ponto forte deste protocolo é o fato de utilizar o protocolo de acesso ao meio *CSMA/CD with NDA* (*Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection with Non-Destructive Arbitration*), o qual permite que os módulos mandem mensagens para o barramento com base em um sistema de prioridade, impedindo que um módulo interfira no outro.

A velocidade de transmissão de dados pela rede é proporcional ao comprimento do barramento, como ilustra o Gráfico 1. A maior taxa de transmissão especificada é de 1Mbps considerando um barramento de 40 metros (Guimarães; Saraiva, 2002).

O protocolo CAN utiliza a codificação de linha NRZ (*non-return to zero*), ou seja, o sinal não volta a um nível zero após o tempo de bit. Sendo assim, a sincronia é obtida conforme a aquisição dos bits da mensagem, onde cada nodo possui seu próprio clock, não havendo um sinal exclusivo de sincronia. Normalmente, a comunicação por rede CAN utiliza uma abordagem diferencial, com dois condutores designados como *CAN_High* e *CAN_Low*. Os dados são enviados em forma de bits classificados como dominantes (nível lógico 0) e recessivos (nível lógico 1), como ilustra o Gráfico 2, característica que se deve à operação lógica 'AND' intrínseca, conhecida como *Wired AND*. Nos *bits* dominantes, há uma diferença de tensão significativa en-

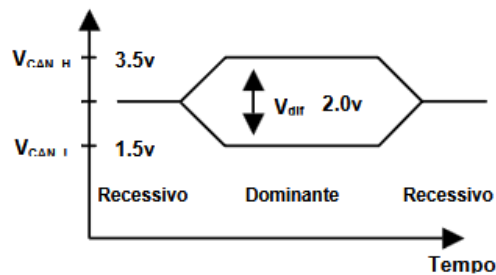
Gráfico 1 – Relação entre transmissão de dados e o comprimento da rede



Fonte: (Guimarães; Saraiva, 2002).

tre *CAN_High* e *CAN_Low*, enquanto nos bits recessivos, a tensão entre os dois condutores é praticamente igual.

Gráfico 2 – Níveis de sinal do barramento CAN



Fonte: (Guimarães; Saraiva, 2002).

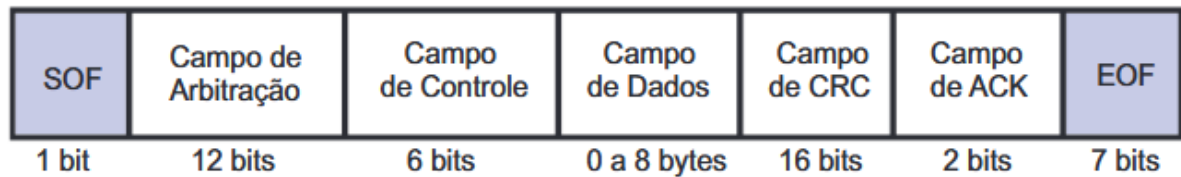
A transmissão e recepção das informações em uma rede CAN são efetuadas e controladas através de quatro tipos diferentes de mensagens:

- Mensagem de Dados;
- Mensagem de Requisição Remota de Dados;
- Mensagem de Erro;
- Mensagem de Sobrecarga.

As mensagens de erro e sobrecarga são utilizadas para sinalizar um estado anormal da rede. Sendo que a mensagem de erro sinaliza existência de um erro gerado no barramento e a mensagem de sobrecarga sinaliza que um nó em particular não está pronto para receber mensagens no momento.

As mensagens de dados e de requisição de dados são utilizadas durante a operação normal da rede e estão separadas de mensagens anteriores por um intervalo de tempo chamado de espaço entre mensagens. A mensagem de dados, ilustrada na Figura 3, é utilizada para transferir dados de um nó para os demais da rede, enquanto a de requisição de dados é usada para requisitar dados de um determinado nó da rede.

Figura 3 – Estrutura de uma mensagem de dados



Fonte: (Sá, 2007).

- SOF (*Start of Frame*): Sinaliza o início do quadro;
- Arbitração: Responsável por enviar o nível de prioridade da mensagem;
- Controle: Seu primeiro bit (IDE) é responsável por identificar a versão da rede CAN e, em seus bits restantes, possui a tarefa de informar a quantidade de bytes que serão transmitidas na mensagem;
- Campo de Dados: Reservado para transmissão da mensagem;
- Dados CRC (*Cyclic Redudancy Check*): Responsável por conter *checksum* da mensagem, para uma verificação de possíveis erros na transmissão de dados.
- ACK (*Acknowledgment*): Responsável por reconhecer uma mensagem sem erro;
- EOF (*End of Frame*): Responsável por finalizar a mensagem.

2.3.1.2 Sistema de Conexão USB

A tecnologia USB é um padrão que possibilita a conexão de diversos dispositivos, como discos rígidos externos, pendrives, mouses, teclados, impressoras e fones de ouvido, a computadores e dispositivos móveis, como tablets e smartphones. Dessa forma, elimina-se a necessidade de conectores específicos para cada tipo de equipamento, promovendo maior praticidade e padronização.

Para fornecer energia elétrica e transmitir dados ao mesmo tempo, os cabos e conectores USB utilizam ao menos quatro fios internos:

- VCC: Terminal positivo da alimentação elétrica;
- D+ e D-: Responsáveis pela transmissão de dados;
- GND: Terminal negativo da alimentação elétrica.

A comunicação entre dispositivos conectados via USB é gerenciada por um protocolo no qual o host, geralmente o computador ou dispositivo que recebe as conexões, emite sinais para identificar os dispositivos conectados e atribui um endereço único a cada um deles. Após o estabelecimento da conexão, o *host* identifica o tipo de transferência de dados utilizada pelo

dispositivo. Existem quatro categorias principais: *Bulk*, indicada para grandes volumes de dados, como em impressoras e scanners, com verificação de erros para garantir a integridade; *Control*, usada para o envio de comandos e configurações ao dispositivo; *Interrupt*, apropriada para pequenas quantidades de dados transmitidas frequentemente, como em teclados, mouses e *joysticks*; e *Isochronous*, recomendada para transmissões contínuas, como em caixas de som, priorizando baixa latência, mesmo sem mecanismos de detecção de erros (Alecrim, 2023).

2.3.2 Protocolo de Comunicação de Telefonia Móvel

Os sistemas de telefonia móvel desempenham um papel fundamental no desenvolvimento de tecnologias modernas, sendo amplamente utilizados em aplicações de telemetria devido à sua abrangência e confiabilidade (Chinonso; Okemiri; Anikwe, 2021). No contexto da telemetria automotiva, a utilização de redes móveis permite a transmissão de dados em tempo real entre o veículo e a central de controle, garantindo maior eficiência na análise e no monitoramento de parâmetros críticos (Chinonso; Okemiri; Anikwe, 2021). Neste projeto, optou-se pela utilização da tecnologia 4G (quarta geração) como meio de comunicação para o sistema de telemetria. Essa escolha justifica-se pelas suas características técnicas, como a alta velocidade de transmissão de dados, que pode atingir até 100 Mbps em movimento e até 1 Gbps em condições ideais; latência reduzida, geralmente inferior a 50 ms; e capacidade de suportar um grande número de conexões simultâneas, com suporte a milhares de dispositivos por célula. Tais atributos são essenciais para um sistema que demanda troca contínua e em tempo real de informações entre o veículo e a infraestrutura de análise (Roberts; Pecka, 2018).

A implementação do 4G possibilitará a coleta e o envio de dados, como parâmetros do motor, informações de desempenho e variáveis ambientais, diretamente para a nuvem ou para uma estação base. Isso permitirá a análise em tempo real, o diagnóstico remoto e a tomada de decisões rápidas durante o funcionamento do veículo em condições de competição ou teste. Além disso, o uso do 4G assegura a escalabilidade do sistema, possibilitando a futura integração com tecnologias emergentes, como 5G, ampliando ainda mais as capacidades de conectividade e processamento (Roberts; Pecka, 2018). Dessa forma, o sistema de telemetria se beneficiará da infraestrutura robusta e confiável oferecida pelas redes móveis, garantindo um fluxo contínuo de dados com qualidade e precisão.

2.3.2.1 Tecnologia 4G de Comunicação

A tecnologia 4G, ou quarta geração, representa um avanço significativo nas comunicações móveis, oferecendo maior largura de banda e suporte a aplicações que exigem conectividade em tempo real, como a telemetria. Segundo Sauter (2013a), "o 4G não apenas oferece maior largura de banda, mas também suporte a aplicações críticas que exigem conectividade em tempo real, como telemetria, streaming e comunicação máquina a máquina (M2M)".

No contexto da telemetria automotiva, especialmente em competições como a *Fórmula SAE*, a capacidade de transmitir dados em tempo real sobre o desempenho do veículo é crucial. Conforme apontado por Kukushkin (2020), "a integração de redes LTE permite que sensores em veículos transmitam informações de forma confiável para servidores ou sistemas centrais, garantindo análises imediatas e suporte à tomada de decisão".

Além disso, a evolução das redes móveis tem facilitado a comunicação entre dispositivos, permitindo a implementação eficiente de sistemas de telemetria. Sauter (2013b) ressalta que "a evolução de dispositivos móveis e sistemas operacionais, incluindo arquiteturas ARM e x86, e sua aplicação em dispositivos otimizados para voz e multimídia" têm impulsionado o desenvolvimento de soluções mais robustas para a coleta e transmissão de dados.

Portanto, a base teórica da tecnologia 4G e sua aplicação na telefonia móvel reforçam sua relevância para sistemas que dependem de transmissão de dados em tempo real, como a telemetria automotiva, permitindo um fluxo contínuo de informações e melhorando o desempenho geral das operações.

2.3.3 Protocolo de Rede MQTT

O Protocolo de Transporte de Telemetria Baseado em Filas de Mensagens, do inglês *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT), é um protocolo de comunicação leve e de baixo consumo, projetado para ambientes com recursos limitados e redes de baixa largura de banda. Desenvolvido inicialmente pela IBM, o MQTT foi projetado para ser simples, flexível e eficiente, permitindo a troca de mensagens entre dispositivos de forma rápida e com pouca sobrecarga. A versão mais comum do MQTT, 3.1.1, define as bases para o protocolo, com foco em comunicação assíncrona e modelo cliente-servidor, em que um *broker* (servidor) centralizado gerencia a troca de mensagens entre os dispositivos (Ibm, 2010).

O protocolo foi especialmente adaptado para sistemas de sensores e redes com limitações de energia, sendo extensivamente utilizado em dispositivos da Internet das Coisas (IoT). Para esses cenários, foi criada uma versão mais enxuta chamada MQTT-SN (*MQTT for Sensor Networks*), que oferece funcionalidades adaptadas às características dessas redes, como a comunicação sem a necessidade de TCP/IP, o que pode ser vantajoso em dispositivos mais simples e em ambientes com restrições de recursos (Steve, 2017).

O MQTT funciona com três componentes principais: o cliente, que envia e recebe mensagens; o *broker*, que organiza a comunicação entre os clientes; e o tema (topic), que define as categorias ou tipos de mensagens trocadas. O cliente se inscreve em tópicos de interesse e o *broker* entrega as mensagens a todos os clientes que estão inscritos naquele tópico específico. Esse modelo de publicação e assinatura (publish/subscribe) permite uma comunicação eficaz e flexível em sistemas distribuídos (Ag, 2023).

Uma das principais características do MQTT é sua capacidade de operar de forma eficiente em redes com alta latência e baixa largura de banda, como é o caso de muitas redes móveis ou de dispositivos IoT. Além disso, o protocolo é projetado para ser confiável e garante

a entrega de mensagens com diferentes níveis de qualidade de serviço (QoS), o que o torna ideal para sistemas de monitoramento em tempo real e aplicações críticas, como o controle de dispositivos automotivos ou sistemas de telemetria (Hivemq, 2020).

2.4 Métodos de Sensoriamento Automobilístico

Os sensores são componentes essenciais dos sistemas eletrônicos de controle automotivo. Sensores são definidos como "dispositivos que transformam (ou transduzem) quantidades físicas, como pressão ou aceleração (chamadas de grandezas medidas), em sinais de saída (geralmente elétricos) que servem como entradas para sistemas de controle." (Norton, 1989) Não faz muito tempo que os sensores automotivos primários eram dispositivos discretos usados para medir pressão de óleo, nível de combustível, temperatura do líquido de arrefecimento, etc.

A partir do final da década de 1970, módulos de controle de motor automotivos baseados em microprocessadores começaram a ser introduzidos para atender às regulamentações federais de emissões. Esses sistemas exigiam novos tipos de sensores, como MAP (pressão absoluta do coletor), temperatura do ar e sensores de ponto de operação da relação estequiométrica ar-combustível dos gases de escape. A necessidade de sensores está evoluindo e crescendo progressivamente. Por exemplo, em aplicações de controle de motor, o número de sensores utilizados aumentou de aproximadamente dez em 1995 para mais de trinta em 2010 (Barron; Powers, 1996).

A importância dos sensores de posição é destacada em diversos estudos, como o artigo "Sensores para gerenciamento do motor de combustão interna ciclo Otto", que enfatiza a necessidade de sensores precisos para monitorar a posição de componentes críticos, como o acelerador, o virabrequim e o comando de válvulas (Embarcados, 2023). Esses sensores permitem que a unidade de controle eletrônico (ECU) realize ajustes precisos na injeção de combustível, na ignição e em outros sistemas essenciais para o desempenho do motor.

Além disso, os métodos de medição de temperatura e pressão são fundamentais para o funcionamento eficiente do motor. Sensores de temperatura, como os termistores NTC, são utilizados para controlar a temperatura do líquido de arrefecimento nos motores refrigerados a água, ou para medir a temperatura do óleo nos motores refrigerados a ar (Carro, 2023). Já os sensores de pressão são essenciais para monitorar a pressão de óleo e de combustível, garantindo a lubrificação adequada e o fornecimento eficiente de combustível ao motor.

Os métodos de medição de aceleração, por meio de sensores de aceleração, são cruciais para os sistemas de segurança ativa, como o controle de estabilidade (ESP) e os sistemas avançados de assistência ao motorista (ADAS). Esses sensores permitem a detecção e a resposta a mudanças rápidas, garantindo que o veículo mantenha estabilidade e controle em diferentes condições de condução (Embarcados, 2023).

Por fim, a sonda lambda, ou sensor de oxigênio, desempenha um papel vital na gestão da combustão, monitorando a quantidade de oxigênio nos gases de escape e permitindo que a

ECU ajuste a mistura ar-combustível para otimizar a eficiência do motor e reduzir as emissões de poluentes (Tecfil, 2023).

A evolução e a integração desses sensores são essenciais para o desenvolvimento de veículos mais eficientes, seguros e ambientalmente amigáveis, refletindo a tendência atual da indústria automotiva em direção à eletrificação e à condução autônoma.

2.4.1 Métodos de Sensoriamento de Posição

Os sensores de posição desempenham um papel essencial nos veículos modernos, garantindo o funcionamento eficiente e seguro de diversos sistemas. Esses sensores são responsáveis por monitorar e informar a posição exata de componentes críticos, como o acelerador, o virabrequim, o comando de válvulas e os pedais de freio e embreagem. Com base nos dados fornecidos, a unidade de controle eletrônico (ECU) realiza ajustes precisos na injeção de combustível, na ignição e em outros sistemas essenciais para o desempenho do motor.

Além disso, os sensores de posição contribuem significativamente para os sistemas de segurança ativa, como controle de estabilidade (ESP) e sistemas avançados de assistência ao motorista (ADAS) (Finotti, 2024). Eles permitem a detecção e a resposta a mudanças rápidas, garantindo que o veículo mantenha estabilidade e controle em diferentes condições de condução. Assim, a aplicação desses sensores é indispensável no contexto de veículos cada vez mais avançados e conectados.

2.4.1.1 Métodos Resistivos para Medição de Posição

Utilizando o princípio de sensores resistivos, podemos medir a posição de objetos com relação à outros por meio de potenciômetros. Um potenciômetro é um componente eletrônico que permite ajustar mecanicamente a resistência elétrica em um circuito, funcionando como um resistor variável. Ele possui uma pista resistiva sobre a qual um contato móvel, conhecido como cursor ou *wiper*, desliza, alterando a resistência entre os terminais conforme sua posição (Electricity and Magnetism, 2024). O sistema de leitura pode então ler a saída dos dispositivos e determinar a posição do elemento mecânico que moveu o contato.

No carro de fórmula SAE esses sensores são empregados no *Throttle position sensor* (TPS), ilustrado na Figura 4, com a função de traduzir o ângulo físico da válvula borboleta responsável pela aceleração do carro em um sinal elétrico que possa ser lido pela ECU. Através deste sensor, a central eletrônica obtém informações de acelerações ou desacelerações realizadas pelo piloto, as quais são utilizadas no cálculo do tempo de injeção instantâneo e, conseqüentemente, no controle das condições de funcionamento do motor.

2.4.1.2 Uso de Efeito Hall para Medição de Posição

Os sensores de efeito Hall geram um sinal de tensão proporcional às variações no fluxo magnético causadas pelo movimento rotativo de peças mecânicas. Quando os dentes de uma

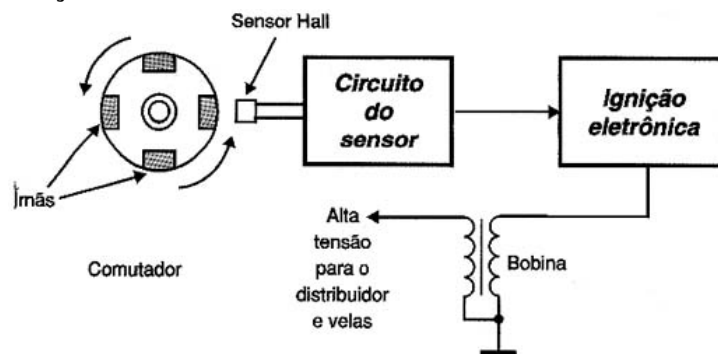
Figura 4 – Sensor de posição TPS



Fonte: <https://www.elprocus.com/throttle-position-sensor-working-principle-applications/>.

engrenagem passam diante do sensor e de seu ímã interno, ocorrem mudanças no campo magnético, de modo semelhante ao funcionamento dos sensores de relutância variável (Fleming, 2001). No entanto, enquanto os sensores de relutância detectam a variação do fluxo no tempo, os sensores Hall medem diretamente o nível do fluxo magnético, com saída proporcional à componente transversal da densidade do campo magnético que atravessa o sensor. Por serem dispositivos semicondutores ativos, exigem uma corrente de polarização para operar. No motor utilizado pela equipe, há dois sensores Hall: o sensor de referência do ponto morto superior (Ref), que informa a rotação do motor, e o sensor de fase (Sync), que identifica o momento exato da fase do primeiro cilindro para controle de injeção e ignição. Esses sensores permitem monitorar o ângulo do virabrequim e determinar com precisão a posição dos pistões. A estrutura interna de um sensor Hall está ilustrada na Figura 5.

Figura 5 – Utilização de um sensor de efeito Hall em um motor de combustão interna.



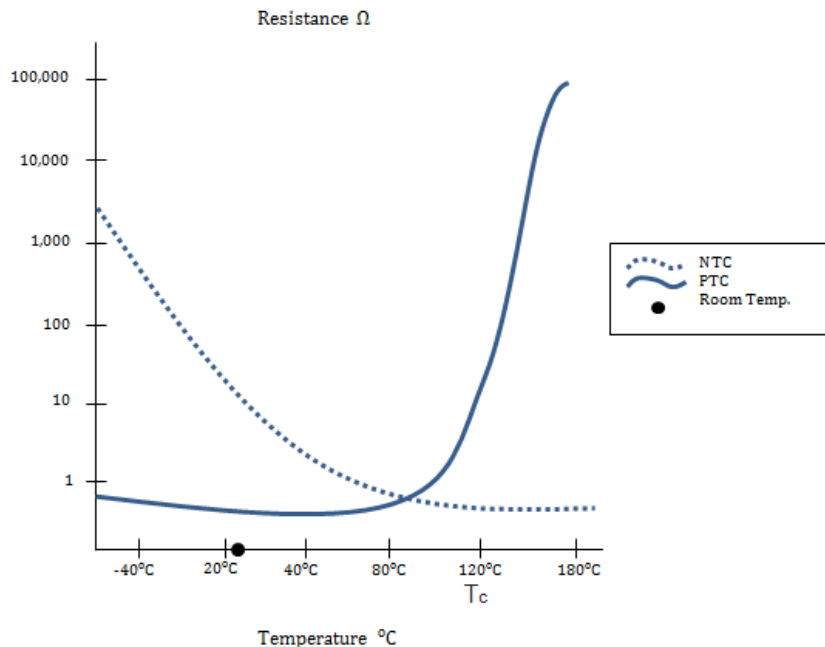
Fonte: (Braga, 2023).

2.4.2 Métodos de Medição de Temperatura

De forma similar, utilizando dispositivos como termistores, termopares e termoresistores, podemos usar a resistência elétrica para medir temperaturas. No caso dos termistores, suas composições de óxidos cerâmicos são fabricadas para apresentar características de resistência NTC ou PTC (coeficiente de temperatura negativo ou positivo), nas quais a resistência dos sensores diminui ou aumenta várias ordens de magnitude à medida que a temperatura aumenta

(Fleming, 2001). O Gráfico 3 ilustra a diferença do comportamento de termistores PTC e NTC em relação a mudanças de temperatura.

Gráfico 3 – Comparação entre termistores PTC e NTC



Fonte: (Electrical eLibrary, 2017).

Como a relação entre resistência e temperatura nos termistores NTC é fortemente não linear, métodos matemáticos específicos são utilizados para realizar a conversão entre resistência medida e temperatura. Entre eles, destaca-se a equação de Steinhart–Hart, ilustrada na Equação 1, amplamente empregada em instrumentação eletrônica devido à sua precisão em uma ampla faixa de operação. Proposta originalmente por Steinhart e Hart (Steinhart; Hart, 1968), essa equação relaciona a temperatura absoluta com a resistência elétrica por meio de três coeficientes característicos do termistor:

$$\frac{1}{T} = C_1 + C_2 \ln(R) + C_3 [\ln(R)]^3, \quad (1)$$

em que T é a temperatura em Kelvin, R é a resistência do termistor e C_1 , C_2 e C_3 são coeficientes determinados por calibração.

Para a medição da temperatura do óleo do motor, optou-se pela utilização de um sensor do tipo termistor NTC. Essa escolha se justifica por ser o mesmo sensor originalmente montado no motor e por apresentar boa precisão, resposta rápida e integração simples com sistemas embarcados. Termistores NTC para aplicações automotivas geralmente possuem encapsulamento compacto, saída analógica, faixa operacional entre -40 e 150 , e erro típico de aproximadamente 1 , garantindo desempenho adequado para monitoramento térmico em tempo real (Fleming, 2001).

2.4.3 Métodos de Medição de Pressão

O sensor de pressão é um dispositivo projetado para medir a pressão de um fluido. O funcionamento desse tipo de sensor é baseado na capacidade de um componente eletrônico de mudar suas características elétricas ao se deformar sob a influência da pressão aplicada (Finotti, 2024). Existem vários tipos de sensores de pressão disponíveis no mercado, cada um com suas próprias características e aplicações específicas. Alguns dos tipos mais comuns incluem:

- Sensores de Pressão Piezoelétricos: Baseados no princípio da piezoelectricidade, sendo essa a capacidade de alguns cristais de gerar tensão elétrica por resposta a uma pressão mecânica;
- Sensores de Pressão Capacitivos: Eles consistem em dois eletrodos separados por um elemento dielétrico, que é deformado pela pressão aplicada. Essa deformação altera a capacitância entre os eletrodos, o que pode ser medido e convertido em um sinal elétrico proporcional à pressão.

Os sensores de pressão instalados no veículo de Fórmula SAE exercem uma função fundamental no monitoramento de parâmetros críticos de operação. Entre eles, destaca-se a pressão no coletor de admissão, medida por meio do sensor de Pressão Absoluta do Coletor (MAP), ilustrado na Figura 6. Além disso, são monitoradas outras variáveis essenciais, como a pressão do óleo do motor, do sistema de turboalimentação, dos fluidos das linhas de freio e do combustível, garantindo a segurança e o desempenho do veículo em condições de alta exigência.

Figura 6 – Sensor MAP



Fonte: (Delphi, 2022).

2.4.4 Métodos de Medição de Aceleração

Os sensores de aceleração, também conhecidos como acelerômetros, são dispositivos fundamentais na indústria automotiva, desempenhando papéis cruciais em diversos sistemas de segurança e controle dos veículos modernos.

Um acelerômetro funciona utilizando um sensor eletromecânico projetado para medir acelerações estáticas ou dinâmicas. A aceleração estática é uma força constante que atua sobre um corpo, como a gravidade ou o atrito. Essas forças geralmente são previsíveis e uniformes. Por outro lado, as forças de aceleração dinâmica são não uniformes, sendo causadas por vibrações ou impactos. Um exemplo clássico de aceleração dinâmica é uma colisão automobilística (Omega Engineering, 2024).

Existem diversos tipos de acelerômetros, os mais comuns são apresentados abaixo:

- **Acelerômetros Piezoelétricos:** Operam gerando um sinal elétrico quando submetidos a uma aceleração repentina. Possuem um cristal piezoelétrico acoplado a um peso sísmico. Quando o sensor é acelerado, o peso exerce uma força sobre o cristal, que converte essa força em sinais elétricos. São altamente eficazes na medição de choques e vibrações.
- **Acelerômetros Piezoresistivos:** Funcionam com base na variação de resistência causada pela aceleração. Essa mudança é medida para determinar a taxa de aceleração. Apesar de serem menos sensíveis a impactos de baixa frequência, são ideais para altas amplitudes e amplamente utilizados em testes de colisão veicular e armamentos.
- **Acelerômetros Capacitivos:** Operam alterando sua capacitância conforme a aceleração. Utilizam duas placas capacitivas e um diafragma que se desloca durante a aceleração, mudando a capacitância. Acelerômetros MEMS capacitivos são amplamente utilizados em smartphones devido à sua eficiência e tamanho compacto.

2.4.5 Medição de Variáveis da Combustão

O monitoramento das variáveis da combustão é essencial para garantir o desempenho, a eficiência energética e o controle das emissões de um motor de combustão interna. Entre os diversos parâmetros envolvidos nesse processo, a razão ar-combustível se destaca por sua influência direta na qualidade da queima e na geração de poluentes. Para a medição precisa dessa razão, o sensor escolhido neste projeto é a sonda lambda, amplamente utilizada em sistemas de injeção eletrônica automotiva.

A sonda lambda tem como principal função medir a concentração de oxigênio presente nos gases de escape. A partir dessa medição, a ECU é capaz de ajustar dinamicamente a proporção entre ar e combustível admitidos pelo motor, com o objetivo de manter a combustão dentro dos parâmetros ideais — garantindo rendimento otimizado e redução das emissões nocivas ao meio ambiente.

O princípio de funcionamento da sonda lambda baseia-se na célula de Nernst, composta por um elemento cerâmico de óxido de zircônio (ZrO_2) recoberto por eletrodos de platina ou ródio. Esse elemento é mantido a temperaturas elevadas (tipicamente acima de 300 °C) por um aquecedor interno, tornando-se condutor de íons de oxigênio. Uma das faces da célula é exposta aos gases de escape e a outra ao ar atmosférico, que serve como referência.

Quando há uma diferença na concentração de oxigênio entre esses dois meios, íons O^{2-} se deslocam através da cerâmica, gerando uma tensão elétrica proporcional à razão entre as concentrações de oxigênio, conforme descrito pela Equação 2, conhecida como equação de Nernst:

$$V = \frac{RT}{4F} \ln \left(\frac{[O_2]_{ar}}{[O_2]_{esc}} \right). \quad (2)$$

Nessa equação, V representa a tensão elétrica gerada (em volts), R é a constante universal dos gases, T é a temperatura absoluta da célula (em kelvin), e F é a constante de Faraday. As variáveis $[O_2]_{ar}$ e $[O_2]_{esc}$ correspondem, respectivamente, à concentração de oxigênio no ar de referência e à concentração de oxigênio nos gases de escape.

Essa tensão varia geralmente entre 0,1V, indicando mistura pobre (excesso de oxigênio), e 0,9V, indicando mistura rica (excesso de combustível), possibilitando à ECU inferir a condição da mistura em relação à estequiometria. Já nas sondas lambda de banda larga, circuitos adicionais mantêm a célula em equilíbrio eletroquímico, fornecendo um sinal proporcional ao valor de λ e permitindo medições contínuas e precisas da razão ar-combustível. Quando a quantidade de ar é adequada para garantir a queima completa do combustível — e vice-versa —, diz-se que a mistura está na condição de estequiometria. Todo o gerenciamento eletrônico do motor busca alcançar essa condição. A Equação 3 define o chamado fator lambda (λ), que representa a razão entre a mistura ar-combustível real e a mistura ideal para combustão estequiométrica, como apresentado por Capelli (Capelli, 2020):

$$\lambda = \frac{\text{ar/combustível}}{\text{ar/combustível estequiométrico}}. \quad (3)$$

Quando $\lambda = 1$, a mistura é considerada estequiométrica; valores menores indicam uma mistura rica (excesso de combustível), enquanto valores maiores indicam uma mistura pobre (excesso de ar).

Dessa forma, a sonda lambda torna-se um componente-chave para o controle em malha fechada da injeção eletrônica, contribuindo para o equilíbrio entre desempenho, economia de combustível e conformidade com normas de emissões (Manavella, 2016).

2.4.6 Métodos de Calibração

A calibração de sensores é um processo essencial na engenharia, principalmente em aplicações críticas como sistemas de telemetria veicular, onde a precisão das medições pode impactar diretamente a segurança e o desempenho do veículo. A calibração assegura que os sensores estejam fornecendo dados confiáveis e precisos, permitindo ajustes e otimizações no sistema.

Sensores são dispositivos que convertem uma grandeza física em um sinal elétrico. No contexto automotivo, sensores medem variáveis como temperatura, pressão, velocidade e aceleração. A precisão dessas medições é crucial, pois decisões baseadas em dados imprecisos

podem levar a falhas mecânicas ou comprometer a segurança do veículo. A calibração é definida como o processo que envolve a comparação da saída do sensor com um padrão de referência conhecido, permitindo a identificação e correção de desvios (Gonzalez; Woods, 2008).

Os métodos de calibração podem ser classificados em várias categorias, cada uma com suas características e aplicações específicas. A seguir, são descritos os principais métodos de calibração:

2.4.6.1 Calibração Estática

A calibração estática é um dos métodos mais utilizados, onde a saída do sensor é comparada com um padrão de referência sob condições fixas. Esse procedimento é amplamente abordado em sistemas de controle, como mencionado em Kalman (1960), que enfatiza como uma calibração precisa pode melhorar consideravelmente o desempenho e a estabilidade do sistema. Esse método é comumente aplicado em sensores de temperatura, pressão e umidade. A calibração ocorre em um ambiente controlado, onde as variáveis são mantidas constantes.

A relação matemática que define a calibração estática é apresentada na Equação 4:

$$y = m \cdot x + b. \quad (4)$$

Nessa equação, y representa a saída do sensor, x é o valor de referência aplicado, m é o coeficiente de calibração que determina a sensibilidade do sensor, e b é o erro de *offset*, ou seja, o valor da saída mesmo na ausência de entrada.

2.4.6.2 Calibração Dinâmica

A calibração dinâmica é utilizada quando o sensor está sujeito a variações rápidas nas condições de operação, como em sensores de velocidade e aceleração. Esse método é essencial em aplicações em que as medições precisam ser ajustadas em tempo real, considerando não apenas a relação estática entre entrada e saída, mas também a resposta temporal do sistema.

A equação correspondente à calibração dinâmica, apresentada na Equação 5, descreve a relação entre entrada e saída em função do tempo por meio de um modelo de primeira ordem:

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K \cdot x(t) + b, \quad (5)$$

Nessa expressão, $y(t)$ é a saída do sensor no instante t , $x(t)$ é a entrada aplicada, K representa o ganho estático do sistema, b é o erro de *offset* e τ é a constante de tempo associada à dinâmica do sensor. Esse parâmetro τ modela o atraso e o amortecimento da resposta, refletindo o fato de que o sensor não acompanha instantaneamente variações rápidas da grandeza medida.

Trabalhos como Russell e Harris (2011) discutem a calibração dinâmica em sensores de movimento, destacando a importância de algoritmos em tempo real para garantir precisão

nas medições, especialmente em sistemas de controle dinâmico de veículos. Esse tipo de calibração é fundamental, por exemplo, em veículos autônomos e aeronaves, nos quais a resposta rápida e precisa dos sensores é essencial para o desempenho e a segurança. Como mostra Russell e Harris (2011), sensores de movimento devem se adaptar a mudanças rápidas no ambiente, como variações nas condições da estrada ou mudanças térmicas que influenciam os componentes eletrônicos.

2.4.6.3 Calibração por Referência

Na calibração por referência, um sensor é ajustado em comparação direta com outro sensor confiável previamente calibrado. Esse método é amplamente empregado em laboratórios de metrologia, onde é necessária alta precisão nas medições.

A relação entre a saída do sensor em teste e a saída do sensor de referência é dada pela Equação 6:

$$R = \frac{y_{\text{sensor}}}{y_{\text{referência}}}. \quad (6)$$

Nesta equação, R é a razão de calibração, y_{sensor} representa a saída do sensor sob teste e $y_{\text{referência}}$ representa a leitura do sensor de referência. Essa razão é usada para ajustar o sensor avaliado, de modo a alinhar sua resposta à referência.

Segundo Taylor (1997), esse tipo de calibração é fundamental para garantir a rastreabilidade metrológica e manter a consistência entre diferentes laboratórios. O estudo de JCGM (2008) aprofunda essa técnica, explicando como padrões primários e secundários são utilizados para garantir que os instrumentos operem dentro das tolerâncias estabelecidas.

2.4.6.4 Calibração Multivariada

A calibração multivariada é necessária quando múltiplos sensores são utilizados simultaneamente e suas saídas são interdependentes. Esse método permite modelar as interações entre variáveis e melhorar a precisão geral do sistema de medição.

A equação que representa esse tipo de calibração está apresentada na Equação 7:

$$Y = X \cdot B + E. \quad (7)$$

Nessa equação, Y é o vetor das saídas calibradas dos sensores, X é a matriz das entradas medidas, B é a matriz de coeficientes de calibração, e E representa o vetor de erros residuais do modelo. Essa abordagem é amplamente utilizada em aplicações industriais e laboratoriais com múltiplas variáveis simultâneas, sendo essencial em sistemas de controle avançados e instrumentação analítica.

Trabalhos, como o de Amaro e al. (2020), exploram a calibração multivariada em sistemas de telemetria, destacando como a análise conjunta de dados de múltiplos sensores pode levar a uma melhor compreensão do desempenho do veículo.

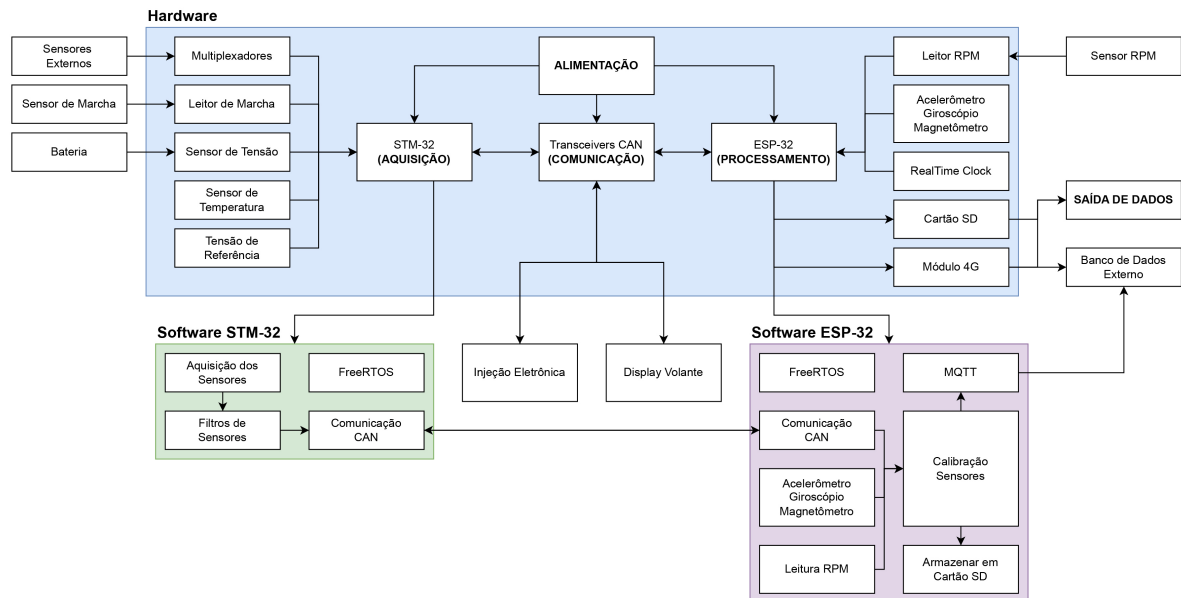
Outro desafio é a necessidade de calibração frequente, especialmente em ambientes onde os sensores estão sujeitos a condições extremas. A degradação dos sensores ao longo do tempo pode levar a medições imprecisas, o que exige um processo de calibração contínuo.

A calibração de sensores é um processo crítico que garante a precisão e a confiabilidade das medições em sistemas de telemetria veicular. Cada método de calibração tem suas vantagens e desvantagens, e a escolha do método adequado depende das características do sensor e das condições de operação. À medida que a tecnologia avança, a calibração de sensores continuará a desempenhar um papel vital na evolução da engenharia automotiva.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento e implementação do sistema de telemetria automotiva e análise de dados em tempo real aplicado ao projeto Formula SAE. Para uma compreensão clara e estruturada, o capítulo está dividido em duas seções que refletem o desenvolvimento dos sistemas de *hardware* de telemetria e de *software* de telemetria. Essa divisão reflete a abordagem integrada adotada no desenvolvimento do sistema, onde os componentes físicos e digitais trabalham em sinergia para atender aos requisitos do projeto. A Figura 7 ilustra a divisão do capítulo em relação aos temas abordados para a concepção dos procedimentos metodológicos empregados neste projeto de pesquisa.

Figura 7 – Fluxograma dos esquemas funcionais do sistema de telemetria



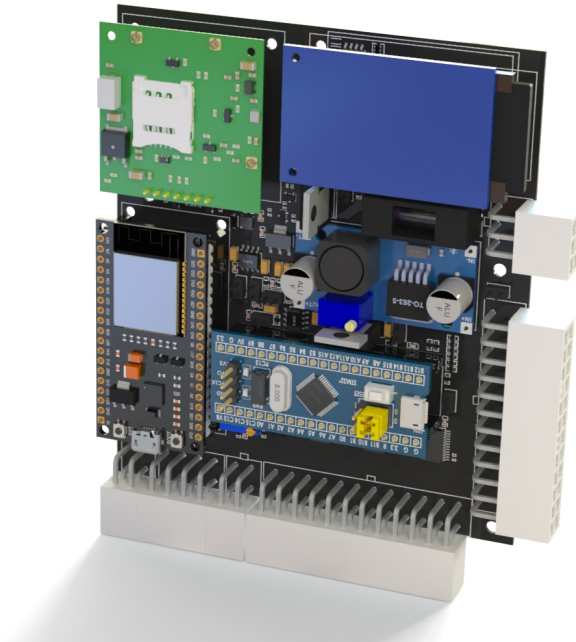
Fonte: Autoria própria.

3.1 Hardware de Telemetria

Nesta seção, são apresentados os dispositivos e componentes físicos utilizados no sistema de telemetria. Para facilitar a organização e a compreensão do hardware empregado, este será dividido em cinco módulos principais: alimentação, aquisição de dados, comunicação, processamento e saída de dados. Cada módulo desempenha uma função específica e essencial para o funcionamento do sistema como um todo. Os itens abordados incluem sensores, unidades de aquisição de dados, módulos de comunicação e outros elementos necessários para a coleta e transmissão dos dados do veículo em tempo real. Serão detalhadas as especificações técnicas, o processo de seleção dos componentes e o modo como estes foram integrados no carro Formula SAE. A Figura 8 ilustra a renderização feita por software de Desenho Assistido por Computador (CAD) do circuito da placa de telemetria, enquanto a Fotografia 1 ilustra a placa

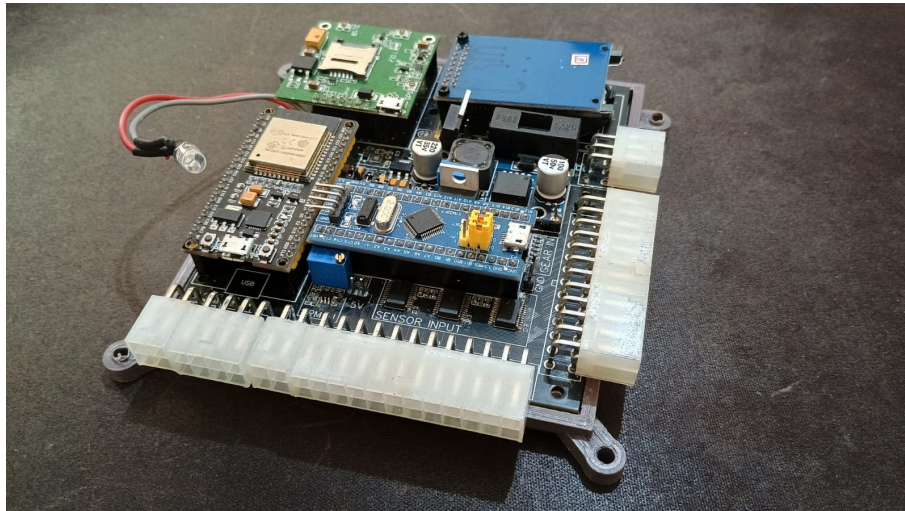
construída. Os circuitos completos podem ser encontrados nos Apêndices: A, B, C, D, E, F e G deste trabalho.

Figura 8 – Renderização da placa de telemetria



Fonte: Autoria própria.

Fotografia 1 – Fotografia da placa de telemetria construída



Fonte: Autoria própria.

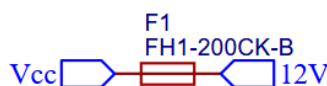
3.1.1 Alimentação

O aterramento adequado é essencial para garantir o bom funcionamento e a precisão dos sensores em sistemas de telemetria automotiva, pois evita interferências elétricas e assegura a integridade dos dados coletados. Para o aterramento da placa de telemetria neste

projeto, foi utilizado o próprio aterramento do carro, que oferece uma referência comum de terra para os componentes eletrônicos. Além disso, foram adicionadas saídas para teste de aterramento, permitindo verificar a eficiência do sistema de aterramento e minimizar possíveis falhas de comunicação.

Além de um aterramento adequado, a alimentação elétrica é um dos aspectos cruciais para garantir o bom funcionamento da placa de telemetria e de seus sensores. Neste projeto, a alimentação foi obtida diretamente da rede elétrica de 12 V do veículo, composta pelo alternador, retificador e bateria. Como medida de segurança e proteção da placa, foi incorporado um elemento fusível de 1 A na entrada de 12 V, conforme ilustrado na Figura 9, garantindo a interrupção da corrente em caso de falhas ou curtos no sistema.

Figura 9 – Proteção do sistema de alimentação da placa de telemetria

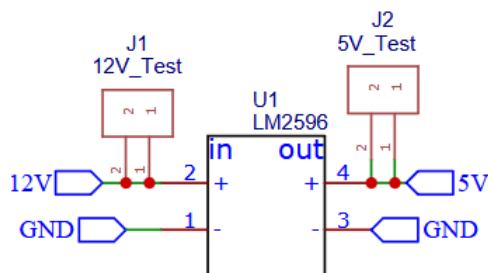


Fonte: Autoria própria.

A escolha do fusível se baseou em sua ampla disponibilidade na equipe e na utilização comum desse componente em outros sistemas do veículo, o que simplifica a integração e a manutenção do sistema de telemetria, mantendo a confiabilidade do sistema elétrico de maneira eficiente.

Para garantir o fornecimento adequado de energia aos diversos componentes do sistema de telemetria, foi utilizado um regulador do tipo *step-down* ou *buck*, que converte os 12 V fornecidos pelo sistema elétrico do carro (composto pelo alternador e bateria) para 5 V, necessário para alimentar os demais elementos eletrônicos. Considerando as características de carga e os custos envolvidos no projeto, o regulador de tensão selecionado foi o modelo *LM2596*, ilustrado no projeto pela Figura 10. Este componente é capaz de suportar uma carga de até 3 A e oferece uma saída ajustável ou saídas fixas, além de possuir uma velocidade de comutação de até 150 kHz. Essas características tornam o *LM2596* uma solução eficiente e adequada para as demandas do sistema de telemetria.

Figura 10 – Regulador de tensão empregado no projeto do sistema de telemetria



Fonte: Autoria própria.

A escolha por um módulo comercial, como o *LM2596*, se deu pela sua facilidade de implementação no projeto e pela confiabilidade comprovada pela equipe de Formula SAE em

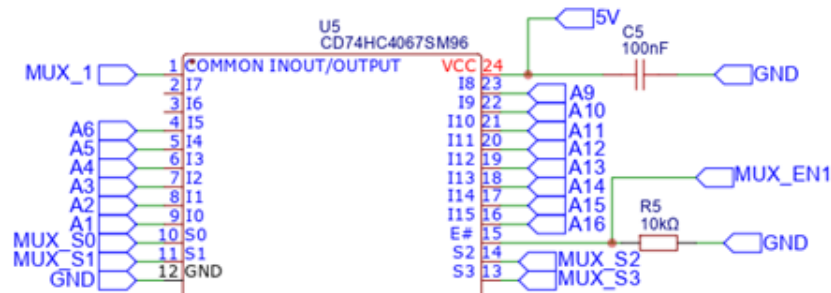
projetos anteriores, o que garantiu sua adequação às exigências do sistema e facilitou sua integração.

3.1.2 Aquisição de Dados

Esta seção descreve os principais elementos utilizados para a aquisição e processamento de dados dos sensores, destacando a importância de cada componente na precisão e confiabilidade do sistema.

Para atender à alta demanda de sensores, foram utilizados três multiplexadores de 16 canais, modelo *CD74HC4067*, ilustrado pela Figura 11, permitindo um uso mais eficiente das portas analógicas do microcontrolador. Isso garantiu a expansão do número de sensores que poderiam ser conectados ao sistema sem comprometer seu desempenho.

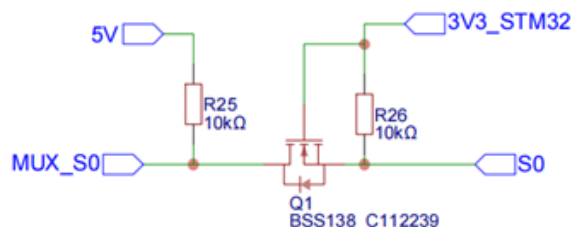
Figura 11 – Multiplexador *CD74HC4067*



Fonte: Autoria própria.

Como alguns sensores requerem uma alimentação de 5V, foi padronizada essa alimentação para todos os sensores. Dado que os microcontroladores operam em 3,3V, foi necessário adicionar conversores de nível (*Level Shifters*) nas portas digitais responsáveis pelo controle dos sensores, conforme a Figura 12. Para as portas analógicas, foram utilizados divisores de tensão, ilustrados na Figura 13, garantindo compatibilidade entre os diferentes níveis de tensão.

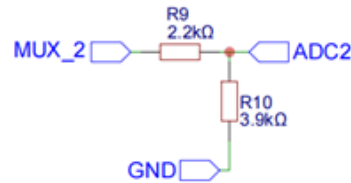
Figura 12 – Conversor de nível das portas digitais



Fonte: Autoria própria.

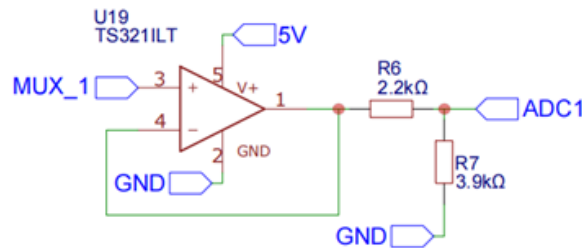
Para melhor isolar os circuitos, foi utilizado um amplificador operacional em modo de ganho unitário no primeiro multiplexador, conforme ilustrado na Figura 14. Isso possibilita a obtenção de sinais provenientes de sensores conectados à injeção eletrônica, sem alterar os valores originais medidos, garantindo maior precisão e integridade dos dados.

Figura 13 – Divisor de tensão entre multiplexador e conversor digital-analógico



Fonte: Autoria própria.

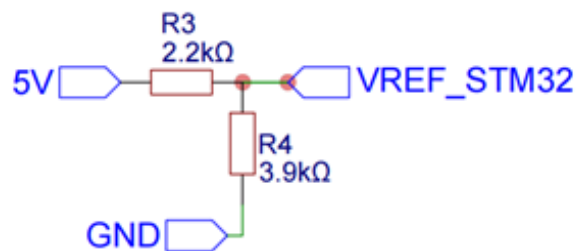
Figura 14 – Amplificador operacional funcionando em modo *buffer*



Fonte: Autoria própria.

Adicionalmente, para aumentar a confiabilidade do sistema, foi utilizada uma porta analógica para monitorar a tensão que alimenta os sensores, ilustrada pela Figura 15. Essa porta de monitoramento foi configurada como referência, permitindo a determinação precisa dos valores medidos e a correção de possíveis variações na alimentação.

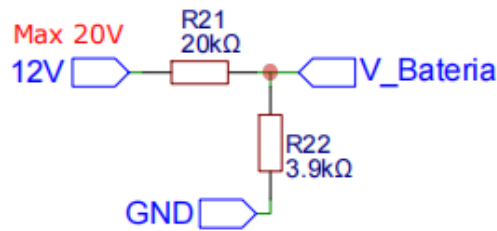
Figura 15 – Porta lógica de monitoramento de tensão



Fonte: Autoria própria.

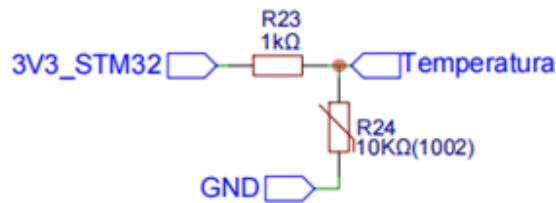
Visando a coleta de dados provenientes da própria placa, foram implementados dois circuitos de condicionamento: um para o sensoriamento da tensão da bateria, ilustrado na Figura 16, e outro para o monitoramento da temperatura interna, conforme a Figura 17. No circuito de temperatura, acrescentou-se um potenciômetro ao divisor resistivo com o objetivo de ajustar com precisão a janela de medição e, assim, ampliar a resolução na faixa de operação mais relevante ao sistema. Além disso, a inclusão de resistores em série auxilia na linearização da curva característica do sensor, atenuando variações abruptas e proporcionando maior estabilidade térmica. Dessa forma, obtém-se um sinal mais adequado ao conversor analógico-digital, garantindo maior precisão, repetibilidade e consistência nas leituras registradas pelo microcontrolador.

Figura 16 – Sensor de tensão da bateria



Fonte: Autoria própria.

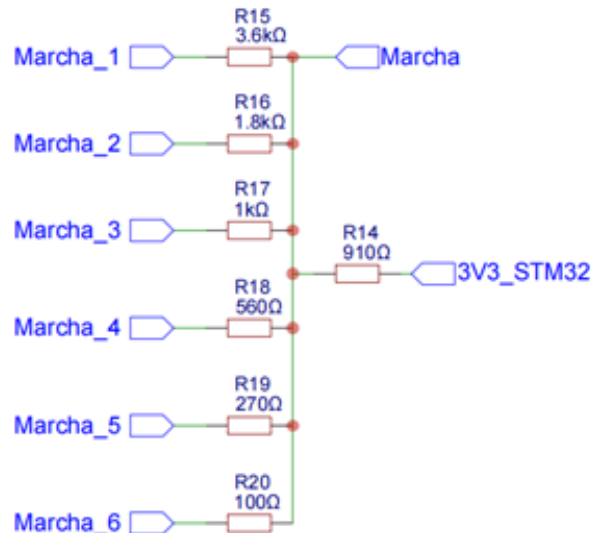
Figura 17 – Sensor de temperatura interna da placa



Fonte: Autoria própria.

Para determinar a seleção de marcha do veículo, foram utilizados resistores de diferentes valores que resultam em valores de tensão distintos conforme a marcha selecionada, como demonstrado na Figura 18.

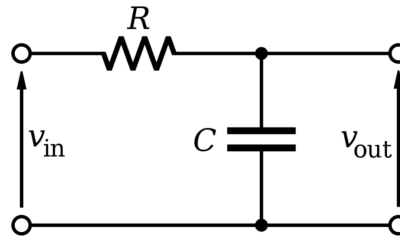
Figura 18 – Sistema de sensoreamento de marchas



Fonte: Autoria própria.

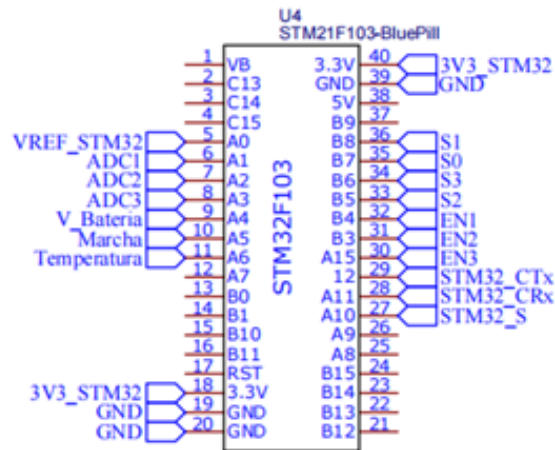
Para medir a aceleração do veículo, foi utilizado um módulo comercial baseado no sensor TDK *Invensense ICM-20948*, fornecido pela *Adafruit*. Este sensor, ilustrado na Figura 19, possui comunicação via Interface Serial Periférica (SPI) e integra nove eixos de medição (acelerômetro, giroscópio e magnetômetro), possibilitando uma leitura precisa dos movimentos. O circuito aproveita a alta taxa de atualização do sensor, permitindo a aquisição direta pelo STM32, sem necessidade de intermediação via rede CAN.

Figura 21 – Topologia do filtro passa-baixa



Fonte: (Rambo, 2013).

Figura 22 – Microcontrolador STM32F103 *Blue-Pill*



Fonte: Autoria própria.

Além do STM32, o ESP32 também desempenha papel essencial, sendo utilizado em sensores de alta frequência ou que demandam comunicação SPI.

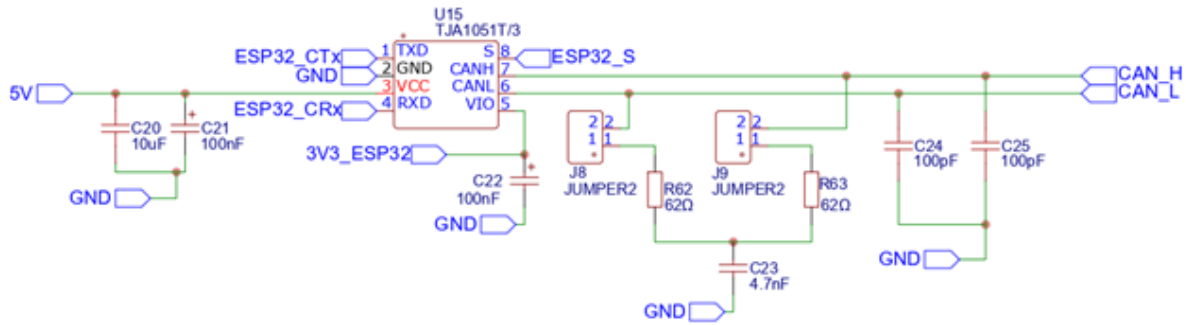
3.1.3 Comunicação

Para comunicação com a rede CAN, criou-se um circuito baseado no módulo automotivo *Macchina M2*, utilizando um *transceiver* CAN de alta velocidade do modelo *TJA1051T/3* da *NXP*, com uma taxa de transmissão de dados máxima de 5000 kbps, circuito representado pela Figura 23. Tal modelo também permite a utilização de 3,3V como tensão de *Input/Output* de dados, possibilitando o uso de microcontroladores como ESP32 e STM32. Usou-se também jumpers que permitem a ativação dos resistores de terminação do barramento, necessários para o funcionamento do protocolo. Este modelo de comunicação permite que dispositivos, como a ECU e o *Display* possam ser integrados na comunicação dos dados.

3.1.4 Processamento

Para o processamento dos dados, foi utilizado o módulo comercial NodeMCU-32S, baseado no microprocessador ESP32, que possui dois núcleos Xtensa LX6 da Tensilica, operando a uma frequência de 240 MHz cada. Este microcontrolador é amplamente utilizado devido ao seu

Figura 23 – Circuito de comunicação com a rede CAN

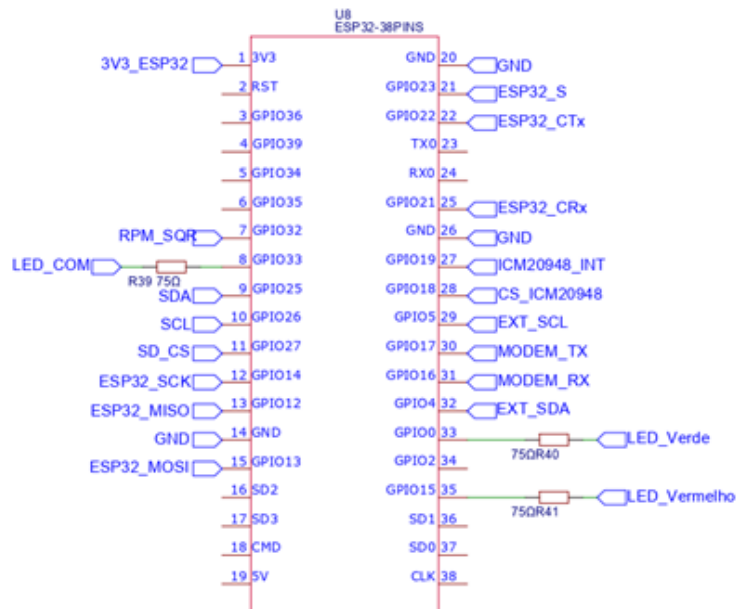


Fonte: Autoria própria.

baixo custo, alto desempenho e à capacidade de comunicação sem fio via *Wi-Fi* ou *Bluetooth*, sem a necessidade de hardware adicional.

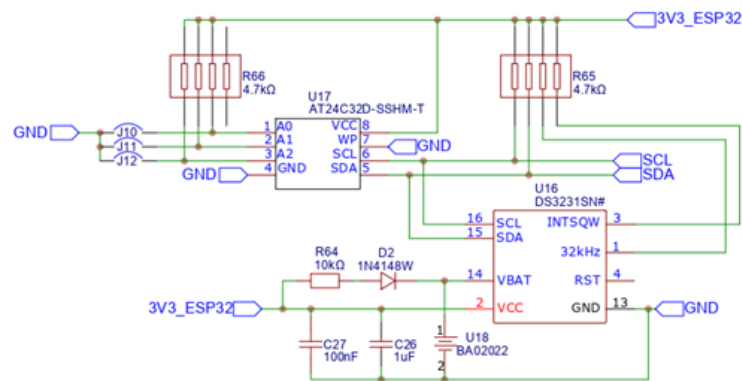
Neste projeto, o ESP32, ilustrado na Figura 24 recebe os dados tratados provenientes do STM32 e de eventuais dispositivos externos, convertendo essas informações para as unidades de medida apropriadas. Posteriormente, o microcontrolador transmite esses dados para um banco de dados na nuvem, utilizando comunicação 4G. Além disso, os dados são armazenados em um cartão SD, como uma medida de redundância.

Figura 24 – Microcontrolador ESP32



Fonte: Autoria própria.

Adicionalmente, o sistema utiliza um circuito RTC (Real-Time Clock) baseado no módulo DS3231 ZS-042, o que elimina a necessidade de calibração da data e hora após cada inicialização do sistema. Graças à bateria interna do módulo, a data e hora permanecem atualizadas mesmo após o desligamento do veículo, o que é fundamental para garantir a precisão e confiabilidade da coleta de dados. O diagrama desse circuito está ilustrado na Figura 25.

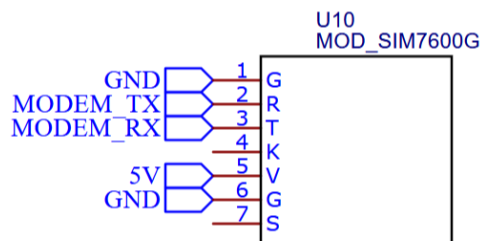
Figura 25 – Circuito *Real-Time-Clock*

Fonte: Autoria própria.

3.1.5 Saída de Dados

O módulo de saída de dados desempenha uma função crucial no sistema de telemetria, sendo responsável tanto pelo armazenamento quanto pela transmissão das informações coletadas durante o funcionamento do veículo. Esta subseção apresenta os principais componentes do módulo de saída de dados, destacando o uso do modem 4G, responsável pela transmissão em tempo real das informações para uma estação de monitoramento remoto, e do cartão SD, que assegura o armazenamento local seguro dos dados. A integração desses elementos foi projetada para garantir alta confiabilidade e flexibilidade na gestão das informações coletadas, permitindo tanto o acompanhamento em tempo real quanto a análise posterior com base nos registros armazenados.

Para a transmissão dos dados via 4G, foi selecionado o módulo SIM7600G, uma solução compacta e eficiente, conforme ilustrado na Figura 26.

Figura 26 – Módulo SIM7600G para transmissão de dados via 4G

Fonte: Autoria própria.

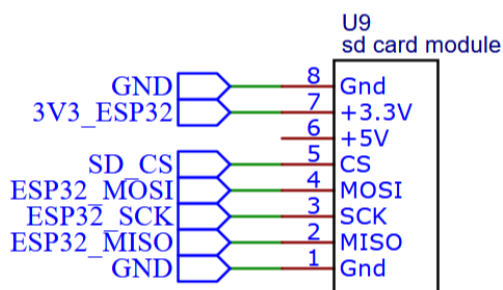
Este modem opera nas frequências de 700 MHz a 2600 MHz, suportando as bandas globais de LTE, WCDMA e GSM. Com uma velocidade de transmissão de até 50 Mbps para upload e 150 Mbps para download, o SIM7600G permite comunicações de alta performance e baixa latência. O módulo oferece versatilidade na integração, dispondo de interfaces como UART, USB 2.0, GPIO e ADC, e é compatível com protocolos como TCP/IP, FTP, HTTP/HTTPS e MQTT, o que facilita o envio e recebimento de dados em diversos formatos. O consumo de

energia do SIM7600G é otimizado, operando com uma tensão de alimentação entre 3,4V e 4,2V. Além disso, a funcionalidade GPS/GLONASS integrada oferece rastreamento em tempo real, aumentando a confiabilidade do sistema. A escolha do SIM7600G garante uma transmissão eficiente e estável dos dados para a estação de monitoramento remoto, com suporte a redes globais e fácil integração no veículo da Formula SAE.

O cartão SD desempenha um papel fundamental no armazenamento local dos dados coletados pelo sistema de telemetria. Esse componente é essencial para a preservação das informações, especialmente em cenários onde a transmissão em tempo real possa ser interrompida. O módulo de cartão SD oferece uma solução confiável e de alta capacidade, com taxas de escrita rápidas para suportar o fluxo contínuo de dados gerado pelos sensores e módulos do sistema. Sua compatibilidade com sistemas de arquivos como FAT32 facilita a integração com outros dispositivos e softwares para análise posterior dos dados. A robustez e simplicidade de uso tornam o módulo de cartão SD um componente indispensável para garantir a continuidade e a segurança do armazenamento de dados.

O módulo de cartão SD será conectado ao microcontrolador ESP32 por meio das portas GND, 3V3, SD_CS, MOSI, SCK e MISO, como ilustrado pela Figura 27, sendo o ESP32 o responsável por gerenciar as saídas de dados do sistema.

Figura 27 – Módulo de cartão SD



Fonte: Autoria própria.

3.1.6 Display LCD

Além do sistema principal de telemetria, desenvolveu-se um módulo auxiliar de exibição baseado em um microcontrolador ESP32, destinado a fornecer ao piloto informações essenciais durante a condução do veículo. Esse módulo incorpora um display LCD montado em uma placa dedicada, projetada para receber e interpretar dados provenientes da rede CAN do carro, permitindo a visualização em tempo real de variáveis como rotação do motor e posição da marcha.

A Figura 28 e a Figura 29 apresentam as renderizações tridimensionais do conjunto eletrônico, elaboradas via software CAD, evidenciando a integração estrutural entre o display, a placa de interface e o ESP32. O circuito eletrônico completo encontra-se detalhado no Apên-

dice G, enquanto o código-fonte responsável pela comunicação CAN, atualização gráfica e lógica de exibição está disponível no Apêndice J.

Figura 28 – Renderização do módulo do display LCD)

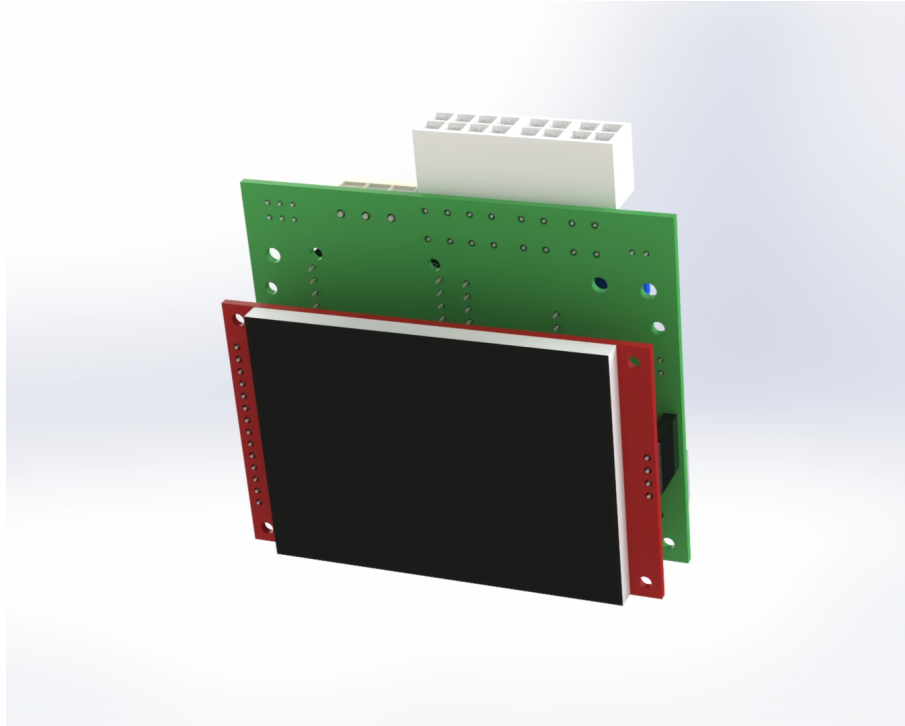
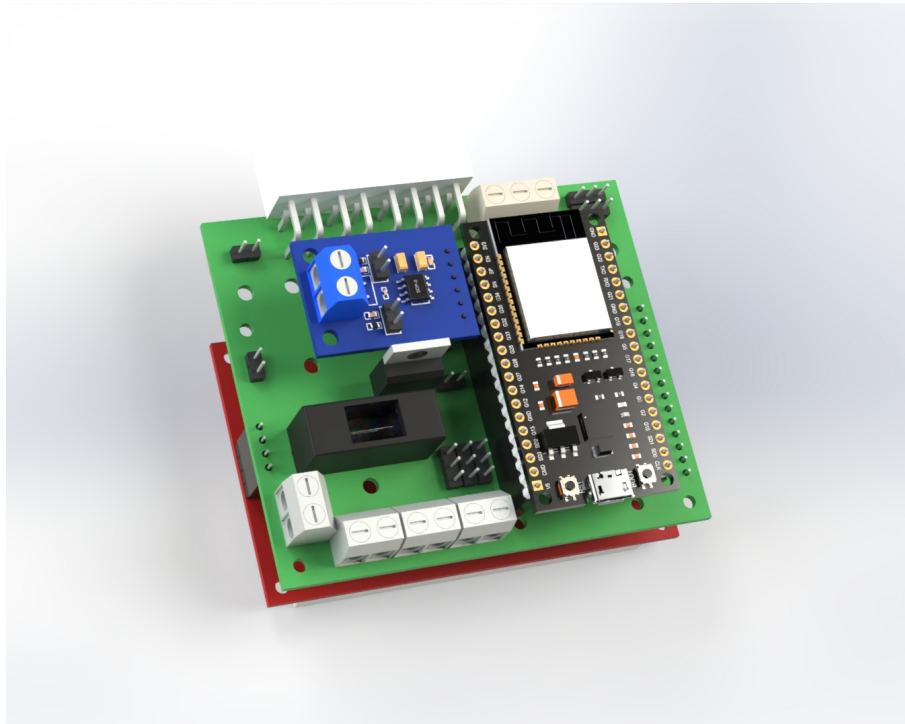


Figura 29 – Renderização do circuito do módulo do display LCD

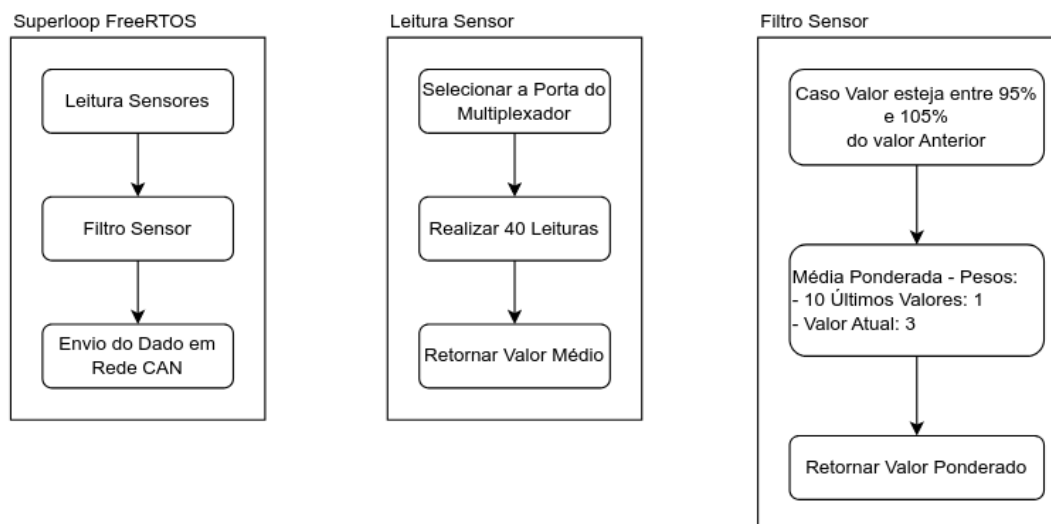


3.2 Software de Telemetria

Esta seção apresenta o desenvolvimento do *software* de telemetria automotiva, abrangendo desde as ferramentas utilizadas até a implementação do código embarcado nos módulos STM32 e ESP32. O sistema foi projetado para operar em tempo real, realizando aquisição, processamento e transmissão de dados com alta confiabilidade e sincronismo, requisitos essenciais em aplicações veiculares.

A arquitetura de software é organizada em módulos funcionais bem definidos. A Figura 30 apresenta o fluxo das rotinas implementadas no STM32, incluindo a aquisição CAN, o processamento inicial dos sensores e a organização dos dados em buffer. Por sua vez, a Figura 31 ilustra o fluxo de execução no ESP32, contemplando leitura, filtragem, armazenamento no cartão SD e transmissão MQTT.

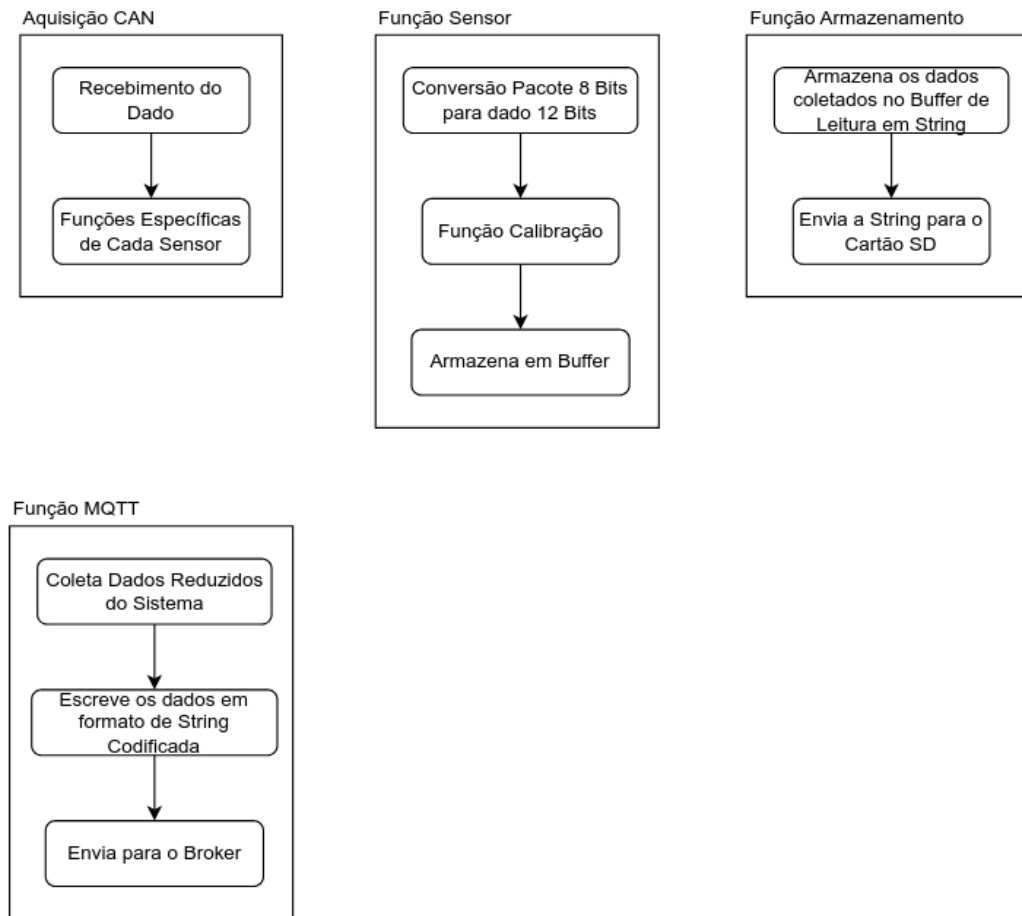
Figura 30 – Fluxo geral das funções implementadas no STM32, incluindo aquisição CAN e processamento inicial dos sensores



Essa estrutura modular garante uma divisão clara de responsabilidades: o STM32 concentra a leitura dos sensores e o envio dos dados pela rede CAN, enquanto o ESP32 executa o processamento local, o armazenamento e a comunicação externa via 4G ou *Wi-Fi*. Essa separação facilita a depuração, aumenta a confiabilidade e permite a expansão do sistema conforme novas variáveis são incorporadas.

O código embarcado foi desenvolvido em linguagem C, utilizando extensivamente a biblioteca HAL (*Hardware Abstraction Layer*) para o gerenciamento das tarefas. As seções seguintes descrevem os ambientes de desenvolvimento empregados e o funcionamento do firmware, desde a aquisição e envio de dados no STM32 até o processamento, armazenamento local e comunicação externa no ESP32.

Figura 31 – Fluxo das rotinas do ESP32, abrangendo leitura filtrada, armazenamento e envio dos dados via MQTT



3.2.1 Ambientes de Desenvolvimento

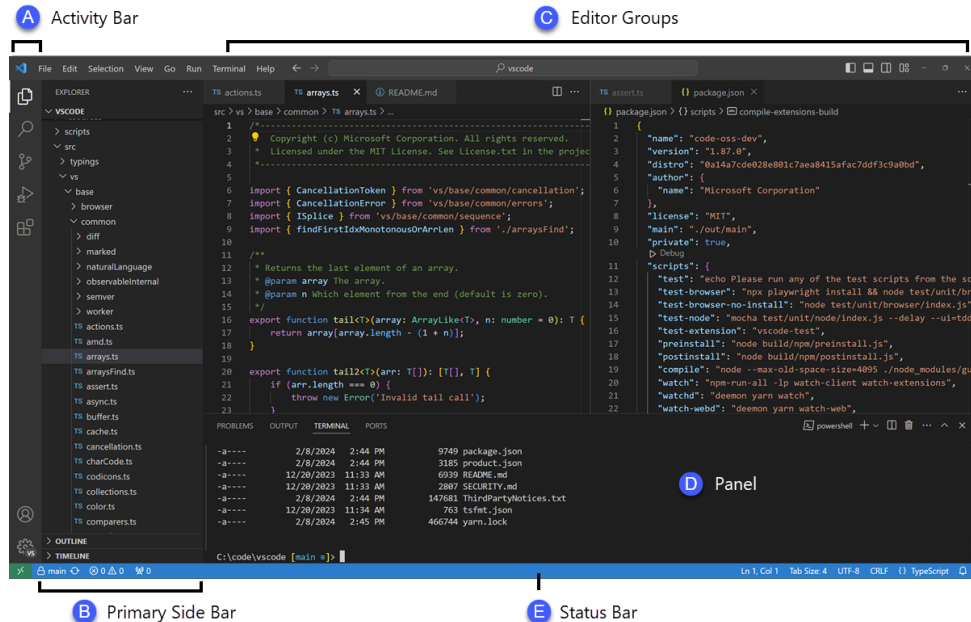
O desenvolvimento do sistema de telemetria foi apoiado por um conjunto de ferramentas que facilitaram a configuração do hardware, a escrita do código-fonte e a integração entre os módulos embarcados. Foram utilizados ambientes consolidados na área de sistemas embarcados, que oferecem suporte direto aos microcontroladores STM32 e ESP32, além de recursos de depuração e automação de compilação. Entre eles, destacam-se o *Visual Studio Code*, com a extensão *PlatformIO*, e o *STM32CubeMX*, responsável pela geração e inicialização de periféricos. Esses ambientes proporcionaram agilidade no desenvolvimento e maior padronização na estrutura do firmware.

3.2.1.1 Visual Studio Code

Trata-se de um editor de código-fonte criado pela *Microsoft* para a elaboração de códigos de programação para aplicações diversas. Sua escolha se deve ao fato de ser gratuito, além de

possuir diversas extensões integradas, o que permite uma maior facilidade de uso (Microsoft, 2020). Sua interface é ilustrada pela Figura 32.

Figura 32 – Interface do *Visual Studio Code*



Fonte: (Microsoft, 2025).

A extensão utilizada para programar é o *PlatformIO*, com suporte para ESP32, torna a programação mais simples ao se usar o mesmo *framework* do *Arduino*, que é utilizado em larga escala.

3.2.1.2 STM32CubeMX

Com a mesma premissa do Visual Studio Code, o *STM32CubeMX* é um software desenvolvido pela *STMicroelectronics*, para microcontroladores STM32.

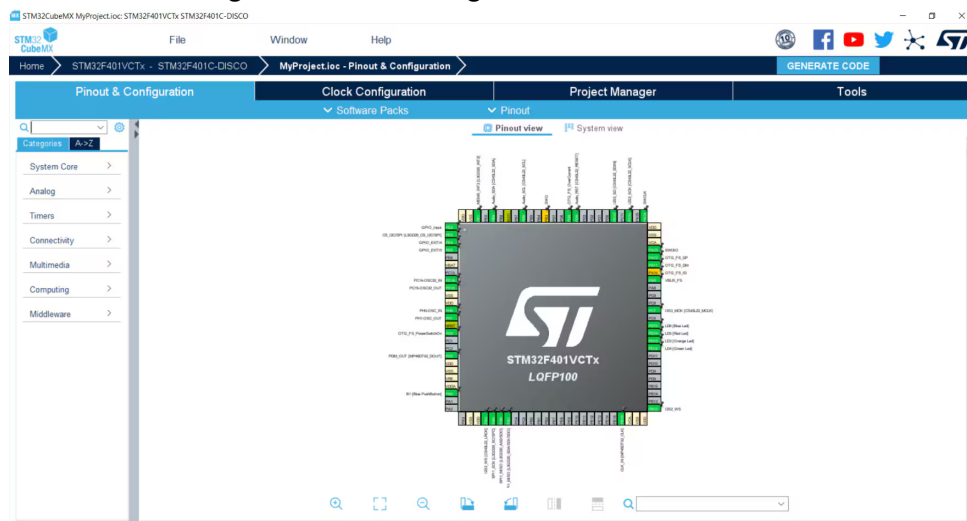
Este aplicativo traz uma simplificação na programação, ao permitir o usuário a configurar as funções das portas do microcontrolador através de um elemento gráfico, como mostra a Figura 33, gerando um código a partir disso.

3.2.2 Software de Aquisição de Dados

O *software* de aquisição de dados foi estruturado de forma modular e segue o padrão de organização gerado pela ferramenta *STM32CubeMX*. Essa estrutura evidencia a utilização da biblioteca HAL e a adoção de boas práticas de desenvolvimento embarcado, permitindo que o sistema realize a coleta, processamento e transmissão de dados de forma eficiente e determinística.

O código é estruturado sobre um laço principal (*superloop*) responsável por coordenar as tarefas de aquisição de dados. A coleta ocorre por meio do ADC e do barramento CAN.

Figura 33 – Interface gráfica do **STM32CubeMX**



Fonte: (Stmicroelectronics, 2025).

O ADC é configurado para operar nos modos *scan* e *continuous*, permitindo a amostragem sequencial de múltiplos canais de sensores.

O fluxo de aquisição é implementado a partir da função `main()`, gerada pelo *CubeMX* e adaptada para o projeto específico. Nela, são inicializados os drivers fundamentais do STM32, como por exemplo `MX_ADC1_Init()` e `MX_ADC2_Init()` para os dois canais de ADC, configurando resolução, tempo de amostragem e modo de operação. Serão inicializadas também as demais GPIOs utilizadas no controle dos multiplexadores, assim como o FreeRTOS, um *Timer* auxiliar e o controlador CAN, utilizando uma taxa de envio de 500 kbit/s, escolhida por ser a mesma que a ECU permite.

A aquisição dos dados ocorre dentro da tarefa `sensorTask()` do FreeRTOS, chamada automaticamente a cada 2 milissegundos. Nesta rotina, o sistema executa operações de filtragem simples (como médias móveis ou filtros exponenciais) e calibração de valores brutos, aplicando *offsets* e fatores de ganho definidos de acordo com os sensores utilizados. A utilização de um *superloop* garante que os multiplexadores são lidos de maneira sequencial e evitando acionamento simultâneo pelo RTOS, pois existe um compartilhamento de conexões elétricas de *select*, possuindo apenas os pinos de *enable* individuais que determinam qual multiplexador será lido.

Os princípios de design aplicados ao firmware seguem os fundamentos de sistemas de aquisição em tempo real: amostragem determinística, latência mínima e isolamento entre aquisição e comunicação. O uso de *buffers* duplos (ping-pong) permite processar um conjunto de dados enquanto o próximo é adquirido, evitando perdas de informação durante o processo. Para garantir o bom funcionamento do multiplexador, foi adicionado um timer de um microssegundo do STM32 para respeitar o tempo de subida do sinal no multiplexador, após a seleção do canal.

Os dados processados são então empacotados em estruturas padronizadas e transmitidos através de pelo barramento CAN, utilizando a função `HAL_CAN_AddTxMessage()`. Cada mensagem CAN contém Identificadores Únicos (IDs) e Campos de Dados de Tamanho

Fixo, do inglês *Data Length Code* (DLC), que representam variáveis como temperatura, rotação do motor ou tensão da bateria. A estrutura do pacote segue o padrão automotivo de 8 bytes por quadro, assegurando compatibilidade com a ECU e sistemas de diagnóstico.

Além da coleta e transmissão, o código organiza a aquisição em blocos temporais indexados por carimbos de tempo (*timestamps*) gerados por temporizadores internos. Essa informação é usada para sincronizar as leituras de diferentes sensores e mensagens CAN, possibilitando a reconstrução temporal precisa dos eventos durante a análise de dados no ambiente de pós-processamento.

3.2.3 Envio de Dados do STM32 para a Rede CAN

O módulo STM32 é responsável pela aquisição e processamento inicial dos dados provenientes dos sensores. Após essa etapa, o microcontrolador organiza as informações em quadros padronizados e as envia novamente à rede CAN, onde são recebidas pelo ESP32. Esse fluxo permite que o ESP32 realize o tratamento final e o encaminhamento dos dados à camada de telemetria, garantindo comunicação contínua e sincronizada entre os módulos.

A transmissão dos dados na rede CAN é realizada a partir da estrutura `CAN_TxHeaderTypeDef`, componente da biblioteca HAL da STMicroelectronics. Essa estrutura define os parâmetros essenciais de cada quadro enviado, como o identificador padrão de 11 bits (*StdId*), o comprimento do campo de dados (*DLC*) e o tipo de quadro (*RTR = CAN_RTR_DATA*). Após a configuração do cabeçalho e do vetor de dados `TxData[8]`, o envio é executado pela função `HAL_CAN_AddTxMessage()` que insere o quadro em um dos três *mailboxes* disponíveis no controlador CAN.

Primeiramente, o código realiza a inicialização do periférico CAN por meio da função `MX_CAN_Init()`, definindo a taxa de transmissão, o modo de operação e os filtros de aceitação. Em seguida, é montado o cabeçalho de envio, atribuindo identificadores únicos a cada tipo de dado, como 0x02 para `DATA_01` e 0x03 para `DATA_02`. Depois disso, as variáveis físicas medidas são convertidas para o formato `uint8_t`, aplicando-se os fatores de escala e a ordem de bytes conforme o protocolo interno da rede. Na sequência, o quadro é enfileirado utilizando a função `HAL_CAN_AddTxMessage()` que retorna o status de sucesso ou erro do envio. Por fim, o sistema usa as funções `HAL_CAN_IsTxMessagePending()` e `HAL_CAN_GetError()` para monitorar o estado do barramento.

O uso de identificadores fixos e formatos de dados estáveis (DLC constante e layout de bytes documentado) permite que o módulo ESP32, atuando como receptor, decodifique os pacotes de maneira determinística. Por exemplo, um pacote de 8 bytes pode conter cinco valores de 12 bits (valores de ADC), garantindo um melhor aproveitamento do barramento. O ESP32, configurado com o driver TWAI (equivalente ao controlador CAN), identifica o ID correspondente e reconstrói as variáveis físicas a partir dos bytes recebidos, mantendo o sincronismo com o fluxo proveniente do STM32.

Em termos de arquitetura, essa camada de retransmissão transforma o STM32 em um nó ativo da rede CAN, responsável por converter medições locais em mensagens compatíveis com o protocolo automotivo. O ESP32, por sua vez, atua como nó de coleta central, agregando os quadros recebidos, calibrando e transmitindo-os via 4G ou armazenando-os em cartão SD.

3.2.4 *Software* de Processamento de Dados no ESP32

O ESP32 é responsável por realizar o processamento local (*edge processing*) dos dados provenientes do módulo STM32, recebidos pela rede CAN, garantindo que as informações coletadas sejam organizadas, armazenadas e posteriormente transmitidas à camada de telemetria via 4G. O sistema de software foi desenvolvido de forma modular e assíncrona, com tarefas independentes para gerenciar os processos de aquisição, tratamento, armazenamento e comunicação dos dados, mantendo o desempenho e a confiabilidade mesmo sob condições de alta taxa de amostragem.

O funcionamento inicia-se com a configuração e inicialização da interface CAN do ESP32, realizada por meio do driver TWAI, operando a uma taxa de 500 kbit/s. Após a ativação, a tarefa `CAN_receiveTask` é responsável por monitorar continuamente o barramento, realizando a recepção não bloqueante dos quadros CAN transmitidos pelo STM32. Cada quadro recebido é encaminhado à função `CAN_setSensor`, que identifica o tipo de dado com base no identificador (ID) e direciona o processamento ao manipulador correspondente, como `fn_Data_01`, `fn_Data_10` ou `fn_Temp`. Esses manipuladores realizam a decodificação dos *payloads* recebidos, convertendo os bytes da CAN em valores brutos (`uint8_t` ou `uint16_t`) utilizando deslocamento de bits, para assim serem transformados em grandezas físicas calibradas, como temperatura, pressão, rotação do motor e posição da suspensão, utilizando funções específicas de conversão e escala.

Os dados convertidos são então armazenados em um *buffer* duplo por meio da função `sensorUpdate`, que organiza as informações conforme a estrutura de sensores definida no sistema, de forma que uma parte recebe os dados das conversões e a outra escreve os valores no cartão SD (`buffer_write` e `buffer_read`). Cada linha do *buffer* corresponde a um ciclo de aquisição e inclui as leituras de todos os sensores ativos, acompanhadas de um carimbo de tempo gerado pelo sistema (*timestamp*). Quando o STM32 envia o sinal de confirmação `BUFFER_ACK`, o ESP32 conclui a gravação da linha atual e avança o índice de escrita. Ao atingir o limite definido (`BUFFER_LENGTH`), ocorre a troca de funções entre os *buffers*, sinalizando que um novo lote de dados está pronto para ser gravado em armazenamento permanente e o outro campo do *buffer* está apto a receber novos dados.

A tarefa `sdTask` é responsável pela gravação dos dados em um cartão SD, utilizando a biblioteca SPI do ESP32. O conteúdo do *buffer* pronto é convertido em formato CSV pela função `writeSDCard`, que organiza os valores de cada sensor em colunas e adiciona o tempo de aquisição ao final de cada linha. Essa estrutura permite que os arquivos sejam lidos diretamente por ferramentas de análise e planilhas eletrônicas. Além disso, o mesmo ponto de escrita pode

servir como *handoff* para o envio de dados pela rede 4G, caso o módulo de comunicação esteja conectado, permitindo o funcionamento híbrido entre armazenamento local e transmissão em tempo real.

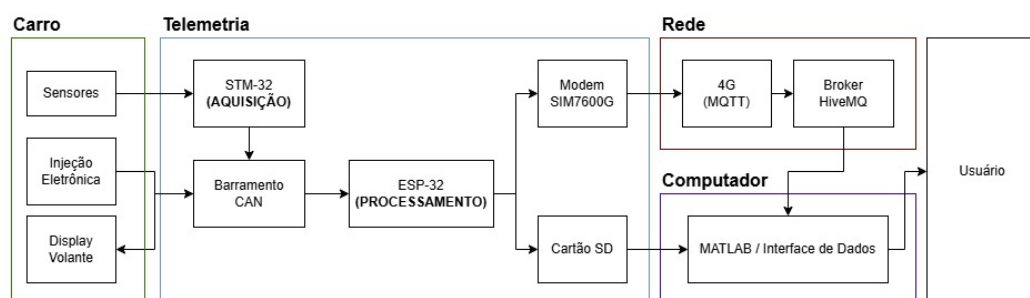
O software também integra mecanismos de sincronização temporal e monitoramento do estado do sistema. O ESP32 utiliza o *RTC DS3231* e sincroniza seu relógio via *NTP* quando conectado à rede *Wi-Fi*, garantindo que todos os registros possuam marcação temporal precisa. Paralelamente, a tarefa `MessagesFN` transmite quadros de diagnóstico (`MESSAGES_ID`) informando o estado dos subsistemas, como o funcionamento do SD e o sensor de Acelerômetro, possibilitando monitoramento de falhas em tempo real.

Por fim, o ESP32 realiza aquisição local complementar através da IMU MPU6050, que fornece dados de aceleração e giroscópio. A tarefa `AccelGyro_task1` lê periodicamente os registradores do sensor via I2C, processa os valores e publica os resultados tanto no sistema interno quanto de volta à rede CAN, nos identificadores `ACC_ID` e `GYRO_ID`. Essa integração amplia a capacidade de medição e análise dinâmica do veículo, permitindo que o módulo funcione tanto como receptor de dados do STM32 quanto como uma unidade sensorial autônoma.

3.2.5 Software de Envio de Dados via Rede 4G

O envio de dados do sistema de telemetria para a nuvem é realizado por meio de um módulo *SIM7600G*, operando na rede 4G e utilizando o protocolo MQTT sobre TCP. O gerenciamento dessa comunicação é implementado em uma tarefa dedicada, denominada `SIM_Task(void *parameter)`, definida no arquivo `main.cpp`. Essa rotina é responsável por todo o ciclo de operação do modem, desde a inicialização e autenticação na rede celular até o envio periódico dos pacotes de dados processados. As funções de baixo nível, responsáveis pelo controle dos comandos AT e pela implementação do protocolo MQTT, estão encapsuladas no arquivo `Formula_SIM7600G.cpp`, destacando-se a função `mqtt_publish(const char *topic, const char *payload)`, que executa efetivamente a publicação das mensagens. A Figura 34 permite compreender a relação do usuário com o sistema.

Figura 34 – Diagrama de casos de uso do Sistema de Telemetria



Fonte: Autoria Própria.

Durante sua execução, a `SIM_Task` segue uma máquina de estados que controla o comportamento do modem conforme o estágio da comunicação. Inicialmente, são envi-

ados comandos de configuração básicos (AT, AT+IPR=115200, AT+IFC=0,0, AT&W), seguidos da verificação do SIM (AT+CPIN?) e da configuração do ponto de acesso (AT+CGDCONT=1, "IP", "zap.vivo.com.br"). Após o registro bem-sucedido na rede, o contexto de dados é aberto com o comando AT+NETOPEN. Em seguida, é estabelecida a sessão MQTT, que inclui a inicialização do subsistema com AT+CMQTTSTART, a atribuição de um identificador de cliente (AT+CMQTTACCQ=0, "Formula_GTW") e a conexão ao *broker* remoto (AT+CMQTTCONNECT=0, "tcp://broker.hivemq.com:1883", 60, 1). Quando o modem retorna a confirmação +CMQTTCONNECT: 0,0, a tarefa passa ao modo operacional contínuo, no qual os dados são enviados periodicamente ao servidor.

Para garantir a integridade e o sincronismo entre tarefas, é utilizado um semáforo binário (xMqttMutex) que protege o *buffer* global de publicação (mqtt_payload). Antes de qualquer modificação, funções como setPayload(), setPayload32() e clearPayload() executam as chamadas xSemaphoreTake() e xSemaphoreGive(), impedindo que múltiplas tarefas alterem o mesmo conjunto de dados simultaneamente. O *payload* é construído em formato textual compactado: cada variável é identificada por um caractere e seu valor é convertido em grupos de 5 ou 6 bits mapeados para caracteres ASCII.

A rotina mqtt_publish() executa a sequência completa de comandos de controle para modems, conhecidos como comandos AT (*Attention*), necessária para o envio das mensagens. Inicialmente, define-se o tópico de publicação com AT+CMQTTTOPIC=0, \$LEN, seguido do envio do *payload* com AT+CMQTTPAYLOAD=0, \$LEN, aguardando o prompt >. Após o carregamento do conteúdo, o comando AT+CMQTTTTPUB=0,0,60 publica o pacote com um tempo limite de 60 s. Caso o modem retorne o código +CMQTTTTPUB: 0,0, a transmissão é considerada bem-sucedida; do contrário, a função executa o encerramento ordenado da sessão (AT+CMQTTDISC, AT+CMQTTREL, AT+CMQTTSTOP) e reinicia o processo de conexão.

Durante a operação, a tarefa monitora continuamente o estado da conexão e a disponibilidade do *payload*. Quando a sessão MQTT não está ativa, o sistema chama mqtt_start() para tentar reconectar automaticamente; caso haja dados prontos, chama-se mqtt_publish(topic, mqtt_payload) para transmitir as informações. Na versão atual, o tópico de publicação é fixo, identificado como "Test2142151", mas pode ser facilmente parametrizado para representar diferentes veículos, pilotos ou sessões de teste. Em caso de falhas na publicação, o modem é reinicializado e o ciclo de reconexão é reiniciado de forma determinística, garantindo que o sistema se recupere automaticamente de interrupções momentâneas de rede, perda de sinal ou reinicializações não planejadas.

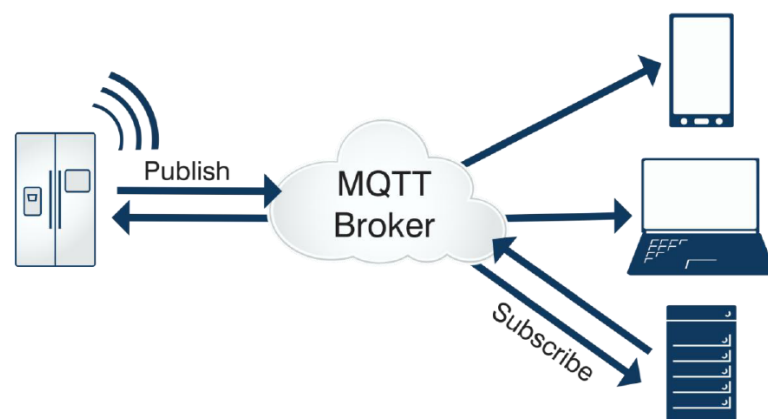
3.2.6 Recebimento de Dados via *Broker* MQTT

O recebimento dos dados transmitidos pelo módulo 4G é realizado através de um servidor intermediário (*broker* MQTT), responsável por gerenciar o fluxo de mensagens entre os dispositivos de campo e a aplicação de análise de dados. O protocolo MQTT foi escolhido por

sua leveza, confiabilidade e ampla adoção em aplicações de telemetria e *Internet of Things* (IoT), permitindo comunicação assíncrona organizada por tópicos. Nesse arranjo, o módulo *SIM7600G* embarcado no veículo atua como *publisher*, enviando periodicamente as informações coletadas, enquanto o servidor de telemetria — localizado localmente ou na nuvem — opera como *subscriber*, recebendo e processando as mensagens publicadas no tópico configurado.

A comunicação segue o modelo de publicação e subscrição típico do MQTT, no qual cada quadro de dados enviado pelo módulo embarcado é publicado em um tópico específico, e o servidor inscrito nesse tópico recebe automaticamente as mensagens associadas. No ambiente de testes do sistema, utilizou-se o *broker* público `broker.hivemq.com` na porta 1883, com tópicos configurados individualmente para cada sessão de ensaio. As mensagens chegam ao *broker* no formato textual gerado pela rotina `mqtt_publish()`, conforme descrito na subseção 3.2.5, contendo o *payload* compactado em caracteres ASCII que representam as variáveis de telemetria adquiridas pelo microcontrolador STM32 — como temperatura, pressão no coletor, posição da borboleta e rotação do motor — codificadas em pares identificador-valor. A representação geral desse fluxo de comunicação é ilustrada na Figura 35.

Figura 35 – Estrutura de comunicação baseada no modelo *publisher/subscriber* do protocolo MQTT



Fonte: Rakwireless (2024).

No servidor de recepção, um cliente MQTT desenvolvido em MATLAB foi utilizado para realizar a subscrição contínua aos tópicos publicados pelo veículo. A aplicação se conecta ao *broker*, monitora os eventos de chegada de mensagem e realiza a decodificação do *payload*. O processo de decodificação inverte a compactação aplicada no módulo embarcado: os blocos de caracteres são convertidos novamente em valores numéricos de 8, 16 ou 32 bits, de acordo com o identificador da variável. Esse procedimento é implementado por um dicionário de chaves, no qual cada caractere representa uma grandeza física e sua respectiva escala de calibração.

Após a decodificação, os dados são exibidos em tempo real de forma gráfica no MATLAB. Esse ambiente permite o monitoramento simultâneo de múltiplos parâmetros, como de

rotação, aceleração e temperatura, com atualização em intervalos de poucos segundos. Estes dados ainda são armazenados no dispositivo local que executa a leitura, permitindo uma facilidade de análises posteriores.

3.3 Procedimentos de Calibração do Sistema

A calibração dos sensores utilizados no sistema de telemetria é uma etapa essencial para garantir que as medições coletadas reflitam com precisão as grandezas físicas observadas durante os testes. No presente trabalho, foram calibrados dois grupos principais de sensores: o sensor de temperatura (termistor NTC) e os sensores de aceleração (acelerômetros MEMS), ambos fundamentais para o monitoramento térmico e dinâmico do veículo.

3.3.1 Calibração do Sensor de Temperatura

A calibração do sensor de temperatura foi realizada utilizando um termistor NTC, cujos valores de referência foram obtidos experimentalmente a partir de três pontos de temperatura conhecidos. A Tabela 2 apresenta os valores de temperatura e suas respectivas resistências elétricas.

Tabela 2 – Dados experimentais utilizados na calibração do termistor NTC.

Temperatura (°C)	Temperatura (K)	Resistência (Ω)
0	273,15	9000
27	300,15	2500
100	373,15	200

Com base nesses pontos, aplicou-se o modelo de Steinhart–Hart, descrito pela Equação 1 na subseção 2.4.2, amplamente utilizado em instrumentação térmica automotiva devido à sua capacidade de representar com precisão a relação não linear entre resistência e temperatura em termistores NTC. Para isso, construiu-se a matriz A contendo os termos 1, $\ln(R)$ e $[\ln(R)]^3$, e o vetor b , composto pelos valores de $1/T$, sendo T a temperatura absoluta. A solução do sistema linear $Ac = b$, em que $c = [C_1 \ C_2 \ C_3]^T$, forneceu resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes ajustados da equação de Steinhart–Hart.

Coeficiente	Valor
C_1	0.00130654
C_2	2.5971×10^{-4}
C_3	-1.0896×10^{-8}

Observa-se que o coeficiente C_1 apresenta a maior magnitude, representando a contribuição predominante no cálculo da temperatura. O termo C_2 , de ordem menor e positivo, corrige a curvatura intermediária da curva resistência–temperatura. Já o coeficiente cúbico C_3 , embora muito pequeno e negativo, desempenha papel importante na representação da forte não linearidade dos termistores em faixas amplas de operação.

3.3.2 Calibração dos Sensores de Aceleração

A calibração dos acelerômetros foi realizada utilizando o método de calibração estática descrito no referencial teórico, no qual a referência é o próprio campo gravitacional terrestre. O procedimento consistiu em orientar o módulo sensorial de forma que dois de seus eixos permanecessem perpendiculares à gravidade, apresentando leitura próxima de $0g$, enquanto o terceiro eixo fosse alinhado diretamente com a direção da gravidade.

Para cada eixo, o acelerômetro foi posicionado de modo a registrar os valores correspondentes às condições de $-1g$, $0g$ e $+1g$. Em cada posição, aguardou-se a estabilização do sinal e registraram-se as leituras brutas fornecidas pelo sensor. A partir desses valores foram determinados o *offset* (leitura em $0g$) e o coeficiente de calibração m , conforme o modelo de calibração estática apresentado na Equação 4, descrita subseção 2.4.6.1.

Os coeficientes obtidos para cada eixo foram então inseridos no firmware do sistema de telemetria, permitindo corrigir as leituras brutas em tempo real.

3.4 Procedimento de Validação do Sistema

A validação do sistema de telemetria desenvolvido foi realizada por meio de ensaios práticos com o veículo Formula SAE da UTFPR, com o objetivo de verificar o funcionamento, a precisão e a robustez da arquitetura de aquisição e transmissão de dados em condições reais de operação. Após a integração completa dos módulos de aquisição (STM32), processamento e comunicação (ESP32), o veículo foi conduzido ao Campus Neville da UTFPR, local onde foram executados testes dinâmicos em ambiente controlado.

O principal ensaio utilizado para a validação — e posteriormente detalhado na seção 4.3 — foi o teste de *skidpad*, amplamente empregado em competições Formula SAE para avaliar aderência lateral, equilíbrio dinâmico e comportamento do veículo em curvas de raio constante. A Figura 36 apresenta o traçado oficial do *skidpad*, composto por duas voltas circulares formando um percurso em formato de “oito”.

No Campus Neville, o traçado foi reproduzido utilizando cones com dimensões equivalentes às da prova oficial, permitindo que o veículo percorresse o circuito em condições representativas. Esse ensaio forneceu dados essenciais para a avaliação da dinâmica veicular, incluindo medições de aceleração lateral, ângulo de volante, RPM e TPS, cujas análises são apresentadas posteriormente na seção de seção 4.3. A Fotografia 2 mostra o veículo durante a execução do teste de *skidpad*, já equipado com o sistema de telemetria desenvolvido.

Além do ensaio de *skidpad*, o veículo também realizou uma volta completa pelo campus, permitindo avaliar o desempenho do sistema de telemetria em um trajeto mais longo e variado, composto por diferentes condições de condução, como variações de velocidade, segmentos retilíneos e curvas de distintas características. Durante esse percurso, foram coletadas as variáveis TPS (*Throttle Position Sensor*, posição da borboleta de aceleração), RPM (*Revolutions Per Minute*, rotação do motor), MAP1 e MAP2 (*Manifold Absolute Pressure*, sendo MAP1 medido na

Figura 36 – Traçado em formato de “oito” utilizado na competição de *SkidPad*



Fonte: Team (2025).

Fotografia 2 – Veículo Formula SAE da UTFPR realizando o teste de *skidpad* no Campus Neoville, equipado com o sistema de telemetria desenvolvido



Fonte: Autoria própria.

admissão do motor e MAP2 tanto após o estágio de compressão da turbina quanto no plenum de admissão) e MAF (*Mass Air Flow*, vazão mássica de ar admitido pelo motor), que também são analisadas na seção 4.3. Todos os dados obtidos nos dois ensaios — tanto no *skidpad* quanto na volta pelo campus — foram simultaneamente registrados no cartão SD e transmitidos em tempo real via MQTT, assegurando redundância e continuidade na aquisição. Os conjuntos de dados coletados e transmitidos durante os testes são apresentados e discutidos em detalhe na seção 4.3.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta e analisa os resultados obtidos durante a validação do sistema de telemetria desenvolvido. As avaliações foram conduzidas conforme o procedimento descrito no Capítulo de Materiais e Métodos, contemplando tanto ensaios dinâmicos, realizados durante o teste de *skidpad* e a volta experimental pelo campus, quanto análises funcionais do processamento embarcado. Os resultados aqui discutidos abrangem o desempenho do sistema na aquisição, transmissão e armazenamento de dados, bem como a caracterização do uso de recursos computacionais e da carga do barramento CAN. Dessa forma, busca-se demonstrar a confiabilidade da solução implementada e sua capacidade de operação em condições reais de funcionamento.

4.1 Resultado de Uso de Recursos do Sistema Embarcado

Nesta seção, apresentam-se também os resultados referentes ao uso de memória do microcontrolador ESP32, a taxa de ocupação do barramento CAN e a latência observada no sistema, parâmetros fundamentais para avaliar a estabilidade operacional e a capacidade de expansão do sistema de telemetria.

4.1.1 Uso de Memória no ESP32

A análise do uso da memória foi realizada por meio do ambiente de desenvolvimento *PlatformIO*, que fornece um relatório detalhado a cada etapa de compilação do firmware. Os resultados obtidos indicam que o sistema utiliza aproximadamente 37,8% da memória RAM total do ESP32, o que corresponde a 123 720 bytes de um total de 327 680 bytes disponíveis. Esse valor demonstra que o firmware possui margem operacional suficiente para lidar com picos de processamento, execução simultânea de rotinas e inclusão de novos componentes no futuro.

Além disso, verificou-se que o uso de memória *Flash* alcançou 55,2% da capacidade total, totalizando 1 737 189 bytes de um total de 3 145 728 bytes. Essa ocupação contempla todas as bibliotecas utilizadas para comunicação CAN, interface com o módulo 4G, armazenamento em cartão SD e processamento interno dos dados recebidos. O resultado confirma que o firmware permanece eficiente em termos de armazenamento, mantendo espaço suficiente para atualizações e aprimoramentos funcionais.

4.1.2 Taxa de Ocupação do Barramento CAN

Com base na planilha de cálculos de carga do barramento (*CAN Bus Load*), foram analisadas as mensagens transmitidas pelo módulo STM32 ao ESP32. Para cada quadro, a planilha considera a quantidade total de bits por mensagem (42 bits fixos acrescidos de 8 bits por byte

de dados do DLC) e a frequência de envio de cada pacote. A partir desses dados, foi calculada a taxa individual de bits por segundo (*bits/s*) gerada por cada mensagem.

Somando-se todas as mensagens de telemetria, a carga total do barramento foi de aproximadamente 93,380 bits/s. Como o sistema opera a 500 kbit/s, isso corresponde a uma ocupação aproximada de 18,7%. Esse valor evidencia que o barramento trabalha com ampla margem de segurança, permitindo a inclusão de novos sinais, aumento da frequência de amostragem ou expansão do sistema sem risco de congestionamento.

4.1.3 Latência do Sistema

O sistema desenvolvido atingiu uma taxa de aquisição de aproximadamente 180 Hz, equivalente a um intervalo de 6 ms entre ciclos completos de leitura. Esse desempenho é considerado satisfatório no contexto do projeto, especialmente porque a própria ECU do veículo opera com cerca de 50 Hz (25 ms por ciclo). Dessa forma, o módulo de telemetria coleta dados em uma frequência significativamente superior à utilizada no controle do motor, garantindo maior resolução temporal para análise dos parâmetros veiculares.

No processo de conversão analógica–digital, cada leitura foi configurada com um *sampling time* de 1,5 ciclos, resultando em um tempo de conversão de aproximadamente 1,17 μ s para cada amostra, considerando o ADC operando a 12 MHz. Para aumentar a robustez das medições, cada sensor foi amostrado 40 vezes, aplicando-se um intervalo adicional de cerca de 1 μ s entre conversões para permitir a estabilização do sinal após a comutação do multiplexador. Com isso, o tempo total dedicado à aquisição de cada sensor ficou em torno de 47,8 μ s, desconsiderando as etapas de processamento e filtragem subsequentes.

4.2 Resultados Adquiridos e Armazenados via Cartão SD

Inicialmente, foi testado o processo de coleta de dados local por meio do cartão SD conectado ao STM32, permitindo registrar todos os quadros adquiridos diretamente na memória. Esse método garante redundância e segurança no armazenamento das informações, possibilitando a análise completa dos dados mesmo em situações de perda de conexão ou instabilidade na transmissão em tempo real.

A Tabela 4 apresenta um trecho real do arquivo CSV gravado no cartão SD durante os ensaios. Os valores exibidos correspondem às variáveis de tensão da bateria, temperatura interna da placa, rotação do motor, ângulo de esterçamento do volante e tempo desde o início do teste. Foram selecionadas cinco amostras consecutivas e cinco amostras distribuídas ao longo do ensaio, de modo a ilustrar tanto o comportamento imediato das medições quanto sua variação temporal ao longo do teste.

Em relação às grandezas monitoradas, observa-se que a tensão da bateria varia entre 11,51 V e 12,72 V, mantendo-se dentro da faixa esperada para o sistema elétrico do veículo. A

Tabela 4 – Trechos dos dados armazenados no cartão SD.

Bat_Voltage (V)	Int_Temp (°C)	RPM	SteerWheel (°)	Tempo (ms)
Amostras consecutivas				
11.51	34.1	2308	46.23	14188
11.51	34.1	2394	46.13	14211
11.51	34.1	2508	46.08	14235
12.11	34.1	2583	46.03	14251
12.11	34.1	2722	46.13	14268
Amostras amplamente espaçadas				
11.51	34.1	2308	46.23	14188
12.11	34.1	6446	45.31	14593
11.51	34.1	7311	43.71	15000
12.72	34.1	5416	47.39	15404
12.72	34.1	4123	45.60	15807

temperatura interna apresenta constância em torno de 34 °C, indicando estabilidade térmica no compartimento onde os módulos eletrônicos estão instalados.

Os valores de rotação do motor mostram ampla variação ao longo do teste, com registros desde aproximadamente 2300 rpm até valores acima de 7000 rpm. O sistema foi capaz de captar corretamente tanto os regimes baixos quanto os altos de operação. O ângulo do volante varia entre 43° e 47°, indicando trechos do percurso que exigiram esterçamento significativo. No sistema de medição adotado, o ângulo 0° corresponde à posição neutra do volante, isto é, com as rodas direcionadas longitudinalmente ao veículo. Valores positivos representam rotações do volante no sentido horário, resultando em esterçamento à direita, enquanto valores negativos indicam rotações no sentido anti-horário, associadas ao esterçamento à esquerda.

O campo *Tempo* evidencia a progressão temporal das amostras, contemplando tanto registros consecutivos quanto outros mais espaçados, o que demonstra a abrangência do período monitorado pelo sistema.

De modo geral, os dados armazenados refletem o comportamento esperado das variáveis monitoradas durante o ensaio, demonstrando que o registro local via cartão SD funcionou adequadamente ao longo de todo o teste.

4.3 Resultados Enviados via Telemetria

A validação do enlace de transmissão de dados via telemetria foi realizada em duas etapas: inicialmente por meio da análise da estrutura das mensagens enviadas pelo módulo *SIM7600G* ao *broker* MQTT, e posteriormente através do estudo dos valores de sensores recebidos durante os testes estáticos (Marcha Lenta e Alta Rotação) e dinâmicos em pista. Esta seção apresenta esses resultados e discute sua coerência com o funcionamento esperado do sistema embarcado.

4.3.1 Estrutura das Mensagens MQTT Enviadas pelo SIM7600G

A comunicação entre o módulo *SIM7600G* e o *broker* MQTT segue uma sequência definida de comandos AT, que garante o estabelecimento correto da sessão de comunicação e a transmissão dos *payloads* de telemetria para o servidor. A Tabela 5 apresenta, de forma organizada, toda a transação realizada pelo módulo, incluindo o início da pilha MQTT, a criação do identificador do cliente, o processo de conexão, a definição do tópico e o envio dos pacotes de dados. Essa estrutura permite compreender detalhadamente como o sistema gerencia a publicação das mensagens, evidenciando o fluxo completo desde a preparação da carga útil até sua entrega ao servidor remoto.

A análise da sequência revela que, após o preparo dos quadros provenientes do STM32, o SIM7600 recebe os dados pela UART e inicia o processo de publicação no tópico configurado. Cada etapa é confirmada por respostas do tipo OK ou códigos de status, permitindo ao firmware detectar possíveis falhas de comunicação e realizar retentativas se necessário. O uso dos comandos AT+CMQTTCONNECT e AT+CMQTTPAYLOAD demonstra a conformidade do módulo com as especificações do protocolo MQTT, garantindo que a transmissão ocorra de forma confiável, mesmo sob variações de sinal da rede 4G. Além disso, o encapsulamento dos valores em formato ASCII possibilita que o servidor interprete corretamente o *payload*, reforçando a integridade do processo de envio em tempo real.

Tabela 5 – Sequência de comandos AT utilizados no envio de dados via MQTT.

Comando / Resposta
AT+CMQTTSTART
OK
AT+CMQTTACCQ=0,"Formula_GTW"
OK
AT+CMQTTCONNECT=0,"tcp://broker.hivemq.com:1883",60,1
OK
+CMQTTCONNECT: 0,0
AT+CMQTTTOPIC=0,11
Test2142151
OK
AT+CMQTTPAYLOAD=0,210
[> 'a~ #Z"bw")7d~ a~ #Zb~"*?d~ a~ #ZNb~")dw a~ #[b~", dw a~ #[2Dw~"%d~]
OK
AT+CMQTTTOPIC=0,11
Test2142151
OK
AT+CMQTTPAYLOAD=0,210
['a~ \$1@b~")dw a~ \$1Rb~")dw a~ \$2\$b~")dw a~ \$26b~")dw a~ \$2Hb~",dw]
OK

4.3.2 Resultados dos Primeiros Testes Estáticos (Marcha Lenta e Alta Rotação)

Antes dos testes em pista, o sistema foi submetido a ensaios estáticos com o veículo parado, de modo a verificar a consistência do fluxo de dados, a estabilidade das leituras e o comportamento das variáveis básicas do motor em condições controladas. Essa etapa foi feita para assegurar que o processo de aquisição, empacotamento e transmissão via MQTT estivesse funcionando corretamente antes de ser exposto às variações dinâmicas e mecânicas presentes durante a condução. Foram analisados dois cenários distintos: o regime de marcha lenta, no qual o motor opera com baixa rotação e mínima abertura da borboleta, e o regime de alta rotação, utilizado para avaliar a capacidade do sistema em lidar com variações rápidas e valores extremos das grandezas monitoradas.

A Tabela 6 apresenta os valores recebidos via MQTT durante o teste de marcha lenta. Observa-se que os valores de RPM permanecem próximos de 2400 rpm e, associados a um TPS igual a 0, indicam que o motor estava estabilizado e operando sem intervenção do acelerador. Além disso, a continuidade e regularidade das amostras recebidas confirmam que o enlace de comunicação funcionou sem perdas, demonstrando que o sistema é capaz de transmitir dados de forma estável mesmo nas condições mais básicas de operação.

Tabela 6 – Exemplo de mensagem recebida via MQTT em regime de marcha lenta (*Idle*).

Time (ms)	Topic	Mensagem Decodificada
09-Nov-2025 17:57:08	"Idle"	42
Dados Recebidos		
Tempo: 19754	RPM: 2433	TPS: 0
Tempo: 19772	RPM: 2435	TPS: 0
Tempo: 19790	RPM: 2441	TPS: 0
Tempo: 19808	RPM: 2387	TPS: 0
Tempo: 19826	RPM: 2409	TPS: 0
Tempo: 19844	RPM: 2352	TPS: 0
Tempo: 19862	RPM: 2407	TPS: 0
Tempo: 19880	RPM: 2427	TPS: 0
Tempo: 19898	RPM: 2423	TPS: 0
Tempo: 19916	RPM: 2426	TPS: 0

A Tabela 7 ilustra o teste em alta rotação, com leituras superiores a 10600 rpm e TPS entre 98% e 100%. Esse cenário simulou aceleração plena, permitindo avaliar o comportamento do sistema de telemetria em condições de rápida variação dos parâmetros e de maior taxa de amostragem.

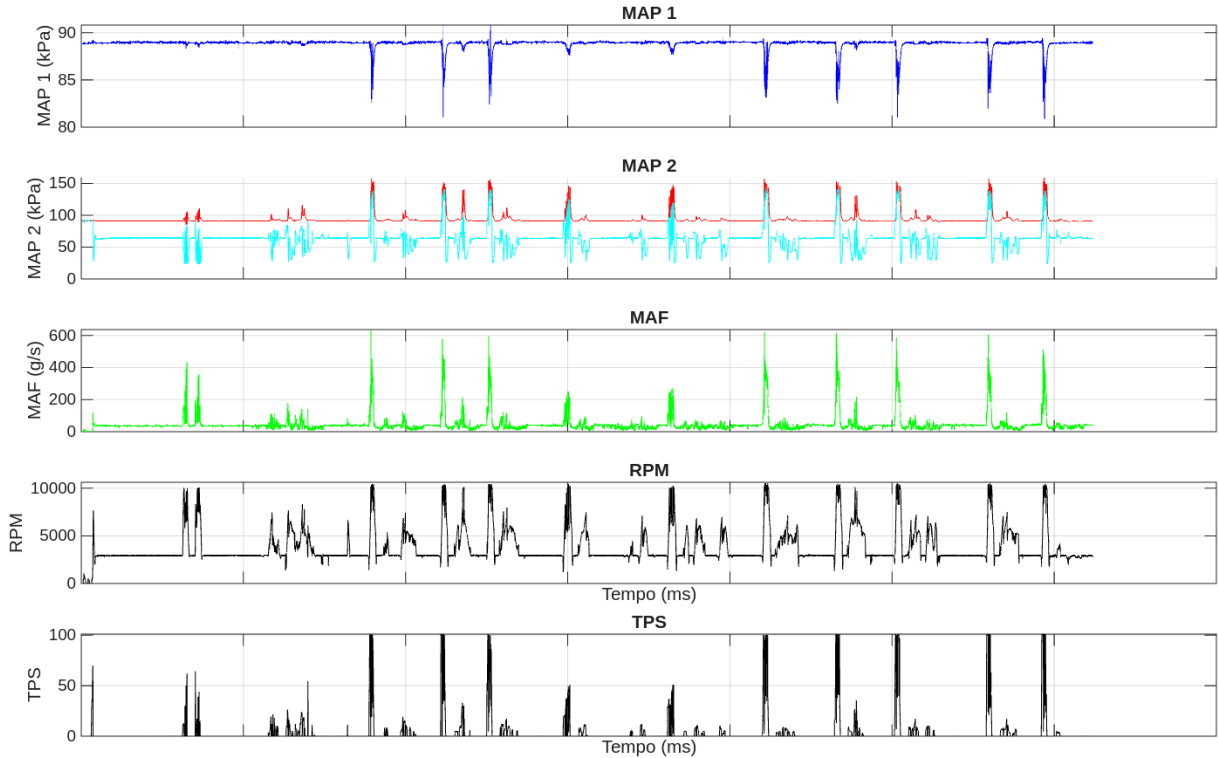
4.3.3 Resultados Dinâmicos e Análise dos Gráficos de Telemetria

Após a verificação em bancada, o sistema foi instalado no veículo e submetido a testes reais em pista. O Gráfico 4 apresenta os sinais de MAP, MAF, RPM e TPS coletados durante a volta experimental.

Tabela 7 – Mensagem recebida via MQTT em regime de alta rotação.

Time (ms)	Topic	Mensagem Decodificada
09-Nov-2025 17:57:08	"HighRPM"	42
Dados Recebidos		
Tempo: 50200	RPM: 10600	TPS: 98
Tempo: 50218	RPM: 10632	TPS: 99
Tempo: 50236	RPM: 10655	TPS: 100
Tempo: 50254	RPM: 10641	TPS: 98
Tempo: 50272	RPM: 10673	TPS: 99
Tempo: 50290	RPM: 10628	TPS: 98
Tempo: 50308	RPM: 10687	TPS: 100
Tempo: 50326	RPM: 10644	TPS: 99
Tempo: 50344	RPM: 10695	TPS: 98
Tempo: 50362	RPM: 10622	TPS: 99

Gráfico 4 – Sinais de pressão no coletor, vazão mássica de ar, rotação do motor e posição da borboleta coletados durante a volta de teste

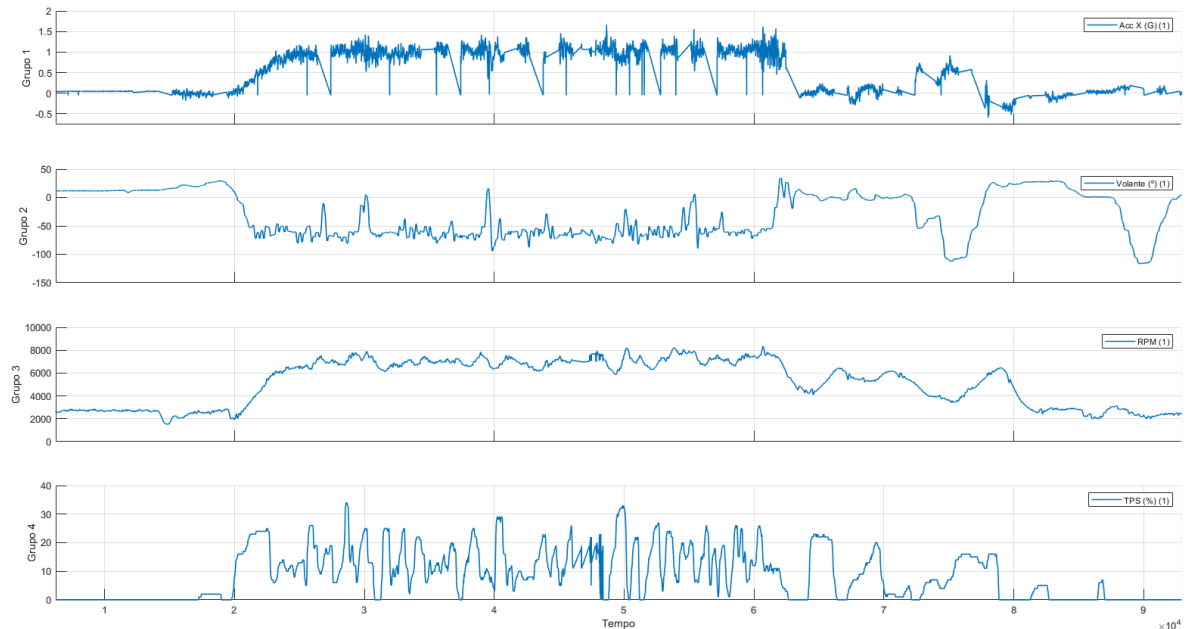


Fonte: Autoria própria.

Os sinais coletados demonstram correlações coerentes com a dinâmica do motor ao longo do trajeto. O sinal de TPS apresentou variações rápidas associadas às transições de aceleração e desaceleração. O sinal de RPM atingiu valores superiores a 10,000 rpm durante os trechos de maior exigência. O sinal de MAP elevou-se nas fases de maior demanda de torque e reduziu-se durante frenagens, acompanhando a variação da pressão no coletor. Por fim, o sinal de MAF exibiu picos nos instantes de maior admissão de ar, refletindo o aumento do fluxo de ar para o motor.

O Gráfico 5 apresenta os dados coletados durante o teste de *SkidPad*, incluindo aceleração lateral, ângulo do volante, RPM e TPS.

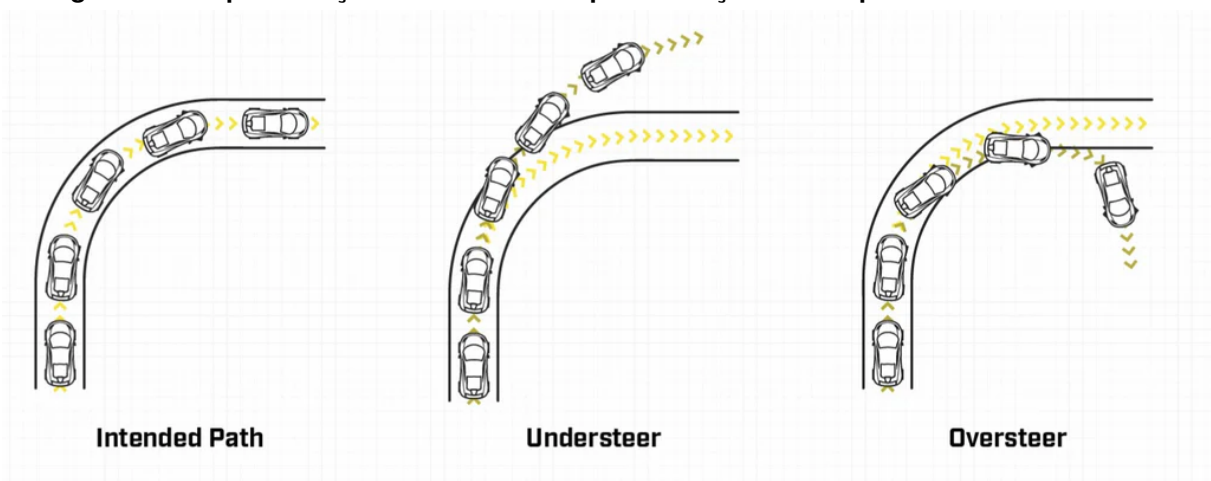
Gráfico 5 – Correlação entre o ângulo de direção e a rotação do motor durante o teste de *SkidPad*



Fonte: Autoria própria.

O pico de aceleração lateral atingiu aproximadamente 1,2 G, valor compatível com o comportamento previsto pela equipe de Suspensão e Direção. As variações dos sinais de TPS e RPM mostram que o piloto modulou a aceleração para controlar o *oversteer*, conforme ilustrado na Figura 37.

Figura 37 – Representação dos diferentes tipos de traçado e comportamento de *oversteer*



Fonte: Performance (2025).

Os resultados obtidos mostram que o sistema de telemetria funcionou corretamente em todas as etapas, adquirindo, processando e enviando os dados do veículo com sucesso. A coerência entre as variáveis coletadas confirmou a calibração dos sensores e a integridade do

sistema de aquisição, permitindo analisar o estilo de pilotagem e o desempenho do conjunto motriz. Além disso, o uso de recursos do ESP32 e a baixa ocupação do barramento CAN indicaram uma margem de segurança adequada para futuras expansões. O registro local via cartão SD operou de forma estável, garantindo redundância, e a transmissão via MQTT apresentou funcionamento consistente tanto nos testes estáticos quanto nos dinâmicos, sem perdas de dados. Assim, os resultados confirmam que o sistema é confiável, robusto e adequado para apoiar análises de desempenho e tomadas de decisão pela equipe de Fórmula SAE.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver, implementar e validar um sistema de telemetria veicular em tempo real para aplicação no contexto da Fórmula SAE. Para isso, foram definidos três objetivos específicos: investigar os conceitos relacionados ao projeto de telemetria, desenvolver sistemas auxiliares necessários para o funcionamento completo da solução e, por fim, elaborar e validar o sistema embarcado de aquisição, processamento e transmissão de informações.

Ao longo do desenvolvimento, os conceitos estudados permitiram compreender os requisitos de um sistema de telemetria aplicado a veículos de competição, bem como as particularidades do uso de microcontroladores, sensores e protocolos de comunicação. Esse conhecimento foi essencial para orientar as escolhas de hardware, a arquitetura do firmware e a definição do fluxo de dados entre os módulos STM32, ESP32 e SIM7600G.

A implementação dos sistemas auxiliares contemplou a comunicação via CAN, o registro redundante em cartão SD, o processamento local no ESP32 e o envio dos dados pela rede 4G utilizando o protocolo MQTT. Esses elementos foram integrados de forma a garantir robustez, confiabilidade e capacidade de operação em diferentes cenários de teste.

Os resultados obtidos durante a fase de validação demonstraram que o sistema desenvolvido atendeu aos objetivos propostos. O uso de recursos do ESP32 permaneceu dentro de limites seguros, mantendo margem para expansões futuras. A carga do barramento CAN manteve-se baixa, o que comprovou a eficiência do tráfego de mensagens e a ausência de risco de saturação. Nos testes estáticos, as variáveis monitoradas apresentaram estabilidade e coerência, confirmando o correto funcionamento da aquisição e transmissão. Nos testes dinâmicos, os sinais de MAP, MAF, TPS, RPM e aceleração refletiram o comportamento do veículo em condições reais de pista, evidenciando a integridade do sistema como um todo. O registro via cartão SD operou continuamente, garantindo redundância mesmo em eventuais situações de instabilidade da rede. A transmissão via MQTT mostrou-se estável tanto em marcha lenta quanto em alta rotação, mantendo desempenho adequado durante os ensaios dinâmicos e sem perdas de dados.

Com base na análise geral, concluiu-se que o sistema de telemetria cumpriu plenamente seu propósito ao permitir a aquisição, o processamento e o envio de dados do veículo de forma confiável. A solução desenvolvida mostrou-se adequada para apoiar diagnósticos, estudos de pilotagem e decisões de projeto da equipe de Fórmula SAE.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se adicionar novos sensores ao sistema (como temperatura de freio e pressão de óleo), estudar o aumento da frequência de leitura dos sinais, desenvolver um painel de visualização em tempo real mais completo e avaliar outras formas de comunicação, como redes Wi-Fi de longo alcance.

REFERÊNCIAS

- AG, P. **O que é MQTT?**, . 2023. Acesso em: 10 fev. 2025. Disponível em: <https://www.paessler.com/it-explained/mqtt>.
- ALECRIM, E. **O que é USB? Guia de velocidades, conectores e versões**, . 2023. Acessado em: 20 jan. 2025. Disponível em: <https://www.infowester.com/usb.php>.
- ALENCAR, A.; NAVES, J. Problemática do transporte no ifro campus ariquemes e o desenvolvimento de um sistema de rastreamento. **REVISTA FOCO**, v. 16,, p. e1689, 04 2023.
- AMARO, F.; AL. et. Predictive maintenance in automotive telemetry systems. **Journal of Automotive Engineering**, v. 234, n. 3, p. 345–356, 2020.
- AMEND, J. **Delphi: Industry Must Go Digital or Die**, . 2017. Disponível em: <https://www.wardsauto.com/suppliers/delphi-industry-must-go-digital-or-die>. Acesso em: 07 dez. 2024.
- AZEVEDO, R. C.; ENSSLIN, L. **Metodologia de Pesquisa para Engenharias**. CEFET-MG, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Rogério-Azevedo/publication/345778299_METODOLOGIA_DA_PESQUISA_PARA_ENGENHARIAS/links/5fb3e5ca299bf10c3686ab20/METODOLOGIA-DA-PESQUISA-PARA-ENGENHARIAS.pdf. Acesso em: 07 dez. 2024.
- BARRON, M.; POWERS, W. The role of electronic controls for future automotive mechatronic systems. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 1, n. 1, p. 80–88, 1996.
- BRAGA, N. C. **Como Funcionam os Sensores de Efeito Hall**, . 2023. Acesso em: 30 jan. 2025. Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/6640-como-funcionam-os-sensores-de-efeito-hall-art1050>.
- BRUMMELEN, B.; AL. et. Wireless communication in automotive telemetry: Challenges and solutions. **International Journal of Automotive Technology**, v. 19, n. 4, p. 637–645, 2018.
- BRUMMELEN, J. van *et al.* Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 89,, p. 384–406, abr. 2018.
- CAPELLI, A. **Eletroeletrônica Automotiva: Injeção Eletrônica, Arquitetura do Motor e Sistemas Embarcados**. São Paulo, Brasil: Editora Érica, 2020. ISBN: 978-85-365-0607-1.
- CARRO, D. de. **Quais são e como funcionam os sensores automotivos?**, . 2023. Disponível em: <https://www.dicasdecarro.com/p/dica-20-qualis-sao-e-como-funcionam-os.html?m=1>.
- CATAPULT. **Análise de dados na F1: Transformando desempenho**, . 2025. Acesso em: 8 fev. 2025. Disponível em: <https://www.catapult.com/pt/blogue/analise-de-dados-f1-transformando-desempenho?>
- CHINONSO, E.; OKEMIRI, H.; ANIKWE, C. Vehicle monitoring system based on iot, using 4g/lte. **International Journal of Engineering and Management Research**, v. 11,, 08 2021.
- COMER, D. **Redes de Computadores e Internet - 6.ed.** Bookman Editora, 2016. ISBN 9788582603734. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=1nwdDAAQBAJ>. Acesso em: 17 dez. 2024.

DELPHI. **Making Sense of Your Sensors: MAP Sensor**, . 2022. Acessado em 10 de fevereiro de 2025. Disponível em: <https://www.delphiautoparts.com/resource-center/article/making-sense-of-your-sensors-map-sensor>.

Electrical eLibrary. **NTC e PTC: Características e Aplicações**, . 2017. Acessado em: 29 dez. 2024. Disponível em: <https://www.electricalibrary.com/2017/08/14/ntc-e-ptc/>.

Electricity and Magnetism. **O que é um potenciômetro?**, . 2024. Disponível em: <https://www.electricity-magnetism.org/pt-br/o-que-e-um-potenciometro.com>. Acesso em: 01 jan. 2025.

EMBARCADOS. **Sensores para gerenciamento do motor de combustão interna ciclo Otto**, . 2023. Disponível em: <https://embarcados.com.br/sensores-motor-combustao-interna-otto/>.

EMILIO, M. D. P. **Embedded Systems Design for High-Speed Data Acquisition and Control**. Springer International Publishing, 2014. ISBN 9783319068657. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=NixnBAAQBAJ>.

FINOTTI, M. **Sensores e atuadores**. Editora Senac São Paulo, 2024. (Série Universitária). ISBN 9788539648467. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=fcAMEQAAQBAJ>.

FLEMING, W. J. Overview of automotive sensors. **IEEE Sensors Journal**, IEEE v. 1, n. 4, p. 296–308, 2001. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=983469>.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing**. 3rd. ed. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2008.

GUIMARÃES, A.; SARAIVA, A. O protocolo can: Entendendo e implementando uma rede de comunicação serial de dados baseada no barramento “controller area network”. **Society of Automotive Engineers**, , 2002.

HERMANN, M.; PENTTEK, T.; OTTO, B. Design principles for industrie 4.0 scenarios: A literature review. **IFAC-PapersOnLine**, v. 48, n. 3, p. 123–128, 2015.

HERMANN, M.; PENTTEK, T.; OTTO, B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A literature review. **Proceedings of the 49th Hawaii International Conference on System Sciences**, , jan. 2015.

HIVEMQ. **Como começar com MQTT**, . 2020. Acesso em: 10 fev. 2025. Disponível em: <https://www.hivemq.com/blog/how-to-get-started-with-mqtt/>.

IBM. **MQTT v3.1.1**, . 2010. Acesso em: 10 fev. 2025. Disponível em: <https://public.dhe.ibm.com/software/dw/webservices/ws-mqtt/mqtt-v3r1.html>.

ICCT. The International Council on Clean Transportation **A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards**. [S.l.], 2016. Disponível em: https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Euro6-VI_briefing_jun2016.pdf. Acesso em: 07 dez. 2024.

Instituto Newton C. Braga. Instituto Newton C. Braga **O básico sobre os Microcontroladores – parte 1 (MIC139)**. [S.l.], 2018. Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/?view=article&id=13263:o-basico-sobre-os-microcontroladores-parte-1-mic139&catid=52>. Acesso em: 16 dez. 2024.

JCGM. Joint Committee for Guides in Metrology **International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)**, . 2008. JCGM 100:2008. International Organization for Standardization.

KALMAN, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. **Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering**, v. 82, n. 1, p. 35–45, 1960.

KUKUSHKIN, A. **Introduction to Mobile Network Engineering: GSM, 3G-WCDMA, LTE and the Road to 5G**. Wiley, 2020. Disponível em: <https://www.wiley.com/en-us/Introduction%2Bto%2BMobile%2BNetwork%2BEngineering%3A%2BGSM%2C%2B3G%2BWCDMA%2C%2BLTE%2Band%2Bthe%2BRoad%2Bto%2B5G-p-9781119484226>.

MANAVELLA, H. **Sensor de oxigênio de banda larga baseado em célula Nernst**, . 2016. Oficina Brasil. Acesso em: 16 jan. 2025. Disponível em: <https://oficinabrasil.com.br/noticia/tecnicas/sensor-de-oxigenio-de-banda-larga-baseado-em-celula-nernst>.

MICROSOFT. **A história do Visual Studio Code**, . 2020. Acesso em: 10 fev. 2025. Disponível em: <https://learn.microsoft.com/pt-br/shows/build-2020/bdl134>.

MICROSOFT. **User Interface - Visual Studio Code Documentation**, . 2025. Acesso em 10 de fevereiro de 2025. Disponível em: <https://code.visualstudio.com/docs/getstarted/userinterface>.

NAVET, N.; SIMONOT-LION, F. **Automotive Embedded Systems Handbook**. [S.l.: s.n.], 2009.

NAVET, N.; SIMONOT-LION, F. **Automotive Embedded Systems Handbook**. [S.l.]: CRC Press, 2009.

NETO, A. S. **Implementação de Telemetria no Veículo da Equipe Cerrado Baja SAE**. 2021. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia 2021. Acesso em: 30 jan. 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/31717/1/Implementa%C3%A7%C3%A3oTelemetriaVe%C3%ADculo.pdf>.

NORTON, H. **Handbook of Transducers**. Prentice Hall, 1989. ISBN 9780133825992. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=1SdTAAAMAAJ>.

Omega Engineering. **Accelerometers - What Are They and How Do They Work?**, . 2024. Acessado em: 29 dez. 2024. Disponível em: <https://www.omega.com/en-us/resources/accelerometers>.

PERFORMANCE, W. **Oversteer and Understeer Explained**, . 2025. Acesso em: 26 out. 2025. Disponível em: <https://whitelineperformance.com/blogs/whiteline-blog/oversteer-and-understeer-explained>.

QUEIRÓS, J. M. R. **Sistema de Sensorização e Telemetria de um VEC (Veículo Elétrico de Competição)**. 2011. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto 2011. Acesso em: 30 jan. 2025. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/112243/2/151149.pdf>.

RAKWIRELESS. **How To Use the MQTT Broker Like a Pro: Examples**, . 2024. Acesso em: 10 nov. 2025. Disponível em: <https://learn.rakwireless.com/hc/en-us/articles/26688300221079-How-To-Use-the-MQTT-Broker-Like-a-Pro-Examples>.

RAMBO, W. **Filtros Passivos**, . 2013. Acesso em: 30 jan. 2025. Disponível em: <https://embarcados.com.br/filtros-passivos/>.

ROBERTS, A.; PECKA, A. 4g network performance analysis for real-time telemetry data transmitting to mobile agricultural robot. *In*: . 2018. **Anais [...]** [S.l.: s.n.], 2018.

RUSSELL, A. D.; HARRIS, T. Calibration of sensors: A practical guide. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 165, n. 2, p. 141–150, 2011.

SAE BRASIL . **Fórmula SAE Brasil**. São Paulo, Brasil: , 2025. Disponível em: <https://saebrasil.org.br/quem-somos/>.

SAUTER, M. **3G, 4G and Beyond: Bringing Networks, Devices and the Web Together**. 2nd edition. ed. Wiley, 2013. Disponível em: <https://www.wiley.com/en-us/3G%2C%2B4G%2Band%2BBeyond%3A%2BBringing%2BNetworks%2C%2BDevices%2Band%2Bthe%2BWeb%2BTogether%2C%2B2nd%2BEdition-p-9781118394533>.

SAUTER, M. **3G, 4G and Beyond: Bringing Networks, Devices and the Web Together**. 2nd edition. ed. Wiley, 2013. Disponível em: <https://www.wiley.com/en-us/3G%2C%2B4G%2Band%2BBeyond%3A%2BBringing%2BNetworks%2C%2BDevices%2Band%2Bthe%2BWeb%2BTogether%2C%2B2nd%2BEdition-p-9781118394533>.

SCHNEIDER, J.; SMALLEY, I. **What is a microcontroller?**, . 2024. Disponível em: <https://www.ibm.com/think/topics/microcontroller>. Acesso em: 16 dez. 2024.

SEGRS, J. **Analysis Techniques for Racecar Data Acquisition**. 1st. ed. Warrendale: SAE International, 2008.

SILVA, L. de O. **Sistema de Navegação para Veículos Autônomos**. 2020. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) 2020. Acesso em: 30 jan. 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br>.

SMITH, G. M. **O que é barramento CAN (Controller Area Network) e suas vantagens**, . 2024. Acesso em: 09 fev. 2025. Disponível em: <https://dewesoft.com/pt/blog/que-e-barramento-can>.

STEINHART, J. S.; HART, S. R. Calibration curves for thermistors. **Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts**, Elsevier v. 15, n. 3, p. 497–503, 1968.

STEVE. **MQTT-SN (MQTT for Sensor Networks)**, . 2017. Acesso em: 10 fev. 2025. Disponível em: <http://www.steves-internet-guide.com/mqtt-sn/>.

STMICROELECTRONICS . **Medium-density performance line Arm ® -based 32-bit MCU with 64 or 128 KB Flash, USB, CAN, 7 timers, 2 ADCs, 9 com. interfaces**. [S./], 2023. Disponível em: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f103/documentation.html>. Acesso em: 26 dez. 2024.

STMICROELECTRONICS. **STM32CubeMX - Initialization Code Generator for STM32 MCUs**, . 2025. Acesso em 10 de fevereiro de 2025. Disponível em: https://www.st.com/content/st_com/en/stm32cubemx.html.

SYSTEMS, E. . **ESP32 Technical Reference Manual**. [S./], 2025. Accessed: 28 Jan. 2025. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf.

Sá, J. d. S. **Projeto e Análise de um Sistema de Aquisição de Dados Distribuído para Aplicações em Tempo Real**. mar. 2007. 121 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande Campina Grande, Paraíba mar. 2007.

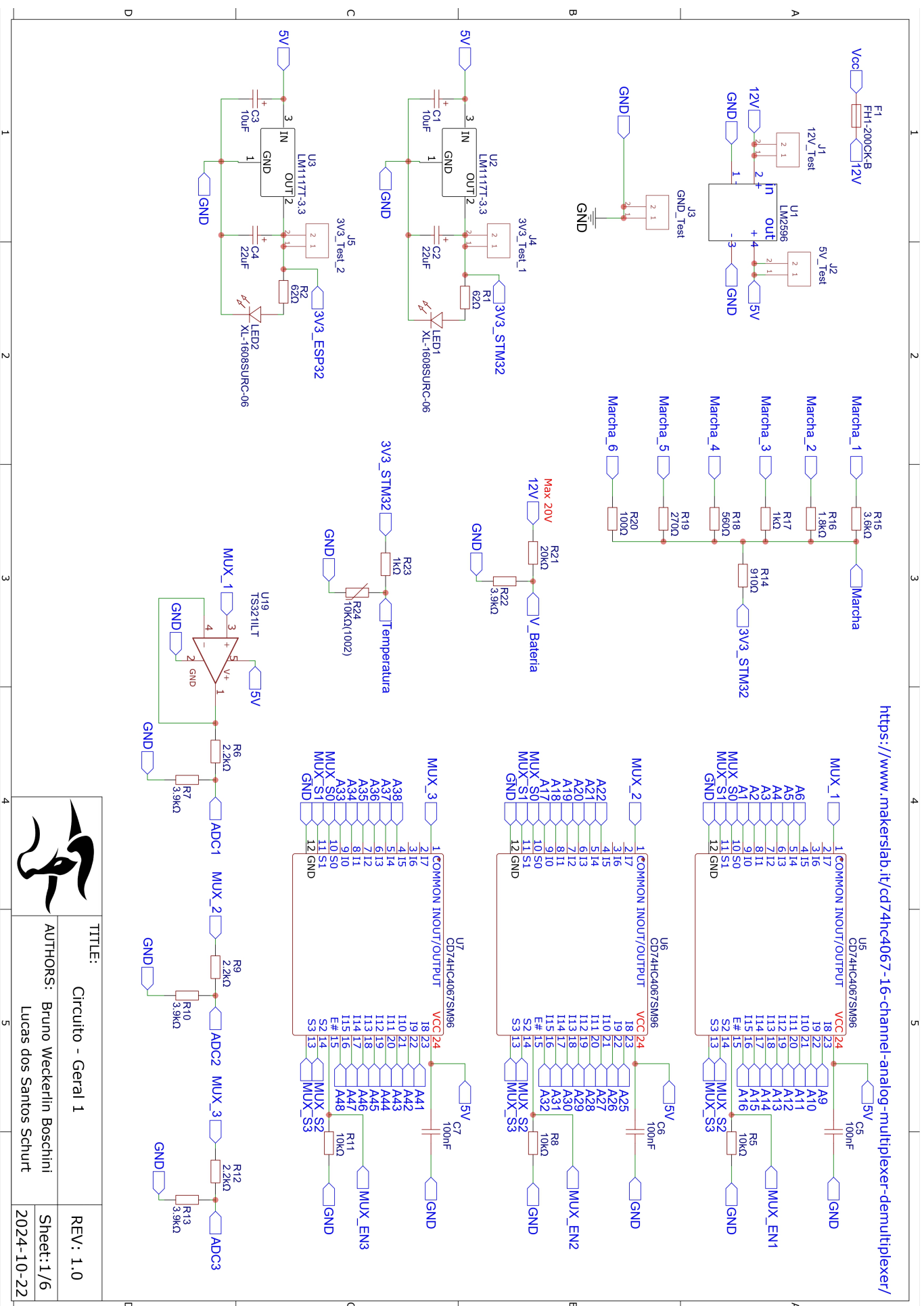
TAYLOR, J. R. **An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements**. [S./]: University Science Books, 1997.

TEAM, E. F. **Estaca Formula Team**, . 2025. Acesso em: 30 set. 2025. Disponível em: <https://www.estacaformulateam.com/en/formula-student-en/>.

TECFIL. **Entenda a importância do sensor de oxigênio: O fiscal da queima de combustível**, . 2023. Disponível em: <https://www.tecfil.com.br/entenda-a-importancia-do-sensor-de-oxigenio-o-fiscal-da-queima-de-combustivel>.

TRACKPLUSGPS. **Explorando a telemetria: Fundamentos e aplicações**, . 2024. Acesso em: 09 fev. 2025. Disponível em: <https://trackplus.com.br/blog/explorando-a-telemetria-fundamentos-e-aplica%C3%A7%C3%B5es>.

APÊNDICE A – Circuito projetado de potência e leitura de sensores

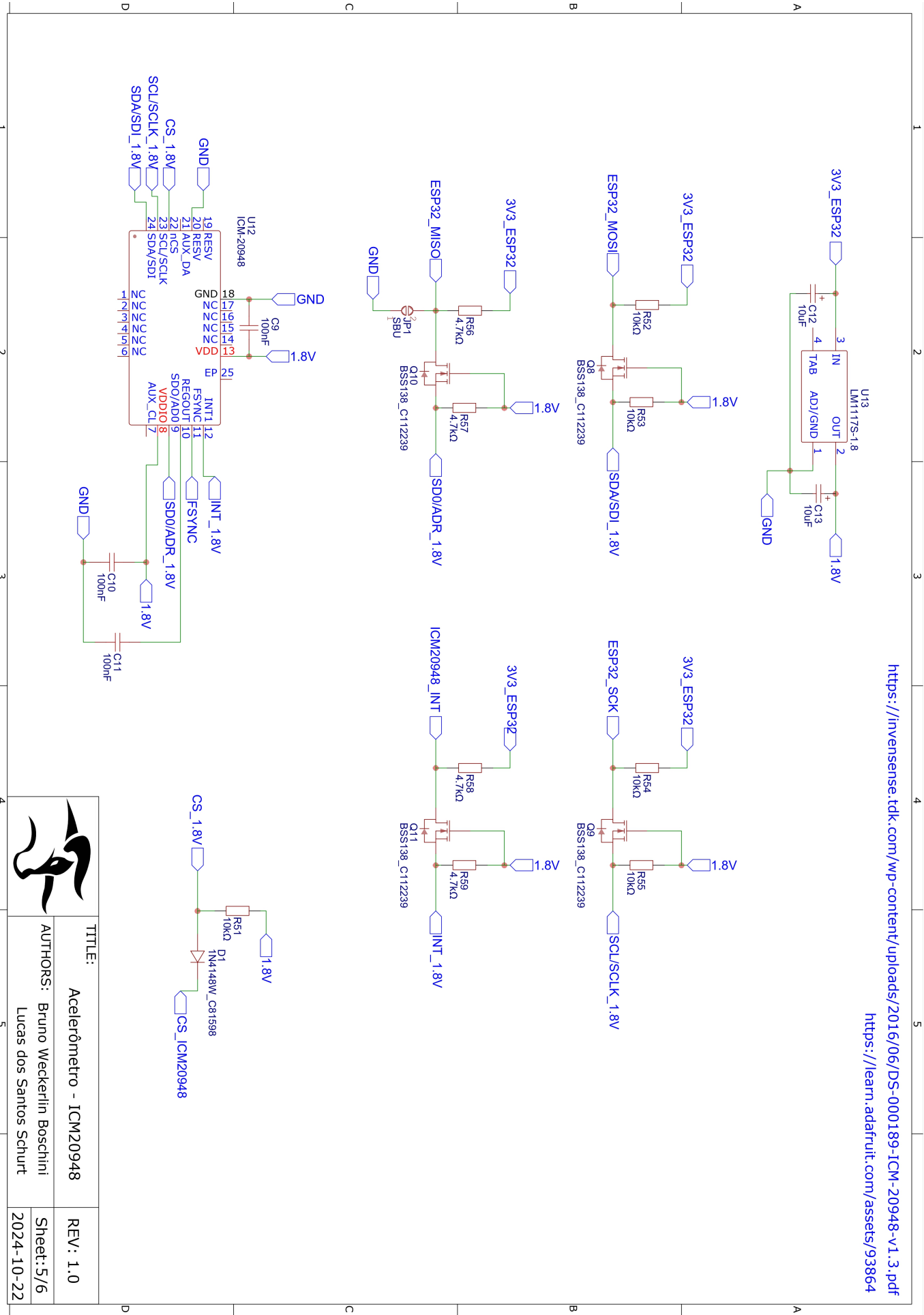


APÊNDICE B – Circuito projetado para o STM32

APÊNDICE C – Circuito projetado para o ESP32

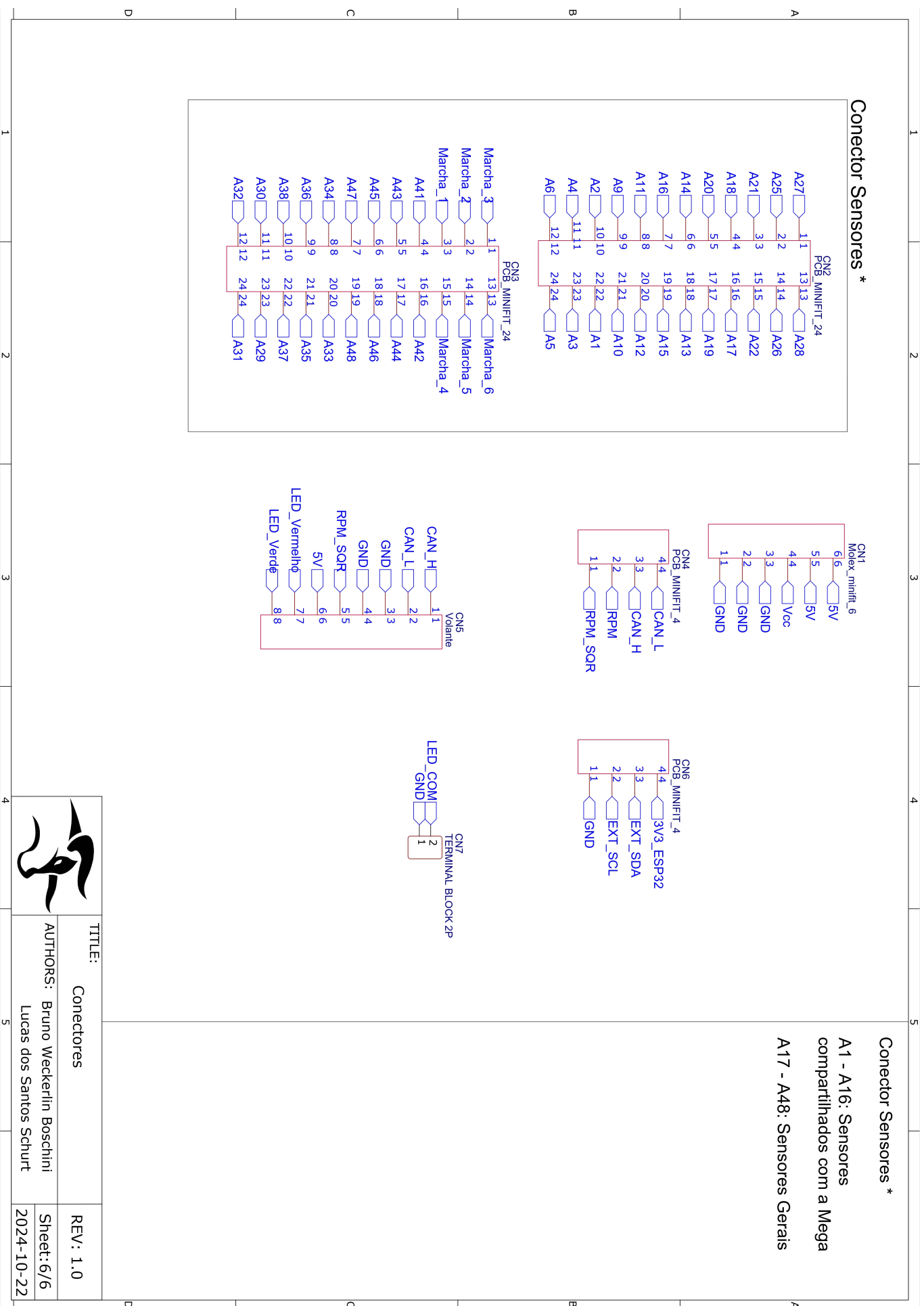
APÊNDICE D – Circuito projetado dos periféricos do ESP32

APÊNDICE E – Circuito projetado do acelerômetro



TITLE: Acelerômetro - ICM20948		REV: 1.0
AUTHORS: Bruno Weckerlin Boschini		Sheet:5/6
Lucas dos Santos Schurt		2024-10-22

APÊNDICE F – Circuito projetado dos conectores



APÊNDICE G – Circuito projetado do *Display LCD*

APÊNDICE H – Repositório *Github* para o código do *ESP32*



APÊNDICE I – Repositório *Github* para o código do *STM32*



APÊNDICE J – Repositório *Github* para o código do *Display LCD*

