

Arquitetura IoT para monitoramento de planta industrial: uma comparação dos protocolos MQTT e ESP-Now

Hugo Brian de Carvalho Cortez* Lucas Batista da Fonseca**
Heitor Medeiros Florencio*** Jefferson Doolan Fernandes****
Vitor Vale Pereira† Gabriel Cavalheiro Francisco‡

* *Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Informação, Instituto Metrópole Digital, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN, (e-mail: hugo.cortez.700@ufrn.edu.br).*

** *Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN (e-mail: lucas.batista.065@ufrn.edu.br)*

*** *Instituto Metrópole Digital, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN (e-mail: heitorm@imd.ufrn.br)*

**** *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, RN (e-mail: jefferson.fernandes@escolar.ifrn.edu.br)*

† *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN (e-mail: vitorvalepereira@gmail.com)*

‡ *Universidade Federal do Rio Grande do Norte, RN (e-mail: gcavalheirof@gmail.com)*

Abstract: This article presents a comparison between IoT architectures focused on monitoring the purified water production station of a pharmaceutical industry. The main difference between the two architectures presented is in the configured topology and in the communication protocols used to collect data from IoT devices installed on the equipment. The first architecture is based on the use of the MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) protocol, where each device sends the collected data individually and the consumer is responsible for the organization. The second architecture is based on a wireless sensor network using the ESP-Now protocol, in which a centralizing device is added to manage and synchronize data. The results demonstrated the greater stability and reliability of the second architecture, but there are advantages and disadvantages in the two configurations detailed in the article.

Resumo: Este artigo apresenta uma comparação entre arquiteturas IoT com foco no monitoramento da estação de produção de água purificada de uma indústria farmacêutica. A principal diferença entre as duas arquiteturas apresentadas está na topologia configurada e nos protocolos de comunicação utilizados para coleta de dados de dispositivos IoT instalados nos equipamentos. A primeira arquitetura se baseia na utilização do protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), onde cada dispositivo envia os dados recolhidos individualmente e o consumidor é o responsável pela organização. Já a segunda arquitetura se baseia em rede de sensores sem fio (*Wireless Sensor Network* – WSN, em inglês) utilizando o protocolo ESP-Now, em que um dispositivo centralizador é adicionado para gerenciar e sincronizar os dados. Os resultados demonstraram a maior estabilidade e confiabilidade da segunda arquitetura, porém há vantagens e desvantagens nas duas configurações detalhadas no artigo.

Keywords: IoT; WSN; Sensors network; MQTT; ESP-Now

Palavras-chaves: IoT; WSN; Rede de Sensores; MQTT; ESP-Now

1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais as plantas industriais tem utilizado novas tecnologias para integração vertical dos sistemas, como Computação em Nuvem (*Cloud Computing*), *Big Data*, Análise de Dados e Internet das Coisas (*Internet of Things* – IoT) (Vaidya et al. (2018)). Esse conjunto de tecnologias são os pilares da quarta revolução industrial, ou Indústria 4.0, que tem por objetivo trazer uma maior eficiência para os processos industriais com o uso de dados.

Nesse contexto, dispositivos interconectados que obtêm, pré-processam e disponibilizam dados através da Internet, contribuem de forma essencial para o funcionamento de uma indústria 4.0, visto que os dados são os elementos fundamentais que compõem a informação auxiliando na busca por mais eficiência (Frank et al. (2019)). A troca de dados industriais desses dispositivos através da Internet configura o conceito de IoT aplicado à indústria.

Existem várias formas de comunicação entre os dispositivos IoT e de disponibilização dos dados obtidos para as aplicações e serviços que irão consumi-los (Al-Sarawi et al. (2017)). A escolha da arquitetura do sistema IoT influencia diretamente no desempenho da aplicação. Existem arquiteturas que permitem que o dispositivo IoT possa publicar diretamente no ambiente que será consumido o dado. No entanto, existem arquiteturas que podem centralizar os dados dos dispositivos IoT em uma camada intermediária, ou até em um dispositivo intermediário. Assim, possibilitando o uso de redes de sensores sem fio entre os dispositivos IoT de campo até o dispositivo da camada intermediária.

Além disso, a aplicação de arquiteturas IoT em ambientes industriais deve levar em conta a hostilidade do ambiente, que muitas vezes apresenta altos níveis de interferência eletromagnética que podem ocasionar falhas na comunicação entre dispositivos que utilizam o meio sem fio. Existe uma alta atenuação provocada pela presença de vários objetos metálicos nesses ambientes (Gomes et al. (2014)).

Este trabalho tem o objetivo de avaliar a implementação de dois tipos de arquiteturas IoT utilizando os protocolos MQTT e ESP-Now com dispositivos IoT em uma estação de tratamento de água de uma indústria farmacêutica. A infraestrutura IoT instalada na planta industrial tem por objetivo fornecer informação dos equipamentos ao sistema de supervisão central da fábrica.

O supervisor central da fábrica já continha as informações dos controladores da estação de tratamento. No entanto, os controladores do processo não fazem a coleta de algumas variáveis importante. Com isso, o objetivo dos dispositivos IoT é obter os dados ausentes do processo de forma não invasiva, sem a necessidade de realizar uma atualização do sistema de automação da planta.

Como os dados são apresentados, em tempo real, aos supervisores do processo em *dashboards*, a perda de dados, mesmo que mínima, pode prejudicar uma tomada de decisão baseada nos dados.

Este trabalho avalia, de forma quantitativa, duas arquiteturas de dispositivos IoT através de indicadores de perda de pacote e de atraso.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção são descritos as bases teóricas aplicadas durante a execução da pesquisa.

2.1 IoT

O conceito de IoT engloba diversas tecnologias e áreas de aplicação. Desde o desenvolvimento de dispositivos para coletar e disponibilizar dados na rede até a evolução de soluções de armazenamento de dados. Os sistemas IoT incluem dispositivos conectados a objetos físicos, incorporando funções de medição ou atuação, objetivando conectar e trocar dados com outros dispositivos e sistemas pela internet. Os dispositivos IoT estão presentes desde objetos ou aplicações domésticas comuns até sistemas industriais.

Nesse contexto, soluções IoT vem sendo cada vez mais empregadas no ambiente industrial com a finalidade especialmente para instrumentação e controle de processos com dispositivos que incorporam tecnologias para disponibilização dos dados em nuvem.

2.2 MQTT

O protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) é amplamente utilizado para aplicações IoT pois possui vantagens como facilidade de implementação, baixa alocação de banda, bibliotecas compatíveis com diversas linguagens, além do modelo de troca de mensagens publicador-assinante que possibilita o envio de um dado para nenhum, um ou vários clientes, entre outras, são qualidades que o tornam ideal para projetos IoT.

Os elementos da comunicação via protocolo MQTT são: o publicador, quem envia dados para um tópico; o subscritor, quem recebe dados de um tópico; o broker, é o responsável por gerenciar a comunicação, receber, enfileirar e enviar as mensagens; a mensagem, pacote de dados trocados entre os clientes e o broker; e os tópicos, endereço para os quais se publica e se subscreve para receber os dados.

Neste trabalho, o protocolo MQTT está presente nas duas arquiteturas. Porém o protocolo é utilizado entre as camadas de *Edge* IoT e *Device* IoT apenas na primeira arquitetura.

2.3 ESP-Now

O protocolo ESP-Now foi desenvolvido pela Espressif, empresa desenvolvedora dos diversos modelos de microcontroladores ESPs disponíveis no mercado. O ESP-Now é um protocolo de comunicação direta ponto-a-ponto com baixo consumo de energia e opera no padrão IEEE 802.11 com faixa de frequência de 2,4GHz. Utilizando o protocolo pode-se programar os microcontroladores para se comunicarem em diversos tipos de topologias.

Foi utilizado nesta pesquisa, o protocolo ESP-Now entre os dispositivos da camada *Device* IoT apenas na segunda arquitetura

2.4 Métricas quantitativas

Para a comparação das arquiteturas foram coletados dados de três métricas diferentes. Também conhecido como força

ou intensidade, a potência de sinal é uma medida dada em dBm e expressa entre 0 e -100, portanto um sinal de -40 dBm apresenta melhor qualidade que um sinal de -80 dBm, por exemplos. A segunda métrica é uma estimativa de *delay*. Para cada arquitetura foi calculado o tempo entre a requisição de um dado presente em um dispositivo IoT pelo sistema de supervisão e o seu recebimento. A terceira métrica é a contagem perda de dados provenientes de cada dispositivos IoT utilizado em intervalos de 24 horas.

3. ARQUITETURAS IOT E MATERIAIS

Este trabalho implementa duas arquiteturas IoT para aquisição de dados em uma planta de tratamento de água de uma indústria farmacêutica. Alguns dados da planta já estão disponíveis no supervisão da fábrica através dos controladores dos processos. Os dispositivos IoT instalados na planta têm o objetivo de coleta novos dados de forma não invasiva, ou seja, sem a necessidade de modificar ou realizar um *retrofit* dos sistemas industriais da planta.

Todos os dados da planta são enviados para um sistema de supervisão e aquisição de dados (*Supervisory Control And Data Acquisition - SCADA*), implantado em um *Data Center* externo à empresa. Com isso, os novos dados, gerados pelos dispositivos IoT, também devem ser enviados para o sistema de armazenamento para consumo por parte do supervisão. A Figura 1 apresenta a arquitetura do sistema IoT.

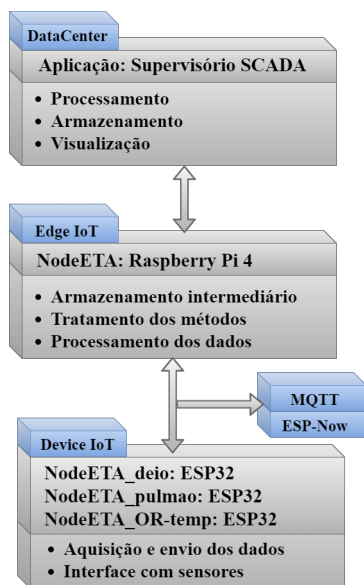


Figura 1. Camadas das arquiteturas IoT

Os dispositivos IoT NodeETA_deio, NodeETA_pulmao e NodeETA_OR-temp, apresentados na camada de *Device IoT* da Figura 1, são os dispositivos IoT instalados na planta para aquisição de alguns dados dos processos: deionização, tanque pulmão e osmose reversa. Esses dispositivos são responsável pela aquisição e envio dos dados.

No entanto, devido à necessidade de realizar algumas técnicas de tratamento de dados e o processamento de alguns algoritmos específicos para a aplicação, tornou-se necessário criar uma camada intermediária, a camada *Edge IoT*, entre os dispositivos IoT a aplicação.

As camadas de *edge IoT* são utilizadas geralmente para processar dados, possibilitando a redução de carga e latência da rede IoT, eliminar o congestionamento de dados até às aplicações e serviços, e, por fim, tornar o processamento mais próximo ao dispositivo de aquisição (Laroui et al. (2021)).

O dispositivo NodeETA, implementado com uma placa Raspberry Pi 4, é responsável pela armazenamento intermediário dos dados dos dispositivos IoT, tratamento desses dados e execução dos métodos de estimação desenvolvidos neste trabalho.

Por fim, os dados tratados e os indicadores gerados pelos métodos de estimativas são enviados ao supervisão central para visualização e avaliação das arquiteturas.

Observa-se na Figura 1 que entre as camadas *Device IoT* e *Edge IoT* existem dois protocolos utilizados para comunicação: MQTT e ESP-Now. Neste trabalho serão implementados duas arquiteturas IoT baseada na arquitetura referência da Figura 1: uma arquitetura IoT com comunicação MQTT (Arquitetura MQTT) e outra arquitetura com comunicação ESP-Now (Arquitetura ESP-Now).

3.1 Arquiteturas IoT baseada no MQTT

A Figura 2 apresenta a primeira arquitetura IoT para aquisição de dados da estação de produção de água purificada com base na comunicação MQTT entre os dispositivos Nodes IoT e o NodeETA (*edge iot*).

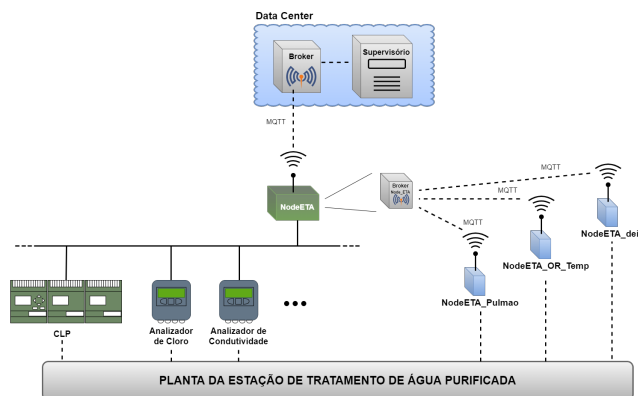


Figura 2. Arquitetura IoT baseada no protocolo MQTT.

O NodeETA, dispositivo da borda IoT (*edge*), é classificado como computador de placa única (*Single Board Computer – SBC*), modelo Raspberry Pi 4.

Observa-se na Figura 2 que todos os Nodes IoT NodeETA_deio, NodeETA_pulmao e NodeETA_OR-temp enviam os dados para um broker MQTT instalado no dispositivo NodeETA. Após o tratamento dos dados e execução dos métodos computacionais, o NodeETA envia as informações para os servidores da aplicação.

Cada Node IoT (ESP32) foi nomeado baseado no dispositivo Edge IoT que recebe os dados, no caso NodeETA, e o equipamento ou processo que contém os dados obtidos, como o deionizador, a osmose reversa e o tanque pulmão.

Nessa primeira arquitetura, Figura 2, a comunicação entre os Nodes IoT e o NodeETA é realizada através do protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*),

assim como a comunicação entre o Raspberry Pi e o supervisor. Existem dois *brokers* para intermediar essa comunicação: o primeiro *broker* está instalado no NodeETA e o segundo está instalado no ambiente da aplicação (o supervisor).

3.2 Arquiteturas IoT baseada no ESP-Now

A Figura 3 apresenta a segunda arquitetura IoT para aquisição de dados da estação com base na comunicação ESP-Now entre os dispositivos Nodes IoT e o NodeETA (*edge iot*). Devido às características de implantação do protocolo ESP-Now, tornou-se necessário inserir um dispositivo ESP32 entre os Nodes IoT e o NodeETA para centralizar os dados dos Nodes IoT.

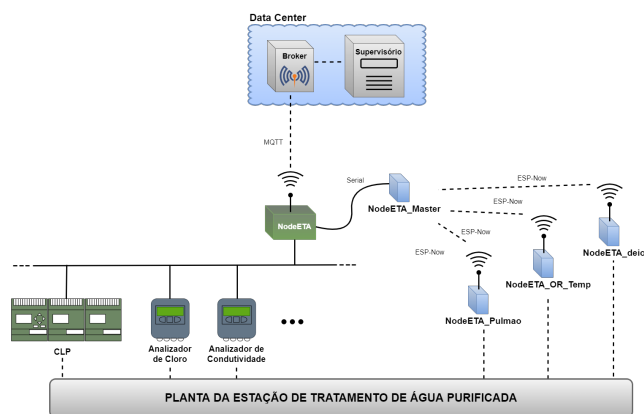


Figura 3. Arquitetura IoT baseada no protocolo ESP-Now.

Nesta segunda arquitetura os Nodes IoT (ESP32) se comunicam através do protocolo ESP-Now. Eles foram programados para enviar os dados recolhidos a uma taxa de amostragem constante para o ESP32 centralizador. Esse Node IoT verifica se houve alguma ausência de dados em cada período de amostragem. Caso ocorra uma ausência o espaço destinado a esse dado no pacote é preenchido com um valor padrão que é identificado como perda de dado.

Na arquitetura IoT baseado em ESP-Now também é possível notar a retirada do *broker* que estava em execução no NodeETA. Essa comunicação é feita agora via protocolo UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*) cabeado. Assim o ESP32 mestre da rede ESP-Now, nomeado NodeETA_Master, gerencia e sincroniza a publicação dos dados dos outros Nodes IoT, enviando-as para o NodeETA através de uma comunicação serial.

Com essa configuração, é possível classificar a rede dos Nodes IoT (ESP32) como uma rede de sensores sem fio.

3.3 Dispositivos Nodes IoT: ESP32

O ESP32 é um microcontrolador de 32 bits desenvolvido pela Espressif. Este microcontrolador vem sendo bastante empregado em solução de IoT principalmente por possuir interface de comunicação sem fio integrada, tornando implementações fáceis e compactas. Além disso, outras características do microcontrolador são: processador *dual core* com frequência de 160 MHz, memória SRAM de 512 Kb, memória *flash* de 16 Mb, 36 GPIO (General Purpose Input/Output) e conversor analógico digital de 12 bits.

A Figura 4 mostra a plataforma com o ESP32 utilizada nos componentes da camada *device* IoT das duas arquiteturas apresentadas.

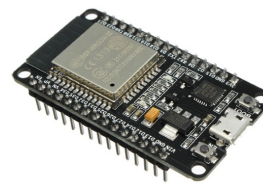


Figura 4. ESP32

Neste trabalho, o microcontrolador é utilizado nos nós da camada *device* IoT tanto na arquitetura IoT MQTT, em 3 dispositivos, quanto na arquitetura IoT ESP-Now, em 4 dispositivos.

3.4 Dispositivo Edge IoT: Raspberry Pi 4B

Raspberry Pi é uma série de SBC (Single Board Computer). Esse dispositivo normalmente é utilizado em soluções IoT que necessitem de alto processamento e armazenamento. Ele possui um sistema operacional robusto baseado em linux e interface de comunicação de rede WiFi integrada. Algumas de suas características principais são: processador de 4 núcleos 1.5 GHz, arquitetura 64 bits e memória RAM de 8GB.



Figura 5. Raspberry Pi 4B

Este dispositivo é utilizado na camada de *Edge* IoT nas duas arquiteturas apresentadas.

3.5 Broker MQTT Mosquitto

O *broker* MQTT é a aplicação responsável por gerenciar os tópicos para a troca de mensagens entre publicadores e assinantes.

Existem alternativas de *brokers* MQTT, entre eles está o Mosquitto que é uma implementação de código aberto desenvolvido pela fundação Eclipse.

Nas duas arquiteturas apresentadas são utilizados *brokers* MQTT do tipo Mosquitto. Na arquitetura IoT MQTT existem dois *brokers*, um rodando no servidor do sistema supervisor e outro no dispositivo NodeETA. Já na arquitetura IoT ESP-Now existe apenas o *broker* executado pelo servidor do sistema supervisor.

4. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho seguiu os passos abaixo:

- (1) Desenho das arquiteturas IoT baseadas no MQTT e no ESP-Now;
- (2) Desenvolvimento dos métodos de estimativa dos indicadores de desempenho da rede;
- (3) Implementação da arquitetura IoT baseada no MQTT;
- (4) Execução dos métodos de estimativa no NodeETA para geração dos indicadores;
- (5) Implementação da arquitetura IoT baseada no ESP-Now;
- (6) Execução dos métodos de estimativa no NodeETA para geração dos indicadores;
- (7) Comparação dos dados obtidos a partir dos métodos nas duas arquiteturas propostas.

Os passos 1, 3 e 5 foram descritos anteriormente.

Os métodos de estimativa implementados neste trabalho foram escolhidos para permitir uma comparação entre as duas arquiteturas a nível de perda de pacotes e atraso. No entanto, entende-se que os protocolos podem apresentar características de execução diferentes.

Os indicadores escolhidos para quantificar o desempenho das arquiteturas foram: potência dos sinais recebidos, atraso dos links (*delay*) e perda de dados diária. Os Nodes IoT foram mantidos nos mesmos locais sobre as mesmas condições de ambiente.

4.1 Potência do sinal

Para comparar os valores de potência de sinal, foi requerido que cada dispositivo da camada *device* IoT enviasse amostras para a camada de *Edge* IoT.

Foram coletadas 500 amostras de potência do sinal para cada dispositivo e para cada uma das arquiteturas. Tais amostras foram armazenadas no NodeETA em forma de arquivo para a posterior comparação.

A arquitetura MQTT apresenta os valores de potência entre os Nodes IoT (ESP32) e o roteador mais próximo disponível. Já a arquitetura ESP-Now calcula os valores de potência entre os Nodes IoT (ESPs) e o NodeETA_Master.

4.2 Método de Estimativa do Delay

A estimativa de *delay* foi obtida calculando a diferença entre o tempo em que uma requisição é realizada pelo sistema supervisor até o momento em que é recebida. Assim, é necessário que informação percorra toda a infraestrutura até que volte ao ponto inicial.

Para a arquitetura MQTT, o método utilizado é ilustrado na Figura 6. O método consiste em enviar um dado do sistema supervisor, percorrer por toda arquitetura e verificar se o mesmo dado foi recebido através de uma sequência de publicações e subscrições utilizando o protocolo MQTT. O caminho percorrido por esse dado é o mesmo para todos os dados provenientes dos Nodes IoT (ESP32) da arquitetura, como pode ser observado na Figura 2.

Esse método de estimativa foi baseado do trabalho de Ferrari et al. (2018). Onde os autores fazem um comparação entre *brokers* MQTT públicos e privados com base no *delay*. Já o presente trabalho utiliza tal método e métrica de *delay* para comparar diferentes topologias e protocolos.

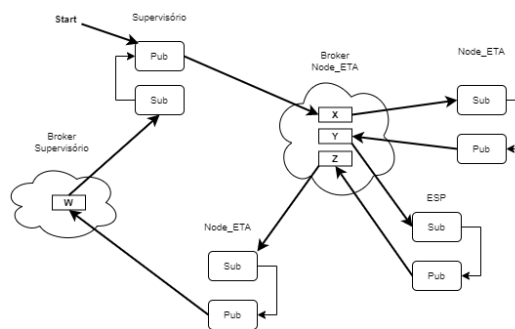


Figura 6. Arquitetura IoT MQTT: Método Estimativa de Delay

Para a arquitetura ESP-Now foi utilizado o mesmo método, porém há uma diferença nos protocolos de comunicação e na topologia da arquitetura com a inserção de um Node IoT mestre, conforme apresenta a Figura 3.

O método de estimativa de *delay* da arquitetura ESP-Now é detalhado na Figura 7. É possível notar a aplicação de protocolo diferente como o serial UART entre o dispositivo NodeETA e o dispositivo NodeETA_Master.

Ao longo dos testes, percebeu-se a existência de um tempo elevado de troca de dados entre a porta serial do dispositivo NodeETA e a aplicação utilizada para processar os dados antes de enviá-los ao sistema supervisor. Esse tempo é fixo e impactou na estimativa de *delay* da arquitetura. Esse tempo não foi desconsiderado no momento porque faz parte da arquitetura.

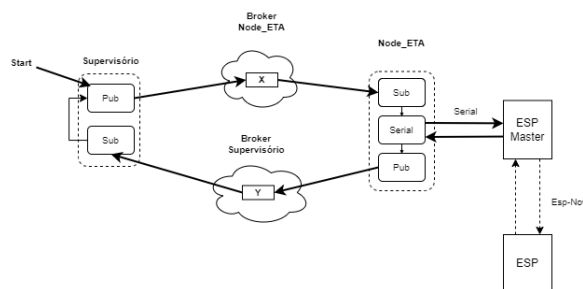


Figura 7. Arquitetura IoT ESP-Now: Método Estimativa de Delay

4.3 Método de Estimativa de Perda de Dados

O método de estimativa da perda de dados foi baseado no armazenamento interno de todos os dados recebidos dos Nodes IoT (ESP32) em um arquivo no NodeETA. Os dispositivos Nodes IoT foram configurados para enviar em uma taxa fixa de 5 segundos.

Após o período de coleta das amostras de 4 (quatro) dias, o NodeETA realiza uma verificação de contagem de pacotes para verificar se existe pacotes perdidos.

A quantidade de perda de dados diária é o indicador mais importante para o estudo pois ele é a consequência final de um sinal fraco e influencia diretamente no monitoramento em tempo real da planta.

Após o desenvolvimento dos métodos de estimativa dos parâmetros de avaliação das arquiteturas, foram realizadas as comparações dos valores obtidos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados e comparados os indicadores das duas arquiteturas implementadas. Os indicadores foram coletados durante 4 (quatro) dias para cada uma das arquiteturas. Os dados da execução da arquitetura IoT MQTT foram obtidos entre o dia 17 e 20 de fevereiro de 2022. Já os dados da arquitetura IoT ESP-Now, foram obtidos entre os dias 26 de fevereiro e 01 de março de 2022.

A Figura 8 apresenta a imagem do NodeETA_OR-temp instalado na planta.



Figura 8. NodeETA_OR-temp instalado no processo.

5.1 Potência do sinal recebido

A Figura 9 mostra os valores obtidos da potência do sinal dos Nodes IoT (ESP32) no período de coleta utilizando a arquitetura MQTT. O gráfico da Figura 9 apresenta os valores da potência do sinal entre os Nodes IoT (ESP32) e o roteador mais próximo.

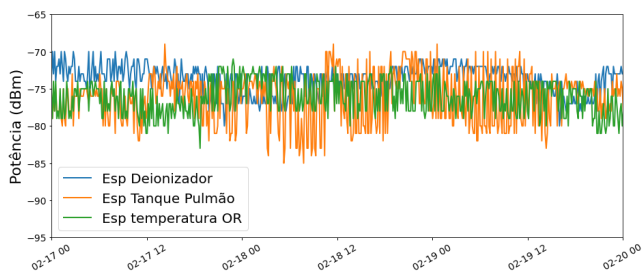


Figura 9. Arquitetura IoT MQTT: Potência do sinal dos Nodes IoT (ESPs).

Observa-se que o melhor sinal no Node IoT localizado no deionizar (NodeETA_deio). E o Node_pulmao (Esp Tanque Pulmão) apresenta uma maior instabilidade.

A Figura 10 apresenta as curvas obtidas para os sinais dos Nodes IoT (ESPs) utilizando a arquitetura ESP-Now, ou seja, a potência medida entre o Node ESP mestre e os demais nodes IoT (ESPs).

Percebe-se uma maior estabilidade de todos os nodes comparado à arquitetura MQTT. Porém, em valores absolutos, o Node IoT que obtém os dados do tanque pulmão (Node_pulmao) obteve o pior desempenho.

As distâncias entre os nós de comunicação e as interferências dos objetos entre eles são as variáveis que mais

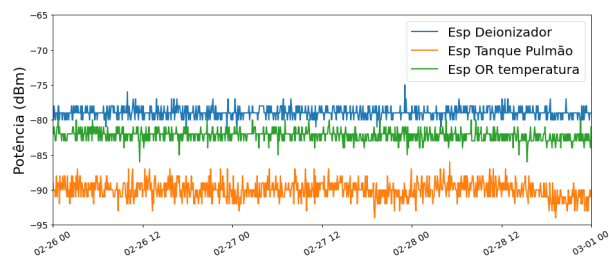


Figura 10. Arquitetura IoT ESP-Now: Potência do sinal dos Nodes IoT (ESPs).

influenciam a potência do sinal. Porém, considerando fixo o posicionamento dos Nodes IoT e os objetos (metálicos ou não) da planta, pode-se afirmar que o protocolo ESP-Now traz uma maior estabilidade mas com menores potências de sinal.

5.2 Estimativa de Delay

Foram obtidas 500 amostras de estimativa de *delay* para cada arquitetura e para cada Node IoT (ESPs) utilizando o método descrito.

Os valores de *delay* da arquitetura MQTT receberam um *offset* devido a comunicação serial e a aplicação do Raspberry Pi utilizada para o pré-processamento dos dados.

A Figura 11 apresenta os resultados de tempo de atraso para o NodeETA_deio, dispositivo IoT instalado no processo de deionização.

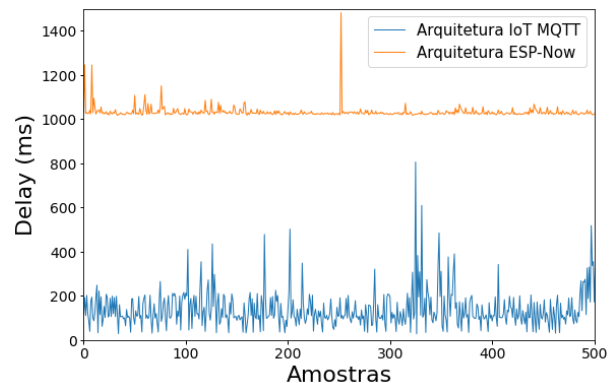


Figura 11. Resultados da estimativa de *Delay* do NodeETA_deio (Deionizador) das duas arquiteturas.

Percebe-se na Figura 11 que uma maior estabilidade nas amostras da arquitetura ESP-Now. Porém, o acréscimo causado pela comunicação serial torna o *delay* muito alto em valores absolutos.

A Figura 12 apresenta os resultados de tempo de atraso para o NodeETA_OR-temp, dispositivo IoT instalado no processo de osmose reversa para coleta do dado de temperatura de um trocador de calor.

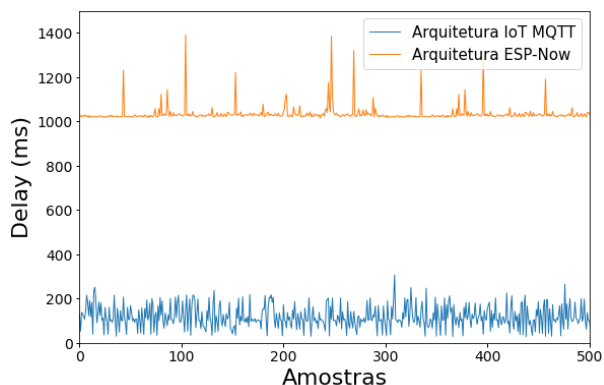


Figura 12. Resultados da estimativa de *Delay* do NodeETA_OR-temp (Osmose Reversa) das duas arquiteturas.

Observa-se na Figura 12 uma quantidade menor de picos na arquitetura MQTT comparado ao NodeETA_deio. Porém, é possível perceber também a maior instabilidade da arquitetura ESP-Now.

A Figura 13 apresenta a estimativa de *delay* para o NodeETA_pulmao, dispositivo que coleta dados do tanque pulmão.

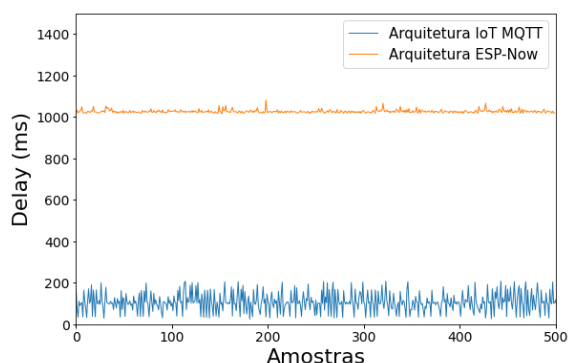


Figura 13. Resultados da estimativa de *Delay* do NodeETA_pulmao (Tanque pulmão) das duas arquiteturas.

Observa-se que o NodeETA_pulmao possui o melhor desempenho com relação ao *delay*, tanto para a arquitetura MQTT quanto para a arquitetura ESP-Now. O NodeETA_pulmao obteve estabilidade e baixos valores de *delay*.

5.3 Perda de dados

Para analisar a perda de dados, foram contadas as quantidades de amostras perdidas a cada dia analisado. O período de amostragem é de 10 segundos, portanto a quantidade total de amostras em um dia é de 8640.

A Figura 14 apresenta o quantitativo de perdas de pacotes no NodeETA_deio. Observa-se que a quantidade de perdas com a arquitetura MQTT é superior à quantidade na arquitetura ESP-Now. Essa diferença é ainda mais evidenciada no quarto dia, onde houveram 17 perdas em 24 horas. Nota-se também a ausência de perdas da arquitetura ESP-Now no primeiro dia.

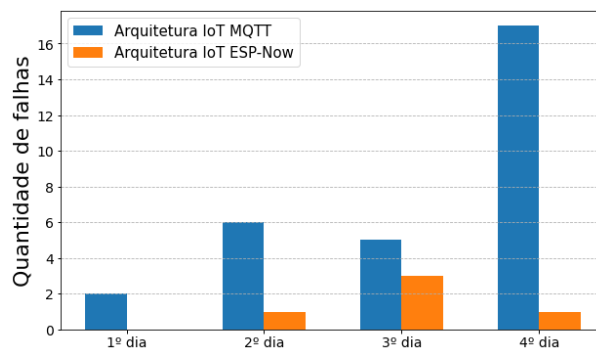


Figura 14. Quantidade de perdas de pacotes no NodeETA_deio.

A figura 15 apresenta a quantidade de perda de pacotes no NodeETA_pulmao. O gráfico enfatiza a maior diferença entre as arquiteturas, principalmente nos dois primeiros e no último dia, em que a somatória das diferenças resultam em 51 falhas a mais do que a outra arquitetura. Além disso, esse foi o único dispositivo que apresentou falhas de comunicação no primeiro dia do experimento. E da mesma forma dos outros gráficos anteriormente explicitados, todos os dias, a arquitetura MQTT obteve mais perdas.

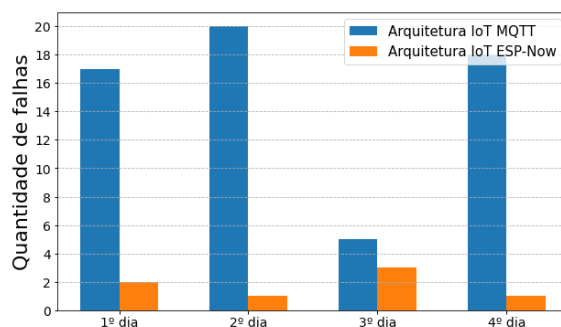


Figura 15. Quantidade de perdas de pacotes no NodeETA_pulmao.

A Figura 16 apresenta o quantitativo de perda de dados do NodeETA_OR-temp, instalado no processo de osmose reversa da planta. É possível observar na Figura 16 que a arquitetura ESP-Now não perdeu dados nos dois primeiros dias, e que em todos os dias a arquitetura MQTT teve perda de dados.

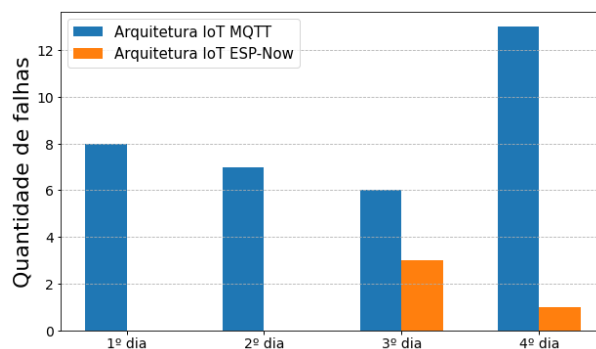


Figura 16. Quantidade de perdas de pacotes no NodeETA_OR-temp.

Diante do exposto, pode-se observar que a arquitetura ESP-Now obteve melhor desempenho no principal indicador que é a quantidade de dados perdidos por dia.

5.4 Dados Estatísticos

As Tabelas a seguir apresentam as médias aritméticas dos indicadores demonstrados anteriormente. Para o indicador de perda de dados, o valor representa a média diária de perdas com relação aos quatro dias analisados. Para os demais, a média leva em conta todas as amostras.

A Tabela 1 refere-se aos dados da arquitetura MQTT. Podemos observar uma proximidade da potência de sinal obtida pelos três Nodes IoT, o que não se aplica aos valores médios de *delay*. O dispositivo que captura os dados do deionizador (NodeETA_deio) possui a resposta média mais lenta enquanto o dispositivo do tanque pulmão (NodeETA_pulmao) possui a resposta mais rápida referente a arquitetura MQTT. Percebe-se também que o dispositivo que a temperatura da osmose reversa (NodeETA_OR-temp) tem a perda diária mais alta, 15 perdas em média.

Tabela 1. Média dos Indicadores Arquitetura MQTT.

Arquitetura MQTT	Potência (dBm)	Delay (ms)	Perdas
NodeETA_deio	-74.35	139.20	7,5
NodeETA_OR-temp	-76.06	120.59	15.0
NodeETA_pulmao	-76.38	105.0	8.5

Os valores médios da arquitetura ESP-Now estão detalhados na Tabela 2. Os valores médios de *delay* são bastante próximos para os 3 dispositivos. A potência do sinal é o indicador que apresenta maior variação entre os três dispositivos onde o valor do NodeETA_pulmao possui a pior média. Com relação a perda de dados, o dispositivo NodeETA_OR-temp, assim como na arquitetura MQTT, possui a pior média diária comparado com os dispositivos da arquitetura ESP-Now.

Tabela 2. Média dos Indicadores Arquitetura ESP-Now

Arquitetura ESP-Now	Potência (dBm)	Delay (ms)	Perdas
NodeETA_deio	-78.97	1032.0	1.25
NodeETA_OR-temp	-82.2	1034.22	1.75
NodeETA_pulmao	-90.05	1025.0	1.0

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi implementado duas arquiteturas com tecnologias de comunicação entre os dispositivos IoT diferentes para comparação do desempenho dos sistemas com base nos parâmetros de perda de pacote e delay. Foram implementados métodos específicos para cada arquitetura com o intuito de coletar os dados para comparação.

Diante da pesquisa e dos resultados apresentados anteriormente, constatou-se que, para o objetivo específico desta aplicação, a arquitetura ESP-Now possui maior confiabilidade pois há significativa melhora na quantidade de dados perdidos em relação a arquitetura MQTT.

As aplicações que utilizam dispositivos sem fio em ambientes hostis e em que a perda de dados é crítica como

para monitoramento em tempo real podem considerar o uso de uma rede de sensores sem fio como exemplificado na arquitetura ESP-Now.

No entanto, cada arquitetura possui pontos fortes a serem destacados. Na arquitetura MQTT, pelo fato dos Nodes IoT (ESPs) estarem conectados diretamente a rede WiFi da fábrica, é possível fazer atualizações remotas de software utilizando a tecnologia OTA (*Over-The-Air*). Além disso, mesmo considerando que a equipe de TI projetou todos os pontos de acesso da fábrica com cuidado, é possível fazer um levantamento de melhores posicionamentos dos roteadores dentro da planta.

A arquitetura MQTT também apresentou menores valores de *delay*. Esses valores podem ser bem mais baixos utilizando QoS (Quality of Service) inferiores aos utilizados na aplicação que é o máximo. Desse modo, aplicações que exijam tempo de resposta menores, como para controle automático, podem também considerar utilizar modelos semelhantes a arquitetura MQTT.

A arquitetura ESP-Now possui outro ponto forte, além da confiabilidade, que é a independência dos Nodes IoT de um roteador e, consequentemente, da rede WiFi da fábrica. Dessa forma, caso a rede WiFi fique indisponível, a rede de sensores baseada no ESP-Now continuará enviando dados para o dispositivo NodeETA que os acumula em forma de *backup* e os envia para o sistema supervisor quando a conexão for reestabelecida.

Portanto, o estudo apresentou uma comparação entre duas arquiteturas IoT que servem como base para implantação de sistemas IoT em ambientes industriais.

AGRADECIMENTOS

Ao Núcleo de Pesquisa em Alimentos e Medicamentos (NUPLAM) da UFRN pela contribuição na pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Al-Sarawi, S., Anbar, M., Alieyan, K., and Alzubaidi, M. (2017). Internet of things (iot) communication protocols. In *2017 8th International conference on information technology (ICIT)*, 685–690. IEEE.
- Ferrari, P., Flammini, A., Sisinni, E., Rinaldi, S., Brandão, D., and Rocha, M.S. (2018). Delay estimation of industrial iot applications based on messaging protocols. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 67(9), 2188–2199.
- Frank, A.G., Dalenogare, L.S., and Ayala, N.F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210, 15–26.
- Gomes, R.D., Alencar, M.S., Fonseca, I.E., and Lima Filho, A.C. (2014). Desafios de redes de sensores sem fio industriais. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, 4(1), 16–27.
- Laroui, M., Nour, B., Mounghla, H., Cherif, M.A., Afifi, H., and Guizani, M. (2021). Edge and fog computing for iot: A survey on current research activities & future directions. *Computer Communications*, 180, 210–231.
- Vaidya, S., Ambad, P., and Bhosle, S. (2018). Industry 4.0—a glimpse. *Procedia manufacturing*, 20, 233–238.