



Universidade Federal do Paraná

**Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Manufatura**



NEIL HISLOP

**COMUNICAÇÃO INSTANTÂNEA NÃO INVASIVA VIA
MONITORAMENTO VIBRACIONAL**

**CURITIBA
2020**

NEIL HISLOP

**COMUNICAÇÃO INSTANTÂNEA NÃO INVASIVA VIA
MONITORAMENTO VIBRACIONAL**

Relatório técnico apresentado como resultado parcial à obtenção do grau de especialização em Engenharia de Manufatura. Curso de Pós-graduação em Engenharia Industrial 4.0, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Pablo Deivid Valle

**CURITIBA
2020**



PROJETO DE COMUNICAÇÃO INSTANTÂNEA NÃO INVASIVA VIA MONITORAMENTO VIBRACIONAL

Neil Hislop

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Departamento de Engenharia Mecânica

Avenida Coronel Francisco Heráclito dos Santos, S/N

Bloco IV do Setor de Tecnologia, Centro Politécnico (Campus III)

Bairro Jardim das Américas, Curitiba, PR

CEP 81531-980

neilhislop@gmail.com

Resumo. Este relatório apresenta os resultados do estudo de um projeto não invasivo e seu desenvolvimento, de modo a fornecer uma ferramenta de comunicação instantânea, M2M (Machine to Machine), composto por um dispositivo eletrônico de baixo custo e uma plataforma digital para o monitoramento de equipamentos industriais e o fornecimento de informação em tempo real. Assim, por meio do monitoramento de vibração, o estado operacional de equipamentos industriais é disponibilizado ao usuário por intermédio de um aplicativo móvel. O público-alvo são pequenas empresas que possuem limitações em recursos e investimentos para a digitalização de informação. Para tanto, foi utilizado o modelo de MVP (Minimum Viable Product), no qual o produto foi desenvolvido para validar o conceito antes de realizar grandes investimentos. Dentro desse modelo de aprendizagem, foi possível construir, medir e aprender sobre o MVP a fim de perseverar com a ideia ou pivotar, caso o produto fosse um fracasso. Logo, constituiu-se de um estudo experimental, com análise quantitativa. De acordo com os dados coletados e analisados, o estudo revelou-se factível dentro de seu escopo inicial, porém, apenas para aplicações específicas, o que se tornou um fator limitante para ser um produto ubíquo.

Palavras chave: M2M – Machine to Machine. Não invasivo. Comunicação instantânea. Baixo custo. MVP – Minimum Viable Product.

1. INTRODUÇÃO

Com a chegada da denominada Quarta Revolução Industrial ¹, sistemas de manufatura convencionais e produtos são transformados em ecossistemas digitais. Dentro dessa transformação, sistemas de IoT (*Internet of Things*) são considerados como pontos-chave para a digitalização de máquinas e processos na geração de informação e nas tomadas de decisões operacionais (SCHWAB, 2016).

De acordo com uma pesquisa realizada pelo *Morgan Stanley Investment Banking Company* em 2015 e pela revista *Automation World* (MORGAN STANLEY, 2016), a melhoria da eficiência operacional e da produtividade são os fatores empresariais mais críticos entre os fabricantes que adotam soluções de IIoT (*Industrial Internet of Things*). Os mesmos estudos revelaram que há nove desafios para se adquirir novas tecnologias atreladas a IIoT, no entanto, a mais relevante para esse estudo relaciona-se ao alto nível de investimento inicial necessário para a sua implementação (id., 2016).

Por outro lado, ao analisar o impacto financeiro que aplicações de IIoT podem gerar na indústria, uma pesquisa feita pela *McKinsey Global Institute* (2015) apontou para um ganho econômico potencial de US\$1.2 a US\$3.7 trilhões por ano. As áreas que mais se beneficiam dessas tecnologias são as de produtividade, com ganhos em torno de 10% a 25%.

Diante desse quadro, torna-se relevante atentar para a necessidade de as empresas agregarem preparo financeiro, tecnológico e operacional para darem conta de adotarem tecnologias IoT e, assim, tornarem-se mais competitivas e condizentes com as tendências mercadológicas atuais.

¹ Ao permitir “fábricas inteligentes”, a quarta revolução industrial cria um mundo onde sistemas físicos e virtuais de fabricação cooperam de forma global e flexível. Isso permite a total personalização de produtos e a criação de novos modelos operacionais. A quarta revolução industrial, no entanto, não diz a respeito apenas a sistemas e máquinas inteligentes e conectadas. Seu escopo é muito mais amplo.

1.1. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho é apresentar uma solução, por meio do uso de hardware, baseado em plataformas de prototipagem de baixo custo, com o intuito de monitorar o estado operacional de equipamentos e/ou máquinas dentro de uma área industrial produtiva recorrendo à leitura vibracional não invasiva. Este dispositivo enviará o estado operacional coletado para um servidor remoto a ser acessado por intermédio de um aplicativo em um dispositivo móvel em tempo real.

Os objetivos específicos são:

- Apresentar as vantagens da implementação de um projeto em IoT nas empresas selecionadas, de modo a digitalizar a obtenção de informações referentes ao estado operacional de equipamentos no chão de fábrica;
- Acelerar o acionamento da cadeia de ajuda por meio do uso do aplicativo e;
- Aumentar o rendimento operacional dos equipamentos que possuem o dispositivo instalado.

1.2. JUSTIFICATIVA

Por meio de pesquisa realizada pela Federação Industrial SENAI (FIESP, 2018), dentre 227 empresas entrevistadas (55% pequenas, 30% médias e 15% de grande porte) e questionadas sobre o conhecimento delas acerca do conceito de Indústria 4.0, constatou-se que 32% desses empreendimentos não tinham conhecimento sobre o conceito. Esses dados permitem atentar para a disseminação de conhecimento sobre essa tecnologia e observar que os dispositivos autônomos são importantes para o avanço da indústria, eles indicam também que há pouco movimento na indústria brasileira no que diz respeito à adoção de tais tecnologias e conceitos.

Os maiores setores beneficiários são: *“produção (55%), controle da produção (50%), rastreabilidade (38%), controle de qualidade (32%), planejamento (31%) e engenharia de desenvolvimento de novos produtos (31%). As grandes empresas destacaram manutenção (34%) e suporte a clientes (31%).”*

A pesquisa também constatou empresas que já estavam implementando, ou planejando projetos para a Indústria 4.0. *“As tecnologias-alvo apontadas pelas empresas foram análise de big data (21%), monitoramento e controle remoto da produção (15%), digitalização (12%) e robótica (11%).”*

Isto posto, as empresas que adotam medidas de concretizar novas tecnologias e/ou implementar dispositivos autônomos compreendem o valor agregado como consequência de investimento.

O estudo aponta que o grau de investimento necessário é um grande obstáculo enfrentado, tanto para equipamentos físicos, quanto a mão de obra treinada para dominar esta nova tecnologia. Desse modo, as empresas buscam a relação custo benefício, o que enfatiza ainda mais a necessidade de criar produtos de baixo custo e que agregam valor à cadeia produtiva.

De acordo com a experiência do autor deste estudo e conforme os resultados obtidos neste trabalho, identificou-se uma lacuna de mercado na qual os empreendimentos industriais com recursos financeiros limitados buscam tecnologias que possam preenchê-los.

2. METODOLOGIA

A empresa escolhida para esta pesquisa localiza-se no município de São José dos Pinhais, na cidade de Curitiba. É uma empresa de médio porte e atua no setor automotivo para fornecimento de peças plásticas injetadas desde 1999.

A empresa concentra aproximadamente trezentos e cinquenta funcionários que atendem as necessidades de nove departamentos principais, nomeadamente: a produção, comercial, financeiro, compras, engenharia de produto e processos, qualidade, logística e manutenção. A atividade principal da empresa é a injeção de polímeros termoplásticos e, além de aplicar tecnologias de soldadura, corte e montagem para peças automotivas, possui processos de acabamento final como colagem e pintura. Os principais clientes são montadoras de veículos nacionais e internacionais com ênfase em vendas para atender a região de Curitiba. A Figura 1 apresenta a gama de produtos da empresa.

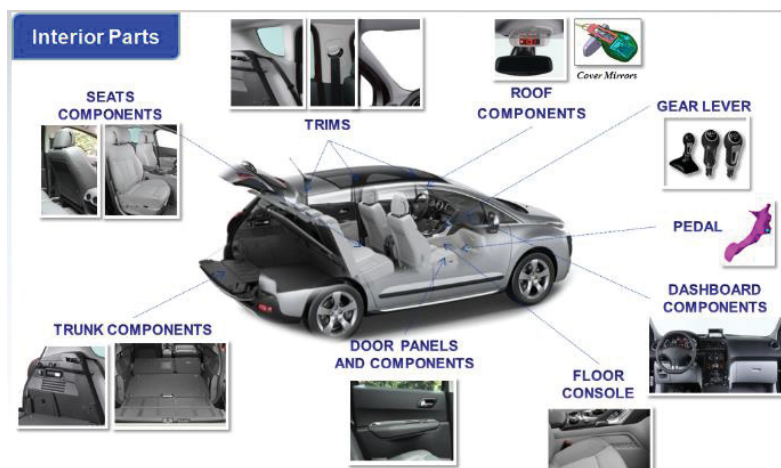


Figura 1. Exemplo de peças interiores.
Fonte: <<http://www.simoldes.com/plastics>>

A metodologia adotada para confecção deste trabalho está dividida em pesquisa bibliográfica e experimental. Esta para validar os ensaios realizados dentro do ambiente de plataformas de prototipagem eletrônica de hardware livre e código aberto. O presente estudo ancora-se em Ries (2012, p.7), pois, segundo o autor, existem cinco princípios da startup enxuta.

- 1.[...] a abordagem da *startup* enxuta pode funcionar em empresas de qualquer tamanho, mesmo numa de grande porte, em qualquer setor ou atividade.
2. Empreender é administrar. Uma *startup* é uma instituição, não um produto, assim, requer um novo tipo de gestão, especificamente constituída para seu contexto de extrema incerteza.
3. Contabilidade para inovação. A fim de melhorar os resultados do empreendedorismo e poder atribuir responsabilidades aos inovadores, precisamos focar também em assuntos menos interessantes: como medir o progresso, definir marcos e como priorizar o trabalho.
4. Aprendizado validado. Startups existem não apenas para fabricar coisas, ganhar dinheiro ou mesmo clientes. Elas existem para *aprender* a desenvolver um negócio sustentável. Essa aprendizagem pode ser validada cientificamente por meio de experimentos frequentes que permitem aos empreendedores testar cada elemento de sua visão.
5. Construir-Medir-Aprender. A atividade fundamental de uma *startup* é transformar ideias em produtos, medir como os clientes reagem, e, então, aprender se é o caso de pivotar ou perseverar. Todos os processos de startup bem-sucedidos devem ser voltados a acelerar esse ciclo de *feedback*.

O método de *startup* enxuta engloba conceitos fundamentais para a melhoria contínua do desenvolvimento de um produto e/ou ideia. Assim, o embasamento entendido e explorado na teoria de Ries (2012) foi de construir o produto, testá-lo e minimizar a curva de aprendizagem. “*Para ser bem-sucedido, é necessário desenvolver o teste de suposições fundamentais de valor e crescimento utilizando produtos viáveis mínimos (MVPs), bem como a otimização do produto por meio de testes, de contabilidade para a inovação e de métricas adequadas para medir a evolução. Caso a estratégia e produto estejam no caminho certo perseveraremos, ao contrário é necessário pivotar.*”

Dentro da Universidade Federal do Paraná (UFPR) foi sediado o evento conhecido como *Pitch Day*, no qual a ideia deste estudo foi apresentada a uma banca de profissionais composta por convidados da UFPR de diversos ramos de atuação industrial e de serviços no sul do Brasil. A apresentação foi realizada em menos de sete minutos pelo autor e sua equipe, logo após foi aberta uma discussão para dar retorno sobre a viabilidade técnica, financeira e possíveis melhorias. O foco principal desse evento foi o de fomentar ideias novas sob as que foram apresentadas, fazer acompanhamento da evolução do projeto nos encontros subsequentes e tratar a questão principal, isto é, se deveria perseverar ou pivotar.

3. HIPÓTESE DE SOLUÇÃO

O projeto nomeado EYERIS² foi desenvolvido de acordo com o diagrama exposto na Fig. 2. Diante disso, a vibração criada pelas máquinas industriais em operação foi mensurada pelo sensor MPU-6050, composto de sistemas micro eletromecânicos (MEMS) que contêm um acelerômetro e um giroscópio, ambos de 3 eixos. Essa vibração mecânica é convertida em sinais digitais e comunicada ao micro controlador ESP8266, que executa o algoritmo para determinar o resultado e realizar a comunicação via rede WIFI. A informação é enviada para os servidores da *Blynk* por intermédio da rede WIFI instalada na fábrica e acessada pelo aplicativo desenvolvido com o próprio software do servidor.

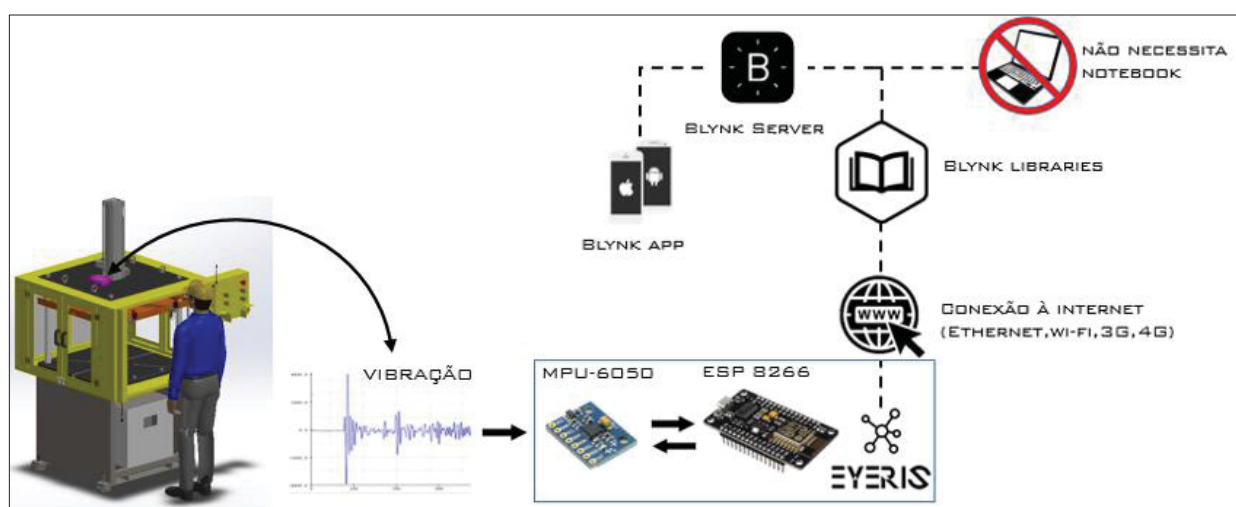


Figura 2. Diagrama do sistema.
Fonte: Adaptado do site <<https://docs.blynk.cc/>>

3.1. COLETA DE DADOS, TRANSMISSÃO E PROCESSAMENTO

Nesta seção serão abordadas as tecnologias utilizadas no desenvolvimento do presente projeto.

3.1.1. SENSOR - Acelerômetro + Giroscópio MPU 6050 (Placa GY-521)

Neste item será apresentado o sensor utilizado para a concepção do *MVP*.

Segundo Rao (2011), a maioria das máquinas produz baixos níveis de vibração quando projetadas adequadamente. Durante o seu funcionamento, todas as máquinas estão sujeitas à fadiga, ao desgaste, à deformação e ao assentamento de fundações. O referido autor explica que há seis maneiras principais de monitorar a condição de uma máquina, elas podem ser de forma auditiva, visual, variações operacionais, temperatura, fragmentos de desgaste e por vibração. O monitoramento por vibração pode ser dividido em três categorias: domínio de tempo, domínio de frequência e domínio de *que-frency*, também conhecido como “*cepstrum*”. A Figura 3 exemplifica o sinal de aceleração de uma caixa de redução.

² O projeto ganhou o nome EYERIS, adaptado do nome da deusa grega Íris. Íris era a mensageira dos deuses para os seres humanos.

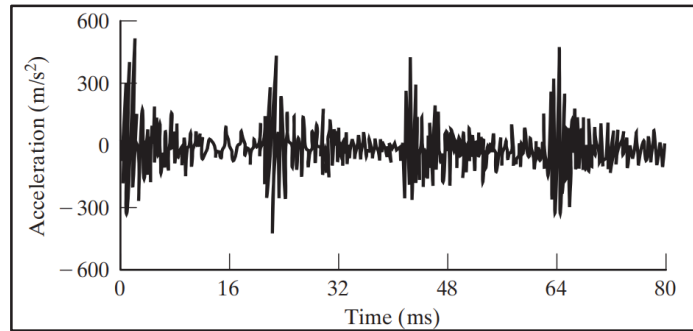


Figura 3. Domínio de tempo de uma caixa de redução.
(Rao, 2011)

Com o embasamento do autor supracitado, a maioria das máquinas industriais são utilizadas para transformar matéria-prima em produtos e utilizam motores elétricos, sistemas pneumáticos ou hidráulicos para criar a inércia necessária para executar o processo. Portanto, o movimento mecânico pode ser considerado com variações de vibração em escalas distintas. Neste estudo, o domínio de tempo foi utilizado para monitorar o funcionamento de máquina.

De acordo com Lee (2011 citado por TORRES, 2020), em concordância com o tipo de mecanismo de sensibilidade e as grandezas a serem mensuradas, transdutores podem ser mecânicos, térmicos, magnéticos, químicos ou de radiação.

Para Torres (2020), talvez os mais famosos sejam os que efetuam a função de sensores mecânicos, como o acelerômetro, que é capaz perceber variações de aceleração.

A Figura 4 mostra as principais aplicações dos acelerômetros em relação à largura de banda de trabalho e ao alcance dinâmico de aceleração (KRAFT, 2000). Pode-se interpretar que um acelerômetro com menor alcance de medição tem uma sensibilidade maior.

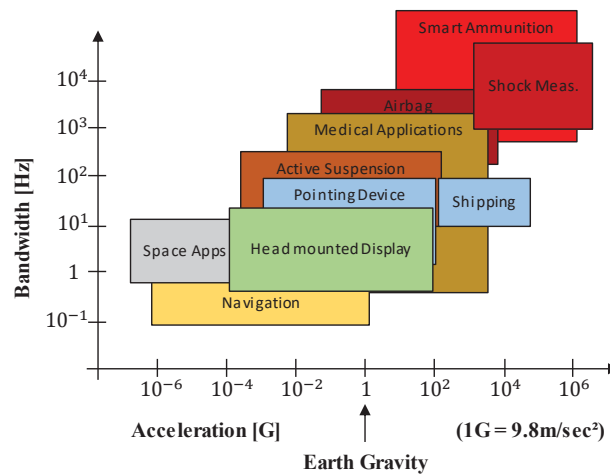


Figura 4. Aplicações do acelerômetro
Adaptado de Kraft (2000)

O chip MPU-6050 possui três eixos de medição para aceleração X, Y e Z, cada uma captura dados de aceleração de alta precisão devido ao conversor analógico digital de 16-bits. Por meio da tecnologia MEMS, quando o MPU-6050 é exposto à vibração mecânica, o transdutor mecânico embutido transforma as variações de aceleração em sinais digitais proporcionais. Estes sinais digitais são enviados ao micro controlador ESP8266 pelo protocolo serial I²C (*Inter Integrated Circuit*), capaz de atingir uma velocidade máxima de transferência de 400kHz. Um sensor de temperatura acompanha o chip e permite medições entre -40 a +85°C e o próprio oscilador de quartzo possui uma acurácia de ±1%, de acordo com a variação de temperatura do CI. O chip GY-521 possui um regulador de tensão de 5V e um LED para indicar o funcionamento. Dependendo da sua aplicação, a faixa de sensibilidade do acelerômetro pode ser configurada de ±2 a ±16g.

A Figura 5 mostra a placa GY-521 com o chip MPU-6050 montado (esquerda), o encapsulamento (centro) e a orientação dos eixos de sensibilidade com suas respectivas polaridades de rotação (direita).

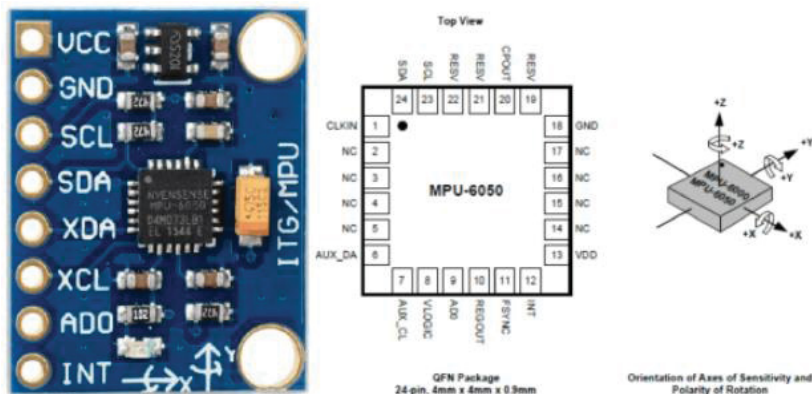


Figura 5. Placa GY-521 com sensor MPU-6050.
(Ganiga, 2019)

Tabela 1. Características da placa GY-521 com sensor MPU-6050
Adaptada de Components101 (2018)

Identificação do pino	Configuração	Dados
VCC	Alimentação	3V a 5V
GND	Barramento	0V
SCL	I2C Pulso Serial	-
SDA	I2C Dados de Escravo	-
XDA	I2C Dados de Mestre (sensor auxiliar)	-
XCL	I2C Pulso Serial de Mestre (sensor auxiliar)	-
AD0	Endereço I2C	-
INT	Interrupção	-

Neste estudo, as máquinas industriais que foram consideradas para receber o sistema de monitoramento conhecido como EYERIS são classificadas como injetoras de termoplástica, prensas pneumáticas ou hidráulicas e dispositivos de montagem, que possuem movimentos pneumáticos. Essas máquinas possuem ciclos entre 10 e 60 segundos, portanto, possuem cadências baixas com grandes paradas entre cada ciclo de operação.

O sensor permite a configuração de quatro fatores de escalas de sensibilidade de ± 2 , ± 4 , ± 6 , ± 8 , $\pm 16g$, com sinais de aquisição para cada escala, sendo de 16384, 8192, 4096 e 2048 LSB/g, respectivamente. Como o objetivo foi detectar o ciclo de operação das máquinas, a aceleração sofrida não precisaria de um parâmetro de escala maior que $\pm 2g$, com 16384 pontos de resolução, logo, esta foi a configuração escolhida do MPU-6050.

3.1.2. PROTOCOLO - I²C (Inter Integrated Circuit)

Neste item será apresentado o protocolo responsável para transmissão de dados coletados do MPU-6050.

Este protocolo serial é composto de uma interface de dois fios para conectar dispositivos de baixa velocidade como micro controladores, memória (EEPROM), conversores A/D e D/A, interfaces I/O e outros periféricos similares em sistemas embarcados. Foi inventado pela Philips e utilizado pelos grandes fabricantes de circuitos integrados. Cada dispositivo escravo I²C precisa de um endereço, o qual ainda é obtido junto a NXP (antiga *Philips semiconductors*).

De acordo com a ficha de especificação (INVENSENSE, 2013), a comunicação I²C requer apenas duas linhas para o seu funcionamento, sendo SCL (*serial clock*) e SDA (*serial data*), limitada a velocidade de transferência máxima de 400kHz. O endereço padrão alocado para a placa GY-521 é 0X68 ou b1101000 (em binário) e sempre atua como escravo na linha de comunicação. Ambas as linhas exigem dois resistores de *pull-up* conectados à tensão VCC, conforme Fig. 6.

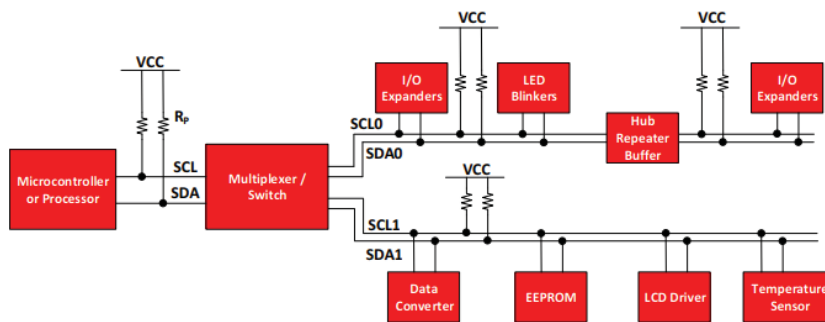


Figura 6. Exemplo de I²C Bus.
(Valdez, 2015)

O esquemático na Figura 7 apresenta a ligação interna da placa GY-521, que inclui o regulador de tensão, a ligação do pino AD0, que é responsável pela definição do endereçamento do CI no protocolo I²C. Se mantiver este pino desligado, o endereço do MPU-6050 mantém o valor 0X68 e, quando estiver conectado a uma tensão de 3.3V ou 5V, muda para 0X69. De acordo com as exigências do protocolo I²C, a imagem mostra também a ligação interna dos resistores *pull-up* (canto superior a direita).

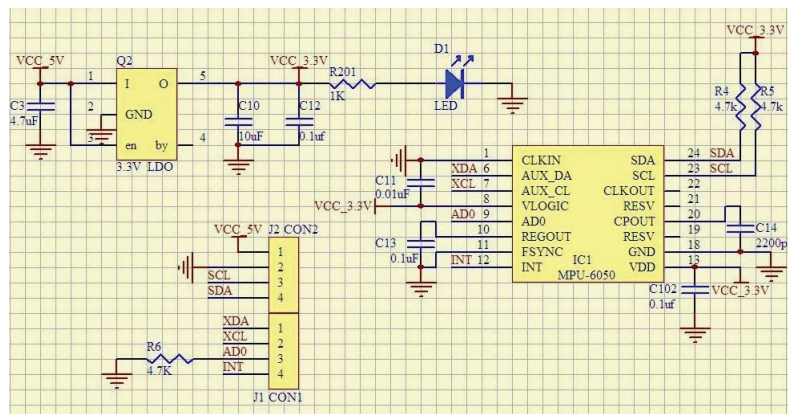


Figura 7. Esquemático da placa GY-521
(Allen, 2017)

Tabela 2. Características do módulo ESP8266 NodeMCU ESP12-E
Adaptada de Espressif Systems - ESP8266EX Datasheet (2015)

Categorias	Características	Dados	
Parâmetros de wifi	Certificados	FCC/CE/TELEC/SRRC	
	Protocolos de wifi	802.11 b/g/n	
	Gama de frequência	2.4G-2.5G (2400M-2483.5M)	
	Potência Tx		802.11 b: +20 dBm
			802.11 g: +17 dBm
			802.11 n: +14 dBm
Sensibilidade Rx		802.11 b: -91 dbm (11 Mbps)	
		802.11 g: -75 dbm (54 Mbps)	
		802.11 n: -72 dbm (MCS7)	
	Tipos de antena	PCB, Externo, Conector IPEX, Chip Cerâmico	
Parâmetros de hardware	Processador	Tensilica L106 32-bit (RISC)	
	Velocidade de clock	80MHz (máx. 160MHz)	
	Tensão de operação	3.0~3.6V	
	Tensão de entrada	4,5 ~ 9V	
	Corrente de operação	80mA	
	Temperatura de operação	-40°~125°	
	Encapsulamento do chip	QFN 32 (5x5mm)	
	Pinos GPIO	11	
	Corrente contínua por pino I/O	12mA	
	Transmissão de dados	UART / HSPI / I2C / I2S / Ir Remote Control / GPIO / PWM	
	Taxa de transferência	110-460800bps	
	Conversor analógico digital (ADC)	10bit	
	SRAM	32kB	
	SPI FLASH	Típico: 512kB - 4Mb, Máx.: 16Mb	
Parâmetros de software	Modo WIFI	station/softAP/SoftAP+station	
	Segurança	WPA/WPA2	
	Criptografia	WEP/TKIP/AES	
	Atualização de firmware	UART Download / OTA (via network)	
	Protocolos de rede	IPv4, TCP/UDP/HTTP/FTP	
	Configuração pelo usuário	Comandos AT, Servidor nuvem, Android/iOS App	

3.2. SOFTWARE – Algoritmo de detecção de operação

Para realizar a detecção correta do evento, em que a vibração do equipamento industrial corresponde ao ciclo de operação, é necessário entender como os dados do sensor são representados ao longo de um período determinado. Os dados capturados pelo sensor podem apresentar variações positivas ou negativas de acordo com o tipo de sensor no caso da Fig. 10, uma saída discreta⁴, que representa uma mudança de sinal digital⁵ de 0V a 5V. Neste caso, a detecção de pico do sinal torna-se objetiva, porque o valor permanece positivo ou negativo para um período e não há posições intermediárias.

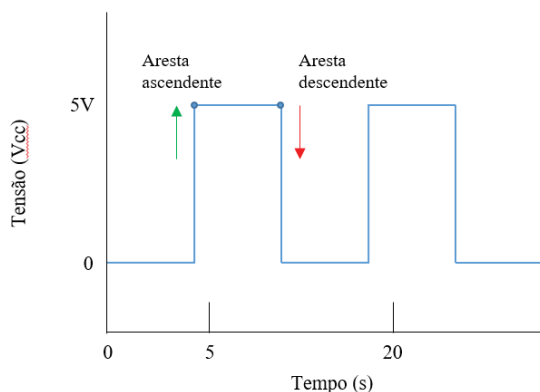


Figura 10. Exemplo de um sinal digital com aresta ascendente e descendente.
(Autor, 2020)

Por outro lado, a vibração observada em sinais analógicos⁶ apresenta mais dificuldade para detectar o momento em que a máquina inicia seu ciclo, pois os sinais podem possuir oscilações bruscas, tanto negativas quanto positivas, entre o ponto máximo (vértice) e o ponto mínimo, de acordo com o movimento do equipamento que está sendo mensurado. Por exemplo, a Fig. 11, inicialmente, apresenta um sinal ascendente, logo após; um vértice falso que representa ruído na leitura, depois mostra o vértice real e, em seguida, o sinal desce novamente.

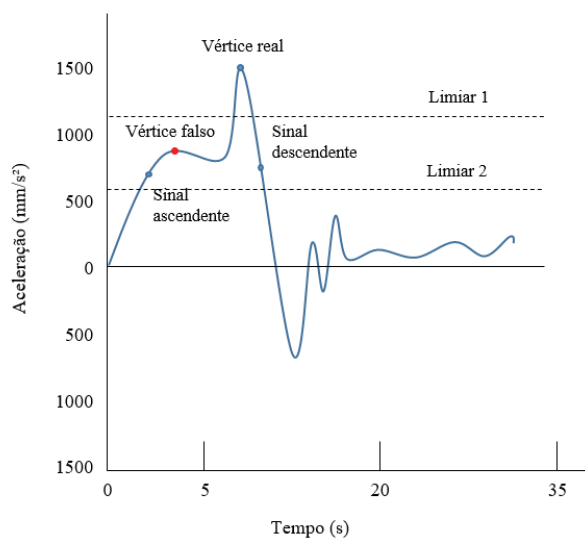


Figura 11. Gráfico de vértices locais
(Autor, 2020)

⁴ Discrete – Separated into distinct segments or pieces. A series of discontinuous values. (DUECK, 2005).

⁵ Digital – a way of representing a physical quantity by a series of binary numbers. A digital representation can have only specific discrete values (DUECK, 2005).

⁶ Analog – a way of representing some physical quantity, such as temperature or velocity, by a proportional continuous voltage or current. (DUECK, 2005).

Com base em Rao (2011), os equipamentos industriais possuem intervalos entre movimentos e paradas, interpreta-se que também há momentos distintos em que a vibração apresentaria um ponto máximo de vibração durante seu ciclo. O objetivo do algoritmo é a detecção desse ponto máximo. Sendo assim, por meio do uso de linhas limiar é possível excluir sinais de vibração considerados como “ruído” e afinar o algoritmo para detectar o momento desejado, o vértice real.

Na Figura 12, o fluxograma apresenta o algoritmo utilizado neste estudo. O programa começa com a inicialização das variáveis, bibliotecas e endereços do MPU-6050 de acordo com o protocolo I²C. Depois disso, a rotina de *setup()* inicializa a comunicação serial em 115200 baud, além da calibração do sensor MPU-6050.

Em seguida, a função *loop()* executa o resto do código de forma repetitiva enquanto a placa estiver alimentada. Nesta função, cada ciclo de busca e execução realiza a comparação entre a leitura atual do MPU-6050, o limiar e a leitura anterior. Ao determinar se o valor atual está maior do que o valor registrado no ciclo anterior, o pico da vibração é identificado. Enquanto essa comparação é feita, o código⁷ também determina o tempo percorrido entre atualizações do aplicativo para avisar ao usuário sobre a parada identificada, apresentado na Fig. 12.

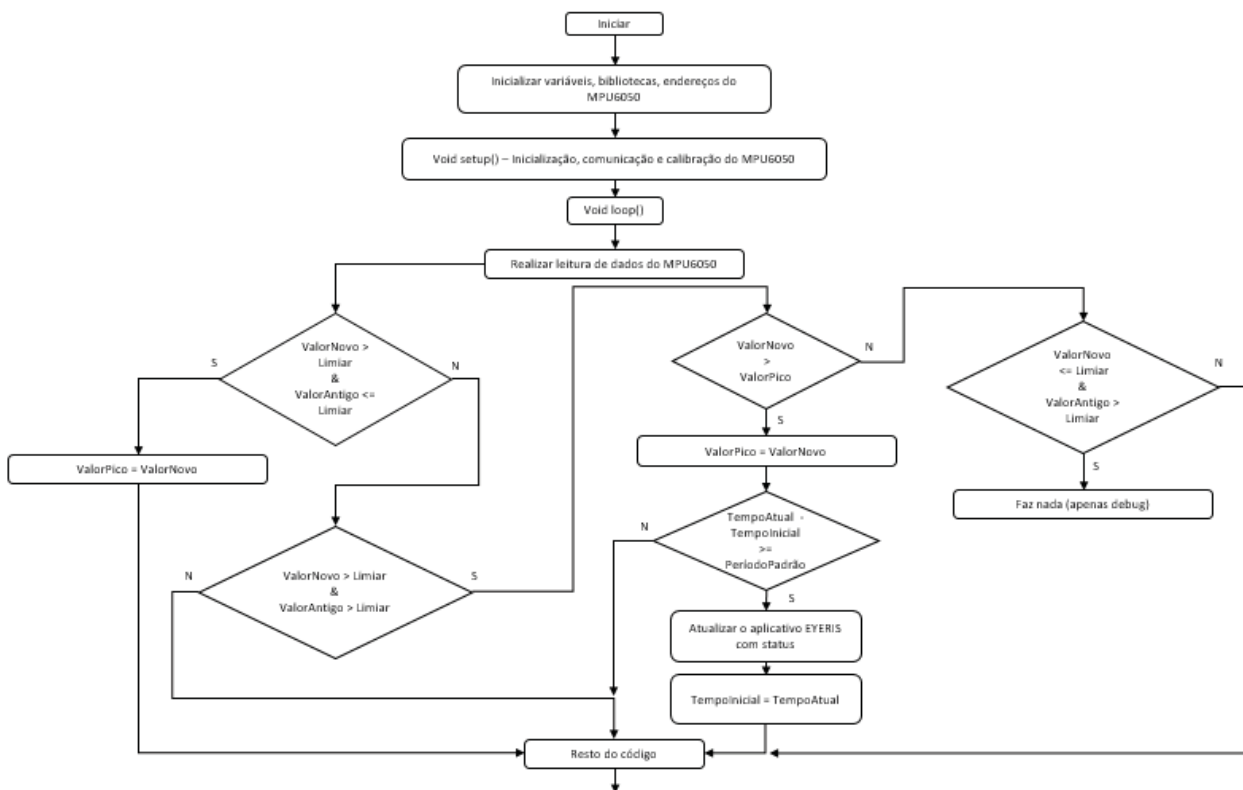


Figura 12. Fluxograma do algoritmo de detecção de vértice.
(Autor, 2020)

⁷ No momento da escrita deste relatório, o aplicativo não estava finalizado, então não foi possível verificar o código responsável pela atualização de estado operacional do equipamento.

3.3. VISUALIZAÇÃO DO ESTADO DOS EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS

Nesta seção serão abordadas as tecnologias utilizadas para a visualização da informação.

3.3.1. *HARDWARE - Smartphone*

Como supracitado no objetivo geral deste estudo, o foco do projeto EYERIS e seu sucesso têm uma correlação direta a viabilidade econômica para o usuário, portanto demanda hardware de baixo custo com uso intuitivo para visualizar o estado operacional dos equipamentos industriais. A prevalência dos dispositivos móveis permite um grande potencial por ser a interface física padrão para aplicações de computação ubíquas⁸, assim, dispositivos móveis como *smartphones* e *tablets* são ideais para essa finalidade devido a sua simplicidade e alta penetração no mercado digital.

3.3.2. *SOFTWARE - O aplicativo*

O *Blynk* é um aplicativo disponível para Android e iOS que disponibiliza ao usuário a possibilidade de criar aplicações que interatuam com diversos tipos de hardware, especificamente projetado para soluções de IoT. Por intermédio do próprio aplicativo, o usuário pode inserir *widgets* que permitem funções de controle, por exemplo: botões simples, botões deslizadores e chaves e, ao mesmo tempo, texto, gráficos e mapas para visualizar os dados do *hardware* coletados.

Um ponto chave desse aplicativo é o gerenciamento feito pelo servidor do Blynk, o qual é responsável por toda a comunicação entre o *hardware* e o aplicativo, transmissão e armazenamento de dados, independente se o aplicativo está aberto ou fechado.

Ao prosseguir com o objetivo global de criar um aplicativo de prototipagem de baixo custo para o projeto EYERIS, foi escolhida a plataforma de IoT, da *Blynk*, que oferece as seguintes vantagens para este projeto:

- O desenvolvimento de aplicativo não necessita conhecimento de programação;
- Os tutoriais estão disponíveis online;
- A assistência de *software* é dada a mais de 400 dispositivos disponíveis (SHYMANSKYI e DUMANSKIY, 2019);
- Conexão à internet via Ethernet, WIFI ou 3G/4G;
- Ampla documentação e bibliotecas;
- Acesso gratuito à nuvem;
- Baixo custo – é possível adquirir recursos (*widgets*) conforme a complexidade do projeto.

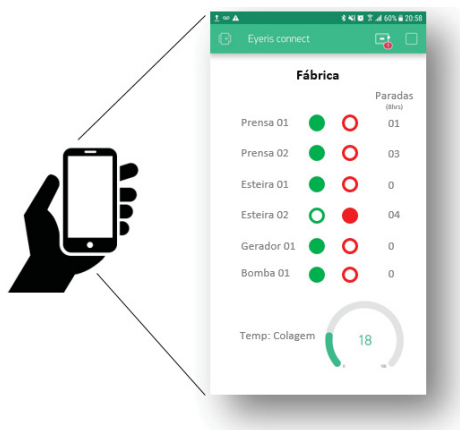


Figura 13. Exemplo da interface do aplicativo.
(Autor, 2020)

A Figura 13 exibe a tela de resumo do aplicativo, na qual apresenta informação sobre o estado operacional de cada equipamento industrial em que o dispositivo EYERIS poderia ser colocado⁹, neste exemplo: duas prensas, duas esteiras, um gerador e uma bomba elétrica. Na coluna à direita, é possível visualizar quantas paradas os equipamentos enfrentaram nas últimas 8 horas.

⁸ Do original: "Mobile phones' prevalence gives them great potential to be the default physical interface for ubiquitous computing applications" (BALLAGAS, et al., 2006)

⁹ É importante ressaltar que até o momento da escrita deste relatório o aplicativo não estava finalizado, portanto, trata-se de um exemplo hipotético para que o leitor possa visualizar o produto final.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. Ensaio

Nesta seção, objetiva-se validar o conceito do EYERIS por meio de uma simulação de vibração para replicar as condições semelhantes aos equipamentos indústrias. O propósito do experimento é capturar os sinais analógicos do MPU-6050 no domínio do tempo e aplicar o algoritmo mencionado anteriormente, com vistas a testar a sua eficácia para identificar o momento em que o suposto equipamento estaria em operação.

A Figura 14 (a) mostra o esquemático elétrico entre a placa GY-521 e o módulo NodeMCU ESP-12E, no qual a conexão é feita por meio de quatro fios. Desse modo, o vermelho representa a alimentação de 5V, o marrom representa o barramento GND, os fios azuis e amarelos são responsáveis pela comunicação via protocolo I²C e conectam os pinos SCL com D1; e SDA com D2 do micro controlador, respectivamente. Ambas as placas são alimentadas com 5V por meio do conector micro USB, que realiza a transferência de dados para o IDE no computador.

O esquemático (b) foi desenvolvido separadamente para simular a vibração periódica causada pelo suposto equipamento industrial. O circuito é composto de um Arduino MEGA 2560, um módulo ponte H L298N para controle de cargas indutivas tais como relés, solenoides, motores de passo motores. Neste estudo, um motor de 6Vcc foi utilizado com peso excêntrico para realizar a vibração.

O módulo ponte H L298N é alimentado com uma fonte comum de 12Vcc/3A e possui um regulador de tensão de 5Vcc embutido na placa, que é responsável pela alimentação do Arduino MEGA por intermédio do fio vermelho de 5Vcc. Ambas as placas utilizam o barramento GND, comum da fonte de 12V.

Foi necessário conectar três fios entre o Arduino MEGA e o módulo ponte H para controlar a velocidade do motor. Assim sendo, o fio cinza controla a velocidade do motor por meio do PWM (*Pulse Width Modulation*), portanto, o pino “Ativa M_B” é conectado ao pino 10 do Arduino MEGA e configurado como saída analógica. Os pinos EN3 e EN4 do módulo ponte H são utilizados para controlar a direção de rotação do motor.

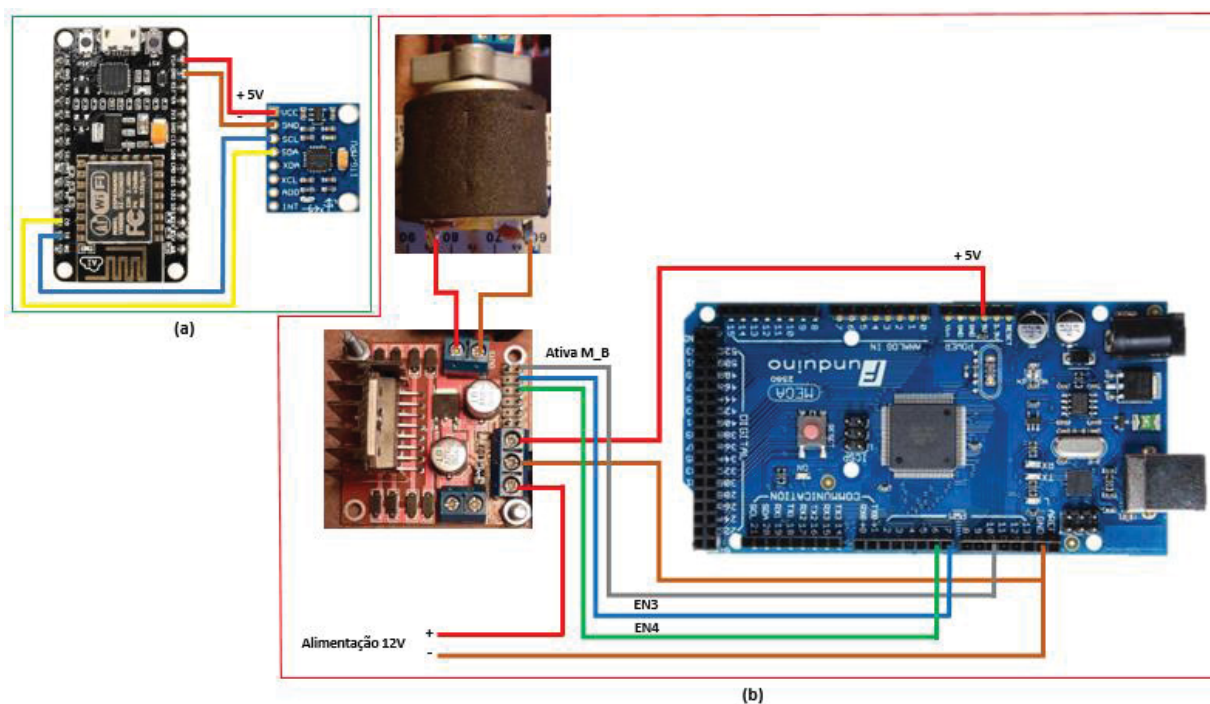


Figura 14. (a) esquemático do ESP8266 e MPU-6050 e (b) esquemático do circuito de vibração.
(Autor, 2020)

Tanto o módulo ESP-12E quanto o Arduino MEGA 2560 foram programados via USB, porém com programas distintos. Os dados capturados pelo acelerômetro foram enviados ao monitor serial do IDE. Por intermédio dessa plataforma integrada, foi possível visualizar e testar o código, além de diagnosticar possíveis erros no programa.

4.1.1. Modelo matemático de sistema mecânico de ensaio

Neste ensaio experimental, o modelo matemático do sistema mecânico utilizado foi de uma viga apoiada com a rigidez equivalente representada pelos parafusos, vide Fig. 15.

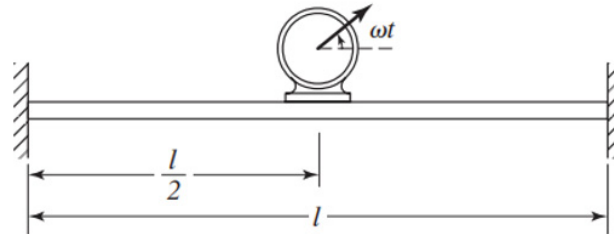


Figura 15. Modelo do motor elétrico montado em uma viga simplesmente apoiada.
(RAO, 2011, p.762)

A Figura 16 mostra como a vibração de domínio de tempo foi simulada. Desse modo, o módulo ESP-12E foi colocado em uma placa de prototipagem, com o acelerômetro fixado ao lado do motor, pelo qual o sistema foi excitado. Depois, o conjunto foi fixado sobre uma régua de aço para simular um sistema mecânico de uma viga simplesmente apoiada. Em seguida, o Arduino MEGA 2560 e módulo ponte H L298N foram montados na mesma base para diminuir as distâncias entre componentes e simplificar a montagem. Entretanto, a fonte de 12V de alimentação não foi capturada nesta imagem.

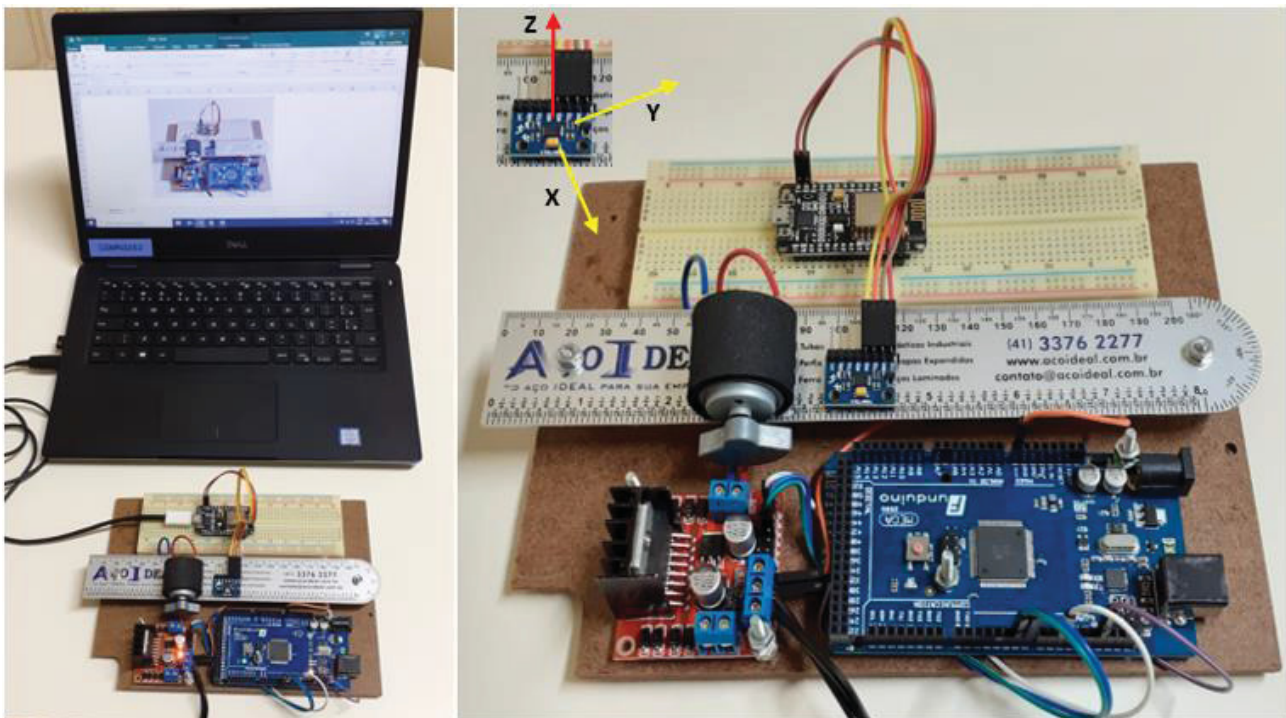


Figura 16. Simulação de vibração representada com viga simplesmente apoiada.
(Autor, 2020)

4.2. Ensaio no equipamento industrial

Neste subitem, o objetivo foi instalar o protótipo EYERIS em um equipamento industrial e averiguar o desenvolvimento realizado do ensaio apresentado anteriormente, a fim de capturar os sinais analógicos do MPU-6050 no domínio do tempo. Sendo assim, o ponto crítico para a validação do algoritmo de detecção foi a capacidade de identificar o momento em que o equipamento estava em operação, apenas acompanhando o monitoramento de vibração de forma não invasiva.

O equipamento industrial foi representado por uma prensa pneumática, que pode gerar até 0.8 toneladas de pressão, a depender da pressão de ar na rede. Ela possui um avanço total de 500mm, com velocidade de trabalho de 30mm/s.

Para encontrar o melhor sinal de vibração transmitido através da estrutura mecânica da prensa, o sensor foi montado em três posições, que vão dos pontos superior, intermediário e inferior da estrutura.

Primeiro cenário: a Figura 17 - (a) e (b) - mostra a placa GY-521 e o módulo NodeMCU ESP-12E fixado na parte superior da prensa, montados em conjunto com o *breadboard*. A imagem (c) mostra a placa GY-521 deslocada na parte superior, para reduzir efeitos de amortecimento e melhorar a leitura da vibração. Ambas as placas foram alimentadas com 5V por meio do conector micro USB, o qual realiza a transferência de dados para o IDE no computador e o software de análise PLX-DAQ.

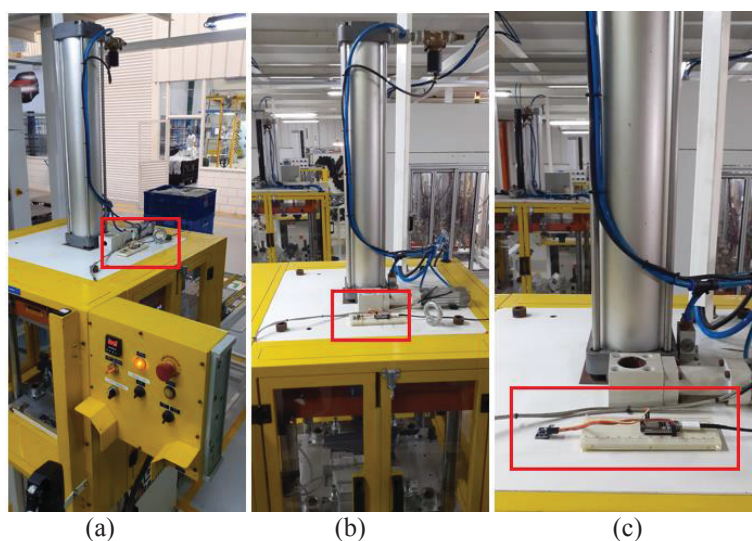


Figura 17. (a) e (b) montagem do protótipo EYERIS na parte superior da prensa pneumática e (b) montagem separada da placa GY-521 na parte superior da prensa.
(Autor, 2020)

Segundo cenário: a Figura 18 (a) mostra a placa GY-521 e o módulo NodeMCU ESP-12E fixados na mesa interna da prensa. Já a imagem (b) mostra somente a placa GY-521 montada no apoio inferior da prensa.

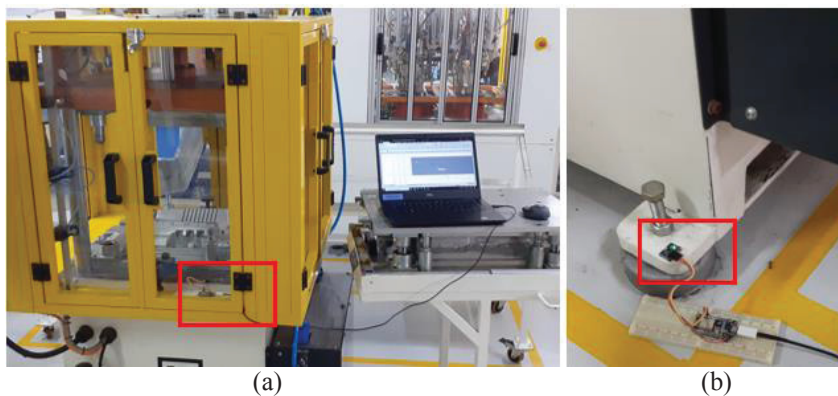


Figura 18. (a) montagem do protótipo EYERIS na mesa da prensa pneumática e (b) montagem da placa GY-521 no apoio inferior da prensa.
(Autor, 2020)

Tabela 3. Características da prensa pneumática.
Adaptada do manual técnico da Hidraulmac - PP4C (2018)

Categorias	Características	Dados
Dados Operacionais	Capacidade	0,8 toneladas
	Capacidade de retorno	0,5 toneladas
	Curso máximo regulável	500 mm
	Velocidade de aproximação	130 mm/seg.
	Velocidade de trabalho	30 mm/seg.
	Velocidade de retorno	130 mm/seg.
	Peso aproximado da máquina	950 kg (sem óleo)
Dados da Potência de Instalação	Potência de acionamento	60 W
	Tensão de alimentação	380 V
	Tensão de comando	24 Vcc
	Frequência da rede	60 Hz

5. RESULTADOS OBTIDOS

Na Figura 19, a imagem (a) apresenta o gráfico criado do eixo de aceleração em Z, no sentido vertical, vide Fig. 16. Logo, a leitura simples do MPU-6050 foi traçada visualmente no monitor serial do IDE. Já o Arduino MEGA 2560 foi programado para acionar o motor em períodos de 200ms e interrompê-los com intervalos de 1000ms. Conforme o esperado, o motor com peso excêntrico gera a vibração excitada por 200ms, representada pelo início da oscilação de cada instância e, logo depois, a vibração residual conforme a desaceleração da inércia provocada.

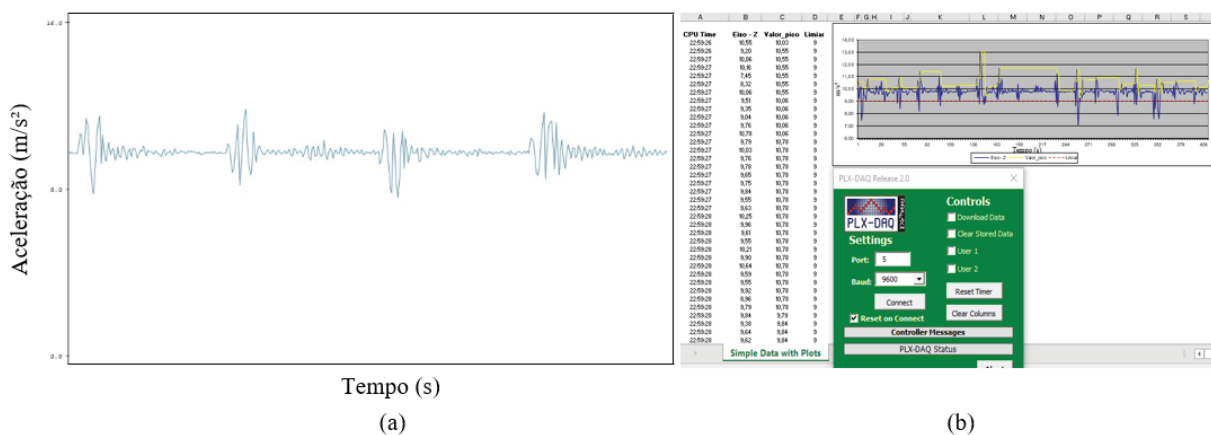


Figura 19. (a) Gráfico de aceleração capturado no IDE para eixo Z. (b) Análise de dados pelo software PLX-DAQ. (Autor, 2020)

Ao aplicar o algoritmo de detecção no domínio de tempo para o mesmo ensaio acima e enviar a leitura do MPU-6050 diretamente para o Excel, por meio do software PLX-DAQ - vide imagem (b), criou-se o gráfico abaixo - Fig. 20. Assim, a linha azul representa a vibração do eixo Z durante a excitação do motor, a linha amarela representa os valores de pico que foram utilizados para identificar o estado operacional do motor e a linha vermelha o limiar no algoritmo que inicialmente foi programado em 9m/s^2 . Dessa maneira, é possível notar que alguns picos não foram detectados. Nessa amostragem de 18 picos, 15 picos foram identificados corretamente pelo algoritmo, representando uma acurácia de 83%.

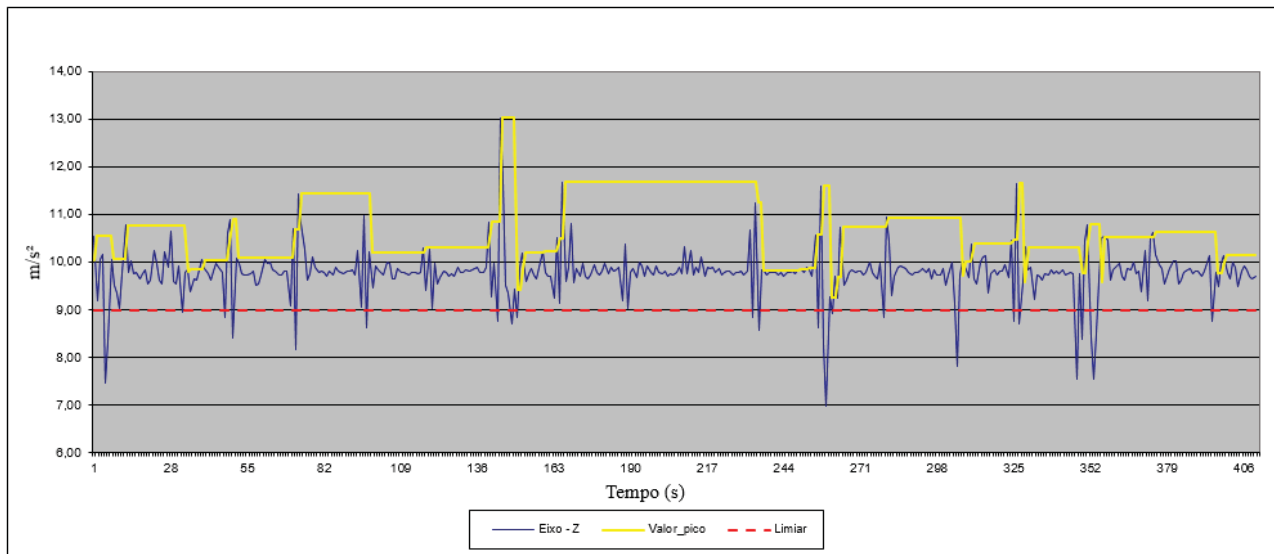


Figura 20. Gráfico de aceleração - primeiro ensaio.
(Autor, 2020)

Na Figura 21, o gráfico apresenta a modificação realizada no simulador de vibração. Desse modo, a lógica do Arduino MEGA 2560 foi alterada para acionar o motor em períodos de 500ms e interrompê-los com intervalos de 1500ms. Ainda, o limiar do algoritmo também foi alterado, de 9m/s^2 para 9.81m/s^2 , a fim de desconsiderar o efeito de gravidade no sensor MPU-6050. Considerando que o motor ficou ligado por um tempo adicional de 300ms, a aceleração dos picos teve um aumento, em média, de 1.2m/s^2 , ou seja, uma diferença de 11.7%. Nessa segunda amostragem, os 10 maiores picos foram identificados corretamente pelo algoritmo, entretanto, o ruído gerado na rampa de aceleração criou interferência de 21 picos adicionais identificados.

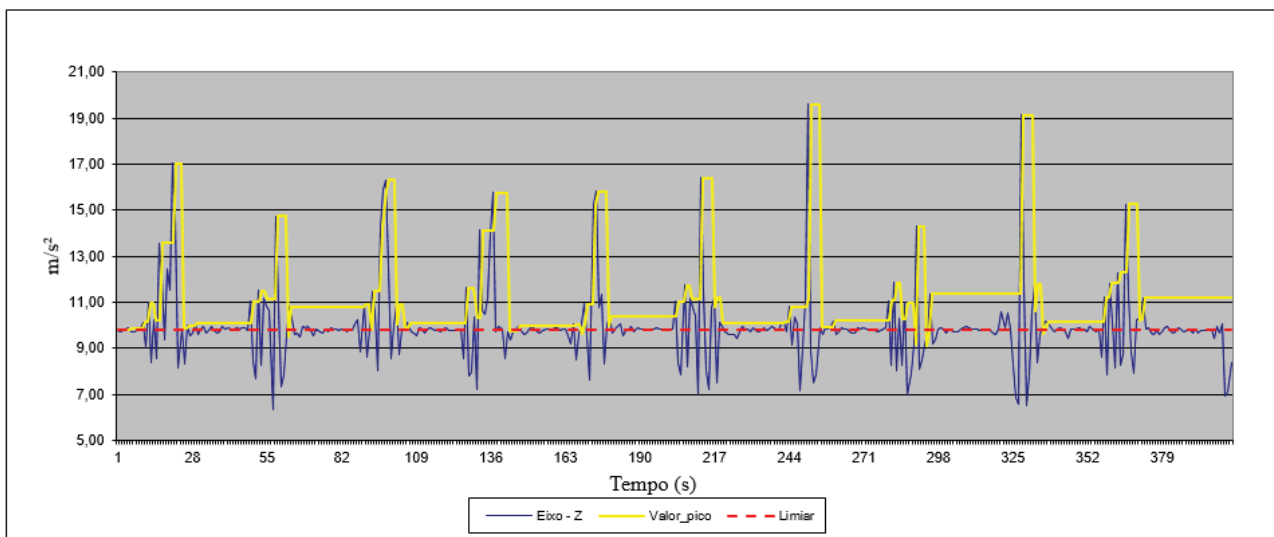


Figura 21 Gráfico de aceleração – segundo ensaio.
(Autor, 2020)

Com o objetivo de desconsiderar picos de ruído na rampa de aceleração, o limiar do algoritmo de detecção foi ajustado de 9.81m/s^2 para 14m/s^2 . Dessa maneira, nessa terceira amostragem, os 11 picos maiores foram identificados com 100% de acurácia entre os intervalos programados. A Figura 22 mostra os resultados dessa alteração.

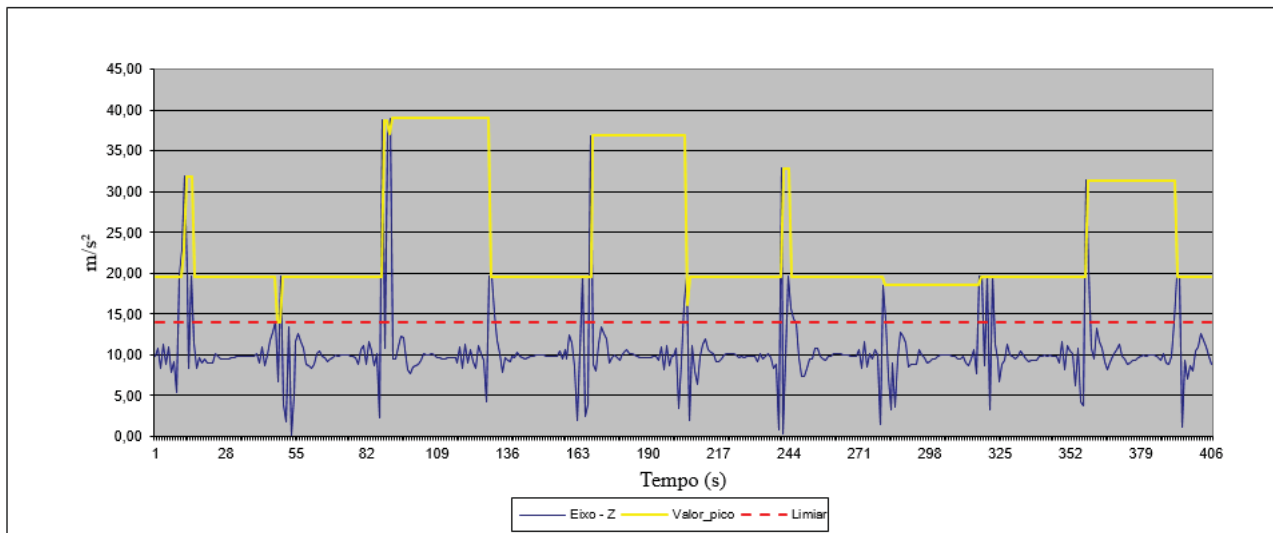


Figura 22. Gráfico de aceleração – terceiro ensaio.
(Autor, 2020)

Na Figura 23, o gráfico apresenta vários picos positivos e negativos que foram gravados conforme o movimento vertical da prensa. A prensa foi acionada três vezes para gerar os dados, representado no gráfico pelos números 1, 2 e 3, cada um possui sua partida com um intervalo de 5 segundos entre o fim do curso e retorno. Além disso, o limiar foi configurado em 9.81 m/s^2 para desconsiderar efeitos da gravidade, porém, mesmo assim, o algoritmo identificou 15 falsos positivos devido ao ruído entre os movimentos reais.

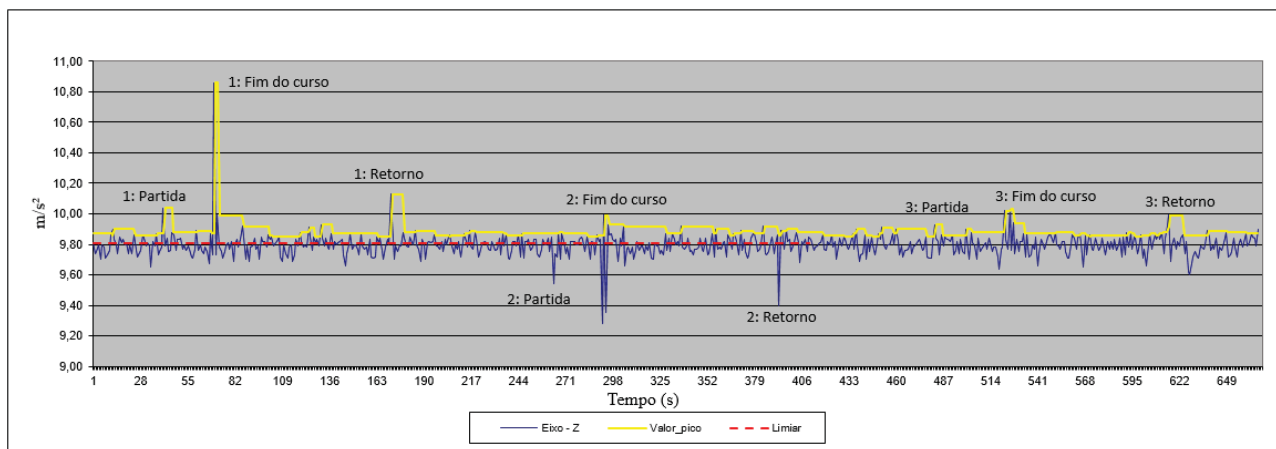


Figura 23. Gráfico de aceleração da prensa pneumática – primeiro ensaio.
(Autor, 2020)

Na Figura 24, a prensa foi acionada duas vezes para gerar os dados, representado no gráfico pelos números 1 e 2, cada um possui sua partida, fim do curso e retorno, respectivamente. O limiar foi alterado de 9.81 m/s^2 do ensaio anterior para 9.89 m/s^2 , cálculo baseado na média dos dados anteriores e aplicado a fim de desconsiderar o ruído apresentado. Mesmo apresentando alguns falsos positivos, o número foi reduzido de 15 para 7, ou seja, uma redução de 53.3%.

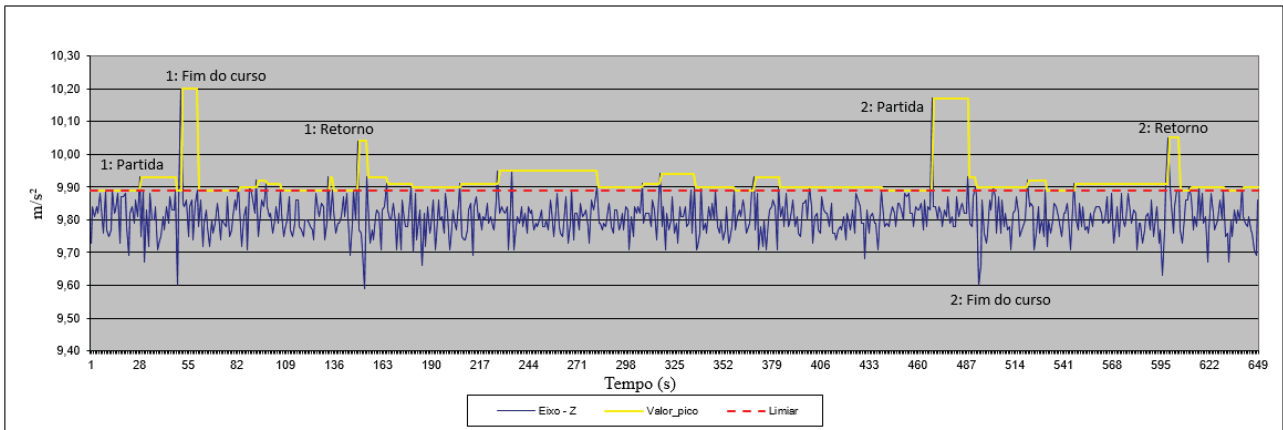


Figura 24. Gráfico de aceleração da prensa pneumática – segundo ensaio.
(Autor, 2020)

Convém ressaltar que a prensa possui um recurso para trocar a velocidade de trabalho entre normal e lento, que é utilizado para minimizar o impacto na ferramenta e sua estrutura. Dessa forma, no terceiro ensaio, este recurso foi desabilitado e o mesmo experimento foi reproduzido para capturar os dados de vibração.

Assim, a Figura 25, a escala do gráfico e os dados foram alterados devido ao maior impacto apresentado. A prensa foi acionada três vezes para capturar os dados novamente, representados no gráfico pelos números 1, 2 e 3, cada um possui sua partida, fim do curso e retorno, respectivamente. Logo, o limiar foi mantido em 9.89 m/s^2 . Do ensaio anterior, o algoritmo de detecção apresentou apenas um falso positivo, o que significa uma redução de 7 para 1, isto é, reduziu em 85.7%.

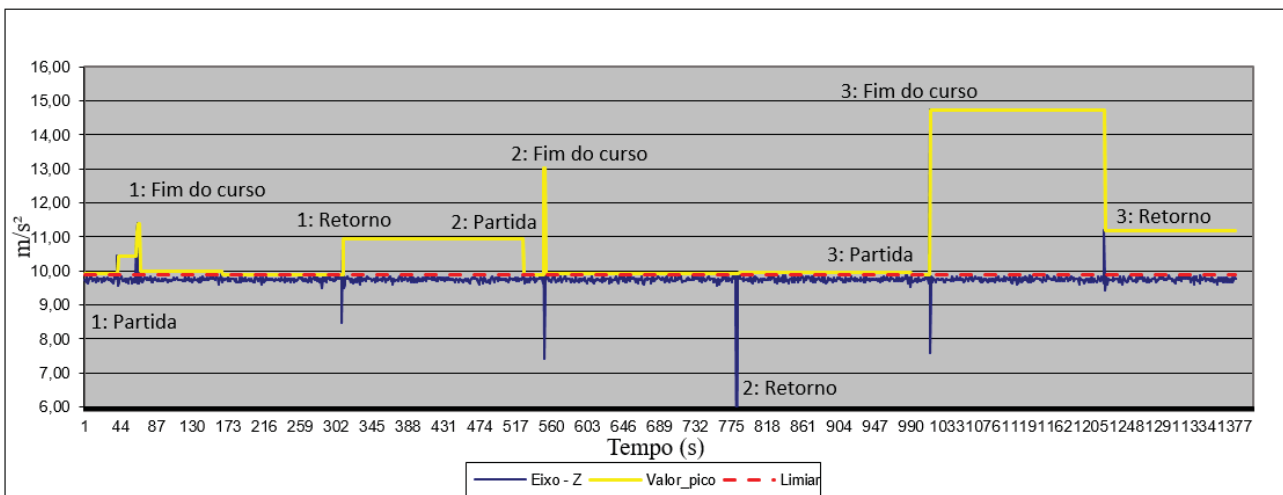


Figura 25. Gráfico de aceleração da prensa pneumática – terceiro ensaio.
(Autor, 2020)

6. CONCLUSÕES

Através dos dados coletados neste estudo, dentro do escopo apresentado e com o objetivo de desenvolver uma solução de baixo custo, revelou-se que por meio de monitoramento vibracional no domínio de tempo de forma não invasiva, o reconhecimento e comunicação do estado operacional de um equipamento industrial é factível. Entretanto, é importante ressaltar que como o projeto foi desenvolvido utilizando uma abordagem não invasiva, a pura dependência de dados vibracionais faz com que o presente projeto em seu escopo atual apresente uma limitação em seu poder no que tange a tomada de decisões corretas em momentos de ausência de vibração.

Embora o acelerômetro MPU-6050 seja destinado para fins de prototipagem, ele mostrou um alto nível de sensibilidade e capacidade de mensurar pequenas vibrações em ensaios teóricos e até mesmo em uma aplicação de equipamento industrial. Apesar de os resultados terem sido satisfatórios em identificar o estado operacional do equipamento, a aplicação desse produto em diversos equipamentos industriais exige uma calibração e programação específica, pois a montagem final foi um fator significativo na capacidade de diferenciar entre valores positivos e falso positivos. Diante disso, implicaria em melhoria no desenvolvimento de *software* para afinar o algoritmo de detecção, no qual os picos inferiores abaixo do limiar também devem ser considerados para a tomada de decisão referente ao estado operacional do equipamento industrial. Em vista disso, seria um erro grave considerar apenas os valores positivos, já que a vibração deve ser analisada em sua totalidade, pois o sensor é capaz de gerar valores negativos, mesmo que o equipamento esteja em plena operação.

Além disso, o aplicativo deve ter recursos disponíveis para que o usuário final possa configurar as necessidades da aplicação diretamente nele. Logo, quanto maior for a facilidade de configurar o sensor de acordo com seu ambiente pelo aplicativo, maior será sua aceitação na indústria.

O algoritmo de detecção baseado apenas no domínio de tempo apresentou limitações com relação à acurácia em identificar os momentos desejados, isso devido ao ruído gerado pelo ambiente e vibrações externas não criadas tanto pelo ensaio teórico, bem como o equipamento industrial. Ocasionalmente, o domínio de tempo de qualquer sistema não apresentará informação útil. No entanto, a resposta de frequência proporcionará uma ou mais frequências discretas em torno das quais a energia fica concentrada. Tendo em vista que as características dinâmicas dos componentes individuais geralmente são conhecidas, é possível vincular componentes de frequência (da sua resposta de frequência), aos componentes físicos, por exemplo a correlação entre frequência de um motor e sua velocidade rotacional¹⁰. (RAO, 2011, tradução minha).

Por meio de uma análise híbrida entre domínio de tempo e domínio de frequência, é possível que o algoritmo tenha mais facilidade para apontar os momentos desejados para tomado de decisão sobre o estado operacional de equipamento industrial. Posto isso, caberia um estudo futuro para testar essa pressuposição.

Um outro fator limitante do conceito de ser não invasivo, identificado durante o desenvolvimento desse trabalho, foi como diferenciar o estado operacional do equipamento entre uma parada programada e uma não programada. Por exemplo, o equipamento estava em uso, porém apenas ocioso devido a uma troca de ferramenta versus uma parada não programada causada por uma falha de componente. Este cenário apresentou o desafio de caracterizar o estado operacional do equipamento apenas pelo monitoramento de vibração sem ter dados adicionais, por exemplo uma entrada para identificar a troca de ferramenta e/ou planejamento e controle de produção para ajudar na tomada de decisão.

Por fim, ao considerar que o estudo foi baseado em vibração transmitida de forma não invasiva, outro aspecto que poderia ter interferido na sensibilidade das leituras foi a forma de fixação do sensor. Já que ele foi fixado com adesivo dupla face da marca 3M para facilitar a montagem do protótipo, o que em retrospectiva foi um erro, porque este material, por mais que tenha uma espessura apenas de 1mm, isolou e amorteceu o sensor da estrutura mecânica da prensa, reduzindo a transmissão de vibração.

Diante dos dados coletados para esse relatório técnico, sugerem-se algumas propostas de trabalhos futuros para a melhora do desempenho do produto.

- Melhorar o algoritmo de detecção para incluir picos negativos;
- Desenvolver um invólucro do sensor composto de resina e aço para embutir o sensor MPU-6050, garantindo paralelismo de acordo com sua base de montagem em aço. A fixação seria feita por parafuso;¹¹
- Incluir no algoritmo de detecção a análise de frequência FFT (*Fast Fourier Transform*);
- Incorporar o aprendizado de máquinas que forneçam ao sistema a capacidade de aprender as tendências de utilização do equipamento industrial e melhorar automaticamente a partir da experiência, sem ser explicitamente programado. Como o EYERIS teria acesso à nuvem, os dados de vibração seriam enviados remotamente pelo WIFI e analisados pelo um sistema de inteligência artificial disponível. O aplicativo seria retroalimentado com o resultado da análise para gerar informação e valor ao usuário final.

¹⁰ Do original. “Often, the time response of a system will not give much useful information. However, the frequency response will show one or more discrete frequencies around which the energy is concentrated. Since the dynamic characteristics of individual components of the system are usually known, we can relate the distinct frequency components (of the frequency response) to specific components.” (RAO 2011, p.895)

¹¹ Essa melhoria foi baseada em acelerômetros industriais especificamente projetado para medição de vibração (BRÜEL e KJÆR, (s/d)).

7. REFERÊNCIAS

- ALLEN, P.G, "School of Computer Science & Engineering". GY-521 schematic. Disponível em: <<https://courses.cs.washington.edu/courses/cse466/14au/labs/14/14.html>>. Acesso em: 24 jun. 2020.
- ARDUINING, 2015. "NodeMCU ESP-12 Development Kit V1.0". Disponível em: <<https://arduinuing.com/2015/08/15/nodemcu-esp-12-development-kit-v1-0/>>. Acesso em: 20 nov. 2019.
- BALLAGAS, R., BORCHERS, J., ROHS, M., e. SHERIDAN, J. G., "The smart phone: a ubiquitous input device," *In IEEE Pervasive Computing*, vol. 5, no. 1, pp. 70-77, Jan.-March 2006, doi: 10.1109/MPRV.2006.18. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1593574>>. Acesso em: 10 jun. 2020.
- BLYNK, 2020. "How blynk works". 10 de maio de 2020. Disponível em: <<https://docs.blynk.cc/>>. Acesso em: 24 jun. 2020.
- BRITANNICA, 2007 "IRIS – Greek mythology". 8 de novembro de 2007. Disponível em: <<https://www.britannica.com/topic/Iris-Greek-mythology>>. Acesso em: 5 out. 2019.
- BRÜEL e KJÆR. (s/d), "ACELERÔMETRO DE CARGA PIEZOELÉTRICO TRIAXIAL". Disponível em: <<https://www.bksv.com/pt-BR/products/transducers/vibration/Vibration-transducers/accelerometers/4321>>. Acesso em: 17 jul. 2020.
- COMPONENTS101, 2018. "MPU-6050 - Accelerometer and Gyroscope Module". Disponível em: <<https://components101.com/sensors/MPU-6050-module>>. Acesso em: 13 abr. 2020.
- DUECK, R. K., 2005. *Digital Design with CPLD Applications and VHDL*. 2nd Edition, Cengage Learning
- FIESP, 2018. "FIESP identifica desafios da indústria 4.0 no brasil e apresenta propostas". 7 de maio de 2018. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/noticias/fiesp-identifica-desafios-da-industria-4-0-no-brasil-e-apresenta-propostas>>. Acesso em: 20 mar. 2020.
- FILIPEFLOP, 2016. "Módulo WiFi ESP8266 NodeMcu ESP-12". 18 de maio de 2016. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/produto/modulo-wifi-esp8266-nodemcu-esp-12>>. Acesso em: 22 nov. 2019.
- GANIGA, R., 2019. "A novel approach to sensor implementation for healthcare systems using internet of things". Researchgate. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/337664623_A_novel_approach_to_sensor_implementation_for_healthcare_systems_using_internet_of_things>. Acesso em: 24 jun. 2020.
- INVENSENSE, 2013. "MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4". Disponível em: <<https://invenSense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2020.
- MANUAL TÉCNICO. 2018. "PP4C, prensa Pneumática tipo 4 colunas". Hidral-mac Industrial LTDA.
- McKINSEY, 2015. "Unlocking the potential of the Internet of Things". Disponível em: <<https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/the-internet-of-things-the-value-of-digitizing-the-physical-world>>. Acesso em: 7 mai. 2020.
- MORGAN STANLEY, 2016, "The internet of things and the new industrial revolution". Disponível em: <<https://www.morganstanley.com/ideas/industrial-internet-of-things-and-automation-robotics>>. Acesso em: 8 mai. 2020.
- RAO, S. S., 2011. *Mechanical Vibrations*, 5th Edition, Prentice Hall.
- RIES, Eric., 2012. *A startup enxuta: como os empreendedores atuais utilizam a inovação contínua para criar empresas extremamente bem-sucedidas*. Rio de Janeiro, Leya.
- ROWBERG, J., 2011. "I2cdevlib". Disponível em: <<https://github.com/jrowberg/i2cdevlib/blob/master/Arduino/MPU-6050/MPU6050.h>>. Acesso em: 12 nov. 2019.
- SIMOLDES PLASTIC DIVISION, 2017. "Interior Parts". Disponível em: <<http://www.simoldes.com/plastics/Interior-Parts.html>>. Acesso em: 31 jul. 2020.
- SHYMANSKYY, V. e DUMANSKIY, D. 2019. "Supported Hardware". 1 de fev de 2019. Disponível em: <<https://github.com/blynkkk/blynkkk.github.io/blob/master/SupportedHardware.md>>. Acesso em: 24 jun. 2020.
- TORRES, H., 2020. "MEMS - Sistemas Microeletromecânicos", Embarcados Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/mems/>>. Acesso em: 2 mar. 2020.
- VALDEZ, Jonathas., 2015. "Understanding the I2C Bus" Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf>>. Acesso em: 5 mar. 2020.