

Utilização dos protocolos ESP-NOW e MQTT para monitoramento e interação com sistemas industriais

Lucas H. Santos*. Eduardo J. da Silva*
Marinelson P. de Santana*. Elen P. Lobato*. Wellington S. Fonseca*.

*Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia,
Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil
E-mails: lucas.brito.santos@itec.ufpa.br, eduardo.monteiro.silva@itec.ufpa.br,
marinelson.santana@itec.ufpa.br, elen.lobato@itec.ufpa.br, fonseca@ufpa.br.

Abstract: This article describes an implementation of an automation system for engines that uses the ESP-NOW and MQTT (Message Queue Telemetry Transport) protocols to send data. The main of the created system is to avoid the loss due to eventual objective in the communication data network. For this, the developed system can use two network topologies: Mesh and Ad Hoc. As a form of control, they were performed to control water and control a control system, where a run-level control system was performed. After the tests carried out, the objective was that the system reached its main use and is its use in the industrial sector.

Resumo: Este artigo descreve a implementação de um sistema de automação para motores que utiliza os protocolos *ESP-NOW* e *MQTT* (do inglês *Message Queue Telemetry Transport*) para enviar dados. O principal objetivo do sistema criado é evitar a perda de dados por conta de eventuais falhas na rede de comunicação. Para isso, o sistema desenvolvido possui a capacidade de utilizar duas topologias de redes: *Mesh* e *Ad Hoc*. Como forma de verificar o seu funcionamento, foram realizados testes, onde o sistema implementado foi alocado para controlar e monitorar um sistema de exaustão, um sistema de compressão e um sistema de controle de nível de água. Após os testes realizados, constatou-se que o sistema alcançou o seu principal objetivo e é viável a sua utilização em linhas de produção do setor industrial.

Keywords: Ad Hoc; ESP-Now; ESP32; Mesh network; engine; MQTT.

Palavras-chaves: Ad Hoc; ESP-Now; ESP32; rede *Mesh*; motor; MQTT.

1. INTRODUÇÃO

Todos os dias novos avanços tecnológicos são desenvolvidos em diversos setores e um dos setores bastante propício para o desenvolvimento de novas tecnologias e inovações, é o setor industrial. Nos últimos anos, houve avanços significativos na área de Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) aplicada no setor industrial.

Dentro desse escopo, os circuitos eletrônicos têm um papel fundamental na otimização de uma produção cada vez mais rápida e eficiente, com uma redução significativa das dimensões e custos. Computadores, periféricos e microcontroladores também evoluíram durante esse período. Dessa forma, ampliou-se as possibilidades de implementar sistemas IoT em diversas áreas e atribuir funções que antes eram executadas apenas por seres humanos (Rosário, 2009).

Com o objetivo de poupar tempo de trabalho humano, as máquinas foram inventadas e implementadas no processo de produção. Isso mudou a forma de se fabricar produtos, pois o processo deixou de ser manufaturado e passou a ser maquinado, permitindo assim uma produção em massa no mercado por um preço menor. Esse período ficou conhecido na história como a Revolução Industrial (Cavalcante, 2011).

Nesse contexto, o desenvolvimento de circuitos integrados possibilitou a produção em larga escala e o baixo custo de microprocessadores dedicados a realizar tarefas mais específicas, no ambiente industrial. Possibilitando, assim, que os sistemas IoT, estejam cada vez mais presentes na indústria, trocando informações, geralmente, através de uma rede.

Um dos principais protocolos de IoT utilizado para o envio de dados é o MQTT. Esse protocolo é aberto, leve, simples, transmite pouca quantidade de dados e funciona através do método de assinatura/publicação (subscribe/ publish) em tópicos (topic). Por conta de todas essas funcionalidades ele é considerado o protocolo ideal para IoT (Cloudmqtt, 2022).

Esta capacidade de troca de informações pode se dar através de uma rede, preferencialmente própria, somada a técnicas de Inteligência Artificial, é essencial em sistemas industriais, onde o tempo de resposta em casos de emergências, pode fazer a diferença, no monitoramento em tempo real de uma linha de produção, por exemplo, alertando os cuidados e possíveis riscos em casos de falha (Zanella, 2014).

A rede *mesh*, também conhecida como rede sem fio, torna possível a troca de informações entre diversos dispositivos com o intuito de tirar o melhor proveito do alcance do sinal emitido. Esse tipo de rede é aplicável em sistemas de monitoramento de ambientes por meio de sensores (Breuel, 2004).

Dentro desse contexto, este trabalho descreve a implementação do sistema nomeado como SP2-EMA (Sistema P2P ESP-Now e MQTT de Automação), para controle e monitoramento de motores. O sistema criado utiliza os protocolos *ESP-NOW* e MQTT através de uma conexão *Wi-Fi* (*Wireless Fidelity*). Esse tipo de conexão sem fio simplifica a comunicação entre os dispositivos de controle remoto (Espresif-systems, 2016). Além disso, também foi criada uma rede *Ad Hoc*, com o intuito de operar na ausência de um ponto de controle central, evitando assim que a produção seja interrompida. Através da rede *Ad Hoc*, as estações se comunicam diretamente umas com as outras, enviando apenas os dados necessários para seus destinatários (Antunes, 2012).

O restante do trabalho está estruturado da seguinte forma: na seção 2 descreve como se deu a implementação do sistema criado, na seção 3 são apresentados os resultados e na seção 4 é feita a conclusão deste trabalho.

2. IMPLEMENTAÇÃO DO SP2-EMA

O sistema criado é composto por dois tipos de sistema embarcados, sendo o primeiro um sistema embarcado mestre e o segundo o sistema embarcado auxiliar de acionamento. O sistema embarcado mestre se conecta a uma plataforma em nuvem e a outros sistemas auxiliares. Esses sistemas embarcados são alocados nos motores que devem ser monitorados e são responsáveis pelo acionamento dos relés e consequentemente dos motores, conforme ilustra a Fig. 1.

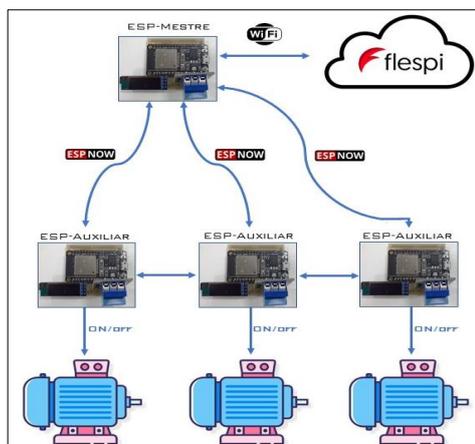


Fig. 1 Arquitetura do SP2-EMA.

Dentro desse contexto, o sistema criado busca viabilizar formas de empregar a tecnologia de sensores wireless com o auxílio da rede Mesh e Ad Hoc, para que sejam utilizadas em qualquer tarefa industrial, principalmente onde não é viável a utilização de redes de cabeada. O SP2-EMA é composto pelo sistema de hardware e pelo sistema software, que serão explicados a seguir.

2.1 Implementação do Sistema de hardware

Parte de *hardware* do SP2-EMA é constituída pelo sistema mestre e o sistema auxiliar de acionamento que utilizam diversos componentes de eletrônica, conforme ilustra a Fig. 2. Os componentes utilizados na montagem dos sistemas embarcados estão descritos na Tabela 1. Destaca-se que os

componentes utilizados são de bom custo-benefício e facilmente encontrados no mercado nacional.

Tabela 1. Componentes utilizados no sistema eletrônico

Item	Componente	Qtd.
1	Módulo de desenvolvimento ESP-32	4
2	Módulo Relé 5 V	3
3	Display OLED	2
4	Sistema de controle do Exaustor	1
5	Sistema de controle do Compressor	1
6	Sistema de controle de nível	1

Os componentes usados nos circuitos eletrônicos foram escolhidos para facilitar a instalação dos sistemas embarcados nos sistemas escolhidos para o experimento.

- 1) **Sistema embarcado mestre:** responsável pela captação dos dados através do protocolo de comunicação *ESP-NOW*. Ele é encarregado pela interação entre os módulos das ESP-32 na rede local. Além disso, o mestre tem a capacidade de transmitir os dados e acionar o motor através da nuvem, sem a necessidade de estar presencialmente no local onde estão os motores. Ele possui um display OLED para verificar os estados de cada sistema de controle de forma presencial, assegurando assim a lisura das informações nos eventuais momentos em que a nuvem estiver *offline*.
- 2) **O sistema embarcado auxiliar de acionamento:** é o ponto central do estudo, porque é responsável pela alimentação do contator de potência que faz o acionamento do motor. Desse modo, o controle do contator é feito pelo módulo relé de 5V que fica conectado em série entre a fonte de alimentação e o contator. Todo o controle é feito através do microcontrolador ESP-32.

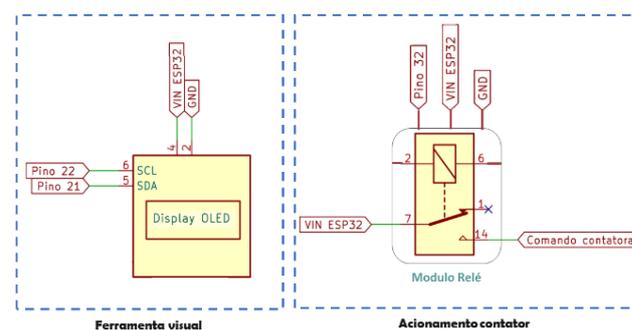


Fig. 2 Esquemáticos dos sistemas embarcados mestre e auxiliar do SP2-EMA.

2.2 Implementação do Sistema do software

O desenvolvimento do *software* utilizado no SP2-EMA é baseado na implementação e dinâmica das redes *Mesh* e *Ad Hoc*. Utilizou-se a plataforma Arduino IDE para programação em linguagem C++ da ESP-32. Além disso, foi utilizado o protocolo *ESP-NOW*, desenvolvido pela *Espressif*, que

permite a comunicação de vários dispositivos entre si sem usar *Wi-Fi* (Pasic; Atanasovski. 2021).

A comunicação do sistema criado ocorre da seguinte forma: no estado inicial, todas as informações disponíveis são concentradas em uma única ESP cujo armazenamento é feito em variáveis criadas em *structs*. Assim, nas ESPs “auxiliares”, optou-se por habilitar via codificação a possibilidade de quem recebe os dados. A ESP “mestre” por sua vez carrega uma senha que é enviada constantemente às ESPs “auxiliares”, por meio da função *esp_now_send()*. Vale destacar que cada ESP tem um *MacAddress* próprio, e para ser efetuado o envio de qualquer informação é necessário que o dispositivo responsável por enviar tal informação tenha conhecimento do *MacAddress* do dispositivo de destino da informação. A Fig. 3 mostra como essa dinâmica explicada anteriormente ocorre.

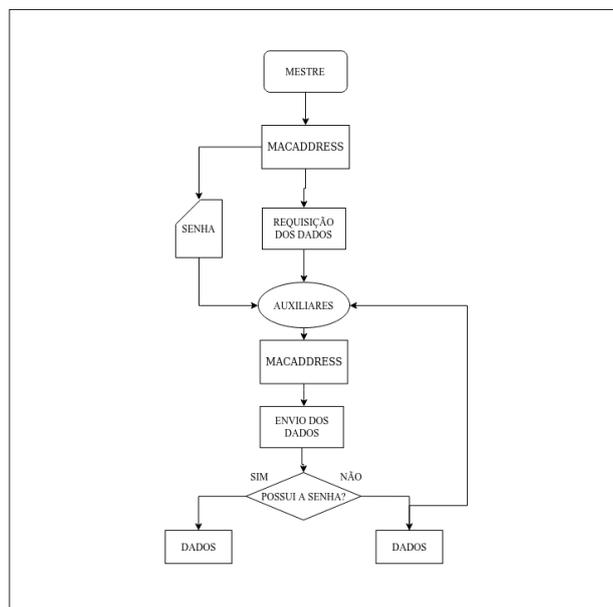


Fig. 3 Diagrama: envio de dados através do protocolo *ESP-NOW*.

Como medida de segurança em caso de falha da rede, foi criada uma rede *Mesh* primária e uma rede *Ad Hoc* secundária. Essa implementação de mais de uma topologia de rede no SP2-EMA ocorreu devido a observação de vulnerabilidades dessas redes de comunicação atuando sozinhas. Fazendo um comparativo de protocolos, é possível identificar fragilidades, as quais comprometem não somente segurança de dados, mas também a confiabilidade de que a comunicação será bem-sucedida (Correa, 2018).

A exemplo dessas fragilidades, pode-se citar a grande quantidade de caminhos possíveis suscetíveis a sobrecarga ou a congestionamento de tráfego de dados (Mallmann, Carlos. 2020). Além disso, a inconsistências de algumas informações pelas redundâncias naturais proveniente do resultado de modelo de comunicação, como mudanças constantes e difíceis de serem previstas deixando um dispositivo inseguro (Canêdo, 2019).

Mediante a isso, optou-se por implementar no SP2-EMA as duas topologias de redes (*Mesh* e *Ad Hoc*), usufruindo assim das vantagens de cada modelo, como por exemplo: a busca

pelo caminho mais rápido presente na rede *Mesh* e o dinamismo da rede *Ad Hoc*. Dessa maneira, foi possível amenizar as vulnerabilidades naturais de ambas as redes operando sozinhas. Assim, essas duas redes operam da seguinte forma no SP2-EMA:

- 1) **Rede *Mesh***: utilizada como a rede padrão do SP2-EMA. Primeiramente, uma única ESP é definida como “mestre” e as demais são definidas como “auxiliares”. Após essas definições iniciais o “mestre” passa a monitorar e recebe dados dos “auxiliares”.
- 2) **Rede *Ad Hoc***: utilizada como a rede secundária do SP2-EMA. Dessa forma, todas as ESPs são definidas como “mestres” e todas as informações que circulam na rede estão disponíveis para todos os “mestres”. Em síntese, cada ESP monitora as funcionalidades e recebe os dados das demais ESP’s.

Dessa forma, caso a ESP “mestre” seja desconectada do sistema por algum motivo, ou pare de enviar ou de receber dados dos “auxiliares” a rede *Ad Hoc* é ativada, até que seja restabelecido a comunicação com o “mestre”.

3. RESULTADOS

Como forma de verificar o funcionamento do SP2-EMA foram realizados alguns testes. O primeiro teste realizado teve como objetivo verificar o funcionamento da rede *Mesh*, conforme ilustra a Fig. 4. Para isso, foram utilizadas 3 variáveis cujos conteúdos foram repassados sem qualquer interferência ou ruído. Neste teste, observou-se que as informações estavam em constante atualização, ou seja, o “mestre” requisitava as informações constantemente dos “auxiliares”. Assim, mesmo quando alguma ESP “auxiliar” fosse desligada propositalmente do sistema, a ESP “mestre” ainda manteve salva a última informação recebida da ESP desconectada.

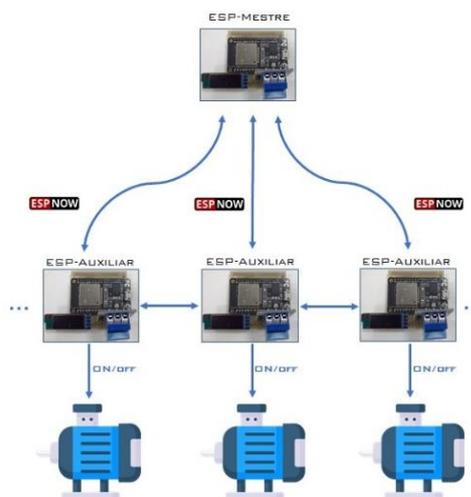


Fig. 4 Conexão primária: rede *Mesh*.

Outro teste realizado teve como objetivo verificar o funcionamento da rede *AD Hoc*, conforme ilustra a Fig. 5. Para isso, foi feito o desligamento da ESP “mestre” do sistema, onde a dinâmica de troca da rede de *Mesh* para *Ad Hoc*, ocorreu com sucesso. De forma que a senha que bloqueia a

leitura de dados pelos “auxiliares” parou de ser enviada, a comunicação *Ad Hoc* foi estabelecida, e as informações fundamentais não tiveram interferências ou perdas.

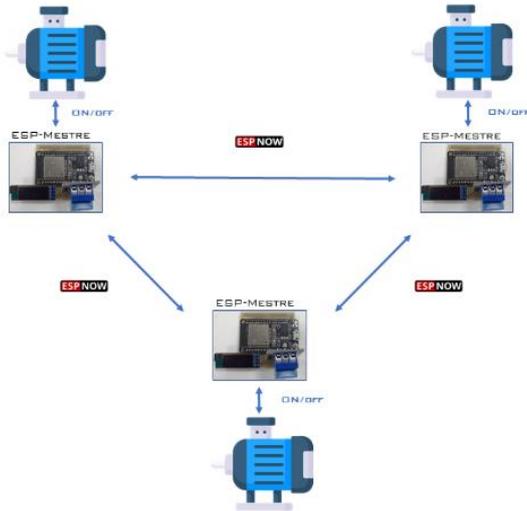


Fig. 5 Conexão secundária: rede *Ad Hoc*.

Dessa forma, após os testes realizados no SP2-EMA, constatou-se o bom funcionamento da dinâmica proposta, pois os dados foram completamente enviados em ambas as topologias da rede (*Mesh* e *Ad Hoc*).

Em relação ao sistema auxiliar de acionamento, os componentes eletrônicos atuaram conforme o esperado nos testes de partida direta, entre os sistemas de controle de exaustão, compressão e controle de nível, conforme é possível visualizar, respectivamente, nas Fig. 6, 7 e 8. Onde, na Fig. 6 é possível verificar o sistema de acionamento de partida direta conectado ao sistema da exaustão pelo relé.



Fig. 6 Sistema de controle de exaustão.

Já na Fig. 7 e 8 é possível visualizar o SP2-EMA controlando o sistema de compressão pelo relé e controle de nível de água, respectivamente.



Fig. 7 Sistema de controle de compressão.



Fig. 8 Sistema de controle de nível.

Durante os testes, foi possível constatar uma alta eficiência do sistema proposto, com uma elevada velocidade de ação e reação dos sistemas quando acionados. Isso ocorreu devido às características do protocolo *ESP-NOW* utilizado, pois ele opera em uma frequência de 2,4 GHz utilizada também em outras comunicações como *ZigBee* (Leal; Ferreira. 2019).

Além disso, a potência de transmissão dos dados da ESP-32 é entre 18 dBm e 20 dBm, o que permite uma taxa de transmissão de dados de até 1 Mbps com tamanho máximo de 250 Bytes, conforme descrito na Tabela 2.

Tabela 2. Características técnicas da ESP-32, Digi Xbee S2C e Digi Xbee-Pro S2C

Informações	ESP-32	Digi Xbee S2C	Digi Xbee-Pro S2C
Faixa de frequência	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz
Potência de transmissão	18 dBm até 20 dBm	5 dBm até 8 dBm	18 dBm
Taxa de Dados	1 Mbps	250 Kb até 1 Mbps	250 Kb até 1 Mbps

Tamanho máximo de dados	250 Bytes	250 Bytes	250 Bytes
-------------------------	-----------	-----------	-----------

Destaca-se ainda que foi verificado o pleno funcionamento dos microcontroladores ESP-32 com a rede *ESP-NOW* e a conexão da ESP “mestre” com a nuvem *Flespi* simultaneamente. Houve alguns entraves em relação a dualidade do microcontrolador, por causa da pinagem e do acionamento da conexão *Wi-Fi*, mas esses problemas foram solucionados com a conexão dos componentes nas portas ADC1 do microcontrolador ESP-32.

Por último, ressalta-se que o microcontrolador ESP-32 utilizado nesta pesquisa tem um custo médio de R\$ 74,90, enquanto o *Digi Xbee S2C* custa R\$ 80,24 e o *Digi Xbee-Pro S2C* (Moyolema et al, 2020), ou seja, é mais caro que a ESP-32. Considerando-se que esse sistema pode ser escalado para um quantitativo ainda maior, conseqüentemente esse valor tende a aumentar. Dessa forma, a ESP-32 torna-se mais vantajosa considerando o seu custo-benefício.

4. CONCLUSÕES

O estudo traz para a luz do conhecimento, o desenvolvimento de estruturas de comunicação entre microcontroladores pelo protocolo *ESP-NOW* a partir do monitoramento pela conexão da nuvem e a interação com o acionamento do relé, sendo possível a utilização de duas topologias de rede: *Mesh* e *Ad Hoc*. Além disso, foi proposto a mudança automática de rede de *Mesh para Ad Hoc*, onde em caso de falha em algum módulo, o funcionamento do sistema não fica comprometido. Contribuindo, assim, para a segurança do sistema que está sendo controlado. Por último, ressalta-se o custo-benefício da ESP-32 para aplicação em sistemas do setor industrial pela alta demanda.

REFERÊNCIAS

- Antunes, R. A. Instalação de uma rede mesh metropolitana utilizando o padrão IEEE 802.11 ae implementação do serviço Voip (Wman-Voip). 2012.
- Breuel, C. M. Redes em malha sem fios. Instituto de Matemática e Estatística, USP, http://grenoble.ime.usp.br/movel/Wireless_Mesh_Networks.pdf. Dezembro, 2004.
- Canêdo, D. R. Sistema de detecção e classificação de intrusão em redes Ad Hoc utilizando redes neurais artificiais e algoritmo K-Médias. (2019).
- Cavalcante, Z. V., Silva, M. L. S. A importância da revolução industrial no mundo da tecnologia. 2011.
- Correa, N. Comparativo de protocolos de IoT para automação residencial: potenciais vulnerabilidades e sugestões de melhorias. (2018).
- Correa, N. Comparativo de protocolos de IoT para automação residencial: potenciais vulnerabilidades e sugestões de melhorias. (2018).
- Cloudmqtt. Hosted message broker for the Internet of Things. CloudMQTT, 2019. Disponível em: <https://www.cloudmqtt.com/docs/index.html>. Acesso em: 15 abr. 2022.
- Espressif-Systems. ESP-NOW User Guide. 1. ed. [S.l.]: Espressif Systems, 2016.

- K. Khanchuea and R. Siripokarpirom, "A Multi-Protocol IoT Gateway and WiFi/BLE Sensor Nodes for Smart Home and Building Automation: Design and Implementation," 2019 10th International Conference of Information and Communication Technology for Embedded Systems (IC-ICTES), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICTEmSys.2019.8695968.
- Leal, G. F.. WaterManna: a IoT na gestão de recursos hídricos. (2019).
- Mallmann, C. R. Rede rf mesh ipv6 baseada em padrões abertos nos sistemas de medição centralizada. (2020).
- Moyolema, B. O et al. Otimização do posicionamento de inteligentes em redes elétricas de baixa tensão baseados em tecnologia ZigBee. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE, v. 1, n. 1, 2020.
- Oliveira, J. M. R. V. Desenvolvimento de um sistema IoT com comunicação via App/Cloud para monitorização de uma cama médica. (2021).
- Pasic, R., I. K., Atanasovski, K. ESP-NOW communication protocol with ESP32. *Journal of Universal Excellence* 6.1 (2021): 53-60.
- Rosario, J. M. Automação industrial. Editora Baraúna, 2009.
- Secco, R. A. M. Desenvolvimento de uma rede de sensores sem fio em topologia mesh utilizando dispositivos IOT. BS thesis. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.
- Zanella, A. et al. Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things journal*, v. 1, n. 1, p. 22-32, 2014.