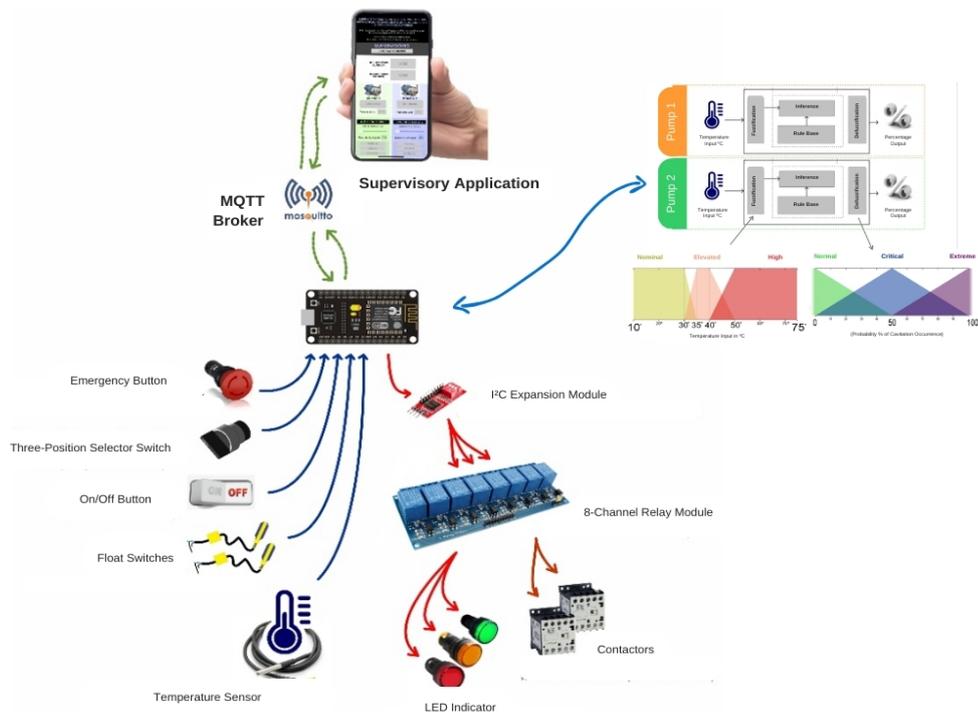


GRAPHICAL ABSTRACT



Representation of the physical-logical network topology of the proposed Remote and Intelligent Supervision System for water supply in civil buildings.

SIMULAÇÃO DA SUPERVISÃO REMOTA E INTELIGENTE VIA “INTERNET OF THINGS (IoT)” DE UM SISTEMA PARA ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM EDIFICAÇÕES CIVIS COM USO DE MOTOBOMBAS ELEVATÓRIAS

SIMULATION OF REMOTE AND INTELLIGENT SUPERVISION VIA “INTERNET OF THINGS (IoT)” OF A SYSTEM FOR WATER SUPPLY IN CIVIL BUILDINGS USING LIFT MOTOR PUMPS

Danilo Stehling Ferreira Silva ^{1*} e Luis Eduardo Martins de Lima ^{1*}

¹ IFES - Instituto Federal do Espírito Santo.

* eng.danilostehling@gmail.com; luisedu@ifes.edu.br

Artigo submetido em 21/06/2024, aceito em 13/08/2024 e publicado em 04/09/2024.

Resumo: A água é um insumo primordial para a manutenção da vida, e seu abastecimento em edificações com elevada altura de recalque é realizado com uso de motobombas elevatórias, sendo que esses equipamentos em operação estão sujeitos a estresses eletromecânicos e consequentemente a ocorrência de falhas causadas por diversos fatores. Um desses fatores é a cavitação nos rotores da bomba, que submetem o material deste equipamento aos desgastes erosivos ocorridos em função de micro implosões de bolhas de vapor, fenômeno gerado em fluidos líquidos bombeados por variação da pressão a qual o fluido está submetido. Nesse trabalho é apresentada a arquitetura e a simulação da operação do sistema embarcado que foi desenvolvido para o acionamento e a supervisão do uso de duas motobombas, aplicadas ao abastecimento de água em edificações civis. As motobombas são acionadas em modo alternado para suprirem a demanda de abastecimento, sendo monitorada a temperatura de operação da bomba para aplicação de um sistema fuzzy de diagnóstico quanto à tendência de ocorrência de cavitação. Toda a operação do sistema de abastecimento pode ser monitorada com uso de um aplicativo móvel processado por smartphone, desenvolvido sobre a plataforma *Android*. Os testes realizados para modos distintos de operação, bem como, o diagnóstico e a sinalização da condição de aquecimento da bomba, comprovaram a validade da proposta.

Palavras-chave: internet das coisas; *nodemcu esp8266*; sistema *fuzzy*; cavitação; aplicativo *android*.

Abstract: Water is a primary resource for the maintenance of life, and its supply in buildings with high elevation is carried out using booster pumps. These pumps are subject to electromechanical stresses during operation, which can lead to failures caused by various factors. One such factor is cavitation in the pump rotors, which subjects the equipment material to erosive wear due to micro-implosions of vapor bubbles, a phenomenon generated in liquid fluids pumped by pressure variations. This work presents the architecture and the simulation of the operation of an embedded system developed for the activation and supervision of two booster pumps used for water supply in civil buildings. The pumps operate alternately to meet the supply demand, and the operating temperature of the pump is monitored to apply a fuzzy diagnostic system regarding the tendency of cavitation occurrence. The entire operation of the supply system can be monitored using a mobile application processed by a smartphone, developed on the *Android* platform. Tests conducted for different operating modes, as well as the diagnosis and signaling of the pump heating condition, validated the proposal.

Keywords: internet of things; *nodemcu esp8266*; fuzzy system; cavitation; *android* app.

1 INTRODUÇÃO

São quatro as modalidades de consumo de água: agricultura, produção energética, atividade industrial e abastecimento humano, e o crescimento constante da população mundial exige mais alimentos e energia elétrica. A Organização das Nações Unidas (ONU) prevê que, em 2030, a sociedade vai necessitar de 35% a mais de alimento, 40% a mais de água e 50% a mais de energia, e até 2050, a demanda por alimentos e por energia crescerá 70% e 60%, respectivamente. (ESCASSEZ DE ÁGUA, 2014).

Diante de tais informações, observa-se que a demanda por água nos próximos anos tende a crescer significativamente, e consequentemente entender como a água é consumida no ambiente urbano pode ajudar a compreender o contexto mais geral desse consumo (CARMO, 2001).

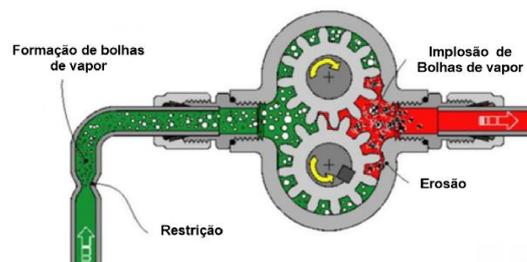
Outro fato importante, é que o turismo e a grande taxa de ocupação imobiliária em cidades litorâneas, durante os períodos de temporadas e feriados, implicam em deficiências no abastecimento hídrico, bem como, a despressurização no fornecimento de água pela concessionária. Um dos impactos sociais do turismo são os conflitos gerados pela disputa ao direito à água, situação na qual a população local pode ter o abastecimento de água reduzido em função do aumento da população turística (FONSECA, 2008).

Para auxiliar o bombeamento de água para os reservatórios superiores, nos edifícios são utilizadas motobombas, normalmente instaladas em duplas para a alternância manual em caso de falhas e também para preservar a vida útil desses equipamentos. Estima-se que entre 2 e 3% do consumo de energia elétrica no Brasil ocorra no bombeamento de água até as residências (GOMES; CARVALHO, 2012), sendo que, um quarto dessa energia poderia ser poupada se as redes e os sistemas de bombeamento de água fossem mais eficientes (JAMES; CAMPBELL; GODLOVE, 2002).

Um fator preocupante é que em grande parte do ano esses equipamentos não são acionados, uma vez que, há pressão satisfatória provendo o abastecimento de água nos reservatórios. Esse fato tem como consequência a oxidação da motobomba, a entrada de ar nos sistemas em função da ausência de uma manutenção rotineira, e também o fenômeno da cavitação, fatores esses que inviabilizam o bombeamento quando as motobombas são acionadas.

De acordo com Coelho (2006), a cavitação é caracterizada por um fenômeno físico, em que bolhas de vapor se formam em um fluido bombeado. Como visto na Figura 1, essas bolhas ocorrem em alguma parte do escoamento, em sua grande maioria na região da sucção da bomba, escoando junto ao líquido e que posteriormente entrarão em colapso.

Figura 1: Formação da Cavitação.



Fonte: <https://www.manutencaoemfoco.com.br/cavitation-e-seus-conceitos/>

O dano causado pela cavitação acontece quando ondas de choque de pressão e micro jatos gerados na implosão de bolhas provocadas, exercem pulsos de tensões na superfície sólida atingida. Esse estresse mecânico imposto à carcaça da bomba dá origem, nas primeiras etapas do processo, à deformação plástica e, em seguida, à formação de trincas e remoção de material (WANTANG, 2001).

O desgaste erosivo gerado por esse fenômeno é conhecido como erosão por cavitação (E-C), ilustrado na Figura 2, sendo responsável por grandes custos de manutenção em sistemas hidráulicos, tais como hélices de embarcações, bombas de

recalque e turbinas hidráulicas (GAVRILJUK et al., 1999; MILLS, 1998).

Figura 2: Erosão ocasionada pela cavitação.



Fonte: <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-cavitacao-em-bombas-centrifugas-definicao/>

Ambos problemas, a entrada de ar e a cavitação, implicam em degradação de componentes e superaquecimento, que em casos extremos causam o derretimento dos tubos de PVC instalados próximos às bombas, podendo até ocasionar incêndios.

Diante do exposto, neste trabalho, pretende-se apresentar a simulação de um sistema automático (Figura 3), dedicado à operação, supervisão remota embarcada móvel e proteção de sobre temperatura para duas motobombas elevatórias de água, com diagnóstico inteligente *fuzzy* para a classificação da tendência à ocorrência de cavitação. Com essa simulação pretende-se validar uma proposta para um sistema de abastecimento de água em edificações civis, minimizando a ocorrência da indisponibilidade de água aos usuários.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nas sessões seguintes serão fundamentados conceitos primordiais para o desenvolvimento da simulação de um sistema automático para gerenciamento do abastecimento de água e detecção de falhas ocorridas por cavitação em motobombas.

Figura 3: Componentes do Sistema



Fonte: Própria

2.1 MONITORAMENTO

Segundo Ribeiro et al. (2015), a supervisão desempenha uma função fundamental por permitir monitorar inúmeras variáveis de um sistema, como vibração, temperatura, corrente, vazão, nível, entre outras, indicando falhas, permitindo uma intervenção técnica mais rápida e eficiente, além de informar, através de parâmetros, o elemento danificado do sistema sem a necessidade de interromper seu funcionamento.

O monitoramento contínuo do status das peças do motor pode dar uma indicação precoce sobre as falhas e fornecer uma oportunidade para a equipe de manutenção em avaliar a condição do motor, tomar medidas corretivas e planejar a atividade de manutenção junto com o orçamento (IRFAN et al., 2021).

De acordo com Ribeiro (2015 apud CLEITON; RIBEIRO; GIACOMELLI, 2012) várias tecnologias são utilizadas atualmente para realizarem o monitoramento e controlar os processos. Dentre elas, as plataformas de programação embarcadas em dispositivos móveis se destacam, por proporcionarem facilidade de acesso e manuseio, e atualmente estarem

presentes no cotidiano de muitas pessoas. Por essas razões, faremos a seguir a abordagem sobre como produzir a interface para o sistema em estudo com uso da plataforma *ANDROID*.

2.2 APLICATIVOS *ANDROID*

O MIT *App Inventor* é uma interface de código aberto e amigável para desenvolver aplicativos móveis e tem sido usado por mais de dez milhões de usuários em todo o mundo. Com o recurso IoT à plataforma MIT *App Inventor*, pode-se criar aplicativos usando vários sensores e plataformas IoT (MUNASINGHE; PATTON; SENEVIRATNE, 2019).

Através do ambiente de programação disponibilizado pelo MIT baseado em blocos, foi desenvolvido uma interface supervisória, que conectada à internet permite o monitoramento contínuo e em tempo real do estado de funcionamento do sistema simulado.

2.3 INTERNET OF THINGS (IoT) INTERNET DAS COISAS

De acordo com Bahhar et al. (2021), a Internet das Coisas, ou IoT, se refere à conexão de bilhões de objetos e humanos através da Internet, e é considerada uma ferramenta poderosa e com comunicação em diferentes tecnologias, tais como: RFID (*Radio Frequency Identification*), *Bluetooth*, Wi-Fi, *Zigbee*, *Sigfox* e *Lora*.

Na IoT um objeto conectado, é um objeto eletrônico que possui um endereço IP capaz de trocar, comunicar, compartilhar e modificar dados via Internet. O objetivo principal da IoT é realizar uma comunicação entre os objetos, podendo ser utilizados diversos protocolos distintos de comunicação, como o MQTT, permitindo ações automáticas e sintonizadas entre esses objetos, na execução de um processo, sem necessariamente a intervenção humana.

Na simulação realizada, foi conectado à internet, o microcontrolador, que através do protocolo MQTT, publica os tópicos em um broker, permitindo que o

aplicativo supervisório assine e passe a ter acesso aos dados publicados.

2.4 PROTOCOLO MQTT

Segundo Shanmugapriya (2021), MQTT é a abreviação de "*Message Queuing Telemetry Transport*", que opera em redes restritas de baixa largura de banda e de alta latência. Esses recursos, o tornam adequado para ser usado para comunicação M2M (*machine-to-machine*), daí o amplo uso de MQTT em IoT.

O MQTT é executado em TCP/IP e qualquer conexão ordenada, bidirecional e sem perdas pode suportá-lo. Quaisquer dados enviados pela rede por meio do protocolo MQTT são recebidos por um *Broker*, que tem a função de intermediar a comunicação entre os dispositivos assinantes, e esses dados são específicos do aplicativo (SHANMUGAPRIYA et al., 2021).

O *Broker* Mosquitto é um *broker* de código aberto que implementa o protocolo MQTT na máquina. É compatível com diversas plataformas como *Windows*, *Linux* e até *Raspberry Pi*. Ele foi desenvolvido mediante a necessidade de uma comunicação leve entre dispositivos, principalmente em equipamentos restritos, como frequentemente é utilizado em IoT (Light et al., 2017).

Foi definido o protocolo MQTT para comunicação entre o microcontrolador e o aplicativo supervisório neste sistema simulado por ser um protocolo simples, de baixo consumo de dados, taxa de transmissão leve, possibilidade de comunicação bilateral e que se baseia na comunicação entre cliente e servidor.

2.5 MICROCONTROLADOR

De acordo com Parihar (2019), a unidade de microcontrolador IoT (MCU) ou placa de desenvolvimento contém processadores de baixa potência que suportam vários ambientes de programação e podem coletar dados do sensor usando o

firmware e transferir dados brutos ou processados para um servidor local ou baseado em nuvem como o *Broker Mosquito*.

O *NodeMCU* é um *firmware* baseado em linguagem de programação de código aberto LUA como também a linguagem C++, podendo até ser programada através do IDE do Arduino, através da transferência de dados via cabo micro-usb. Esta prototipagem pode ser conectada a computadores, internet ou ser utilizada para processamento independente (*stand alone*).

De acordo com Sartika (2020), o *NodeMCU ESP8266* possui o *chip ESP8266*, regulador de tensão 3.3v DC, possuindo uma comunicação para programação através de interface usb-serial. Possui 11 pinos de I/O, conversor analógico/digital, antena embutida e conectividade wireless.

A programação deste microcontrolador permite o uso de bibliotecas como *eFLL (Embedded Fuzzy Logic Library)*, em que são definidos parâmetros para aplicação da lógica fuzzy.

No projeto de simulação desenvolvido, foi utilizado o microcontrolador *ESP8266*, pois este possui como características fundamentais para o sistema, a capacidade para processamento de dados, possibilitando a execução de uma inferência fuzzy para diagnóstico de falha, leitura e controle das portas GPIO, protocolo de comunicação TCP/IP sem fio através de conectividade *Wireless 2,4 GHz* e sua programação facilitada na IDE do Arduino, e por ser um microcontrolador de baixo valor de custo.

2.6 LÓGICA NEBULOSA (*FUZZY LOGIC*)

Gomide (1995) entende que a *Lógica Nebulosa (Fuzzy)* é a lógica que permite entendimento aproximado ao invés de apenas exatos. Modelagem e controle *fuzzy* de sistemas são técnicas para o tratamento de informações qualitativas de

uma forma rigorosa. Derivada do conceito de conjuntos *fuzzy*, a lógica *fuzzy* constitui a base para o desenvolvimento de métodos e algoritmos de modelagem e controle de processos, permitindo a redução da complexidade de projeto e implementação, tornando-se a solução para problemas de controle até então intratáveis por técnicas clássicas.

Almeida (2021) diz que a biblioteca *eFLL (Embedded Fuzzy Logic Library)* é uma biblioteca padrão para Sistemas Embarcados para implementar Sistemas *Fuzzy* eficientes, que recebe o sinal dos sensores, como sensores de temperatura instalados junto a Motobombas, faz a fuzzificação e envia a resposta para as saídas.

De posse dos dados inseridos nos conjuntos de entradas, saída, inferência realizada, e desfuzzificação, essa biblioteca permite o diagnóstico de falha ocorrido pela cavitação no projeto simulado, a partir de tal, o sistema definirá prioridade no funcionamento das motobombas a serem acionadas através de relés que por sua vez alimentam as contadoras respectivas de cada bomba e assim, iniciando o funcionamento e permitindo o bombeamento de água.

2.7 MOTOBOMBA

Motobomba é um dispositivo composto por um motor elétrico de CA, com uma bomba acoplada ao seu eixo. A motobomba pode apresentar diversos formatos, tais como: bombas submersas, periférica, centrífuga, autoaspirante e injetora (NOGUEIRA, 2010).

De acordo com Irfan et al. (2021), o monitoramento da condição do motor é realizado através da aquisição dos dados de vários sensores, dentre esses, os sensores de vibração, acelerômetro, medidor de velocidade, sensor de deslocamento, sensores de corrente do estator, sensores de tensão, sensores de fluxo magnético, sensores de temperatura e sensores de ruído. Sensores estes que permitem a detecção de

falhas como cavitação, possibilitando uma rápida intervenção.

2.8 CAVITAÇÃO

Segundo Abu-Rahmeh et al. (2018), a cavitação é uma grande preocupação em muitos sistemas hidráulicos, pois, pode resultar em desempenho reduzido da bomba, e danos em tubulações e acessórios. Quando as bolhas de cavitação colapsam, elas forçam no líquido, pontos de alta temperatura, emitindo ondas de choque, sendo essas últimas, fontes de ruído e estresse.

Plesset (2010) investigou os efeitos da temperatura nos danos de cavitação para diferentes materiais, dentro da faixa de temperaturas de água destilada de 0 °C à 90 °C. Os resultados mostraram que o máximo na taxa de dano ocorre em temperaturas na faixa de 40 °C a 50 °C.

Os resultados dos experimentos apresentados por Abu-Rahmeh et al. (2018) evidenciam que a cavitação aumenta à medida que a temperatura e a taxa de fluxo aumentam, o que é consistente com a definição geral de formação de cavitação.

O aquecimento do líquido observado durante o colapso da bolha é de maior amplitude do que o resfriamento medido durante o crescimento da bolha. Este ponto pode estar relacionado ao caráter abrupto da fase final do colapso da bolha, que gera altos níveis de temperatura e pressão no gás (Yasui 1997; Storey e Szeri 2000).

Uma temperatura tão alta, da ordem de milhares de Kelvin, induz a troca de calor por condução com o líquido circundante, o que resulta em um aumento significativo da temperatura na interface, além da condensação de vapor (DULAR; COUTIER-DELGOSHA, 2013).

De acordo com os experimentos realizados por Dular (2016), a temperatura da água influencia significativamente na força da cavitação, onde a agressividade máxima sendo encontrada próximo aos 60 °C.

3 PROCESSOS METODOLÓGICOS MATERIAIS E MÉTODOS

Diante da necessidade do monitoramento de motobombas com o objetivo de intervenção preventiva, aumentando-se assim a vida útil do equipamento, bem como, a confiabilidade e a continuidade do abastecimento de água, foi desenvolvido um sistema embarcado de controle automático, e aplicativo supervisorio criado com uso do MIT APP *Inventor*, baseado em sistema operacional *Android*.

3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento do sistema proposto, foram utilizados os seguintes equipamentos e componentes:

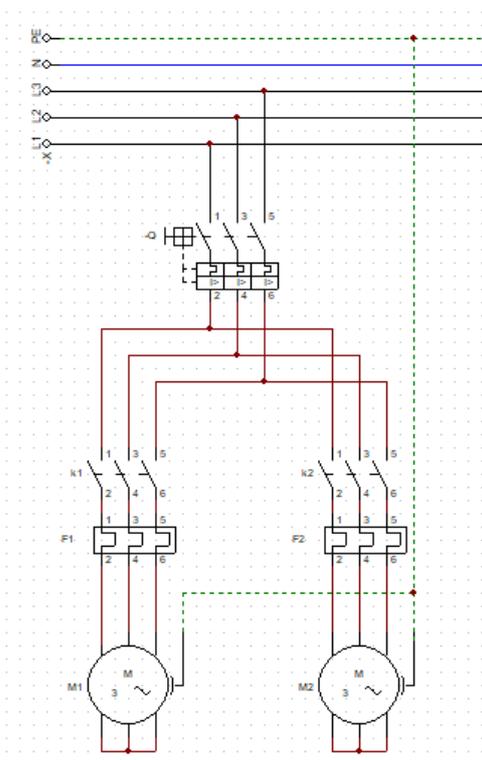
- Microcontrolador ESP8266 *NodeMCU*;
- Módulo de Relé 8ch – HL-58S V1.2;
- Módulo de expansão de portas I2C – PCF8574T;
- Sensor de Temperatura – DS18B20;
- Fonte de alimentação AC/DC 12v 10a;
- *Push Buton* (simular o funcionamento das eletro-boias);
- Resistores 4,7 kΩ;
- Cabos *Jumper* para conexões;
- Cabo flexível 0,5 mm;
- Botão de Emergência – Contato MICIM EB2-BE 101 NO;
- Chave Seletora 3 posições – Contatos MICIM EB2-BE 101 NO;
- Sinalizador Led Verde MICIM ED16-22DS;
- Sinalizador Led Amarelo MICIM ED16-22DS;
- Sinalizador Led Vermelho MICIM ED16-22DS;
- Chave Contatora;
- Relé Térmico;
- Disjuntor;
- Microcomputador;

- *Protoboard.*

3.2 CIRCUITO DE FORÇA

O circuito de força principal, conecta o motor à rede de alimentação elétrica, com uso de contadores para comando, disjuntor e relé de sobrecarga para proteção elétrica (Figura 4).

Figura 4: Circuito de Força.



Fonte: Própria.

3.3 CIRCUITO DE COMANDO

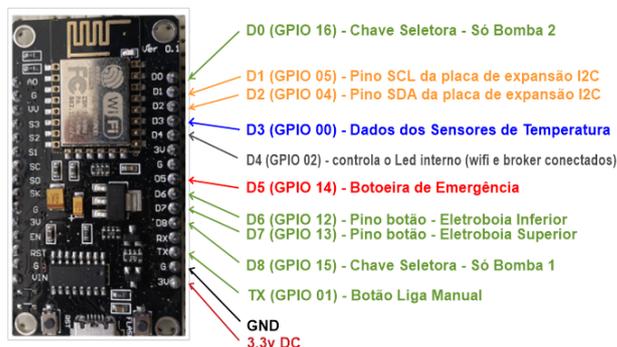
O circuito de comando, responsável pelo sequenciamento de acionamento das motobombas, foi desenvolvido sob a plataforma do microcontrolador embarcado ESP 8266 na PCB *NodeMCU*. Os pinos utilizados podem ser visualizados na Figura 5.

Utilizando-se uma protoboard, estão conectados ao microcontrolador os sensores de temperatura, o módulo de expansão de portas através de interface I2C, módulo de relés conectado ao módulo de expansão, *push buttons* para simular o acionamento das eletro-boias, botoeira de emergência, chave

seletores e botão para acionamento manual do sistema, Figura 6.

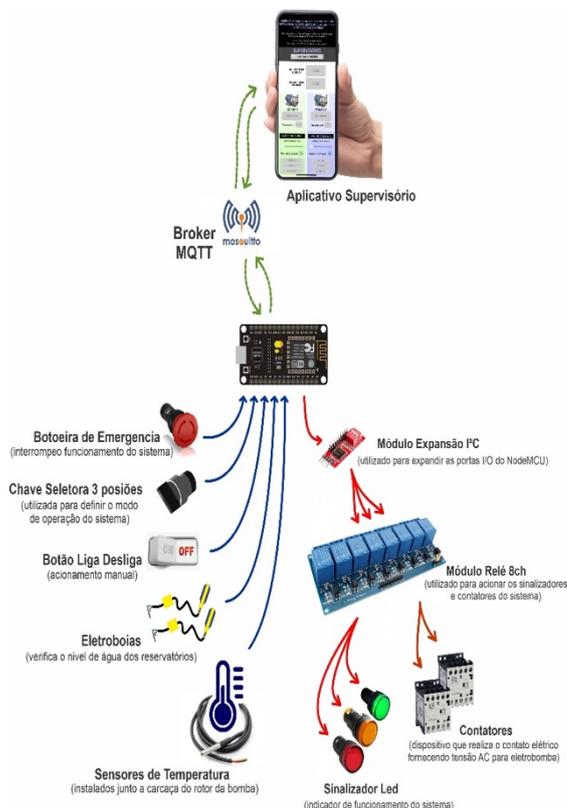
Figura 5: Conexões circuito de comando.

CONEXÕES COM O MICRO CONTROLADOR ESP8266



Fonte: Própria

Figura 6: Esquemático do Circuito de Comando.



Fonte: Própria

3.4 CÓDIGO DO PROGRAMA

O programa foi elaborado utilizando-se um microcomputador PC, e a

plataforma de programação Arduino IDE versão 1.8.19.

Como suporte para o desenvolvimento, foram utilizadas as seguintes bibliotecas:

- Esp8266WiFi.h – utilizada para conexão *wireless* com a internet usando as informações de SSID e *PASSWORD* da rede local;
- PubSubClient.h – utilizada para conexão com o *Broker*, informando a URL de destino e a Porta de comunicação. Também responsável por conectar a tópicos publicados, bem como, publicar novos tópicos no *broker*;
- *Wire.h* – utilizada pelo protocolo de comunicação I²C entre o microcontrolador e o módulo de expansão conectado nas portas SCL e SDA do micro controlador;
- *OneWire.h* – Protocolo de comunicação de dados com os sensores de temperatura Ds18b20 utilizados;
- *DallasTemperature.h* – Biblioteca responsável por interpretar o sinal recebido, informando como saída a temperatura em °C de cada sensor;
- *Fuzzy.h* – Biblioteca eFLL para utilização da inferência nebulosa. Esta biblioteca utiliza o processo de mínimo de Mamdani para inferência sobre as regras e método de Centro de área para defuzzyficação.

3.5 LÓGICA DE ACIONAMENTO

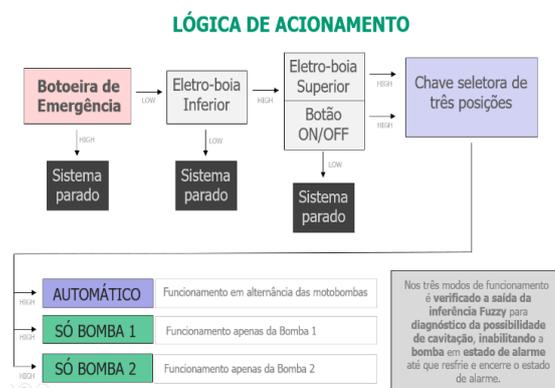
Para que o sistema comande os contadores, permitindo a alimentação das motobombas, é necessário que sejam satisfeitos alguns requisitos (Figura 7):

Inicialmente é verificado o não acionamento da botoeira de emergência.

É verificado também o estado dos sensores de nível, pois, esse estado deve informar um nível satisfatório de água no reservatório inferior para que a motobomba não inicie seu funcionamento “a seco”. E, o estado do sensor de nível do reservatório

superior deve indicar que há necessidade de abastecimento.

Figura 7: Lógica de Acionamento



Fonte: Própria

A partir de então, é verificado o posicionamento da chave seletora de três posições, Automático, Somente Bomba 1 ou Somente Bomba 2, sendo o sinal interpretado da seguinte forma:

- Modo Automático

Neste modo, ocorre uma alternância da motobomba utilizada para o bombeamento, sempre que solicitada água no reservatório superior.

É verificado também a saída da Inferência *Fuzzy*, caso a saída indique uma alta probabilidade de estar ocorrendo cavitação devido ao sobreaquecimento, o sistema colocará a referida bomba em resfriamento até que fique apta a ser utilizada novamente, ascende o Led sinalizador no painel de comando físico, e aciona a motobomba de backup.

- Modo Somente Bomba 1 e Modo Somente Bomba 2

Nesse modo de operação, sempre que for solicitada água no reservatório superior, o bombeamento será realizado apenas pela bomba instalada na posição indicada pela chave de três posições. Caso ocorra um aquecimento acentuado na motobomba, gerando uma saída da Lógica *Fuzzy* que indique uma alta probabilidade de cavitação, a bomba entrará em modo de resfriamento, será acionado o Led

senalizador no painel de comando físico, porém diferente do modo automático, não iniciará o funcionamento da bomba backup.

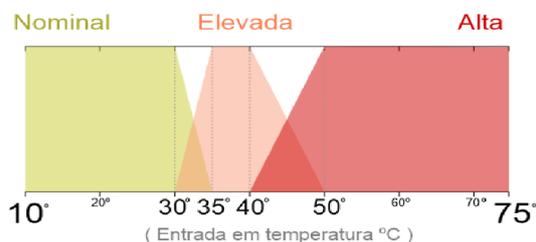
Está disponível também, instalado no painel de comando físico, um botão *On/Off*, que tem a finalidade de acionar a bomba para teste de funcionamento, dispensando o sinal decorrido da caixa superior, desde que a eletro-boia instalada no reservatório inferior indique que há água.

3.6 INFERÊNCIA FUZZY

A Inferência *Fuzzy* ou Lógica nebulosa foi desenvolvida sob o processo de mínimo de Mandani, tendo sido utilizados como conjuntos de entrada uma partição para Temperatura Nominal, uma para Temperatura Elevada e outra para Temperatura Alta para cada motobomba (Figura 8), com inferências independentes.

De acordo com os experimentos realizados por Abu-Rahmeh et al. (2018), o máximo na taxa de danos provocados pela cavitação ocorre em temperaturas na faixa de 40 °C a 50 °C. Deste modo, foi configurado um conjunto de entrada como sendo nominal de 10 °C a 35 °C, um conjunto como sendo de temperatura elevada de 30 °C à 50 °C e o conjunto como sendo de temperatura alta de 40 °C à 75 °C.

Figura 8: Conjuntos *Fuzzy* de Entrada para cada motobomba.

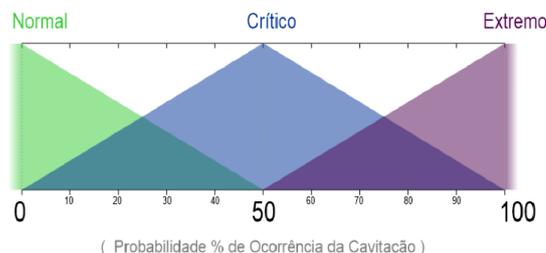


Fonte: Própria

Com o objetivo de simular o funcionamento do sistema proposto, foram configurados como conjuntos de saída da inferência para cada motobomba, três conjuntos, sendo esses definidos como: Funcionamento Normal do equipamento,

estado de Risco de Operação e Situação Extrema, onde possivelmente ocorrerá cavitação (Figura 9).

Figura 9: Conjuntos *Fuzzy* de Saída para cada motobomba.



Fonte: Própria

As regras adotadas para interpretação da lógica nebulosa são mostradas na Figura 10.

Figura 10: Conjunto de Regras para cada motobomba.

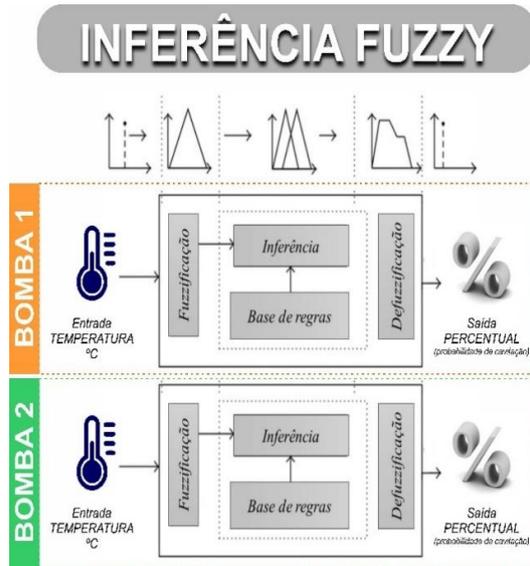
Regra - 01
Se TEMPERATURA é **NOMINAL** então ESTADO é **NORMAL**
Regra - 02
Se TEMPERATURA é **ELEVADA** então ESTADO é **CRÍTICO**
Regra - 03
Se TEMPERATURA é **ALTA** então ESTADO é **EXTREMO**

Fonte: Própria

Assim será retornado um valor percentual indicativo da possibilidade de haver cavitação no sistema da bomba analisada, a partir do método de defuzzyficação centroide.

Aplicam-se os mesmos conjuntos fuzzy de entradas e saída, bem como o mesmo banco de regras ao diagnóstico de cada motobomba em funcionamento. O objetivo é de permitir que, de acordo com as características de operação e dimensionamento de cada motobomba no decorrer do tempo de uso, se possa, de forma independente, alterar as configurações da inferência *fuzzy* (partições, regras) para um diagnóstico individualizado mais preciso. Para esse sistema a saída informa a probabilidade de ocorrência da cavitação em função da temperatura da bomba (Figura 11).

Figura 11: Inferência Fuzzy.



Fonte: Própria

3.7 EXPERIMENTOS COM VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

Para a simulação do sistema em funcionamento, os sensores de temperatura referentes a cada bomba foram expostos ao calor direto de uma chama acesa (Figura 12), bem como, foi realizada a imersão dos sensores de temperatura DS18B20 em água (Figura 13) apresentando diferentes temperaturas.

Figura 12: Teste de variação de temperatura com exposição ao calor de chama.



Fonte: Própria

O comportamento do sistema foi analisado a partir dos resultados obtidos

pela inferência *fuzzy* e observados por meio do Monitor Serial do Arduino, e também com uso do aplicativo supervisorio desenvolvido.

Figura 13: Teste de variação de temperatura com imersão em água.



Fonte: Própria

3.8 DADOS PUBLICADOS NO BROKER MQTT

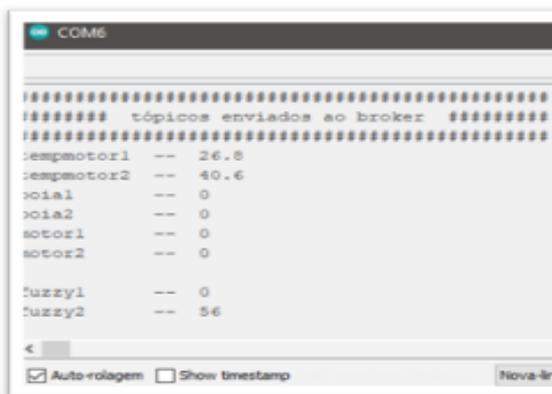
Para o monitoramento no aplicativo supervisorio, foram publicados oito tópicos no *broker* MQTT Eclipse Mosquitto e acompanhado através do monitor serial do Arduino os tópicos enviados:

- `tempmotor1` – informa a temperatura atual em °C, aferida no sensor instalado junto ao corpo da bomba 1;
- `tempmotor2` – informa a temperatura atual em °C, aferida no sensor instalado junto ao corpo da bomba 2;
- `boia1` – informa o estado da eletroboia superior, onde 0 indica caixa cheia e 1 caixa solicitando água;
- `boia 2` – informa o estado da eletroboia inferior, onde 0 indica reservatório vazio e 1 reservatório cheio;
- `motor1` – indica o estado de funcionamento do motor 1 – sendo 0 para bomba desligada e 1 para bomba ligada;
- `motor2` – indica o estado de funcionamento do motor 2 – sendo 0 para bomba desligada e 1 para bomba ligada;

- *fuzzy1* – informa a probabilidade percentual de ocorrência da cavitação a partir da inferência *fuzzy* calculada a partir da temperatura medida na bomba 1;
- *fuzzy2* – informa a probabilidade percentual de ocorrência da cavitação a partir da inferência *fuzzy* calculada a partir da temperatura medida na bomba 2;

Para o exemplo da Figura 14, com temperaturas de entrada de 26,8 °C para motobomba 1 e 40,6 °C para bomba 2, a inferência *fuzzy* indica uma probabilidade nula de ocorrência de cavitação para bomba 1 e 56% de tendência de ocorrência de cavitação para bomba 2.

Figura 14: Monitor Serial com os dados publicados no broker e saída do sistema *Fuzzy*.



Fonte: Própria

3.9 SISTEMA SUPERVISÓRIO

Para a elaboração do sistema supervisório foi utilizada a plataforma web de programação disponibilizada pelo MIT APP *Inventor*, bem como, a linguagem de programação em blocos para o desenvolvimento da lógica desse sistema.

Esse supervisório se conecta ao broker e se inscreve nos tópicos publicados pelo microcontrolador, trazendo em sua *FrontPage* os dados recebidos do *broker* (Figura 15).

Figura 15: Aplicativo Supervisório do sistema proposto.



Fonte: Própria

Ao inicializar o aplicativo supervisório, deve-se solicitar conexão ao *Broker* MQTT clicando no botão “*CONECTAR AO BROKER*” localizado na porção central superior de seu *Layout* (Figuras 16 e 17). Caso haja perda de conexão com a internet e por consequência com o *Broker*, deve ser repetido o procedimento anterior.

Figura 16: Exibição do botão quando desconectado ao *Broker* MQTT.



Fonte: Própria

Figura 17: Exibição do botão quando conectado ao *Broker* MQTT.



Fonte: Própria

Em sua exibição inicial ou quando ocorrer uma perda de conexão, todos os parâmetros apresentam um aspecto esmaecido (Figura 18).

Figura 18: Aplicativo supervisorio desconectado ao Broker MQTT.



Fonte: Própria

Ao ser estabelecida uma conexão, e recebido os tópicos inscritos no *broker*, é ilustrado, no supervisorio, o estado atual do sistema.

Quando o reservatório superior apresentar um nível satisfatório de água, o supervisorio indicará o estado de “CHEIO” para este reservatório (Figura 19).

Figura 19: Indicativo de Reservatório superior Cheio.



Fonte: Própria

Quando o sinal indicado pelo sensor de nível indicar caixa vazia, o supervisorio mostrará “SOLICITANDO ÁGUA” (Figura 20).

Figura 20: Indicativo de Reservatório superior Solicitando Água.



Fonte: Própria

No indicador do reservatório inferior, será apresentada a saída como “VAZIO” ou “CHEIO”, a depender do sinal recebido do tópico “boia2” inscrito no *Broker* MQTT (Figura 21).

Figura 21: Indicativos de estado do Reservatório Inferior.



Fonte: Própria

O indicativo de funcionamento das bombas será ilustrado através do botão “LIGADO”, apresentado logo abaixo da bomba em funcionamento (Figura 22).

Figura 22: Indicativo do estado de funcionamento da Motobomba.



Fonte: Própria

Será exibida, durante todo tempo, a temperatura aferida junto ao sensor instalado próximo ao rotor da bomba (Figura 23).

Figura 23: Exibição da temperatura atual aferida pelo Sensor.



Fonte: Própria

No campo “ANÁLISE DA BOMBA” será apresentada a saída em percentual da Inferência *Fuzzy*, indicando a probabilidade de se estar ocorrendo cavitação no sistema momentaneamente. Além do valor numérico, também será ilustrada através da barra o nível (Figura 24).

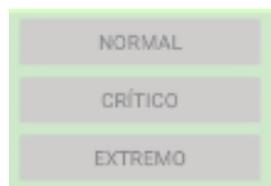
Figura 24: Análise da bomba – Resultado da Inferência *Fuzzy*.



Fonte: Própria

Ainda como indicativo do sistema, os botões “NORMAL”, “CRÍTICO” e “EXTREMO”, apresentam um indicador visual da saída interpretada pela inferência *fuzzy* (Figura 25).

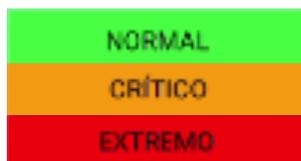
Figura 25: Alarme de estado da Inferência *Fuzzy* sem acionamento.



Fonte: Própria

O estado atual do sistema será destacado no botão, trazendo uma cor ao fundo do botão acionado (Figura 26).

Figura 26: Alarme de estado da Inferência *Fuzzy* acionado.



Fonte: Própria

Sempre que indicado o funcionamento “EXTREMO” da bomba, essa se torna inoperante, entrando em modo

de resfriamento até que fique apta a ser utilizada novamente.

3.10 PAINEL DE COMANDO

No painel de comando, deverá ser configurado o modo de funcionamento do sistema através da chave seletora, nele também será sinalizado o estado funcionamento do sistema (Figura 27).

Figura 27: Painel de Comando.



Fonte: Própria

Este dispõe dos seguintes recursos:

- Botoneira de Emergência;
- Sinalizador Led de botoneira de emergência acionado;
- Sinalizador Led para estado de funcionamento das bombas;
- Sinalizador Led, indicando o estado dos reservatórios;
- Chave seletora para definir o modo de funcionamento do sistema (Automático, Bomba 1 ou Bomba 2);
- Botão para acionamento manual da bomba;
- Sinalizador Led para a saída Extrema do sistema *Fuzzy*;
- Sinalizador Led para indicar o acionamento do relé de sobrecarga;
- Botão para desligar o alarme sonoro de falha.

3.11 ANÁLISE CRÍTICA

É importante citar que, apesar do foco desse trabalho ser o emprego de uma técnica de Inteligência Artificial, a Inferência Fuzzy, para diagnosticar preventivamente a ocorrência de cavitação nas bombas de recalque e com uso de IoT prover ao usuário o acesso à distância de supervisão e controle do sistema de abastecimento, há outros focos relevantes a serem explorados para proporcionar eficiência na operação. Para todos os elementos componentes do circuito de Força e de Comando, a possibilidade de realização de testes em quantidade e frequência de ações por período prolongado, permitirá uma melhor caracterização quanto à qualidade do serviço, bem como, a vida útil do sistema como um todo por análise de falhas. A restrição de tempo para execução da pesquisa nesse trabalho, nos induz a estabelecer como parâmetro de análise de qualidade e eficiência as informações providas pelos fabricantes de cada componente utilizado. Outra condição que permitirá aperfeiçoamento no sistema é viabilizar a instalação de sensores de temperatura em bombas que estejam operando em uso real, o que certamente permitirá uma melhor sintonia da Inferência Fuzzy, com ajustes nas funções de pertinência e definição das regras. Vale também a ressalva de que a supervisão e o comando à distância são dependentes de conexões sem fio para a comunicação de dados, o que sem dúvida é sujeito à falhas oriundas a partir de diversos fatores como, áreas de sombra (áreas sem alcance de sinal de internet ou sinal em muito baixa potência) que impedem a conexão via internet, falhas de conexão com o *Broker* em função de ruídos sobre os dados transmitidos, e ainda possível erros lógicos que possam se manifestar em situações específicas não detectadas na fase de validação, como por exemplo na condição de concorrência de acesso por múltiplos usuários. Assim sendo, é relevante limitar a validade desse trabalho a uma proposta de

solução de baixo custo, com detalhamento suficiente para a reprodução por demais pesquisadores, mas ainda suscetível à exploração por meio de maior quantidade e variedade de testes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através de um ambiente de simulação, foi realizado com sucesso o monitoramento das motobombas com uso de um aplicativo supervisorio Android. Além disso, o programa desenvolvido obteve êxito no gerenciamento do sistema proposto, com acionamento em alternância das motobombas e supervisão dos sensores de temperatura utilizados na simulação da variação de temperatura. Também é possível selecionar manualmente qual motobomba funcionará, recurso este importante diante da necessidade de uma manutenção preventiva e/ou corretiva desse equipamento.

Todo o funcionamento em tempo real pode ser observado através do aplicativo supervisorio, que informa a situação dos reservatórios de água, o estado de funcionamento das motobombas, a temperatura de trabalho, a probabilidade percentual de ocorrência da cavitação e o estado de risco na operação do sistema.

Essa proposta de solução automatizada para o abastecimento de água, também agrega a relevância de ser aplicável a distintas situações como o uso residencial, principalmente em edificações de mais de um pavimento, também o uso comercial, e ainda o uso industrial. Para essas distintas aplicações, a potencialidade da solução proposta se evidencia pelo fato de que há apenas a necessidade de adequação do Circuito de Força, tanto quanto ao dimensionamento das motobombas (potência e vazão nominais), como quanto ao dimensionamento elétrico (capacidade de condução e valores limites para o acionamento) dos dispositivos de comando (contatores) e de proteção (disjuntores e relés). Todo o restante do sistema não se altera, o que proporciona a invariabilidade

do custo para a implantação física do diagnóstico, supervisão e comando propostos por essa solução, ficando a variabilidade do custo definida apenas pela necessidade de revisão da sintonia do sistema (custo homem-hora). Há ainda outro fator relevante que é a diversidade de aplicações para cada âmbito acima citado. Nesses âmbitos (residencial, comercial e industrial) o bombeamento de água possui diversos usos, a citar: o consumo vital humano (principal), o uso higiênico (limpeza de utensílios, ambientes e descargas sanitárias), o uso para o lazer, terapêutico e esportivo (piscinas e banheiras de hidromassagem), processos de fabricação nas mais diversas atividades industriais como, indústria civil, produção têxtil, produção agrícola, produção portuária, enfim, a abrangência atinge desde o setor primário ao setor quaternário da economia. Ou seja, essa é uma proposta de grande relevância em contribuição à sociedade moderna.

5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados do trabalho experimental desenvolvido, obteve-se um sistema confiável para o gerenciamento, o acionamento e monitoramento de motobombas, com a funcionalidade de detectar falhas através do acionamento de relés de sobrecarga, bem como, o monitoramento constante da temperatura com o objetivo de prever a cavitação nos rotores deste equipamento, interferindo de modo a colocar a bomba em modo de resfriamento com acionamento da bomba reserva.

Para um aprimoramento do sistema desenvolvido, pretende-se:

- Em trabalhos futuros, incluir um banco de dados com a finalidade de armazenar todo o histórico de funcionamento e parâmetros configurados no decorrer do tempo;
- Implementar o comando pleno desses equipamentos de forma remota e

multiusuário, além da supervisão até então já implantada;

- Incluir o monitoramento de outras variáveis como vibração, corrente de alimentação das motobombas, e vazão, possibilitando o cruzamento de dados para a detecção de outras imagináveis falhas, que possam prejudicar a confiabilidade do sistema de abastecimento de água;
- Implantar o sistema em uma planta de testes, sujeitando a testes de estresse e monitorando o funcionamento neste cenário.

REFERÊNCIAS

- ABU-RAHMEH, T. et al. **The effect of water temperature and flow rate on cavitation growth in conduits**. Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering Technology, Al-Balqa' Applied University, Amã – Jordânia, 2018. Disponível em: <<http://www.jeaconf.org/UploadedFiles/Document/64541b01-0a47-437e-b3af79afd07a828f.pdf>>
- ALMEIDA, L. F.; PEREIRA, R. T. **Inteligência Artificial no Controle de Robô Sumo**. RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar - ISSN 2675-6218, v. 2, n. 1, p. 69–84, 6 Fev. 2021.
- BAHHAR, C. et al. **Real-time intelligent monitoring system based on IoT**. 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), Monastir – Tunísia. p. 93-96, 2021. doi: 10.1109/SSD52085.2021.9429358
- CARMO, R. L. **A água é o limite? Redistribuição espacial da população e recursos hídricos no Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Demografia) – Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, São Paulo. 2001. 194 p.

CLEITON, E.; RIBEIRO, J.; GIACOMELLI, W. **Automação Residencial: Sistemas Microcontrolados Com Comunicação Wireless Via Gsm.** VII CONNEPI – Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação, Palmas – TO, 2012.

COELHO, W. R. **Análise do fenômeno de cavitação em bomba centrífuga.** 2006. xxxii, 234 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ilha Solteira, São Paulo, 2006.

BAULÉ, D. S. et al. **Using Deep Learning to Support the User Interface Design of Mobile Applications with App Inventor.** Proceedings of the XX Brazilian Symposium on Human Factors in Computing Systems (IHC 21). Association for Computer Machinery, New York, NY – USA, Article 49, p. 1-11, 2021. Disponível em: <[https://doi-org.ez120.periodicos.capes.gov.br/10.1145/3472301.3484340](https://doi.org.ez120.periodicos.capes.gov.br/10.1145/3472301.3484340)>

DULAR, M. **Hydrodynamic cavitation damage in water at elevated temperatures.** 16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Hononulu – USA, 2016.

DULAR, M.; COUTIER-DELGOSHA, O. **Thermodynamic effects during growth and collapse of a single cavitation bubble.** Journal of Fluid Mechanics, v. 736, p. 44–66, 2013.

ESCASSEZ DE ÁGUA. Em Discussão, Brasília, 23, dezembro de 2014. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/emdiscussao/edicoes/escassez-de-agua/contexto/demanda-sera-cada-vez-maior-em-todo-o-mundo>>. Acesso em: 28, novembro 2021.

FONSECA, F. **Efeitos do turismo na demanda d'água da bacia do Rio Gramame Estudo de Caso.** Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. 143 p., Campina Grande-PB, 2008.

IRFAN, M. et al. **A Novel Feature Extraction and Fault Detection Technique for the Intelligent Fault Identification of Water Pump Bearings.** Sensors, v. 21, n. 12, 2021.

GAVRILJUK, V. G., BERNS, H. **High Nitrogen Steels.** 1ª Edição, Springer Berlin, Alemanha – 1999.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-03760-7>

GOMES, H. P.; CARVALHO, P. S. O. (org.). **Manual de Sistemas de Bombeamento: Eficiência Energética. Manual do Usuário.** Procel Sanear. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2012.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R.; TANSCHKEIT, R. **Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações.** Proceedings of 6th IFSA Congress-Tutorials, n. July, p. 1–38, 1995.

JAMES, K.; CAMPBELL, S. L.; GODLOVE, C. E. **Watergy: Taking Advantage of Untapped Energy and Water Efficiency Opportunities in Municipal Water Systems,** Whashington – D.C.: Alliance to Save Energy, 2002.

LIGHT, R. A. et al. **Mosquito: server and client implementation of the MQTT protocol.** Journal of Open Source Software, v. 2, n. 13, p. 265, 2017.

LASHIN, M. **Different Applications of Programmable Logic Controller.** International Journal of Computer Science, Engineering and Information Technology, v. 4, n. 1, p. 27–32, 2014.

MUNASINGHE, T.; PATTON, E. W.; SENEVIRATNE, O. **IoT Application Development Using MIT App Inventor to**

Collect and Analyze Sensor Data, 2019 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), Los Angeles, CA, USA, 2019, p. 6157-6159, doi: 10.1109/BigData47090.2019.9006203.

VERDE, W. M. **Máquinas de Fluxo**, Londrina Editora e Distribuidora Educacional S.A., 248 p., 2018. ISBN: 978-85-522-0738-2

PARIHAR, Y. S. **Internet of Things and Nodemcu: A review of use of Nodemcu ESP8266 in IoT products**. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR), v. 6, n. 6, p. 1085–1086, 2019.

PHAN, T.-H. et al. **Thermodynamic effects on single cavitation bubble dynamics under various ambient temperature conditions**. Physics of Fluids, AIP Publishing, v. 34, Ed. 2, USA, 2022.

PONTES, W. M. C. S. et al. **Sistema de Aquisição e Monitoramento de Dados de Temperatura e Umidade Baseado em Plataforma IoT e Arduino**. 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), USP, São Paulo, 2021.

RIBEIRO, J. M. et al. **SISTEMA DE MONITORAMENTO E CONTROLE DE UM PROCESSO DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA, USANDO ARDUINO E PROTOCOLO GSM**. Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2015.

SARTIKA, D. T. et al. **Development of Irrigation Tank Monitoring System and Its Environment for the Effectiveness of Rice Irrigation**. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, v. 68, n. 5, p. 859–865, 2020.

SHANMUGAPRIYA, D. et al. **MQTT Protocol Use Cases in the Internet of**

Things. Big Data Analytics 9th International Conference (BDA), p. 146-162, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93620-4_12.

STOREY, B. D.; SZERI, A. J. **A reduced model of cavitation physics for use in sonochemistry**. Proceedings of Royal Society, Vol. 457, p. 1685–1700, London, 2001.

SZERI, A. J.; STOREY, B. D.; PEARSON, A.; BLAKE, J. R. **Heat and mass transfer during the violent collapse of nonspherical bubbles**. Physics of Fluids, AIP Publishing v. 15, p. 2576–2586, USA, 2003.

WANTANG, F. **Resistance of high nitrogen austenitic steel to cavitation erosion**. Elsevier, v. 249, Issue 9, p. 788-791, Amsterdã – HOL, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(01\)00811-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(01)00811-0)

YASUI, K. **Alternative model of single-bubble sonoluminescence**. Physical Review E, v. 56, p. 6750–6760, USA 1997.