

MONITORAMENTO IoT DAS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DE UMA BOMBA HIDRÁULICA DE PISTÕES AXIAIS.

IoT MONITORING OF OPERATIONAL CONDITIONS OF A HYDRAULIC AXIAL PISTON PUMP.

1, i
,
2, ii
,
3, iii
,
4, iv
,
5, v
,

RESUMO

A Internet das Coisas (IoT) e a sua aplicação na indústria tem se alastrado ultimamente. A integração de equipamentos em uma rede em nuvem permite que dados sejam disponibilizados em tempo real, promovendo o monitoramento contínuo de informações valiosas, como as condições ideais de operação de equipamentos e ativos industriais. Averiguar e validar que um equipamento opera em suas condições ideais é vital para diminuir desgastes dos componentes internos, custos de manutenção e tempos ociosos com linhas de produção paradas. Devido à importância de tais fatores, este trabalho busca analisar e monitorar as condições de operação de uma bomba hidráulica durante condições normais de funcionamento e em condições de cavitação forçada. Além disso, monitorou-se a vazão através de seu dreno, indicador de interesse para análise das condições de seus componentes internos. Uma bomba de pistões axiais foi utilizada como modelo prático. Utilizou-se um acelerômetro para coleta dos sinais de vibração, um sensor de vazão e microcontrolador com capacidade de conexão Wi-Fi, disponibilizando os dados em nuvem por meio do protocolo MQTT. Realizou-se a coleta dos dados em bancada de testes, visualizando-os através de uma plataforma de código aberto.

Palavras-chave: monitoramento IoT; cavitação; bomba hidráulica.

ABSTRACT

The Internet of Things (IoT) and its applications in industry has grown lately. Connecting equipment in a cloud network allows real time data inputs, promoting a continuous monitoring of valuable information, such as ideal operating conditions of industrial equipment and assets. To verify and validate that an equipment works under ideal conditions is key to reduce wear on inner components, maintenance costs and production line idle time. Due to the importance of such factors, this works aims to analyze and monitor of a hydraulic pump during its normal operation and under forced cavitation conditions. In addition to it, it has been monitored the flow through its drain, as it indicates the conditions of the inner parts. An axial piston pump has been selected

¹ Pós-graduado em Automação e Controle de Processos Industriais pela Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Mange”. E-mail: victor.zeni@hotmail.com

² Professor Mestrando em Automação - Eng^a Mecânica, Especialista em Engenharia de Controle e Automação Industrial e Mecatrônica, Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Mange”. E-mail: michel.chaparro@sp.senai.br.

as a practical model. It was used an accelerometer to collect the vibration signal, a flow sensor and a microcontroller with Wi-Fi connection feature, uploading data into cloud through MQTT protocol. The data was collected on a test bench, being visualized on an open-source platform.

Keywords: continuous monitoring; cavitation; hydraulic pump.

1 INTRODUÇÃO

Muitas aplicações industriais têm em seu processo equipamentos críticos para a cadeia produtiva. Mantê-los em pleno funcionamento, com baixos índices de manutenção é uma tarefa árdua, cuja qual seria facilitada por meios de monitoramento das suas condições de operação.

Tendo a tecnologia da Internet das Coisas ou, ainda, *Internet of Things* (IoT), como um dos pilares da quarta revolução industrial, foi possível conectar equipamentos ordinários à uma rede através da incorporação de sensores, promovendo o compartilhamento e coleta de dados pela internet.

Estendendo tal tecnologia aos equipamentos de uma cadeia produtiva, promove-se vantagens significativas ao monitorar suas condições ideias de operação, identificando e detectando eventuais falhas, antecipando quebras e indisponibilidades indesejadas.

Aspectos que influenciam na eficiência de um equipamento são objeto de estudo e pesquisa, de modo a prover à indústria meios de aumentar sua lucratividade, qualidade de seu produto e vantagem técnico comercial.

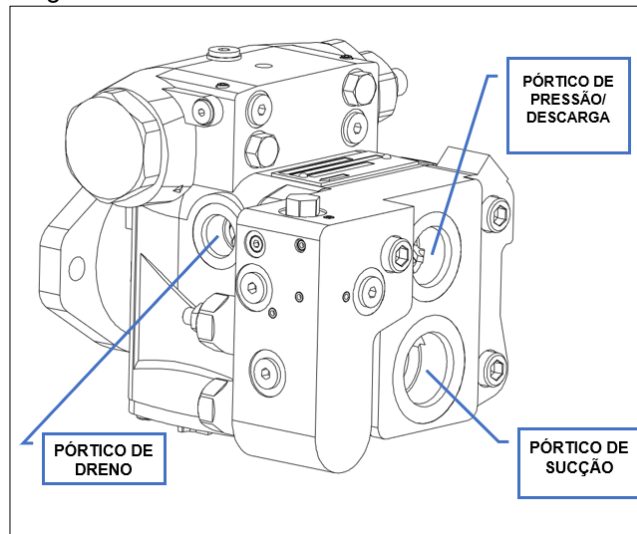
Diversos meios produtivos possuem um sistema óleo hidráulico, no qual um destes equipamentos críticos é a bomba hidráulica, considerada como o coração da máquina. Pequenas variações em seu desempenho podem acarretar grandes ganhos ou perdas no processo produtivo, sendo suas condições operantes de extremo interesse para o departamento de manutenção. O monitoramento dos parâmetros de manutenção, com diagnóstico de falhas, é de grande interesse e importância para a otimização de uma planta fabril da indústria moderna. Monitorar a perda volumétrica de uma bomba, ou motor hidráulico, é um exemplo de tal indicador de manutenção.

Em vista do avanço tecnológico e da necessidade de garantir o funcionamento dos equipamentos em condições ideais, criar o sistema de monitoramento via IoT mostra-se de grande interesse e importância na indústria moderna.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Aplicou-se o Sistema de Monitoramento via IoT aqui desenvolvido em uma bomba de pistões axiais de modo a monitorar suas condições de operação. Nas palavras de Norvelle (1995), as bombas de pistões axiais são classificadas como bombas de deslocamento positivo, cujas quais mantém sua vazão relativamente constante independentemente da pressão de trabalho do sistema. Todas as bombas de pistões operam basicamente pelo princípio do movimento recíproco de um pistão em seu alojamento, no qual desloca fluido para dentro da sua câmara, ao se retrair, e empurrá-lo para fora, ao mover-se para dentro dela. Por seu princípio construtivo, parte do fluido é retornado para a carcaça da bomba dado as folgas entre as interfaces mecânicas dos componentes internos, sendo conduzido de volta ao reservatório através do conduto instalado em seu pórtico dreno. A Figura 1 ilustra a localização dos pórticos de uma bomba hidráulica de pistões axiais.

Figura 1 – Bomba de Pistões Axiais e seus Pórticos



Fonte: Elaborado pelo Autor.

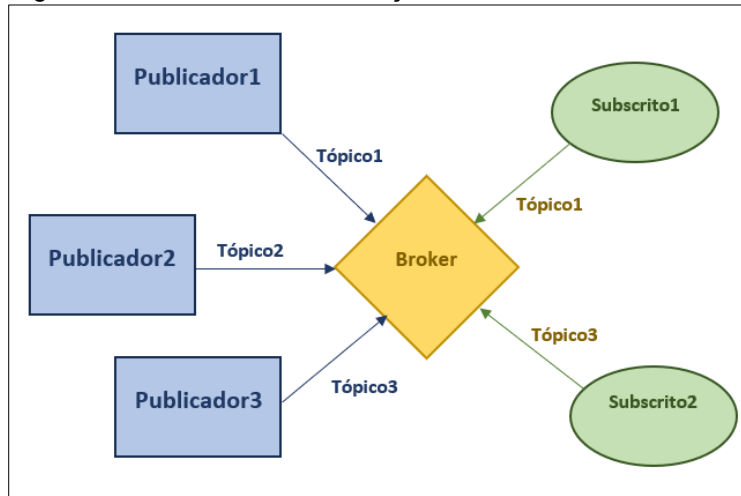
Segundo Doddannavar e Barnard (2005), mediante desgastes dos componentes internos, a folga entre as interfaces mecânicas aumenta. O aumento de tais folgas permite maior vazão para dentro da carcaça, aumentando o fluxo através do pórtico de dreno e, por consequência, diminuindo sua eficiência volumétrica.

Além dos desgastes internos, as bombas podem sofrer cavitação. A cavitação, segundo Esposito (2014), pode ocorrer devido às bolhas de ar no fluido hidráulico ou vaporização do fluido hidráulico. Isto ocorre quando o poder de sucção é excessivo e a pressão da linha de sucção é menor do que a pressão de vapor do fluido. Como resultado, gases ou bolhas de vapor se formam na região de baixa pressão da linha de sucção e se colapsam quando alcançam a região de alta pressão da linha de descarga. Isto gera alta velocidade do fluido e forças de impacto, erodindo os componentes metálicos e diminuindo a vida útil da bomba. Uma condição típica para ocorrência da cavitação é a obstrução do conduto de sucção de bombas. A ocorrência destes eventos é monitorada pelo sistema aqui desenvolvido.

Segundo a *Internet Engineering Task Force*, IETF (2023), A Internet das Coisas (IoT) é uma rede de objetos físicos (“coisas”) combinadas com dispositivos eletrônicos, softwares, sensores, atuadores com conectividade permitindo trocar informações com o desenvolvedor, operador, e/ou outros dispositivos conectados à internet.

Como modelo de comunicação utilizou-se o modelo “Publicador-Subscrito” que, segundo Kamlesh Lakhwani et. al. (2020), é composto pelos publicadores, servidores e subscritos. Os publicadores são as fontes de dados, enviados em forma de tópicos. Estes são recebidos pelos Servidores, ou Brokers, transferindo tais dados aos subscritos, particularmente registrados nos tópicos, conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 – Modelo de Comunicação IoT “Publicador-Subscrito”



Fonte: Elaborado pelo Autor.

As possibilidades de cavitação e falha de elementos de máquina ordinários, como o rolamento do eixo da bomba, são monitoradas através de acelerômetros de modelo ADXL345. Para Thomazini et al. (2005), um acelerômetro pode ser considerado como um transdutor que converte a energia mecânica associada ao movimento em energia elétrica. Desta maneira, o acelerômetro detectará as vibrações decorrente dos fenômenos de cavitação e, possível falha do rolamento do eixo. Conforme a fabricante Analog Devices (ANALOG DEVICES, 2022), o ADXL345 é um acelerômetro triaxial, pequeno, fino e de ultra baixa potência, com alta resolução (13 bits) de medição até +/- 16g.

Para monitor a vazão através do pórtilo de dreno utilizou-se um sensor de vazão do tipo turbina, de modelo YF-S401, com capacidade de medição de 0,3 a 6 litros por minuto, suportando 0,8 MPa de pressão. Como aponta Thomazini et al. (2005), o sensor de vazão do tipo turbina é constituído por um gerador a imã permanente colocado em rotação pelo líquido, promovendo uma frequência variável de rotação proporcional à velocidade média do fluido através dele.

Microcontroladores são largamente usados na indústria, captando e processando sinais, sejam eles de sensores ou outros dispositivos. Segundo Rafiquzzaman (2018), o microcontrolador é um dispositivo que se desenvolveu a partir dos microcomputadores de chip único, utilizados em diversas aplicações, possuindo tipicamente uma CPU, Memória, Entradas e Saídas, juntamente com algumas funções periféricas como timers e Conversores Analógicos-Digitais. Para este trabalho escolheu-se um módulo microcontrolador com capacidade de conexão Wi-Fi e internet, de modelo ESP-WROOM-32. Conforme Espressif Systems (2024), o ESP-32 é capaz de suportar, no Protocolo I2C, ambas configurações Standard-mode (Sm) e Fast-mode (Fm), cujas quais podem atingir 100KHz e 400KHz de leitura respectivamente.

Como linguagem de programação para microcontroladores, utilizou-se a linguagem C++ que, segundo Kernighan e Ritchie (1986), é uma linguagem de programação de finalidade geral e de relativo “baixo nível.”

Um dos protocolos de comunicação entre sensores e microcontrolador é o protocolo de comunicação I2C. Nas palavras de Oner (2021), O I²C, ou I2C, é outro barramento de comunicação serial que suporta diversos dispositivos na mesma linha, possuindo endereçamento de 7-bits. Duas linhas, ou fios, são necessários na

interface I2C: O Clock (CLK) e o Serial Data (SDA).

Como Broker, utilizou-se o Raspberry Pi 4 Modelo B. Conforme Humphrey (2020), O Raspberry Pi é um dispositivo como um computador em que os usuários podem criar e customizar sua interface para as mais variadas funções e projetos. Como um computador, ele requer um Sistema Operacional para conferir a capacidade de realizar as mais variadas tarefas. Como Sistema Operacional, utilizou-se Linux que, nas palavras de Membrey e Hows (2013), é o núcleo de sistema operacional, isto é, lida com bit de baixo nível e provê fácil acesso à rede e dados no disco rígido. Para cumprir a função de Broker ao armazenar os dados e informações recebidas dos Publicadores, instalou-se um mecanismo de base de dados SQL, que nas palavras de Taylor (2013) é uma linguagem de programação especificamente criada para base de dados. O SQL permite a criação de base de dados, adição, manutenção e recuperação dos dados armazenados. Segundo Hwaci (2023), SQLite é uma biblioteca de código aberto em linguagem C, que implementa um mecanismo SQL de base de dados de maneira leve, rápida e confiável. Provedendo meios de administrar as informações via Web, utilizou-se uma ferramenta Web para gerenciamento das bases de dados SQL. Nas palavras de About (2023), o phpLiteAdmin é uma ferramenta de administração de banco de dados SQLite baseada na Web.

Como protocolo de comunicação com o Broker, empregou-se o protocolo MQTT (Message Queue Telemetry Transport). Conforme Oner (2021), O protocolo MQTT é um protocolo de comunicação de muitos-para-muitos, tendo como intermediador um servidor, ou Broker. Conforme Mosquitto™ (2023), o Eclipse Mosquitto é um broker de mensagens de código aberto que implementa o protocolo de mensagens MQTT. O fluxo e informações no Broker e interface de visualização de dados aos Subscritos é provido pela ferramenta de programação Node-Red. Segundo Node-RED (2023), o Node-RED é uma ferramenta de programação e editor visual de código aberto para conexão da Internet das Coisas (IoT).

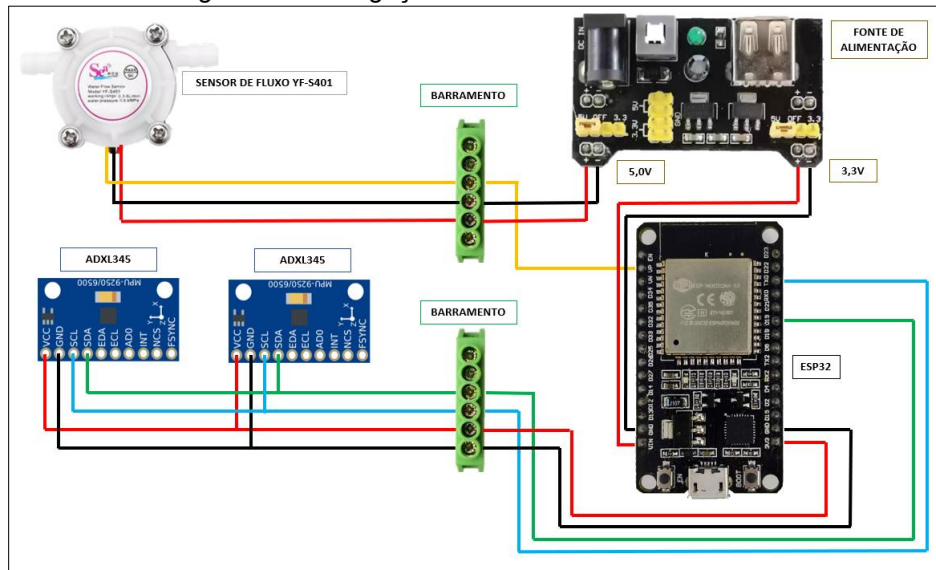
3 METODOLOGIA

Este trabalho está separado em duas partes. A primeira aborda a arquitetura e conexão dos elementos constituintes do Sistema de Monitoramento, a programação do Microcontrolador e a configuração do Broker. A segunda, a instalação do Sistema na Bomba Hidráulica de Pistões Axiais, arranjo para testes em bancada e apresentação inicial de dados obtidos.

3.1 ARQUITETURA E CONEXÃO DOS ELEMENTOS CONSTITUINTES, PROGRAMAÇÃO DO MICROCONTROLADOR E CONFIGURAÇÃO DO BROKER.

Conforme Protocolo de Comunicação I2C, os terminais CLK e SDA dos Acelerômetros foram conectados ao Microcontrolador nos terminais D22 e D21 respectivamente. Para contagem dos pulsos provenientes do Sensor de Vazão, conectou-se seu cabo de sinal ao pino UP do microcontrolador. Acelerômetros, Sensor de Vazão e Microcontrolador foram por uma fonte providendo 5V e 3,3V para correta alimentação, de acordo suas especificações. Estas ligações são ilustradas pela Figura 3.

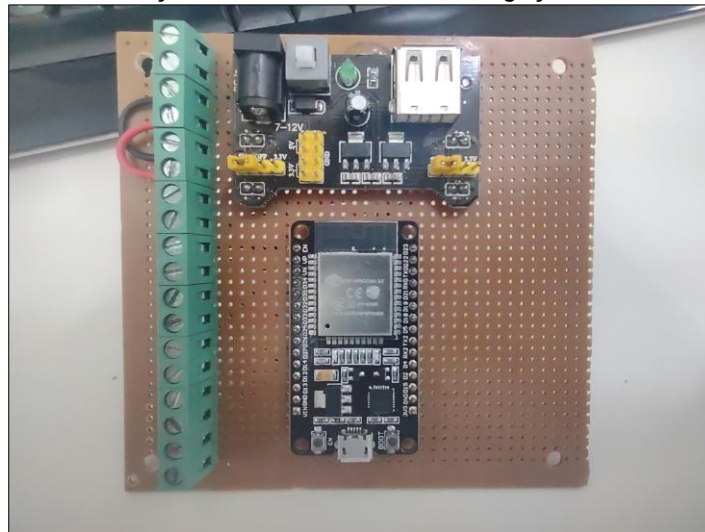
Figura 3 – Interligações Sensores-Microcontrolador



Fonte: Elaborado pelo Autor

A montagem física da placa é ilustrada pela Figura 4, mostrando a Fonte, Microcontrolador e o barramento para ligação aos três sensores.

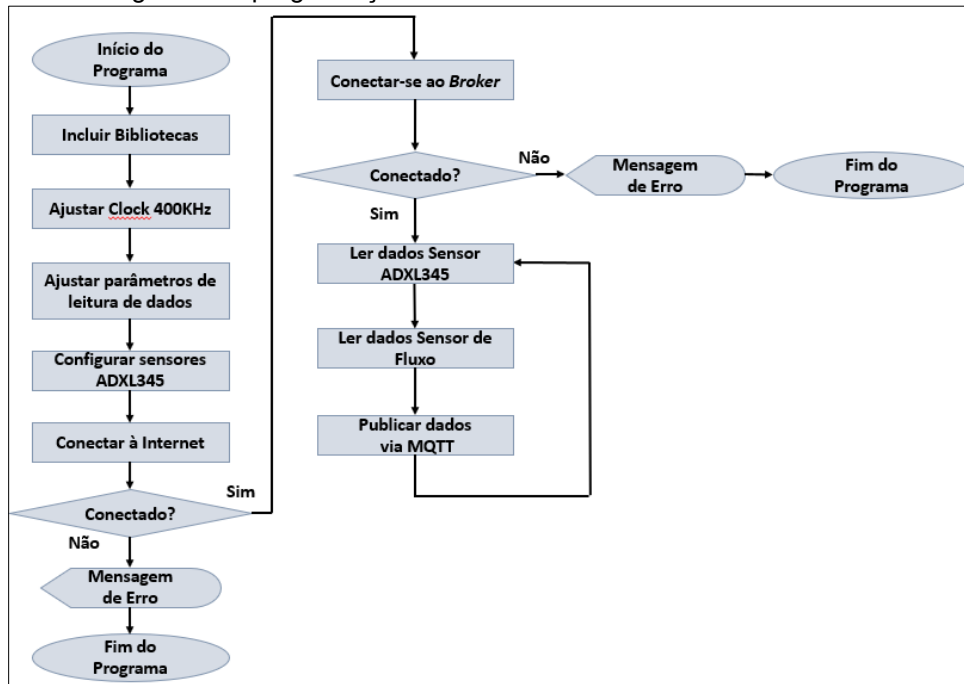
Figura 4 – Placa De Alimentação Com EXP32 e Barra de ligação.



Fonte: Elaborado pelo Autor

O microcontrolador foi programado em C++, de modo a conectar-se à internet, receber as leituras dos sensores e transferir tais leituras ao Broker. Ainda na programação do Microcontrolador, foi provida capacidade de calibração aos acelerômetros e sensor de vazão. A taxa de publicação para cada sensor foi configurada em 250 milissegundos, por escolha do autor, em uma tentativa de explorar a capacidade do microcontrolador e garantir que eventos destrutivos, como a cavitação, fossem detectados o mais rápido possível. Para tal capacidade, o Microcontrolador foi configurado em *Fast-mode* (FM), mediante uso do protocolo I2C, operando em uma velocidade de compilação (Clock) de 400KHz. O fluxograma de programação é ilustrado pela Figura 5.

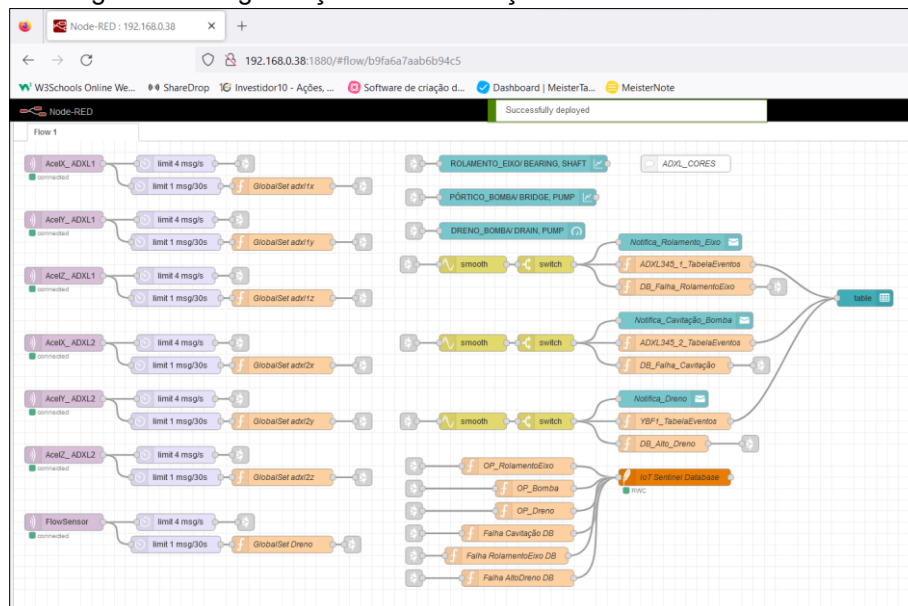
Figura 5 – Fluxograma da programação do microcontrolador



Fonte: Elaborado pelo Autor

Como Broker, configurou-se o Raspberry Pi 4 Modelo B, munido de um cartão SSD de 256gb, com Sistema Operacional Linux, de modo a evitar interfaces gráficas, focando toda sua capacidade de processamento para gerenciamento e apresentação das informações. Conectou-o na internet, via Wi-Fi para progressão em sua configuração. Para prover meios de armazenamento, instalou-se o mecanismo de base de dados SQLite. Para gerenciamento desta base de dados, instalou-se o phpliteAdmin para base dados via web. Provendo Protocolo de Comunicação MQTT, instalou-se o Eclipse Mosquitto. Para programação do fluxo de informações no Broker, instalou-se Node-RED. Tal programação é ilustrada pela Figura 6.

Figura 6 – Programação das Informações do Broker via Node-RED



Fonte: Elaborado pelo Autor

Através das ferramentas do Node-RED, configurou-se uma Interface ao Usuário via Web, de modo a visualizar as informações provenientes dos Publicadores, ou seja, dos sensores.

Para a os acelerômetros, configurou-se uma tabela de leituras por tempo. Para o sensor de vazão, configurou-se um gráfico do tipo velocímetro, configurado até 6 litros por minuto, conforme vazão máxima de dreno especificado pelo fabricante da bomba hidráulica de pistões. Nesta interface, inseriu-se uma tabela para registros dos eventos de cavitação, falha no rolamento do eixo e alta vazão de dreno, tudo em tempo real. Mediante ocorrência dos eventos, configurou-se, ainda, alertas na tela em tempo real, registrando hora, dia, magnitude detectada e em qual sensor a detecção ocorreu. A Interface desenvolvida é ilustrada pela Figura 7.

Figura 7 – Interface de visualização de dados do Sistema de Monitoramento IoT



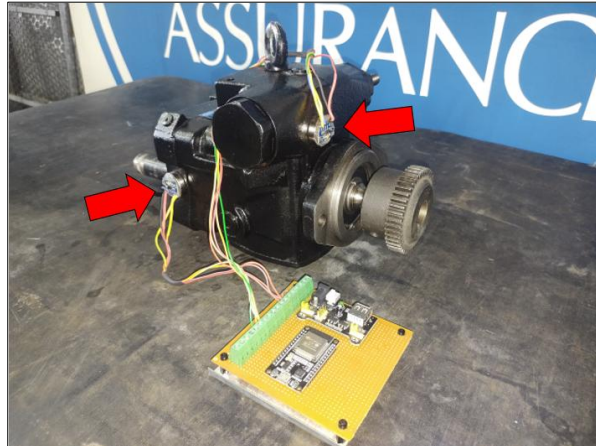
Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.2. INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO VIA IOT NA BOMBA HIDRÁULICA DE PISTÕES AXIAIS, ARRANJO PARA TESTES EM BANCADA E A COLETA INICIAL DE DADOS.

Com o Sistema de Monitoramento fisicamente interconectado, instalaram-se os acelerômetros e sensor de vazão na bomba hidráulica. Para instalação dos acelerômetros, em particular, usou-se ímãs em conjunto com uma resina termoplástica. Optou-se por esta estratégia de modo a prover melhor estabilidade física na superfície, aderência aos acelerômetros e uma maneira não intrusiva de instalação na bomba.

Um acelerômetro foi posicionado próximo à interface entre os pórticos de sucção e pressão presentes na tampa traseira da bomba, captando as vibrações causadas pela cavitação. O outro, colocado o mais próximo possível do rolamento do eixo, detectando possíveis falhas, ou comportamento errático. Tais posicionamentos são mostrados pelas setas indicativas na Figura 8.

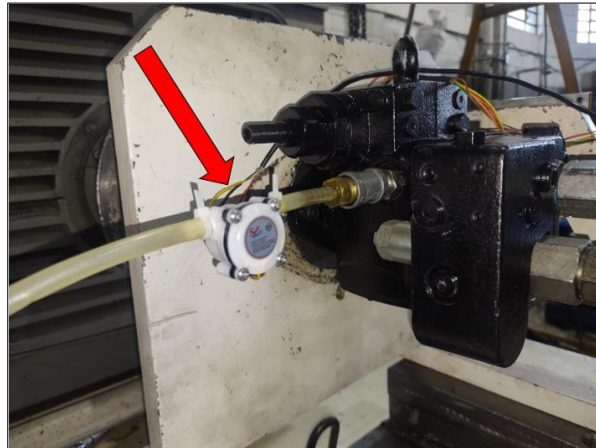
Figura 8 – Instalação dos Acelerômetros na Bomba Hidráulica



Fonte: Elaborado pelo Autor

Sensor de vazão instalado no pórtico de dreno, como mostrado pela seta na Figura 9.

Figura 9 – Sensor de Vazão Instalado.



Fonte: Elaborado pelo Autor

A Bomba Hidráulica com o Sistema de Monitoramento instalado foi posta em bancada de testes, progredindo com a instalação de seus respectivos condutos. O arranjo de teste é ilustrado pela Figura 10.

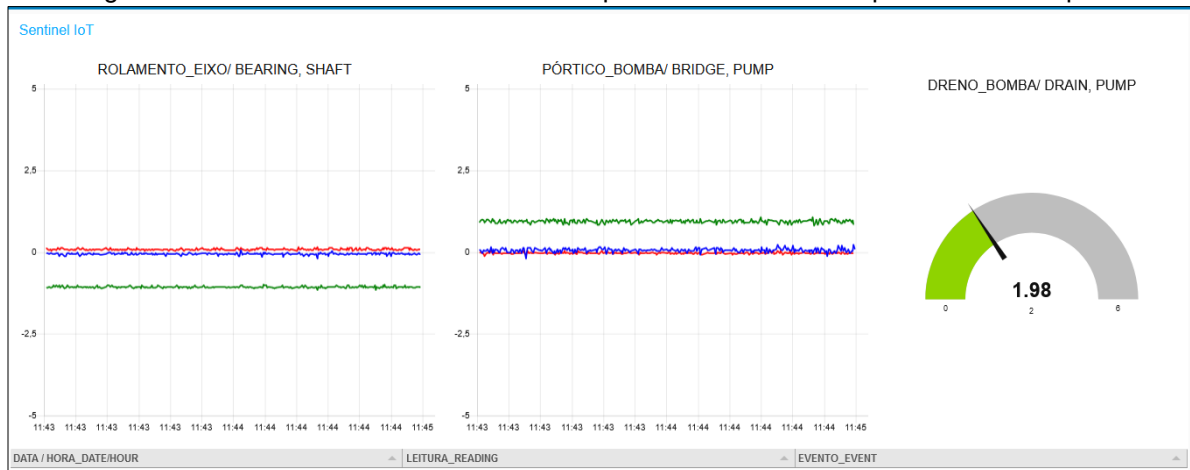
Figura 10 – Sistema de Monitoramento e Bomba em Bancada de Testes.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Finalizada instalação, o sistema foi posto em marcha, registrando as leituras dos sensores. Os registros, armazenados e mostrados na interface web criada, foram coletados explorando a faixa de pressão de 0psi a 3.750psi, aumentando em intervalos de 500psi. Estes registros foram necessários para obtenção dos dados de operação dentro da normalidade, a fim de criar parâmetros para configuração dos alarmes de cavitação, falha de rolamento e alto fluxo de dreno. A Figura 12 ilustra as condições normais de operação em 1.000psi observadas na Interface Web.

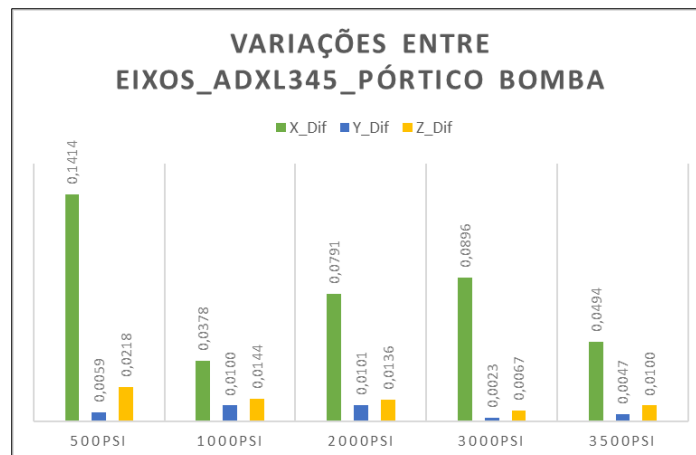
Figura 12 – Interface Web e Dados em Tempo Real com Bomba Operando à 1.000psi.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Os dados registrados das operações normais foram armazenados pelo Broker e exportados para análise. Observou-se a sensibilidade de cada eixo dos acelerômetros triaxiais. O gráfico 1 mostra o levantamento de sensibilidade dos eixos do acelerômetro instalado entre os pórticos da bomba nas diferentes faixas de pressão às quais a bomba foi submetida.

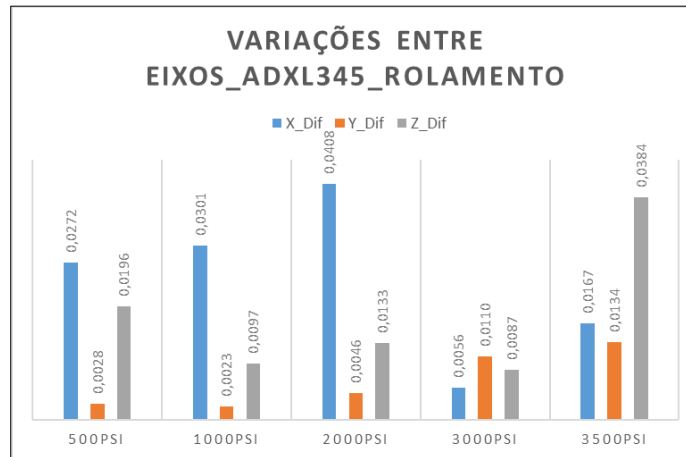
Gráfico 1 – Análise Sensibilidade do Acelerômetro entre Pórtico da Bomba



Fonte: Elaborado pelo Autor

O gráfico 2 mostra o levantamento de sensibilidade dos eixos do acelerômetro instalado próximo ao rolamento do eixo da bomba, nas diferentes faixas de pressão às quais ela foi submetida.

Gráfico 2 – Análise Sensibilidade do Acelerômetro Próximo ao Rolamento do Eixo.



Fonte: Elaborado pelo Autor

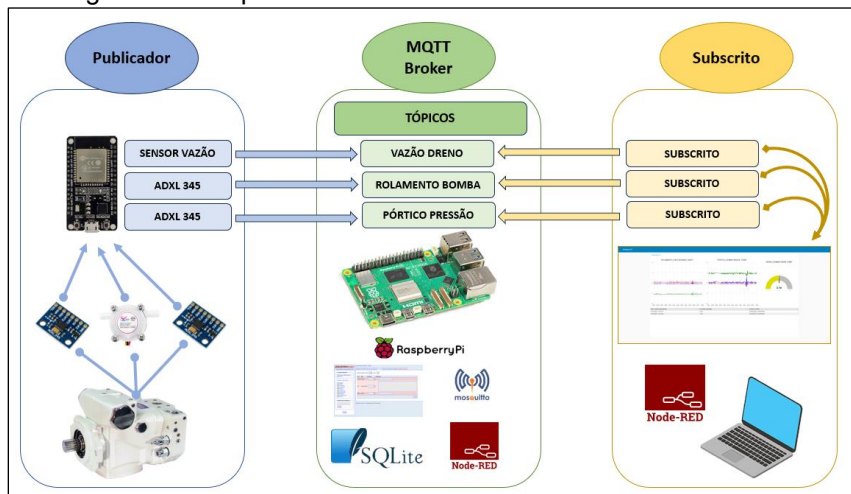
Do Gráfico 1, observa-se que o Eixo X deste acelerômetro possui maior sensibilidade aos eventos, sendo, portanto, a variável monitorada para possíveis eventos de cavitação.

Do Gráfico 2, observa-se que o Eixo X deste acelerômetro possui maior sensibilidade aos eventos. Observa-se que o Eixo Z deste rolamento obteve maior sensibilidade na faixa de 3.500psi. Considerando a sensibilidade em cada faixa de pressão, escolheu-se o eixo X como variável monitorada para possíveis eventos de falha do rolamento do eixo.

Os alarmes foram configurados acrescentando 25% do valor médio de cada eixo escolhido para monitoramento, por decisão do autor. Para o alarme de dreno, foi escolhido como gatilho valores maiores de 5,0 litros por minuto, concluindo a confecção e parametrização do Sistema de Monitoramento via IoT.

Com os elementos constituintes do Sistema de Monitoramento via IoT devidamente configurados e conectados, a Figura 13 apresenta a arquitetura final do Sistema de Monitoramento da Bomba Hidráulica de Pistões Axiais

Figura 13 – Arquitetura Final do Sistema de Monitoramento IoT



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

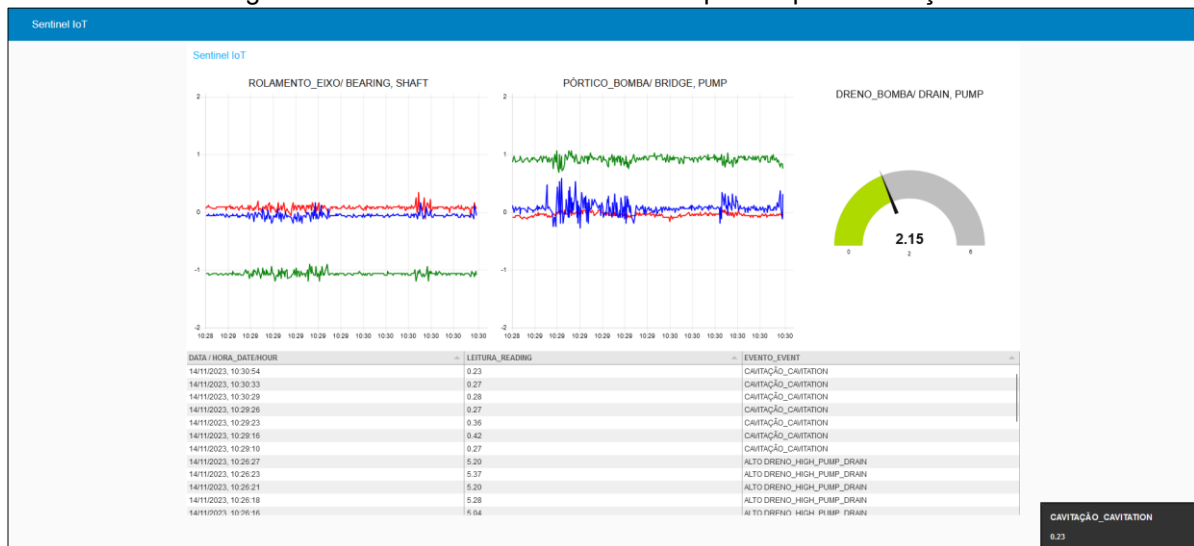
Neste capítulo mostram-se os dados obtidos ao simular os eventos

propostos e a funcionalidade do Sistema de Monitoramento via IoT concebido para os cenários de falha. A bomba foi testada em toda sua faixa de pressão de trabalho, i.e., de 0psi a 3.750psi, em intervalos de 500psi. Ao longo dos testes analisou-se os dados coletados, as informações, alertas e registros mostradas em tempo real na Interface Web.

4.1 SIMULAÇÃO DE CAVITAÇÃO

Para simular a cavitação, fechou-se parcialmente a válvula de esfera instalada no conduto de sucção da bomba hidráulica de pistões. Ao fechar, obteve-se o fenômeno da cavitação, observando fisicamente grande vibração e ruído. Para cada faixa de pressão manteve-se a bomba sob cavitação durante 20 segundos, evitando qualquer dano real no equipamento. Na Figura 14 é possível observar na Interface Web em tempo real o comportamento das curvas do gráfico, captando a magnitude da vibração, os alertas emitidos e registro dos eventos na tabela de alertas.

Figura 14 – Interface com dados em tempo real para cavitação



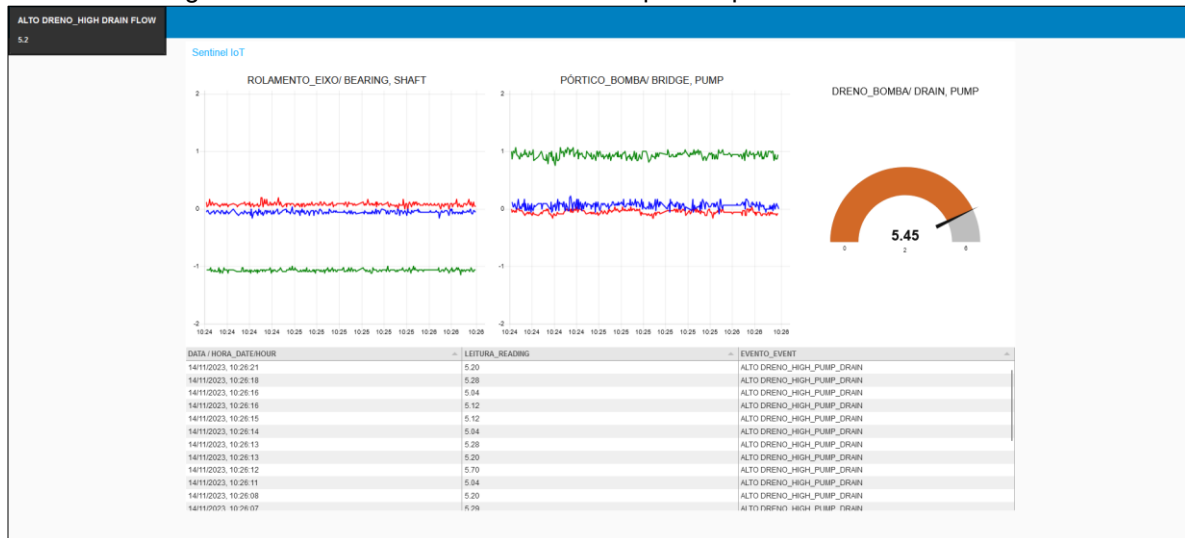
Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.2 SIMULAÇÃO DE ALTA VAZÃO NO PÓRTICO DE DRENO

Para simulação de alta vazão no pórtico de dreno, submeteu-se a bomba à alta pressão de modo a prover maior resistência ao fluxo e, como consequência, maior vazamento para dentro da carcaça da bomba, sendo direcionado ao reservatório através do conduto instalado no pórtico de dreno.

Na Figura 15 é possível observar tempo real o gráfico de velocímetro representando a magnitude da vazão através do dreno, os alertas emitidos e registro dos eventos na tabela.

Figura 15 – Interface com dados em tempo real para alta vazão de dreno



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.3 DEMAIS CAPACIDADES DO SISTEMA DE MONITORAMENTO

O Sistema de Monitoramento conta com capacidade de registro dos dados recebidos na base de dados no Broker. A Figura 16 ilustra a base de dados obtida ao longo dos testes, acessada via Web.

Figura 16 – Base de Dados no Broker

ID	DataHora	Evento	Dreno	Leitura2	Leitura1
1	14/11/2023, 10:28:38	ALTO DRENO	5.04	-	-
2	14/11/2023, 10:28:41	ALTO DRENO	5.12	-	-
3	14/11/2023, 10:28:42	ALTO DRENO	5.04	-	-
4	14/11/2023, 10:28:43	ALTO DRENO	5.28	-	-
5	14/11/2023, 10:28:46	ALTO DRENO	5.01	-	-
6	14/11/2023, 10:28:46	ALTO DRENO	5.12	-	-
7	14/11/2023, 10:28:51	ALTO DRENO	5.04	-	-
8	14/11/2023, 10:28:07	ALTO DRENO	5.2	-	-
9	14/11/2023, 10:28:07	ALTO DRENO	5.28	-	-
10	14/11/2023, 10:28:08	ALTO DRENO	5.2	-	-
11	14/11/2023, 10:28:11	ALTO DRENO	5.04	-	-
12	14/11/2023, 10:28:12	ALTO DRENO	5.7	-	-
13	14/11/2023, 10:28:13	ALTO DRENO	5.2	-	-
14	14/11/2023, 10:28:13	ALTO DRENO	5.28	-	-
15	14/11/2023, 10:28:14	ALTO DRENO	5.04	-	-
16	14/11/2023, 10:28:15	ALTO DRENO	5.12	-	-
17	14/11/2023, 10:28:16	ALTO DRENO	5.12	-	-
18	14/11/2023, 10:28:16	ALTO DRENO	5.04	-	-
19	14/11/2023, 10:28:18	ALTO DRENO	5.28	-	-
20	14/11/2023, 10:28:21	ALTO DRENO	5.2	-	-
21	14/11/2023, 10:28:23	ALTO DRENO	5.37	-	-
22	14/11/2023, 10:28:27	ALTO DRENO	5.2	-	-
23	14/11/2023, 10:29:10	CAVITAÇÃO	-	0.27	0.97
24	14/11/2023, 10:29:16	CAVITAÇÃO	-	0.42	0.97
25	14/11/2023, 10:29:23	CAVITAÇÃO	-	0.38	0.97
26	14/11/2023, 10:29:26	CAVITAÇÃO	-	0.27	0.9
27	14/11/2023, 10:30:29	CAVITAÇÃO	-	0.28	0.9
28	14/11/2023, 10:30:33	CAVITAÇÃO	-	0.27	0.9
29	14/11/2023, 10:30:54	CAVITAÇÃO	-	0.23	0.84

Fonte: Elaborado pelo Autor.

O sistema elaborado ainda oferece capacidade para exportação dos dados. A Figura 17 ilustra dados exportados em formato .csv, destacando o registro dos eventos de cavitação e alta vazão de dreno.

Figura 17 – Dados exportados em .csv

ID	DataHora	Evento	Dreno	LeituraX	LeituraY	LeituraZ
1	14/11/2023, 10:33:04	OP_Norm_Bomba	-	0.09	0.94	-0.06
2	14/11/2023, 10:33:04	OP_Norm_RolEixo	-	-0.06	-1.06	0.09
3	14/11/2023, 10:33:04	OP_Norm_Dreno	3.14	-	-	-
4	14/11/2023, 10:33:48	OP_Norm_Bomba	-	0.06	0.94	-0.06
5	14/11/2023, 10:33:48	OP_Norm_RolEixo	-	-0.06	-1.06	0.06
6	14/11/2023, 10:33:48	OP_Norm_Dreno	2.81	-	-	-
7	14/11/2023, 10:34:18	OP_Norm_Bomba	-	0.0	0.9	-0.09
8	14/11/2023, 10:34:18	OP_Norm_RolEixo	-	-0.06	-1.12	0.03
9	14/11/2023, 10:34:18	OP_Norm_Dreno	2.64	-	-	-
10	14/11/2023, 10:34:48	OP_Norm_Bomba	-	-0.12	1.0	-0.03
11	14/11/2023, 10:34:48	OP_Norm_RolEixo	-	-0.03	-1.09	0.03
12	14/11/2023, 10:34:48	OP_Norm_Dreno	2.97	-	-	-
13	14/11/2023, 10:34:50	CAVITAÇÃO	-	0.3	1.0	-0.03
14	14/11/2023, 10:34:51	CAVITAÇÃO	-	0.52	1.0	-0.03
15	14/11/2023, 10:35:19	OP_Norm_Bomba	-	0.03	1.0	-0.03
16	14/11/2023, 10:35:19	OP_Norm_RolEixo	-	-0.06	-1.06	0.12
17	14/11/2023, 10:35:19	OP_Norm_Dreno	3.14	-	-	-
18	14/11/2023, 10:35:49	OP_Norm_RolEixo	-	-0.06	-1.06	0.12
19	14/11/2023, 10:35:49	OP_Norm_Dreno	3.14	-	-	-
20	14/11/2023, 10:35:49	OP_Norm_Bomba	-	0.06	0.9	0.0
21	14/11/2023, 10:35:55	ALTO DRENO	5.25	-	-	-
22	14/11/2023, 10:35:56	ALTO DRENO	5.45	-	-	-
23	14/11/2023, 10:35:57	ALTO DRENO	5.45	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E COMENTÁRIOS GERAIS

O Sistema de Monitoramento via IoT alcançou os resultados esperados, demonstrando capacidade de registro de operação normal do equipamento e eventuais possíveis condições de falha. Importante salientar que se verifica leituras mais significativas no acelerômetro instalado próximo ao rolamento do eixo no momento em que foi simulada a cavitação. Isto é dado ao fato de que a vibração se propaga ao longo da carcaça da bomba, conseqüentemente atingindo este sensor. Ainda assim, comparando a magnitude dos sinais captados pelos sensores, é nítido que as leituras do sensor próximo aos pórticos da bomba são de maior intensidade, não deixando dúvidas quanto ao evento em ocorrência. Uma falha no rolamento do eixo não seria possível simular, dado ao fato da bomba hidráulica utilizada ser um produto novo. O sistema é perfeitamente capaz de armazenar as informações em uma base de dados e exportar tais informações, como demonstrado. A Interface Web desenvolvida funciona como um painel de monitoramento em tempo real, com gráficos, alertas e registros. O êxito na sinalização dos eventos de falha é a característica chave ao que o sistema de propõe a fazer.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do Sistema de Monitoramento via IoT aborda e incorpora diversas áreas da automação industrial, como o uso de microcontrolador, uso da linguagem de programação, desenvolvimento e interligação física dos componentes constituintes, protocolo de comunicação industrial, uso da tecnologia e desenvolvimento IoT, confecção de uma tela de interface para os dados em tempo real e o dispositivo a ser controlado e monitorado.

Apesar de ter sido elaborado para uso em uma bomba hidráulica de pistões axiais, a metodologia empregada pode ser facilmente adaptada para monitoramento de outros equipamentos e grandezas, como motores elétricos, redutores e outros

equipamentos críticos que se deseja monitorar suas condições de operação.

Mediante validação da metodologia empregada e dos fins propostos alcançados, mencionam-se as seguintes sugestões abaixo para desenvolvimentos futuros e encorajamento para novas aplicações:

- Aplicação e seleção de microcontrolador, ou registrador de dados e sensores de classe industrial.
- Desenvolvimento de capacidade de avisos de ocorrência de falhas por meio de e-mail e mensagens de texto para celular.

REFERÊNCIAS

ABOUT: phpLiteAdmin is for SQLite what phpMyAdmin is for MySQL. phpLiteAdmin is for SQLite what phpMyAdmin is for MySQL. Disponível em: <https://www.phpliteadmin.org/>. Acesso em: 29 maio 2023.

CONTRIBUTORS, Openjs Foundation &. **User Guide**. Disponível em: <https://nodered.org/docs/user-guide/>. Acesso em: 18 maio 2023.

DEVICES, Analog. **ADXL345**: 3-axis, ± 2 g/ ± 4 g/ ± 8 g/ ± 16 g digital accelerometer. 3-Axis, ± 2 g/ ± 4 g/ ± 8 g/ ± 16 g Digital Accelerometer. Disponível em: <https://www.analog.com/en/products/adxl345.html#part-details>. Acesso em: 16 maio 2023.

DODDANNAVAR, Ravi; BARNARD, Andries. **Practical Hydraulic Systems**: operation and troubleshooting for engineers and technicians. Boston: Elsevier Science & Technology Books, 2005.

ESPOSITO, Anthony. **Fluid Power with Applications**. 7. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2014.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32**: ESP-IDF Programming Guide. Shanghai: Espressif Systems, 2024. 3270 p.

HWACI. **What Is SQLite?** Disponível em: <https://www.sqlite.org/index.html>. Acesso em: 25 maio 2023.

IETF. **The Internet of Things**. Disponível em: <https://www.ietf.org/technologies/iot/>. Acesso em: 01 abr. 2023.

KERNIGHAN, Brian W.; RITCHIE, Dennis M.. **C: A linguagem de Programação**. Rio de Janeiro: Campus Ltda., 1986.

LAKHWANI, Dr Kamlesh; KUMAR, Dr Hemant; WIREKO, Joseph Kofi; HIRAN, Kamal Kant. **Internet of Things (IoT)**: principles, paradigms and applications of iot. Nova Delhi: Bpb Publications, 2020.

MEMBREY, Peter; HOWS, David. **Learn Raspberry Pi with Linux**. New York: Apress, 2013.

MOSQUITTO, Eclipse. **Eclipse Mosquitto™**: an open source mqtt broker. An open

source MQTT broker. Disponível em: <https://mosquitto.org/>. Acesso em: 30 maio 2023.

NODE-RED. **About**. Disponível em: <https://nodered.org/about/>. Acesso em: 15 abr. 2023.

NORVELLE, F. Don. **Fluid Power Technology**. Albany: West Publishing Company, 1995.

ONER, Vedat Ozan. **Developing IoT Projects with ESP32: automate your home or business with inexpensive wi-fi devices**. Birmingham: Packt Publishing, 2021.

Rafiquzzaman, M.. **Microcontroller Theory And Applications With The Pic18f**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2018.

TAYLOR, Allen G.. **SQL For Dummies: learn the basics of sql programming in 2 weeks**. 8. ed. Nj: John Wiley & Sons, Inc., 2013.

THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro Urbano Braga de. **Sensores Industriais: fundamentos e aplicações**. 5. ed. São Paulo: Érica, 2005.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me guardar e prover forças, ao professor por aceitar me orientar na produção deste trabalho, pela atenção e suporte ao longo do desenvolvimento e a empresa Oilgear do Brasil, por conceder a bomba hidráulica de pistões axiais, instrumentos e bancada de testes, sem os quais a produção deste trabalho não seria possível.

SOBRE O(S)AUTOR(ES)

i NOME DO AUTOR (Autor 1)

Foto (Exemplo) - Possui graduação em Engenharia xxxx com especialização em xxxx pela Faculdade xxxx (2000), e Mestrado (2001) e Doutorado (2012) em xxxx pela Universidade xxxx. Atualmente é professor da Faculdade Senai de Tecnologia Mecatrônica, lecionando as disciplinas xxxxx no curso Tecnológico em Mecatrônica e na Pós-graduação em xxxx. Tem experiência na área de Engenharia xxxx, com ênfase em Mecatrônica, etc.

ii NOME DO AUTOR (Autor 2)

Foto (Exemplo) - Possui graduação em Engenharia xxxx com especialização em xxxx pela Faculdade xxxx (2000), e Mestrado (2001) e Doutorado (2012) em xxxx pela Universidade xxxx. Atualmente é professor da Faculdade Senai de Tecnologia Mecatrônica, lecionando as disciplinas xxxxx no curso Tecnológico em Mecatrônica e na Pós-graduação em xxxx. Tem experiência na área de Engenharia xxxx, com ênfase em Mecatrônica, etc.