

Sistema de automação utilizando redes Mesh e Ad Hoc para área industrial

Lucas H. Santos*. Eduardo J. da Silva*
Marinelson P. de Santana*. Lucas R. Morais*.
Elen P. Lobato**. Wellington S. Fonseca**. Marcelo de O. e Silva***.

*Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, Brasil
(e-mails: lucas.brito.santos@itec.ufpa.br, eduardo.monteiro.silva@itec.ufpa.br,
marinelson.santana@itec.ufpa.br, lucas.morais@itec.ufpa.br).

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), UFPA, Belém, Brasil
(e-mails: elen.lobato@itec.ufpa.br, fonseca@ufpa.br).

*** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), UFPA, Belém, Brasil
(e-mails: mos@ufpa.br).

Abstract: This paper describes the implementation of an engine automation system that uses ESP-NOW and MQTT (Message Queue Telemetry Transport) protocols to send data. The main objective of the system created is to avoid data loss due to eventual failures in the communication network. To this end, the system developed has the ability to use two network topologies: Mesh and Ad Hoc. As a way to verify its operation, tests were performed, where the implemented system was allocated to control an exhaust system, a compression system, and a water level control system. After the tests carried out, it was found that the system achieved its main objective and its use in production lines in the industrial sector is feasible.

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 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, houveram avanços significativos na área de Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) aplicada no setor industrial.

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).

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).

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 o controle 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 (Espressif, 2016).

Há estudos com a mesma aplicabilidade de mini redes inteligentes que o SP2-EMA, como: a utilização de multiprotocolos por Khanchuea et al. (2019), auxílio de protocolo ESP-NOW para monitoramento de uma cama médica por Oliveira (2021) e a implementação da topologia mesh por uma rede de sensores sem fio por Secco (2019). No entanto, o trabalho visa aperfeiçoar a dinâmica da comunicação em rede para o melhor funcionamento em máquinas industriais com mais de um tipo de topologia.

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

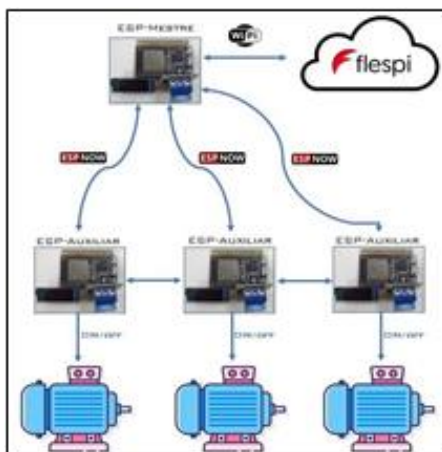


Fig. 1 Arquitetura do SP2-EMA.

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

A 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	3
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 pelas três fases. 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, onde a contatora de potência é acionada a partir do controle auxiliar que altera o estado de contato. Todo o controle é feito através do microcontrolador ESP-32.

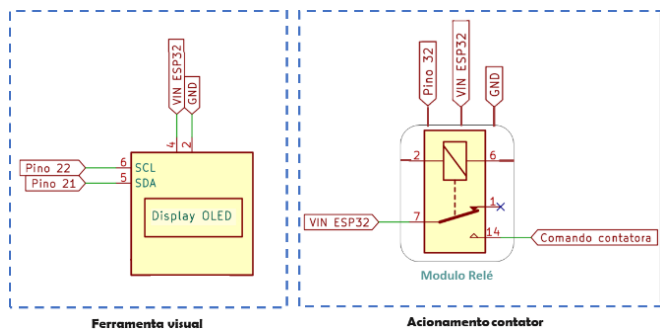


Fig. 2 Esquemáticos dos sistemas embarcados mestre e auxiliar do SP2-EMA.

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 a internet (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.

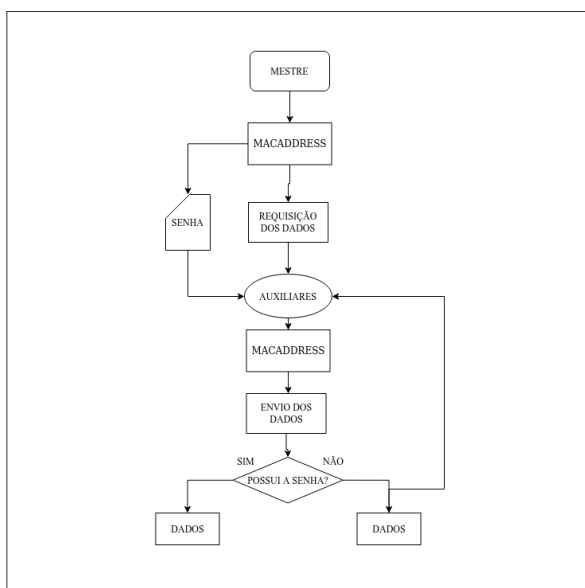


Fig. 3 Diagrama: envio de dados através do protocolo ESP-NOW.

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: 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 ESPs.

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. 1. 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.

Outro teste realizado teve como objetivo verificar o funcionamento da rede *Ad Hoc*, conforme ilustra a Fig. 4. 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. 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.

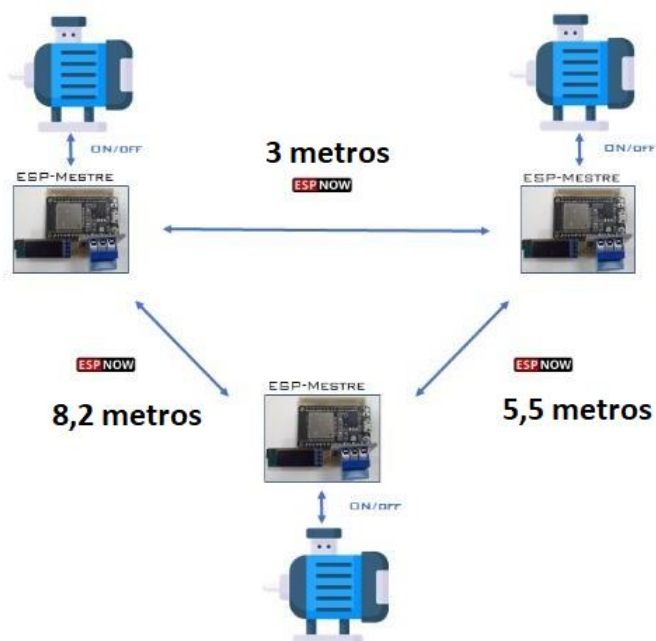


Fig. 4 Conexão secundária: rede *Ad Hoc*.

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. 5, 6 e 7. Onde, na Fig. 5 é possível verificar o sistema de acionamento de partida direta conectado ao sistema da exaustão pelo relé.



Fig. 5 Sistema de controle de exaustão.

Já na Fig. 6 e 7 é possível visualizar o SP2-EMA controlando o sistema de compressão pelo relé e controle de nível de água, respectivamente.

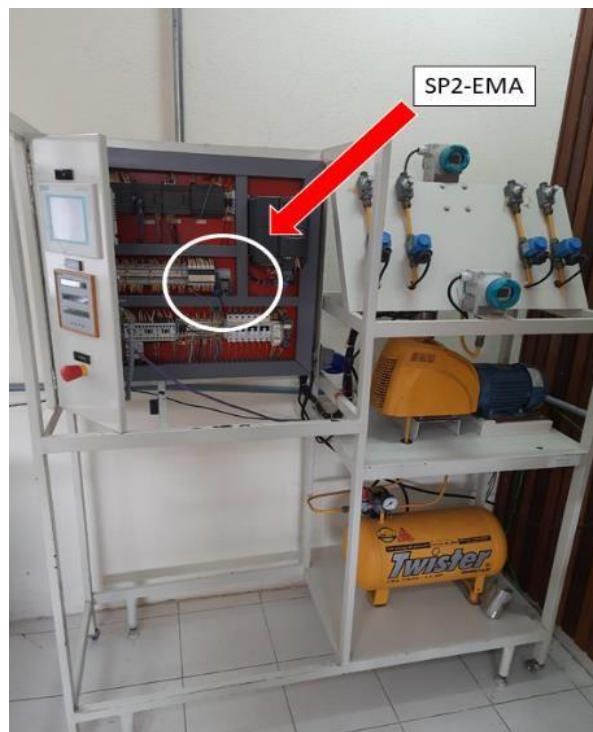


Fig. 6 Sistema de controle de compressão.



Fig. 7 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 via MQTT simultaneamente. Houve alguns entraves em relação a dualidade do microcontrolador, devido a pinagem e do

acionamento da conexão *Wi-Fi*, porém esses problemas foram solucionados com a conexão dos componentes nas portas ADC1 do microcontrolador ESP-32, visto que as portas ADC2 são ocupadas pelo processo de comunicação durante a interligação com a rede *Wi-Fi* na banda larga (Tristão, 2021).

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 controle pela conexão da nuvem e da 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 de 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 (2012). Instalação de uma rede mesh metropolitana utilizando o padrão IEEE 802.11 ae implementação do serviço Voip (Wman-Voip). *Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.*
- Breuel, C. M. (2004). Redes em malha sem fios. *Instituto de Matemática e Estatística. Universidade de São Paulo (USP).*
- Canêdo, D. R. (2019). Sistema de detecção e classificação de intrusão em redes Ad Hoc utilizando redes neurais artificiais e algoritmo K-Médias. *Tese de doutorado em Engenharia de Sistemas Eletrônicos e Automação, Universidade de Brasília, Brasília.*
- Cavalcante, Z. V., Silva, M. L. S. (2011). A importância da revolução industrial no mundo da tecnologia. *Encontro Internacional de produção Científica (VII EPCC).*
- Correa, N. (2018). Comparativo de protocolos de IoT para automação residencial: potenciais vulnerabilidades e sugestões de melhorias. *Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS.*
- Cloudmqtt. Hosted message broker for the Internet of Things. *CloudMQTT*, 2019.
- 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.
- Leal, G. F. (2019). WaterManna: a IoT na gestão de recursos hídricos. Dissertação de mestrado em Ciência da Computação. *Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR*.
- Mallmann, C. R. (2020). Rede rf mesh ipv6 baseada em padrões abertos nos sistemas de medição centralizada. *Universidade Federal de Santa Catarina*.
- Moyolema, B. O. P., Silva, C. A., Casella, I. R. S., Trujillo, J. D. M. (2020). 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.
- Oliveira, J. M. R. V. (2021). Desenvolvimento de um sistema IoT com comunicação via App/Cloud para monitorização de uma cama médica. *Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores – Universidade do Porto*.
- Pasic, R., Kuzmanov, I., Atanasovski, K. (2021). ESP-NOW communication protocol with ESP32. *Journal of Universal Excellence*, pp: 53-60.
- Rosario, J. M. (2009). Automação industrial. *Editores Baraúna*.
- Secco, R. A. M. (2019). Desenvolvimento de uma rede de sensores sem fio em topologia mesh utilizando dispositivos IOT. BS thesis. *Universidade Tecnológica Federal do Paraná*.
- Tristão, E. M. (2021) Desenvolvimento de uma estação meteorológica de baixo custo. *Trabalho de conclusão (Engenharia Elétrica) - Universidade La Salle, Canoas*.
- Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., Zorzi, M. (2014). Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things journal*, v. 1, n. 1, p. 22-32.