

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

BRUNO MARTINS DO NASCIMENTO

**Solução *wireless* de baixo custo para
monitoramento de condição de operação de
máquinas rotativas**

São José - SC

dezembro/2023

SOLUÇÃO *WIRELESS* DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO DE CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

Projeto de Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Coordenadoria do Curso de
Engenharia de Telecomunicações do campus
São José do Instituto Federal de Santa Ca-
tarina

Orientador: Prof. Carlos Boabaid Neto, Dr.

São José - SC

dezembro/2023

RESUMO

A *Internet of Things* (IoT) desempenha um papel essencial ao possibilitar a coleta e transmissão de dados em tempo real. Isto possibilita a interconexão de dispositivos e máquinas, criando-se uma rede. Sensores colocados nas máquinas podem coletar dados sobre sua condição operacional e estes dados podem ser transmitidos, armazenados, processados e analisados. A possibilidade dos dados ficarem disponíveis em tempo real é uma vantagem para o usuário, permitindo-o verificar a todo momento as condições das máquinas. A integração dessas tecnologias possibilita a aplicação de estratégias de manutenção preventiva e preditiva, apresentando-se como uma abordagem promissora para a otimização industrial. Como exemplo, pode-se citar o monitoramento dos níveis de vibração em máquinas rotativas, que são um indicador de sua eficiência, bem como de possíveis desgastes e falhas em componentes. Este trabalho tem como objetivo realizar o monitoramento de máquinas rotativas utilizando “hardware” de baixo custo e recursos de “software” livre, de forma a avaliar a viabilidade de sua aplicação na detecção de padrões de comportamento e de falhas neste tipo de máquina. A utilização de dispositivos de baixo custo tem o potencial de ampliar consideravelmente a aplicação de técnicas de manutenção preventiva e preditiva em campo, com um evidente retorno positivo em termos de eficiência técnica e econômica para as empresas e para a sociedade.

Palavras-chave: Máquinas rotativas. Monitoramento de máquinas. Manutenção preditiva. Otimização industrial.

ABSTRACT

The Internet of Things (IoT) plays an essential role in enabling real-time data collection and transmission. This makes it possible to interconnect devices and machines, creating a network. Sensors placed on machines can collect data about their operating condition and this data can be transmitted, stored, processed and analyzed. The possibility of data being available in real time is an advantage for the user, allowing them to check the conditions of the machines at all times. The integration of these technologies enables the application of preventive and predictive maintenance strategies, presenting itself as a promising approach for industrial optimization. As an example, we can mention the monitoring of vibration levels in rotating machines, which are an indicator of their efficiency, as well as possible wear and failure in components. This work aims to monitor rotating machines using low-cost hardware and free software resources, in order to evaluate the feasibility of its application in detecting behavior patterns and failures of this type of machine. The use of low-cost devices has the potential to considerably expand the application of preventive and predictive maintenance techniques in the field, with an evident positive return in terms of technical and economic efficiency for companies and society.

Keywords: Rotating machines. Machine monitoring. Predictive maintenance. Industrial optimization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Crescimento para a IoT (em bilhões de dólares)	11
Figura 2 – Curva potencial de falha ao longo do tempo	12
Figura 3 – Modelo de análise de vibração	13
Figura 4 – Módulo com acelerômetro ADXL345	18

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Limites de frequência dos método de montagem	15
Quadro 2 – Comparativo dos microprocessadores ESP8266, ESP32 e ATmega328P (ArduinoUNO)	19
Quadro 3 – Cronograma de atividades	20

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DFT *Discrete Fourier Transform.*

FFT *Fast Fourier Transform.*

I²C *Inter-Integrated Circuit.*

IoT *Internet of Things.*

MEMS *Micro Electro Mechanical System.*

SPI *Serial Peripheral Interface.*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Objetivo geral	9
1.2	Objetivos específicos	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1	Internet das coisas	10
2.2	Manutenção preditiva	11
2.3	Análise de vibração em máquinas rotativas	12
2.4	Sensores de vibração	13
2.5	Processamento de sinais dinâmicos	15
3	PROPOSTA	17
3.1	Definição do protótipo	17
3.1.1	Sensores	17
3.1.2	Microcontrolador	18
3.1.3	Conexão com internet	19
3.2	Metodologia de processamento, armazenamento e disponibilização de dados	20
3.3	Resultados preliminares	20
3.4	Cronograma de atividades	20
	REFERÊNCIAS	21

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia tem nos tornado mais conectados e automatizados. A Internet das Coisas (IoT) é um exemplo disso, conectando dispositivos comuns com capacidade computacional, como aparelhos do cotidiano, à internet, permitindo que eles se comuniquem entre si (SANTOS et al., 2016). A IoT tem demonstrado ser uma valiosa ferramenta de otimização e eficiência para as empresas e tem significativa importância ao realizar processos, sejam eles simples ou complexos, repetitivos ou não, reduzindo assim, erros humanos e custos para as empresas. A tecnologia *wireless* é essencial nesse cenário, facilitando o uso das aplicações, tornando-as mais escaláveis e aumentando a mobilidade. Esse tipo de conexão viabiliza a comunicação com diversos dispositivos, como computadores, smartphones, ou quaisquer equipamentos com tecnologia compatível.

Máquinas rotativas/vibratórias tem uma ampla aplicação e desempenham um papel importante em vários segmentos industriais e comerciais. Este tipo de máquina se caracteriza por apresentar frequências de vibração e ruído específicos, que se alteram com o desgaste progressivo de peças e componentes, ou na ocorrência de anormalidades nas condições de operação. Manutenção preditiva é um processo sistemático de monitoramento de grandezas físicas que caracterizam o funcionamento de máquinas e equipamentos. Esse processo tem por objetivo determinar se há ou não a necessidade de realizar atividades de manutenção para garantir o funcionamento dos equipamentos (OTANI; MACHADO, 2008). Desta forma, a manutenção preditiva é essencial para uma maior eficiência e redução de eventuais falhas e custos desnecessários no setor industrial. Crucial para a aplicação destas técnicas de manutenção avançadas é o monitoramento das máquinas de maneira contínua, com sensores adequados. O avanço das ferramentas de IoT no setor fabril tornou muito mais acessível o monitoramento e supervisão de máquinas, permitindo uma grande evolução na aplicação da manutenção preditiva. Ao integrar sensores, banco de dados e comunicação, é possível desenvolver uma solução acessível de baixo custo para a supervisão desse tipo de máquinas.

O presente trabalho tem como foco desenvolver uma solução *wireless* de baixo custo e arquitetura livre para o monitoramento de vibração em máquinas rotativas/vibratórias, explorando a melhor utilização de sensores e demais dispositivos, bem como selecionar técnicas adequadas de processamento dos dados obtidos para transformá-los em informações capazes de possibilitar ao usuário compreender as condições da máquina e tomar a melhor decisão possível.

1.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema de monitoramento de vibração de máquinas rotativas *wireless* com sensores e controladores de baixo custo e de arquitetura livre. A solução será testada em bombas hidráulicas e compressores de refrigeração com o intuito de analisar as frequências de vibração, caracterizar suas assinaturas vibracionais típicas e detectar condições de operação anômalas.

1.2 Objetivos específicos

- selecionar equipamentos adequados para a solução, como placa de desenvolvimento/microcontrolador e sensores;
- estudar e realizar testes em máquinas rotativas;
- desenvolver *software* para coleta de dados e transmissão via nuvem;
- avaliar métodos de análise dos dados;
- desenvolver algoritmo para processamento dos dados;
- desenvolver interface para o usuário receber as informações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentada uma revisão bibliográfica das principais áreas de conhecimento abordadas no projeto, a saber: a Internet das Coisas, que se refere à conectividade dos dispositivos; manutenção preditiva, onde se destaca o uso da análise de vibração em máquinas rotativas. Posteriormente será apresentada a área de processamento de sinais, tratando conceitos da transformada de Fourier e maneiras de aplicá-la diretamente no microcontrolador.

2.1 Internet das coisas

O conceito de Internet das Coisas não é singular, pois existem diferentes interpretações a seu respeito. No entanto, podemos destacar características comuns dentre as definições: é um sistema em que objetos com capacidade de processamento, sensores e computadores processam informações por meio da hiperconectividade (MAGRANI, 2018). A hiperconectividade se refere à conexão de pessoa para pessoa e também a diversos dispositivos (TOTVS, 2022).

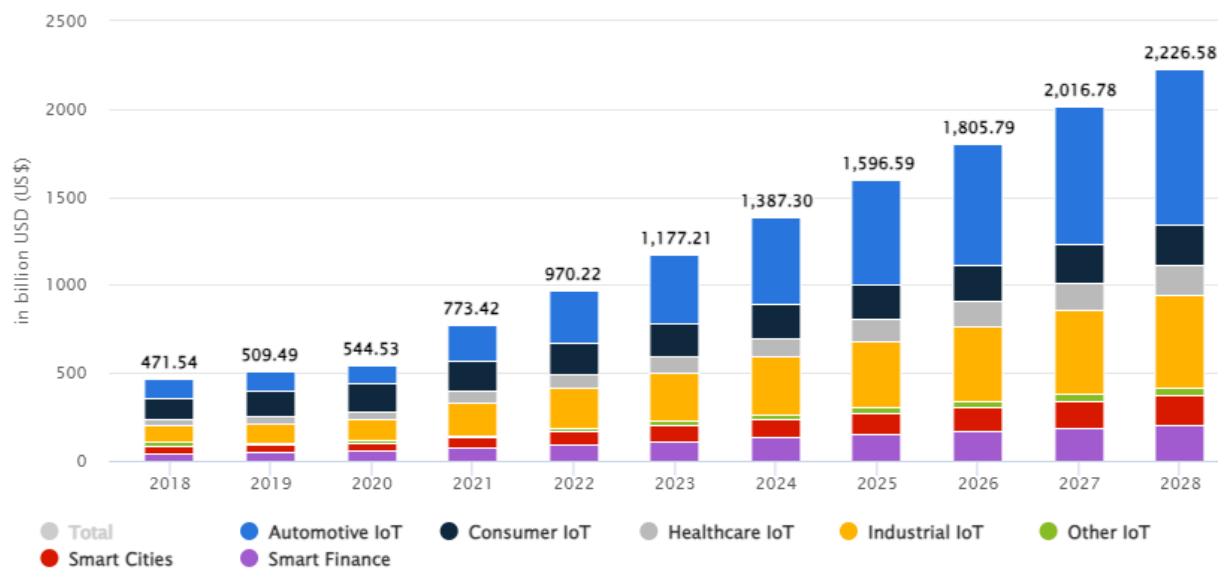
A Internet das Coisas está promovendo uma mudança significativa nos setores produtivos, ajudando a indústria a obter maior eficiência e produção. Essa revolução tecnológica está definindo o futuro da produção, proporcionando benefícios em diversas áreas, desde a fabricação de bens de consumo, até áreas como petróleo, gás, mineração e agricultura (SINCLAIR, 2018).

À medida em que a tecnologia se torna mais acessível e sofisticada, espera-se que essa tecnologia seja adotada cada vez mais pelas empresas. Ao conectar dispositivos e máquinas à internet, esse setor se torna mais eficiente, inteligente e sustentável. Essa conexão permite analisar os dados coletados e tomar decisões decorrentes do processo de produção. Isso permite reduzir o custo, melhorar a qualidade do produto e reduzir o impacto ambiental (BUYYA; DASTJERDI, 2016).

A Internet das coisas é uma revolução tecnológica que tem chamado a atenção do mundo, tendendo à inúmeras possibilidades futuramente. O crescimento da IoT tem sido expressivo, indo de US\$ 44,0 bilhões em 2011 para uma previsão de US\$ 1177,21 bilhões em 2023 (BUYYA; DASTJERDI, 2016). Empresas reconhecidas globalmente, como Microsoft, IBM, Google, Samsung, Cisco, Intel, ARM estão investido nesse mercado, o que está fazendo além de empresas privadas incentivarem esse setor, governos de países quererem capitalizar também, como Reino Unido e Singapura que aplicaram milhões de dólares nesse cenário nos últimos anos (BUYYA; DASTJERDI, 2016; INSIGHTS, 2023).

A Figura 1 mostra o crescimento e a previsão de crescimento para a Internet das Coisas no planeta.

Figura 1 – Crescimento para a IoT (em bilhões de dólares)



Fonte: Insights (2023)

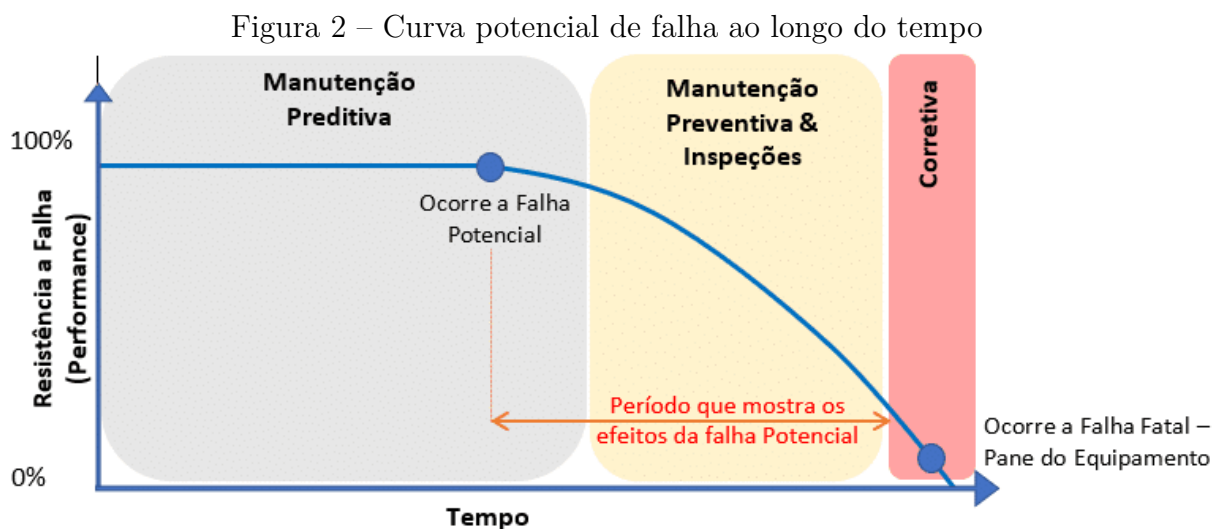
2.2 Manutenção preditiva

A gestão eficaz da manutenção reflete-se diretamente nas despesas dos processos, resultando num poder de competitividade ao oferecer ao consumidor qualidade e preço acessível enquanto a indústria possui um desempenho ideal. Os custos de manutenção representam um valor substancial nas operações de indústrias de diversos setores. Algumas empresas alimentícias gastam cerca de 15% do total da produção em manutenção (MOBLEY, 2002). Nos Estados Unidos, cerca de 33% dos custos de manutenção são gastos de maneira inadequada (MOBLEY, 2002). Uma interrupção não planejada no ciclo de produção não só resulta numa perda financeira direta, como prejudica a reputação da empresa (MOBLEY, 2002; RAN et al., 2019).

A gestão de manutenção pode ser classificada em 3 categorias: manutenção corretiva (execução até a falha), manutenção preventiva e manutenção preditiva. A manutenção corretiva consiste em reparar o equipamento após a falha, sendo o método mais simples e direto, porém o mais caro (ABECOM, 2021b; MOBLEY, 2002). A manutenção preventiva é planejada em intervalos de tempo de acordo com as características de cada equipamento, o que resulta muitas vezes em custos e paradas desnecessárias na produção (MOBLEY, 2002; LEAO, 2022). Já a manutenção preditiva, que é o foco deste trabalho, consiste em um método onde é necessário monitorar as condições das máquinas para extrair informações. Pode-se, por exemplo, utilizar sensores de temperatura, vibração,

som e pressão para identificar padrões e detectar potenciais falhas específicas. De acordo com Abecom (2021a), a manutenção preditiva pode proporcionar em uma economia de até 25% ao aumentar a disponibilidade da linha de produção em 15% (ABECOM, 2021a; MOBLEY, 2002).

A Figura 2 mostra a curva potencial de falha e sua relação ao longo do tempo para as três categorias de manutenção citadas anteriormente. Pode-se observar que, durante o período entre o início da falha potencial e a efetiva ocorrência da pane total do equipamento (falha fatal), há um comprometimento crescente da performance. Ou seja, quanto antes puder ocorrer a detecção da falha, menor perda de performance e menor prejuízo econômico haverá. Desta forma, fica evidente a efetividade da manutenção preditiva, pois permite a detecção da falha potencial ainda no seu início.



Fonte: Abecom (2021b)

2.3 Análise de vibração em máquinas rotativas

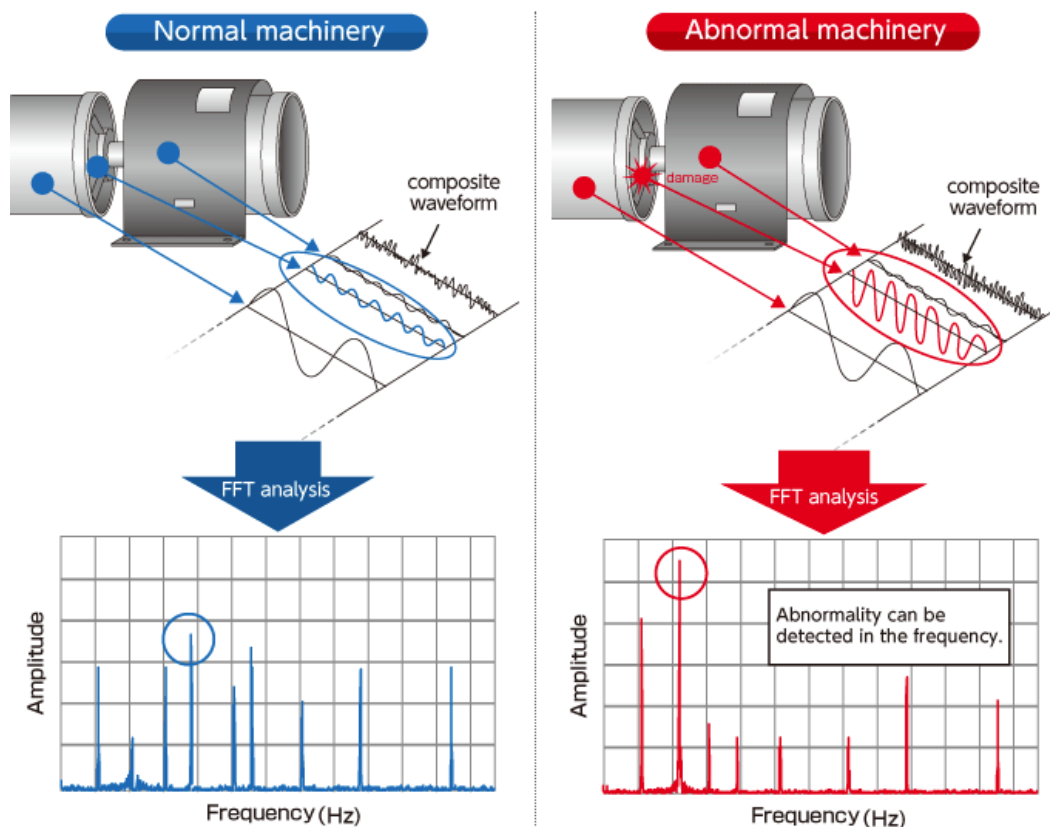
A vibração, vista por vezes como uma característica indesejada, é na verdade uma fonte de informações que reflete o equilíbrio mecânico do equipamento. Qualquer dispositivo que gera força mecânica deixa sua marca no ambiente, que denominamos de assinatura vibracional. A análise de vibração é uma técnica não invasiva, significando que não necessita desmontar o aparelho para verificar sua condição (MOBLEY, 2002).

Vibrações anormais em máquinas rotativas podem ser resultado de diferentes problemas, como: desequilíbrio, desalinhamento, engrenagens ou rolamentos desgastados e folgas. O processo de análise é feito em três etapas: extração de dados, processamento dos dados e detecção de falhas. Técnicas de processamento de dados são necessárias para a melhor compreensão das informações, além de dissociar os ruídos (VISHWAKARMA et al., 2023).

Ao realizar a análise de vibração, dois parâmetros principais são analisados: amplitude e frequência. A amplitude representa a magnitude da excitação (medida na forma de aceleração, força, ou energia) e a frequência reflete as características geométricas e dinâmicas do equipamento. No passado, as análises de vibração eram feitas por pessoas que possuíam uma habilidade de percepção física, porém a tecnologia superou os sentidos humanos nesse aspecto. A análise de vibração evoluiu para o uso de analisadores espectrais, que são instrumentos utilizados para analisar as características espectrais de um sistema, como potência, frequência dominante e harmônicos, em tempo real, permitindo categorizar a análise em diferentes domínios, como tempo, frequência e tempo-frequência (GHAZALI; RAHIMAN, 2021).

A Figura 3 exemplifica as diferentes partes de uma máquina rotativa, como, por exemplo, motor, acoplamento, engrenagem e seus efeitos (desequilíbrio, defeitos de rolamento e engrenagem) representados no domínio da frequência.

Figura 3 – Modelo de análise de vibração



Fonte: World (2023)

2.4 Sensores de vibração

Um sensor de vibração é um dispositivo projetado para detectar e medir vibrações mecânicas em objetos. Ele converte as oscilações mecânicas ou movimentos vibracionais

em sinais elétricos que podem ser interpretados e utilizados para diversos fins. Existem vários tipos de sensores de vibração, dentre eles, os extensômetros, corrente parasita, acelerômetros piezoelétricos e os acelerômetros do tipo *Micro Electro Mechanical System (MEMS)* (REALPARS, 2019; TECHNOLOGIES, 2023).

O extensômetro é utilizado para medir a deformação ou a tensão em um objeto. À medida que o material se deforma, a resistência elétrica do extensômetro muda conforme a deformação e esse valor pode ser medido (REALPARS, 2019; TECHNOLOGIES, 2023).

Os sensores de corrente parasita são comumente usados para medir deslocamentos ou variações na posição de objetos. À medida em que o campo magnético varia, correntes parasitas são criadas e uma tensão é medida na interação dos dois campos (REALPARS, 2019; TECHNOLOGIES, 2023).

A estrutura de um acelerômetro piezoelétrico consiste em um material piezoelétrico, que significa a capacidade do material de gerar uma carga elétrica ao sofrer uma deformação mecânica (como pressão), como quartzo, fixado entre dois eletrodos. Quando ele é submetido a uma aceleração, o material piezoelétrico é deformado, causando um deslocamento entre os terminais. Esse movimento gera uma diferença de potencial elétrico que tem uma relação com a aceleração aplicada. Há dois tipos de acelerômetros piezoelétricos: os de alta impedância e os de baixa impedância. Esses sensores de alta impedância são conectados a aparelhos de instrumentação especiais, requerem um amplificador de carga e suportam alta temperatura. Os de baixa impedância convertem carga em tensão e conectam-se à aparatos comuns, como transdutores de baixa impedância que utilizam cabos de uso geral para medir este valor (KISTLER, 2007; KESTER; KITCHIN, 1999; PERLINGEIRO; PIMENTA; SILVA, 2016).

Acelerômetros MEMS são construídos usando uma tecnologia que integra componentes mecânicos e eletrônicos em uma plataforma microscópica. Os princípios de seu funcionamento envolvem a detecção de mudanças na capacitância ou resistência de estruturas microeletromecânicas sob uma aceleração (RIVERO, 2018; ZUSMAN, 2019).

A seleção de um método de montagem dos sensores e sua correta realização é uma parte essencial para a correta aferição dos dados de vibração. Há quatro métodos de montagem comumente utilizados: montada em pinos, adesivo, magnética ou não montada. A técnica com pinos é predominantemente utilizada, pois oferece alta resposta em frequência e consiste em parafusar o sensor em um pino e prender à máquina. A metodologia com adesivos consiste em colar o sensor na máquina e geralmente é utilizada para aplicações permanentes que não se pode perfurar a máquina, ou em medições temporárias. Na maioria das vezes, utilizada em utilizações temporárias, a montagem magnética não suporta vibrações tão altas como os outros métodos, pois oferece pior contato com a máquina e um maior peso, podendo resultar até mesmo em uma alteração na frequência

aferida (GHAZALI; RAHIMAN, 2021; WILCOXON, 2023).

O Quadro 1 informa a relação das maiores frequências aferidas possíveis em relação ao método de montagem.

Quadro 1 – Limites de frequência dos método de montagem

Método de montagem	Frequência mais alta (Hz)
Portátil	2000
Montagem magnética	5000
Montagem adesiva	6000
Montagem com parafuso	7000

Fonte: Fernandez (2023)

2.5 Processamento de sinais dinâmicos

Fenômenos naturais oscilatórios podem ser matematicamente representados como uma combinação de ondas senoidais de diferentes frequências. Sabendo disso, o conceito da transformada de Fourier consiste em expressar um sinal complexo como uma soma de senoides simples. A Transformada de Fourier é um método utilizado na análise de sinais e sistemas, comumente utilizado na área de processamento de sinais e comunicações. Isto possibilita decompor um sinal no domínio do tempo em suas componentes de frequência (BEVEL, 2010). Desta forma, a transformada de Fourier é um método comumente utilizado na área de processamento de sinais e comunicações para a análise de sinais e sistemas.

A Transformada Rápida de Fourier ou *Fast Fourier Transform (FFT)*, é um algoritmo eficiente para calcular a Transformada de Fourier Discreta ou *Discrete Fourier Transform (DFT)* e sua inversa. A principal motivação para o desenvolvimento da FFT foi a necessidade de otimizar os tempos gastos pelos cálculos computacionais, com destaque para cenários onde o tempo de processamento é de suma importância, como aplicações em tempo real. A DFT transforma um sinal discreto no domínio do tempo em seu equivalente no domínio da frequência. A FFT é uma técnica que explora os subsinais para reduzir o número de operações necessárias para calcular a DFT. O algoritmo FFT divide recursivamente o cálculo da DFT em subproblemas menores (COLLIMATOR, 2023).

Em um contexto de microcontrolador, onde os recursos computacionais são restritos, é importante utilizar a FFT por conta de sua otimização, e é importante ter algumas precauções. Mesmo em microcontroladores que possuem unidades de ponto flutuante, a utilização de ponto fixo pode ser preferível, pois evita a complexidade das operações aritméticas de ponto flutuante. Outro cuidado se refere à utilização de técnicas de janelamento antes de aplicar a FFT em um sinal para minimizar vazamentos espectrais.

Ao escolher o tamanho da FFT é necessário levar em conta os recursos computacionais. FFT maiores requerem mais ciclos de CPU e mais memória. Esse tamanho é geralmente uma potência de 2 para facilitar a utilização eficiente do algoritmo FFT (EMBEDDED STAFF, 2005; ESPRESSIF, 2023).

O teorema de Nyquist não pode ser esquecido na amostragem de sinais. Ele estabelece uma relação entre a taxa de amostragem de um sinal contínuo e a frequência máxima do sinal para evitar a distorção durante o processo de amostragem (OLIVEIRA, 2011).

O teorema de Nyquist afirma que para reconstruir completamente um sinal contínuo, a taxa de amostragem deve ser pelo menos o dobro da frequência máxima do sinal original. Quando isso não é respeitado, ocorre um fenômeno chamado *aliasing*. Alias é um fenômeno em que frequências fora da faixa de Nyquist são interpretadas de maneira errada como frequências dentro dessa faixa (menores). Isso pode resultar em distorções significativas do sinal. Para evitar o *aliasing*, é necessário filtrar o sinal antes da amostragem para eliminar componentes de frequência que estão acima da frequência de Nyquist. Esse processo é conhecido como *anti-aliasing* (OLIVEIRA, 2011; NATIONAL INSTRUMENT, 2023).

3 PROPOSTA

Neste capítulo será descrita a proposta para o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de máquinas, com a utilização de Internet das Coisas baseada na análise vibracional. A proposta abrange uma solução que integra sensores de vibração em máquinas rotativas, microcontroladores para processamento local e conexão sem fio para a transmissão dos dados.

3.1 Definição do protótipo

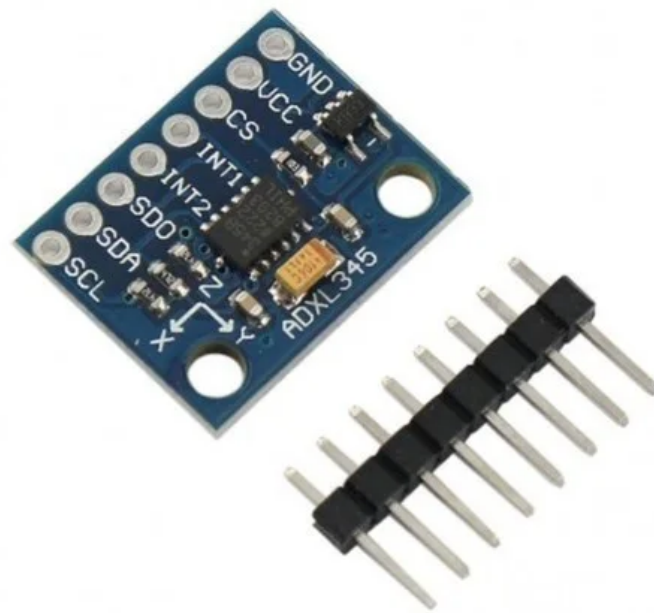
A proposta consiste na utilização do microcontrolador ESP32, que possui características técnicas necessárias, como capacidade de processamento, memória, Wifi, baixo custo e baixo consumo de energia. Ele será responsável pela recepção dos valores de vibração obtidos através do sensor, processamento desses dados e comunicação sem fio com outro dispositivo. Para a medição de vibração será utilizado o sensor ADXL345. Através da conectividade Wifi serão transmitidos os dados processados para outro dispositivo que, conectado à plataforma Plotly (2023b), possibilitará a apresentação dos dados ao usuário, na forma de mostradores ou gráficos (SANTOS, 2020).

3.1.1 Sensores

A escolha do sensor de vibração foi o acelerômetro ADXL345. Fabricado pela Analog Devices, é um acelerômetro triaxial que possui uma sensibilidade de ± 16 g e resolução de 13 bits. A comunicação com o sensor é realizada por meio do barramento *Inter-Integrated Circuit (I²C)* com uma transferência de dados padrão de 100 kHz ou rápida de 400 kHz ou *Serial Peripheral Interface (SPI)* com taxa de dados de saída de até 3200 Hz, o que facilita a integração com microcontroladores e permite uma transmissão eficiente de dados (ANALOG DEVICES, 2022).

A Figura 4 ilustra um módulo com o sensor ADXL345, o que facilita a integração com o microcontrolador.

Figura 4 – Módulo com acelerômetro ADXL345



Fonte: ELETROGATE (2023)

3.1.2 Microcontrolador

A escolha do microcontrolador desempenha um papel fundamental na implementação de sistemas de análise de vibração. Comparou-se três microcontroladores amplamente utilizados: ESP32, ESP8266 e Arduino 328P, com o intuito de identificar a plataforma mais adequada para a realização de análises de vibração precisas e eficientes em máquinas rotativas (LOBO, 2023).

O ATmega328P faz parte da arquitetura AVR da Atmel, conhecida por sua eficiência e facilidade de programação. É amplamente utilizado e está disponível a preços acessíveis. Sendo o Arduino uma placa de prototipagem amplamente utilizada e conhecida pela sua facilidade, existe uma vasta quantidade de documentações disponíveis. Embora esta placa tenha suas vantagens, é importante ressaltar suas limitações: o microcontrolador possui apenas 8 bits, memória RAM de 2kb, memória flash de 32kb, clock de 16 MHz, além de não possuir conexão Bluetooth e Wifi (LOBO, 2023; DIAS, 2023).

O ESP32 e o ESP8266, ambos desenvolvidos pela Espressif Systems, têm ganhado popularidade devido às suas capacidades de conectividade WiFi e Bluetooth, além de recursos mais abundantes de processamento em comparação com placas mais populares. Sendo a ESP32 uma sucessora da ESP8266, ela leva vantagem em alguns quesitos pertinentes para o projeto. Ambas possuem 32 bits e memória flash de 16Mb, porém a ESP32 possui dois núcleos, frequência de operação e memória RAM maiores (LOBO, 2023).

O Quadro 2 exibe um comparativo das características dos microcontroladores estudados.

Quadro 2 – Comparativo dos microprocessadores ESP8266, ESP32 e ATmega328P (ArduinoUNO)

	ESP8266	ESP32	Arduino UNO
Corrente	197mA	220mA	40mA
Núcleo	1	2	1
Arquitetura	32 bits	32 bits	8 bits
Clock	80 – 160 MHz	160-240 MHz	16MHz
Bluetooth	Não	Clássico e BLE (Bluetooth Low Energy)	Não
WiFi	Sim	Sim	Não
RAM	160KB	520KB	2KB
FLASH	16Mb	16Mb	32KB
GPIO	13	34	14
DAC	0	2	0
ADC	1	18	6
Interfaces	SPI, I2C, UART e I2S	SPI, I2C, UART, I2S e CAN	SPI, I2C e UART

Fonte: Lobo (2023)

Todas as placas possuem relevância no campo do desenvolvimento de IoT. Porém a ESP32 se destaca ao possuir WiFi e maior capacidade de processamento e armazenamento, demonstrando-se uma solução mais adequada para a proposta.

3.1.3 Conexão com internet

A escolha da tecnologia de comunicação entre a ESP32 e o *notebook* é importante para que o sistema de monitoramento desempenhe da maneira desejada. A utilização do Wi-Fi como meio de comunicação oferece vantagens, como ampla cobertura, alta taxa de transferência de dados e compatibilidade com grande parte das infraestruturas de rede existentes. Outro fator é a inexistência de fios, o que torna a solução mais fácil de utilizar (MOKO, 2022).

Será utilizado o protocolo WebSocket (SANTOS, 2020). Sua utilização otimiza a transferência contínua de dados de vibração, permitindo uma rápida resposta às mudanças nas condições da máquina rotativa. Além disso, a simplicidade na configuração e a baixa latência oferecida pelo WebSocket são pontos relevantes para a eficácia do monitoramento (APPMASER, 2023).

Portanto, a EPS32 se conectará com o notebook, que disponibilizará a interface gráfica (SANTOS, 2020).

3.2 Metodologia de processamento, armazenamento e disponibilização de dados

Assim como os analisadores de vibrações industriais, o processamento ocorrerá de maneira embarcada. Com a utilização de sensor na ESP32, serão obtidos os valores de aceleração e realizadas as FFTs. Após esta etapa, serão transmitidos os valores de amplitude de maneira sem fio para o *notebook* onde estará o código da interface que utiliza a biblioteca Plotly, que é uma biblioteca de visualização de dados que permite criar gráficos. Dessa maneira, além de visualizar a representação no domínio da frequência momentos após a transmissão dos dados, eles também ficarão salvos no servidor da plataforma Plotly e podem ser acessados posteriormente no Plotly Chart Studio através de gráficos ou listas, por exemplo (SANTOS, 2020; PLOTLY, 2023b; PLOTLY, 2023a).

3.3 Resultados preliminares

Após montar o cenário de teste, que inclui, ESP32, sensor ADXL345, configuração do ambiente de desenvolvimento e o correto acoplamento do sensor no motor, serão realizados testes em bombas hidráulicas e compressores de refrigeração para posteriormente analisar os dados obtidos.

3.4 Cronograma de atividades

Para uma melhor visualização, o cronograma abaixo está dividido em 10 períodos. Cada período equivale a aproximadamente 2 semanas (18 horas efetivas).

Quadro 3 – Cronograma de atividades

Etapa	Período									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Obtenção dos equipamentos	■									
Estudo das falhas e correspondência vibracional	■	■								
Configuração do ambiente de desenvolvimento			■							
Montagem do cenário de testes práticos			■	■	■					
Testes iniciais					■					
Obter identidade vibracional das máquinas						■				
Estudar e forçar diferentes falhas nas máquinas							■	■		
Comparar resultados								■	■	
Elaboração da defesa									■	■
Produzir documento final		■	■	■	■	■	■	■	■	■

Fonte: Elaborada pelo autor.

REFERÊNCIAS

- ABECOM. *Manutenção Preditiva: O que é? Quais Técnicas e Vantagens?* 2021. Disponível em: <https://www.abecom.com.br/o-que-e-manutencao-preditiva/>. Acesso em: 14 nov. 2023. 12
- ABECOM. *O que é Manutenção Corretiva? Quais são as vantagens e desvantagens? Quando realizá-la?* 2021. Disponível em: <https://www.abecom.com.br/manutencao-corretiva/#:~:text=Manuten%C3%A7%C3%A3o%20Corretiva%20pode%20ser%20definida,na%20opera%C3%A7%C3%A3o%2C%20entre%20outros%20fatores.> Acesso em: 14 nov. 2023. 11, 12
- ANALOG DEVICES. *Data Sheet ADXL345*. 2022. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl345.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2023. 17
- APPMASER. *Quais são os benefícios de usar WebSocket para comunicação IoT?* 2023. Disponível em: <https://appmaster.io/pt/blog/websocket-para-comunicacao-iot>. Acesso em: 18 nov. 2023. 19
- BEVEL. *Fourier Transforms*. 2010. Disponível em: <https://www.thefouriertransform.com/>. Acesso em: 15 nov. 2023. 15
- BUYYA, R.; DASTJERDI, A. V. *Internet of Things: Principles and Paradigms*. [S.l.]: Morgan Kaufmann Publishers, 2016. 10
- COLLIMATOR. *What is a fast fourier transform?* 2023. Disponível em: <https://www.collimator.ai/reference-guides/what-is-a-fast-fourier-transform>. Acesso em: 15 nov. 2023. 15
- DIAS, M. *Arduino Uno Pinout – Desvendando O Arduino!* 2023. Disponível em: <https://lobodarobotica.com/blog/arduino-uno-pinout/>. Acesso em: 16 nov. 2023. 18
- ELETROGATE. *Módulo Acelerômetro 3 Eixos ADXL345 - GY-291*. 2023. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/modulo-gy-291-acelerometro-3-eixos-adxl345>. Acesso em: 17 nov. 2023. 18
- EMBEDDED STAFF. *Develop FFT Apps on Low-Power MCUs*. 2005. Disponível em: <https://www.embedded.com/develop-fft-apps-on-low-power-mcus/>. Acesso em: 15 nov. 2023. 16
- ESPRESSIF. *API Guides: Speed Optimization*. 2023. Disponível em: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32s3/api-guides/performance/speed.html#:~:text=Avoid%20using%20floating%20point%20arithmetic,always%20slower%20than%20integer%20calculations.> Acesso em: 15 nov. 2023. 16
- FERNANDEZ, A. *Vibration Sensors and Measurement Devices*. 2023. Disponível em: <https://power-mi.com/content/sensor-mounting-techniques>. Acesso em: 2023-11-23. 15

- GHAZALI, M. H. M.; RAHIMAN, W. Vibration analysis for machine monitoring and diagnosis: A systematic review. *Review Article | Open Access*, v. 2021, p. Article ID 9469318, 2021. Academic Editor: Gang Tang. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2021/9469318>. 13, 15
- INSIGHTS, S. M. *Internet of Things - Worldwide*. 2023. Disponível em: <https://www.statista.com/outlook/tmo/internet-of-things/worldwide#volume>. Acesso em: 15 nov. 2023. 10, 11
- KESTER, S. W. W.; KITCHIN, C. *Practical Design Techniques for Sensor Signal Conditioning*. [S.l.], 1999. 14
- KISTLER. *The Piezoelectric Effect: Theory, Design and Usage*. [S.l.], 2007. 14
- LEAO, T. *Você sabe o que é manutenção preventiva? Entenda como funciona*. 2022. Atualizado em 24/10/22. Blog Industrial Nomus. Disponível em: <https://www.nomus.com.br/blog-industrial/manutencao-preventiva/#:~:text=A%20manuten%C3%A7%C3%A3o%20preventiva%20%C3%A9%20uma,de%20um%20problema%20no%20aparelho>. Acesso em: 15 nov. 2023. 11
- LOBO, M. T. *Arduino Ou ESP: Descubra A Melhor Opção!* 2023. Disponível em: <https://lobodarobotica.com/blog/arduino-ou-esp-descubra-a-melhor-opcao/>. Acesso em: 16 nov. 2023. 18, 19
- MAGRANI, E. *A Internet das Coisas*. Rio de Janeiro: FGV Editora, 2018. ISBN 978-85-225-2005-3. 10
- MOBLEY, R. K. *An Introduction to Predictive Maintenance*. 2nd. ed. Woburn, MA: Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier Science, 2002. ISBN 0-7506-7531-4. 11, 12
- MOKO. Bluetooth vs wi-fi: Qual é a melhor tecnologia para conectividade iot. 2022. Disponível em: <https://www.mokoblue.com/pt/bluetooth-vs-wifi-which-is-better/>. Acesso em: 18 nov. 2023. 19
- NATIONAL INSTRUMENT. *Filtros anti-aliasing e seu uso explicado*. 2023. Disponível em: <https://www.ni.com/en/shop/data-acquisition/measurement-fundamentals-main-page/analog-fundamentals/anti-aliasing-filters-and-their-usage-explained.html>. Acesso em: 14 nov. 2023. 16
- OLIVEIRA, K. de S. *Transformadas de Fourier*. 2011. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/med/imagens/fourier.htm>. Acesso em: 14 nov. 2023. 16
- OTANI, M.; MACHADO, W. V. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. *Revista Gestão Industrial*, v. 4, n. 2, p. 01–16, 2008. 8
- PERLINGEIRO, A. R.; PIMENTA, G. M.; SILVA, S. E. da. *Geração de Energia Através de Materiais Piezoelétricos*. Tese de Graduação — Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ, Rio de Janeiro, Julho 2016. 14
- PLOTLY. *Chart Studio*. 2023. Disponível em: <https://chart-studio.plotly.com/>. Acesso em: 19 nov. 2023. 20

- PLOTLY. *Plotly*. 2023. Disponível em: <https://plotly.com/>. Acesso em: 19 nov. 2023. 17, 20
- RAN, Y. et al. A survey of predictive maintenance: Systems, purposes and approaches. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Singapore, China, XX, n. XX, Nov 2019. 11
- REALPARS. *What is a Vibration Sensor? / Types of Vibration Sensors*. 2019. Disponível em: <https://www.realpars.com/vibration-sensor-types/>. 14
- RIVERO, C. C. *MEMS Vibration Sensors*. 2018. Disponível em: <https://power-mi.com/content/mems-vibration-sensors-0>. Acesso em: 15 nov. 2023. 14
- SANTOS, B. P. et al. *Internet das coisas: da teoria à prática*. 31. ed. [S.l.]: Sociedade Brasileira de Computação (SBC), 2016. v. 31. 8
- SANTOS, L. A. dos. *Espectro de Vibração Usando ADXL345*. 2020. <https://luciano57466388.wordpress.com/daq-diy-na-manutencao-mecanica/espectro-de-vibracao-usando-adxl345/>. Acesso em: 16 nov. 2023. 17, 19, 20
- SINCLAIR, B. *IoT: Como Usar a Internet das Coisas para Alavancar Seus Negócios*. 1. ed. São Paulo: Autêntica Business, 2018. 10
- TECHNOLOGIES, I. U. *How to Measure Vibration to Minimize Failures*. 2023. Accessed on November 13, 2023. Disponível em: <https://www.onupkeep.com/learning/maintenance/vibration-sensor/>. 14
- TOTVS. *Hiperconectividade: o que é e impactos nas empresas*. 2022. Disponível em: <https://www.totvs.com/blog/inovacoes/hiperconectividade/>. Acesso em: 19 nov. 2023. 10
- VISHWAKARMA, M. et al. *Vibration Analysis & Condition Monitoring for Rotating Machines: A Manual*. [S.l.], 2023. Centre for Remote Sensing & GIS, M.A.N.I.T, Bhopal-462051, India. 12
- WILCOXON. *Sensor mounting methods*. 2023. Disponível em: <https://wilcoxon.com/blog/sensor-mounting-methods/>. Acesso em: 13 nov. 2023. 15
- WORLD, M. E. *How to Evaluate the Condition of Rotating Equipment Using Vibration Analysis*. [S.l.]: LinkedIn Corporation, 2023. Acesso em: 28 nov. 2023. 13
- ZUSMAN, G. Piezoelectric vs mems: Future of the vibration sensors. *Vibration Measurement Solutions, Inc.*, 2019. 14