

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

ALISSON MATEUS BOEING

**Estudo e melhoria da aquisição de dados de
acelerômetros MEMS para análise de vibração
por sistemas embarcados de baixa potência**

São José - SC

Agosto/2022

ESTUDO E MELHORIA DA AQUISIÇÃO DE DADOS DE ACELERÔMETROS MEMS PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO POR SISTEMAS EMBARCADOS DE BAIXA POTÊNCIA

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia de Telecomunicações do campus São José do Instituto Federal de Santa Catarina para obtenção do diploma de Engenheiro de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Arliones Stevert Hoeller Junior, Dr.

Coorientador: Romano Sabetzki Weirich, Me.

São José - SC

Agosto/2022

Alisson Mateus Boeing

Estudo e melhoria da aquisição de dados de acelerômetros MEMS para análise de vibração por sistemas embarcados de baixa potência/ Alisson Mateus Boeing. – São José - SC, Agosto/2022-

59 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Arliones Stevert Hoeller Junior, Dr.

Coorientador: Romano Sabetzki Weirich, Me.

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC

Campus São José

Engenharia de Telecomunicações, Agosto/2022.

I. Sistemas Embarcados Distribuídos. II. Industria 4.0. III. Baixa Potência. IV. Manutenção Preditiva. V. Análise de Vibração.

ALISSON MATEUS BOEING

ESTUDO E MELHORIA DA AQUISIÇÃO DE DADOS DE ACELERÔMETROS MEMS PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO POR SISTEMAS EMBARCADOS DE BAIXA POTÊNCIA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro de Telecomunicações, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

São José - SC, 31 de agosto de 2022:

Prof. Arliones Stevert Hoeller Junior, Dr.
Orientador
Instituto Federal de Santa Catarina

Romano Sabetzki Weirich, Me.
Coorientador
Dynamox S.A.

Prof. Tiago Semprebom, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Roberto de Matos, Dr.
Instituto Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a meus pais e meus irmãos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais e meus irmãos pelo apoio e confiança incondicional durante todo o período da graduação, dando suporte e me incentivando a seguir em frente independente da situação.

Agradeço a minha namorada Marina pelo companheirismo, ajuda e compreensão, foi muito importante durante o caminho. E a sua família, que me acolheu e sempre me apoiou.

Agradeço ao meu orientador, professor Arliones, pela orientação, atenção e paciência durante o desenvolvimento deste projeto, onde ocorreram diversos imprevistos, foi essencial para a finalização do trabalho.

Agradeço ao meu coorientador Romano, por trazer este trabalho e me auxiliar a formalizar uma proposta, pelas revisões, incentivo e orientação, me ajudaram muito no decorrer do trabalho.

Agradeço ao Instituto Federal de Santa Catarina - Câmpus São José e a todos os seus colaboradores pelo ótimo trabalho desempenhado e pela entrega de uma educação pública de qualidade.

E por fim, agradeço aos meus amigos e todos que fizeram parte desta jornada de alguma forma. Muito obrigado!

"A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original"

(Albert Einstein)

RESUMO

A chegada da indústria 4.0 e seus recursos trouxe diversos benefícios para as fábricas no que diz respeito a disponibilidade de ativos e automatização de tarefas. Grande parte destes benefícios é proporcionada pelo avanço tecnológico que se iniciou na terceira revolução industrial, onde sistemas eletrônicos e computacionais automatizados foram inseridos nos processos de produção. Neste contexto, tem-se investido na melhoria de processos de manutenção. Dentre os tipos de manutenção, na indústria 4.0, se destaca a preditiva, que busca monitorar e detectar problemas em estágios iniciais, para que seja possível realizar a manutenção antes da quebra da máquina, evitando paradas indesejáveis. Amparada pelo conceito de internet das coisas, a manutenção preditiva, que ocorria por meio de técnicos visitando fisicamente os ambientes para monitoramento, agora recebe o auxílio de sistemas embarcados que possibilitam coletar e transmitir dados automaticamente. A partir deste contexto, a empresa Dynamox S.A., situada em Florianópolis - Santa Catarina, especializada em manutenção preditiva por meio da análise de vibração voltada à indústria 4.0, identificou uma demanda de melhoria em um de seus produtos, sendo esse um sensor de temperatura e vibração, sem fio e com conectividade *Bluetooth*. Existe uma ciência que relaciona as características vibratórias e de temperatura de uma máquina rotativa com sua condição de operação e, apesar dos sensores da Dynamox produzirem dados capazes de verificar diversos problemas, algumas limitações no fluxo de aquisição impedem de detectar casos específicos. Estas limitações estão relacionadas à frequência de amostragem, resolução dos dados de vibração e à simultaneidade da leitura dos eixos de vibração. Com isso, o objetivo deste trabalho é identificar as limitações e realizar melhorias no *software* embarcado do sensor de vibração, com intuito de viabilizar a detecção de problemas que ocorrem em frequências mais elevadas, com o mesmo *hardware* e mantendo um padrão de consumo de energia compatível com o do produto atual.

Palavras-chave: Sistemas Embarcados Distribuídos, Indústria 4.0, Baixo Consumo de Energia, Manutenção Preditiva, Análise de Vibração.

ABSTRACT

The arrival of Industry 4.0 and its resources has brought several benefits to factories regarding asset availability and task automation. Most of them derive from the technological advance that began in the third industrial revolution, where electronic, computational and automated systems integrated production processes. Among the types of maintenance in Industry 4.0, predictive maintenance stands out, which seeks to monitor and detect problems at early stages so that it is possible to carry out maintenance before the machine breaks down, avoiding unwanted stops. Supported by the internet of things concept, predictive maintenance, which occurred through technicians physically visiting the environments for monitoring, now receives assistance from distributed embedded systems, making it possible to collect and transmit data automatically. From this context, the company Dynamox S.A., located in Florianópolis - Santa Catarina, specializing in predictive maintenance through vibration analysis focusing on Industry 4.0, identified a demand for improvement in one of its products, a wireless temperature and vibration sensor with Bluetooth connectivity. A science relates the vibration and temperature characteristics of a rotating machine with its operating condition. Although Dynamox sensors produce data capable of verifying several problems, some limitations in the acquisition flow prevent detecting specific cases. Such limitations relate to the sampling frequency, data resolution, and the ability to read multiple axes simultaneously. Therefore, the goal of this work is to identify the causes of such limitations and improve the product's embedded software to exploit the total capacity of the product hardware and, therefore, enable the detection of problems that occur at higher frequencies while maintaining an energy consumption profile compatible with the current product version.

Keywords: Distributed Embedded Systems. Industry 4.0, Low-Power Systems, Predictive Maintenance, Vibration Analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Curva de falha potencial.	24
Figura 2 – Representação de sinal de tempo contínuo e discreto.	25
Figura 3 – Relação vibração <i>Root Mean Squares</i> (RMS) x Tempo.	26
Figura 4 – Análise espectral em cascata.	27
Figura 5 – Imagem microscópica de um acelerômetro MEMS capacitivo.	28
Figura 6 – Conceito massa-mola para acelerômetros.	29
Figura 7 – Exemplo de estrutura de um sistema embarcado.	31
Figura 8 – <i>Barramento Inter-Integrated Circuit (I2C)</i>	33
Figura 9 – <i>Barramento Serial Peripheral Interface (SPI)</i>	34
Figura 10 – Linhas SPI.	35
Figura 11 – <i>Dynaloggers</i> HF, TcA+ e Assíncrono.	36
Figura 12 – Diagrama de blocos simplificado de um <i>DynaLogger</i> HF.	37
Figura 13 – Instrumentação dos equipamentos.	40
Figura 14 – Laço de captura de dados.	41
Figura 15 – Largura do <i>Data ready (DRDY)</i>	42
Figura 16 – Processo de aquisição triaxial.	42
Figura 17 – Máquina de estados SPI.	46
Figura 18 – Novo formato de requisição SPI.	46
Figura 19 – Novo fluxo de captura de dados.	47
Figura 20 – Resultado do novo fluxo de captura de dados.	48
Figura 21 – Sensor em repouso.	49
Figura 22 – Sensor sobre calibrador, domínio do tempo.	50
Figura 23 – Sensor sobre calibrador, domínio da frequência.	50
Figura 24 – Sensor sobre calibrador, domínio da frequência, com zoom.	51
Figura 25 – Resposta em frequência.	52
Figura 26 – Espectrograma.	52
Figura 27 – Consumo durante aquisição no fluxo novo.	53
Figura 28 – Consumo durante aquisição no fluxo atual.	53
Figura 29 – Consumo durante aquisição no fluxo novo em 25k6Hz.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos <i>Dynaloggers</i>	36
Tabela 2 – Caracterização de tempos do microcontrolador.	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACK <i>Acknowledgement</i>	33
ADC <i>Analog-Digital Converter</i>	29
AS <i>Assíncrono</i>	35
BLE <i>Bluetooth low energy</i>	35
CS <i>Chip Select</i>	33
CPU <i>Central Processing Unit</i>	31
DRDY <i>Data ready</i>	15
DMA <i>Direct Memory Access</i>	31
EEPROM <i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>	30
FCLK <i>Flash clock</i>	42
FRAM <i>Ferroelectric Random-Access Memory</i>	30
FPT <i>Flash programming time</i>	42
GPIO <i>General Purpose Input/Output</i>	30
HAL <i>Hardware Abstraction Layer</i>	36
HF <i>High Frequency</i>	35
Hz <i>Hertz</i>	36
I2C <i>Inter-Integrated Circuit</i>	15
IoT <i>Internet of Things</i>	20
LED <i>Light Emitting Diode</i>	31
Mbps <i>Mega bits per second</i>	43
MHz <i>Mega Hertz</i>	40
MEMS <i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>	27
MISO <i>Master In Slave Out</i>	33
ML <i>Machine Learning</i>	20
MOSI <i>Master Out Slave In</i>	33
PF <i>Potential Failure</i>	24
RAM <i>Random-Access Memory</i>	30
RMS <i>Root Mean Squares</i>	15
SCL <i>Serial Clock Line</i>	32
SCLK <i>Serial Clock Line</i>	33

SDA <i>Serial Data Line</i>	32
SLIT <i>Sistema linear invariante no tempo</i>	51
SNR <i>Signal-to-Noise Ratio</i>	22
SPI <i>Serial Peripheral Interface</i>	15
TcA <i>Temperatura de contato e Aceleração</i>	35
UART <i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>	30

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Objetivos	22
1.2	Organização do texto	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	Manutenção industrial	23
2.2	Análise de vibração	24
2.2.1	Técnicas de análise de vibração	26
2.2.2	Dispositivos de coleta	27
2.3	Acelerômetro MEMS	28
2.4	Sistemas embarcados	30
2.5	Recursos de memória	31
2.6	Protocolos de comunicação serial	32
2.6.1	I2C	32
2.6.2	SPI	33
2.7	Sistema de aquisição de dados da Dynamox	35
3	PROPOSTA DE PROJETO	38
3.1	Proposta	38
3.2	Metodologia	38
3.3	Avaliação do cenário atual	39
3.4	Fluxo teórico ideal de captura de dados	42
3.5	Comparação entre fluxo ideal e fluxo atual do produto	43
4	DESENVOLVIMENTO	45
4.1	Implementação do novo fluxo de captura	45
4.2	Segmentação dos módulos envolvidos na captura	47
4.3	Alteração do método de sincronização	48
4.4	Resultado	48
4.5	Testes de desempenho e qualidade dos dados	48
4.6	Levantamento do consumo energético	53
5	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos, a indústria vem evoluindo em complexidade tecnológica e em formas de manter a confiabilidade e produtividade dos ativos industriais. A eminente quarta revolução industrial, conhecida como Indústria 4.0, vem promovendo uma evolução no conceito de manutenção, em que passa a ter uma função ainda mais estratégica dentro das empresas (BALDISSARELLI; FABRO, 2019).

A manutenção industrial é definida pela combinação de atividades técnicas, operacionais e administrativas, que procura garantir um melhor desempenho da produção por meio da confiabilidade e disponibilidade de ativos industriais (SIMÕES JÚNIOR, 2014). Ela define metas e objetivos a partir de normas e procedimentos de trabalho e procura obter um melhor aproveitamento de pessoal, máquinas e materiais em uma organização (BRANCO FILHO, 2008 apud SIMÕES JÚNIOR, 2014). Por exemplo, na indústria petroquímica, cerca de 60% da força de trabalho é destinada à manutenção (GROOTE, 1995 apud SIMÕES, 2011) e um estudo na Suécia aponta que custos de manutenção em uma mineradora altamente mecanizada podem atingir a faixa entre 40% e 60% dos custos de operação (PARIDA; KUMAR, 2006 apud SIMÕES, 2011). Com base nesses dados, observa-se a importância da manutenção industrial na vida útil das máquinas.

Segundo Almeida (2018) existem cinco tipos de manutenção industrial, que atendem necessidades diferentes. São elas: corretiva, preventiva, produtiva total, centrada na confiabilidade e preditiva. A corretiva é a que age imediatamente para reestabelecer o funcionamento de uma máquina, o mais rápido possível, após um defeito ocorrer. A preventiva, ocorre em datas predeterminadas e planejadas de forma controlada. Peças são trocadas e procedimentos de conservação são realizados para evitar paradas forçadas ou não planejadas. Já a produtiva total atua na melhoria e no aproveitamento da mão de obra dos operadores das máquinas. A centrada em confiabilidade, se baseia em sistemáticas administrativas focadas em eliminar causas conhecidas de defeitos recorrentes. E por fim, a preditiva monitora e avalia as reais condições de funcionamento de uma máquina, oferecendo um melhor aproveitamento e planejamento das paradas para manutenção.

A chegada da Indústria 4.0 traz novos paradigmas para a manutenção preditiva, por exemplo, a Internet das Coisas (*Internet of Things (IoT)*), o Aprendizado de Máquina (*Machine Learning (ML)*) e o *Big Data*. Segundo Mattern e Floerkemeier (2010), IoT é uma visão de conectividade em que a internet passa a abranger diversos objetos além de computadores. Isso se relaciona diretamente com o conceito de *Big Data*, uma expressão relacionada à capacidade de processar uma quantidade muito grande de dados, como os gerados pelos equipamentos IoT conectados à rede. Essa riqueza de dados possibilita a

alimentação de sistemas de ML.

Esses conceitos possibilitam a inclusão de tecnologias mais avançadas para acompanhar o estado dos ativos, principalmente na manutenção preditiva. Um exemplo disso é o monitoramento remoto, através de sensores sem fio e uma produção de dados elevada, sem a necessidade de recursos humanos no local. Com esse volume de dados, especialistas podem prever situações com uma antecedência satisfatória e evitar qualquer pausa não programada.

Alguns parâmetros monitorados pela manutenção preditiva, de acordo com [Antonilli et al. \(1999\)](#), são temperatura, ruído, pressão e, por fim, vibração, também considerado o parâmetro mais utilizado para verificar as condições reais dos equipamentos segundo o autor.

O fenômeno de vibração se encontra em todos os lugares. Segundo [Silva \(2006\)](#), é a manifestação de um comportamento oscilatório em um sistema mecânico, resultante de uma troca repetitiva de energias cinéticas e potenciais. A análise de vibração pode ser realizada tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. No primeiro caso, a variável independente de um sinal de vibração é o tempo, e o sistema pode ser modelado por intermédio de equações diferenciais. No segundo, a frequência é a variável independente e a modelagem do sistema pode ser feita por funções de transferência de entrada e saída, em um modelo algébrico ao invés de diferencial. A transformada de Fourier permite a relação entre os dois domínios ([LATHI; GREEN, 2005](#)).

Com base no contexto exposto e, a partir de uma demanda identificada pela empresa Dynamox S.A., este trabalho propõe o estudo e a implementação de melhorias no processo de aquisição e armazenamento de dados de aceleração, medida por meio de acelerômetros ([TEVES, 2013](#)), em seus dispositivos comerciais.

A Dynamox é uma empresa de alta tecnologia situada em Florianópolis – Santa Catarina, que desenvolve sistemas de monitoramento e aquisição de dados de vibração e temperatura, e é especializada em manutenção preditiva realizada pela análise de vibração de ativos industriais. Sua solução envolve sensores, chamados de *DynaLoggers*, dispositivos de coleta automatizada e disponibilização via internet por diversas interfaces, chamados *DynaGateways*, e uma plataforma *Web* onde o histórico dos dados é armazenado e disponibilizado para análise, interpretação, diagnóstico de defeitos e prognóstico de falhas. Por fim, está incluso na solução um aplicativo para dispositivos móveis capaz de configurar os *DynaLoggers* e coletar seus dados manualmente.

A família atual de *DynaLoggers* produzem dados que permitem a detecção de diversos tipos de problemas. São alguns deles: desalinhamento, desbalanceamento, folga e cavitação de eixos e rotores, e defeitos em espiras de estatores de motores elétricos. Entretanto, limitações na taxa de amostragem, resolução das leituras e não-simultaneidade

na aquisição de diferentes eixos em determinadas situações impedem alguns casos específicos de serem verificados. Atualmente não é possível realizar o monitoramento de frequência de engrenamento em redutores, deficiência de lubrificação e falhas de rolamento em estágios iniciais, monitoramento de órbitas, e análise de fase.

Com isso, este trabalho tem a finalidade de aumentar a frequência máxima detectada pelos *DynaLoggers* e permitir o monitoramento dos três eixos de vibração simultaneamente. Além disso, busca-se melhorar a relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio (SNR)*) do sinal coletado com o incremento da resolução dos valores amostrados.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é analisar o fluxo de leitura e armazenamento de dados de aceleração dos sensores e, então, desenvolver e avaliar melhorias nesse processo para que seja possível, mantendo um consumo de energia compatível com o dos produtos atuais, extrair o máximo dos recursos ofertados pelos acelerômetros.

A partir do objetivo geral, foram definidos alguns objetivos específicos.

- Identificar as limitações de *firmware* dos sensores da Dynamox.
- Permitir o monitoramento de frequências de engrenamento em redutores, deficiência de lubrificação e falhas de rolamentos em estágios iniciais.
- Viabilizar o monitoramento de órbitas e análise de fase através da leitura triaxial simultânea.

1.2 Organização do texto

O trabalho está dividido em cinco capítulos. Inicialmente, uma introdução sobre os assuntos abordados no decorrer do texto, uma breve descrição da problemática e os objetivos gerais e específicos definidos são apresentados. A seguir os temas que servirão como base no decorrer do estudo e da implementação, bem como os recursos e tecnologias envolvidas são abordadas. No capítulo seguinte, a motivação que levou à Dynamox propor este projeto, em conjunto com a proposta e a metodologia definida para resolução do problema são descritas. De forma complementar, os resultados obtidos e uma breve discussão sobre os mesmos é realizada. E finalmente, no **Capítulo 5** é feita uma conclusão sobre a metodologia executada e os resultados adquiridos durante os testes.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentadas as bases teóricas, ferramentas e tecnologias necessárias para o desenvolvimento da solução proposta de forma detalhada.

2.1 Manutenção industrial

Há muito tempo a manutenção desempenha um papel importante na indústria, contudo a forma estruturada e sistematizada conhecida atualmente surgiu durante a primeira guerra mundial aplicada em aviões e submarinos. A partir de 1920, passou a também ser praticada em plantas industriais. Ainda assim, grande parte da evolução da manutenção se deu durante a segunda guerra mundial. Nessa época, deu-se início à criação de planos protocolados de manutenção em aeronaves e realizados testes a fim de definir probabilidades de falhas (CARRASCO, 2016).

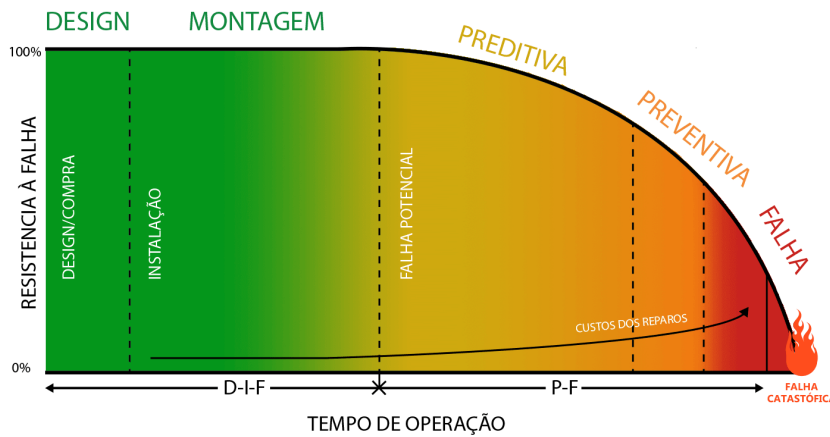
Desde então, com o advento da tecnologia e impulsionada pelas revoluções industriais, onde a busca pela substituição da mão de obra humana por máquinas automatizadas é realidade, tornou-se crucial a obtenção de métodos de manutenção eficientes. Dentre os tipos de manutenção industrial, destacam-se três: corretiva, preventiva e preditiva.

Segundo Almeida (2018), a manutenção corretiva ocorre quando observa-se uma condição de falha e/ou quebra em algum maquinário e se torna necessário agir no reparo do ativo. Este tipo de manutenção pode ser planejada para ser realizada nos intervalos de utilização, ou não planejada, quando não há possibilidade da máquina trabalhar após o defeito. Isso faz com que a manutenção corretiva tenha um custo elevado devido ao atraso de produção, funcionários ociosos e a compra de materiais de forma urgente.

Já a manutenção preventiva busca manter os ativos dentro do seu padrão de funcionamento por meio de ações de reparos planejados, com base nos manuais, vida útil das peças e no histórico de manutenção. Alguns benefícios da manutenção preventiva em relação à corretiva são a melhor utilização de recursos humanos, a redução do tempo de espera pela chegada de peças e maior confiabilidade dos ativos.

Por sua vez, a manutenção preditiva, busca indicar as reais condições de operação de uma máquina através do monitoramento de parâmetros relacionados à sua saúde, por exemplo: vibração, temperatura e ruídos (ALMEIDA, 2018). Estas inspeções são realizadas periodicamente e com instrumentos de medição específicos, na tentativa de definir um estado futuro com base nos dados coletados ao longo do tempo, analisando uma tendência nos parâmetros da máquina (BALDISSARELLI; FABRO, 2019). Devido à sua capacidade de antecipar falhas, a manutenção preditiva ganha destaque no cenário da Indústria 4.0.

Figura 1 – Curva de falha potencial.



Fonte: (Dynamox S.A., 2021)

Na Figura 1 é possível visualizar a curva de falha potencial (*Potential Failure (PF)*), que relaciona o tempo de operação de uma máquina com sua resistência a falhas, indicando qual tipo de manutenção está apto a detectar falhas potenciais durante seu período de funcionamento até ocorrer uma falha funcional, ou catastrófica, que tornaria a máquina inoperante. Alguns indicadores de falhas potenciais são elevação dos níveis de temperatura e vibração, queda de pressão e elevados níveis de ruídos, enquanto exemplos de falhas funcionais são quebra de rolamento e eixo travado.

A Figura 1 também evidencia a manutenção preditiva como o tipo de manutenção capaz de identificar problemas no período mais curto após a detecção de uma falha potencial. Algumas técnicas utilizadas por ela são testes de ultrassom, análise de fluidos, imagem infravermelha, testes de motor e análise de vibração. Essa última é a técnica mais utilizada para o monitoramento de ativos industriais segundo Antonioli et al. (1999).

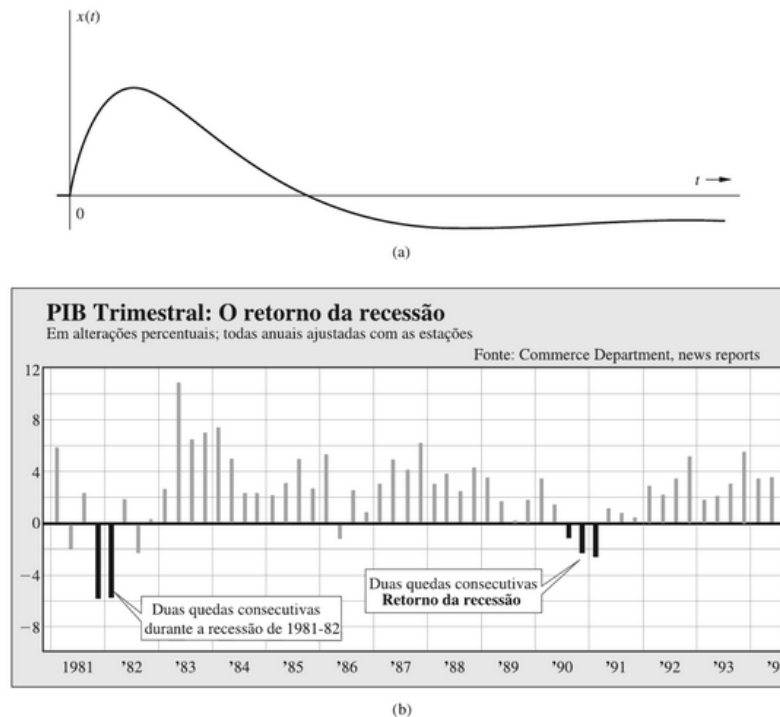
Finalmente, conforme discutido anteriormente, a evolução tecnológica e o surgimento da IoT elevou a demanda por sistemas de monitoramento automatizado, o que induziu um aumento nas possibilidades de aplicações e redução de custos desses sistemas (BALDISSARELLI; FABRO, 2019 apud KARDEC; NASCIF, 2005). Isso viabilizou economicamente o monitoramento de parâmetros como vazão, temperatura e, principalmente, vibração.

2.2 Análise de vibração

Sistemas de monitoramento automatizados voltados à Indústria 4.0 permitem a coleta de uma quantidade elevada de dados, o que permite a alimentação de sistemas de predição de problemas que utilizam técnicas de análise de vibração.

O fenômeno de vibração, é a manifestação de um comportamento oscilatório em

Figura 2 – Representação de sinal de tempo contínuo e discreto.



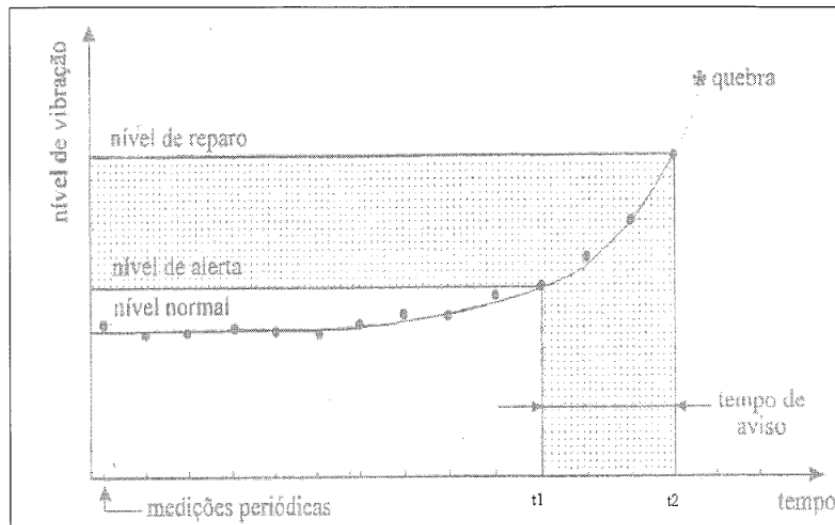
Fonte: (LATHI; GREEN, 2005)

um sistema mecânico, resultante de uma troca repetitiva de energias cinéticas e potenciais (SILVA, 2006). A repetição desse movimento de forma contínua, caracteriza uma vibração para determinada unidade de tempo e pode ser modelada matematicamente como um sinal em função dessa unidade, por exemplo $x(t)$. Este tempo gasto ao realizar um ciclo, é conhecido como período do sinal e a quantidade de ciclos executados dentro de uma unidade de tempo é chamada de frequência do sinal (SILVA, 2012).

Segundo Lathi e Green (2005), um sinal pode ser definido como um conjunto de dados ou informações em função de uma variável independente que, no caso de um sinal de vibração, pode ser o tempo ou a frequência. Esses sinais podem ser classificados em sinais de tempo contínuo e de tempo discreto. Quando um sinal é definido em todo o instante t , ele é chamado de contínuo, exibido na Figura 2(a). Se o sinal é definido apenas para valores discretos de t , ele é classificado como discreto, conforme apresentado em Figura 2(b). Sistemas computacionais, costumeiramente, utilizam sinais de tempo discreto. Portanto, para interpretar sinais da natureza, ao obtê-los precisa realizar um procedimento chamado de amostragem.

Este processo consiste em coletar amostras de um sinal originalmente de tempo contínuo em uma determinada frequência. Para que seja possível a reconstituição do sinal, é necessário respeitar o Teorema de Nyquist, que diz que a frequência em que este é amostrado – número de amostras por unidade de tempo – deve ser no mínimo igual ou

Figura 3 – Relação vibração RMS x Tempo.



Fonte: (ANTONIOLLI et al., 1999)

superior ao dobro da maior frequência presente no sinal em questão (LATHI; GREEN, 2005), evidenciando a importância da frequência de amostragem como um parâmetro da análise de vibração. Por exemplo, para que um sinal com informação útil na frequência de 10kHz possa ser interpretado, é preciso amostrá-lo, no mínimo em 20kHz.

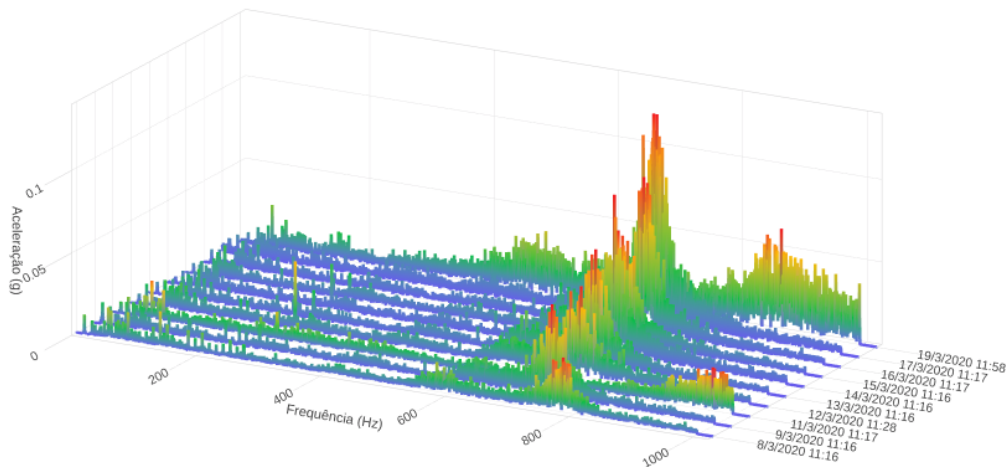
Segundo Silva (2012), as máquinas rotativas, quando em funcionamento, produzem vibrações características conhecidas. Porém, essas podem sofrer alterações devido ao tempo ou a alguma modificação na distribuição da energia vibratória no conjunto dos elementos que constituem a máquina. A seguir são apresentadas algumas técnicas que viabilizam a observação da evolução de vibrações.

2.2.1 Técnicas de análise de vibração

A análise de vibração pode ser realizada no domínio do tempo e no domínio da frequência. Eles podem ser relacionados pela transformada de Fourier (LATHI; GREEN, 2005). Segundo Antonioli et al. (1999), uma das técnicas de análise de vibração é o monitoramento do valor eficaz (RMS) do sinal de vibração. Mantendo uma comparação com valores característicos da máquina, é possível verificar se ela está trabalhando dentro de um limite aceitável ou existe alguma tendência em seu comportamento. A Figura 3 apresenta um exemplo em que foram realizadas N coletas e observou-se uma evolução nos níveis de vibração, que gerou um alerta para a equipe de manutenção.

A análise espectral, utiliza o domínio da frequência e permite a verificação de componentes e amplitudes em gráficos apropriados. Nesta técnica, a amplitude da vibração é o parâmetro tomado para a comparação com determinados valores característicos e avaliação do estado da máquina. A frequência é o dado indicativo da natureza do problema

Figura 4 – Análise espectral em cascata.



Fonte: (Dynamox S.A., 2021).

que pode estar causando um mau funcionamento. A partir da análise espectral, pequenas variações nos componentes espectrais podem ser mais facilmente detectadas, permitindo a detecção de diversos defeitos (ANTONIOLLI et al., 1999).

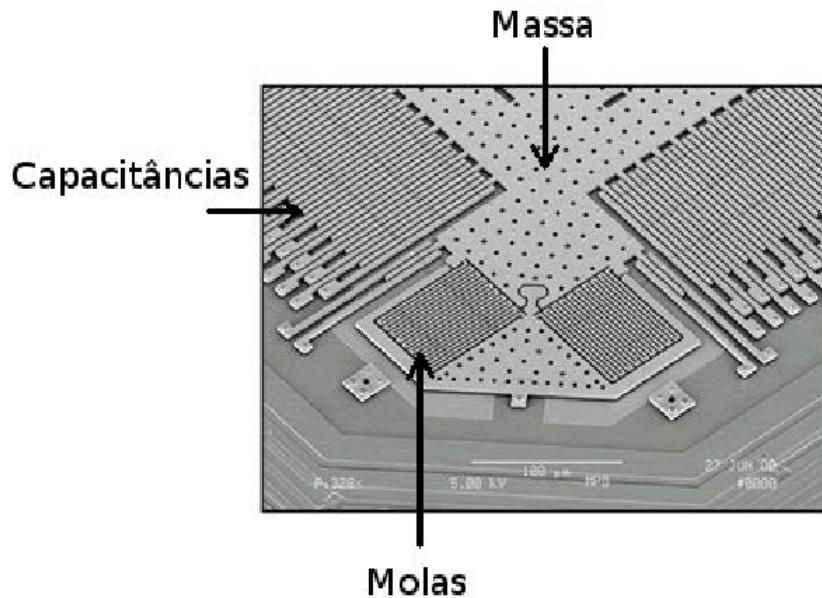
Na Figura 4, por exemplo, é exibida uma das telas da plataforma da Dynamox, trata-se de um gráfico em cascata da evolução da amplitude e das componentes de frequência em um eixo de vibração. Com essas informações, especialistas são capazes de tomar decisões sobre a disponibilidade da máquina.

Em ambas as técnicas, é primeiramente necessário obter de forma apropriada uma série temporal com dados brutos de aceleração por meio de um dispositivo de monitoramento adequado. Costumeiramente, utiliza-se acelerômetros.

2.2.2 Dispositivos de coleta

Segundo Teves (2013), um acelerômetro é um dispositivo eletromecânico com a capacidade de medir aceleração, ou seja, a taxa de variação da velocidade de um objeto sendo monitorado. A aceleração pode ser estática, como a força da gravidade, em muitos casos apresentada como um fator multiplicativo de $g = 9,8m/s^2$ (força gravitacional da Terra no nível do mar), ou dinâmica, induzida pela movimentação ou vibração do objeto. Os acelerômetros são capazes de medir a aceleração indiretamente. Eles utilizam uma massa em seu interior, que quando acelerada, sofre uma força inercial que pode ser medida (CALACHE, 2013). Existem acelerômetros que operam com base em diversos efeitos físicos, como os piezelétricos, piezo-resistivos, capacitivos e *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS). Usualmente, acelerômetros fornecem uma saída proporcional a um valor de aceleração. De acordo com Ramalho (2012), acelerômetros piezelétricos são amplamente

Figura 5 – Imagem microscópica de um acelerômetro MEMS capacitivo.



Fonte: (CALACHE, 2013 apud ACAR; SHKEL, 2003).

utilizados, porém, pesquisas apontam uma tendência à substituição para os do tipo MEMS. Isto devido ao seu tamanho, consumo energético e em muitos casos a já entregar o dado em formato digital, sem a necessidade de conversores.

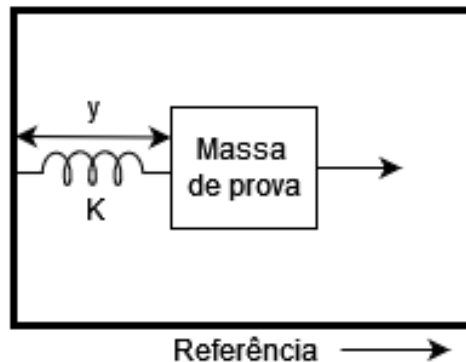
2.3 Acelerômetro MEMS

O termo *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS), em português sistemas microeletromecânicos, se refere a sistemas micrométricos basicamente compostos por um sensor, responsável por adicionar informações ao sistema, um circuito eletrônico, que realiza o tratamento deste sinal, e um atuador, que gera uma resposta para o controlador do sistema. Com o passar do tempo, este termo passou a ser utilizado para designar microssistemas sem atuadores. Estes dispositivos geralmente são produzidos em silício e com técnicas aproximadas às da construção de circuitos integrados (CALACHE, 2013 apud BEEBY et al., 2004).

Os acelerômetros MEMS podem ser modelados como um sistema com uma massa de prova conectada a uma referência por molas. Na Figura 5 é possível observar estes elementos. Neste caso, trata-se de um acelerômetro capacitivo e a referência são as placas paralelas da capacitância.

A Figura 6 apresenta o modelo conceitual. Devido à inércia, o deslocamento da massa de prova é diferente do deslocamento da referência. Esta diferença de posições, o coeficiente de elasticidade da mola (K), e o coeficiente de amortecimento (γ), possibilitam

Figura 6 – Conceito massa-mola para acelerômetros.



Fonte: Adaptado de (KAAJAKARI, 2009).

a medição da aceleração. Neste caso, o valor tem relação com a capacitância entre as placas (CALACHE, 2013). Existem outros tipos de acelerômetros MEMS além dos capacitivos, entretanto, ficam fora do escopo deste trabalho.

Segundo Teves (2013), algumas especificações importantes sobre acelerômetros são:

- Direção: Trata-se dos eixos (X, Y ou Z) em que o acelerômetro é capaz de detectar vibração/aceleração. Dispositivos sensíveis a um eixo específico são chamados de uniaxiais, e os que detectam os três, são conhecidos como tri-axiais.
- Frequência de amostragem: Quantidade de amostras por segundo que o acelerômetro é capaz de obter.
- Largura de banda: É a faixa de frequência em que o sensor está apto a amostrar.
- Fundo de escala: Aceleração máxima que o dispositivo consegue representar.
- Resolução: Menor aceleração detectável pelo sensor.
- Alcance dinâmico: Faixa de valores representáveis, da resolução até a saturação.
- Consumo energético: Muito importante em aplicações IoT e que utilizam bateria.
- Interface de comunicação: Analógico ou digital, sendo que no primeiro caso é necessário um conversor Analógico/Digital (*Analog-Digital Converter (ADC)*), e no segundo caso geralmente são utilizados protocolos de comunicação serial. Conversores e protocolos serão comentados posteriormente.

2.4 Sistemas embarcados

É possível observar sistemas computacionais em quase todos os lugares, incluindo computadores pessoais e servidores. Contudo, uma grande parte compõe sistemas embarcados em conjunto com outros componentes eletrônicos para executar uma função particular (VAHID; GIVARGIS, 1999). Sistemas embarcados podem ser definidos como um conjunto de *hardware* e uma aplicação em *software* com objetivo de auxiliar, monitorar ou controlar um equipamento. A palavra embarcado se origina do fato de fazerem parte de um sistema e, não estarem visíveis ao usuário na maioria dos casos. Segundo Vahid e Givargis (1999), alguns aspectos caracterizam os sistemas embarcados:

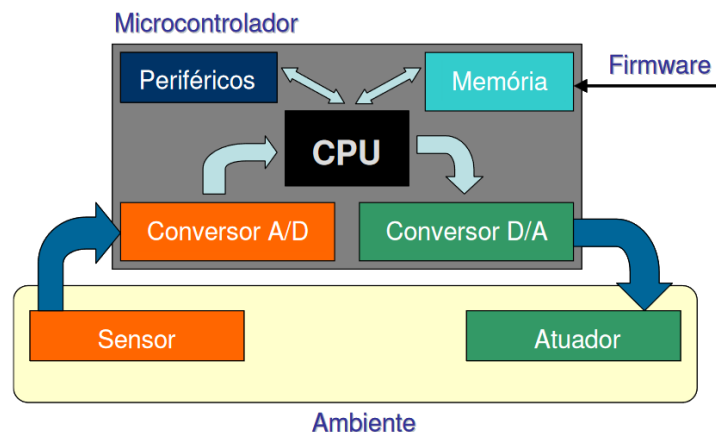
- Função única: Geralmente são produzidos para executar uma única função repetidamente, exceto quando o *software* embarcado é atualizado.
- Altamente limitado: Normalmente limitados por custo, recursos, tamanho e consumo de energia.
- Tempo-real: Tempo hábil de reagir aos fenômenos que monitora.

Em ocasiões em que o sistema embarcado utiliza baterias como fonte de energia, o baixo consumo de potência torna-se um requisito importante na construção do sistema como um todo. Esta categoria é amplamente utilizada em aplicações IoT devido a portabilidade e ao fato de poderem ser instalados em locais remotos, onde o alcance da energia elétrica cabeada pode ser um problema, como em máquinas e equipamentos em movimento.

Um exemplo de uma composição de componentes eletrônicos para formar um sistema embarcado pode ser visto na Figura 7. Ele é composto por um microcontrolador, que gerencia e controla os recursos a seguir:

- Periféricos: *Timers*, interfaces de comunicação serial *Serial Peripheral Interface (SPI)*, *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART)*, entradas e saídas digitais ou analógicas *General Purpose Input/Output (GPIO)* etc.
- Memória: Memórias voláteis como a *Random-Access Memory (RAM)* e não voláteis como a *Ferroelectric Random-Access Memory (FRAM)* e a *Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory (EEPROM)*.
- Conversores Analógico/Digital e Digital/Analógico: São tipos de periféricos que convertem sinais analógicos para digitais e vice-versa.
- Sensor: É uma das formas do sistema interagir com o ambiente real. Podem ser do tipo analógico e se comunicarem com o processador via um *ADC*, ou então digitais e utilizarem um periférico para integrá-los ao sistema, sendo os mais comuns as interfaces seriais *SPI*, *I2C* e *UART*.

Figura 7 – Exemplo de estrutura de um sistema embarcado.



Fonte: (CHASE; ALMEIDA, 2007).

- Atuador: Utilizado para realizar uma ação perceptível ao mundo real. Também pode ser analógico ou digital, como o *Light Emitting Diode (LED)*, alto falantes, entre outros.
- CPU: Unidade de processamento central, opera como o cérebro do sistema, realiza operações lógicas, aritméticas e a comunicação entre os demais recursos.

A Figura 7 ainda apresenta outro componente, o *firmware*, que é o *software* embarcado no sistema e contém sua regra de negócio, com instruções para o *hardware* disponível executar funções específicas.

2.5 Recursos de memória

Dispositivos de memória também podem compor sistemas embarcados. Seu objetivo é armazenar programa, dados utilizados por ele e dados temporários. Alguns modelos permitem acessos através da *Central Processing Unit (CPU)*, outros, diretamente por periféricos dedicados, como *Direct Memory Access (DMA)* e interfaces seriais. A partir deste contexto, diferentes tipos de memória se adéquam a finalidades diferentes. Neste trabalho, elas são componentes importantes devido à necessidade de armazenamento de dados de aceleração em uma curta janela de tempo.

As memórias do tipo voláteis não mantêm a integridade das informações quando o sistema não está energizado. Nesta categoria está a memória **RAM**, traduzindo do inglês: memória de acesso aleatório. Ela é formada por circuitos integrados e o nome é derivado do fato de ser possível acessar qualquer um de seus endereços a qualquer momento e em qualquer ordem. Ela considerada como de alta relevância entre as memórias em semicondutores devido à sua alta velocidade de acesso (MUROGA, 2003). É costumeiramente utilizada para armazenar dados durante a execução de programas quando o processador

os requer. Isso ocorre porque o acesso é feito de forma ágil em relação as memórias não voláteis (FERGUSON; HEBELS, 2003).

As memórias não voláteis, por sua vez, viabilizam a consistência dos dados persistidos mesmo sem a presença de energia elétrica. Exemplos dessa categoria são as memórias *Flash* e *EEPROM*. Estes tipos de memória podem ser apagadas e reescritas eletronicamente possibilitando atualizações de *firmware* do sistema sem a alteração de *hardware*. Outro exemplo é a *FRAM*, outro tipo de memória de acesso aleatório que utiliza um material ferroelétrico em sua construção. Ela oferece alguns benefícios, como o baixo consumo de energia, alta velocidade de operação e a não-volatilidade (JI et al., 2019).

Como um dos objetivos deste trabalho é atingir frequências de amostragem maiores, e este processo envolve o armazenamento dos dados adquiridos, um maior desempenho da memória também será necessário.

2.6 Protocolos de comunicação serial

Esta seção apresenta uma breve descrição sobre duas interfaces de comunicação serial inseridas no contexto de sistemas embarcados, os protocolos *I2C* e *SPI*.

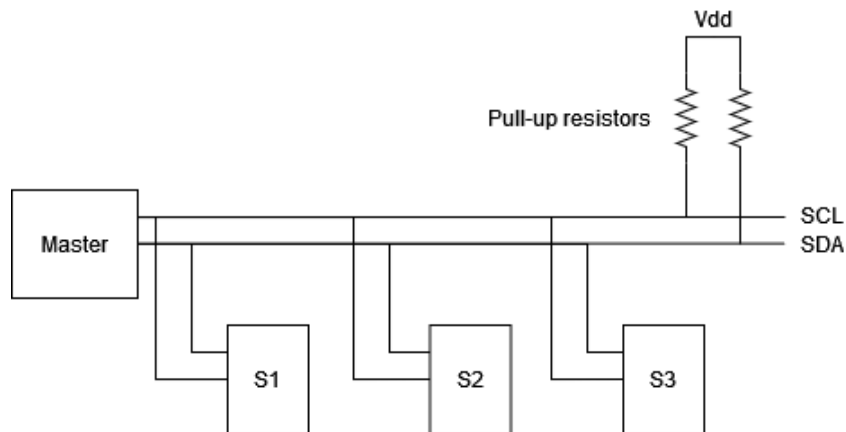
2.6.1 I2C

O protocolo *I2C*, foi idealizado pela Philips Semiconductors (agora NXP Semiconductors), tem o objetivo de estabelecer uma comunicação entre dois ou mais circuitos integrados. Apenas duas linhas de barramento são necessárias para que a comunicação ocorra, uma linha de dados, chamada de *Serial Data Line (SDA)*, e uma de *clock*, conhecida por *Serial Clock Line (SCL)*. Essas linhas operam como *open-drain* e são capazes apenas de forçar um nível lógico baixo, para gerar um nível lógico alto, utiliza-se resistores de *pull-up* e os dispositivos apenas liberam o barramento. Na Figura 8, é apresentado um barramento *I2C* com um mestre e três escravos (S1, S2 e S3). (LEENS, 2009).

As trocas de mensagens são feitas de forma bidirecional e *half-duplex*, orientadas a pacotes de 8 bits, e podem atingir velocidades de 100 kbps, 400 kbps, 1 Mbps, 3,4 Mbps. Caso a comunicação seja unidirecional, a taxa pode chegar até 5 Mbps (NXP Semiconductors, 2021). Os componentes conectados na interface seguem o padrão mestre e escravo. Cada dispositivo é identificado por um endereço de 7 bits, resultando em um máximo de 128 em um único barramento. O mestre comanda a comunicação gerando o sinal de *clock (SCL)* e do envio do endereço do escravo desejado.

Para iniciar a comunicação, o mestre gera uma condição de *START*, que consiste em forçar um nível lógico baixo na linha de *SDA* enquanto a trilha de *SCL* está em nível lógico alto. A seguir, ele envia um bloco de 8 *bits* formado por 7 *bits* de endereço do escravo

Figura 8 – Barramento I2C.



Fonte: Adaptado de (MANKAR et al., 2014).

com o qual deseja-se comunicar e um *bit* sinalizando se a operação é de escrita ou leitura (1 ou 0, respectivamente). O escravo, responde com um *bit* de *Acknowledgement* (*ACK*) e o mestre passa enviar os dados. Ao recebê-los, o escravo responde outro *ACK*. A condição de parada (*STOP*) é alcançada quando o mestre libera a linha de *SDA* enquanto a linha de *SCL* estiver em nível lógico alto (LEENS, 2009).

2.6.2 SPI

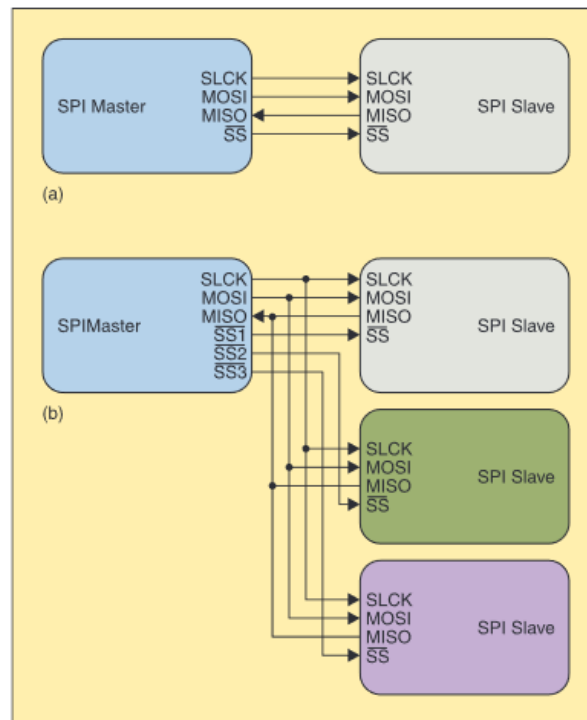
Segundo Leens (2009), o protocolo SPI foi desenvolvido pela Motorola com o objetivo de permitir a comunicação entre um microcontrolador e seus periféricos com a utilização de 4 barramentos. Ele também opera segundo o modelo mestre-escravo. A Figura 9 apresenta dois exemplos de configurações de uma interface SPI. Na Figura 9(a) há apenas um escravo e, na Figura 9(b), três.

As trilhas que compõe o barramento SPI e suas finalidades são apresentadas a seguir:

- *Serial Clock Line* (*SCLK*): Sinal de *clock*. É gerado pelo mestre e conectado a todos os periféricos. As demais trilhas são síncronas a esse *clock*.
- *Master In Slave Out* (*MISO*): Sinal de dados no sentido escravo para mestre.
- *Master Out Slave In* (*MOSI*): Sinal de dados no sentido mestre para escravo.
- *Chip Select* (*CS*): Na Figura 9 referido como *SS*, é o sinal de seleção que indica com qual escravo o mestre está se comunicando.

Conforme exibido na Figura 9, o barramento SPI também pode trabalhar com diversos escravos. O mestre indica uma condição de *START* por intermédio da configuração do *CS* para do escravo desejado para o modo ativo e gerando um sinal de *clock* suportado

Figura 9 – Barramento SPI.



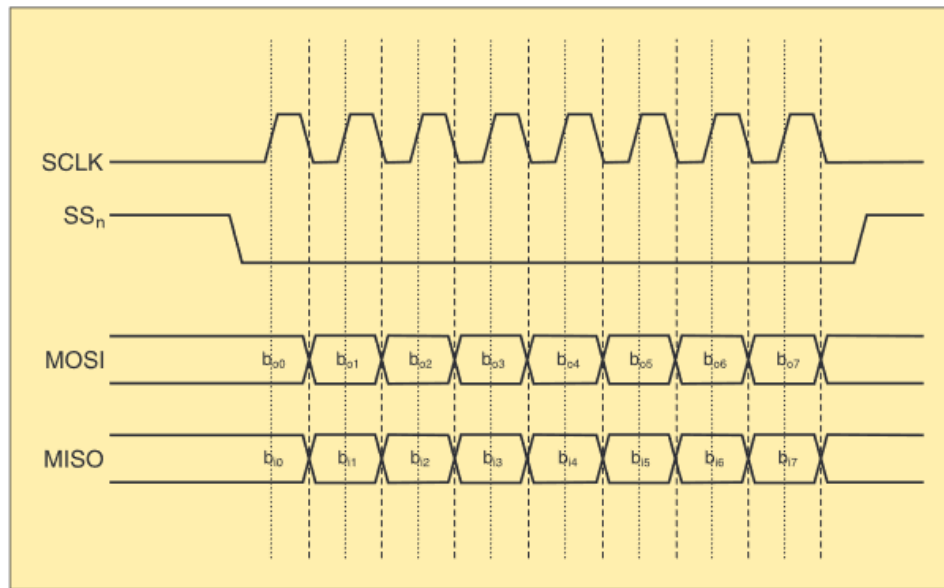
Fonte: (LEENS, 2009).

por ambos dispositivos na trilha *SCLK*. Alterar o estado da linha *CS* para o modo inativo, resulta em uma condição de *STOP* e a comunicação é finalizada. O protocolo *SPI* não possui mecanismos de *ACK* e nenhum outro tipo de controle de fluxo, não define taxas de transmissões máximas e também não conta com nenhum sistema particular de endereçamento (LEENS, 2009). Na Figura 10, é apresentado um exemplo de transmissão de um dado de 8 bits. Nela é observar o sinal de *CS* controlando o início e o fim da comunicação. As regras de negócio da comunicação são dependentes dos dispositivos envolvidos. Eles definem seus *clocks* e taxas de transmissão máximas e como as condições de *read* e *write* são geradas.

Apesar do *I2C* oferecer recursos de confiabilidade, como o *ACK*, e o fato do circuito compreender menos conexões, o *SPI* possui alguns pontos positivos em relação ao *I2C* no que diz respeito a vazão de dados. Ele não tem mecanismos de controle de fluxo, é *full-duplex* e não estabelece taxas máximas de transmissão.

No contexto deste trabalho, em que os objetivos envolvem o incremento na velocidade da comunicação entre o periférico e o processador, quando possível será feita a opção pelo protocolo *SPI*.

Figura 10 – Linhas SPI.



Fonte: (LEENS, 2009).

2.7 Sistema de aquisição de dados da Dynamox

Na solução *DynaPredict*, da Dynamox, os *DynaLoggers* são responsáveis pela produção de dados para a análise de vibração de máquinas rotativas, voltada à manutenção preditiva. Eles são sistemas embarcados, compostos por um microcontrolador, sensores de vibração e temperatura e um módulo *Bluetooth low energy (BLE)*, que permite a comunicação com dispositivos de coleta, como o *DynaGateway* ou o aplicativo *mobile DynaPredict*.

Na Figura 11, são apresentados os três modelos de *DynaLoggers* produzidos pela Dynamox atualmente. O modelo branco é o Temperatura de contato e Aceleração (*TcA*)+, o amarelo é o Assíncrono (*AS*) e o azul é o *High Frequency (HF)*.

As características relacionadas à aquisição de dados mais relevantes para este estudo são apresentadas na Tabela 1. Estas propriedades fazem com que cada sensor tenha sua especialidade. O *TcA+* é voltado para detecção de problemas em baixa frequência, como desalinhamento, desbalanceamento, folga e cavitação, defeitos nas espiras de rotor e estator de motores elétricos e falhas de rolamento em estágios avançados. O modelo *AS* é focado na detecção de eventos de vibração transientes. O *HF*, é o modelo mais potente e é indicado para a detecção de defeitos em engrenagens, conjuntos de transmissão e rotores de máquinas críticas de alta rotação. A vida útil da bateria de um *DynaLogger* pode chegar até 5 anos, dependendo de seu perfil de utilização (Dynamox, 2021).

O *Firmware* que gerencia o sistema, foi desenvolvido na linguagem de programação C e não possui sistema operacional (*bare-metal*). Ele está estruturado em quatro camadas

Figura 11 – *Dynaloggers* HF, TcA+ e Assíncrono.

Fonte: (Dynamox S.A., 2021).

Tabela 1 – Características dos *Dynaloggers*.

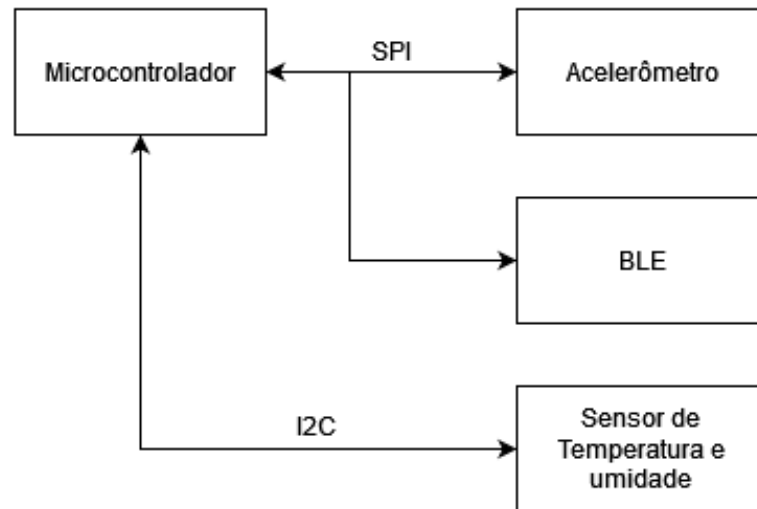
Modelo	Frequência de amostragem máxima (Hertz)		Resolução (bits)
	Triaxial	Uniaxial	
TcA+	1024	1024	8
AS	1024	1024	8
HF	3200	12800	8

Fonte: (Dynamox S.A., 2021).

de abstração: *Hardware Abstraction Layer* (HAL), *drivers*, módulos de gerenciamento dos *drivers* e aplicações com as regras de negócio.

A Figura 12 apresenta o diagrama de blocos do *DynaLogger HF*. Nela estão indicados quais protocolos são utilizados na comunicação entre processador e periféricos. Nota-se que o protocolo *SPI* é adotado para o acelerômetro. Conforme discutido anteriormente, esse protocolo oferece maior vazão de dados que o *I2C*. Essa característica se torna relevante já que o dispositivo pode trabalhar com taxas elevadas de aquisição de dados.

O sensor de vibração utilizado neste produto é um acelerômetro tri-axial *MEMS* capacitivo, com capacidade de amostrar dados em até 25600 Hertz (Hz) e com resolução máxima de 16 bits. Contudo, atualmente, o *HF* disponibiliza frequências de amostragem máximas de 3200 Hz para aquisições tri-axiais e 12800 Hz para aquisições uniaxiais. Adicionalmente, ambas aquisições são realizadas com uma resolução de 8 bits. Um dos objetivos deste trabalho é aproveitar melhor os recursos oferecidos por este acelerômetro.

Figura 12 – Diagrama de blocos simplificado de um *DynaLogger* HF.

Fonte: Do Autor.

Os *DynaLoggers* oferecem dois modos de monitoramento de vibração: o contínuo e o espectral. Durante o monitoramento contínuo, o *DynaLogger* produz dados globais de velocidade e aceleração **RMS** em intervalos de monitoramento configuráveis e os armazena em sua memória interna. Ambas as métricas são calculadas partindo de uma série temporal de aceleração adquirida com um número de amostras, frequência de amostragem e resolução fixas. O monitoramento espectral, por sua vez, realiza o equivalente a uma gravação do sinal bruto de aceleração em sua memória interna. É possível configurar a quantidade de eixos, o número de amostras e a frequência de amostragem, segundo as características indicadas na [Tabela 1](#). É responsabilidade dos dispositivos de coleta manter o *DynaLogger* no modo de monitoramento apropriado para cada situação.

Durante o monitoramento espectral ou na aquisição da série temporal do monitoramento contínuo, a camada de *drivers* é acionada. Ela configura o processador para que ele seja capaz de ler e armazenar dados mais rapidamente e configura o acelerômetro conforme opções selecionadas, envolvendo eixos, quantidade de amostras, frequência de amostragem, faixa dinâmica, e filtros (caso necessário). Inicia-se, então, o laço de leitura definido pela quantidade de amostras. Em cada iteração, os dados dos eixos selecionados são solicitados via **SPI** e uma função de sincronização garante a coerência da aquisição de dados conforme a frequência de amostragem do acelerômetro. Ela é realizada através da avaliação do sinal de *new data* do acelerômetro, que gera um pulso a cada amostra produzida. No monitoramento contínuo, os dados são armazenados na memória **RAM** para posterior processamento e no monitoramento espectral, eles são armazenados na memória *Flash* para posterior consulta pelos dispositivos de coleta.

3 PROPOSTA DE PROJETO

Este capítulo apresenta a proposta para a demanda de melhoria identificada pela Dynamox e a metodologia adotada durante o desenvolvimento deste trabalho. Suas etapas foram derivadas sistematicamente dos requisitos levantados e das condições de contorno identificadas.

3.1 Proposta

A proposta é uma melhoria no fluxo de aquisição de dados dos sensores da Dynamox, no que diz respeito a frequência de amostragem, simultaneidade da leitura dos eixos de vibração e resolução dos dados, com intuito de que possam produzir dados capazes de viabilizar o monitoramento de frequências de engrenamento em redutores, deficiência de lubrificação e falhas de rolamentos em estágios iniciais, bem como o monitoramento de órbitas e a análise de fase.

Com base no funcionamento do sistema apresentado na [seção 2.7](#) e nos objetivos desta proposta, foi possível levantar os seguintes requisitos adicionais a serem atingidos pelo produto com as modificações executadas neste projeto:

- Para permitir a análise de órbita, os dados dos três eixos do acelerômetro devem ser adquiridos simultaneamente.
- Para permitir a identificação de problemas em estágios iniciais de rolamentos, a aquisição deve poder ser realizada 12800 e 25600 Hz de frequência de amostragem.
- Segundo definições do time de processamento de dados da Dynamox, a aquisição deve poder ser realizada com 8 e 16 bits, trazendo uma melhoria na [SNR](#) do sinal.
- Manter o padrão de consumo energético entre 3 e 5 anos.

3.2 Metodologia

Nesta seção está apresentada a metodologia para o desenvolvimento da melhoria no processo de aquisição de dados dos acelerômetros considerando um *DynaLogger*. Ele é um sistema embarcado composto basicamente por um *Display* de [LEDs](#) para indicação de funcionamento e alerta, um banco de sensores para monitoramento de temperatura e vibração, um módulo [BLE](#) para comunicação e um processador que rege o funcionamento do sistema.

Primeiramente, foi realizado um levantamento dos cenários de aplicação e uma avaliação do cenário atual. Posteriormente, realizou-se uma modelagem do cenário atual para comparação e identificação de possibilidades de melhoria. Finalmente, foram implementadas as melhorias levantadas na comparação. Então, testes de desempenho e qualidade dos dados foram executados.

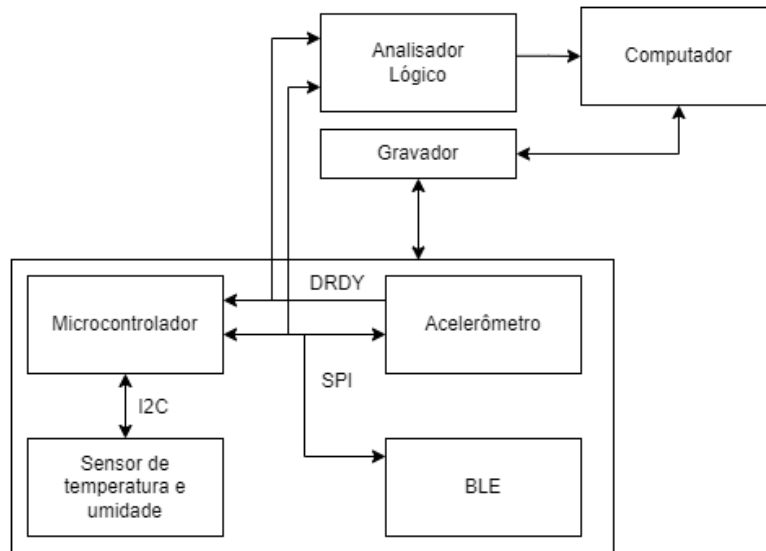
Nesse sentido, as seguintes etapas compuseram a metodologia:

1. **Cenários de aplicação:** Um dos principais estudos para a realização deste trabalho é a determinação dos cenários de aplicação que deseja-se atender com as melhorias para os *DynaLoggers*. É importante entender suas especificidades e como ele deve se comportar para atendê-las. Ao final dessa sondagem, tornou-se possível a identificação de requisitos para essa funcionalidade.
2. **Avaliação do cenário atual:** De forma complementar, realizou-se um estudo de instrumentação da comunicação entre o acelerômetro e o processador do modelo de *DynaLogger* envolvido para caracterização do perfil de tempo do processo de aquisição de dados.
3. **Fluxo teórico ideal:** Nesta etapa foram levantadas todas as operações que fazem parte do fluxo de aquisição de dados com base nas informações dos *datasheets* dos componentes envolvidos, posteriormente foi construída uma linha do tempo considerando as durações teóricas para cada operação a fim de verificar a viabilidade de atender os objetivos.
4. **Comparação entre fluxo ideal e fluxo atual do produto:** Com base no estudo realizado, nesta etapa, realizou-se uma comparação entre as o fluxo ideal teórico e o real, o que possibilitou a identificação das principais oportunidades de melhoria.
5. **Desenvolvimento de melhorias:** Nesta etapa, as implementações das melhorias, propriamente ditas, foram efetivamente implementadas.
6. **Testes de desempenho e qualidade dos dados:** Nesta última etapa, duas rotinas de testes foram propostas e executadas. A primeira delas tem o objetivo de garantir a sanidade dos dados adquiridos e, posteriormente, caracterizar a resposta em aceleração do dispositivo como um todo. A segunda visa a verificação da viabilidade energética das melhorias.

3.3 Avaliação do cenário atual

Nesta seção, são apresentadas as operações que fazem parte do fluxo atual de captura de dados levando em consideração o diagrama de blocos da [Figura 12](#). A análise

Figura 13 – Instrumentação dos equipamentos.



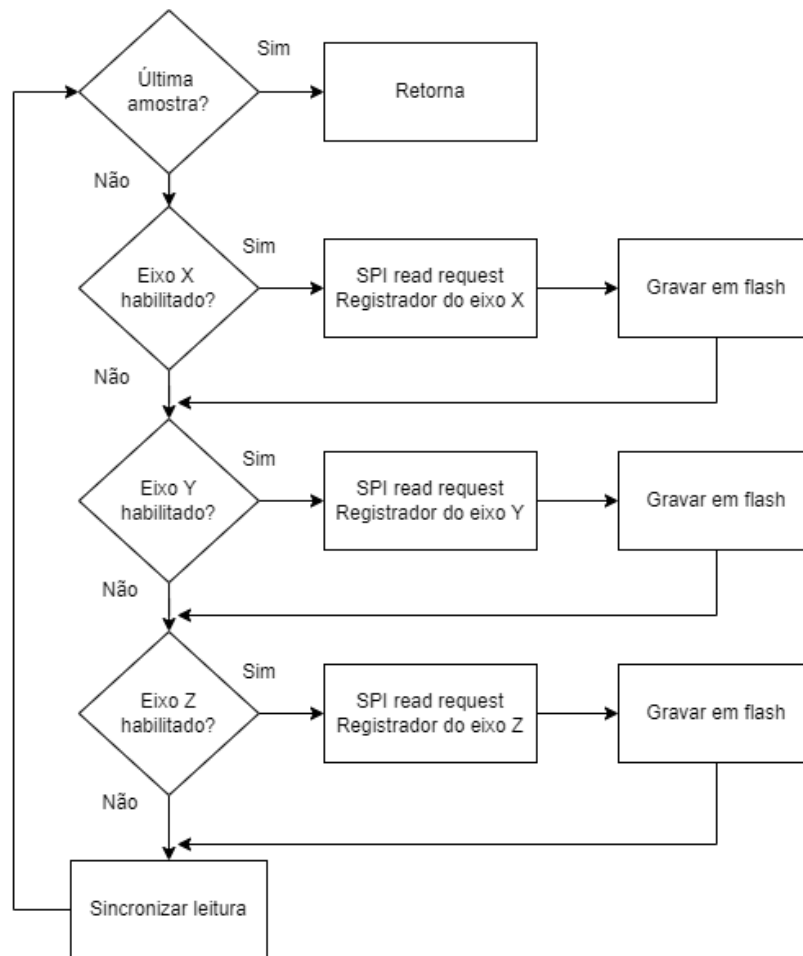
Fonte: Do Autor.

compreendeu dois componentes: um microcontrolador com *clock* de até 16 Mega Hertz (MHz) e um acelerômetro MEMS. Considerou-se interfaces I2C e SPI e resoluções de 8 e 16 *bits*. Adicionalmente, o acelerômetro em questão disponibiliza um sinal chamado DRDY, que indica a finalização de um ciclo de aquisição de dados. Durante o funcionamento normal do *DynaLogger*, o seu processador opera com *clock* de 1MHz. Contudo, durante a execução das rotinas de aquisição de dados, essa frequência é aumentada para 12MHz. Nessas configurações, a taxa de operação da interface SPI foi de 6MHz.

A Figura 13 apresenta o arranjo experimental utilizado na instrumentação desta etapa e suas conexões. Ele conta com um analisador lógico que oferece 8 entradas digitais e uma frequência de amostragem de 48MHz; um *DynaLogger*; um computador; e um gravador. Com esse *setup*, foi possível instrumentar o comportamento das linhas da interface SPI e o do sinal DRDY, permitindo a determinação da duração de cada etapa do fluxo de leitura.

Sempre que o *DynaLogger* vai exercitar o seu acelerômetro, primeiramente, é necessário configurá-lo, conforme os parâmetros apresentados na Tabela 1, respectiva ao modelo *DynaLogger HF*. A seguir, inicia-se o laço de aquisição de dados apresentado Figura 14. A cada iteração, uma requisição SPI dos dados associados aos eixos habilitados é realizada e o seu retorno é armazenado na memória *flash*. Para evitar a perda de amostras, é necessário garantir que a duração desse processo seja inferior ao intervalo de amostragem. Adicionalmente, para evitar a leituras de amostras repetidas, é necessário sincronizar essas iterações com o sinal DRDY. Nesse sentido, após a sua execução, o *DynaLogger* monitora o sinal DRDY, esperando pela próxima borda de subida, para liberar a execução da iteração seguinte. Anteriormente ao desenvolvimento deste trabalho, esta espera era realizada por

Figura 14 – Laço de captura de dados.



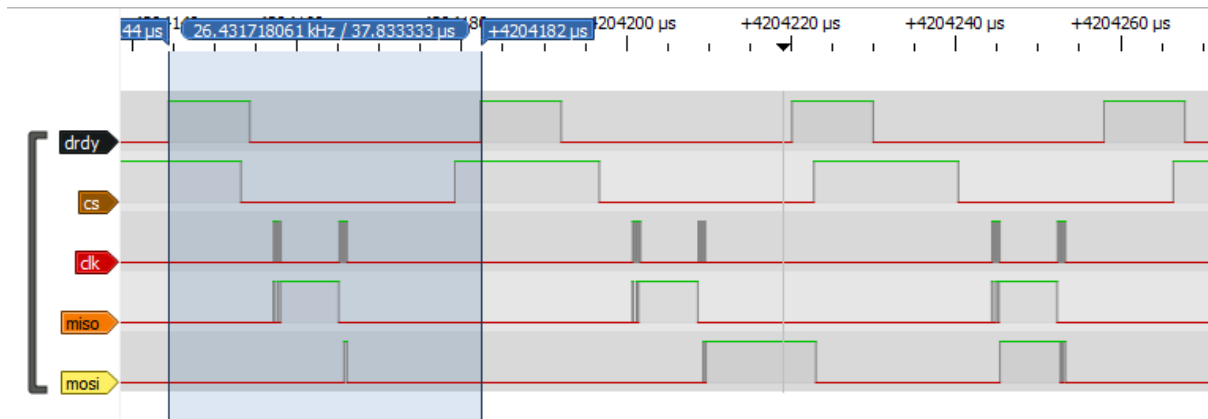
Fonte: Do Autor.

polling de GPIO.

A Figura 15 apresenta uma captura de tela do analisador lógico durante a execução de três iterações de leitura com 25600Hz de frequência de amostragem. As linhas de SPI (CS, SCLK, MISO e MOSI) e o sinal DRDY são compreendidos. Os marcadores em azul indicam a frequência de amostragem efetiva do acelerômetro em questão em 26431Hz. Nesse caso, observa-se um valor superior ao nominal, mas que se encontra dentro da faixa especificada no *datasheet* do dispositivo. Levando-se em consideração a maior excursão documentada, verifica-se a necessidade de manter a duração de uma iteração do laço de aquisição a, no máximo, 37us. Esse limite se aplica a todas as configurações de leitura disponíveis, seja ela triaxial, uniaxial, e com 8 ou 16 bits de resolução.

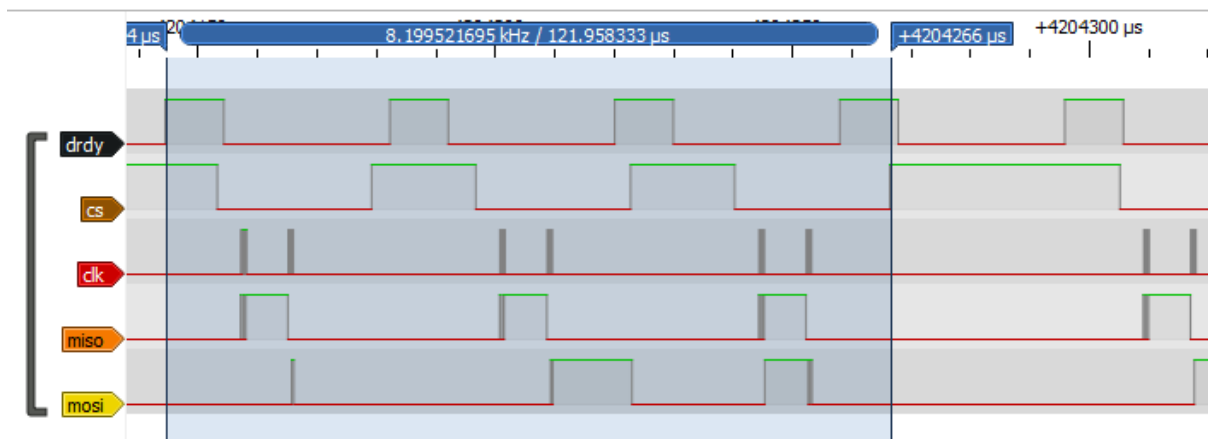
A título de estudo, sabendo-se da sua inviabilidade, realizou-se um teste com a versão vigente de *firmware*, habilitando-se os três eixos na aquisição. O resultado é apresentado na Figura 16. Nesse caso, nota-se uma duração total de cerca de 122us, fazendo com que amostras sejam perdidas. Nesse contexto, evidencia-se uma das oportunidades de

Figura 15 – Largura do DRDY.



Fonte: Do Autor.

Figura 16 – Processo de aquisição triaxial.



Fonte: Do Autor.

melhoria citadas anteriormente.

3.4 Fluxo teórico ideal de captura de dados

Esta seção documenta as durações esperadas para as operações do processador e do acelerômetro envolvidas no laço de aquisição de dados, segundo as especificações definidas nos *datasheets* de ambos os dispositivos, com o objetivo de avaliar a sua viabilidade.

Em relação ao microcontrolador, identificou-se como relevante os três parâmetros citados a seguir, com durações especificadas na Tabela 2. O tempo de execução de suas instruções, o tempo de gravação em *flash*, ou *Flash programming time* (FPT), definido com base no *clock* da memória *flash* chamado de *Flash clock* (FCLK), através da expressão $FPT = 1/FCLK$. A versão vigente do *firmware* do *DynaLogger* utiliza 476kHz e é possível aumentar esse valor para até 1MHz. E por fim, a duração da comunicação SPI, considerando o tempo de carregamento de dados recebidos em seus registradores internos, chamado

Tabela 2 – Caracterização de tempos do microcontrolador.

Operação	Tempo
<i>Instruction cycle</i>	1/clock
Gravar 1 <i>word</i>	30 * FPT
Gravar +1 <i>word's</i>	6 * FPT
<i>SPI setup time</i>	75ns

Fonte: *Datasheet* do componente.

setup data time.

Em relação ao acelerômetro, identificou-se ser apenas necessário considerar o seu respectivo *setup data time*, de cerca de 20ns

Nesse sentido, notou-se que a operação mais crítica, do ponto de vista de sua duração, é a escrita de dados na *flash*. Contudo, utilizando um *clock* de 12 MHz para o processador e 1 MHz para a flash, estima-se que a duração deste armazenamento não deveria exceder 18us. O que acaba permitindo uma duração de cerca de 19us para a transmissão de dados via *SPI*. Considerando que, nessas condições, a taxa da interface pode atingir até 6 *Mega bits per second* (Mbps) e que, no pior caso, considera-se o tráfego de 7 bytes, teoricamente há tempo suficiente para a iteração completa.

3.5 Comparação entre fluxo ideal e fluxo atual do produto

Uma vez definida a viabilidade teórica para execução do processamento necessário, realizou-se uma análise de instrumentação mais detalhada sobre cada etapa que compõe as iterações do laço de aquisição. Durante sua execução, notou-se que a escrita de dados na *flash* e entre requisições *SPI* consecutivas estavam demorando mais que o esperado.

Realizou-se, portanto, uma investigação no código e notou-se a possibilidade de otimização das configurações da flash e refatoração da máquina de estados de controle da interface *SPI*, a fim de diminuir o tempo entre essas requisições. Nessa etapa, também foi possível observar uma demora entre a borda de subida do sinal *DRDY* e o início da comunicação *SPI*. Nesse sentido, identificou-se a possibilidade de reordenação de algumas operações envolvidas nesse caminho crítico.

Definiu-se, portanto, cinco implementações de melhorias:

1. **Novo fluxo de captura:** Nesta etapa, foi implementado um novo fluxo de captura, que permitiu utilizar de forma mais eficiente os recursos dos componentes.
2. **Máquina de estados do *SPI*:** A alteração dessa máquina de estados permitiu a redução do tempo entre as requisições, trazendo mais velocidade na coleta dos dados.

3. **Gravação em *flash*:** O formato em que os dados estão dispostos influencia no tempo de gravação, uma alteração nesse ponto gerou um impacto positivo no processo de salvar em *flash*.
4. **Segmentação dos módulos acelerômetro:** Devido ao fato de tratar-se de um tempo muito curto para a realização dos procedimentos e a forma com que as funções são declaradas e onde estão, afeta no tempo de *CALL* das mesmas, algumas alterações foram feitas para que o compilador otimizasse alguns desses processos.
5. **Métodos de sincronização:** O método de sincronização via *polling* de **GPIO** foi substituído por uma interrupção alimentada pelo mesmo sinal de novo dado, com o objetivo de diminuir o consumo energético enquanto o sistema aguarda uma nova amostra.

O **Capítulo 4** relata detalhadamente o processo de implementação de cada uma delas.

4 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta detalhadamente o processo de desenvolvimento do software embarcado e a execução rotinas de testes especificados no [Capítulo 3](#).

4.1 Implementação do novo fluxo de captura

A primeira melhoria mapeada era relacionada ao fluxo de aquisição de dados, permitindo uma utilização mais eficiente dos recursos do microcontrolador e do acelerômetro envolvidos.

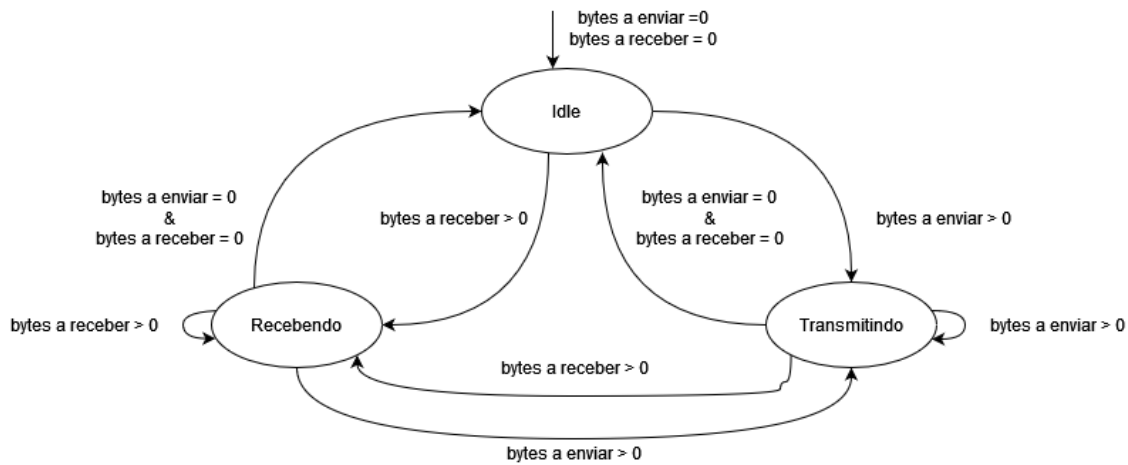
Um recurso explorado, é a função de auto incremento de registradores que o acelerômetro oferece, isto é, o dispositivo mestre pode solicitar a leitura de um registrador e caso outro *byte* seja enviado na mesma transação *SPI*, o acelerômetro responde o valor do registrador seguinte. Considerando os endereços do registradores referentes aos dados de aceleração dos eixos x, y e z estarem organizados consecutivamente no banco de registradores do acelerômetro, foi possível utilizar esse recurso para fazer a leitura em apenas uma requisição, mesmo na configuração tri-axial. A fim de permitir todas as configurações disponíveis, criou-se uma lógica anterior ao laço de aquisição, que define a quantidade total de bytes que será requisitada utilizando esse recurso e o endereço do primeiro registrador a ser solicitado em função dos eixos e resolução selecionados.

Adicionalmente, reestruturou-se a máquina de estados de controle da interface *SPI*. Como o barramento é compartilhado entre acelerômetro e módulo *BLE*, historicamente, a versão de *firmware* vigente dos *DynaLoggers* durante a execução deste trabalho, utiliza uma biblioteca única que rege a interação do microcontrolador com ambos os dispositivos. E, para garantir o seu correto funcionamento com o módulo *Bluetooth*, há a necessidade de inclusão de *delays* entre os blocos de transmissão. Adicionalmente, o funcionamento da biblioteca, é controlado por meio de interrupções que, apesar de promoverem um melhor aproveitamento energético da transmissão, não são ótimas em relação à duração da comunicação como um todo.

Com isso, é possível realizar a leitura dos valores sem a necessidade de três transações no caso tri-axial, onde o processo de ativar o *CS* para iniciar a troca de mensagens era realizado três vezes como apresentado na [Figura 16](#). Desta forma, uma etapa foi adicionada antes da iteração de captura, onde se é obtido a quantidade de *bytes* a serem solicitados e qual o primeiro, dependendo dos eixos, e a resolução habilitados.

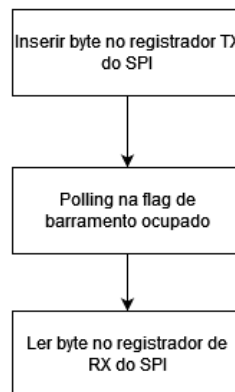
Para permitir um melhor entendimento, do funcionamento dessa biblioteca, o seu comportamento foi modelado em um diagrama de máquina de estados apresentada na

Figura 17 – Máquina de estados SPI.



Fonte: Do Autor.

Figura 18 – Novo formato de requisição SPI.



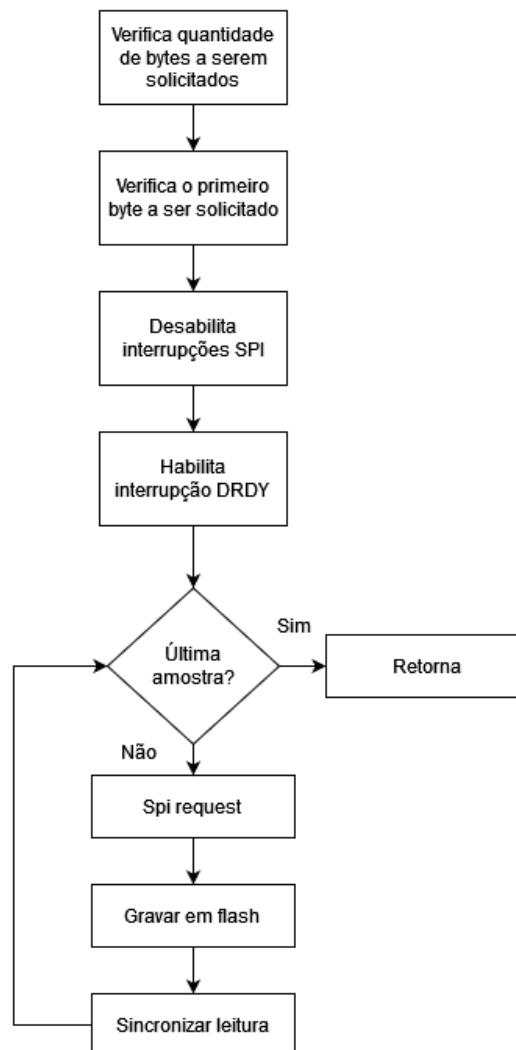
Fonte: Do Autor.

Figura 17.

Com essas informações, definiu-se o que seria o comportamento mínimo necessário para a correta interação com o acelerômetro por intermédio do fluxograma apresentado na Figura 18. A seguir, esse fluxo foi implementado e o seu funcionamento validado.

Posteriormente, a forma em que os dados são gravados na *flash* foi alterada para blocos, visto que desta forma os dados são escritos mais rapidamente. Uma requisição SPI recebe por parâmetro o primeiro *byte* a ser lido, uma quantidade e um ponteiro para uma estrutura a ser preenchida com os valores, esta estrutura então é gravada na flash. Com estas alterações, foi obtido o fluxo apresentado na Figura 19, onde o procedimento de habilitar a interrupção de DRDY está apresentado na próxima seção.

Figura 19 – Novo fluxo de captura de dados.

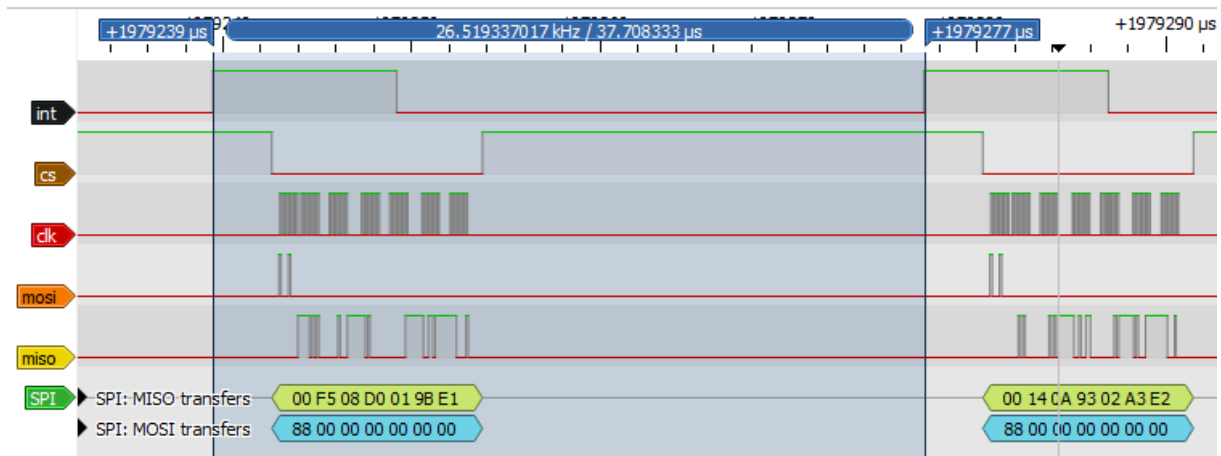


Fonte: Do Autor.

4.2 Segmentação dos módulos envolvidos na captura

Durante o desenvolvimento percebeu-se a possibilidade da utilização destas melhorias nos demais acelerômetros de outros produtos, o que levou a uma refatoração do módulo chamado também de acelerômetro, de forma que ficasse genérico e permitisse trabalhar com outros *drivers* abaixo dele. Algumas etapas que antes eram realizadas pelo *driver* agora são realizadas por esse serviço genérico que gerencia os acelerômetros e fica encarregado de utilizar o *driver* específico da sua aplicação, para configurá-lo, obter os dados e salvá-los na memória. Esse procedimento permitiu algumas funções a terem o atributo *inline* em suas declarações, indicando ao compilador para copiar o seu conteúdo para onde a função é chamada, sem a necessidade de literalmente chamá-la durante a execução. A abstração é importante também para a escalabilidade do código.

Figura 20 – Resultado do novo fluxo de captura de dados.



Fonte: Do Autor.

4.3 Alteração do método de sincronização

Com o objetivo de atingir o requisito relacionado ao consumo energético, uma alteração na forma de sincronização foi implementada. Uma interrupção disparada pela borda de subida do sinal de novo dado foi configurada a fim de manter o sistema em *low-power mode* enquanto aguarda uma nova amostra. Este modo desabilita algumas funções do microcontrolador, fazendo com que seu consumo energético diminua, enquanto o atual *polling* de **GPIO** mantinha o micro em normal funcionamento.

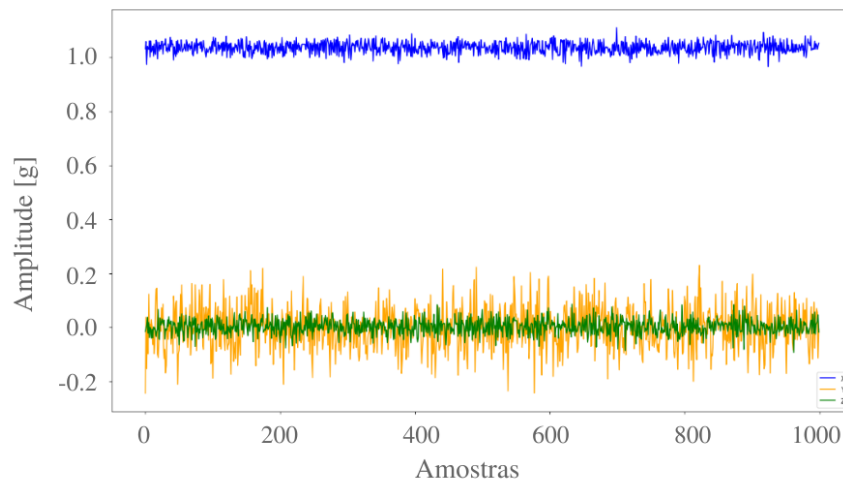
4.4 Resultado

Ao final de todos os procedimentos realizados durante o desenvolvimento, obteve-se êxito na captura de dados em todas as configurações desejadas, a **Figura 20** exibe o novo comportamento das linhas **SPI**, em uma leitura tri-axial, com 16 *bits* de resolução e 25600Hz de frequência de amostragem. Percebe-se a proximidade das requisições pela linha de *clock* e, como todas estão dentro de apenas uma transação, o **CS** foi ativo apenas uma vez. Assim que a gravação em *flash* é finalizada, o restante do tempo do período o microcontrolador aguarda em *low-power*, trazendo um impacto grande quando a leitura é feita em frequências menores, onde o período é maior.

4.5 Testes de desempenho e qualidade dos dados

Nesta etapa foi proposta a execução de dois cenários de testes diferentes: um para garantia da sanidade do processo de aquisição e um para caracterização da coerência dos dados produzidos. O primeiro caso é composto por testes com o sensor em repouso com a gravidade e posteriormente sobre um calibrador de vibração com amplitude e

Figura 21 – Sensor em repouso.



Fonte: Do Autor.

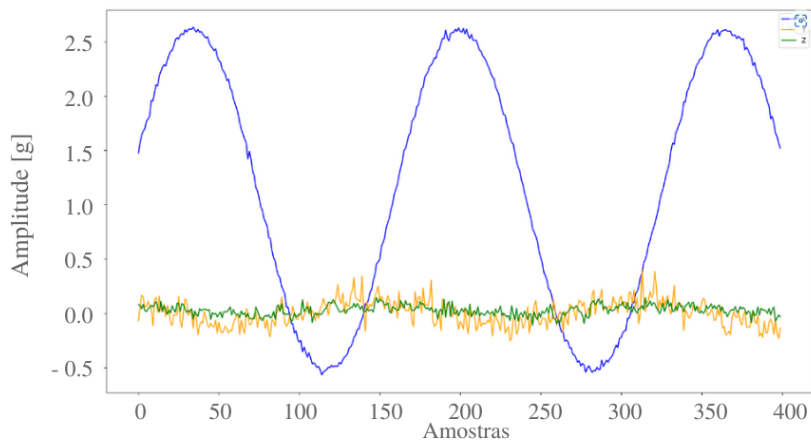
frequência conhecidas. No segundo caso, uma ferramenta de análise de vibração da Dynamox foi utilizada. Ela é composta por um acelerômetro robusto com 24 *bits* de resolução e capacidade de amostragem de até 100kHz, como referência para comparar o desempenho da aquisição do *DynaLogger*, um *Shaker* com vibração controlável, onde foi alocado os dois sensores, e um *Script* que gerencia os componentes, executa os procedimentos e disponibiliza os resultados em forma de relatório para que possa ser analisado. O sistema calibrador e a ferramenta de análise de vibração foram disponibilizados pela Dynamox em sua sede. A última etapa de testes, foi o levantamento do consumo energético do sistema e a comparação com o perfil atual.

Para avaliar a sanidade dos dados, o *DynaLogger* foi configurado nas condições extremas de funcionamento, os três eixos habilitado, 16 *bits* de resolução e frequência de amostragem em 25600Hz. Então a memória do microcontrolador fora extraída e o processamento dos dados foi realizado em *Python* com um algoritmo que converte os dados brutos coletados em dados de aceleração e plota gráficos no domínio do tempo e da frequência.

Para o primeiro teste do primeiro cenário, com o acelerômetro em repouso, espera-se uma série temporal com suas amostras representando valores próximos de 1g no eixo X e próximos de 0 nos demais eixos, visto que o sensor está com seu eixo X alinhado com a gravidade e em uma superfície plana. A Figura 21 apresenta o gráfico gerado a partir dos dados brutos extraídos do *DynaLogger*. Percebe-se uma coerência na imagem em relação a amplitude dos eixos, o que comprova a sanidade dos dados.

O segundo teste do primeiro cenário, foi realizado com o sensor sobre um calibrador. Trata-se de um equipamento capaz de gerar uma senoide com uma frequência de 159,2Hz e amplitude de 1g RMS em uma direção. Com o sensor sobre este equipamento, espera-se

Figura 22 – Sensor sobre calibrador, domínio do tempo.



Valor pico a pico em [g]

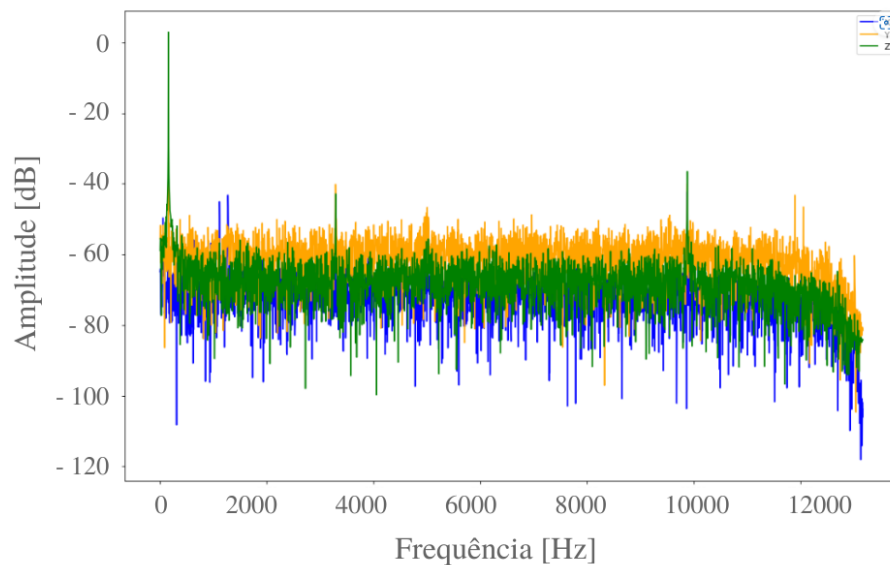
3,3695068359375

Valor RMS em [g]

1,16690

Fonte: Do Autor.

Figura 23 – Sensor sobre calibrador, domínio da frequência.

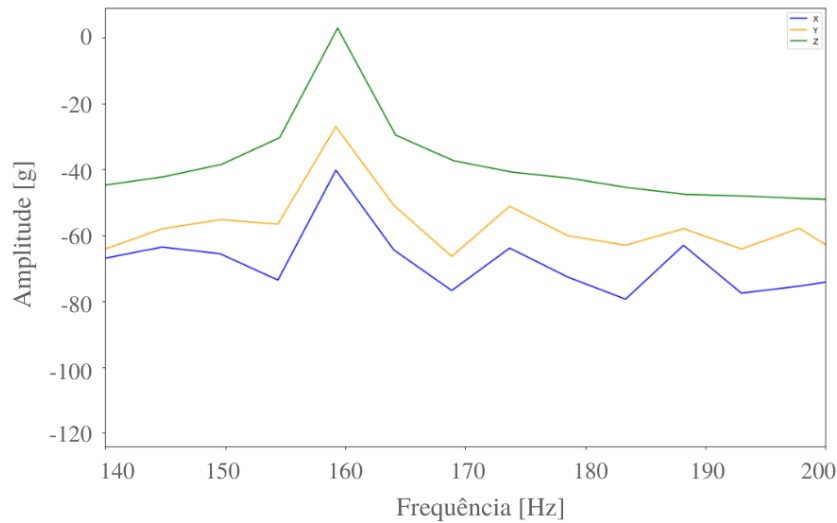


Fonte: Do Autor.

que os dados obtidos sejam capazes de representar esse comportamento. Na Figura 22 é apresentado o sinal do domínio do tempo acompanhado dos valores de pico a pico e de RMS do sinal calculados a partir da série temporal de dados brutos. Percebe-se que sua média não foi removida, visto que está com um *offset* de a 1g relacionado a gravidade, e seu valor de RMS calculado está muito próximo de 1g conforme o esperado.

Já na Figura 23 é exibida a representação do sinal no domínio da frequência, gerado utilizando a transformada de Fourier. Com a imagem, visualiza-se a faixa total do espectro

Figura 24 – Sensor sobre calibrador, domínio da frequência, com zoom.



Fonte: Do Autor.

representada pelo *DynaLogger*, chegando próximo aos 13kHz, para uma melhor observação a Figura 24 exibe um *zoom* na área de interesse, próximo aos 159,2Hz e é possível perceber a maior energia do sinal concentrada nessa região, também conforme o esperado.

A partir destes resultados confirma-se que o sensor está coletando os dados de maneira correta e sendo capaz de adquirir com precisão o comportamento de uma superfície vibratória.

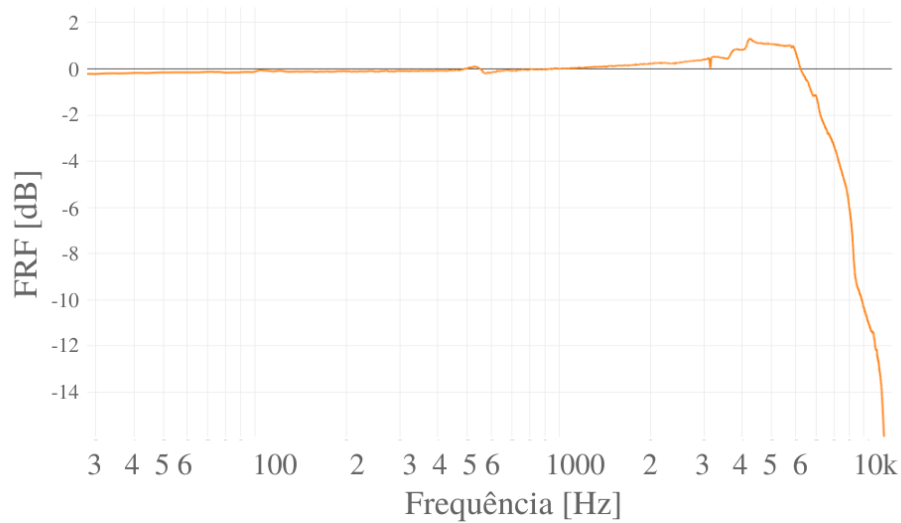
Para o segundo caso, o teste realizado com a ferramenta de análise de vibração da *Dynamox* foi utilizado para caracterizar a resposta em frequência do sistema *DynaLogger* como um todo, bem como a caracterização do espectrograma, a fim de verificar se algum tipo de *aliasing* ou perda de amostras está ocorrendo durante a aquisição.

Considerando o *DynaLogger* como um todo, um *Sistema linear invariante no tempo (SLIT)*, a saída deste sistema é o sinal medido pelo seu acelerômetro, enquanto a entrada, é o sinal que excita todos os sistemas envolvidos. Para medir o sinal de entrada, utilizou-se o acelerômetro robusto de referência. A resposta em frequência $H(\omega)$ de um *SLIT* pode ser obtida pela equação 4.1, onde $Y(\omega)$ e $X(\omega)$ são respectivamente as densidades espectrais de potência da saída e da entrada.

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \quad (4.1)$$

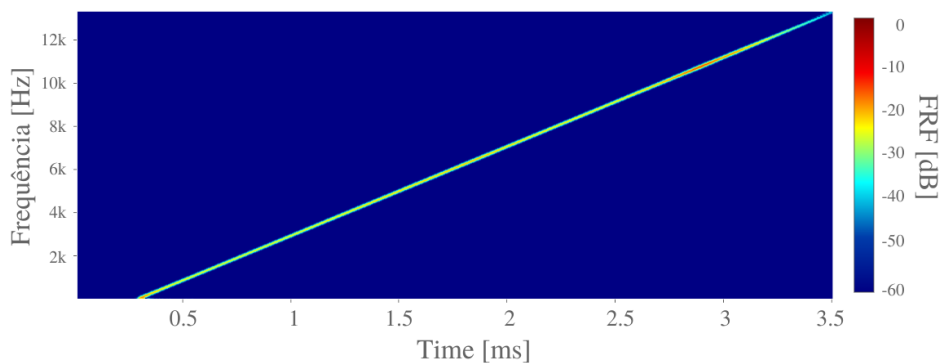
Deste modo para obter-se a resposta em frequência, foi necessário excitar o *Shaker* com um sinal de vibração que varre todas as frequências que o sensor é capaz de amostrar (0 a 12,8kHz), um sinal também conhecido como *sweep*. Então, os dados do *DynaLogger* e do acelerômetro de referência são coletados e sincronizados via correlação-cruzada. O

Figura 25 – Resposta em frequência.



Fonte: Do Autor.

Figura 26 – Espectrograma.

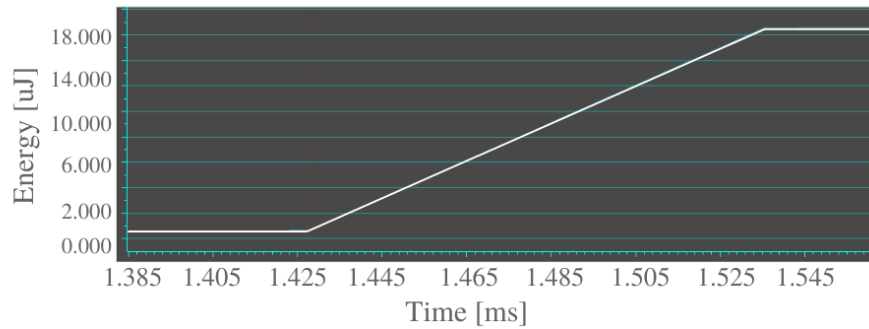


Fonte: Do Autor.

próximo passo foi então calcular a densidade espectral de potência, aplicar na equação 4.1 e gerar o gráfico apresentado na Figura 25. O gráfico está apresentando uma resposta com alguns ganhos nas regiões de mais alta frequência, que podem estar ocorrendo devido ao sistema como um todo estar montado com o pino, resina e os demais componentes do *DynaLogger*, conforme respaldo de analistas de vibração da Dynamox, esta curva está dentro do esperado e os resultados são satisfatórios.

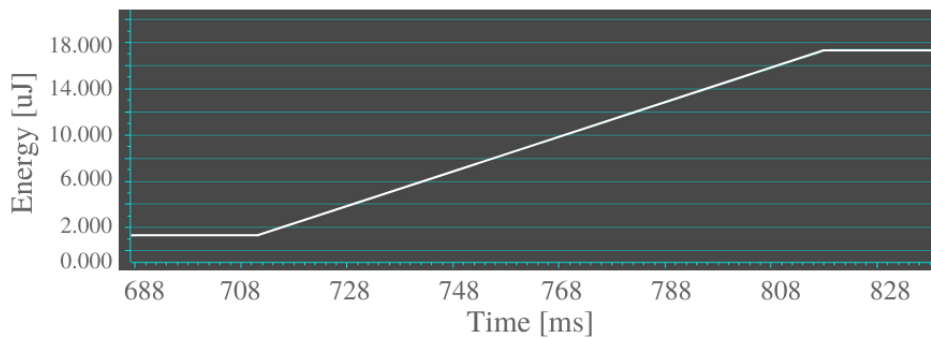
De forma complementar, a ferramenta também nos entrega o espectrograma, apresentado na Figura 26, que representa a energia nas frequências excitadas pelo *Shaker* durante um período de tempo. Conforme este gráfico, confirma-se que o sinal não possui componentes de frequência refletidas para dentro do espectro e que não está ocorrendo perda de amostras durante a aquisição.

Figura 27 – Consumo durante aquisição no fluxo novo.



Fonte: Do Autor.

Figura 28 – Consumo durante aquisição no fluxo atual.



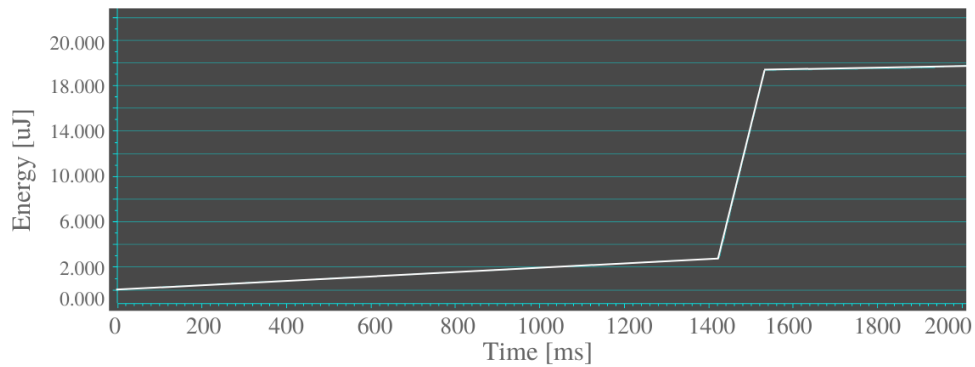
Fonte: Do Autor.

4.6 Levantamento do consumo energético

Para o levantamento do consumo energético, uma metodologia já consolidada foi utilizada. Trata-se da avaliação da energia gasta durante procedimentos atômicos, cujos valores alimentam um sistema capaz de prever o tempo de vida da bateria com base em um perfil de funcionamento. Os valores são obtidos através de uma ferramenta de análise de energia *built-in* no gravador do fabricante do microcontrolador. A partir dos resultados desse sistema, foi comparado o consumo do fluxo atual e após as melhorias.

A Figura 27 apresenta o consumo em uJ da aquisição de 2500 amostras de 16 bits com frequência de amostragem de 12800Hz após as melhorias. Do gráfico foi extraído o seguinte valor de energia consumida: 15,916uJ. A Figura 28 realiza o mesmo teste com o produto atual, porém, conforme a Tabela 1, suportando apenas 8 bits de resolução e não realizando leituras tri-axiais simultaneamente nesta frequência. O resultado obtido foi um consumo energético de 16,15uJ por eixo, um total de 48,45uJ. Desta forma, o teste deixou explícito que as melhorias também trouxeram benefícios quanto ao consumo energético do sensor, que apesar de adquirir mais *bytes*, consome menos energia. Com isso, é possível afirmar que, caso seja utilizado o mesmo perfil de uso do produto atual, a expectativa de vida da bateria se mantém entre 3 e 5 anos.

Figura 29 – Consumo durante aquisição no fluxo novo em 25k6Hz.



Fonte: Do Autor.

De forma complementar, outro teste de consumo foi realizado e apresentado na Figura 29 com a frequência de 25600Hz disponível após as otimizações. Utilizando a mesma quantidade de amostras que o teste anterior, o resultado foi um consumo de aproximadamente 17,5uJ. Sendo este, outro resultado positivo quanto ao consumo energético e que agrega a conclusão relativa a perspectiva de vida da bateria.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho se propôs a analisar o *software* embarcado de um sensor de temperatura e vibração, sem fio e com conectividade *Bluetooth* produzido e comercializado pela empresa Dynamox e voltado para manutenção preditiva inserida no contexto da indústria 4.0. Com o objetivo de entender suas limitações em relação à gama de problemas que ele permite monitorar e implementar melhorias no que diz respeito a frequência de amostragem, simultaneidade da leitura dos eixos de vibração e resolução dos dados.

A metodologia adotada permitiu levantar os cenários de aplicação para estas melhorias, levando em consideração as limitações de *hardware* do acelerômetro e microcontrolador. Trata-se da geração de dados capazes de permitir o monitoramento de frequências de engrenamento em redutores, deficiência de lubrificação e falhas de rolamentos em estágios iniciais, bem como o monitoramento de órbitas e a análise de fase. Com isso, estabeleceram-se os requisitos de funcionamento do sistema.

Com os requisitos definidos, fora levantado o fluxo atual da captura de dados, que envolveu a instrumentação dos dispositivos envolvidos, agregando um conhecimento mais aprofundado sobre o funcionamento do sensor. Esta etapa também permitiu a identificação das principais oportunidades de melhoria a serem implementadas.

A seguir, executou-se uma análise de viabilidade por meio dos dados da documentação dos componentes presentes na solução. Após comprovada a possibilidade, iniciou-se o desenvolvimento das melhorias.

Com base na implementação e com os resultados da caracterização de resposta em frequência, espectrograma e consumo energético documentados no [Capítulo 4](#), conclui-se que os objetivos deste estudo foram cumpridos. Os dados obtidos com o sensor em repouso e sobre o calibrador se mostraram coerentes com os valores esperados, aferindo a sanidade dos dados lidos. Utilizando a ferramenta de validação da Dynamox, comprova-se a faixa de frequência coberta pelo *DynaLogger* com algumas interferências da construção do corpo do sensor.

Desta forma, sendo possível gerar dados de aceleração em 25600Hz, dos três eixos simultaneamente, com 16 *bits* de resolução, com uma vida útil de no mínimo 3 anos é possível afirmar que a implementação atende a todos os objetivos e requisitos levantados durante o desenvolvimento.

Para o futuro, devido aos recursos do acelerômetro terem sido explorados, alguns trabalhos podem ser realizados em outras partes do sistema embarcado para continuação das melhorias do projeto como um todo, como a melhoria do *throughput* do BLE e a

exploração de outros *hardware's* para a composição do sistema, com o objetivo de ampliar suas capacidades em relação a processamento e armazenamento e sensores capazes de monitorar outras grandezas, diferentes de vibração.

REFERÊNCIAS

- ACAR, C.; SHKEL, A. M. Experimental evaluation and comparative analysis of commercial variable-capacitance mems accelerometers. *Journal of micromechanics and microengineering*, IOP Publishing, v. 13, n. 5, p. 634, 2003. Citado na página 28.
- ALMEIDA, P. S. D. *Manutenção Mecânica Industrial–Conceitos Básicos e Tecnologia Aplicada*. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 23.
- ANTONIOLLI, E. B. et al. Estudo comparativo de técnicas de medição e análise de vibrações para a manutenção preditiva em mancais de rolamentos. Florianópolis, SC, 1999. Citado 4 vezes nas páginas 21, 24, 26 e 27.
- BALDISSARELLI, L.; FABRO, E. Manutenção preditiva na indústria 4.0. *Scientia cum industria*, v. 7, n. 2, p. 12–22, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 20, 23 e 24.
- BEEBY, S. et al. *MEMS mechanical sensors*. [S.l.]: Artech House, 2004. Citado na página 28.
- BRANCO FILHO, G. *A Organização, o planejamento eo controle da manutenção*. [S.l.]: Ciência Moderna, 2008. Citado na página 20.
- CALACHE, D. C. Caracterização de um acelerômetro baseado em sistemas microeletromecânicos (mems). *Rio de Janeiro*, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 29.
- CARRASCO, F. J. C. Historical evolution of industrial maintenance in relation to knowledge management. *DYNA: Ingeniería e Industria*, Publicaciones DYNA, v. 91, p. 590–595, 2016. Citado na página 23.
- CHASE, O.; ALMEIDA, F. Sistemas embarcados. *Mídia Eletrônica. Página na internet*: <www.sbaiovem.org/chase>, capturado em, v. 10, n. 11, p. 13, 2007. Citado na página 31.
- Dynamox. *Especificações técnicas DynaLogger HF*. Versão 4.4. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://dynamox.net/img/Datasheet-Dynalogger-HF-PT.pdf>>. Citado na página 35.
- Dynamox S.A. *Solução DynaPredict*. 2021. Disponível em: <<https://dynamox.net/dynapredict/>>. Citado 3 vezes nas páginas 24, 27 e 36.
- FERGUSON, S.; HEBELS, R. Chapter 6 - computer systems and technology. In: FERGUSON, S.; HEBELS, R. (Ed.). *Computers for Librarians (Third Edition)*. Third edition. Chandos Publishing, 2003, (Topics in Australasian Library and Information Studies). p. 167–196. ISBN 978-1-876938-60-4. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781876938604500124>>. Citado na página 32.
- GROOTE, P. D. Maintenance performance analysis: a practical approach. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, MCB UP Ltd, 1995. Citado na página 20.

- JI, Q. et al. Effects of total ionizing dose on single event effect sensitivity of frams. *Microelectronics Reliability*, v. 95, p. 1–7, 2019. ISSN 0026-2714. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026271418311442>>. Citado na página 32.
- KAAJAKARI, V. Practical mems: Analysis and design of microsystems mems sensors (accelerometers pressure sensors gyroscopes). *Sensor Electronics, Actuators, RF MEMS, Optical MEMS, and Microfluidic Systems*, 2009. Citado na página 29.
- KARDEC, A.; NASCIF, J. Manutenção–função estratégica, qualitymark. *Ltda, Rio de Janeiro*, 2005. Citado na página 24.
- LATHI, B. P.; GREEN, R. A. *Linear systems and signals*. [S.l.]: Oxford University Press New York, 2005. v. 2. Citado 3 vezes nas páginas 21, 25 e 26.
- LEENS, F. An introduction to i2c and spi protocols. *IEEE instrumentation & measurement magazine*, IEEE, New York, NY, v. 12, n. 1, p. 8–13, 2009. ISSN 1094-6969. Citado 4 vezes nas páginas 32, 33, 34 e 35.
- MANKAR, J. et al. Review of i2c protocol. *International Journal of Research in Advent Technology*, Citeseer, v. 2, n. 1, 2014. Citado na página 33.
- MATTERN, F.; FLOERKEMEIER, C. From the internet of computers to the internet of things. In: *From active data management to event-based systems and more*. [S.l.]: Springer, 2010. p. 242–259. Citado na página 20.
- MUROGA, S. Ultra large-scale integration design. In: MEYERS, R. A. (Ed.). *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*. Third edition. New York: Academic Press, 2003. p. 245–267. ISBN 978-0-12-227410-7. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0122274105007961>>. Citado na página 31.
- NXP Semiconductors. *I2C-bus specification and user manual*. Rev. 7. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>>. Citado na página 32.
- PARIDA, A.; KUMAR, U. Maintenance performance measurement (mpm): issues and challenges. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Emerald Group Publishing Limited, 2006. Citado na página 20.
- RAMALHO, G. L. B. Monitoramento de condição de máquina utilizando acelerômetro mems. *Revista Tecnologia*, v. 33, n. 1, p. 63–72, 2012. Citado na página 27.
- SILVA, B. T. V. d. Bancada para análise de vibração: análise de falhas em máquinas rotativas. Universidade de Taubaté, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- SILVA, C. W. D. *Vibration: fundamentals and practice*. [S.l.]: CRC press, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 25.
- SIMÕES, J. A. M. *Indicadores de performance em manutenção industrial: utilização, valor e disponibilidade de informação*. Tese (Doutorado) — FEUC, 2011. Citado na página 20.
- SIMÕES JÚNIOR, V. Implantação de um sistema de gestão para manutenção industrial. 2014. Citado na página 20.

TEVES, A. d. C. *Otimização de acelerômetros MEMS eletroestáticos de alto desempenho*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 21, 27 e 29.

VAHID, F.; GIVARGIS, T. Embedded system design: A unified hardware/software approach. *Department of Computer Science and Engineering University of California*, v. 114, 1999. Citado na página 30.