

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA A AQUISIÇÃO DE DADOS DINÂMICOS ATRAVÉS DE ACELERÔMETROS MEMS TRIAXIAIS: APLICAÇÃO EM PROTÓTIPO BAJA

Development of a Low-Cost System for Acquisition of Dynamic Data Through Triaxial Mems Accelerometer: A Baja Prototype Case

Pablo M. M. Pires ^{1*}, Gabriel Z. B. L. Bueno ¹ e Maurício M. Nelton ¹

¹ Universidade Federal de São João del-Rei

*Autor correspondente: pabllomiguel_26@hotmail.com

RESUMO

Componentes e conjuntos mecânicos frequentemente estão expostos a carregamentos dinâmicos em função de seu funcionamento. Junto disso, quando se trata de peças automotivas, é eminente a necessidade de um projeto otimizado e confiável, haja vista a preocupação com a integridade estrutural do produto e, consequentemente, as vidas que estão envolvidas com tal. Nesse viés, para alcançar um nível satisfatório em simulações numéricas como Método de Elementos Finitos e até mesmo em simulações de Dinâmica Multicorpos, é imprescindível a obtenção de dados reais captados em protótipos ou até mesmo em produtos finais em condições de uso, podendo assim validar tais análises. Diante disso, o presente trabalho busca explicitar o desenvolvimento e aplicação de um sistema de aquisição de dados de baixo custo para a obtenção de carregamentos de acelerações na suspensão de um protótipo tipo baja da equipe de competição KomiKeto Baja – UFSJ, objetivando a utilização dos mesmos para a aplicação em condições de contorno em simulações numéricas de tensão e de fadiga.

Palavras-chave: Aquisição de dados, Protótipo tipo baja, Condição de Contorno.

ABSTRACT

Components and mechanical assemblies are often subjected to dynamic loads due to their operation. Furthermore, when it comes to automotive parts, the need for an optimized and reliable design is imminent, considering the concern for the structural integrity of the product and, consequently, the lives involved with it. In this regard, to achieve a satisfactory level in numerical simulations such as Finite Element Method and even in Multibody Dynamics simulations, obtaining real data captured from prototypes or even from final products under operating conditions is essential to validate such analyses. Therefore, this study aims to elucidate the development and application of a low-cost data acquisition system for obtaining acceleration loads on the suspension of a baja prototype from the KomiKeto Baja Racing Team - UFSJ, aiming to use them for boundary conditions in numerical simulations of stress and fatigue.

Keywords: Data Acquisition, Baja Prototype, Boundary Conditions.

1. Introdução

A obtenção de dados de carregamentos em componentes mecânicos na área automotiva vem sendo explorada e valorizada cada dia mais a fim de realizar projetos com condições de contorno cada vez mais fiéis ao comportamento físico-mecânico desses componentes, quando expostos em pleno funcionamento, e, assim, tornar possível a otimização e aumento da confiabilidade estrutural do projeto como um todo [3], [5].

Nesse viés, visando compreender os esforços atuantes e o comportamento dinâmico dos componentes do protótipo KB09 da Equipe KomiKeto Baja UFSJ - equipe de competição BAJA SAE -, através do setor de cálculo estrutural, objetiva-se no presente trabalho apresentar técnicas utilizadas para a aquisição de dados por meio de acelerômetros, quantificando esforços e carregamentos obtidos em testes e ensaios realizados por membros da equipe, os quais serão utilizados para simulações numéricas de fadiga pelo método de elementos finitos para validar e/ou projetar componentes do veículo [6], [13]. Além disso, visa-se, principalmente, mostrar os resultados obtidos com um sistema de baixo custo e de desenvolvimento próprio, haja vista o alto valor de produtos utilizados na indústria para esse tipo de análise; além mostrar os desafios encontrados, cooperando para trabalhos futuros, haja vista a escassez de materiais disponíveis voltados para o tema.

1.1. Acelerômetros Tipo MEMS

A tecnologia MEMS é caracterizada por um ramo da engenharia aplicada à desenvolvimento de chips microscópicos nos quais integram componentes mecânicos e elétricos em uma mesma plataforma de maneira precisa e inovadora, sendo fabricados com base em critérios de desenvolvimento de semicondutores, normalmente a base de silício devido a seu alto desempenho em relação à histerese material quando submetido a deformações, sem dissipação de energia, além de possuir uma característica excepcional em comportamento de fadiga, possibilitando bilhões de ciclos de funcionamento sem falhar, resultando em sensores extremamente precisos mesmo produzidos em larga escala [10], [11].

Baseados na Segunda Lei de Newton e na Lei de Hook, os acelerômetros MEMS utilizam do princípio de que sua massa sísmica suspensa por molas quando experimenta um deslocamento não uniforme, é gerado

uma determinada aceleração equivalente ao sistema (Figura 1). Assim, quando o acelerômetro sofre uma aceleração, a massa se desloca em relação à estrutura fixa, alterando as propriedades elétricas capacitivas, gerando assim uma variação no sinal analógico emitido e, conseqüentemente, nos valores calibrados e programados para representar a aceleração medida [9].

$$F_l = F_s \quad (1)$$

$$m \cdot a = k \cdot x \quad (2)$$

Como a massa e a rigidez das molas são precisamente padronizadas pelos padrões de fabricação dos chips, logo pode-se dizer que a aceleração (a) é diretamente proporcional (α) ao deslocamento (x).

$$a = \frac{k \cdot x}{m} \quad (3)$$

$$\therefore a \propto x \quad (4)$$

Conforme ilustrado na Figura 1 abaixo, o chip possui diversas placas paralelas condutoras que medem o deslocamento do sistema de acordo com a variação da capacitância medida ($C1$ e $C2$).

Capacitores são componentes eletrônicos formados por dois condutores elétricos (placas) e um isolante (dielétrico). A capacitância de um capacitor plano de placas paralelas varia diretamente com a permissividade do dielétrico e a área da superfície das placas, e inversamente com a distância entre as placas [1]. Logo:

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{x} \quad (5)$$

Analogamente ao sistema massa-mola, onde a massa e a constante de mola são constantes, no caso do capacitor plano de placas paralelas, a permissividade do dielétrico " ϵ " e a área da superfície das placas " A " também têm valores constantes. Portanto, pode-se inferir que a capacitância (C) é inversamente proporcional à distância (x) entre as placas, assumindo que a permissividade e a área das placas permaneçam constantes. Portanto:

$$C \propto \frac{1}{x} \quad (6)$$

A relação entre a carga elétrica armazenada nas placas do capacitor "q" e a capacitância (C) referida, pode ser representada pela tensão elétrica "V" seguindo a equação:

$$V = \frac{q}{C} \quad (7)$$

Assim, a partir da relação de proporcionalidade (6) e da equação (7), podemos afirmar que:

$$V \propto x \quad (8)$$

Portanto, ao analisar as equações (4) e (6), percebemos que o fator comum entre elas é o deslocamento "x", levando-nos à conclusão de que:

$$a \propto V \quad (9)$$

Acelerômetros MEMS produzem sinais analógico em volts (V), proporcional à aceleração medida. A partir das equações (5) e (7), através da correlação entre elas, temos:

$$x = \frac{AV\varepsilon}{q} \quad (10)$$

Esta equação, por sua vez, é combinada com a equação (3) para calcular a aceleração, como representado pela equação abaixo:

$$a = \frac{kAV\varepsilon}{qm} \quad (11)$$

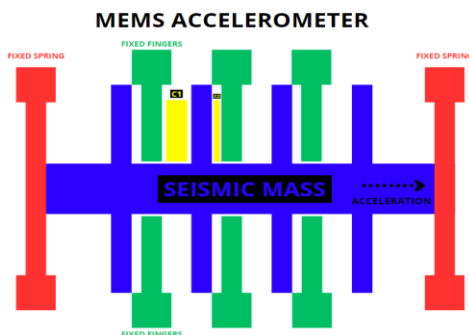


Figura 1. Ilustração de elementos que compõem o chipset de um acelerômetro MEMS. Fonte: AUTOR.

Amplamente utilizados na indústria automobilística, os acelerômetros do tipo MEMS (Microelectromechanical Systems) destacam-se por

serem uma solução integrada de alto nível com sensores pequenos e robustos acoplados em um único chipset, o que foi crucial para o desenvolvimento progressivo de Airbags de alta tecnologia. Além disso, seu uso não fica restrito somente à indústria automotiva, sendo também explorado de maneira ímpar na medicina (dispositivos de monitoramento de saúde, próteses), na indústria aeroespacial (sensores de monitoramento inercial, controle de navegação e afins), além de outras aplicações de precisão.

Para o presente trabalho, visando o baixo custo e o desempenho satisfatório, foi escolhido o sensor MPU-6050 desenvolvido pela TKD InvenSense (Figura 2). Cada sensor teve preço de R\$: 5,10 / U\$: 1,04 na cotação referente à data 26/02/2024.

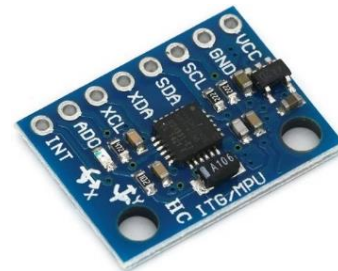


Figura 2. Acelerômetro utilizado no projeto. Fonte: [10]

1.2. Dispositivo Gerenciador (ESP32)

Desenvolvido pela Espressif Systems, o ESP32 é um módulo de chip utilizado para aplicações diversas, como IoT (Internet of Things), desenvolvimento de produtos e projetos eletrônicos, tendo como uma das principais características a fácil aplicação e programação, seu baixo peso e design portátil e compacto.

Algumas especificações técnicas são:

- Chipset microcontrolador integrado com Wi-Fi IEEE 802.11b/g/n e Bluetooth v4.2 BR/EDR e BLE (Bluetooth de baixa energia).
- Processamento dual-core 32-bit Xtensa LX6, capaz de operar a até 240 MHz.

Periféricos integrados, como GPIOs (Entradas/Saídas de Propósito Geral), UARTs (Transmissores/Receptores Universais Assíncronos), I2C (Inter-Integrated Circuit), SPI (Serial Peripheral Interface), ADC (Conversor Analógico-Digital), permitindo a conexão com diversos sensores, inclusive com o acelerômetro MPU-6050.

Para este trabalho, foi utilizado o modelo ESP32 WROOM 32U em função de sua característica de

possuir antena WiFi externa, permitindo a instalação de antenas externas com potência maior quando comparado com antenas integradas. Além disso, um fator crucial para tal aplicação foi o baixo custo de aquisição do dispositivo (R\$: 17,75 / U\$: 3,40 na cotação referente à data 26/02/2024) quando comparado a outros módulos de aquisição de dados de empresas como National Instruments, HBK, DEWESOFT e LYNX que custam entre \$1000 - \$5000.



Figura 3. ESP32 WROOM 32U. Fonte: Espressif Systems.

2. Metodologia

2.1. Sistema Embarcado e Data-Case

A seguir, tem-se a esquematização (Figura 4) do sistema embarcado (nomeado no presente trabalho de “DATA-CASE I / DCI”) estruturado em uma caixa blindada para projeto eletrônico, na qual explicita a disposição do microcontrolador ESP32, juntamente com a possibilidade de utilização de um smartphone (Figura 4) ou de um computador (Figura 5) com os aplicativos ou softwares de leitura e gravação dos dados, além da configuração de outros componentes como uma antena Wi-Fi externa conectada ao microcontrolador e os acelerômetros conectados ao circuito. Ressalta-se que a utilização de uma antena externa que possibilita o roteamento de um sinal Wi-Fi foi idealizada com o intuito de monitorar de maneira remota o correto funcionamento do sistema enquanto o carro encontra-se em movimento.

Para o presente trabalho foi realizado uma bateria de testes para que comprovasse a possibilidade da utilização tanto de um smartphone para a alimentação e ao mesmo tempo a gravação dos dados (caso a); quanto também a possibilidade de utilizar um laptop para tal função (caso b). Junto disso, a utilização de um smartphone deixou claro a possibilita maior comodidade para a análise, evitando de que haja o acréscimo de um componente no cockpit junto ao piloto quando se opta pela utilização de um laptop.

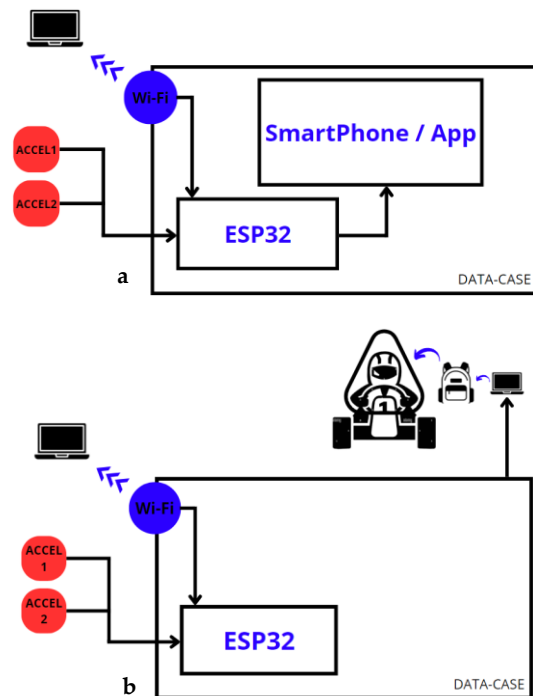


Figura 4. Ilustração esquemática do sistema de aquisição e disposição dos componentes utilizando smartphone (a); laptop (b). Fonte: AUTOR.



Figura 5. Imagem real do sistema de aquisição e disposição dos componentes utilizando smartphone (a); laptop (b). Fonte: AUTOR.

2.2. Configuração e Códigos Programados

Para o desenvolvimento do código a ser utilizado no dispositivo de aquisição de dados embarcado, utilizou-se o software Arduino IDE, o qual possui características de linguagem de programação C e C++ [2]. O IDE permite de maneira rápida e intuitiva

a comunicação direta com o microcontrolador ESP32, possibilitando o envio de diferentes códigos de forma ágil e direta, além de disponibilizar um serial monitor, o que torna o processo interativo através da visualização em tempo real da interpretação do código e suas variáveis de respostas, isto é, a aceleração medida. Além disso, ressalta-se que por limitação do microcontrolador, foi possível utilizar somente 2 acelerômetros ao mesmo tempo, pois em função do seu tipo de comunicação IC2, para que seja possível a conexão de mais sensores no protocolo, faz-se necessário a utilização de um dispositivo chamado multiplexador, o qual torna possível a comunicação de até 64 sensores no mesmo protocolo IC2 [15], entretanto não foi realizado tal configuração devido à falta de recursos para o projeto.

A seguir, tem-se o código utilizado para a leitura da aceleração utilizando dois acelerômetros de forma conjunta, sendo possível utilizar tanto para o caso a, quanto para o caso b.

```
#include <Wire.h>
#include <WiFi.h>
#include <Arduino.h>
```

```
WiFiServer server(80); // Cria um ponto de rede wi-fi pela
configuração interna do ESP32.
```

```
const char* ssid = "KOMIKETO_DAQ"; // configuração do
nome e senha da rede criada
const char* password = "";
```

```
// Variáveis para armazenar os dados dos acelerômetros
int16_t AcX1, AcY1, AcZ1;
int16_t AcX2, AcY2, AcZ2;
const int MPU2 = 0x69, MPU1 = 0x68;
```

```
void setup() {
  Serial.begin(115200);
```

```
// INICIALIZA O PRIMEIRO ACELERÔMETRO
```

```
Wire.begin();
Wire.beginTransmission(MPU1);
Wire.write(0x6B);
Wire.write(5);
Wire.endTransmission(true);
```

```
// INICIALIZA O SEGUNDO ACELERÔMETRO
```

```
Wire.begin();
```

```
Wire.beginTransmission(MPU2);
Wire.write(0x6B);
Wire.write(5);
Wire.endTransmission(true);
```

```
// Configura Acelerômetro para fundo de escala desejado
```

```
Wire.beginTransmission(MPU1);
```

```
Wire.write(0x1C);
```

```
Wire.write(0b00011000); // Trocar esse comando para
fundo de escala desejado
```

```
Wire.endTransmission();
```

```
Wire.beginTransmission(MPU2);
```

```
Wire.write(0x1C);
```

```
Wire.write(0b00011000); // Trocar esse comando para
fundo de escala desejado
```

```
Wire.endTransmission();
```

```
// Inicialização do servidor Wi-Fi
```

```
Serial.print("Configurando o ponto de acesso Wi-Fi...");
```

```
WiFi.softAP(ssid, password);
```

```
IPAddress IP = WiFi.softAPIP();
```

```
Serial.print("Endereço IP do ponto de acesso: ");
```

```
Serial.println(IP);
```

```
server.begin();
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
  WiFiClient client = server.available(); // Verifica se há
  clientes conectados
```

```
  if (client) {
```

```
    while (client.connected()) {
```

```
      unsigned long tempo = millis(); // Obter tempo atual em
      milissegundos
```

```
      readMPUData(); // Lê os dados dos acelerômetros
```

```
      // Envia os dados para o cliente
```

```
      sendMPUData(client, tempo);
```

```
      delay(1);
```

```
    }
```

```
    client.stop();
```

```
  } else {
```

```
    // Se não houver cliente, apenas lê os dados e imprime no
    Serial
```

```
    readMPUData();
```

```
    delay(1);
```

```

}
}

void readMPUData() {
    // Leitura de dados do MPU1
    Wire.beginTransmission(0x68);
    Wire.write(0x3B);
    Wire.endTransmission(false);
    Wire.requestFrom(0x68, 6, true);
    AcX1 = Wire.read() << 8 | Wire.read();
    AcY1 = Wire.read() << 8 | Wire.read();
    AcZ1 = Wire.read() << 8 | Wire.read();

    // Imprime os dados do MPU1 via Serial
    Serial.print(millis()); // Imprimir o tempo atual
    Serial.print(",");
    Serial.print(float(AcX1) / 2048, 4); // Mostra com 4 casas
    decimais
    Serial.print(",");
    Serial.print(float(AcY1) / 2048, 4);
    Serial.print(",");
    Serial.print(float(AcZ1) / 2048, 4);
    Serial.print(",");

    // Leitura de dados do MPU2
    Wire.beginTransmission(0x69);
    Wire.write(0x3B);
    Wire.endTransmission(false);
    Wire.requestFrom(0x69, 6, true);
    AcX2 = Wire.read() << 8 | Wire.read();
    AcY2 = Wire.read() << 8 | Wire.read();
    AcZ2 = Wire.read() << 8 | Wire.read();

    // Imprime os dados do MPU2 via Serial
    Serial.print(float(AcX2) / 2048, 4); // Mostra com 4 casas
    decimais
    Serial.print(",");
    Serial.print(float(AcY2) / 2048, 4);
    Serial.print(",");
    Serial.println(float(AcZ2) / 2048, 4);
}

void sendMPUData(WiFiClient client, unsigned long
tempo) {
    if (client) {
        // Envia os dados do MPU1 para o cliente via Wi-Fi
        client.print(tempo);
        client.print(",");
        client.print(float(AcX1) / 2048, 4);

```

```

client.print(",");
client.print(float(AcY1) / 2048, 4);
client.print(",");
client.print(float(AcZ1) / 2048, 4);
client.print(",");

// Envia os dados do MPU2 para o cliente via Wi-Fi
client.print(float(AcX2) / 2048, 4);
client.print(",");
client.print(float(AcY2) / 2048, 4);
client.print(",");
client.println(float(AcZ2) / 2048, 4);
}

```

2.3. Sistema Industrial LYNX

A fim de obter parâmetros comparativos, com o auxílio da empresa brasileira LYNX Tecnologia [8], realizou-se testes de bancada e dinâmicos para avaliar a eficiência do projeto desenvolvido, haja vista a alta confiabilidade garantida no sistema da empresa por meio de normas nacionais e internacionais, além desta ser fornecedora de equipamentos e fornecedora de serviços para grandes projetos, como o metro de São Paulo.



Figura 6. Equipamento e Acelerômetros da empresa LYNX. Fonte: AUTOR.

Ressalta-se que todos os testes comparativos foram feitos somente nas rodas dianteira do protótipo em função da falta de recursos para obtenção de componentes a serem utilizados nas rodas traseira; entretanto, foi possível realizar a medição com os instrumentos da empresa LYNX nas 4 rodas.

2.4. Pista de Testes

A fim de obter sinais de durabilidade que represente a condição crítica de trabalho do protótipo, conforme citado por Carneiro em 2019 e apresentado

por PIRES. P. M. M. em 2024, foi realizado um percurso de durabilidade na pista de testes oficial da Equipe Komiketo Baja – UFSJ (sendo essa a sede da 16ª competição BAJA SAE Brasil - Etapa Sudeste), representando de maneira fidedigna as condições de pistas de competições nacionais e regionais, as quais o carro é exposto de maneira severa e crítica à obstáculos variados (Figura 6).

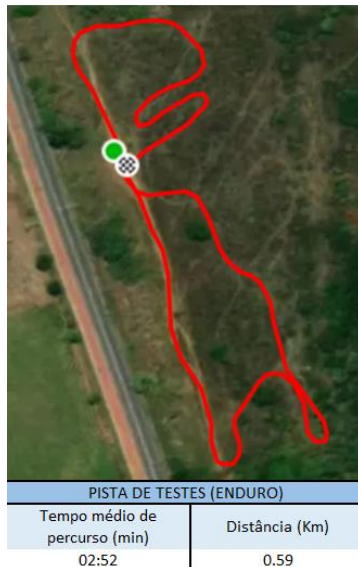


Figura 7. Traçado de uso contínuo (enduro) mapeado em GPS. Fonte: AUTOR.

Diferentemente de carros de linha de produção, protótipos tipo baja não são permitidos circularem por rodovias ou circuitos urbanos, logo, percursos de rua, percursos de mal uso e percursos de dirigibilidade devem ser adaptados para o presente estudo [5]. Sendo assim, considera-se um único percurso de uso contínuo, representando o traçado de enduro de competições, onde será analisado as condições das quais o protótipo é exposto de maneira exclusiva e crítica, isto é, um traçado em terreno de terra com obstáculos acentuados, rampas e valas.

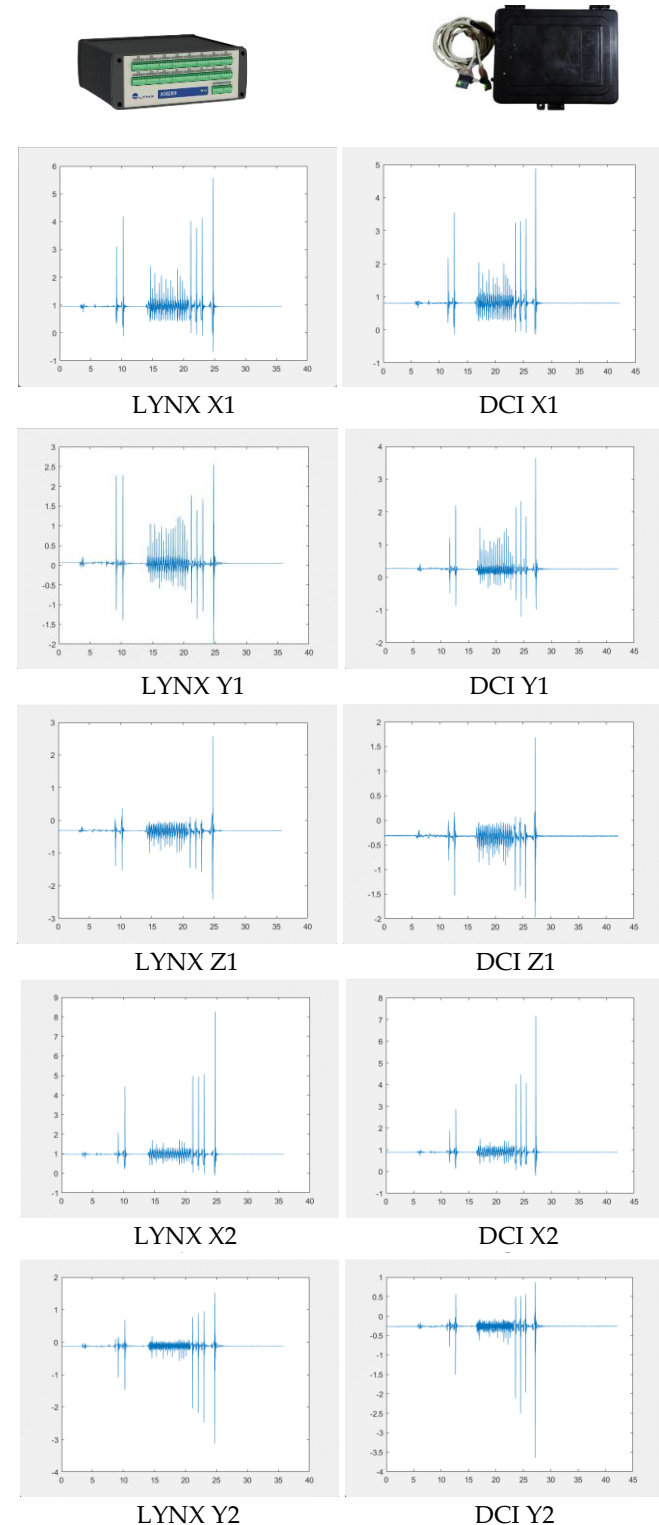
A obtenção de tais carregamentos dinâmicos por meio de sinais ou blocos de durabilidade faz-se fundamental para o projeto de componentes confiáveis e otimizados [5], [7], [12].

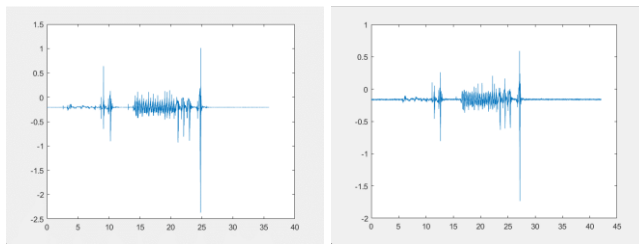
3. Resultados

3.1. Análise Comparativa

Objetivando a validação do sistema de aquisição desenvolvido, DATA-CASE I (DCI), realizou-se testes comparativos em bancada entre o sistema

próprio (DCI) e o sistema de aquisição de dados LYNX ADS2500, este último utilizado para avaliação estrutural profissional de nível industrial [8]. O teste consistiu na aplicação de cargas aleatórias, as quais excitavam o sistema de suspensão do protótipo onde estava localizado os sensores.





LYNX Z2

DCI Z2

Figura 8. Dados de aceleração decomposta separadamente por eixos (X, Y, Z). Fonte: AUTOR.

Resultados comparativos entre os dados captados nas duas rodas dianteiras do protótipo (Figura 8) podem ser visto pela figura 8 acima, as quais comparam os valores obtidos para cada um dos 3 eixos de aceleração (X, Y e Z) de ambos os sistemas de aquisição, mostrando

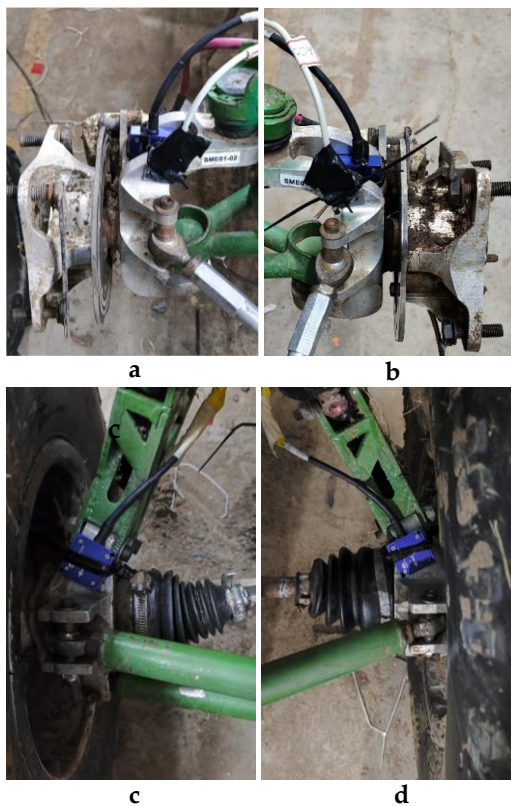


Figura 9. Instrumentação com os sensores nas rodas dianteiras esquerda (a) e direita(b); rodas traseiras esquerda (c) e direita (d). Fonte: AUTOR.

3.2. Blocos de Carregamento

Blocos de carregamentos descrevem de maneira categórica sinais de forças, acelerações, deslocamentos e outros dados obtidos durante um evento no qual se performou determinada análise [5].

3.2.1. Endurance

A seguir, tem-se os dados de blocos de carregamento obtidos durante uma volta na pista de enduro da equipe, representando condições reais de trabalho do protótipo. Conforme ilustrado pelas figuras a seguir e justificado anteriormente, foi possível obter dados de acelerações das 4 rodas somente com os equipamentos da empresa LYNX, já para o sistema de aquisição próprio foi priorizado as duas rodas dianteiras em função da condição crítica de exposição inicial às irregularidades e obstáculos.

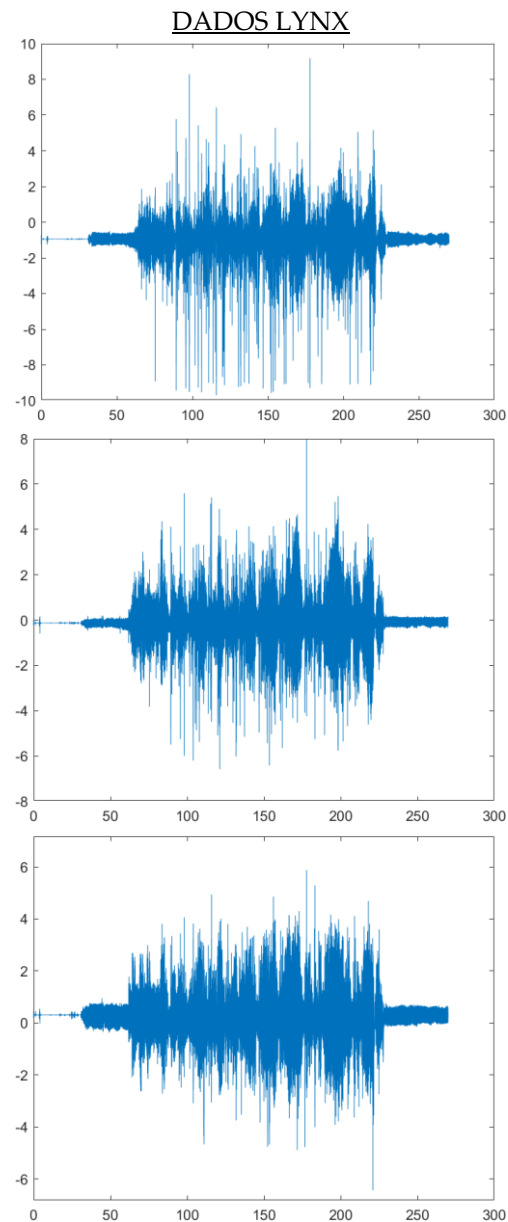


Figura 10. Dados das coordenadas X, Y e Z, respectivamente, do acelerômetro fixado na manga de eixo dianteira direita. Fonte: AUTOR.

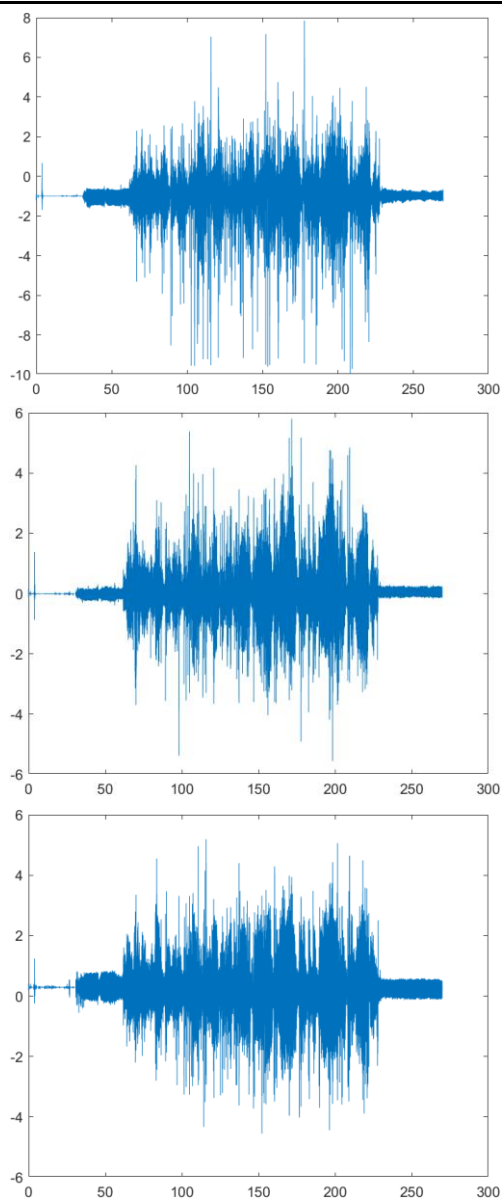


Figura 11. Dados das coordenadas X, Y e Z, respectivamente, do acelerômetro fixado na manga de eixo dianteira esquerda. Fonte: Autor.

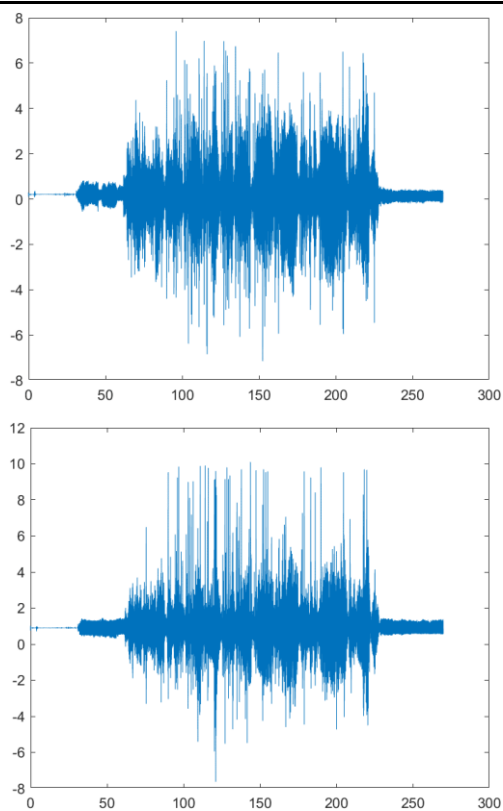
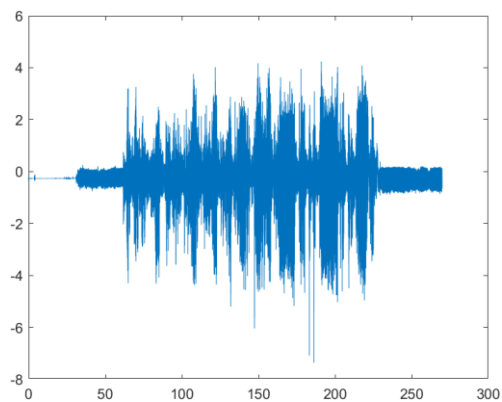
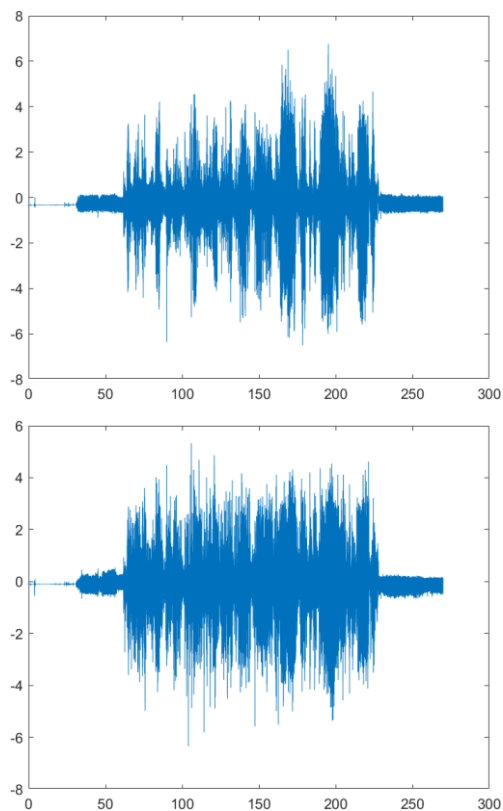


Figura 12. Dados das coordenadas X, Y e Z, respectivamente, do acelerômetro fixado no cubo de roda traseiro direito. Fonte: Autor.



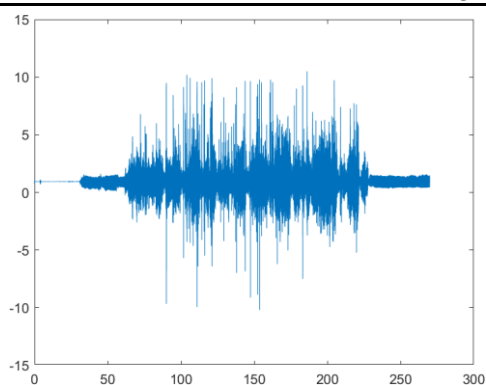


Figura 13. Dados das coordenadas X, Y e Z, respectivamente, do acelerômetro fixado no cubo de roda traseiro esquerdo. Fonte: Autor.

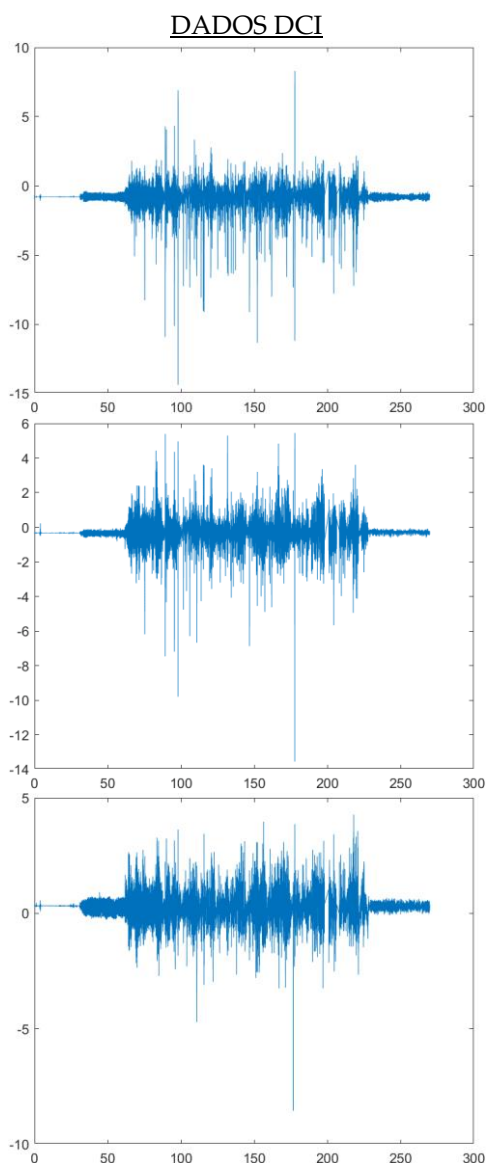


Figura 14. Dados das coordenadas X, Y e Z, respectivamente, do acelerômetro fixado na manga de eixo dianteira direita. Fonte: Autor.

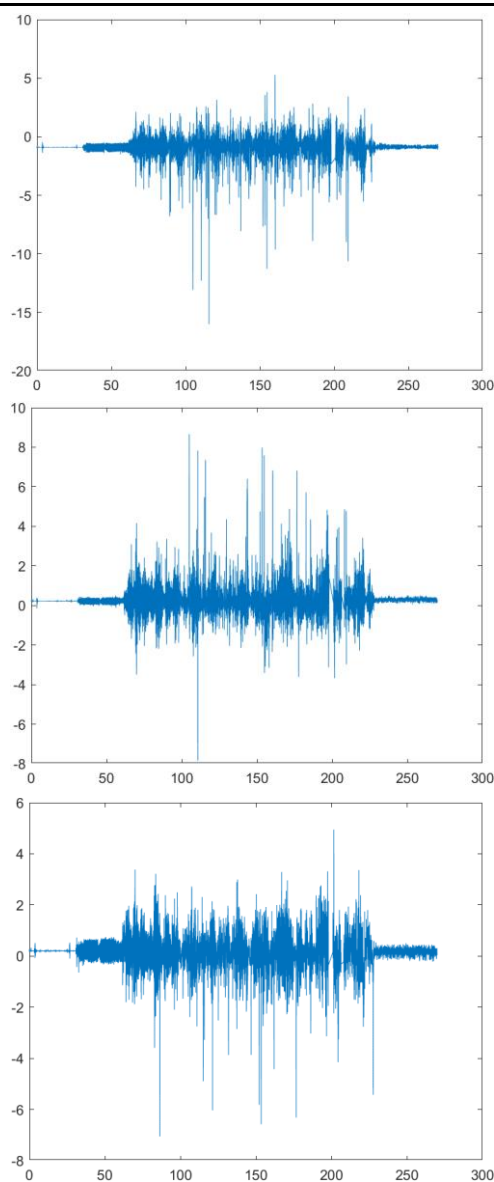


Figura 15. Dados das coordenadas X, Y e Z, respectivamente, do acelerômetro fixado na manga de eixo dianteira esquerda. Fonte: Autor.

4. Conclusões

- Acelerômetros são sensores extremamente precisos e com alto potencial de aplicabilidade em projetos de componentes mecânicos, haja vista sua capacidade de mapeamento do comportamento de todo o sistema.
- Resultados mostram a viabilidade de desenvolvimento e acuracidade do sistema desenvolvido através do microcontrolador ESP32, o qual apresenta excelente custo benefício e precisão nos dados captados, sendo cerca de 830% mais barato que o sistema industrial LYNX utilizado para efeitos comparativos

- O alto custo do sistema da empresa LYNX se justifica categoricamente por ser um módulo industrial, com software próprio, e inúmeras aplicações além de apenas captação de aceleração, como utilização de strain gages, termopares, monitoramentos complexos e outros.
- Os dados captados mostraram satisfatoriedade quando comparados com trabalhos anteriores discurridos sobre tal área, como feito por Cunningham, M. (2019) e Pereira (2019), sendo estes de extrema importância para a equipe de competição KomiKeto Baja UFSJ, contribuindo para a evolução desta por meio de projetos ainda mais confiáveis e otimizados.
- Comparando ambos sistemas, conclui-se a confiabilidade no sistema de baixo custo desenvolvido, haja vista a mínima diferença nos dados captados, em torno de 6% entre os valores de pico (máximos), quando comparado ao sistema industrial LYNX.
- Tem como objetivos futuros a continuidade de trabalhos voltados ao tema abordado, visando a implementação de mais sensores a fim de monitorar diversas outras partes do protótipo para ampliar ainda mais a captação de dados dinâmicos oriundos das diversas fontes de vibração existentes devido ao contato pneu-solo do veículo.

5. Agradecimentos

Discorre-se por meio deste trabalho os mais sinceros agradecimentos à empresa brasileira LYNX TECNOLOGIA, a qual permitiu que todo o estudo e desenvolvimento de tal temática se tornasse possível por meio do fornecimento de equipamentos e suporte técnico.

À Equipe KomiKeto Baja por inspirar tal trabalho.

À Universidade Federal de São João del Rei.

À todas pessoas e parentes que auxiliaram no desenvolvimento desse trabalho por meio de apoio financeiro e/ou físico.

Referências

- [1] Albert Paul Malvino, & Bates, D. J. (2007). *Electronic Principles*. McGraw-Hill Higher Education.
- [2] Arduino. (2018). *Arduino*. Arduino.cc. <https://www.arduino.cc/>
- [3] Batista, Marco Túlio B. (2019). Criação de um Bloco Virtual Padrão de Cargas para Avaliação de Fadiga do Veículo, Isodano com Provas Exeperimentais de Durabilidade para Chassis e Carroceria. *Repositorio.ufmg.br*. <http://hdl.handle.net/1843/32630>
- [4] Beckwith, T. G., Marangoni, R. D., & Lienhard, J. H. (1993). *Mechanical Measurements*. Prentice Hall.
- [5] Carneiro, G. C. (2019). Desenvolvimento de metodologia para otimização dinâmica e estrutural de suspensão veicular traseira do tipo eixo de torção. *Repositorio.ufmg.br*. <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/34906>
- [6] Cunningham, M. (2019). Finite Element Model Validation and Testing of an Off-Road Vehicle under Dynamic Loading Conditions. *Doctoral Dissertations and Master's Theses*. <https://commons.erau.edu/edt/444/>
- [7] LEE, Y.-L., Barkey, M. E., & Kang, H.-T. (2011). *Metal Fatigue Analysis Handbook*. Elsevier.
- [8] *Lynx Tecnologia*. (n.d.). *Www.lynxtec.com.br*. <https://www.lynxtec.com.br/>
- [9] Mixed-signal and digital signal processing ICs | Analog Devices. (2019). *Analog.com*. <https://www.analog.com/en/index.html>
- [10] *MPU-6050 | TDK*. (n.d.). <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/>
- [11] *News*. (2022). *Memsnet.org*. <https://www.memsnet.org/news/>
- [12] Norton, R. L. (2011). *Machine design: an integrated approach*. Prentice Hall.
- [13] PEREIRA, Luiz Felipe Moraes. Aplicação de extensometria a suspensão de protótipo de fórmula SAE com auxílio de análise por elementos finitos. 2019. 107 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- [14] Roy, N., Scheiblegger, C., Darling, J., & Pfeffer, P. (2017). Durability Loads Prediction of Body-on-Frame Vehicles using Full Vehicle Simulations. *SAE International Journal of Passenger Cars. Mechanical Systems*, 10(1), 13–24. <https://doi.org/10.4271/2017-01-9675>
- [15] Straub, M. G. (2021, October 25). *Multiplexador I2C – Controle até 64 Sensores com ESP32*. Blog Usinainfo. <https://www.usinainfo.com.br/blog/multiplexador-i2c-com-bmp280-controle-ate-64-sensores-atraves-do-esp32/>