

**Rede de sensores *wireless* com topologia *Mesh* utilizando protocolo ZigBee**  
**Wireless sensor network with Mesh topology using ZigBee protocol**  
**Red de sensores inalámbricos con topología Mesh usando protocolo ZigBee**

Recebido: 24/09/2020 | Revisado: 02/10/2020 | Aceito: 02/10/2020 | Publicado: 04/10/2020

**Gilberto de Melo Junior**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2317-7779>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Brasil

E-mail: gilberto.melo@outlook.com

**Renato Milhomem de Oliveira Filho**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3351-1176>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Brasil

E-mail: rmoliveira17@gmail.com

**Sílvio Leão Vieira**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4523-0769>

Universidade Federal de Goiás, Brasil

E-mail: slvieira@ufg.br

**Sanderson Oliveira de Macedo**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5255-596X>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Brasil

E-mail: sandecom@gmail.com

**Geovanne Pereira Furriel**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8510-1024>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Brasil

E-mail: geovanne.furriel@ifgoiano.edu.br

**Brunna Carolinne Rocha Silva**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1654-5980>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Brasil

E-mail: brunnac.rocha@gmail.com

**Resumo**

Redes de sensores *wireless* vem sendo extensivamente aplicadas na automação residencial e industrial. O objetivo desse projeto é desenvolver uma rede de sensores sem fio com

topologia *Mesh* utilizando protocolo ZigBee. Para o desenvolvimento da pesquisa utilizou um estudo de caso, onde há a descrição da elaboração de dispositivos e desenvolvimento de rede de sensores sem fio. A rede é dotada de dispositivos coordenador, roteadores e *end device*. Como resultado a rede foi testada com intuito de validar a capacidade de reestruturação e auto-organização da topologia *Mesh* a partir do protocolo utilizado.

**Palavras-chave:** Redes de sensores *wireless*; Protocolo ZigBee; Topologia *Mesh*.

### **Abstract**

Wireless sensor networks have been applied extensively in home and industrial automation. The objective of this project is to develop a wireless sensor network with Mesh topology using the ZigBee protocol. For the development of the research used a case study, where there is a description of the elaboration of devices and development of a wireless sensor network. The network is equipped with coordinating devices, routers and an end device. As a result, the network was tested in order to validate the ability to restructure and self-organize the Mesh topology based on the protocol used.

**Keywords:** Wireless sensor network; ZigBee Protocol; Mesh topology.

### **Resumen**

Las redes de sensores inalámbricos se han aplicado ampliamente en la automatización industrial y doméstica. El objetivo de este proyecto es desarrollar una red de sensores inalámbricos con topología Mesh utilizando el protocolo ZigBee. Para el desarrollo de la investigación se utilizó un caso de estudio, donde se describe la elaboración de dispositivos y desarrollo de una red de sensores inalámbricos. La red está equipada con dispositivos de coordinación, enrutadores y un dispositivo final. Como resultado, se probó la red para validar la capacidad de reestructurar y autoorganizar la topología de malla en función del protocolo utilizado.

**Palabras clave:** Red de sensores inalámbricos; Protocolo ZigBee; Topología de malla.

## **1. Introdução**

Sistemas de automação residencial e comercial tem como objetivo proporcionar ao usuário conforto, segurança e economia de energia. Projeto de automatização de edificações em construção podem ser executados utilizando cabeamento estruturado, uma solução simples e econômica que, todavia, se torna onerosa em termos de mão de obra e custo quando

implementada pós-obra. Em vista deste fato, a utilização de redes sem fio se torna uma alternativa viável para projetos de automação (Borges e Dores, 2010).

As tecnologias de redes sem fio se apresentam como um diferencial no mundo da automação e seu uso proporciona diversos benefícios (Lugli e Sobrinho, 2012), tais como:

- Faixa de frequência: a faixa utilizada pelo dispositivo wireless é conhecida como ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), que é liberada para uso sem necessidade de licença;
- Facilidade de instalação: sem requer estrutura preexistente, as redes sem fio podem ser facilmente instaladas;
- Mobilidade: dentro de uma área de alcance limitada, os dispositivos da rede podem ser reposicionados a qualquer instante;

Com os avanços na comunicação sem fio, nos MEMS (*Micro-eletromechanical System*) e nos sistemas embarcados, surgiu uma nova geração de redes de sensores, denominada *Wireless Sensor Network* (WSN) (Zhao *et al.*, 2004). Iniciou-se então o uso dessa tecnologia em diversas áreas, tais como: Militar – comando, controle, comunicação e vigilância dos sistemas militares; Ambiental – detecção de incêndios e alagamento, agricultura de precisão; Saúde – tele monitoramento da fisiologia humana, rastreamento e monitoramento de profissionais e pacientes em ambiente hospitalar; Instalações residenciais – automação residencial e ambiente inteligentes.

Akyildiz *et al.* (2002) ressalta que fatores como tolerância ao erro, escalabilidade, custo de produção e topologia de rede, podem influenciar o projeto de uma rede WSN. Eles são importantes pois orientam decisões acerca do uso adequado do protocolo e das respectivas configurações necessárias para funcionamento das redes de sensores *wireless*.

Em relação aos protocolos utilizados nas WSN, tem-se (Yick *et al.*, 2008): *Bluetooth*, IEEE 802.15.4, ZigBee, *WirelessHART*, ISA100.11, IETF 6LoWPAN, IEEE 802.15.3, *Wibree*. Neste estudo foi utilizado o protocolo ZigBee, que é baseado no padrão IEEE 802.15.4.

O ZigBee é um protocolo de comunicação para redes sem fio de curto alcance e de baixa taxa de dados (Farahani, 2011). As suas bases foram estabelecidas no protocolo *Home RFLite* criado pela *Philips*. A tecnologia foi pela primeira vez apresentada ao público com o nome de ZigBee em julho de 2005 (Saleiro e Ey, 2009). O nome deste protocolo remete ao

movimento característico encontrado em abelhas durante a busca de néctar, que a partir deste transmitem informações ao enxame de forma semelhante a uma rede de comunicação.

ZigBee é uma tecnologia de comunicação sem fio simples, de baixo custo e baixa potência usada em aplicações embarcadas. Os dispositivos ZigBee podem formar redes em malha conectando muitos dispositivos em conjunto. Os dispositivos ZigBee consomem pouca energia e podem operar com baterias de baixa capacidade por longos períodos.

Em redes de sensores *wireless* baseadas no protocolo ZigBee existem dois tipos de dispositivos que são chamados de FFD (*Full Function Device*), dotados de funcionalidades plenas e tipicamente alimentado pela rede de energia e o RFD (*Reduced Function Device*), dotado de funcionalidades específicas e limitadas, alimentado por bateria (Zucato, 2009). Os FFD podem ter funcionalidades como dispositivo Coordenador ou dispositivo Roteador. Os RFDs são conhecidos como *End Device*, ou dispositivos finais.

O coordenador ZigBee inicia a formação da rede, armazena informações e estabelece conexões entre redes. Os roteadores ZigBee conectam grupos de dispositivos e fornecem comunicação *multi-hop*. O dispositivo final ZigBee consiste em sensores, atuadores e controladores que coletam dados e se comunicam apenas com o roteador ou o coordenador (Craig, 2004).

Vários trabalhos de redes de sensores *wireless* vem sendo desenvolvidos utilizando o protocolo ZigBee. Litjens (2009) desenvolveu uma rede de sensores *wireless* empregando módulos XBee (tipo de módulo de comunicação baseado no protocolo ZigBee), para monitoramento e automação de estufas agrícolas.

Braga (2010) utilizou redes de sensores baseado em protocolo ZigBee para monitoramento de dados de temperatura, umidade, luminosidade em florestas. Souza (2009) apresentou protótipo de sistema de automação residencial para iluminação por meio da tecnologia ZigBee, cujo intuito é realizar o acionamento remoto de lâmpadas.

Da Silva *et al.* (2017) realizou estudo para avaliação de performance de uma rede de sensores *wireless* ZigBee utilizando topologia *Mesh*. Andrighetto (2008) empregou módulos ZigBee para constituir o Sistema de Processamento de Sinais Biomédicos (SPSB), que realiza visualização e monitoramento remoto de biossinais para fins didáticos no âmbito da engenharia biomédica.

Souza *et al.* (2013) desenvolveram metodologia de otimização de redes *mesh* ZigBee baseada em programação linear binária, propondo algoritmo para determinação do posicionamento ótimo de dispositivos concentradores GPRS aplicados em Redes AMI (*Advanced Metering Infrastructure*).

Com base nessa tecnologia de rede, esse trabalho teve como objetivo validar o uso de topologia *Mesh* em redes de sensores *wireless* ZigBee, abordando o conceito de auto-organização dos dispositivos roteadores, coordenadores e *End Devices* utilizados.

A Seção 2 apresenta os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do trabalho. Seção 3 apresenta os resultados obtidos. Seção 4 apresenta as conclusões do trabalho.

## 2. Metodologia

O presente estudo objetiva o desenvolvimento de uma rede de sensores sem fio, abordando a tecnologia ZigBee e validando o uso de topologia *Mesh*. Para o desenvolvimento da pesquisa utilizou um estudo de caso, onde há a descrição da elaboração de dispositivos e desenvolvimento de rede de sensores sem fio. A característica especial deste estudo de caso é o desenvolvimento da rede usando os conceitos da topologia em malha, como, auto-organização e auto estruturação, visando a ampliação do conhecimento sobre a tecnologia ZigBee.

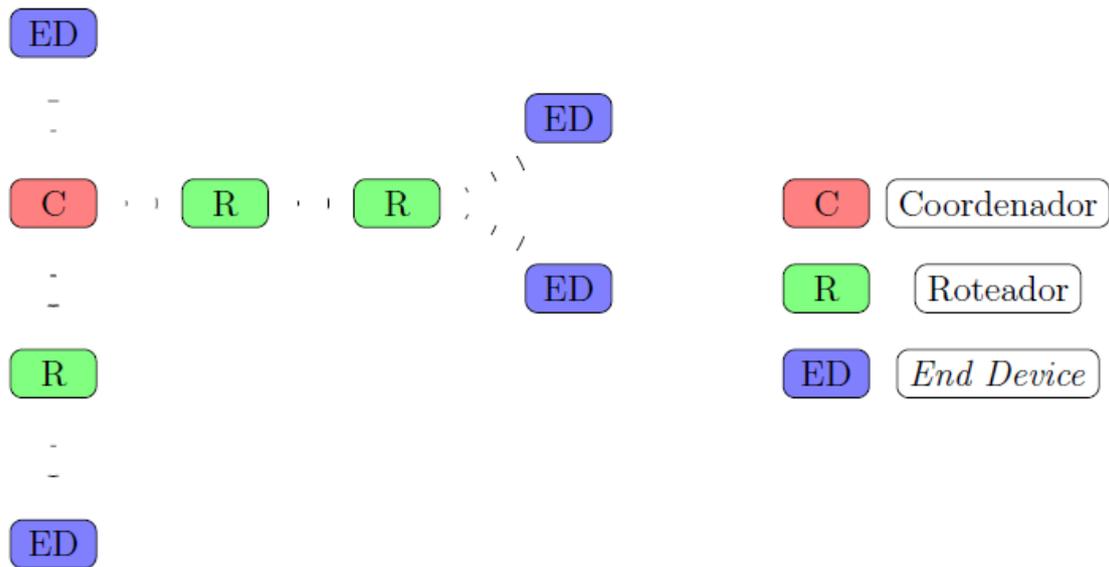
Os métodos utilizados para apresentação do resultado da metodologia empregada no estudo de caso, são métodos qualitativos, onde os pesquisadores exploraram o funcionamento da rede de sensores sem fio e validaram a topologia empregada (Pereira *et al.*, 2018).

No padrão 802.15.4, no qual o protocolo ZigBee é baseado, são utilizados basicamente dois tipos de topologia de redes: *Star* (Estrela) e *Peer-to-Peer* (Ponto-a-Ponto), que por sua vez, subdivide em duas variações denominadas *Cluster-tree* (Grupo de árvores) e *Mesh* (Malha)

Na topologia *Mesh* os dispositivos Coordenadores ou Roteadores são livres para enviar informação para qualquer outro dispositivo da rede, ou seja, não existe uma centralização profunda da rede. Neste caso, o coordenador apenas registra a entrada e saída de dispositivos na rede, assumindo um papel passivo no que diz respeito ao fluxo de informação.

De acordo com Saleiro e Ey (2009) a topologia *mesh* é muito útil, porque possibilita a fácil expansão física da rede, permitindo que seja estabelecida uma rede capaz de abranger uma área relativamente grande. Neste tipo de topologia é possível verificar o *Self-Healing* (Auto-organização) da rede, pois ainda que um dos dispositivos da rede pare de funcionar, apenas em casos excepcionais a comunicação da rede será afetada. A Figura 1 ilustra um diagrama de funcionamento da topologia *Mesh*.

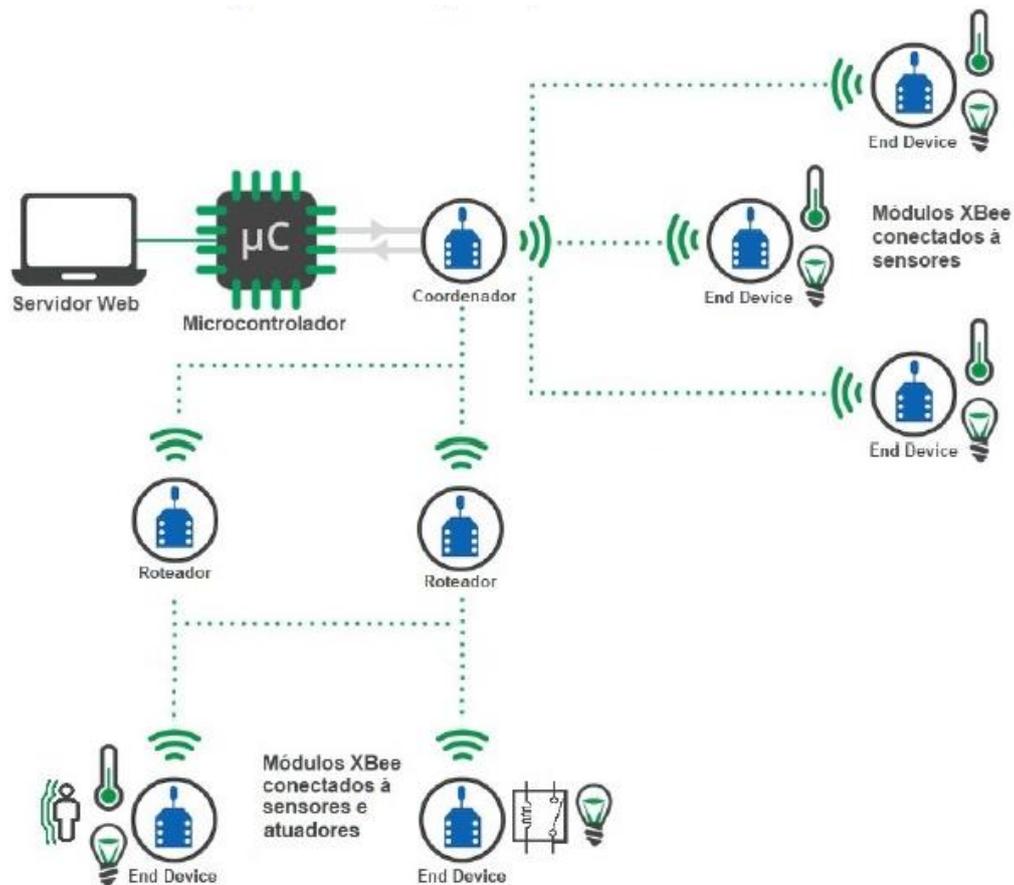
**Figura 1.** Diagrama de uma rede de sensores *wireless* com topologia *Mesh*.



Fonte: Autores (2020).

O estudo de caso foi realizado para analisar e validar a capacidade de auto-organização e reestruturação da rede *Mesh*. Neste caso foi realizado o monitoramento de quatro ambientes diferentes, sendo três deles sendo monitorados por dispositivos Sensores Modelo 1 e o último pelo dispositivo Sensor Modelo 2 em conjunto com o dispositivo Atuador. Além dos dispositivos finais, a rede também foi composta por dois dispositivos Roteador e um dispositivo Coordenador. A Figura 2 apresenta o diagrama de funcionamento da rede de sensores *wireless* desenvolvida.

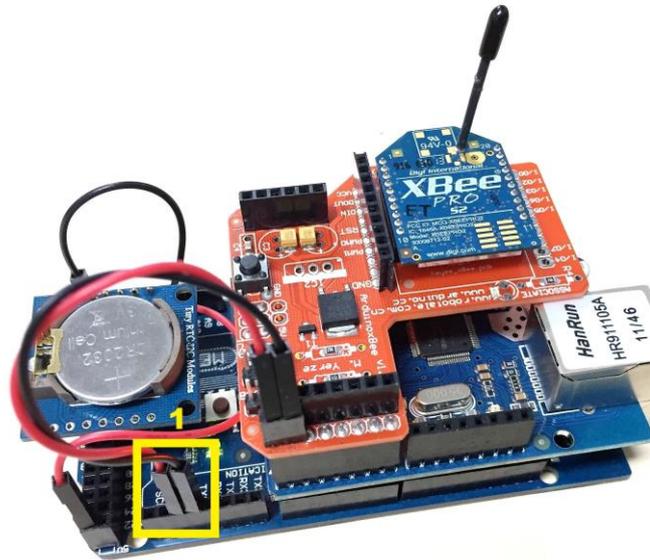
**Figura 2.** Diagrama do estudo de caso desenvolvido no projeto.



Fonte: Autores (2020).

O dispositivo Coordenador foi composto por um Arduino Mega 2560, uma Ethernet *Shield* W500 para Arduino, uma XBee *Shield* para Arduino, um XBee-PRO S2 e um Relógio de Tempo Real (RTC - Real Time Clock) DS1307, sendo responsável por receber os dados dos dispositivos finais, processá-los e armazená-los. Baseando-se nos dados recebidos, este também foi responsável por enviar comandos para acionamento de um relé que estava conectado ao dispositivo final Atuador. Figura 3 apresenta o dispositivo Coordenador.

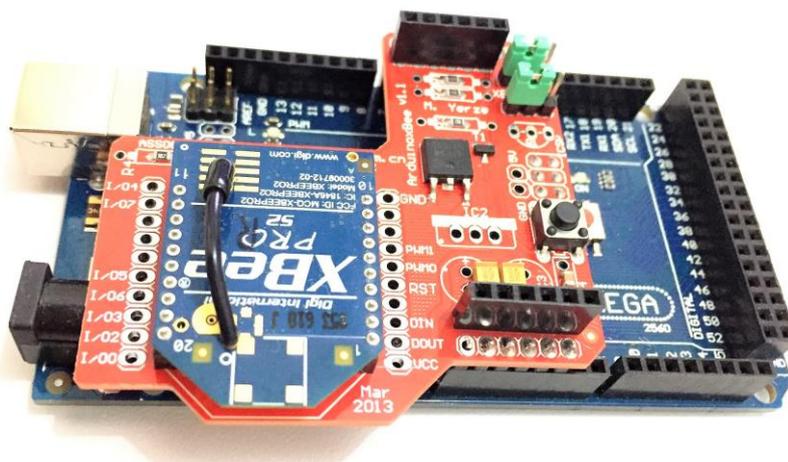
**Figura 3.** Dispositivo Coordenador, onde (1) são os conectores entre a XBee Shield e o Arduino.



Fonte: Autores (2020).

O dispositivo Roteador foi composto por um XBee-PRO S2, uma placa Arduino e uma XBee Shield para Arduino. O módulo XBee, configurado como roteador AT, foi responsável pelo roteamento de dados na rede, comunicando com o coordenador e com os *end devices*. Figura 4 ilustra o dispositivo Roteador desenvolvido. A Figura 4 ilustra o dispositivo Roteador.

**Figura 4.** Dispositivo Roteador desenvolvido.



Fonte: Autores (2020).

Os *end devices*, nomeados como dispositivo Sensor Modelo 1, dispositivo Sensor Modelo 2 e dispositivo Atuador, apresentam características construtivas diferentes. Eles

foram utilizados para monitoramento de temperatura, luminosidade e presença, e também para o acionamento de uma lâmpada.

O dispositivo Sensor Modelo 1, foi composto por um XBee-PRO S2, um XBee *Explorer Adapter*, um sensor de luminosidade LDR e um sensor de temperatura LM35. O dispositivo Sensor Modelo 2, é semelhante ao primeiro, diferenciando apenas por possuir, além dos dois sensores citados, um sensor de presença do tipo infravermelho passivo (PIR). O dispositivo Atuador, constituído por um Arduino Uno, uma XBee *Shield* para Arduino, um XBee-PRO S2 e um módulo relé, foi o responsável pelo acionamento de uma lâmpada. Figura 5 ilustra os três dispositivos finais desenvolvidos.

**Figura 5.** Dispositivos finais, onde (1) dispositivo Sensor Modelo 1, (2) dispositivo Sensor Modelo 2 e (3) dispositivo Atuador.



Fonte: Autores (2020).

O sistema foi disposto de modo que somente os dispositivos Sensores Modelo 1 pudessem se comunicar diretamente com o coordenador. Os demais dispositivos comunicavam com o coordenador através dos roteadores. O sistema, que utilizou dois roteadores, foi testado com eventos de desconexão dos mesmos, visando avaliar a efetividade do procedimento de manutenção de conexão de rede baseado na capacidade de auto-organização e reestruturação dos dispositivos do sistema.

### 3. Resultados e Discussão

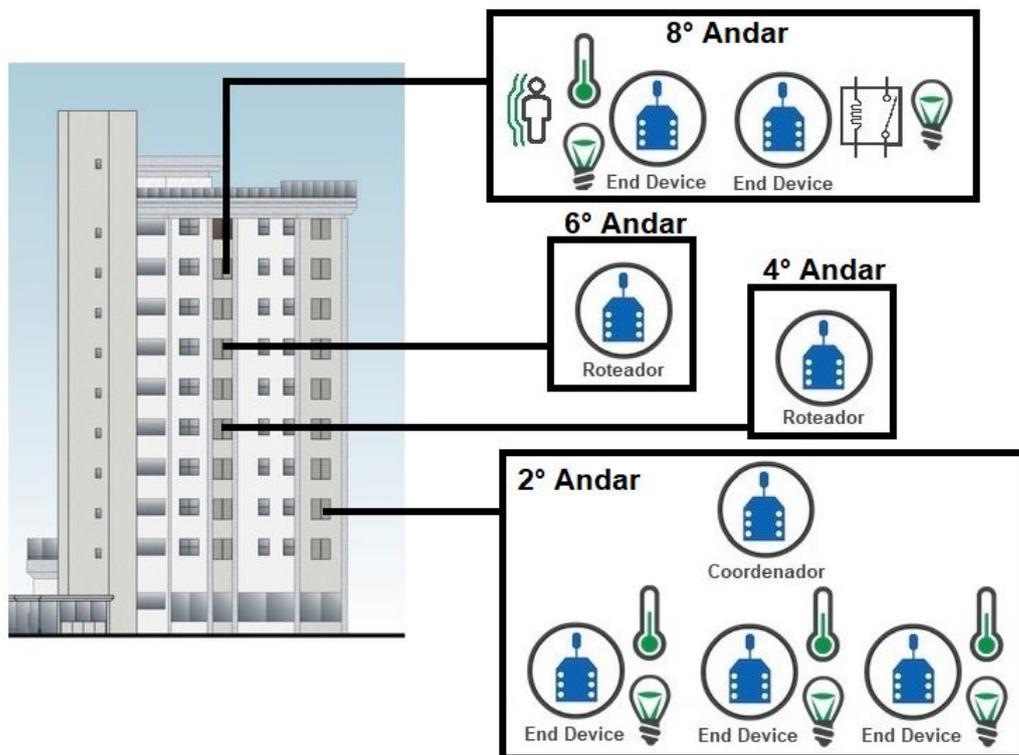
No estudo de caso uma rede *Mesh* foi estruturada para o monitoramento de quatro ambientes diferentes, no qual três ambientes foram monitorados por dispositivos Sensores Modelo 1 e um outro foi supervisionado pelo dispositivo Sensor Modelo 2 em conjunto com o dispositivo Atuador para acionamento da lâmpada. Porém, a rede foi disposta de tal forma que

o dispositivo Sensor Modelo 2 e o dispositivo Atuador não conseguissem se comunicar diretamente com o coordenador, sendo necessário a inserção de roteadores na rede.

Com intuito de inserir barreiras que imedissem a comunicação direta entre alguns dispositivos finais e o Coordenador, o estudo foi realizado em um edifício residencial e os módulos foram dispostos da seguinte maneira: o dispositivo Coordenador e os dispositivos Sensores Modelo 1 foram alocados em um apartamento no 2º andar; o dispositivo Sensor Modelo 2 e o dispositivo Atuador foram instalados no *Hall* do 8º Andar; um roteador foi colocado no 4º e outro no 6º andar.

Através de testes de comunicação realizados, foi verificado que dois módulos conseguiam se comunicar quando estivessem distantes de, no máximo, quatro andares de diferença. Logo, os dispositivos do 8º andar se comunicaram com o módulo coordenador exclusivamente através dos roteadores. A Figura 6 descreve o local que o experimento foi realizado.

**Figura 6.** Disposição dos dispositivos da rede no prédio residencial.

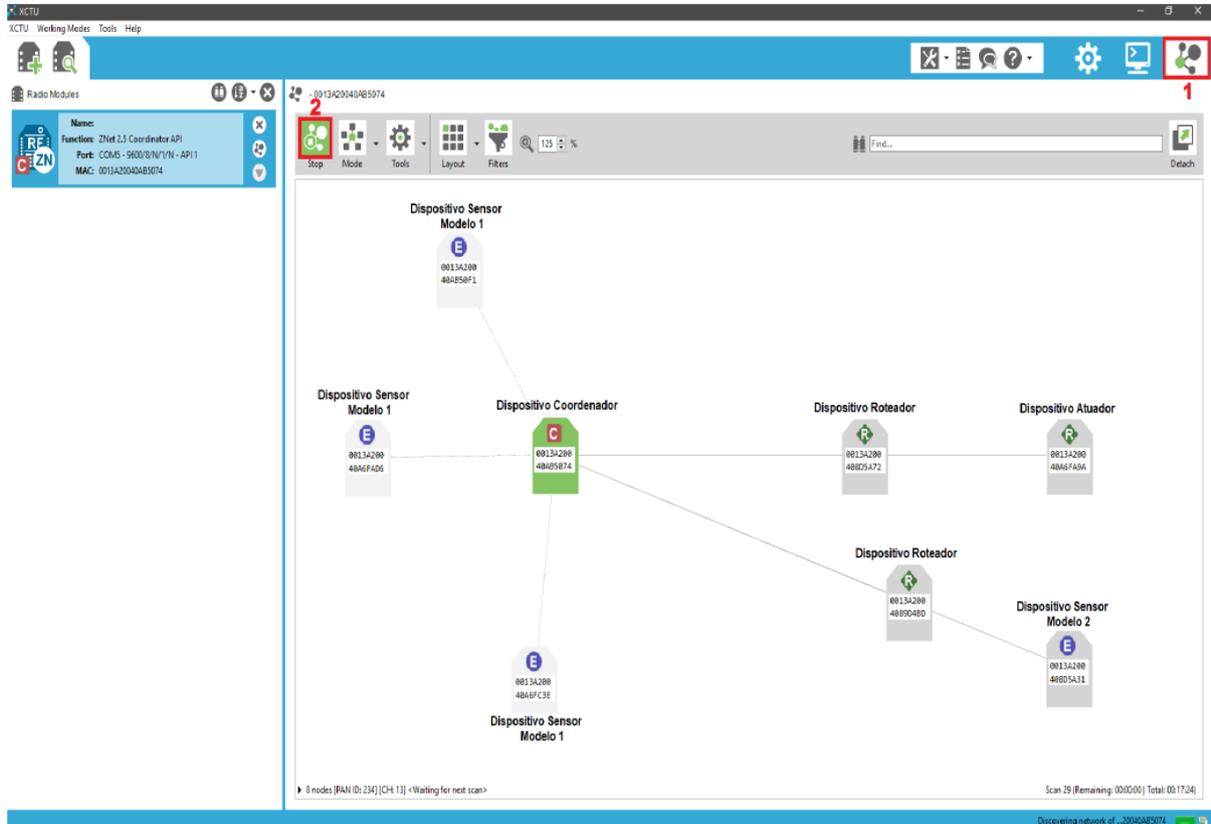


Fonte: Autores (2020).

Para supervisionar o estado da conexão dos dispositivos e fluxo de dados enviados ao dispositivo coordenador, o módulo XBee Coordenador foi conectado ao computador permitindo o monitoramento das referidas informações através do *software* XCTU. Este

*software* permite que uma busca seja feita para identificar todos os dispositivos conectados à rede em *Network* (1) → *Scan* (2), conforme ilustrado na Figura 7.

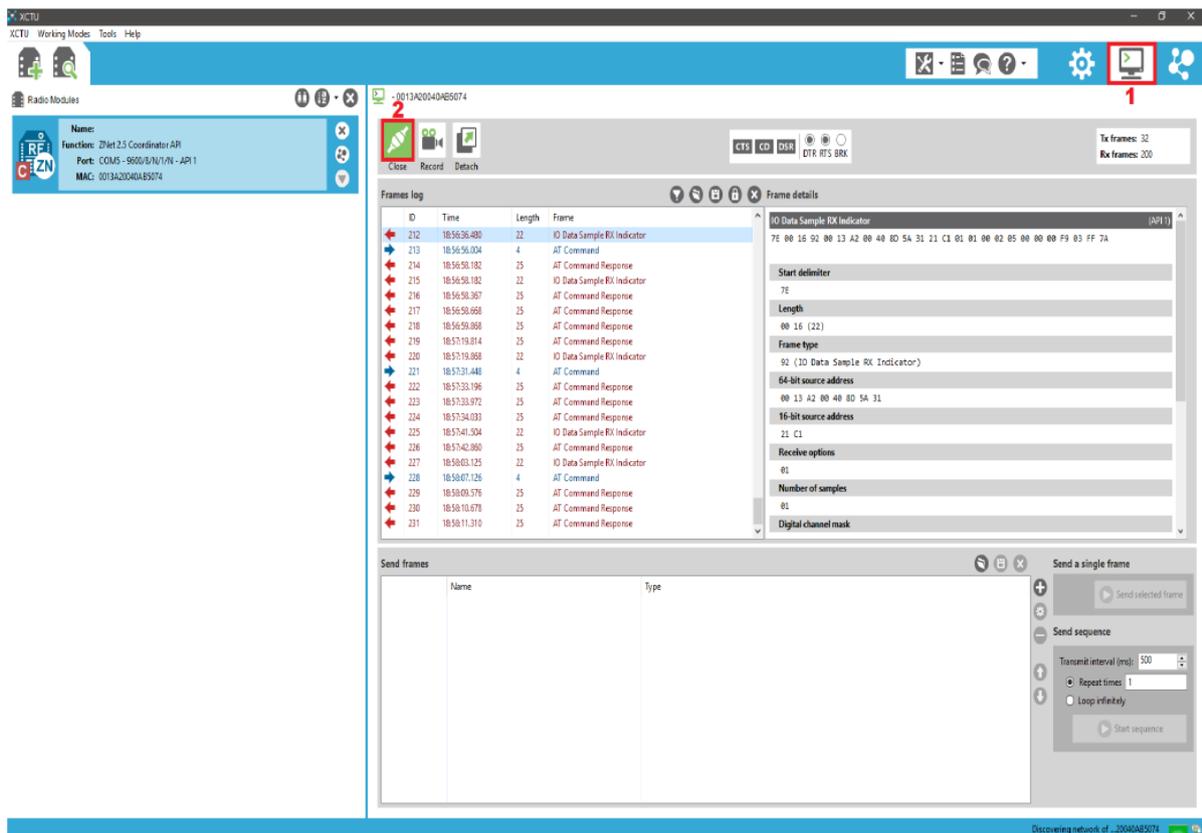
**Figura 7.** Busca de módulos conectados à rede.



Fonte: Autores (2020).

Além disso, o XCTU permitiu a visualização dos *frames* enviados ao Coordenador e forneceu ao usuário a possibilidade de criação e envio de *frames* para qualquer dispositivo conectado. A comunicação com os módulos foi realizada acessando o menu *Consoles* (1) → *Open* (2), ilustrados na Figura 8.

**Figura 8.** Gerenciamento de comunicação do módulo coordenador.



Fonte: Autores (2020).

Com o objetivo de analisar a capacidade de reestruturação e auto-organização da rede *Mesh*, foram realizados desligamentos alternados dos roteadores que permitiam a comunicação entre o dispositivo Coordenador, localizado no 2º andar, e os dispositivos situados no 8º andar (dispositivo Sensor Modelo 2 e dispositivo Atuador).

Verificou-se que: quando os dois dispositivos Roteadores estavam desligados, os dispositivos finais não se comunicavam com o Coordenador; ao ligar um dispositivo Roteador a comunicação foi reestabelecida após os dispositivos finais saírem do modo *Sleep* (modo de economia do módulos XBee); ao energizar o novo Roteador e desligar o anterior, os dispositivos mantiveram a comunicação; quando os dispositivos finais foram retirados do 8º andar e levados para um local onde seu alcance permitia a comunicação direta com o Coordenador, todos se comunicaram instantaneamente, independente do estado dos roteadores.

Por meio desse estudo foi possível validar a capacidade de reestruturação e auto-organização da rede *Mesh* usando ZigBee, característica denominada *Self-Healing*.

#### 4. Considerações Finais

Através do projeto implementado, o estudo mostrou as vantagens da característica de auto-organização e recursos correlatos dos módulos Zigbee, quando aplicados na constituição de redes de sensores *wireless*. O projeto facilitou a instalação dos dispositivos pelo usuário, já que não houve necessidade de mudanças estruturais de infraestrutura no ambiente de utilização. A adaptabilidade ao ambiente, a organização sistemática do monitoramento de rede, as facilidades de utilização, instalação e interfaceamento bem como a interoperabilidade dos dispositivos de rede constituintes, mostram o elevado grau de aplicabilidade das redes de sensores sem fio ZigBee.

Em trabalhos futuros podem ser aplicados mais dispositivos finais e roteadores para verificar a extensibilidade da rede. Além disso, há a possibilidade de implementação de outros tipos de topologia, podendo ser realizada a comparação com a topologia *Mesh*.

#### Referências

Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, 38(4), 393-422. Recuperado de <http://www.ee.oulu.fi/~carlos/WSNPapers/AK02.pdf>.

Andrighetto, E. (2008). Sistema de processamento de sinais biomédicos: rede wireless ZigBee com aplicação do padrão IEEE 802.15.4. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Santa Catarina. Recuperado de <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/92085>.

Borges, L. P., & Dores, R. C. (2010). Automação predial sem fio utilizando bacnet/zigbee com foco em economia de energia. *Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação. Publicação FT. TG*, (06).

Braga, T. C. (2010). *Monitorização ambiental em espaços florestais com rede de sensores sem fios* (Doctoral dissertation, Universidade da Madeira).

Craig, W. C. (2004). Zigbee: Wireless control that simply works. *Zigbee Alliance ZigBee Alliance*. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/Zigbee-%3A-%E2%80%9C->

Wireless-Control-That-Simply-Works-%E2%80%9D-Craig/4d79defee6653ff91  
09c13446b87a2b92f4e009d.

Da Silva, C. A. G., dos Santos, E. L., Ferrari, A. C. K., & dos Santos Filho, H. T. (2017). A study of the mesh topology in a ZigBee network for home automation applications. *IEEE Latin America Transactions*, 15(5), 935-942.

Farahani, S. (2011). *ZigBee wireless networks and transceivers*. Newnes. Recuperado de <http://www.chiaraburatti.org/uploads/teaching/ZigBee-Libro.pdf>.

Litjens, O. J. (2009). *Automação de estufas agrícolas utilizando sensoriamento remoto e o protocolo Zigbee* (Doctoral dissertation, Universidade De São Paulo).

Lugli, D. A. B., & Sobrinho, D. G. (2012). Tecnologias Wireless para automação Industrial: Wireless\_Hart, Bluetooth, Wisa, Wi-fi, ZigBee e Sp-100. *Instituto Nacional de Telecomunicações Inatel*.

Pereira, A. S., et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [free e-book]. Santa Maria. Ed. UAB/NTE/UFSM. Recuperado de [https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic\\_Computacao\\_Metodologia-pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1](https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1).

Saleiro, M., & Ey, E. (2009). ZigBee – Uma abordagem prática. Recuperado de [http://luserobotica.com/ficheiros/Introducao\\_ao\\_Zigbee\\_-\\_por\\_msaleiro.pdf](http://luserobotica.com/ficheiros/Introducao_ao_Zigbee_-_por_msaleiro.pdf).

Souza, M. A. D. (2010). Sistema de automação residencial para iluminação. Recuperado de <https://repositorio.uniceub.br/jspui/handle/123456789/3136>.

Souza, G. B. D. C., Viera, F. H., Cardoso, A. A., Lima, C. R., de Deus Júnior, G. A., de Castro, M. S., & de Araújo, S. G. (2013). Utilização de Programação Linear Inteira para Posicionamento de Concentradores GPRS em Redes *Smart Grid*. *XI Simpósio Brasileiro de Automação ao Inteligente*, 1-6.

Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2008). Wireless sensor network survey. *Computer networks*, 52(12), 2292-2330.

Zhao, F., Guibas, L. J., & Guibas, L. (2004). *Wireless sensor networks: an information processing approach*. Morgan Kaufmann.

Zucato, F. L. (2009). *Rede ZigBee gerenciada por sistema de monitoramento remoto utilizando TCP/IP e GPRS* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

**Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito**

Gilberto de Melo Junior – 35%

Renato Milhomem de Oliveira Filho – 20%

Sílvio Leão Vieira – 15%

Sanderson de Oliveira Macedo – 10%

Geovanne Pereira Furriel – 10%

Brunna Carolinne Rocha Silva – 10%