

Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados de baixo custo para protótipos de Fórmula SAE

João Vitor C. P. Maciel

Resumo — A aquisição e análise de dados é de suma importância em veículos de competição, uma vez que a análise de dados é fundamental para a melhoria dos projetos dos sistemas do protótipo de Fórmula SAE, determinação dos seus parâmetros e melhoria na performance do carro em pista. Por isso existe a importante demanda de um sistema de aquisição de dados de alta confiabilidade e versatilidade, que atenda aos requisitos da equipe, ao mesmo tempo que apresente um preço acessível. Este trabalho avalia a demanda específica das equipes de competição Fórmula SAE em relação ao sistema de aquisição de dados e apresenta uma revisão dos principais conceitos envolvidos na análise e na aquisição de dados. Posteriormente, desenvolveu-se um protótipo para testar as funcionalidades propostas e por fim, o hardware e firmware para um módulo eletrônico com capacidade para aquisição de oito entradas analógicas, quatro de velocidade, GPS, acelerações e giros nos três eixos, além de gravação de dados embarcada e telemetria por radiofrequência.

Palavras-chave — Aquisição de dados, Fórmula SAE, microcontroladores.

I. INTRODUÇÃO

Fórmula SAE (FSAE) é um modelo de competição de engenharia para estudantes de graduação e pós-graduação, criado pela *SAE International® (Society of Automobile Engineers)*, e que atualmente acontece em várias regiões do mundo. O objetivo da competição é promover um ambiente de estudo e desenvolvimento de conhecimentos tecnológicos e gerenciais voltados para o ramo automobilístico.

A competição é dividida em provas estáticas e dinâmicas. Enquanto a primeira consiste em apresentações e relatórios de projetos, negócios e custos de manufatura, na segunda as equipes colocam seus protótipos à prova em circuitos que atestam a eficiência, performance e durabilidade em pista.



Figura 1 – Exemplar de protótipo de Fórmula SAE da equipe Fórmula Cefast – CEFET/MG

O conceito do protótipo de Fórmula SAE (figura 1) é baseado em outros carros de corrida do tipo Fórmula sendo, deste modo, um veículo monoposto, com as quatro rodas fora do corpo, um chassis tubular ou em forma de monocoque.

Carros de corrida, em geral, possuem várias possibilidades de ajustes em sistemas como o de *powertrain* (motor), suspensão e aerodinâmica. Deste modo, engenheiros de análise de dados são fundamentais para se compreender o comportamento do carro e determinar os melhores ajustes para garantir a performance ótima do veículo em determinada pista.

A aquisição e análise de dados em carros de corrida é fundamental para avaliação do funcionamento de cada subsistema do veículo. Segundo Segers (2014), os principais motivos para análise de dados em corridas são: análise da performance do veículo, análise da performance do piloto, gerar dados para desenvolvimento e validação de novos projetos e monitoramento da confiabilidade e segurança do carro.

Assim como nas equipes de competições automobilísticas profissionais, os estudantes das equipes de FSAE também necessitam realizar a análise de dados de seus veículos, a fim de garantir a progressão do projeto e maior competitividade em pista. Porém, o orçamento das equipes de competições estudantis é limitado ao suporte das universidades e parcerias com instituições externas, o que torna inviável a obtenção de sistemas de aquisição de dados automotivos como os utilizados em competições profissionais.

A figura 2 ilustra a estrutura básica de um sistema de aquisição de dados segundo Balbinot e Brusamarello (2010). O sistema é composto pelos sensores, dispositivos que realizam diretamente a conversão do sinal físico do mensurando para um sinal elétrico, que é adequado através de um circuito de condicionamento de sinal para ser amostrado e convertido por um conversor A/D, que, então, transmite o sinal digital para uma unidade de processamento que poderá realizar o pré-processamento dos dados a gravação/transmissão desses dados para o destino de armazenamento.

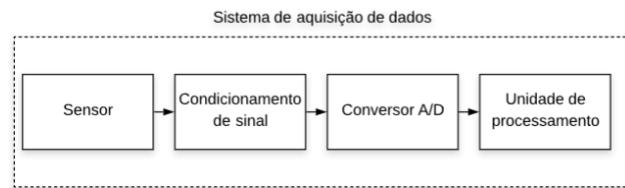


Figura 2 – Diagrama de blocos de um sistema de aquisição de dados

A motivação principal deste trabalho é incentivar as equipes de competição a desenvolverem suas próprias soluções tecnológicas, de forma que seus projetos evoluam de acordo com as necessidades e requisitos ao longo dos anos. Desta forma, além de um imenso ganho de conhecimento para os membros e para o legado da equipe, o desenvolvimento interno

é mais acessível financeiramente e permite uma maior flexibilidade e continuidade das implementações. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é demonstrar a viabilidade do desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados (DAS – *Data Acquisition System*) que possibilite às equipes de competição de FSAE a aquisição dos sinais necessários para a progressão de seus projetos, além do desenvolvimento técnico dos métodos de análise de dados com foco no cenário automobilístico. Toda a documentação deste projeto será publicada abertamente para que qualquer equipe de competição esteja apta a iniciar o desenvolvimento de seus próprios sistemas de aquisição de dados.

II. METODOLOGIA

O desenvolvimento do projeto do sistema de aquisição de dados baseou-se na seguinte metodologia: primeiramente, estudar quais são e como podem ser obtidas as variáveis desejadas para a análise de um carro de corrida; em seguida, uma pesquisa de mercado dos *dataloggers* automotivos disponíveis no mercado e levantamento dos requisitos mínimos que o sistema de aquisição deve atender para ser um dispositivo viável técnica e financeiramente para uma equipe de competição de Fórmula SAE; criar um protótipo para desenvolver a programação e testar as funcionalidades propostas; e, por fim, projetar o módulo em uma placa de circuito impresso.

A. Levantamento de requisitos

Segers (2014) classifica os sinais de aquisição desejados para um veículo de corrida em básicos e suplementares. Os sinais básicos são aqueles fundamentais para análise do comportamento dos sistemas vitais do veículo e da atividade do piloto, como: rotação do motor (RPM), velocidade, posição da borboleta, ângulo de esterço e acelerações longitudinais e laterais. Esses sinais são importantes para que o engenheiro de dados da equipe possa garantir o bom funcionamento do veículo e diagnosticar causas de falhas ou problemas de performance. Já os sinais suplementares, são aqueles utilizados para análises avançadas de dinâmica veicular, performance do veículo e do piloto e para determinação dos parâmetros do carro, sendo muito importantes para validação de modelos computacionais do projeto e otimização das configurações de pista do carro. Alguns exemplos de sinais suplementares são: movimento da suspensão, pressão das linhas de freio, posição da marcha, velocidade de cada roda, acelerações em cada eixo, pressão e temperatura dos pneus e vários outros sinais que podem ser adquiridos. A aquisição de cada um desses sinais dependerá da análise solicitada pelos engenheiros da equipe, logo, a configuração da instrumentação do protótipo pode mudar à cada teste para cumprir com os objetivos da análise.

Os sinais vitais de um carro, aqueles relacionados com o funcionamento do motor e transmissão, podem ser adquiridos através da porta de comunicação CAN (*Controller Area Network*), das ECUs (*Engine Control Module*), protocolo padronizado pela ISO15765-4. Em 1996, foi implementado nos EUA o sistema OBD-II (*On-board diagnostics*), cuja função era criar um padrão de diagnose veicular, em que o usuário

poderia acessar barramentos de comunicações veiculares através de um conector SAE J1962 (popularmente conhecido como conector OBD-II, ilustrado na figura 3). Assim, as montadoras poderiam ter uma rede de dados própria, mas deveriam também disponibilizar a possibilidade de aquisição de alguns sinais através da comunicação CAN e por códigos de mensagens padronizadas para solicitação de determinado sinal no barramento, denominadas OBD-II PIDs (*Parameter IDs*).

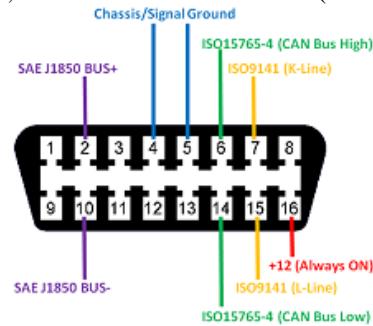


Figura 3 – Padrão de conexões do OBD-II (SAE J1962)

A SAE J1979, padroniza 10 modos de operação do protocolo de diagnose veicular através do OBD-II, dentre os modos, existe a possibilidade de solicitar aquisição de sinais, verificar códigos de falha, resultados de teste de sensores ou sistemas específicos e até obter informações de identificação do veículo, porém, nem todos os veículos suportam todos os modos. O modo 1 é o que pode ser utilizado para adquirir leituras atuais dos sinais veiculares através da requisição utilizando os códigos PIDs. A tabela I apresenta a lista dos principais sinais e PIDs que podem ser adquiridos neste modo e a transformação matemática que deve ser realizada para obter o valor na unidade informada.

TABELA I
PRINCIPAIS SINAIS OBTIDOS ATRAVÉS OBD-II MODO 1

PID (hex)	Bytes	Descrição	Unidade	Transformação
0A	1	Pressão de combustível	kPa	3A
0B	1	Pressão do ar de admissão	kPa	A
0C	2	Velocidade do motor	RPM	(256A + B)/4
0D	1	Velocidade do carro	Km/h	A
0E	1	Avanço de ignição	° **	A/2 - 64
0F	1	Temperatura do ar de admissão	°C	A - 40
10	2	Vazão mássica de ar da admissão	Gramas/seg	(256A + B)/100
11	1	Posição da borboleta	%	100A/255
14	2	Sensor de oxigênio 1	V	A/200
62	1	Torque do motor	%	A - 125
63	2	Torque de referência do motor	Nm	256A + B
67	3	Temperatura do fluido de arrefecimento	°C	Valor dos três bytes retornados

* A representa o byte mais significativo retornado, enquanto D representa o menos significativo entre os 4 bytes da mensagem.

** Distância angular antes do ponto morto superior do pistão

Basicamente, todos os sinais vitais do sistema de motor e transmissão de um carro de passeio hoje em dia podem ser adquiridos através do barramento CAN e dos códigos PIDs padrão. Porém, no caso dos carros de corrida, usualmente são

utilizadas centrais eletrônicas de desenvolvimento, que também possuem o barramento CAN, podendo ser configurado para realizar a transmissão continua (*broadcast*) dos dados, ou responder dados através de *requests* como no caso do padrão apresentado. Este projeto trabalha com a possibilidade de realizar a aquisição dos dados de um barramento CAN, seja em *broadcast* de dados, ou através de uma comunicação *request and response*.

Os demais sinais devem ser adquiridos através de sensores e instrumentação específica, como sensores de pressão que podem ser aplicados aos sistemas de freio, de combustível e lubrificação do motor, sensores de deslocamento angular que podem medir o ângulo de esterço do volante, entre várias outras medições que podem ser relevantes para análises básicas ou específicas de cada sistema do veículo. Por isso, os modelos de *dataloggers* mais comuns no mercado possuem entradas analógicas genéricas para prover aos usuários a possibilidade de utilizar diferentes configurações da instrumentação do veículo, variando, por exemplo, quais sensores serão utilizados em cada teste.

Em seguida, foi realizado um benchmark baseado nas informações de equipes das competições Formula SAE Lincoln e Formula SAE Michigan 2018. Ambas as competições disponibilizam publicamente os resumos das equipes (figura 4) em um documento chamado *Event Guide*. Desta forma, foram analisadas as principais características dos sistemas de aquisição de dados e das centrais eletrônicas utilizadas para controle do motor.

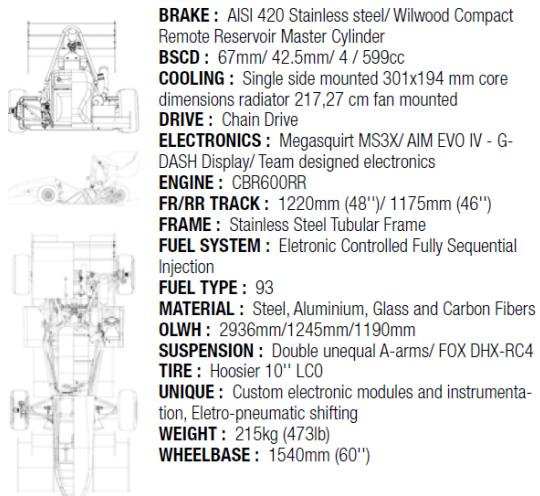


Figura 4 – Resumo do protótipo da equipe Fórmula Cefast

Com base nos dados válidos de todos os protótipos de combustão interna que competiram em 2018, levantou-se, os modelos de *dataloggers* mais utilizados entre as equipes e as características principais destes módulos eletrônicos.

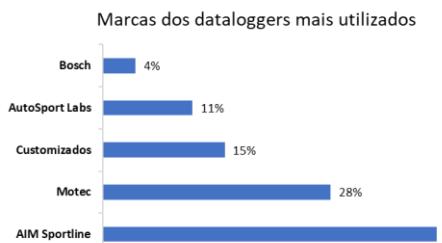


Figura 5 – Levantamento das marcas de dataloggers mais utilizados entre as equipes das competições dos EUA

Na figura 5, são apresentados os resultados do levantamento: as marcas de *dataloggers* mais utilizados entre as equipes norte-americanas são AIM Sportline, Motec, AutoSport Labs, e apenas 16% das equipes projetam seus próprios *dataloggers*. No Brasil, o cenário das equipes é diferente, o acesso a produtos dessas marcas apresenta um custo muito elevado de importação, por isso maior parte das equipes acaba projetando seus próprios módulos, ou, no pior dos casos, não possuem sistema de aquisição de dados.

Os modelos mais utilizados na lista foram os AIM Sportline EVO IV e EVO V, Motec L180 e C185, e o AutoSportLabs Racecapture Pro MK3. Estes módulos eletrônicos possuem entre 5 – 10 entradas analógicas genéricas para sinais de tensão, 0 – 4 entradas para sensores de temperatura resistivos, 2 – 4 entradas para sensores de velocidade, normalmente possuem sensores integrados como GPS, acelerômetro, giroscópio, além de interfaces de comunicação padrão em sistemas automotivos tais como RS232 e CAN, e algumas possuem a possibilidade de implementação de um sistema de telemetria por radiofrequência. A tabela II apresenta o resumo de características dos principais modelos avaliados.

TABELA II
MODELOS DE DATALOGGERS MAIS UTILIZADOS PELAS EQUIPES DE FSAE NAS COMPETIÇÕES DE LINCOLN E MICHIGAN 2018.

Modelo	AIM EVO IV	AIM EVO V	Motec L180	Motec C185	Racecapture Pro MK3
Entradas Analógicas	5	8	10 *	10 *	9
Entradas de Temperatura	0	0	4 *	4 *	0
Entradas de Velocidade	2	4	4	4	4
GPS	Sim	Sim	Extra	Extra	Sim
Acelerômetro	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Giroscópio	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
Interfaces	RS232/ K-Line /CAN	RS232/ K-Line /CAN	RS232/ CAN	RS232/ CAN	RS232/CAN
Telemetria	Não	Não	Extra	Extra	Extra
Preço (USD)	\$1000	\$1699	\$4040	\$5390	\$750

* Entradas expansíveis através de comunicação CAN.

Com base na análise dos benchmarks e no conhecimento da necessidade particular da equipe do CEFET-MG, foram determinados os requisitos mínimos do sistema de aquisição de dados do protótipo para fins de análise de performance dos subsistemas, do piloto, melhoria de calibração e progressão dos projetos:

- Cinco entradas analógicas genéricas (nas quais o tipo de sensor conectado pode ser intercambiável).
- Duas entradas de velocidade (uma para cada eixo)
- Aquisição de acelerações lateral e longitudinal

- Aquisição de sinais através de comunicação CAN
- Gravação dos dados embarcada e/ou telemetria.

A taxa de aquisição para os sinais de acelerações, velocidade e analógicos deve ser de ao menos 100 Hz, possibilitando análises voltadas para os subsistemas e para a dinâmica veicular. Os sinais vitais do veículo ficam limitados à frequência de amostragem e transmissão do ECM, porém, são sinais que normalmente possuem dinâmicas mais lentas, tais como a rotação do motor, temperaturas, variáveis de injeção e ignição, entre outras. No caso dos sinais analógicos, 100Hz é suficiente para maior parte dos sinais comuns, como curso da suspensão e pressão do freio, podendo não ser suficiente apenas para análises mais avançadas, voltadas para componentes do espectro, como análises modais.

B. Prototipação

A escolha dos componentes foi realizada de forma iterativa, realimentando a decisão de cada componente para garantir a compatibilidade do sistema como um todo. Os requisitos iniciais para o microcontrolador, são de que ele possua ao menos cinco entradas analógicas, com conversão de 10 bits de resolução, controladores de comunicação para os protocolos necessário de acordo com os outros dispositivos, memória e capacidade de processamento suficientes para a aplicação.

A decisão foi baseada na disponibilidade de placas de desenvolvimento no mercado brasileiro, sendo avaliadas as quatro principais placas: os modelos Arduino Nano, Uno e Mega, e a Blue Pill STM32, cujas informações principais foram trazidas na tabela III.

TABELA III
DADOS COMPARATIVOS ENTRE AS PRINCIPAIS PLACAS DE DESENVOLVIMENTO DISPONÍVEIS NO MERCADO BRASILEIRO.

Especificações	Arduino Uno	Arduino Mega	Arduino Due	Blue Pill STM32
Microcontrolador	ATMega 328	ATMega 2560	ATMEL SAM3X8 E	STM32F1 03C8T6
Arquitetura	AVR 8-bits	AVR 8-bits	Cortex-M3 ARM 32-bits	Cortex-M3 ARM 32-bits
Frequência	16 MHz	16 MHz	84 MHz	72 MHz
Qty. ADC	6	16	12	10
Resolução ADC	10	10	10	12
Porta Serial	1	4	4	3
GPIO	14	54	54	37
Interfaces de Comunicação	PC/SPI /USART	PC/SPI /USART	PC/SPI /USART/ USB/CAN	PC/SPI /USART/ USB/CAN
Preço (R\$)	59,90	124,90	189,90	32,90

Fonte: www.filipeflop.com.

O módulo Blue Pill STM32, apresentado na figura 6, foi escolhido por apresentar um melhor custo benefício, uma vez que é encontrado pelo menor preço e possui melhores características de processamento, maior resolução de conversão analógico-digital, quantidade de entradas analógicas e pinos digitais adequada, suporta as comunicações seriais necessárias, além de possuir um grande diferencial que é o DMA (*Direct Memory Access*), que possibilita uma maior eficiência na transferência de dados entre a memória e os periféricos.



Figura 6 – Placa de desenvolvimento Blue Pill STM32

De acordo com o acervo de dados e conhecimento da equipe Fórmula Cefast, constatou-se, através de medições anteriores, as acelerações típicas no protótipo em um circuito comum, não passam de ± 4 g e que a taxa de aquisição de 100 Hz é suficiente para análises de dinâmica veicular.

Desta forma, foi escolhida a placa GY-521, que possui um único chip (MPU-6050) de acelerômetro e giroscópio integrados do tipo MEMS (*micro-electro-mechanical-system*), que possui a interface de comunicação I²C (*Inter-integrated circuit*) para configuração e transmissão dos sinais medidos. São medidas as acelerações e giros em seus três eixos, sendo ao todo seis graus de liberdade. Além disso o MPU-6050 possui alta precisão devido ao conversor A/D de 16 bits para cada canal, o que provém a captura simultânea dos três eixos de medição. É possível configurar o acelerômetro em 4 faixas de medição (range), ± 2 , ± 4 , ± 8 , ± 16 g, e o giroscópio também em 4 faixas, ± 250 , ± 500 , ± 1000 , ± 2000 °/s.

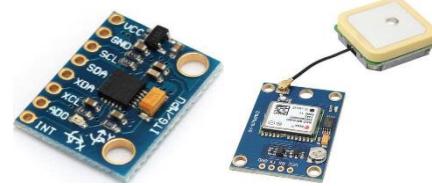


Figura 7 – Placa GY-521 (à esquerda) e placa HW-248 (à direita)

Foi decidido implementar um sistema de GPS no protótipo, apesar de não ser um dos requisitos mínimos definidos para o sistema, a aquisição da posição do veículo, aliada às acelerações e giros podem ser de grande valia para análises de pista. Portanto, foi escolhida a placa HW-248, comumente utilizada em robôs e drones, ela é baseada no módulo U-blox NEO-6M, possui antena cerâmica e memória EEPROM integradas, o que proporciona uma ótima precisão. A utilização do módulo é simples, a comunicação pode ser feita através da porta serial, através de comandos AT (linguagem de comandos específica encontrada no *datasheet* do GPS [18]).

Dentre as várias opções de chips *transceivers* para a comunicação CAN, foi escolhido o TJA1050, por possuir uma placa para desenvolvimento difundida no Brasil. O TJA1050 realizada a interface entre o controlador CAN do microcontrolador e o barramento físico, providenciando a capacidade de transmissão em sinal de tensão diferencial. Este dispositivo atende às especificações do protocolo de comunicação definidas pela ISO 11898, que define padrões para as camadas de dados e para a camada física do barramento CAN. Este foi o terceiro modelo de *transceiver* CAN lançado pela *Philips Semiconductors*, apresentando uma grande redução da emissão eletromagnética em relação aos seus antecessores.

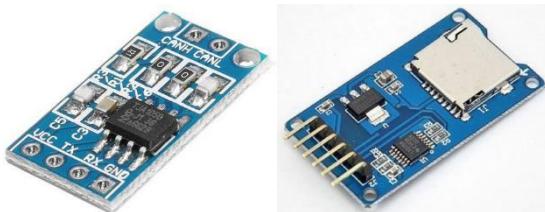


Figura 7 – TJA1050 (à direita) e HW-125 (à direita)

Para possibilitar a comunicação com o cartão micro SD, foi utilizada a placa de desenvolvimento HW-125, muito comum em protótipos eletrônicos e amplamente comercializada no Brasil. Ela embarca um soquete para o cartão, um regulador de tensão de 3,3V e um *level-shifter*, para possibilitar a comunicação através da interface SPI com dispositivos baseados em 3,3V e em 5V, sem danificar o cartão.

Foi decidido utilizar o transceptor de radiofrequência Xbee-PRO 900HP S3B da marca Digi International para o sistema de transmissão sem fio, que se comunica com o microcontrolador através da comunicação UART (*Universal asynchronous receiver/transmitter*) e envia os dados através do protocolo Zigbee. Todas as versões Xbee de hardware *Legacy S3B* possuem certificação de operação pela ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) do governo brasileiro, a Comissão Federal de Comunicações dos Estados Unidos da América - FCC (*Federal Communications Commission*), e da agência regulatória do Canadá - ISED (*Innovation, Science and Economic Development of Canada*). Portanto, este módulo pode ser amplamente utilizado no Brasil, EUA e Canadá, países contemplados com competições Fórmula SAE. A versão Xbee-PRO 900HP S3B possui alcance em campo aberto de até 6,5 km na taxa de transmissão de 200 kb/s e até 16,5 km na taxa de transmissão de 10 kb/s, uma potência de transmissão de 250 mW, interface de comunicação UART com *baudrate* configurável entre 9600 e 230400 e opera na frequência de transmissão da banda dos 900 MHz (64 canais disponíveis).



Figura 8 – Xbee-Pro S3B (à direita) e adaptador (à esquerda)

C. Projeto de Hardware

Foi decidido projetar o hardware final do sistema de aquisição de dados sobre uma placa de circuito impresso de dupla-face, e, para otimizar a área da placa e reduzir o acoplamento eletromagnético entre os componentes, foram utilizados, na maioria, componentes de montagem na superfície (SMD – *Surface Mounted Devices*).

Devida à falta de recursos computacionais e laboratoriais (e outras dificuldades causadas pela pandemia), não foram realizadas simulações ou testes de compatibilidade eletromagnética (EMC). Por isso, o projeto da placa foi conduzido de acordo com as orientações da recomendação para compatibilidade eletromagnética da *Ford Motor Company* (2002).

Desta forma, fica à critério da equipe determinar o posicionamento ideal do módulo em seu protótipo. Deve-se

evitar as partes mais ruidosas do ambiente veicular, como locais em que ocorrem muitas comutações (injeção eletrônica, retificador) e em que possuam cabos de alta corrente ou de comunicações de alta velocidade. Assim, por mais que a susceptibilidade eletromagnética do módulo não tenha sido testada, espera-se que, longe de potenciais fontes de ruído, o dispositivo opere em pleno funcionamento.

Foram seguidas abordagens de design para redução da susceptibilidade a radiações, imunidade a descargas eletrostáticas e controle de emissões irradiadas e conduzidas. Neste contexto, a primeira orientação seguida foi a utilização de plano de *ground*, cuja função é ser o condutor de menor impedância para servir como retorno de corrente e referência de sinais. Além disso, foram utilizadas capacitâncias de desacoplamento na alimentação de cada um dos circuitos integrados, com o objetivo de reduzir a interferência entre os diferentes tipos de circuitos na placa. Desta forma, a intenção foi utilizar a camada inferior (*bottom layer*) como plano de referência e a camada superior, na qual maioria dos componentes estão montados, como plano de blindagem conectado ao plano de referência através um único ponto, possibilitando um caminho de baixa impedância para o escoamento de correntes induzidas por radiação. A figura 9 representa um diagrama de blocos resumido do módulo.

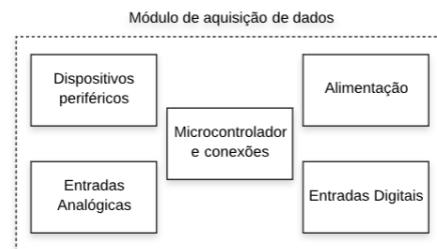


Figura 9 – Overview dos circuitos do módulo de aquisição de dados

A figura 10 apresenta a visão superior do módulo, que foi projetado no software Altium Designer. Pode-se verificar que foi realizada a separação de circuitos de propriedades distintas, tais como a alimentação, concentrada na parte superior da placa, com os componentes no *bottom layer*. O circuito de condicionamento dos sinais digitais e os outros dispositivos de alta frequência na parte central da placa, separados dos circuitos de condicionamento de sinais analógicos que se encontra concentrado na parte inferior da placa, no *bottom layer*. Os conectores foram posicionados na borda da placa para serem encaixados no invólucro do módulo, da mesma forma que o GPS e o XBEE foram posicionados de forma que possam ser encaixados seus conectores das antenas na caixa, permitindo que o usuário possa levar, através de um cabo coaxial, as antenas para pontos estratégicos do carro, onde o sinal seja melhor aproveitado e menos suscetível à ruídos de outros sistemas. Este posicionamento dos circuitos, de forma a separar o máximo possível os diferentes sinais entre si, é uma das recomendações para compatibilidade eletromagnética indicadas pela *Ford Motor Company* (2002).

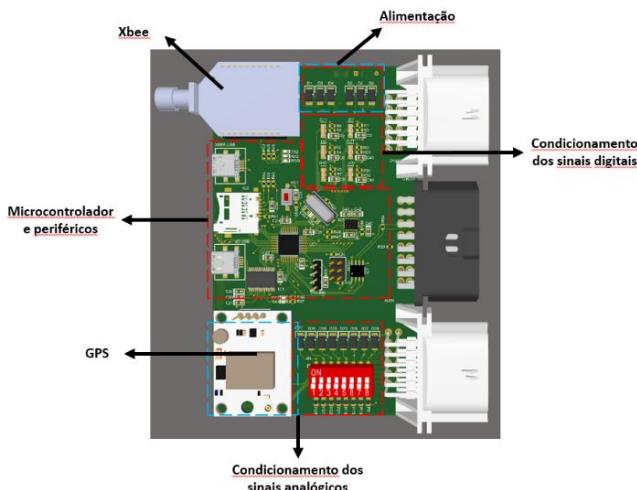


Figura 10 – Design do módulo de aquisição de dados

Alimentação

O circuito de alimentação da placa se baseia em dois reguladores de tensão que são alimentados diretamente pela bateria (12V) do carro e adequam os níveis de tensão para 3.3 e 5V. Foi escolhido o LDO (*Low-dropout regulator*) TPS709-Q1 (versões de 3.3 e 5V). Este é um regulador qualificado para aplicações automotivas pela norma de testes AEC-Q100, atendendo aos requisitos de funcionamento sob estresses térmicos, descargas eletrostáticas e outras condições do ambiente automotivo. O regulador possui proteção contra correntes reversas e sobrecarga térmica, além de poder ser utilizado em um encapsulamento compacto, o SOT-23-5.

Além disso, foi utilizado como proteção contra curtos-circuitos, um fusível resetável do tipo PTC (*positive temperature coefficient*) na entrada da alimentação do módulo e diodos TVS (*Transient Voltage Suppressor*) para proteção contra eventuais picos de tensão causados por ruídos do ambiente automotivo.

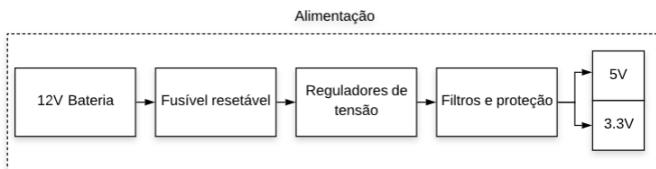


Figura 11 – Diagrama de blocos do circuito de alimentação

Microcontrolador e Conexões

Essa seção do circuito compõe as conexões com o microcontrolador. O STM32F103C8T6 possui conexão com todos os capacitores de desacoplamento de seus pinos de alimentação, o cristal oscilador de 8MHz utilizado para permitir a máxima frequência de trabalho da CPU (72MHz), um botão de reset, conectores para seleção de modo de boot e para conexão do dispositivo de gravação do firmware (ST-Link). Além disso, foi decidido utilizar um conversor UART-USB (FT232) para possibilitar o broadcasting de dados através de uma das portas USART do microcontrolador para um computador através de cabo USB. Foi necessária a utilização

do conversor, apesar de o microcontrolador possuir um controlador USB nativo, porque não é possível configurar a comunicação USB junto à comunicação CAN, uma vez que os controladores de ambas as comunicações compartilham o mesmo espaço de memória SRAM.

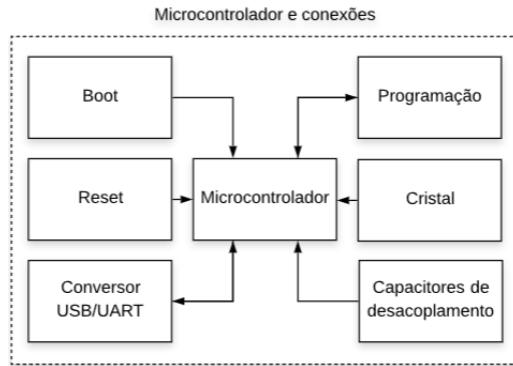


Figura 12 – Diagrama de blocos das conexões do microcontrolador

Dispositivos Periféricos

Essa parte do circuito consiste apenas no hardware dos dispositivos que possuem comunicação com o microcontrolador, como o acelerômetro e giroscópio, o GPS, o cartão microSD, o transceiver CAN e o rádio Xbee. Cada dispositivo está acompanhando do hardware complementar necessário para seu funcionamento (capacitores de desacoplamento, resistências de *pull-up*) e, em alguns casos, LEDs indicadores para auxiliar no diagnóstico do funcionamento de cada componente.

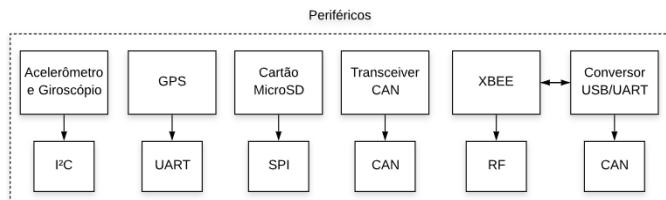


Figura 13 – Diagrama de blocos do circuito dos periféricos

Entradas Analógicas

O circuito de condicionamento de sinal das entradas analógicas foi projetado para possibilitar a utilização de sensor de saída em tensão na faixa de 0-5V, ou sensores resistivos tais como termistores NTC (*negative temperature coefficient*), muito comuns em sistemas automotivos. Por isso, foi utilizada uma chave de seleção (*DIP-Switch*) para que o usuário do módulo possa conectar uma resistência de *pull-up* quando desejar conectar um termistor na entrada, fechando o circuito de um divisor de tensão com saída em até 5V. De modo geral, esperava-se um sinal até 5V na entrada, mas foi utilizado um diodo TVS para proteção contra surtos de tensão e foi utilizado um amplificador operacional em forma de buffer para isolar o sinal do sensor. Em seguida, tem-se um divisor de tensão para abaixar o nível de 5V para 3.3V, um filtro passa-baixas e um diodo zener como forma de garantir uma maior proteção para a entrada analógica do microcontrolador.

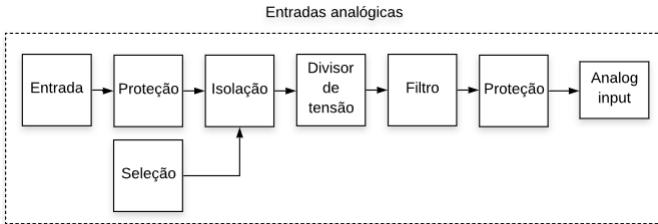


Figura 14 – Diagrama de blocos do circuito de condicionamento de sinal das entradas analógicas

Foram avaliados amplificadores operacionais de várias marcas para a função de isolador, escolheu-se o TLV9064-Q1, da *Texas Instruments*. Este é um circuito integrado que contém quatro amplificadores operacionais independentes, certificação AEC-Q100, que possui tecnologia *rail-to-rail* nas entradas e saídas, e uma banda de passagem de 10MHz. Além disso, este é um dispositivo otimizado para baixa susceptibilidade à radiação eletromagnética.

Entradas Digitais

Sensores de velocidade automotivos, independente do elemento sensor ser baseado em princípios de indução ou efeito hall, comumente possuem sua saída chaveada por um transistor NPN. Ao conectar uma resistência de *pull-up* na saída do sensor, define-se o nível de tensão do sinal em repouso. O sinal é, então, chaveado para o negativo quando um dente da roda fônica passa pela frente do sensor.

Desta forma, utilizou-se de uma resistência de *pull-up* conectada ao 5V e uma segunda resistência e um capacitor, formando um divisor de tensão e um filtro RC, adequando o sinal para o nível do microcontrolador (de acordo com o critério de *Nyquist*) e removendo componentes de alta frequência indesejadas. Por fim, foi utilizado um diodo zener para garantir a proteção da entrada do microcontrolador contra eventuais sobretensões. A figura 14 apresenta o diagrama de blocos do circuito.

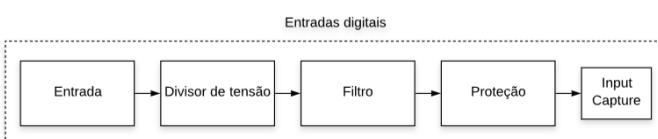


Figura 15 – Diagrama de blocos do circuito de condicionamento de sinal das entradas digitais

D. Projeto de Firmware

A programação do firmware para o microcontrolador STM32F103C8T6 foi desenvolvida nos ambientes STM32 CubeMX e STM32 CubeIDE. O primeiro, foi utilizado para parametrizar todas as configurações do microcontrolador, enquanto o segundo, é a IDE na qual todas as bibliotecas para abstração das camadas de baixo nível são integradas ao programa principal.

O primeiro passo do projeto de firmware foi mapear as funções de cada pinos de acordo com as possibilidades de remapeamento e as funções necessitadas.

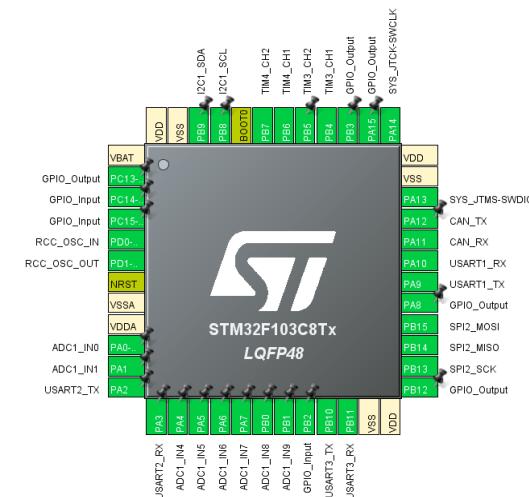


Figura 16 – Configuração dos pinos do microcontrolador no STM32CubeMX

Como resultado, a estrutura do programa conta com funções do núcleo de processamento como o acesso direto de memória (DMA), manipulação dos pinos digitais de entrada e saídas (GPIO), controle de interrupções (NVIC) e controle de *clock* (RCC). Além disso, foi configurado o módulo de conversão analógico/digital ADC1 como canal das 8 entradas analógicas, os temporizadores TIM3 e TIM4 como entradas de captura de entrada (*input capture*), e os controladores de comunicações CAN, I²C1, SPI2 e as três portas USART do microcontrolador.

Programa principal

O programa principal do firmware consiste na aquisição de todos os dados, seja por interrupções das comunicações, ou mesmo por DMA, agrupar os dados e transmitir para as portas de broadcasting UART da telemetria e da conexão USB, além de realizar a gravação dos dados no cartão microSD embarcado.

Captura de Entrada (Input Capture)

Microcontroladores usualmente possuem pinos com funções de captura de sinais, que são utilizados para medição de frequência ou largura de pulso de sinais quadrados. Essa função é coordenada pelo hardware da entrada em conjunto com um temporizador, de forma que, baseado no tipo de borda programada, seja capturado o valor atual do temporizador correspondente [16]. Neste trabalho a captura de entrada será utilizada para realizar a medição de período entre duas bordas negativas do sinal, de forma a calcular a frequência instantânea. A frequência do sinal é diretamente proporcional à velocidade da roda, uma vez que, a revolução da roda causa a revolução da roda fônica à qual o sensor está apontado, gerando pulsos para cada dentes que passa pela frente do sensor.

Logo, pode-se estimar a velocidade medida através da equação abaixo [24]:

$$V_v = \frac{o_v}{N} f_s = \frac{2\pi r_v}{N} = k f_s$$

Onde V_v é a velocidade linear da roda medida, f_s é a frequência do sinal, r_v é o raio da roda, o_v é a circunferência da roda e N é a quantidade de dentes da roda fônica.

Desta forma, foram configurados como entradas de captura os canais 1 e 2 dos temporizadores TIM3 e TIM4, que através de uma interrupção configurada para ser acionada à cada borda de descida, sendo realizado o cálculo da frequência instantânea do sinal.

Entradas analógicas

O protótipo possui oito entradas analógicas conectadas aos pinos do conversor analógico-digital ADC1 no microcontrolador através do circuito de condicionamento de sinal, que adequa os níveis de tensão para uma faixa de 0-3V. O microcontrolador foi configurado para realizar as conversões A/D em modo contínuo e realizar a transferência dos resultados para a memória através do canal 1 do acesso direto de memória (DMA). O DMA implementa um buffer circular que possibilita a escrita na memória sem que seja necessária a interrupção da CPU para realizar essa tarefa. Desta forma, foi alocado um buffer de 8 palavras (16 bytes) para receber os dados do ADC à cada leitura.

Gravação de dados

A gravação de dados é realizada em cartão microSD através do protocolo de comunicação SPI (*Serial Peripheral Interface*). Este é um protocolo baseado em 4 conexões: *Serial Clock* (SCK), *Master In Slave Out* (MISO) e *Master Out Slave In* (MOSI), que podem ser compartilhados entre o dispositivo mestre e todos os dispositivos escravos, enquanto a conexão *Slave Select* (SS) serve para selecionar qual escravo estará ativo no barramento em dado momento.

Embora a comunicação física entre o microcontrolador e o cartão microSD aconteça através do protocolo SPI, são necessárias outras camadas de programação (*drivers*) que possibilitam a padronização e unificação dos comandos de nível de arquivo, como *open*, *read* e *write*, na estrutura determinada pela formatação do cartão, para que se possa acessar arquivos específicos dentro do cartão. Este driver é disponibilizado como uma camada do firmware pelo STM32 CubeMX, é o chamado *middleware* FATFS.

Com o objetivo de obter uma comunicação mais eficiente entre os dispositivos, foi utilizado o canal 5 do DMA para realizar a transferência de dados do buffer de transmissão do controlador SPI2 para o periférico. Desta forma, a CPU não é demandada durante a transferência dos dados adquiridos, para o controlador da comunicação.

Acelerômetro

A comunicação com o dispositivo MPU6050 é realizada através do protocolo I²C (*Inter-integrated circuit*). O I²C é baseado em apenas duas conexões, SCL (*Serial Clock*) e SDA (*Serial Data*), que neste caso, é uma via de dados bidirecional. O protocolo apresenta a possibilidade de conexões de múltiplos dispositivos escravos no mesmo barramento. Porém, diferentemente do protocolo SPI, a seleção do escravo é realizada através do seu endereço de identificação, que é composto por 2 bytes.

O *frame* da comunicação I²C, apresentado na figura 17, possui seções em que o dado flui do mestre para o escravo e ao contrário. No caso das mensagens para configuração do MPU6050, ou seja, operação de escrita em espaços de memória do escravo, o frame *Write Transaction* apresenta a estrutura da

mensagem. O importante é notar a utilização do endereço do escravo, um bit de sinalização de operação de leitura/escrita, os bits de *acknowledgement* (resposta de confirmação) e a estrutura do pacote de dados, que contém, o endereço na memória do registrador que se quer ler ou escrever e os dados em si, transferidos em sentidos diferentes para cada operação.

Foram utilizadas bibliotecas que já trazem mapeados os endereços dos registradores de configuração mais importantes como escalas e filtros do dispositivo, além das funções para calibração e requisição das leituras.

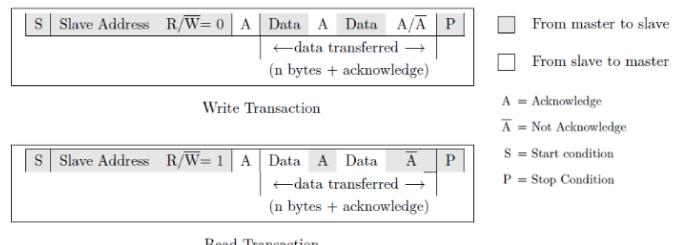


Figura 17 – Frames do protocolo de comunicação I²C

Vale ressaltar que, para realizar a análise adequada dos sinais de aceleração, é necessário que o ponto de referência dos sinais seja o central de massa (CM) do veículo. Desta forma, é necessário realizar, no pós-processamento, a adequação dos sinais através da matriz de translação do ponto do acelerômetro até o ponto de referência.

CAN

As especificações do protocolo estabelecidos na norma ISO11898 são cumpridos pelo transceptor TJA1050. No âmbito do *firmware*, o controlador CAN do STM32 realiza a comunicação serial com o transceptor. As camadas dos drivers disponibilizados pelo STM32CubeMX já desempenham o papel de padronização e controle do protocolo. Desta forma, são necessárias apenas a implementação das funções de *request* das mensagens padronizadas com os códigos PID, enquanto a transmissão e recepção dos dados é controlada através de interrupções configuradas para os *buffers* dedicados à comunicação na memória RAM do microcontrolador.

GPS

O GPS utiliza a lógica de comandos de Hayes, ou comandos AT, através do protocolo de comunicação UART. Os comandos AT possibilitam a configuração do módulo GPS e as requisições dos dados de latitude, longitude, altitude, data e horário. O canal de comunicação USART3 do microcontrolador foi utilizado para este dispositivo, sendo possível a implementação dos canais 2 e 3 do DMA para possibilitar a transmissão e recepção direta dos dados, de forma que o programa principal precisa apenas chamar as funções de *trigger* da comunicação, mas não precisa executar a transferência, otimizando a performance do sistema.

Broadcasting

Todos os dados adquiridos são transmitidos simultaneamente para duas portas USART, de modo que, na USART1, seja enviado para a conexão USB através do conversor FT232, e pela porta USART2, seja transmitido ao Xbee, que através do protocolo Zigbee realiza a transmissão

sem fio para o outro módulo XBee conectado ao computador da equipe.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foi realizado o projeto do hardware para um módulo que possa ser utilizado de forma flexível pela equipe, de forma que seja possível a implementação de novas funções posteriormente, apenas com o desenvolvimento da programação do módulo. Desta forma, o projeto pode ser reutilizado por várias temporadas, sendo necessárias apenas modificações de firmware e implementações de software para o pós-processamento e análise dos sinais.

Foi criada a *Bill of Materials* (BOM) dos componentes do módulo no *Altium Designer*, e feitas as cotações em distribuidores de eletrônicos online tais como a *Digikey* e a *Mouser*. O custo calculado para compra dos componentes e das placas de circuito impresso (cotada na *JLCPCB*), foi de aproximadamente USD \$300, o que representa menos de 50% do preço do *RaceCapture Pro MK3*, o *datalogger* mais barato do benchmark.

O condicionamento de sinal das entradas analógicas possibilita a utilização de uma grande variedade de sensores automotivos, sejam eles resistivos ou com saída em tensão. Foram disponibilizadas em um conector 6 pinos de entradas digitais, das quais 4 podem ser utilizadas para leitura de velocidade através dos módulos de captura de sinal do microcontrolador, enquanto todas podem ser utilizadas para fins genéricos, como a leitura de alguma chave ou pressostato. No mesmo conector, foram disponibilizadas saídas digitais através de drivers de transistores, que possibilita a implementação de sinais para funções variadas, inclusive sinais PWM para controle de motores e outros atuadores.

Além disso, o firmware já foi estruturado para implementação das funções propostas neste trabalho, de aquisição de sinais, transmissão sem fio e gravação embarcada.

A tabela IV mostra a comparação dos requisitos levantados no início da metodologia e as características realizadas no projeto. Os requisitos de projeto foram cumpridos e foi possível expandir o escopo para possibilitar algumas funções a mais para o sistema de aquisição.

TABELA IV

COMPARAÇÃO DOS REQUISITOS LEVANTADOS E PROJETO REALIZADO

	Requisitos	Realizado*
Entradas Analógicas	5	8
Entradas de Velocidade	2	4
GPS	Sim	Sim
Acelerômetro	Biaxial	Triaxial
Giroscópio	-	Triaxial
Interface CAN	Sim	Sim
Transmissão de dados	Gravação de dados embarcada e/ou telemetria	Gravação em cartão microSD e telemetria via rádio XBee
Preço (USD)	Abaixo do mercado	\$300 (-50%)

* Além dos pontos colocados na tabela, foram disponibilizadas 2 entradas digitais extras, 2 saídas digitais e aquisição de posição via GPS à taxa de 1Hz.

** As entradas analógicas podem ser utilizadas para aquisição de sinais padrão de 0-5V ou para sensores resistivos, como os termistores.

Com o protótipo desenvolvido, foi implementado parte do firmware para testar a aquisição de sinais analógicos através de DMA, as três acelerações e três giros do MPU6050, tempo decorrido (em milissegundos), e transmitir todos os sinais para o computador através de dois canais de comunicação: o rádio XBee e a porta USB do PC.

A figura 19 exibe a recepção dos dados através do XBee (nó Telemetria FSAE 1) no software XCTU da fabricante (Digi International).

A transmissão por telemetria foi validada em bancada comparando com os dados recebidos através da transmissão via USB para o computador. Neste trabalho não foram realizados testes com os rádios embarcados no veículo de FSAE. Porém, a equipe já utilizou o módulo XBee para transmissão dos dados da central eletrônica do motor, por isso espera-se que nesta aplicação o módulo apresente bom desempenho e grande alcance (até 2km de distância, como especificado, para locais abertos).

A aquisição dos dados transmitidos para o computador através do rádio foi feita através do software XCTU e os sinais foram processados e plotados utilizando a biblioteca Plotly, em Python. A figura 20 apresenta os resultados desta aquisição. A taxa de aquisição registrada em ambos os canais foi de aproximadamente 110Hz, o que seria suficiente para a análise dos sinais propostos para o sistema de aquisição do protótipo de FSAE. A figura 21 mostra o exemplo dos 15 canais adquiridos no teste em bancada, sendo eles: três canais de aceleração, três de giro, 8 canais analógicos e um canal de temperatura interna do microcontrolador.

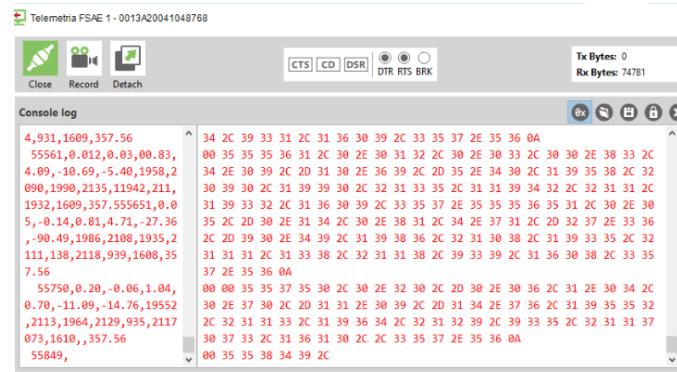


Figura 19 – Pacotes de dados recebidos pelo XBee conectado ao computador

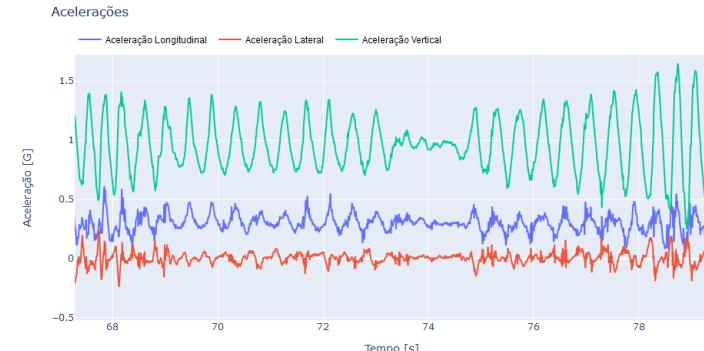


Figura 20 – Sinais de aceleração adquiridos pelo microcontrolador e transmitido para o computador por telemetria.

time	Ax	Ay	Az	Gx	Gy	Gz	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	Temp	
0	0.000	0.13	0.78	-0.65	2.09	-3.59	-0.46	2381	2140	1949	2122	1934	2113	1929	1663	23.06
1	0.008	0.13	0.78	-0.66	2.16	-3.60	-0.56	2387	2132	1944	2115	1927	2106	1932	1663	23.06
2	0.017	0.13	0.77	-0.65	2.11	-3.71	-0.57	2385	2134	1949	2121	1936	2112	1926	1661	23.06
3	0.026	0.13	0.78	-0.65	2.11	-3.63	-0.63	2378	2135	1947	2118	1930	2110	1936	1664	23.06
4	0.034	0.13	0.78	-0.66	2.16	-3.52	-0.50	2386	2130	1945	2118	1933	2112	1931	1662	23.06

Figura 21 – Dados adquiridos de 15 sinais a taxa de aproximadamente 110Hz.

Desta forma, em termos de firmware, ainda é necessário validar a comunicação CAN do veículo e integrar todas as funcionalidades. Sugere-se a utilização da FreeRTOS, sistema operacional de tempo real já implementado pelo STM32CubeMX, para organização e temporização das aquisições, uma vez que o período de aquisição de cada sinal será diferente. Enquanto as entradas analógicas, de velocidade, acelerações e giro, podem ser adquiridas em uma frequência superior, os sinais de posição do GPS só podem ser adquiridos à uma taxa de até 1Hz, e os sinais do barramento CAN possuem também frequência mais baixa de atualização a depender do modelo da central eletrônica, podendo chegar a apenas 10Hz (comum em carros de passeio), mas podendo ultrapassar os 100Hz em centrais de veículos de competição ou de desenvolvimento.

IV. CONCLUSÕES

Ao fim do trabalho, foi projetado o hardware completo do módulo de aquisição de dados e o firmware base para as funções propostas. O hardware foi projetado com o objetivo de ser flexível, atendendo uma variedade de aplicações que podem ser necessitadas pela equipe, e que podem ser implementadas futuramente através do desenvolvimento e adaptação contínua do firmware.

O projeto do módulo de aquisição de dados pelas equipes é absolutamente factível para as habilidades de projeto eletrônico, programação e capacidade de manufatura que os membros das equipes podem obter no ambiente da faculdade ou até com auxílio de empresas parceiras. Além disso, o custo estimado para manufatura do módulo (USD \$300) apresentou-se muito abaixo das opções comerciais que a maioria das equipes brasileiras não possui condições de obter devido ao orçamento limitado e alto custo destes produtos. Outro ponto positivo é que grandes fabricantes de componentes eletrônicos possuem programas de incentivo para projetos estudantis, possibilitando a aquisição de amostras dos componentes principais do projeto, sem custo para a equipe.

Desta forma, a opção de desenvolvimento interno de um módulo como este é uma grande vantagem não somente em termos de aprendizado técnico, flexibilidade e desenvolvimento de projeto (pontuado nas provas estáticas da competição), mas também como forma de viabilizar economicamente a aquisição de dados no veículo de competição e fomentar o desenvolvimento da análise de dados e evolução dos projetos dos outros sistemas do veículo.

V. AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente aos meus pais, Rubens e Leonia e meu irmão Pedro, que sempre suportaram e incentivaram minha educação tecnológica. À minha parceria, Malu, por todo

o suporte dado ao longo da minha graduação e o apoio em cada desafio neste caminho.

Ao professor Anthony Chiaratti, por sempre estar aberto à discussão e me auxiliar a colocar no papel esse projeto, e ao professor Túlio Carvalho por todo incentivo durante a graduação e minha participação na equipe de competição. Aos membros da equipe Fórmula Cefast, que, cada qual com sua respectiva contribuição, tornaram a equipe na campeã que é hoje.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SAE INTERNATIONAL. Formula SAE Rules 2019, 2018.
- [2] SEGERS, J. Analysis Techniques for Raccecar Data Acquisition – 2nd Edition, 2014.
- [3] BALBINOT A., V. J. B. Instrumentação e Fundamentos de Medidas Vol. 1, 2010.
- [4] FRADEN, J. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs and Applications – 3rd Edition, 2004.
- [5] PALLAS, R. dan J. G. W. Sensors and Signal Conditioning - Second Edition, 2001.
- [6] STMICROELECTRONICS. RM0008 Reference manual STM32F101xx, STM32F102xx, STM32F103xx, STM32F105xx and STM32F107xx advanced Arm®-based 32-bit MCUs, 2018.
- [7] HENG, L. I. U. Vehicle Network Communication Protocols — Comparison and Case Study.
- [8] TUOHY, S. et al. Intra-vehicle networks: A review. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 16, 2015.
- [9] SAE INTERNATIONAL, 2018 Formula SAE Lincoln/Electric Event Guide, 2018.
- [10] SAE INTERNATIONAL, 2018 Formula SAE Michigan Event Guide, 2018.
- [11] AIM SPORTLINE. EVO4 Data Logger User guide. Disponível em: https://www.aim-sportline.com/download/doc/eng/evo4/EVO4_116_eng.pdf. Acesso em 17 de novembro de 2019.
- [12] AIM SPORTLINE. EVO5 Logger User guide. Disponível em: https://www.aim-sportline.com/download/doc/eng/evo5/EVO5_105_eng.pdf. Acesso em 17 de novembro de 2019.
- [13] MOTEC. L180 Enclosed Logger. Disponível em: <https://www.motec.com.au/L180/L180-overview/>. Acesso em 17 de novembro de 2019.
- [14] MOTEC. C185 Display Logger. Disponível em: <https://www.motec.com.au/c185/c185overview/>. Acesso em 17 de novembro de 2019.
- [15] AUTOSPORTS LABS. RaceCapture/Pro MK3 Lap timer, data logger, telemetry system. Disponível em: <https://www.autosportlabs.com/product/racecapturepro-mk3/>. Acesso em 17 de novembro de 2019.
- [16] BROWN, G. Discovering the STM32 Microcontroller, 2016.
- [17] IBRAHIM, D. SD Card projects using the PIC microcontroller, 2010.
- [18] U-BLOX. NEO-6u-blox 6 GPS Modules Data Sheet, 2011.
- [19] INVENSENSE. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification, 2013.
- [20] RICHARDS, P. A CAN Physical Layer Discussion – Microchip. AN228, 2002.
- [21] CORRIGAN, S. Introduction to the Controller Area Network (CAN) – Texas Instruments, 2002.
- [22] TEXAS INSTRUMENTS. SN65HVD23x 3.3-V CAN Bus Transceivers, 2001.
- [23] DIGI INTERNATIONAL. XBee-PRO900HP/XSC RF Modules S3 and S3B – User Guide, 2015.
- [24] TROBORO C., M. M. Improving wheel Speed Sensing and Estimation. Department of Automatic Control - Lund Institute of Technology 2003.
- [25] FORD MOTOR COMPANY, Engineering Specification - EMC Design Guide for Printed Circuit Boards, 2002.