

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE  
ALGORITMO DE AUTO-ORGANIZAÇÃO  
PARA UMA ARQUITETURA DE REDE  
SEM FIO BASEADA EM ÁRVORE**

FELIPE GROISMAN SIEBEN

Dissertação apresentada como requisito  
parcial à obtenção do grau de Mestre em  
Ciência da Computação pela Pontifícia  
Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Missio Marcon

Porto Alegre

2015

### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

S571i	Sieben, Felipe Groisman
	Implementação e avaliação de algoritmo de auto-organização para uma arquitetura de rede sem fio baseada em árvore / Felipe Groisman Sieben. – Porto Alegre, 2015. 75 p.
	Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Informática, PUCRS. Orientador: Prof. Dr. César Augusto Missio Marcon.
	1. Informática. 2. Arquitetura de Redes. 3. Algoritmos (Programação). I. Marcon, César Augusto Missio. II. Título.
	CDD 004.6

**Ficha Catalográfica elaborada pelo  
Setor de Tratamento da Informação da BC-PUCRS**

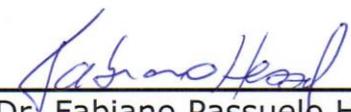


Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul  
FACULDADE DE INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

## TERMO DE APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Dissertação intitulada "Implementação e Avaliação de Algoritmo de Auto-Organização para uma Arquitetura de Rede Sem Fio Baseada em Árvore" apresentada por Felipe Groisman Sieben como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Computação, aprovada em 20/03/2015 pela Comissão Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. César Augusto Missio Marcon – PPGCC/PUCRS  
Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Fabiano Passuelo Hessel – PPGCC/PUCRS

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Carlos Eduardo Pereira – UFRGS

Homologada em 23/04/2015, conforme Ata No. 006 pela Comissão Coordenadora.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Luiz Gustavo Leão Fernandes  
Coordenador.

**PUCRS**

**Campus Central**

Av. Ipiranga, 6681 – P32 – sala 507 – CEP: 90619-900

Fone: (51) 3320-3611 – Fax (51) 3320-3621

E-mail: [ppgcc@pucrs.br](mailto:ppgcc@pucrs.br)

[www.pucrs.br/facin/pos](http://www.pucrs.br/facin/pos)

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa, Camila.

“São as nossas escolhas,  
que revelam o que realmente somos,  
muito mais do que as nossas qualidades.”  
(J.K. Rowling)

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor César Marcon, por sua participação e contribuição nesta jornada.

Ao colega Giuliano Guarese, pela colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

À Novus Produtos Eletrônicos, por permitir a realização deste projeto, em especial ao Diretor de Tecnologia Marcos Rebello Dillenburg.

À HP (Hewlett-Packard Development Company, L.P.), pelo apoio concedido.

Obrigado.

# IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ALGORITMO DE AUTO-ORGANIZAÇÃO PARA UMA ARQUITETURA DE REDE SEM FIO BASEADA EM ÁRVORE

## RESUMO

Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) estão em constante desenvolvimento e entre as melhorias propostas está o suporte ao comportamento dinâmico dos sensores, para que possam se adaptar às necessidades que surgem no ambiente. Neste trabalho são propostos três algoritmos para redes com topologia em forma de árvore, denominados de: (i) algoritmo de Reorganização de Potência Ótima (RPO), (ii) algoritmo de Escolha do Canal de Operação Baseado no ScanED (ECOBS) e (iii) algoritmo de Auto-organização (AO), que é o resultado da execução dos dois primeiros simultaneamente. Este último algoritmo toma decisões baseado nas métricas LQI, RSSI, potência de transmissão, canal de operação, CCA e energia detectada no canal. Como benefícios da utilização deste algoritmo são ressaltados: (i) a redução do consumo de energia, (ii) a diminuição da interferência eletromagnética no ambiente, (iii) o alcance de uma topologia mais adequada para as necessidades da RSSF, (iv) a diminuição da taxa de erros de comunicação, reduzindo as colisões e retransmissões de frames, e (v) a seleção periódica do canal mais limpo para operar.

**Palavras-chave:** Algoritmos de auto-organização; Rede de sensores sem fio. IEEE 802.15.4; Protocolo Modbus. Topologia em árvore.

# IMPLEMENTATION AND EVALUATION OF A SELF-ORGANIZING ALGORITHM FOR TREE-BASED WIRELESS NETWORK ARCHITECTURE

## ABSTRACT

Improvements in Wireless Sensor Networks (WSNs) are constantly being proposed and one of the challenges is to develop the ability to create smarter dynamics so that it can adapt to the needs that arise in the environment. This work proposes three algorithms for networks based on tree topology: (i) Reorganization of Optimal Power algorithm, (ii) Best Channel Choice Based on ScanED algorithm and (iii) Self-Organizing algorithm, which is the result of the implementation of the first two simultaneously. This last algorithm makes decisions based on metrics such as LQI, RSSI, transmission power, operation channel, CCA and energy detected in channel. The benefits of using this algorithm are: (i) reduction of energy consumption, (ii) reduction of electromagnetic interference in the environment, (iii) achieving a more suitable topology for the needs of the WSN, (iv) reduction of the communication error rate, thus reducing collisions and retransmission of frames, and (v) periodic selection of a clean channel to operate.

**Keywords:** Self-organization algorithms; Wireless sensor network; IEEE 802.15.4 Standard; Modbus protocol; Tree topology.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Topologia estrela contendo o coordenador da PAN, 2 nodos FFD e 4 nodos RFD [Elaborada pelo autor baseada em IEE11]. .....	20
Figura 2 - Topologia de rede contendo 7 conexões ponto-a-ponto [Elaborada pelo autor baseada em IEE03]. .....	21
Figura 3 - Exemplo de topologia cluster-tree com 7 clusters [Elaborada pelo autor baseada em IEE11]. .....	22
Figura 4 - Arquitetura IEEE 802.15.4 [Elaborada pelo autor baseada em IEE11]. ...	23
Figura 5 - Canais de operação IEEE 802.15.4 [Elaborada pelo autor baseada em VAS10].....	24
Figura 6 - Exemplificação do emprego do <i>Inter-frame delay</i> [MOD06a]. .....	26
Figura 7 - Exemplificação do <i>Inter-character delay</i> na transmissão de dois frames, sendo que o primeiro tem os tempos de guarda respeitados e o segundo tem uma violação [MOD06a].....	26
Figura 8 - Pilha de comunicação Modbus [Elaborada pelo autor baseada em MOD12].....	27
Figura 9 - Interfaces do nodo Gateway [Elaborada pelo autor].....	28
Figura 10 - Camadas de suporte com e sem fio do nodo Gateway [Elaborada pelo autor baseada em SIE12b]. .....	29
Figura 11 - Modo de operação Multi-Master [Elaborada pelo autor]. .....	29
Figura 12 - Modo de operação USB-Master [Elaborada pelo autor]. .....	30
Figura 13 - Modo de operação RS485-Master [Elaborada pelo autor]. .....	30
Figura 14 - Modo de operação RS485-Slaves [Elaborada pelo autor].....	31
Figura 15 - Arquitetura de camadas do nodo Sensor [Elaborada pelo autor]. .....	31
Figura 16 - Exemplo de topologia em forma de árvore puramente sem fio [Elaborada pelo autor].....	32
Figura 17 - Exemplo de topologia em forma de árvore híbrida [Elaborada pelo autor]. .....	33
Figura 18 - LQI Rx e LQI Tx [Elaborada pelo autor]. .....	40
Figura 19 - Fluxograma de execução do algoritmo de Reorganização de Potência Ótima para os nodos FFD e RFD [Elaborada pelo autor]. .....	44
Figura 20 - Exemplo de RSSF operando com o algoritmo de Reorganização de Potência Ótima [Elaborada pelo autor]. .....	46

Figura 21 - Canais de operação WLAN não sobrepostos aos das LR-WPAN [Elaborada pelo autor].....	49
Figura 22 - Fluxograma de execução do algoritmo ECOBS para os nodos FFD e RFD [Elaborada pelo autor]. .....	51
Figura 23 - Exemplo de topologia antes de executar o algoritmo ECOBS [Elaborada pelo autor].....	53
Figura 24 - Exemplo de topologia após executar o algoritmo ECOBS [Elaborada pelo autor].....	53
Figura 25 - Fluxograma de execução do algoritmo de Auto-organização para os nodos FFD e RFD [Elaborada pelo autor].....	55
Figura 26 - Topologia experimental gerada sem a aplicação do algoritmo RPO [Elaborada pelo autor].....	58
Figura 27 - Tela do DigiConfig contendo a tabela de dados da RSSF sem o algoritmo RPO [Elaborada pelo autor]. .....	59
Figura 28 - Analisador de espectro eletromagnético manual RF- Explorer ISM Combo [Elaborada pelo autor].....	62
Figura 29 - Espectro eletromagnético inicial no centro do ambiente experimental [Elaborada pelo autor].....	63
Figura 30 - Análise de espectro eletromagnético onde os nodos foram posicionados (desligados). A linha central mostra a relação dos endereços e tipos de nodos com os seus respectivos espectros eletromagnéticos [Elaborada pelo autor].....	63
Figura 31 - Resultado da varredura <i>ScanED</i> do endereço 1 antes da execução do algoritmo AO [Elaborada pelo autor].....	65
Figura 32 - Topologia formada antes de executar o algoritmo de Auto-Organização [Elaborada pelo autor].....	66
Figura 33 - Imagem do DigiConfig com os dados da RSSF antes de executar o algoritmo AO [Elaborada pelo autor].....	66
Figura 34 - Espectro eletromagnético sem executar o algoritmo de Auto-organização [Elaborada pelo autor].....	67
Figura 35 - Varredura <i>ScanED</i> de todos os nodos durante a execução do algoritmo AO [Elaborada pelo autor].....	68
Figura 36 - Imagem do DigiConfig com a topologia formada após a execução do algoritmo AO [Elaborada pelo autor].....	69

Figura 37 - Imagem do DigiConfig com os dados da RSSF após executar o algoritmo AO [Elaborada pelo autor]..... 70

Figura 38 - Topologia relacionada à análise de espectro eletromagnético local com a execução do algoritmo de Auto-organização [Elaborada pelo autor]..... 72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo dos Trabalhos Relacionados.....	37
Tabela 2 - Conversão dBm para mW.....	39
Tabela 3 - Relação RSSI e LQI.....	41
Tabela 4 - Ajuste pós-fórmula PTxiteração.....	42
Tabela 5 - Consumo de energia durante transmissão em cada potência de transmissão.....	43
Tabela 6 - Exemplo de LQIs finais analisados e potências de transmissão ótima escolhidas após execução do algoritmo de RPO.....	46
Tabela 7 - Frequências dos canais de operação IEEE 802.15.4 na faixa de 2,4 GHz.....	47
Tabela 8 - Frequências dos canais de operação IEEE 802.11b na faixa de 2,4 GHz [IEE12].....	48
Tabela 9 - Sobreposição dos canais do IEEE 802.15.4 em relação ao IEEE 802.11b na faixa de 2,4 GHz utilizando as recomendações de utilizar os canais 1, 6 e 11.....	48
Tabela 10 - RSSF com potências dos canais estabelecidos sem executar o algoritmo RPO.....	59
Tabela 11 - RSSF com potências dos canais estabelecidos com a execução do algoritmo RPO.....	60
Tabela 12 - Ganho percentual da média de LQI e diminuição da potência ótima após a execução do algoritmo RPO.....	61
Tabela 13 - Varredura de <i>ScanED</i> dos nodos sem a execução do algoritmo AO (valores em dBm).....	64
Tabela 14 - Varredura <i>ScanED</i> dos nodos com a execução do algoritmo AO (valores em dBm).....	68
Tabela 15 - RSSF com potências dos canais estabelecidos após executar o algoritmo AO.....	70
Tabela 16 - Ganho percentual da média de LQI e diminuição da potência ótima após a execução do algoritmo AO.....	71

## **LISTA DE ACRÔNIMOS E ABREVIações (SIGLAS)**

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações

CCA – Clear Channel Assessment

CCAA – Clear Channel Assessment Attack

CID – Cluster Identifier

CLH – Cluster Head

CSMA-CA – Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

CSMA-CD – Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection

DSSS – Direct Sequence Spread Spectrum

ECOBS – Escolha do Canal de Operação Baseado no ScanED

ED – Energy Detection

FFD – Full-Function Device

FCC – Federal Communications Commission

FSK – Frequency-Shift Keying

GTS – Guaranteed Time Slot

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

ISM – Industrial Scientific and Medical

LAN – Local Area Network

LEACH – Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy

LLC – Logical Link Control

LR-WPAN – Low-Rate Wireless Personal Area Network

LQI – Link Quality Indication

LQI Tx – Link Quality Indication Transmitter

LQI Rx – Link Quality Indication Receiver

MAC – Medium Access Control

MAN – Metropolitan Area Network

MLME – MAC Sublayer Management Entity

MPDU – MAC Protocol Data Unit

O-QPSK – Offset Quadrature Phase Shift Keying

OPTICS – Ordering Points to Identify the Clustering Structure

OSI – Open Systems Interconnection Model

P2P – Peer-to-Peer

PAN – Personal Area Network

PAN ID – PAN Identifier

PC – Personal Computer  
PER – Packet Error Rate  
PHY – Physical Layer  
PO – Potência Ótima  
PUCRS – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul  
RF – Rádio Frequência  
RFD – Reduced-Function Device  
RPO – Reorganização de Potência Ótima  
RSSI – Received Signal Strength Indication  
RSSF – Rede de Sensores Sem Fio  
RTU – Remote Terminal Unit  
SAP – Service Access Point  
SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition  
SSCS – Service Specific Convergence Sublayer  
TCP – Transmission Control Protocol  
USB – Universal Serial Bus  
WLAN – Wireless Local Area Network  
WSN – Wireless Sensor Network

## LISTA DE SÍMBOLOS

bytes/s – Bytes por segundo.....	56
Char – Character .....	24
dB – DeciBel .....	37
dBm – DeciBel-miliwatt .....	36
GHz – GigaHertz .....	21
Kbps – Kilobits por Segundo.....	21
MHz – MegaHertz .....	21
ms – Milisegundos .....	56
mW – MiliWatt.....	37

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1	NORMA IEEE 802.15.4.....	19
2.1.1	Componentes de uma PAN.....	19
2.1.2	Topologias de Rede .....	20
2.1.3	Arquitetura de um Dispositivo IEEE 802.15.4 .....	22
2.2	PROTOCOLO MODBUS.....	25
2.2.1	Meios Físicos do Modbus.....	25
2.2.2	Requisitos Temporais do Modbus.....	25
2.2.3	Pilha de Comunicação do Modbus .....	26
2.2.4	Arquitetura de Rede e Endereçamento do Modbus .....	27
2.3	NODOS GATEWAY E SENSOR SEM FIO.....	27
2.3.1	Nodo Gateway.....	28
2.3.2	Nodo Sensor .....	31
2.3.3	Exemplo de Topologia em Forma de Árvore.....	32
2.3.4	Exemplo de Topologia em Forma de Árvore Híbrida. ....	33
3	TRABALHOS RELACIONADOS.....	34
4	ALGORITMOS DESENVOLVIDOS .....	38
4.1	ALGORITMO DE REORGANIZAÇÃO DE POTÊNCIA ÓTIMA (RPO) .....	38
4.1.1	Objetivos.....	38
4.1.2	Métricas.....	38
4.1.3	Fluxograma do Algoritmo RPO.....	43
4.2	ALGORITMO DE ESCOLHA DO CANAL DE OPERAÇÃO BASEADO NO SCANED (ECOBS).....	46
4.2.1	Objetivos.....	47
4.2.2	Métricas.....	47
4.2.3	Fluxograma do Algoritmo ECOBS .....	51
4.3	ALGORITMO DE AUTO-ORGANIZAÇÃO .....	54
4.3.1	Objetivos do Algoritmo de Auto-organização .....	54
4.3.2	Métricas Empregadas.....	54
4.3.3	Fluxograma do algoritmo AO .....	54
5	TESTES EXPERIMENTAIS PARA AVALIAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS ALGORITMOS RPO, ECOBS E AO ...	57
5.1	AVALIAÇÃO E VALIDAÇÃO DO ALGORITMO DE REORGANIZAÇÃO DE POTÊNCIA ÓTIMA (RPO).....	57
5.1.1	Experimentos sem a Implementação do Algoritmo RPO.....	57
5.1.2	Experimentos com a Implementação do Algoritmo RPO.....	59
5.2	VALIDAÇÃO DO ALGORITMO DE ESCOLHA DO CANAL DE OPERAÇÃO BASEADO NO SCANED (ECOBS) E DO ALGORITMO DE AUTO-ORGANIZAÇÃO (AO).....	61

5.2.1	<i>Instrumentação Utilizada para Realização dos Testes Experimentais .....</i>	61
5.2.2	<i>Ambiente Experimental Antes de Ligar os Nodos.....</i>	62
5.2.3	<i>Experimentos sem a Execução do Algoritmo de Auto-organização .....</i>	64
5.2.4	<i>Experimentos com a Execução do Algoritmo de Auto-organização .....</i>	67
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75

# 1 INTRODUÇÃO

Rede de Sensor Sem Fio (RSSF), em inglês *Wireless Sensor Network* (WSN) [RAG04], é uma tecnologia amplamente utilizada em diversos segmentos da indústria e comércio. Para atender a requisitos da aplicação alvo, as RSSFs podem ser construídas em diferentes topologias, tal como *ad hoc*, estrela, árvore e malha, e normalmente utilizam protocolos baseados na norma IEEE 802.15.4 [IEE11]. Esta norma define as camadas física e de enlace com robustez suficiente para que protocolos baseados na mesma proponham suas camadas superiores de forma simples, adicionando novos serviços que permitam atender a outros tipos de aplicações.

Resultado de uma pesquisa desenvolvida em parceria acadêmica (Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul) e industrial (Novus Produtos Eletrônicos), os nodos denominados nesta dissertação como nodo Gateway e nodo Sensor foram especificados e implementados com base no padrão IEEE 802.15.4. Estes nodos formam uma RSSF em uma topologia de árvore híbrida [GUA12], onde segmentos sem fio podem ser inseridos de acordo com a necessidade da aplicação industrial. O protocolo que rege a comunicação de alto nível destes equipamentos industriais é o Modbus RTU [MOD12], que atende integralmente aos requisitos dos projetos de comunicação industrial devido à sua robustez.

Este trabalho apresenta uma pesquisa no campo dos sistemas embarcados para RSSFs, buscando facilitar a criação de redes de comunicação industriais puramente sem fio ou a inserção de segmentos sem fio em arquiteturas cabeadas. Assim, é possível incluir nodos Sensores para o monitoramento de temperatura, umidade e outras grandezas de forma rápida, permitindo que os nodos sejam acessados sem a necessidade de um dispositivo específico definido e restrito pelos protocolos já apresentados no mercado (WirelessHART [CHE10], ISA100.11a [ISA09] e Zigbee [ZIG01]), que algumas vezes impõem a compra de *network managers*, *gateways*, *handheld devices* e outros equipamentos de grande custo e dificuldade de implementação.

Por vezes, é possível identificar que uma determinada RSSF está organizada de maneira inadequada, ou seja, os seus nodos estão dispostos e conectados entre si de maneira ineficiente com relação à potência de transmissão e recepção, além da possibilidade de estarem se comunicando em um canal de operação com interferências no espectro eletromagnético. Estes problemas são recorrentes e geram dificuldades no

momento da implantação do projeto. A motivação desta dissertação é propor uma topologia de RSSF com características de auto-organização dinâmica. Logo, os algoritmos de Reorganização de Potência Ótima (RPO), Escolha do Canal de Operação Baseado no *ScanED* (ECOBS) e de Auto-organização (AO) foram especificados e implementados visando este objetivo. Os resultados obtidos nos testes para validar do uso destes algoritmos durante a formação e operação de RSSFs comprovaram os benefícios da técnica proposta.

Iniciando por este capítulo de introdução, este trabalho é seguido pelas seções: (i) Capítulo 2, onde é apresentada a fundamentação teórica para o embasamento do conhecimento da temática, auxiliando na especificação dos três algoritmos propostos; (ii) Capítulo 3, no qual estão expostos os artigos estudados para comparação e definição da proposta de desenvolvimento; (iii) Capítulo 4, que descreve a especificação dos algoritmos implementados; (iv) Capítulo 5, que relata os testes de validação destes algoritmos; e (v) Capítulo 6, que conclui esta dissertação com as devidas considerações finais.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta o referencial teórico para a fundamentação do trabalho proposto. Dentre os conteúdos necessários para a compreensão deste trabalho destacam-se: (i) a norma IEEE 802.15.4 com seus componentes, topologias e arquitetura; (ii) o protocolo de comunicação Modbus, apresentando os meios físicos, endereçamento e arquitetura; (iii) o Gateway e Sensor sem fio Modbus, com o detalhamento do seu funcionamento, interfaces, topologias de rede e arquitetura.

### 2.1 Norma IEEE 802.15.4

O *Institute of Electrical and Electronic Engineers*<sup>1</sup> (IEEE) publicou normas que definem a comunicação em diversas áreas e segmentos, como na Internet, em periféricos para computadores pessoais e na comunicação industrial com tecnologia sem fio. Como exemplos, o padrão IEEE 802.11 define a comunicação de rede sem fio em uma área local, em inglês *Local Area Network* (LAN), e o padrão IEEE 802.16 define a comunicação banda larga sem fio em uma região metropolitana, em inglês *Metropolitan Area Networks* (MAN). O IEEE 802.15.4, foco deste trabalho, é um padrão para comunicação sem fio que define um modelo otimizado de comunicação para uma região restrita, em inglês *Personal Area Network* (PAN), aplicado tipicamente em dispositivos sensores. As seções seguintes abordam seus principais elementos e características.

#### 2.1.1 Componentes de uma PAN

Os componentes básicos de uma PAN para redes IEEE 802.15.4 são o FFD (do inglês, *Full-Function Device*) e o RFD (do inglês, *Reduced-Function Device*). A rede deve ter, pelo menos, um dispositivo operando como FFD coordenador, que poderá desempenhar funções especiais como atribuição de endereços aos outros dispositivos da rede, gerenciamento de tempos, entre outras funções [BUR11].

O FFD pode operar em três modos: (i) coordenador de uma PAN, em inglês *PAN coordinator*, (ii) roteador, ou (iii) um dispositivo folha, que apenas se comunica com FFDs coordenadores ou roteadores. Um RFD é um dispositivo folha, destinado a aplicações que são extremamente simples, e que não necessitam enviar grandes quantidades de dados. Um FFD pode comunicar-se com RFDs ou FFDs, enquanto um RFD só estabelece comunicação com um FFD.

---

<sup>1</sup> O IEEE é uma associação técnica profissional que especifica padrões para promover o crescimento e a interoperabilidade das tecnologias existentes e emergentes.

### 2.1.2 Topologias de Rede

O protocolo IEEE 802.15.4 dá suporte para três topologias de rede: estrela, ponto-a-ponto e *cluster-tree*.

#### Topologia Estrela

Na topologia em estrela, a comunicação de todos os dispositivos é estabelecida somente com o coordenador da PAN, que é percebido como um nodo central de comunicação. Este coordenador não deve ser alimentado à bateria, enquanto os demais dispositivos provavelmente serão. Aplicações que se beneficiam desta topologia incluem automação residencial, computadores pessoais, periféricos, brinquedos e jogos.

Depois que um FFD é ligado pela primeira vez, ele poderá criar sua própria rede e tornar-se o coordenador da PAN. Para cada rede iniciada, deverá ser escolhido um identificador PAN, o qual não poderá estar sendo utilizado por qualquer outra rede dentro da esfera de influência de rádio (limites de alcance do rádio). Isso permite que cada rede em estrela opere independentemente.

A Figura 1 ilustra um exemplo de topologia estrela contendo, além do coordenador da PAN, nodos FFD e RFD.

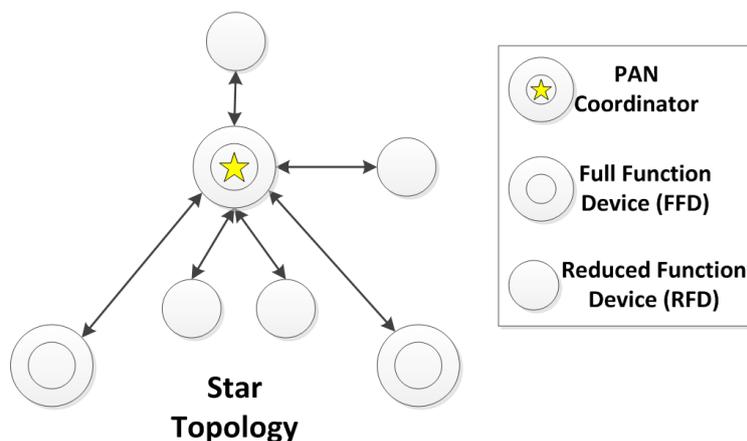


Figura 1 - Topologia estrela contendo o coordenador da PAN, 2 nodos FFD e 4 nodos RFD [Elaborada pelo autor baseada em IEE11].

#### Topologia Ponto-a-ponto (P2P)

Na topologia de redes ponto-a-ponto, em inglês *peer-to-peer*, qualquer dispositivo pode comunicar-se com qualquer outro dispositivo, desde que eles estejam dentro da esfera de influência de rádio. Uma rede ponto-a-ponto pode ser *ad hoc* [SAN05], com auto-organização (a responsabilidade pela organização e controle da rede é distribuída entre os próprios nodos) e auto-cura (quando um nodo da rede é desconectado os outros nodos detectam a falta do mesmo e esta rede se auto-organiza novamente). Aplicações como controle e monitoramento industrial, RSSF e controle de estoque de ativos

beneficiam-se desta topologia. Ela também permite vários saltos para encaminhar mensagens de um dispositivo para qualquer outro na rede, conforme ilustra a Figura 2, e pode fornecer confiabilidade através de múltiplos caminhos de roteamento.

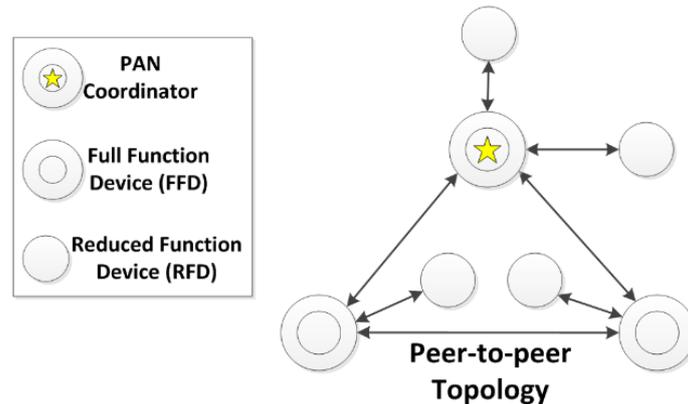


Figura 2 - Topologia de rede contendo 7 conexões ponto-a-ponto [Elaborada pelo autor baseada em IEEE03].

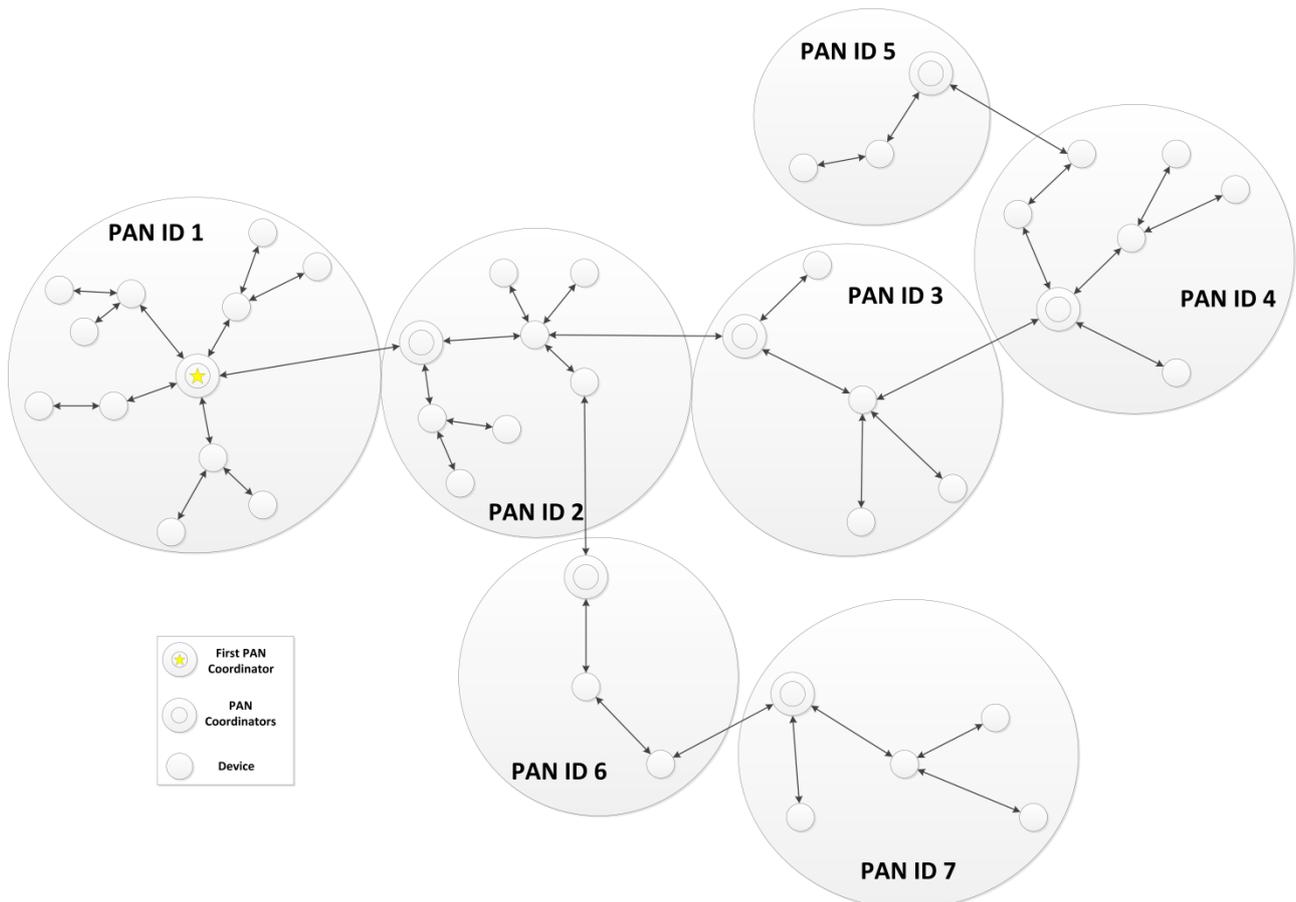
### Topologia Cluster-tree

A topologia em forma de *cluster-tree* é um caso especial de uma rede ponto-a-ponto em que a maioria dos dispositivos são FFDs, e um RFD pode se conectar a uma rede como um nodo final de um ramo. Qualquer um dos FFDs pode agir como um coordenador/roteador e fornecer serviços de sincronização para outros dispositivos. Porém, apenas um destes é o coordenador da PAN.

O coordenador da PAN é o nodo raiz da rede, em inglês *cluster head* (CLH), sendo referenciado pelo identificador de *cluster* (CID) com valor zero. O CLH escolhe um identificador PAN (PAN ID) não utilizado até o momento e envia em *broadcast* pacotes de *beacon* (tipo de pacote enviado para facilitar o acesso a redes sem fio, indicando que o dispositivo está ligado) para os dispositivos vizinhos.

Um dispositivo candidato que receber um pacote de *beacon* pode pedir para entrar na rede controlada pelo CLH. Se o coordenador da PAN permitir que o dispositivo entre, este será adicionado como um dispositivo filho na lista de vizinhos. O dispositivo recém incluso irá adicionar o CLH como seu pai em sua lista de vizinhos e começará a transmitir *beacons* periódicos, servindo para que outros candidatos possam juntar-se à rede. Uma vez que a rede esteja formada, o coordenador da PAN pode instruir um dispositivo a tornar-se um CLH de um cluster novo, adjacente ao primeiro. A vantagem desta estrutura é o aumento da área de cobertura, tendo como contrapartida o aumento da latência das mensagens.

A Figura 3 ilustra um exemplo sintético de uma rede com topologia em forma de *cluster-tree*. Esta topologia contém 7 CLHs formando 7 redes PAN.



**Figura 3 - Exemplo de topologia cluster-tree com 7 clusters [Elaborada pelo autor baseada em IEE11].**

### 2.1.3 Arquitetura de um Dispositivo IEEE 802.15.4

Um dispositivo IEEE 802.15.4 compreende uma camada PHY, que contém um transceptor de Rádio Frequência (RF) juntamente com o seu mecanismo de controle de baixo nível, e uma subcamada de controle de acesso ao meio, em inglês *Medium Access Control* (MAC), que permite o acesso ao canal físico para todos os tipos de transferência de dados. As camadas superiores são: (i) rede, que proporciona a configuração e manipulação da rede, e encaminha mensagens, e (ii) aplicação, que fornece a função pretendida de um dispositivo. Uma subcamada IEEE 802.2 de controle lógico do canal, em inglês *Logical Link Control* (LLC) pode acessar a subcamada MAC através da subcamada de convergência de serviço específico, em inglês *Service Specific Convergence Sublayer* (SSCS). A Figura 4 apresenta a arquitetura de software básica de um dispositivo IEEE 802.15.4.

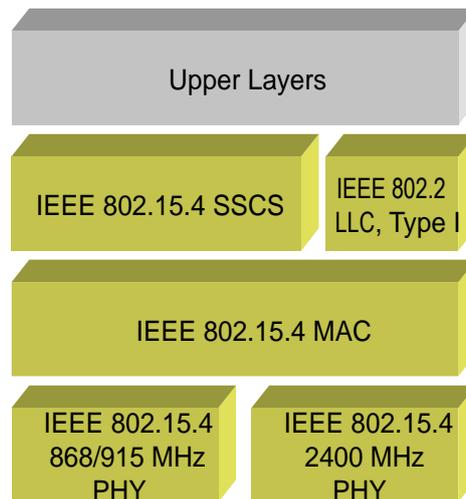


Figura 4 - Arquitetura IEEE 802.15.4 [Elaborada pelo autor baseada em IEE11].

### Camada Física - PHY

O padrão IEEE 802.15.4 foi desenvolvido para normatizar comunicações sem fio com baixa taxa de dados, conectividade simples e voltado à aplicação com baterias. O IEEE 802.15.4 especifica que a comunicação pode ocorrer nas bandas industriais, científicas e médicas, em inglês *Industrial, Scientific and Medical (ISM)* [MIS09], ou seja, operar em frequências entre os intervalos 868 a 868,8 MHz, 902 a 928 MHz e 2,4 a 2,4835 GHz. Embora qualquer uma destas bandas possa, tecnicamente, ser usada por dispositivos que operam conforme o protocolo IEEE 802.15.4, a banda de 2,4 a 2,4835 GHz é mais popular, pois é aberta na maioria dos países do mundo. A banda de 868 a 868,8 MHz é especificada principalmente para uso nos países europeus, enquanto que a banda de 902 a 928 MHz só pode ser utilizada nos Estados Unidos, Canadá e em alguns outros países e territórios que aceitam a regulamentação da FCC (*Federal Communications Commission*), entidade análoga à Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) no Brasil.

Dentro do intervalo de 2,405 GHz a 2,480 GHz, a comunicação ocorre em canais de 5 MHz. Na faixa de 2,4 GHz, a taxa de dados máxima é especificada em 250 kbps, mas devido à sobrecarga dos dados usados no protocolo, a taxa de dados máxima é, na prática, aproximadamente metade deste valor. Embora o padrão especifique canais com 5 MHz, apenas cerca de 2 MHz do canal é consumido com a largura de banda ocupada. Em 2,4 GHz, o IEEE 802.15.4 determina como técnica de modulação a sequência direta de espalhamento do espectro, em inglês *Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)*, com modulação por deslocamento de fase do tipo O-QPSK (*Offset Quadrature Phase Shift Keying*), usando pulso de meio seno para modular a portadora de RF. A Figura 5 mostra os canais nas bandas definidas pela norma IEEE 802.15.4.

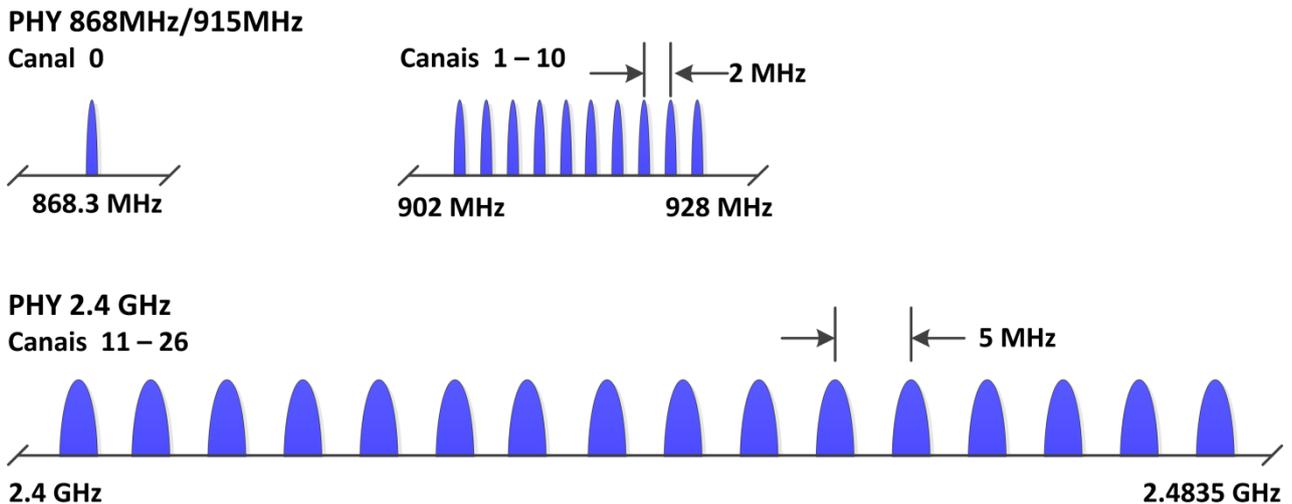


Figura 5 - Canais de operação IEEE 802.15.4 [Elaborada pelo autor baseada em VAS10].

Determinadas funções disponibilizadas por esta camada são extremamente úteis e importantes para que este protocolo atinja seus objetivos, como: (i) detecção de energia do sinal, em inglês *Energy Detection* (ED), cuja medição é utilizada por uma camada de rede como parte do algoritmo de seleção de canal; (ii) indicação da qualidade do canal de comunicação, em inglês *Link Quality Indication* (LQI), que mede a força e a qualidade do pacote recebido; e (iii) análise de canal livre, em inglês *Clear Channel Assessment* (CCA), que avalia a possibilidade de uso de um canal.

### Camada *Medium Access Control* - MAC

A camada MAC fornece dois serviços: (i) de dados e (ii) de gerenciamento. A *MAC sublayer management entity* (MLME) é uma entidade gestora que serve de interface para a camada MAC, e o SAP (*Service Access Point*) é o ponto de acesso ao serviço. O serviço de dados MAC permite a transmissão e recepção de unidades de dados do protocolo MAC, em inglês *MAC Protocol Data Unit* (MPDU), através do serviço de dados PHY [IEE11].

As características da subcamada MAC são: (i) gestão de sinais de aviso (*beacons*); (ii) acesso ao canal; (iii) gestão da garantia do slot de tempo, em inglês *Guaranteed Time Slot* (GTS); (iv) validação de pacotes; (v) reconhecimento de entrega de pacotes; e (vi) associação e dissociação de dispositivos na rede.

Referente ao acesso ao canal, a norma especifica que o *ScanED* [IEE06] permite que um dispositivo obtenha uma medida do pico de energia em cada canal solicitado. Isto pode ser utilizado por um possível coordenador de uma PAN para selecionar um canal para operar antes de iniciar uma nova PAN. Durante um *ScanED*, a subcamada MAC

deve descartar todos os *frames* recebidos pelo serviço de dados PHY. Um *ScanED* que atua em um determinado conjunto de canais lógicos é solicitado através da primitiva MLME-SCAN.request com o parâmetro *ScanType* definido para indicar uma varredura de *ED*. Para cada canal lógico, o MLME deve primeiramente mudar o canal, ajustando *phyCurrentChannel* e *phyCurrentPage* devidamente, e então realiza repetidamente uma medição *ED* para  $[aBaseSuperframeDuration * (2n + 1)]$  símbolos, onde *n* é o valor do parâmetro *ScanDuration* da primitiva MLME-SCAN.request. A medição *ED* é realizada pela MLME através da emissão de PLME-ED.request, que certamente retornará um valor. A medida máxima obtida durante o período deve ser observada antes de passar para o próximo canal da lista. Um dispositivo deve ser capaz de armazenar entre um e o número máximo de medidas especificado na implementação. O *ScanED* deve terminar quando o número de medidas armazenadas é igual ao máximo especificado na implementação ou quando a energia foi medida em cada um dos canais lógico especificados.

## 2.2 Protocolo Modbus

O protocolo Modbus é amplamente divulgado e utilizado em sistemas de automação industrial por ser conhecido como um protocolo com fio robusto, baseado na comunicação mestre-escravo entre dispositivos conectados em diferentes tipos de barramentos ou redes [MOD12]. É um protocolo de mensagens na camada de aplicação que define uma forma para a troca de dados entre os dispositivos. Desde 2004, o protocolo Modbus é mantido e controlado pela Modbus-IDA, comunidade de usuários e fornecedores de equipamentos de automação. A entidade é responsável pelas suas atualizações e padronização, o que garante que o protocolo possa ser utilizado por vários produtos, mantendo a compatibilidade independentemente do fabricante.

### 2.2.1 Meios Físicos do Modbus

Os meios físicos já definidos pela norma são: (i) RS485 [MOD06a]; (ii) RS232 [MOD06a]; e (iii) Ethernet [MOD06b]. Apesar de a norma estar limitada a especificar o funcionamento para estes três meios físicos, o protocolo pode ser implementado para outros – conforme definido na camada de aplicação (i.e. nível 7 da camada OSI) – desde que estes meios atendam principalmente aos requisitos temporais exigidos pelo protocolo. Vale ressaltar a inexistência de uma norma para o meio físico sem fio.

### 2.2.2 Requisitos Temporais do Modbus

O processo de transmissão e recepção de pacotes Modbus RTU possui requisitos temporais bastante rígidos. Toda interceptação e reconhecimento de pacotes são

realizados através de verificações temporais. Cada byte transmitido dentro de um pacote (*frame*) é acrescido de 3 bits de controle. Assim, o tempo para transmitir um caractere equivale ao tempo de transmissão de 11 bits: 1 bit de inicialização; 8 bits de dados, o bit menos significativo é enviado primeiro; 1 bit de paridade; e 1 bit de parada.

Para controle da transmissão de um *frame*, é definido o *inter-frame delay*, que consiste em aguardar um período de 3,5 a 4,5 caracteres em silêncio antes de iniciar um novo pacote na rede. Também é definido o *inter-character timeout*, visando detectar que a sequência de caracteres recebidos faz parte do mesmo *frame*; onde para caracteres de um mesmo *frame*, não pode haver um silêncio maior que o tempo de 1,5 caracteres. Na Figura 6 são identificados três frames sendo transmitidos e divididos pelo *inter-frame delay*.

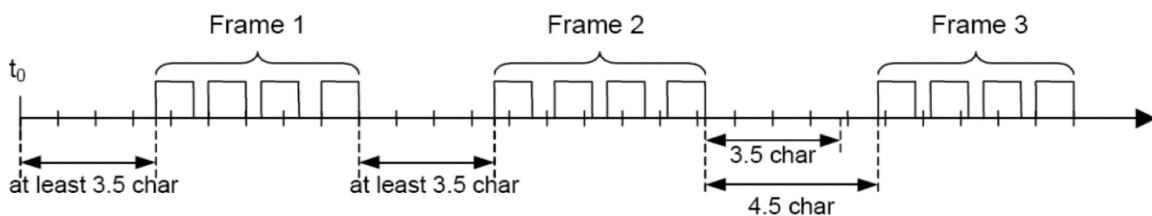


Figura 6 - Exemplificação do emprego do *Inter-frame delay* [MOD06a].

A Figura 7 exemplifica o emprego do *inter-character timeout* durante a transmissão de dois frames. O primeiro *frame* demonstra o correto funcionamento do *inter-character timeout*. Todavia, o segundo *frame* não atende aos requisitos da norma Modbus, pois teve seu *inter-character timeout* violado.

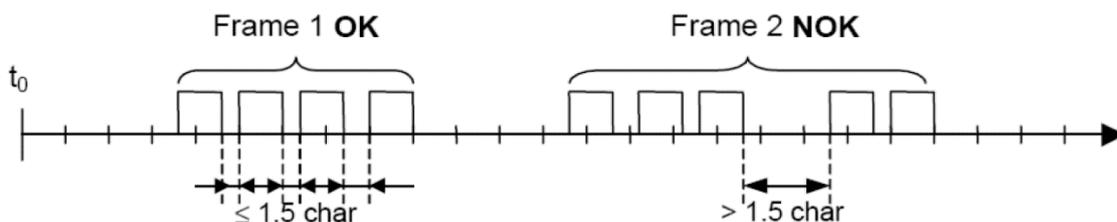


Figura 7 - Exemplificação do *Inter-character delay* na transmissão de dois frames, sendo que o primeiro tem os tempos de guarda respeitados e o segundo tem uma violação [MOD06a].

### 2.2.3 Pilha de Comunicação do Modbus

A Figura 8 ilustra a pilha de comunicação do Modbus. Este é um protocolo da camada de aplicação baseado na arquitetura cliente/servidor, no qual o servidor (Escravo) só funciona a partir de uma solicitação do cliente (Mestre) [MOD12]. Este protocolo fornece uma interface para comunicação entre dispositivos ligados em diferentes tipos de redes.

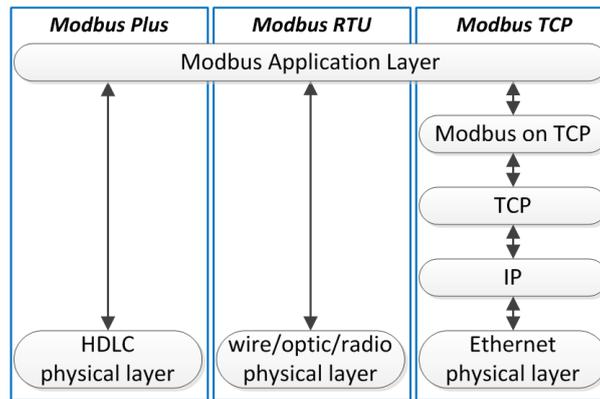


Figura 8 - Pilha de comunicação Modbus [Elaborada pelo autor baseada em MOD12].

O **Modbus Plus** implementa uma rede de transferência de alta velocidade com muitos recursos adicionais para o encaminhamento, diagnóstico e consistência dos dados e endereços. O **Modbus RTU** opera em meios físicos variados (e.g. cabo, fibra óptica e rádio), trabalhando com protocolos ponto-a-ponto, como o RS232, e com possibilidade de ponto-a-ponto ou multiponto, como o RS485. O **Modbus TCP** implementa dados encapsulados em pacotes TCP (*Transmission Control Protocol*) [USC81] usando a norma Ethernet (i.e. IEEE 802.3). O controle de acesso ao meio utilizado é o acesso múltiplo com verificação de portadora e detecção de colisão, em inglês *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection* (CSMA-CD) [IEE08].

#### 2.2.4 Arquitetura de Rede e Endereçamento do Modbus

A comunicação mestre-escravo do protocolo Modbus RTU ocorre da seguinte forma: o mestre transmite uma requisição para os escravos, que só respondem quando solicitados, ou seja, estes operam reativamente, ocupando o meio físico com suas respostas somente quando uma requisição for feita diretamente para o seu endereço. Devido a esta arquitetura, o protocolo Modbus RTU é capaz de integrar até 247 escravos em um único mestre. Os endereços que podem ser associados aos escravos estão entre 1 e 247, reservando o endereço 0 e a faixa de 248 a 254. Além destes, o endereço 255 é destinado à comunicação em difusão. O protocolo apresenta como desvantagem a limitação de operar somente com um único mestre, que não requer endereço.

### 2.3 Nodos Gateway e Sensor Sem Fio

Este subcapítulo detalha os nodos Gateway e Sensor, suas funcionalidades, interfaces, modos de operação e algumas possíveis aplicações implementáveis através da topologia proposta. Estes nodos compõem um sistema sem fio desenvolvido no escopo da pesquisa colaborativa acadêmica-industrial entre a PUCRS e a Novus

Produtos Eletrônicos. Os equipamentos possibilitam a implementação do meio físico sem fio, baseado na norma IEEE 802.15.4, para o protocolo Modbus RTU [SIE11].

### 2.3.1 *Nodo Gateway*

O nodo Gateway tem como objetivo principal interoperar de forma transparente os protocolos Modbus RTU sobre RS485 e IEEE 802.15.4, viabilizando de forma simples a substituição de extensos trechos de cabeamento estruturado por segmentos sem fio.

### Interfaces

O equipamento dispõe de três interfaces de comunicação: (i) RS485, (ii) USB e (iii) IEEE 802.15.4, que, de acordo com o modo de operação selecionado, executam tarefas distintas. Estas interfaces estão dispostas conforme a Figura 9.

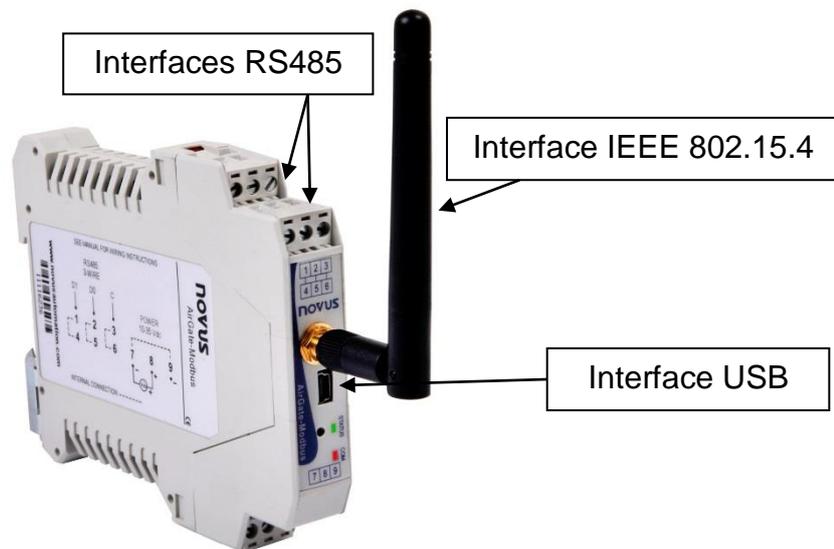


Figura 9 - Interfaces do nodo Gateway [Elaborada pelo autor].

### Arquitetura de Camadas do Nodo Gateway

A Figura 10 ilustra a arquitetura de software do Gateway, incluindo os meios físicos com e sem fio, com as camadas: (i) física, implementada pelo IEEE 802.15.4 PHY, PHY USB e PHY RS485; (ii) de enlace de dados, implementada pelo MAC IEEE 802.15.4; e (iii) de aplicação, implementada pelo Modbus RTU e camada de aplicação do nodo Gateway.

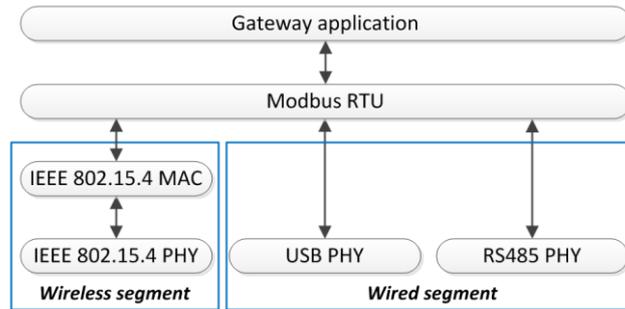


Figura 10 - Camadas de suporte com e sem fio do nó Gateway [Elaborada pelo autor baseada em SIE12b].

## Modos de Operação

Determinadas funções podem ser configuradas para que as interfaces de comunicação do nó Gateway desempenhem as funções necessárias em um projeto de comunicação industrial Modbus RTU. Estes modos de operação são:

### a) Multi-Master

Muitas aplicações industriais que utilizam redes Modbus RTU podem exigir mais de um mestre Modbus. Como exemplos destas aplicações estão um sistema com software SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) e um dispositivo registrador de dados ou uma interface homem-máquina. Todavia, o Modbus RTU não permite mais de um mestre na mesma rede Modbus RTU. A fim de melhorar este protocolo, o Gateway implementa a multiplexação de mestres, permitindo a dois mestres o controle de uma mesma rede.

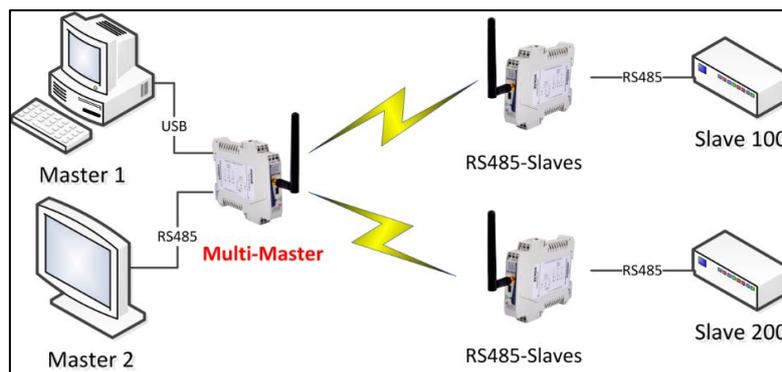


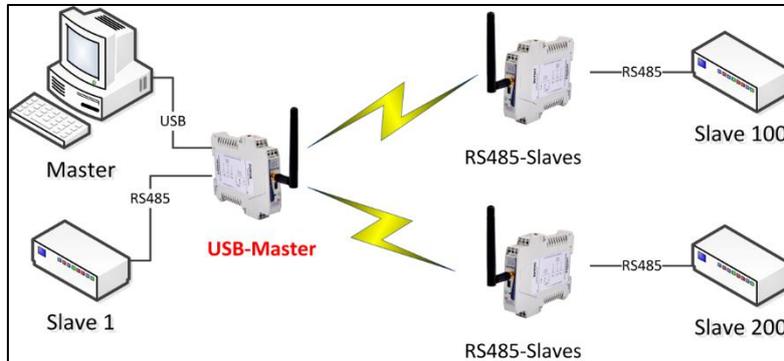
Figura 11 - Modo de operação Multi-Master [Elaborada pelo autor].

O modo de operação Multi-Master atua como FFD coordenador da rede IEEE 802.15.4 na sua interface sem fio e habilita as duas interfaces, RS485 e USB, para receberem requisições de dois mestres de uma mesma rede Modbus RTU. A Figura 11 exemplifica uma topologia viável para este modo de operação.

### b) USB-Master

Este modo de operação viabiliza a comunicação direta na interface USB de um mestre Modbus RTU. Operando como FFD coordenador, configura sua interface IEEE

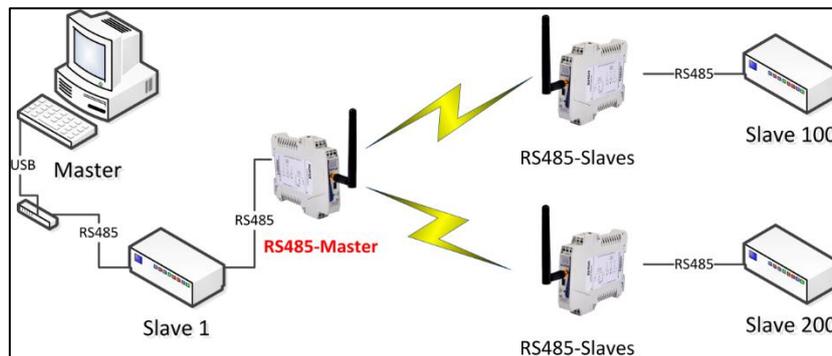
802.15.4 para encaminhar os pacotes recebidos na USB para os outros nodos sem fio presentes na rede e roteia para a USB quando uma resposta for recebida. A interface RS485 fica disponível para conexão de escravos, capacitando o nodo Gateway a operar como um conversor USB/RS485. Para ilustrar este modo de operação a Figura 12 apresenta uma possível topologia utilizando este modo de operação.



**Figura 12 - Modo de operação USB-Master [Elaborada pelo autor].**

#### c) RS485-Master

Quando o nodo Gateway estiver configurado neste modo de operação, as requisições de mestre estarão sendo esperadas na interface RS485. Os pacotes recebidos nesta interface serão encaminhados para a interface IEEE 802.15.4, que estará configurada como um FFD coordenador e, assim, encaminhará para a rede sem fio as perguntas do mestre Modbus RTU, retornando para esta mesma interface quando houver resposta. A interface USB fica desabilitada neste modo de operação. O modo de operação RS485-Master pode ser utilizado como no exemplo da Figura 13.



**Figura 13 - Modo de operação RS485-Master [Elaborada pelo autor].**

#### d) RS485-Slaves

Neste modo de operação, o Gateway inicia sua interface IEEE 802.15 configurada como RFD até que este seja pareado com outro Gateway. Assim que for estabelecido o canal de comunicação, o Gateway torna-se um repetidor, habilitando a sua interface para a função FFD e podendo estabelecer novos canais de comunicação sem fio. A interface RS485 prevê respostas de escravos roteadas para a interface IEEE 802.15.4 e

retornando para o mestre Modbus RTU através do canal sem fio estabelecido. A função de comunicação da interface USB fica desabilitada neste modo de operação. A Figura 14 apresenta dois nodos Gateways configurados com o modo de operação RS485-Slaves, que está operando como repetidor sem fio.

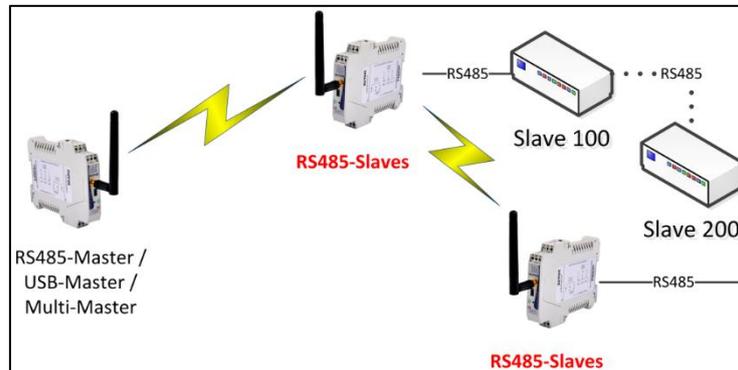


Figura 14 - Modo de operação RS485-Slaves [Elaborada pelo autor].

### 2.3.2 Nodo Sensor

O nodo Sensor desempenha a função de sensoriamento dentro da RSSF. Podendo operar utilizando bateria, este nodo pode adquirir os dados de temperatura, umidade e ponto de orvalho de determinado ambiente e disponibilizá-los na sua tabela de registradores retentivos Modbus. Outros dados da rede sem fio também podem ser lidos deste nodo quando em operação, facilitando, assim, o acesso ao mesmo quando for necessária alguma configuração remota ou monitoramento das variáveis.

A única interface de comunicação para operação disponível neste nodo é a sem fio IEEE 802.15.4. Internamente, para facilitar a primeira configuração, uma interface USB está habilitada e comunica através do protocolo Modbus RTU.

As camadas definidas para operação do nodo Sensor são: (i) física (através da PHY do IEEE 802.15.4), (ii) de enlace (baseando-se na camada MAC IEEE 802.15.4); e (iii) de aplicação (padronizada pelo Modbus RTU e aplicação do nodo Sensor). Estas camadas estão representadas na Figura 15.

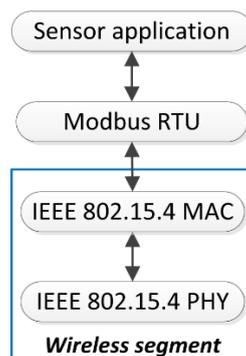
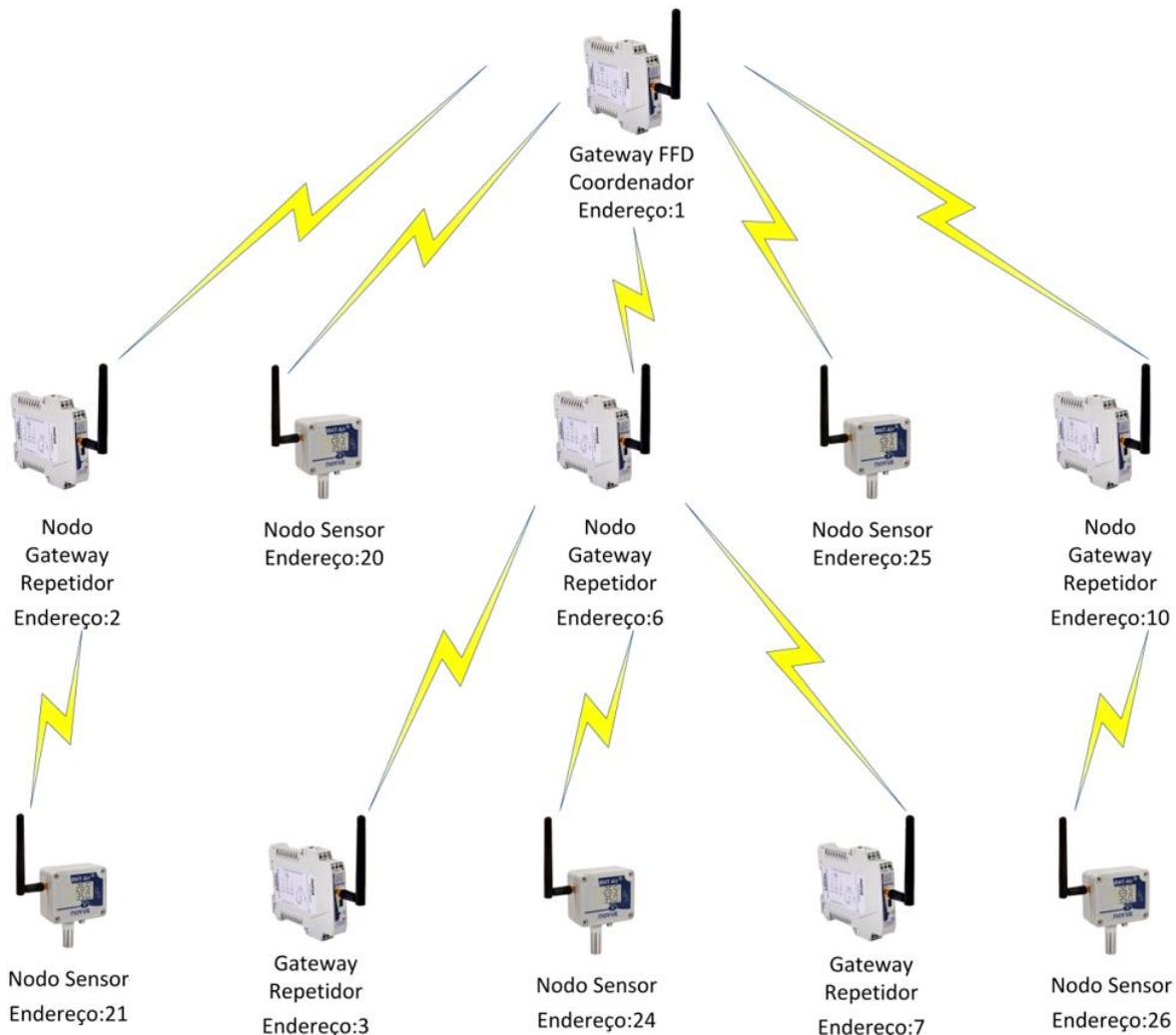


Figura 15 - Arquitetura de camadas do nodo Sensor [Elaborada pelo autor].

### 2.3.3 Exemplo de Topologia em Forma de Árvore

A Figura 16 apresenta uma possibilidade de utilização dos nodos Gateways e Sensores com o objetivo de gerar uma RSSF em topologia de árvore puramente sem fio.



**Figura 16 - Exemplo de topologia em forma de árvore puramente sem fio [Elaborada pelo autor].**

Inicialmente o nodo Gateway FFD Coordenador, configurado em um dos modos de operação Master inicia a rede no canal de operação escolhido através do algoritmo de *ScanED* [IEE06] e aguarda as requisições de pareamento dos RFDs, configurados no modo de operação RS485-Slaves. Caso os nodos RFDs estejam configurados com a mesma PANID do Gateway Coordenador o pareamento será executado, gerando um primeiro nível de profundidade de rede numa topologia em forma de estrela. Os nodos Gateways presentes neste primeiro nível podem receber pacotes de pareamento de outros RFDs pois, ao estarem pareados com um nodo FFD, trocam sua função e passam a operar como FFDs, permitindo que um próximo nível possa ser gerado e, assim, passam a ser chamados de nodos Gateways Repetidores. Já os nodos Sensores sempre se mantêm com a mesma função de RFD.

### 2.3.4 Exemplo de Topologia em Forma de Árvore Híbrida.

A topologia em forma de árvore híbrida representada na Figura 17 mostra um exemplo de aplicação de automação industrial. Esta configuração do nodo Gateway como Multi-Master possibilita a inserção de dois mestres Modbus monitorando e gerenciando os equipamentos presentes nesta rede. Esta topologia é chamada de árvore híbrida, pois segmentos sem fio e com fio são meios físicos possíveis para comunicação.

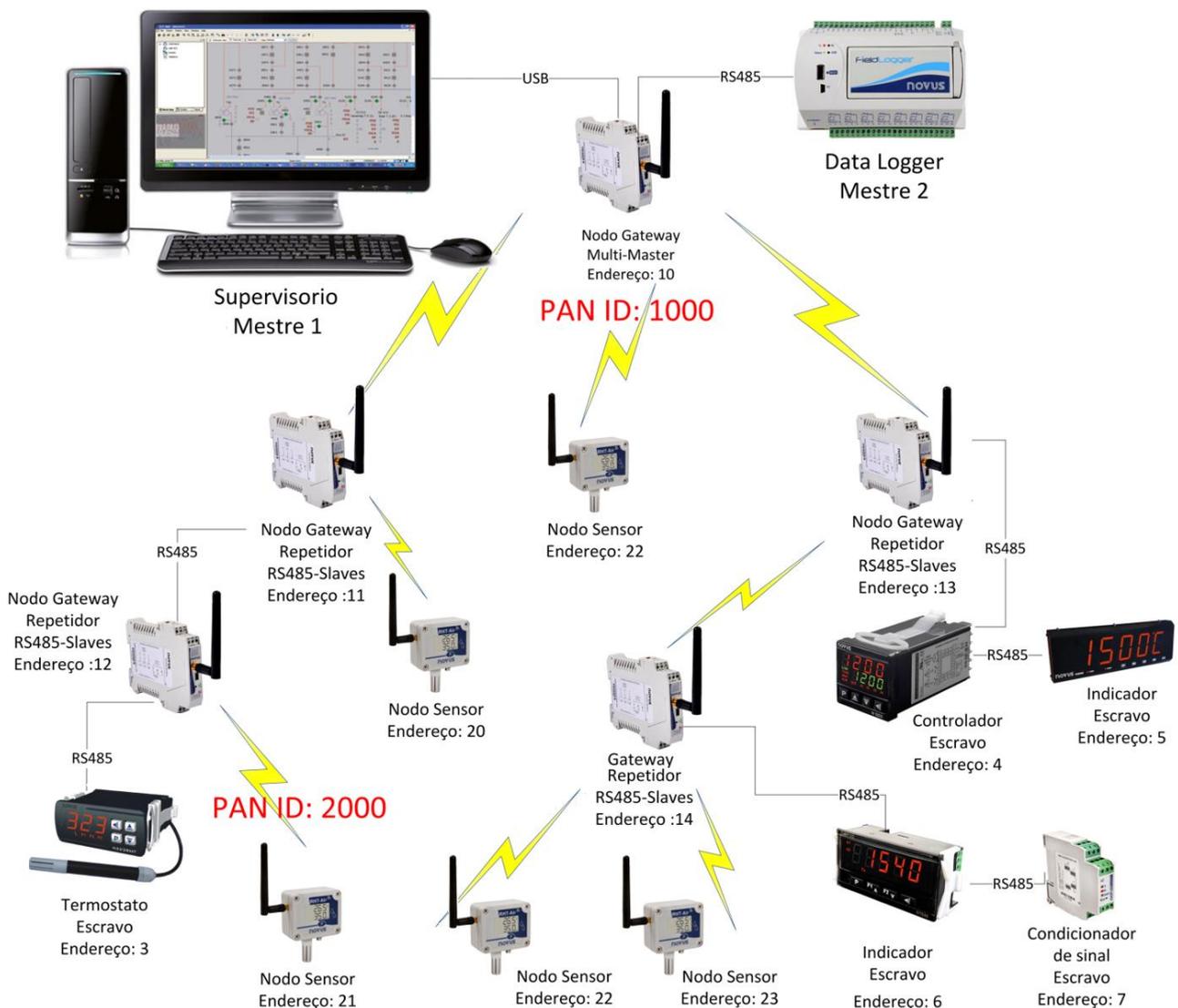


Figura 17 - Exemplo de topologia em forma de árvore híbrida [Elaborada pelo autor].

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

Este capítulo apresenta trabalhos relacionados ao tema auto-organização de RSSFs. Os trabalhos aqui descritos contribuem para esta dissertação, uma vez que, apesar da temática comum de auto-organização dos nodos de uma RSSF, estes se diferenciam pelas métricas levantadas e algoritmos utilizados para alcançar este objetivo. Ao final, uma tabela comparativa resume as diferenças entre este trabalho e os relacionados.

Collier e Taylor [COL04] definem um sistema de auto-organização onde um conjunto de unidades se coordena para formar um sistema que se adapta para atingir um objetivo de forma mais eficiente. Os autores distinguem os termos auto-organização de auto-ordenação pelo fato de que, em um sistema auto-ordenado, o estado de uma parte deste sistema influencia o estado de outra através de interações locais. Isto o difere da aleatoriedade, contudo não é suficiente para alcançar a coerência e o funcionamento como um todo, o que seria essencial para o enquadramento no termo “organização”. No intuito de auxiliar no entendimento da definição do termo, os autores enumeram características essenciais para um sistema auto-organizado: (1) O sistema é composto por unidades que podem responder individualmente aos estímulos locais, (2) as unidades agem em conjunto para alcançar uma divisão de trabalho, e (3) o sistema adapta-se para alcançar um objetivo de forma mais eficiente. E, finalmente, para que estas características se mantenham, são necessárias certas condições como: (a) O sistema deve ter entradas e alguma saída mensurável, (b) o sistema deve ter, pelo menos, um objetivo, (c) as unidades devem mudar seu estado interno com base em suas entradas e nos estados das outras unidades, (d) nenhuma unidade sozinha ou subconjunto não-comunicativo de unidades pode alcançar o objetivo do sistema tão corretamente como o conjunto pode, e (e) em média, à medida que ganha experiência em um ambiente específico, o sistema atinge os seus objetivos de forma mais eficiente e/ou precisa.

Kalita e Kar [KAL10] propõem um algoritmo para auto-organização de sensores implantados em uma região geográfica baseado no algoritmo OPTICS, que ordena os dados dos pontos para obter um agrupamento de forma arbitrária, o algoritmo proposto forma aglomerados de sensores através de um método de triangulação único. Quando o procedimento de ordenação termina, todos os nodos sensores formam uma rede própria e se tornam membros de um cluster.

Wenyang e Xue [WEN13] dissertam sobre a importância do uso de RSSFs auto-organizadas na concepção de aparelhos para Internet das Coisas. Em RSSFs auto-organizadas a topologia de rede e o canal de operação mudam dinamicamente com a mobilidade dos nodos. O modelo é descentralizado, os nodos podem entrar e sair da rede a qualquer momento e automaticamente encontrar vizinhos para formar uma topologia de rede. Portanto, nodos de RSSFs auto-organizadas podem efetivamente promover a expansão de casas inteligentes e colocar equipamentos em um grande grau de liberdade. Por isso, os autores argumentam que a aplicação de RSSFs auto-organizadas em aparelhos de Internet das Coisas resultam não somente em redução de custos, mas também em melhoria da escalabilidade do sistema. No intuito de encontrar um modo de rede de transmissão sem fio eficiente e confiável em aparelhos de Internet das Coisas, o artigo testa RSSFs utilizando seis nodos. Os testes de conexões de nodos indicaram que não havia necessidade de nova conexão, pois nenhuma mensagem de timeout foi recebida. Como a confiabilidade do sistema depende principalmente da taxa de perda de pacotes e do tempo de execução, nenhuma conexão em curto espaço de tempo indica alta confiabilidade e estabilidade das RSSFs. Logo, pode-se inferir que nodos de RSSFs auto-organizadas têm grande valor quando aplicados em aparelhos de Internet das Coisas.

Sirsikar, Chunawale e Chandak [SIR14] propõem um modelo que forma uma base para auto-organização em RSSFs, motivados pela necessidade de se estudar os vários parâmetros do sistema que são requeridos pela RSSF para ser auto-organizada. O modelo proposto tem o intuito de permitir a formação de auto-organização de RSSF através da capacidade de agrupamento de nodos. Os parâmetros necessários são expostos no artigo divididos por camadas do modelo OSI: (i) camada física: comunicação, coordenação implícita, sensoriamento e cobertura de transmissão; (ii) camada de enlace: compartilhamento de canal e sincronização temporal; e (iii) camada de rede: roteamento, agrupamento, descoberta dos vizinhos e controle de topologia. Os autores argumentam que o sucesso da aplicação dos princípios de auto-organização em uma RSSF depende do projeto do modelo.

Smeets et al. [SME08] apresentam em seu artigo um algoritmo de roteamento baseado em controle de topologia que melhora o tempo de vida de uma RSSF ao permitir que os nodos escolham entre dois níveis de potência pré-definidos. O algoritmo proposto aproveita topologias não homogêneas, onde os nodos são agrupados em nuvens, e determina que os nodos apenas irão utilizar a potência mais alta para estabelecer um canal de comunicação, como, por exemplo, para criar uma ponte entre duas nuvens.

Dentro das nuvens, no entanto, apenas canais de baixa potência são utilizados. Assim, o algoritmo proposto é capaz de criar, de forma distribuída, uma topologia de energia eficiente, usando duas potências de transmissão diferentes, de modo a otimizar o uso de energia.

Lee e Lee [LEE11] propõem um modelo de agrupamento hierárquico e roteamento que opera os clusters formados de uma maneira inteligente e adaptativa, maximizando o tempo de vida da rede através da tomada de decisão de cada nodo com base em informações locais. O método é composto por três mecanismos. Em primeiro lugar, a fim de selecionar um coordenador de cluster adequado, são utilizados dois tipos de medidas de desempenho. Em segundo lugar, o intervalo de transmissão é determinado como uma função do número de nodos de sensores. Em terceiro lugar, para superar os problemas causados por uma possível avaria, dano ou falha de nodos sensores na RSSF, um mecanismo de backup inteligente é estabelecido para monitorar o estado do coordenador e para restaurar o sistema automaticamente no caso de tais problemas. O método proposto permite que os nodos sensores formem clusters sem a assistência de um servidor ou qualquer assistência externa. A principal vantagem do modelo é a capacidade de identificar quaisquer perturbações ambientais, como mudanças de relógio, número de nodos sensores e falhas de nodos, utilizando-se de três mecanismos inteligentes e adaptativos.

Park et al. [PAR07] dissertam sobre a necessidade de compor clusters com poucos coordenadores. Quando agrupados em clusters, os nodos sensores apenas necessitam se comunicar com os coordenadores de clusters minimizando o consumo de energia dos nodos sensores. O artigo propõe um algoritmo para otimizar clusters de redes de sensores, onde coordenadores de clusters redundantes são eliminados e clusters desnecessariamente sobrepostos são fundidos. O algoritmo também controla as alterações dinâmicas como inclusão ou saída de nodo, enquanto a rede continua trabalhando.

Biradar et al. [BIR11] descrevem e implementam diversos protocolos *multihop* de roteamento para RSSFs, como *Flooding*, *Gossiping* e o protocolo de agrupamento *Multihop-LEACH*. Os autores concluem que o último protocolo é o mais adequado para a minimização do consumo de energia, dentre os analisados, pois o protocolo *Multihop-LEACH* envolve técnicas como agrupamento em clusters e agregação de dados. *Multihop-LEACH* é baseado em clusters onde os coordenadores coletam dados de todos

os nodos sensores do cluster, agregam estes dados através de métodos de fusão e transmitem os mesmos através de um caminho ótimo entre o coordenador e a estação base. Este caminho ocorre através de outros coordenadores de clusters intermediários, que são utilizados como uma estação de retransmissão.

A Tabela 1 resume os sistemas desenvolvidos nos trabalhos relacionados e as características que são relevantes para a comparação com este trabalho.

**Tabela 1 - Resumo dos Trabalhos Relacionados.**

Ano [Trabalho]	Protocolos, Algoritmos e Modelos	Topologia de Rede	Requisitos e Objetivos
2010 [KAL10]	OPTICS	Ad hoc	Minimização de Consumo de Energia
2013 [WEN13]	IoT, MAS	P2P	Confiabilidade, Escalabilidade e Minimização de Consumo de Energia
2014 [SIR14]	SOWSN	Cluster-tree	Minimização de Consumo de Energia
2008 [SME08]	Two Powers Topology Control (TPTC)	Tree	Minimização de Consumo de Energia e Diminuição da Taxa de Erros de Comunicação
2011 [LEE11]	LEACH, LEACH-ED, HEED, REED, DED, Proprietários	Cluster-tree	Escalabilidade e Minimização de Consumo de Energia
2007 [PAR07]	Clustering vs. ACE e SOS	Cluster-tree	Estabilidade e Diminuição da Taxa de Erros de Comunicação
2011 [BIR11]	Flooding, Gossiping, Multihop-LEACH	Cluster-tree	Escalabilidade e Minimização de Consumo de Energia
Este Trabalho	IEEE 802.15.4, Modbus, Reorganização de Potência Ótima, Escolha do Canal de Operação Baseado em ScanEd, Auto-organização	Tree	Flexibilidade, Escalabilidade, Minimização de Consumo de Energia, Espectro Eletromagnético Limpo, Diminuição da Taxa de Erros de Comunicação, Desempenho e Confiabilidade

Este capítulo mostrou trabalhos relacionados que propõem a implementação de algoritmos de auto-organização para RSSFs. Os sistemas propostos simulam e implementam soluções orientadas às suas aplicações, com base nas métricas de cada proposta. A contribuição desta dissertação é uma solução que permita a obtenção de uma rede melhor organizada e com melhor desempenho através do uso dos três algoritmos propostos: Reorganização de Potência Ótima (RPO), Escolha do Canal de Operação Baseado em *ScanED* (ECOBS) e algoritmo de Auto-organização (AO).

## 4 ALGORITMOS DESENVOLVIDOS

Os objetivos, as especificações de funcionamento e as métricas utilizadas dos algoritmos desenvolvidos estão descritos neste capítulo. Imagens e tabelas ilustrativas auxiliam no entendimento desta seção central do trabalho. Seguem apresentados na sequência lógica de desenvolvimento os algoritmos: (i) Reorganização de Potência Ótima, (ii) Escolha do Canal de Operação Baseado em *ScanED* e (iii) Auto-organização. Estes algoritmos são propostos para a obtenção de redes com nodos que se auto-organizem, transformando suas características, a rede e o ambiente no qual estão incorporados.

### 4.1 Algoritmo de Reorganização de Potência Ótima (RPO)

Estão descritas neste subcapítulo as definições deste algoritmo, objetivos de sua implementação, métricas utilizadas no seu desenvolvimento e o fluxograma de como opera para chegar ao seu propósito.

#### 4.1.1 Objetivos

O desenvolvimento de uma sistemática inteligente para que as potências de transmissão dos nodos sem fio sejam adequadas para as suas necessidades se faz necessário por diversos motivos. Dentre eles podemos ressaltar a diminuição do consumo de energia dos nodos, a obtenção de um espectro eletromagnético com menor interferência causada pelos nodos e menor taxa de erro devido à diminuição de retransmissões e colisões.

#### 4.1.2 Métricas

As métricas utilizadas como parâmetros para a implementação deste algoritmo são as seguintes:

#### **LQI (Link Quality Indicator)**

O LQI é uma métrica da qualidade atual do sinal recebido. Este fornece uma estimativa de quão facilmente um sinal recebido pode ser demodulado por meio de acúmulo da magnitude de erro entre os valores ideais e o sinal recebido ao longo dos 64 símbolos imediatamente seguintes à palavra de sincronização. O LQI é usado como uma medida relativa da qualidade do canal (um valor baixo indica um canal melhor e um valor alto indica um canal pior), uma vez que o valor depende do formato de modulação.

Este parâmetro pode ser adquirido no último pacote recebido pelo nodo, através da camada física do protocolo IEEE 802.15.4. Ele é apresentado com a unidade dBm, que

representa o nível de potência em decibéis em relação ao nível de referência de 1 miliWatt. Esta unidade é utilizada principalmente na área de telecomunicações para expressar a potência absoluta mediante uma relação logarítmica. Assim, 0 dBm equivale a 1 mW. A conversão da potência em Watts para dBm pode ser realizada utilizando-se a seguinte fórmula:

$$Pd_{Bm} = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{mW}}{1 \text{ mW}} \right)$$

Onde:

$Pd_{Bm}$  é a potência em dB;

$P_{mW}$  é a potência em miliWatts.

Os valores máximos e mínimos para LQI são, respectivamente, -15 dBm (0,031 mW), representado também pelo hexadecimal 0xFF que se refere à melhor qualidade de sinal possível, e -100 dBm (1e-10 mW), podendo também aparecer como 0x00, que representa a qualidade mínima para que um canal de comunicação se mantenha estabelecido. A partir do último valor os nodos não conseguem se manter mais pareados. A Tabela 2 mostra como referência algumas conversões dentro da faixa de valores de LQI possíveis:

**Tabela 2 - Conversão dBm para mW.**

dBm	mW
-15	31,6E-3
-20	10,0E-3
-30	1,0E-3
-40	100,0E-6
-50	10,0E-6
-60	1,0E-6
-70	100,0E-9
-80	10,0E-9
-90	1,0E-9
-100	100,0E-12

O ideal para aferir corretamente um canal de comunicação entre dois nodos (FFD e RFD) pareados é utilizar os LQI recebidos nos dois nodos. Assim, podemos representar como LQI Rx o valor adquirido na recepção do nodo RFD, enquanto que o LQI Tx denota o valor recebido no nodo FFD, isto analisado do ponto de vista do nodo RFD. A Figura 18 exemplifica esta representação.

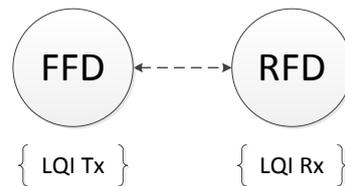


Figura 18 - LQI Rx e LQI Tx [Elaborada pelo autor].

Esta avaliação é de suma importância para utilização do LQI como parâmetro, pois este está condicionado a elementos como as interferências eletromagnéticas (ruídos) próximas aos nodos transmissor e receptor, à sensibilidade na recepção dos nodos e à potência de transmissão.

Distância e obstáculos são fatores que manipulam o valor do LQI e são importantes para os cálculos em modelos de propagação de sinal, estudo do impacto da zona de Fresnel e cálculo de enlace de comunicação. A variação do LQI aparece em uma relação inversamente proporcional à distância. Logo, podemos constatar que a inserção de barreiras ou objetos no caminho dos nodos apresenta uma diminuição na sua potência. Por este motivo, o LQI é amplamente utilizado como parâmetro para algoritmos de localização e rastreamento de nodos em redes de sensores sem fio.

O LQI é um valor acumulado, utilizado em redes *multi-hop* para avaliar o custo de um canal de comunicação. Os valores de LQI podem ser modificados a cada passo de propagação da mensagem da rede, uma vez que este é apresentado somente entre os últimos nodos que receberam a mensagem. As mensagens tomam diferentes caminhos através de uma determinada topologia e, assim, podem ter diferentes valores de LQI. Portanto, o ideal é escolher o caminho com o melhor LQI como rota para as mensagens subsequentes.

### **RSSI (Received Signal Strength Indicator)**

O RSSI é uma indicação de intensidade do sinal. Enquanto o LQI dá importância à qualidade ou correção do sinal, o RSSI tem como foco a força do sinal. A qualidade do sinal, no entanto, muitas vezes está ligada à força, já que um sinal forte é provavelmente menos afetado pelo ruído e, portanto, é visto como limpo ou mais correto pelo receptor.

O RSSI é uma medida de potência de RF em um canal. A potência de RF pode vir de diversas fontes, sendo elas: (i) outros transmissores IEEE 802.15.4, (ii) Bluetooth, (iii) Wi-Fi, (iv) FSK, ou (v) qualquer radiação de segundo plano presente no local. O RSSI também é chamado de detecção de energia, em inglês *Energy Detection* (ED), e é um parâmetro para o *Clear Channel Assessment* (CCA), ou seja, pode ser utilizado para

testar se o canal está ocupado. Para uma rede *single-hop*, o RSSI pode ser manipulado para o LQI.

Uma relação com cinco casos extremos de como o RSSI e o LQI podem ser apresentados é ilustrada na Tabela 3:

**Tabela 3 - Relação RSSI e LQI.**

Sinal	RSSI	LQI
Fraco, com ausência de ruído	Baixo	Baixo
Fraco, na presença de ruído	Baixo	Alto
Forte, com pouco ruído	Alto	Baixo
Forte (geralmente proveniente de uma interferência)	Alto	Alto
Muito forte (que faça com que o receptor sature)	Alto	Alto

O RSSI é uma métrica para obtenção dos parâmetros utilizados nos algoritmos desenvolvidos. A norma IEEE 802.15.4 não apresenta informações sobre o RSSI, mas em muitos algoritmos de localização de nodos este valor é percebido como parâmetro e assim utilizado nos cálculos de aproximação de posicionamento [MAO09].

### Potência de Transmissão (PTx)

A potência de transmissão ótima, ou seja, a PTx que melhor se adequa para determinada transmissão é o resultado final que se espera obter do algoritmo RPO para cada um dos nodos da RSSF. Ao mesmo tempo em que ela é utilizada como métrica, a PTx é um parâmetro da fórmula PTxiteração, que será apresentada a seguir. Conforme exposto na fórmula PTxiteração, devemos calcular a potência que deverá ser configurada para a transmissão de cada nodo em cada uma das iterações do cálculo da PTxiteração. O valor final obtido após as iterações será a PTx ótima. Estes valores deverão estar de acordo com as necessidades de cada enlace de comunicação estabelecido na RSSF formada, e a negociação deverá ocorrer após toda a execução de pareamento consolidada.

$$PTxiteração(LQI, PTx) = PTx + (-70 - LQI)$$

A potência de transmissão está ligada diretamente a dois requisitos importantes das RSSFs, sendo eles: (i) consumo de energia e (ii) interferência eletromagnética. Tendo como objetivo a redução destes dois aspectos, a adequação da melhor potência de transmissão deve ser realizada. No entanto, para que isso não impacte negativamente no desempenho da RSSF, é necessário estabelecer algumas regras especificadas a seguir. A obtenção da potência de transmissão ótima deverá ser calculada pelo nodo FFD de acordo com as vinte vezes que os LQIs de cada nodo forem analisados (LQI Tx e LQI

Rx). A necessidade de vinte iterações deve-se ao fato de que, através dos resultados experimentais, foi verificado que a partir desta quantidade de iterações o valor de PTx ótima já não sofria mais alterações. A cada LQI analisado, uma nova PTx será assumida para a próxima transmissão tanto do nodo FFD quanto do nodo RFD. A fórmula para obtenção da PTx a ser assumida é a PTxiteração(LQI, PTx). Esta fórmula faz com que um LQI analisado pelo nodo FFD busque, se possível, ficar próximo de um nível de qualidade de sinal na ordem de -70 dBm. A definição deste valor é motivada pelo fato de que a sensibilidade de recepção limite é -100 dBm, ou seja, quando o sinal no receptor for menor que -100 dBm o pacote será perdido. Além disso, perdas de sinal podem ocorrer e reduzir em torno de 10 dB a sua intensidade, devido a mudanças climáticas. A margem de segurança foi definida em 20 dB, obtendo-se assim o nível de qualidade de sinal de -70 dBm.

Quando o valor resultante da fórmula não estiver dentre as possíveis potências de transmissão configuráveis para os nodos Gateways e Sensores (0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 e 20), deverá ser executado o ajuste conforme a Tabela 4.

**Tabela 4 - Ajuste pós-fórmula PTxiteração.**

Teste	PTxiteração (dBm) ajustada
PTxiteração $\leq$ 1	0
1 < PTxiteração $\leq$ 3	2
3 < PTxiteração $\leq$ 5	4
5 < PTxiteração $\leq$ 7	6
7 < PTxiteração $\leq$ 9	8
9 < PTxiteração $\leq$ 11	10
11 < PTxiteração $\leq$ 13	12
13 < PTxiteração $\leq$ 17	14
17 < PTxiteração	20

Ao final das vinte iterações, a potência de transmissão que mais se repetiu deverá ser selecionada como PTx ótima. Caso mais de um valor de potência tenha se repetido na mesma quantidade de vezes, será selecionada a menor, pois esta trará menores consumos de energia e interferências eletromagnéticas. Ao ajustar as potências de transmissão dos nodos é possível verificar a redução de consumo de energia durante a transmissão na ordem de grandeza apresentada na Tabela 5 [GUA14]. Apesar do valor impactante de consumo de energia nos nodos ser o do consumo quiescente, ou seja, o valor de drenagem quando o nodo está dormindo, a redução de consumo de energia durante as transmissões também impacta neste quesito, principalmente quando o nodo comunica com muita regularidade, ou seja, executa transmissões frequentemente.

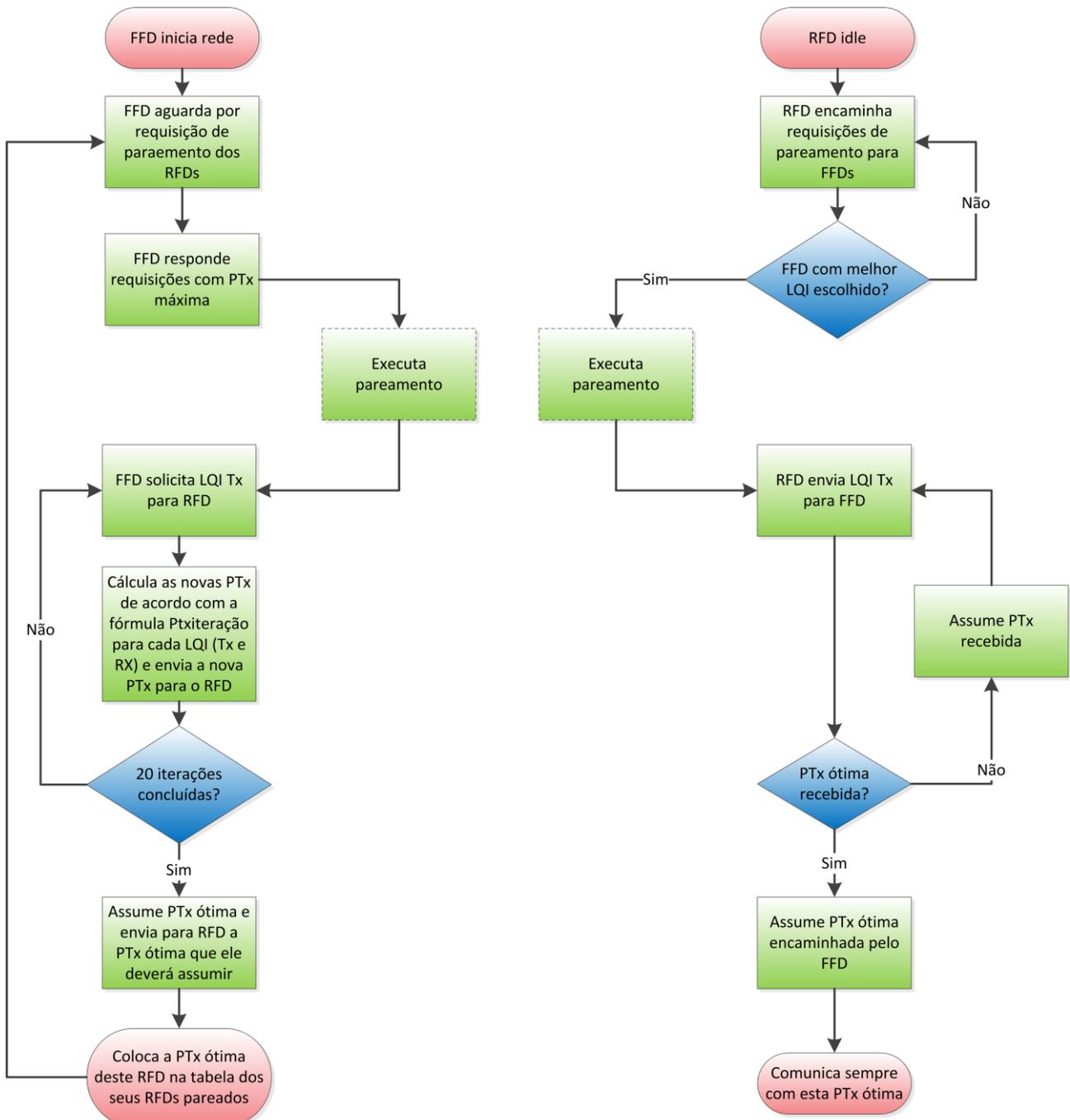
**Tabela 5 - Consumo de energia durante transmissão em cada potência de transmissão.**

PTx (dBm)	Consumo durante Tx
0	74 mA
2	76 mA
4	78 mA
6	79 mA
8	80 mA
10	81 mA
12	91 mA
14	102 mA
20	175 mA

Assim, o resultado da avaliação de PTx ótima deixa de ser definida sem nenhuma inteligência e passa ter uma métrica para sua decisão, melhorando o que por muitas vezes é feito de maneira simples, selecionando a potência mais elevada possível para que não se corra o risco de os nodos perderem o canal de comunicação estabelecido.

#### 4.1.3 Fluxograma do Algoritmo RPO

A Figura 19 representa a sequência de execução do algoritmo do RPO para os dois nodos FFD e RFD. O fluxograma expõe temporalmente as fases dos diferentes nodos e mostra como o processo de decisão da Potência de Transmissão Ótima é dependente dos dois LQIs (Tx e Rx). Através da técnica apresentada, ao final do fluxo será possível verificar qual PTx deverá ser ótimo para este canal estabelecido.



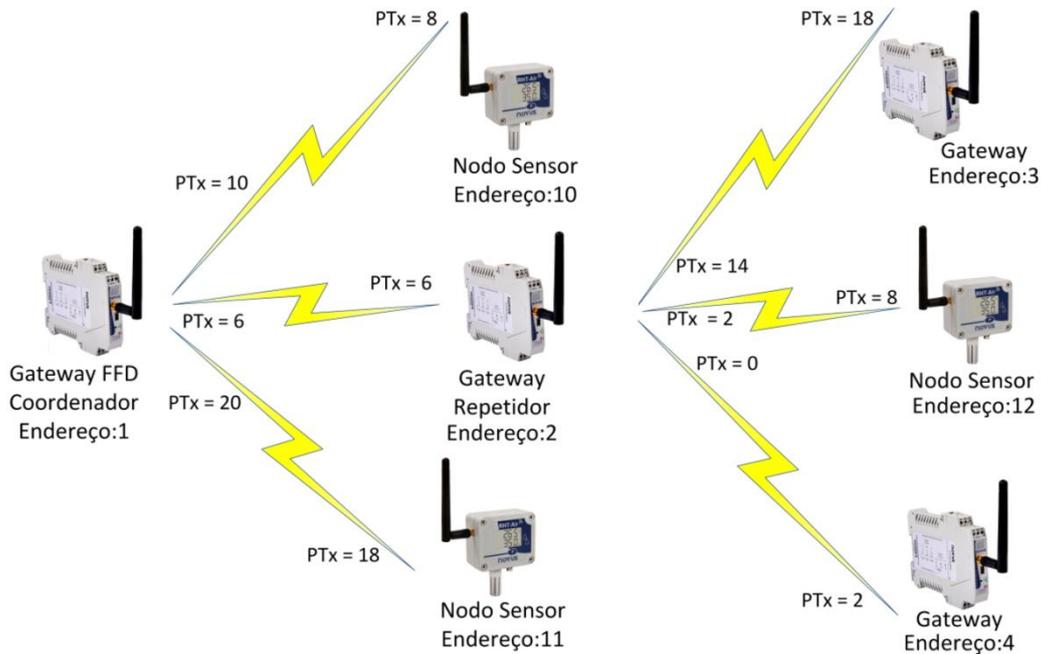
**Figura 19 - Fluxograma de execução do algoritmo de Reorganização de Potência Ótima para os nodos FFD e RFD [Elaborada pelo autor].**

Inicialmente, dentro da etapa onde o FFD inicia rede, o nodo faz a varredura dos canais de operação através do algoritmo de *ScanED* e determina em qual canal de operação irá anunciar a sua PAN ID para que os outros nodos possam encontrá-lo. A partir deste momento, o FFD passa a aguardar as requisições de pareamento dos RFDs. Ao receber uma requisição de um nodo RFD que estava em estado de *idle* – e à procura de um FFD para se parer – o FFD encaminha as respostas com PTx máxima, possibilitando, assim, que os RFDs mais distantes possam encontrá-lo.

O RFD executa o algoritmo de escolha do melhor FFD para se parear de acordo com o melhor nível LQI Tx recebido por ele. Após escolher o melhor FFD, os nodos realizam o pareamento com as devidas trocas de mensagens e confirmações necessárias. Neste momento, o FFD começa a solicitar ao nodo RFD que retorne o LQI Tx recebido em cada pacote enviado pelo FFD. Ao receber esta mensagem contendo o LQI do seu último pacote enviado, o nodo FFD calcula qual deverá ser a potência de transmissão do próximo pacote a ser enviado por ele e qual a PTx que o RFD deverá assumir, enviando para ele este valor para que na próxima iteração o RFD já tenha adotado esta potência.

Este processo se repete por vinte vezes e, durante a sua execução, o RFD fica aguardando pela PTx ótima, que será enviada para ele ao final das iterações. Ao final, quando a PTx ótima estiver calculada pelo FFD, ele irá assumir este valor como sua potência de transmissão ótima e encaminhará a PTx ótima analisada para o RFD, lançando o valor em sua tabela de RFDs para que fique registrada com qual PTx ele deverá se comunicar neste enlace com este RFD. O RFD configura a sua PTx para o valor recebido e, a partir deste instante, assume este parâmetro, ficando os dois nodos configurados com as potências de transmissão mais adequadas, a fim de diminuir o consumo de energia dos mesmos e gerar menos interferência no espectro eletromagnético durante as transmissões dos pacotes de comunicação. Depois de finalizadas as etapas do algoritmo, o FFD passa a aguardar por novas requisições de outros RFDs.

A topologia sugerida na Figura 20 apresenta uma RSSF em forma de árvore puramente sem fio após a execução do algoritmo RPO. Os nodos têm representado em cada enlace de comunicação (raios em cor amarela) a Potência de Transmissão Ótima que este utiliza para enviar seus pacotes para cada nodo pareado. Por exemplo, o nodo Gateway FFD Coordenador (endereço 1) comunica com a PTx ótima 10 com o nodo Sensor endereço 10, PTx ótima 6 com o nodo Gateway Repetidor endereço 2 e PTx ótima 20 com o nodo Sensor endereço 11.



**Figura 20 - Exemplo de RSSF operando com o algoritmo de Reorganização de Potência Ótima [Elaborada pelo autor].**

Os valores registrados na Tabela 6 mostram os enlaces da topologia da RSSF apresentada na Figura 20. A coluna “Endereço nodo avaliado” é a referência a partir de qual nodo está sendo feita a análise em relação ao nodo endereçado na coluna 2. Os LQIs Rx e Tx finais obtidos utilizando a PTx ótima escolhida estão presentes nas colunas 3 e 4, respectivamente. A última coluna expõe a PTx ótima escolhida para o canal avaliado.

**Tabela 6 - Exemplo de LQIs finais analisados e potências de transmissão ótima escolhidas após execução do algoritmo de RPO.**

Endereço nodo avaliado	Endereço nodo pareado	LQI Rx Final	LQI Tx Final	PTx ótima escolhida
1	10	-67	-65	10
1	2	-69	-68	6
1	11	-66	-66	20
2	1	-68	-69	6
2	3	-68	-68	14
2	12	-70	-69	2
2	4	-67	-68	0
3	2	-68	-68	18
4	2	-68	-67	2
10	1	-65	-67	8
11	1	-66	-66	18
12	2	-69	-70	8

## 4.2 Algoritmo de Escolha do Canal de Operação Baseado no ScanED (ECOBS)

Esta seção explica o funcionamento do algoritmo ECOBS, bem como seu objetivo, as métricas utilizadas e seu fluxograma de execução.

#### 4.2.1 Objetivos

O canal de operação é determinante para que a comunicação seja executada com o desempenho desejado. Além disso, a seleção de um canal para operação que esteja com espectro eletromagnético mais limpo é necessária pelos seguintes motivos: (i) reduzir o ruído no espectro eletromagnético para melhor operação da própria RSSF e para os outros equipamentos/protocolos que dividem a mesma banda de frequência, (ii) diminuir a taxa de erros, reduzindo retransmissões de *frames* e colisões, e (iii) prover aos nodos um canal mais limpo para comunicação, reavaliando periodicamente e, assim, escolhendo uma faixa de frequência mais adequada sempre que for necessário.

#### 4.2.2 Métricas

Para implementar este algoritmo foram utilizados os seguintes conceitos e métricas:

#### Canais de Operação

Este algoritmo atua na banda de operação de 2,4 GHz (banda ISM), definida segundo a norma IEEE 802.15.4. Os canais de operação estão subdivididos conforme a Tabela 7, onde é possível verificar que cada canal utiliza 3 MHz desde a sua frequência inferior até a sua frequência superior, passando pela frequência central.

**Tabela 7 - Frequências dos canais de operação IEEE 802.15.4 na faixa de 2,4 GHz.**

Identificador do Canal	Frequência inferior	Frequência central	Frequência superior
11	2404	2405	2406
12	2409	2410	2411
13	2414	2415	2416
14	2419	2420	2421
15	2424	2425	2426
16	2429	2430	2431
17	2434	2435	2436
18	2439	2440	2441
19	2444	2445	2446
20	2449	2450	2451
21	2454	2455	2456
22	2459	2460	2461
23	2464	2465	2466
24	2469	2470	2471
25	2474	2475	2476
26	2479	2480	2481

Entre os canais existem um espaçamento de 2 MHz. Ou seja, as frequências centrais dos canais estão distantes 5 MHz, resultando em 16 canais possíveis para operação.

Para efeito de comparação nos testes executados para a validação do algoritmo, os canais de operação do protocolo IEEE 801.11b estão apresentados na Tabela 8. Estes canais, diferentemente do IEEE 802.15.4, se sobrepõem na mesma faixa de operação de 2,4 GHz. Os canais ocupam 22 MHz e são divididos em 14 frequências centrais. Nem todos os canais são liberados em todos locais do mundo.

**Tabela 8 - Frequências dos canais de operação IEEE 802.11b na faixa de 2,4 GHz [IEE12].**

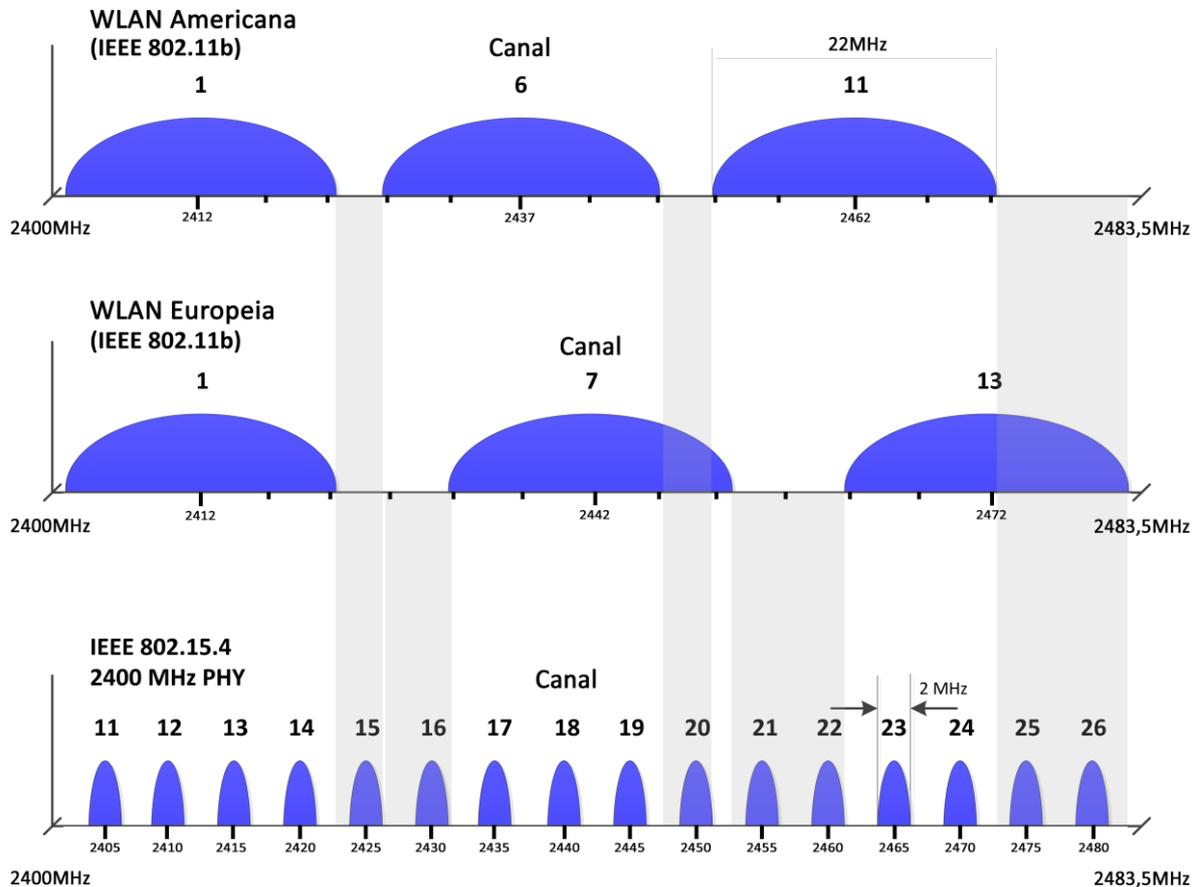
Identificador do Canal	Frequência inferior	Frequência central	Frequência superior	USA & Canada	Maioria do Mundo
1	2401	2412	2423	X	X
2	2404	2417	2428	X	X
3	2411	2422	2433	X	X
4	2416	2427	2438	X	X
5	2421	2432	2443	X	X
6	2426	2437	2448	X	X
7	2431	2442	2453	X	X
8	2436	2447	2458	X	X
9	2441	2452	2463	X	X
10	2446	2457	2468	X	X
11	2451	2462	2473	X	X
12	2456	2467	2478	-	X
13	2461	2472	2483	-	-
14	2473	2484	2495	-	-

Um exemplo de correspondência de sobreposição que pode ser gerado ao seguir a recomendação de utilização dos canais de operação 1, 6 e 11 para Wi-Fi está apresentado na Tabela 9 e desenhado na Figura 21.

**Tabela 9 - Sobreposição dos canais do IEEE 802.15.4 em relação ao IEEE 802.11b na faixa de 2,4 GHz utilizando as recomendações de utilizar os canais 1, 6 e 11.**

Identificador do Canal	Frequência central	Canal IEEE 802.11 sobreposto
11	2405	1
12	2410	1
13	2415	1
14	2420	1
15	2425	No Conflict
16	2430	6
17	2435	6
18	2440	6
19	2445	6
20	2450	No Conflict
21	2455	11
22	2460	11
23	2465	11
24	2470	11
25	2475	No Conflict
26	2480	No Conflict

Os canais de operação do IEEE 802.15.4 que podem ficar livres de interferências provenientes do IEEE 802.11b são o 15, 20, 25 e 26. No capítulo de validação deste algoritmo isso será verificado de acordo com os resultados dos testes.



**Figura 21 - Canais de operação WLAN não sobrepostos aos das LR-WPAN [Elaborada pelo autor].**

Para LR-WPAN (*Low-Rate Wireless Personal Area Network*) e Bluetooth, o uso de qualquer um dos canais que pode ser alocado é aceito em todo o mundo. Para WLAN, no entanto, a utilização do canal depende do órgão regulador. Nos Estados Unidos e Canadá, por exemplo, os canais 12, 13 e 14 não são permitidos para utilização plena. Atualmente os canais 12 e 13 já podem ser utilizados sob condições de baixa potência. Isso permite que dois canais LR-WPAN operem livres de interferência Wi-Fi. Além disso, o padrão IEEE 802.11b recomenda a utilização de canais de operação não sobrepostos: 1, 6 e 11 para a América do Norte, e 13 e para a Europa. Embora esta prática operacional não seja obrigatória, é muitas vezes empregada onde vários pontos de acesso estão em uso. Isso permite a obtenção de canais mais limpos para o funcionamento das LR-WPANs, como mostrado na Figura 21, onde os canais 15, 20, 25 e 26 estariam teoricamente livres de interferências caso os canais Wi-Fi fossem os citados acima.

## **Clear Channel Assessment - CCA**

CCA é uma função do método de transmissão de acesso múltiplo com verificação de portadora que evita colisão, em inglês *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA), para determinar se o meio sem fio está pronto e é capaz de receber dados, de modo que o transmissor possa começar a enviar.

Para ilustrar sua utilidade e importância existe um ataque de rede chamado de CCAA (*Clear Channel Assessment Attack*), ou *Queensland Attack*, que consiste em direcionar ataques de ocupação de todos os canais de operação de uma rede Wi-Fi, colocando o controlador da interface de rede, em inglês *Network Interface Controller* (NIC), em modo de transmissão contínua para que pareça que as ondas eletromagnéticas estejam ocupadas, o que basicamente coloca todo o sistema em espera. Esse ataque é efetivo em redes que utilizam o protocolo IEEE 802.11b, mas em redes sem fio híbridas, como as que operam com as duas normas IEEE 802.11b e IEEE 802.11g, ele irá atacar o primeiro e comprometer o desempenho do segundo.

## **Receiver ED (Energy Detect)**

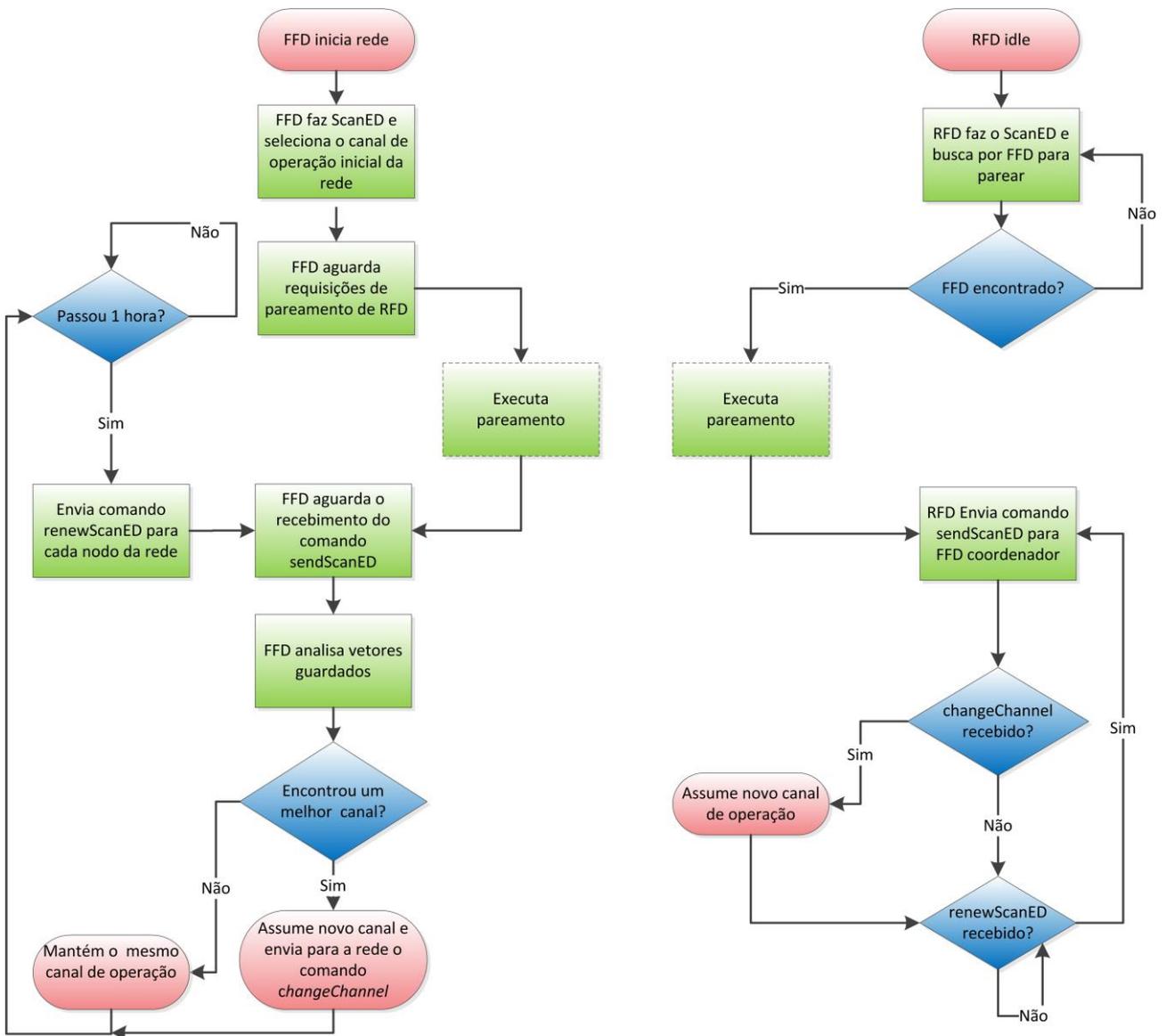
A camada física do protocolo IEEE 802.15.4 permite obter o nível de ruído de cada um dos 16 canais de operação. Baseado no RSSI, o valor do ruído eletromagnético no canal pode variar de -100 dBm, quando um canal estiver livre de interferências, até -15 dBm, que representa a maior intensidade de interferência possível em um canal.

A função que executa a varredura dos canais de operação é chamada de *ScanED* (e utiliza o CCA para isto) e, de acordo com o tempo de *scan*, apresenta o valor de energia detectado em cada canal. Normalmente, a varredura dos canais só é efetuada pelo FFD Coordenador quando a RSSF é iniciada e, por isso, a proposta deste algoritmo é de que, além de efetuar a varredura periodicamente, esta seja executada por todos os nodos da rede. Assim, um nodo que possa estar sofrendo interferência constante em um canal tem a chance de encaminhar a sua avaliação após um *ScanED* e este valor será computado no momento de escolher o canal de operação.

Esta métrica é utilizada para identificar frequências que estão sendo utilizadas por outras RSSFs operando com o mesmo protocolo IEEE 802.15.4 ou por algum equipamento operando com Wi-Fi normatizado pelo IEEE 802.11, e ainda identificar ruídos eletromagnéticos que possam bloquear sinais da RSSF que está em execução.

#### 4.2.3 Fluxograma do Algoritmo ECOBS

A Figura 22 apresenta o fluxograma do algoritmo de ECOBS com as sequências de execução para o FFD coordenador e para os RFDs. Para facilitar o entendimento, as duas execuções ocorrem em paralelo nos dois tipos de nodos.



**Figura 22 - Fluxograma de execução do algoritmo ECOBS para os nodos FFD e RFD [Elaborada pelo autor].**

O fluxograma da Figura 22 apresenta o FFD Coordenador iniciando a rede e executando pela primeira vez um *ScanED* para selecionar o canal mais livre de interferências. Depois de selecionado o canal, o FFD aguarda pela requisição de pareamento de um RFD. Ao mesmo tempo, o RFD executa um *ScanED* e inicia a procura por um FFD para parear. Quando encontra o melhor FFD para parear, eles executam o pareamento no canal escolhido pelo FFD. Então, o FFD Coordenador aguarda o recebimento do comando *sendScanED*, que é enviado pelo nodo RFD. Ao receber este

comando, o FFD Coordenador analisa o vetor recebido contendo todos os níveis de ruído dos 15 canais (no caso dos nodos Gateway e Sensor, o canal 26 foi desabilitado devido à necessidade do hardware que só libera a utilização da potência máxima de transmissão quando este canal está bloqueado) e coloca no vetor *decisãoScanED* o pior valor encontrado de todos RFDs. Ao final, ele seleciona o melhor dos piores valores encontrados. Caso o canal encontrado com o melhor dos piores níveis de ruídos seja diferente do qual ele está operando, o nodo FFD Coordenador envia o comando *changeChannel* para a rede. Enquanto isso, o RFD fica aguardando por um comando *changeChannel* que, caso seja recebido, significa que ele deverá trocar para o canal de operação selecionado pelo FFD Coordenador. Caso este comando não seja recebido, ele verifica então se um comando *renewScanED* foi recebido. Este comando deve ser enviado pelo FFD Coordenador de hora em hora para que todos os nodos executem novamente um *ScanED* e propaguem os seus vetores para análise do FFD Coordenador. Esta temporização foi implementada através de um *timer* específico, que é inicializado logo após decidir se o canal de operação prévio deve ser mantido ou alterado. Novamente a análise em busca do melhor dos piores níveis de ruído deverá ser executada e, se necessária, também a propagação do comando *changeChannel*. Caso não receba nenhum *renewScanED* pelo RFD, este deverá manter-se operando no mesmo canal.

Um exemplo de execução do algoritmo ECOBS pode ser verificado nas topologias apresentadas nas figuras Figura 23 e Figura 24. Na primeira imagem uma topologia em forma de árvore puramente sem fio foi formada e a escolha do canal de operação pelo FFD coordenador foi o canal 12 – isso antes de executar o algoritmo ECOBS.

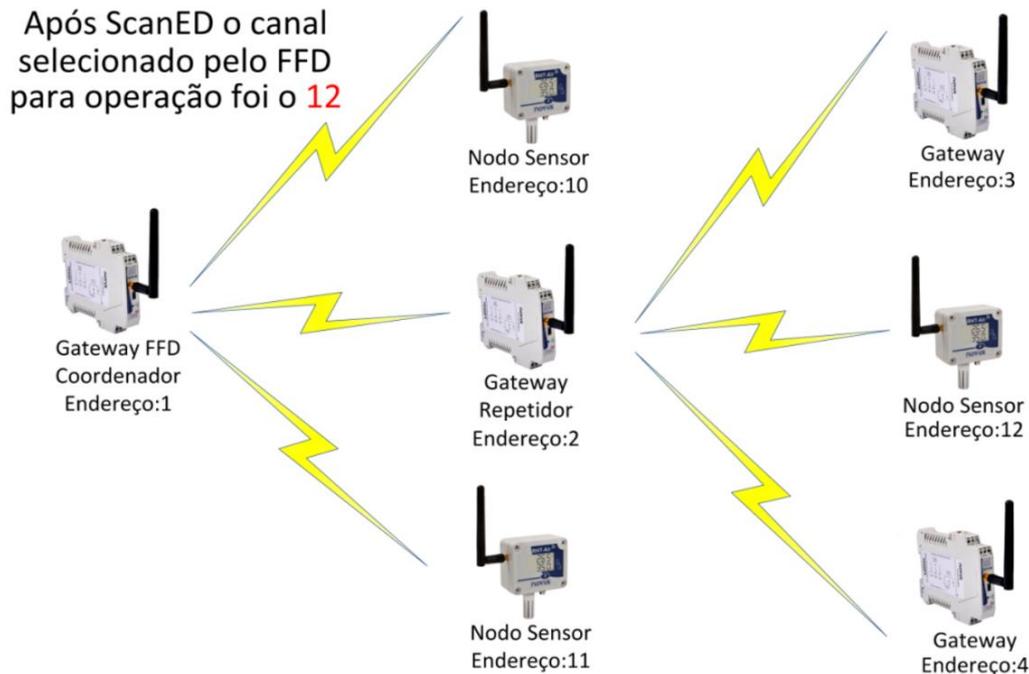


Figura 23 - Exemplo de topologia antes de executar o algoritmo ECOBS [Elaborada pelo autor].

A Figura 24 mostra que, após executar o algoritmo ECOBS, onde os nodos que sofrem influência do ponto de acesso sem fio operando no canal 1 propagaram os resultados dos seus *ScanEDs*, o FFD Coordenador analisa os vetores contendo os valores e decide trocar o canal de operação para o canal 23, pois este estava sofrendo menor interferência eletromagnética dentre todos os canais analisados.

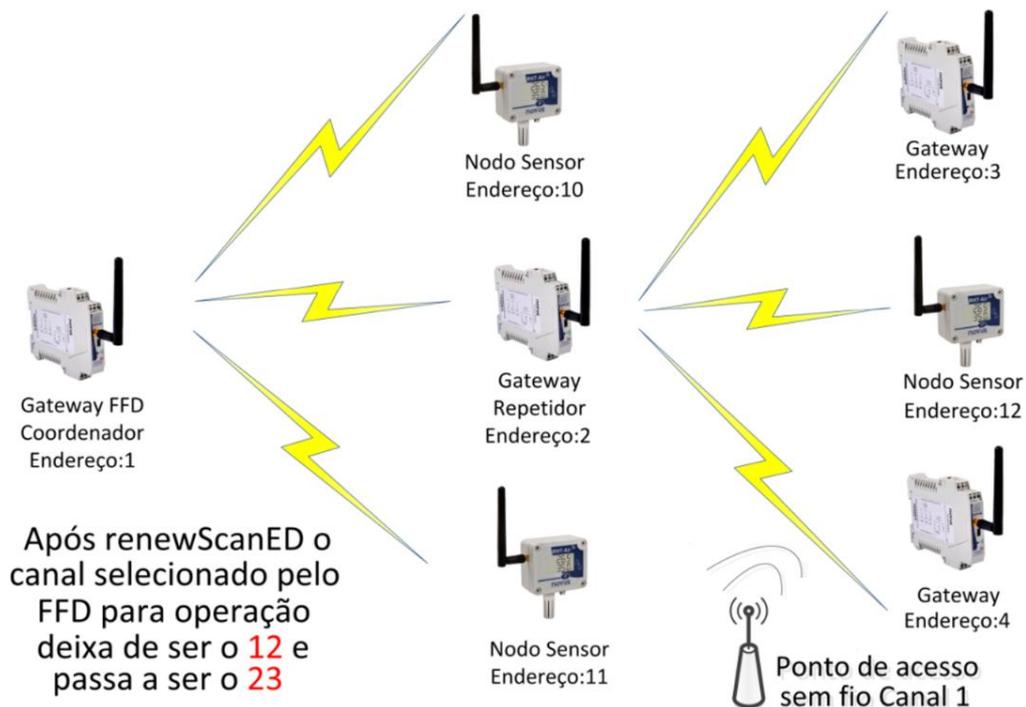


Figura 24 - Exemplo de topologia após executar o algoritmo ECOBS [Elaborada pelo autor].

### 4.3 Algoritmo de Auto-organização

Para alcançar o objetivo de auto-organizar a RSSF, foi proposto e desenvolvido um algoritmo de Auto-organização (AO). Neste subcapítulo os objetivos e métricas serão explanados. O algoritmo AO foi implementado utilizando os algoritmos RPO e ECOBS apresentados nas seções anteriores.

#### 4.3.1 *Objetivos do Algoritmo de Auto-organização*

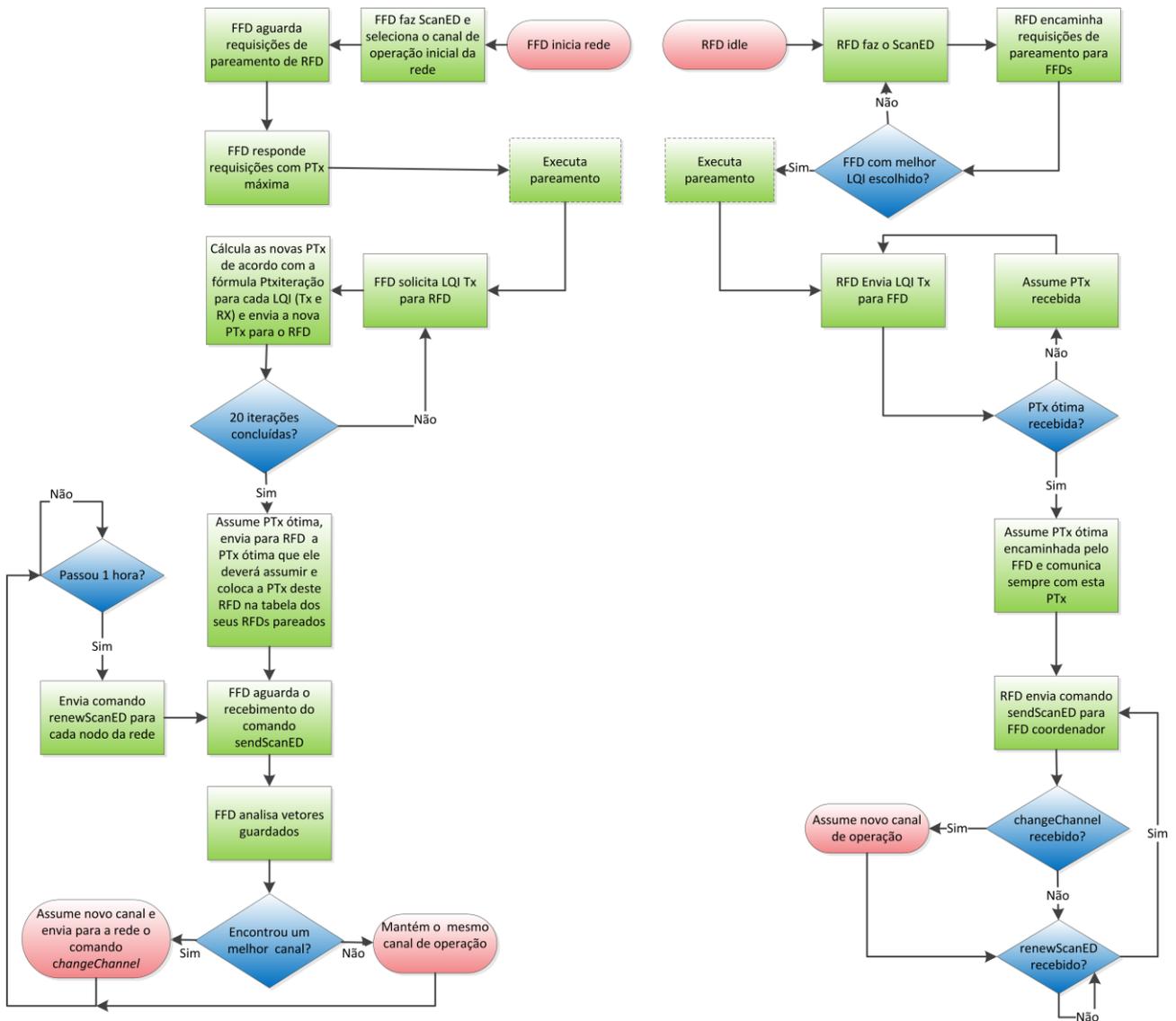
Sendo um sistema de auto-organização aquele onde os nodos coordenam-se para formar uma topologia adaptável para atingir um objetivo de forma eficiente, podemos citar os seus objetivos: (i) redução do consumo de energia; (ii) diminuição da interferência eletromagnética no ambiente; (iii) alcance de uma topologia eficiente para atender aos requisitos da RSSF; (iv) diminuição da taxa de erros de comunicação, reduzindo as colisões e retransmissões de *frames*; e (v) seleção do canal mais limpo para operar periodicamente.

#### 4.3.2 *Métricas Empregadas*

O AO emprega as mesmas métricas dos algoritmos RPO e ECOBS: (i) LQI (ii) RSSI, (iii) PTx, (iv) Canais de operação, (v) CCA e (vi) *Receiver ED*.

#### 4.3.3 *Fluxograma do algoritmo AO*

A Figura 25 ilustra o processo do algoritmo de Auto-organização, compreendendo as etapas dos algoritmos de Reorganização de Potência Ótima e Escolha do Canal de Operação Baseado no *ScanED*.



**Figura 25 - Fluxograma de execução do algoritmo de Auto-organização para os nodos FFD e RFD [Elaborada pelo autor].**

O nodo FFD inicia a rede, executa o algoritmo *ScanED* e seleciona o canal de operação. Passa a aguardar por requisições de pareamento provenientes dos RFDs. Os RFDs partem do estado de *idle*, executam o algoritmo *ScanED* e começam a procurar o melhor FFD para parear.

Quando o RFD encontra o melhor FFD, estes trocam informação para realizarem o pareamento. Então, o FFD solicita o LQI Tx recebido pelo RFD, calcula as novas PTx de acordo com a fórmula  $PTx_{iteração}$  para cada LQI (Tx e Rx), e envia a nova PTx para o RFD. O RFD estará ao mesmo tempo aguardando pelas solicitações de LQI Tx e as enviará para o FFD, além de assumir a PTx recebida durante as 20 iterações desta etapa do algoritmo.

Quando a PTx ótima estiver definida, o nodo FFD assumirá o valor que foi calculado para e enviará a PTx ótima calculada para o RFD, que também assumirá esta como definitiva. No momento que FFD receber o vetor com os níveis de ruído encontrados no *ScanED* executado pelo RFD, este irá encontrar o melhor entre os piores índices de nível de ruído de cada canal e definirá qual será o canal de operação da RSSF. Caso este seja diferente do qual ele já está operando, ele deverá enviar o comando *changeChannel* para toda a rede, que passará a operar no novo canal determinado. Uma reavaliação do canal de operação é executada de hora em hora, quando o FFD envia o comando *renewScanED*, fazendo com que os RFDs encaminhem seus vetores novamente para a revisão de escolha do canal de operação.

## 5 TESTES EXPERIMENTAIS PARA AVALIAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS ALGORITMOS RPO, ECOBS E AO

Os algoritmos desenvolvidos foram avaliados e validados através da execução dos testes apresentados neste capítulo. A eficácia e eficiência dos algoritmos foram avaliadas, confrontando os resultados dos experimentos com e sem a implementação dos mesmos.

### 5.1 Avaliação e Validação do Algoritmo de Reorganização de Potência Ótima (RPO)

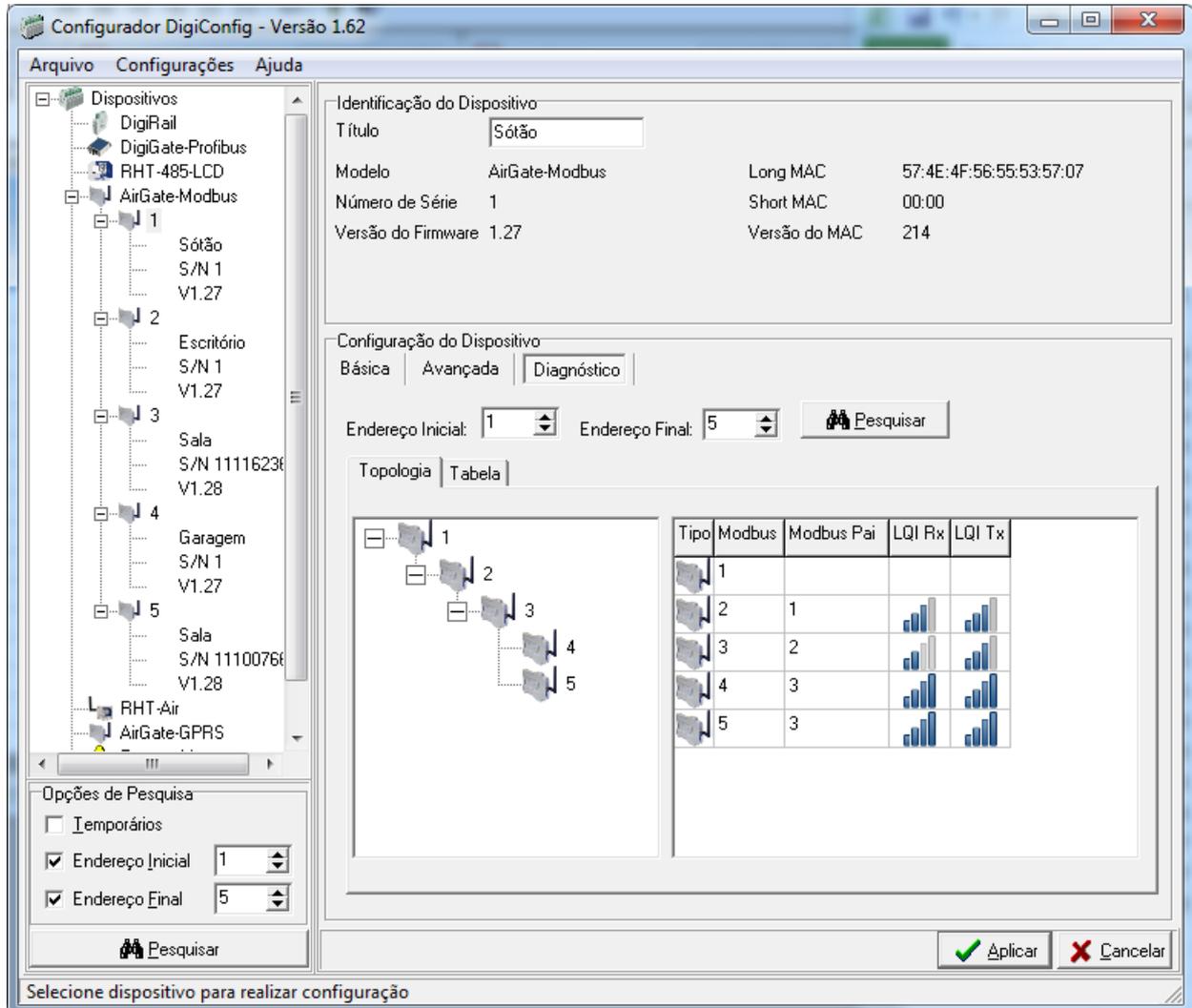
O experimento utilizado para avaliar e validar o algoritmo RPO é composto por cinco nodos configurados com a mesma PAN ID, sendo o endereço 1 como USB-Master e os endereços de 2 a 5 como RS485-Slaves. Os nodos foram posicionados em quatro níveis de uma casa localizada em área remota para que fosse possível encontrar a menor influência de interferência eletromagnética. O nodo FFD coordenador 1 foi instalado no sótão (quarto andar) da casa, o nodo 2 foi acomodado no escritório (terceiro andar), os nodos 3 e 5 foram posicionados na sala e cozinha da casa (segundo andar) e, por fim, o nodo 4 foi colocado na garagem (primeiro andar).

#### 5.1.1 Experimentos sem a Implementação do Algoritmo RPO

Inicialmente, para o teste sem a implementação do algoritmo RPO, todos os nodos foram configurados com a potência de transmissão mais elevada (20 dBm). Analisando a topologia formada a partir dos pareamentos executados chegou-se no resultado apresentado na Figura 26. O software de configuração dos nodos DigiConfig [NOV15] apresenta uma funcionalidade de diagnóstico, onde é possível selecionar um endereço inicial e um final para que seja efetuada uma busca por estes endereços. Caso existam nodos pareados com o nodo que está sendo diagnosticado e eles estejam endereçados dentro da faixa de pesquisa, é apresentado um desenho contendo a topologia formada, bem como uma tabela que contém o endereço do FFD ao qual está conectado e barras de qualidade de sinal do canal tanto de RX quanto de TX.

Esta topologia gerou uma árvore puramente sem fio onde o FFD Coordenador se conecta com o repetidor 2 que, por conseguinte, se parecia com nodo 3. Os nodos 4 e 5 estabeleceram seus canais de comunicação com o nodo 3. Nas colunas da tabela onde são apresentadas as barras de LQI Tx e LQI Rx não são exibidos os valores, mas é possível verificar três níveis de qualidade de sinal. Os canais estabelecidos entre o nodo 4

e 5 com o nodo 3 ficaram com o melhor LQI, enquanto que os enlaces entre os outros nodos obtiveram LQIs piores.



**Figura 26 - Topologia experimental gerada sem a aplicação do algoritmo RPO [Elaborada pelo autor].**

A Figura 27 ilustra um *site survey* [SIE12a] simplificado, iniciado a partir do software DigiConfig. Este apresenta uma tabela com informações relevantes da RSSF, tais como os LQIs Tx e Rx (dBm), latência (ms), taxa de transmissão (bytes/s) e taxa de erro (%).

Analisando os LQIs foi possível gerar a Tabela 10, que apresenta todos os enlaces de comunicação sendo avaliados na perspectiva de cada um dos nodos. Como verificado na aba Topologia do DigiConfig (Figura 26), os LQIs que haviam apresentado melhores valores de qualidade de sinal foram os canais entre os nodos 4 (Tx -55 e Rx -56) e 5 (Tx -34 e Rx -35) com o nodo 3, e o pior enlace encontrado foi entre os nodos 3 (Tx -69 e Tx -74) e 2.

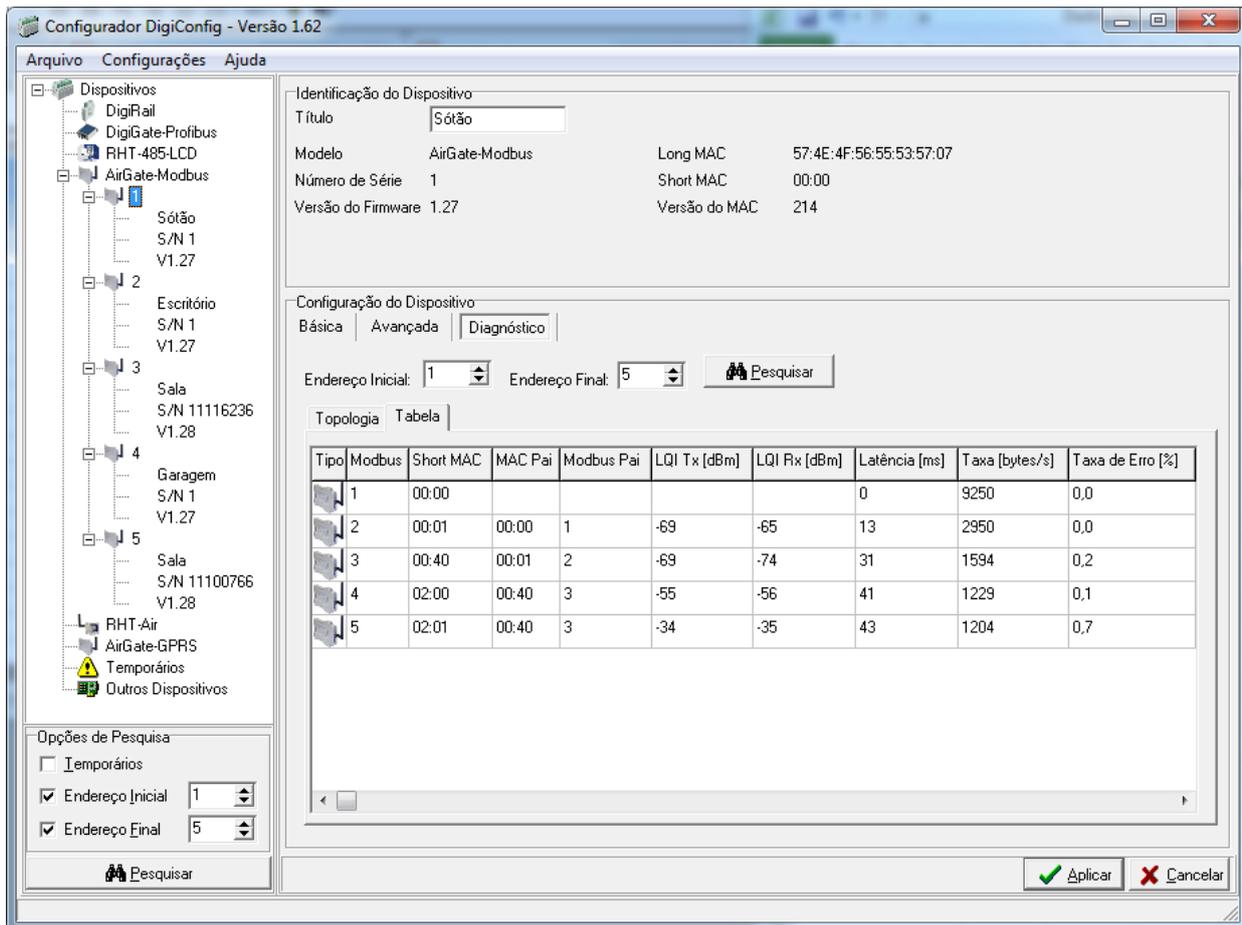


Figura 27 - Tela do DigiConfig contendo a tabela de dados da RSSF sem o algoritmo RPO [Elaborada pelo autor].

Tabela 10 - RSSF com potências dos canais estabelecidos sem executar o algoritmo RPO.

Nodo avaliado (Endereço)	Nodo pareado (Endereço)	LQI Tx (dBm)	LQI Rx (dBm)	PTx ótima (dBm)
1	2	-65	-69	20
2	1	-69	-65	20
2	3	-74	-69	20
3	2	-69	-74	20
3	4	-56	-55	20
3	5	-35	-34	20
4	3	-55	-56	20
5	3	-34	-35	20

### 5.1.2 Experimentos com a Implementação do Algoritmo RPO

Na validação do algoritmo RPO, a mesma topologia apresentada sem executar o algoritmo se manteve após a execução do algoritmo RPO. Isso pode ser verificado confrontando os pareamentos presentes nas colunas “Nodo avaliado (Endereço)” e “Nodo pareado (Endereço)” das tabelas Tabela 10 e Tabela 11.

Após a execução do algoritmo RPO, as potências foram ajustas de acordo com os cálculos de PTx ótima, que passou por 20 iterações de cálculos PTxiteração e ajustes até a obtenção da mesma.

**Tabela 11 - RSSF com potências dos canais estabelecidos com a execução do algoritmo RPO.**

Nodo avaliado (Endereço)	Nodo pareado (Endereço)	LQI Tx (dBm)	LQI Rx (dBm)	PTx ótima (dBm)
1	2	-69	-69	14
2	1	-69	-69	20
2	3	-74	-69	20
3	2	-69	-74	20
3	4	-70	-71	10
3	5	-54	-56	0
4	3	-71	-70	8
5	3	-56	-54	0

Ao começar a operação com as potências de transmissão ótimas configuradas, os valores encontrados para LQIs Tx e LQI Rx são modificados, tendendo, conforme a proposta do algoritmo, a ficar próximo de -70 dBm. Isso pode ser verificado nas colunas correspondentes da Tabela 11. Somente o enlace estabelecido entre os nodos 3 e 5 não tiveram os LQIs aproximados à qualidade de nível de sinal -70 dBm, pois, mesmo configurando a potência de transmissão para 0 dBm, o canal continuou com LQIs melhores. A coluna “PTx ótima (dBm)” da Tabela 11 mostra que algumas potências de transmissão não puderam ser alteradas após o cálculo de PTx ótima, como ocorreu nos enlaces entre os nodos 2 e 3, onde foram mantidas as potências de transmissão que já haviam sido configuradas antes da execução do algoritmo (20 dBm). Isso ocorreu devido ao resultado do cálculo encontrar o mesmo valor de PTx anterior.

Para efeito de comparação, a Tabela 12 apresenta os resultados da execução básica, quando o algoritmo RPO ainda não havia sido executado, e da execução do algoritmo RPO. A média de qualidade de nível de sinal Tx e Rx estabelecido entre os links de comunicação foi calculada para que um ganho percentual pudesse ser auferido. Este ganho percentual representa a melhora da média de LQI após a execução do algoritmo RPO. No caso validado, a melhora foi na ordem de 16,41%, já que a média de LQI passou de -57,13 dBm na execução básica para -66,5 dBm após a execução do algoritmo. A média de potência ótima também teve o ganho percentual de diminuição de potência de transmissão ótima analisada. No teste apresentado a potência ótima média passou de 20 dBm na execução básica para 11,5 dBm, gerando um ganho percentual de 42,50% na diminuição da potência de transmissão ótima.

**Tabela 12 - Ganho percentual da média de LQI e diminuição da potência ótima após a execução do algoritmo RPO.**

Pareamento		Execução básica			Execução algoritmo RPO		
Nodo avaliado (Endereço)	Nodo pareado (Endereço)	LQI Tx (dBm)	LQI Rx (dBm)	PTx ótima (dBm)	LQI Tx (dBm)	LQI Rx (dBm)	PTx ótima (dBm)
1	2	-65	-69	20	-69	-69	14
2	1	-69	-65	20	-69	-69	20
2	3	-74	-69	20	-74	-69	20
3	2	-69	-74	20	-69	-74	20
3	4	-56	-55	20	-70	-71	10
3	5	-35	-34	20	-54	-56	0
4	3	-55	-56	20	-71	-70	8
5	3	-34	-35	20	-56	-54	0
<b>Média</b>		-57,13	-57,13	20	-66,5	-66,5	11,5
<b>Ganho Percentual</b>					16,41%	16,41%	42,50%

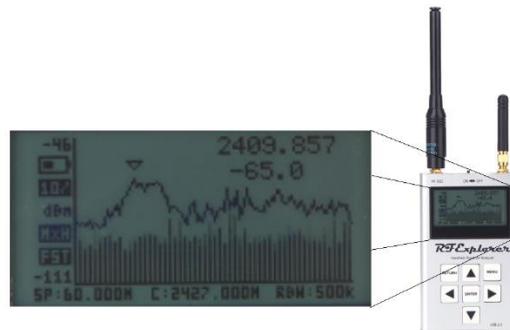
## 5.2 Validação do Algoritmo de Escolha do Canal de Operação Baseado no *ScanED* (ECOBS) e do Algoritmo de Auto-organização (AO)

Os dois algoritmos ECOBS e AO foram avaliados e validados no mesmo *setup* de testes e ocorreram paralelamente. Foram utilizados cinco nodos configurados de duas formas: (i) endereço 1 como USB-Master e (ii) endereços 2 a 5 como RS485-slaves. Estes nodos foram distribuídos em uma casa isolada para que as interferências eletromagnéticas provenientes da vizinhança tivessem o mínimo impacto, e foi utilizado um analisador de espectro manual, no intuito de verificar a alternância de canais dos nodos e a ocupação presente na faixa de frequência de 2,4 GHz.

Os nodos foram distribuídos de diversas formas, citadas a seguir: (i) o nodo endereço 1 FFD Coordenador foi instalado no sótão da casa que se localiza no quarto andar; (ii) o nodo 2 foi posicionado no escritório situado no terceiro andar; (iii) os nodos 3 e 5 foram colocados no segundo andar, na sala e na cozinha respectivamente; (iv) e o nodo 4 foi acomodado na garagem situada no primeiro andar.

### 5.2.1 Instrumentação Utilizada para Realização dos Testes Experimentais

Para avaliação do espectro eletromagnético do ambiente de testes foi utilizado um analisador de espectro manual da linha RF-Explorer, modelo ISM Combo (Figura 28), que conta com as seguintes características: (i) calcula o pico máximo; (ii) mantém o valor máximo encontrado; (iii) calcula médias; (iv) contempla bateria para mais de 16 horas de operação contínua; (v) dispõe de software livre de código aberto; (vi) atende as bandas de frequência de 240 – 960 MHz e 2350 – 2550 MHz; e (vii) inclui gerador de sinal RF integrado.



**Figura 28 - Analisador de espectro eletromagnético manual RF- Explorer ISM Combo [Elaborada pelo autor].**

Além de apresentar no próprio display o gráfico e os valores da faixa de frequência analisada, um software que adquire os dados do analisador em tempo real foi utilizado para facilitar na aquisição de imagens e interpretação dos dados coletados. O software RF Explorer for Windows, Version 1.11.1311.4, Copyright © Ariel Rocholl é um *client* para PC Windows, que, ao verificar um analisador de espectro RF-Explorer conectado a uma COM do PC através de um porta USB, passa a habilitar o PC a configurar o equipamento e apresenta algumas formas de visualização, como *Spectrum Analyzer* e *Waterfall*. Os eixos dos gráficos gerados são Amplitude (dBm) x Frequência (MHz).

### 5.2.2 Ambiente Experimental Antes de Ligar os Nodos

Ao iniciar os testes, o analisador de espectro foi acomodado em uma área central no segundo andar da residência, para que fosse executada uma varredura. Isto permitiu comprovar que a casa sofria pouca interferência eletromagnética. Como pode ser verificado na Figura 29, somente três faixas estavam ocupadas pelos pontos de acesso Wi-Fi que foram configurados nos canais 1, 6 e 11 da norma IEEE 802.11. Para verificar que estes canais não apresentavam ocupação significativa, foram gerados tráfegos com três notebooks, cada um conectado a cada ponto de acesso Wi-Fi. A seguir foram executadas transferências de dados na ordem de Gigabytes para que demorassem o tempo necessário dos testes e, assim, ocupassem os canais com tráfego.

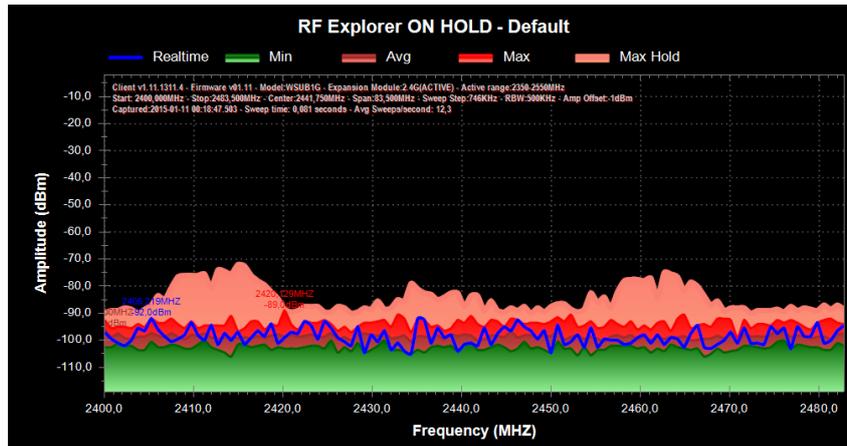


Figura 29 - Espectro eletromagnético inicial no centro do ambiente experimental [Elaborada pelo autor].

Com o intuito de verificar o quanto estava comprometido o espectro eletromagnético da banda de 2,4 GHz da residência antes dos nodos serem ligados e entrarem em operação, a Figura 30 ilustra a análise de espectro eletromagnético realizada.

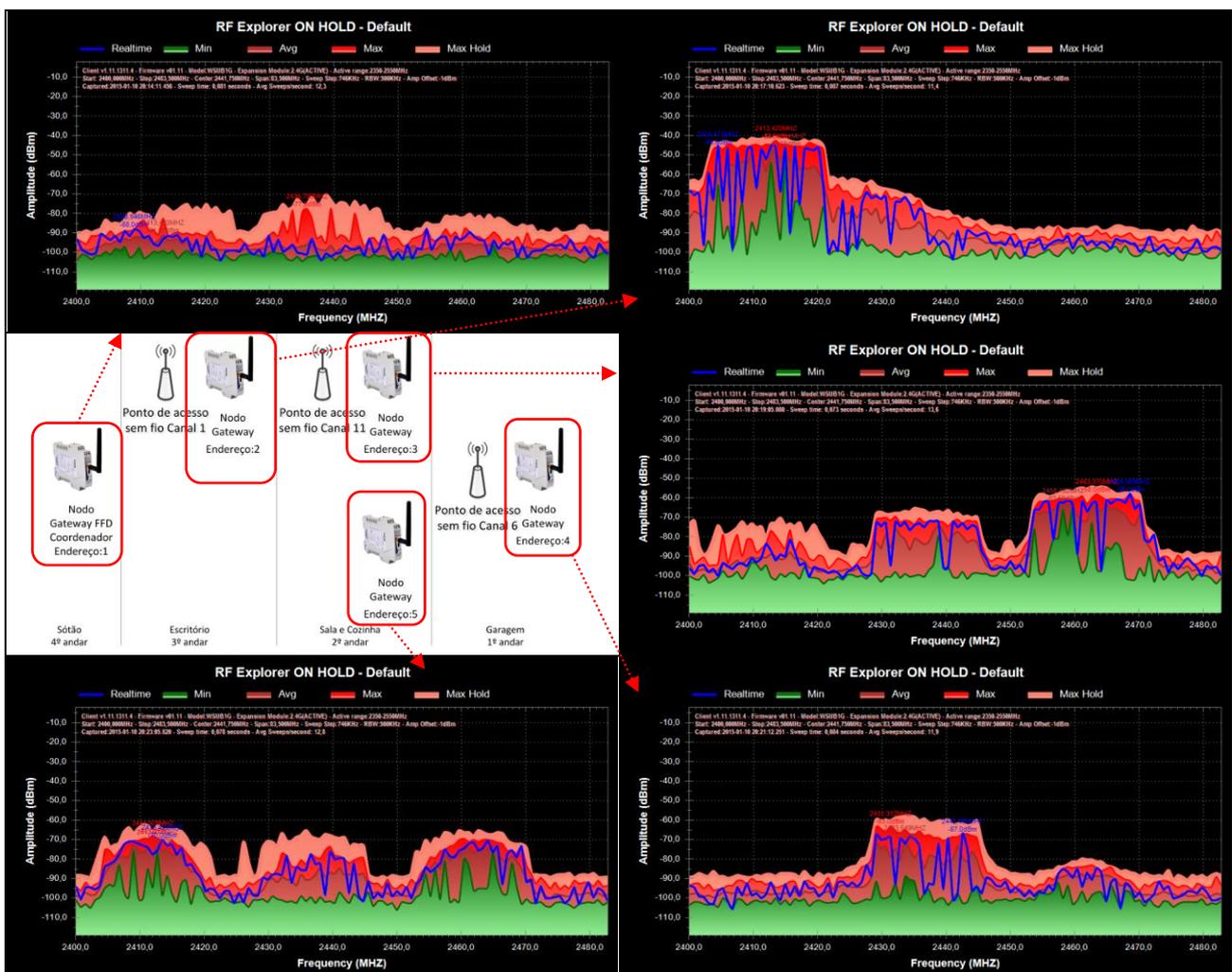


Figura 30 - Análise de espectro eletromagnético onde os nodos foram posicionados (desligados). A linha central mostra a relação dos endereços e tipos de nodos com os seus respectivos espectros eletromagnéticos [Elaborada pelo autor].

O espectro eletromagnético próximo ao Gateway FFD Coordenador com endereço 1 apresentou pouca incidência de ocupação, mas os três pontos de acesso Wi-Fi puderam ser encontrados, com nenhum sinal passando de -70 dBm. Quando analisado o espectro próximo ao Gateway endereço 2, o canal 1 ocupado pelo ponto de acesso sem fio apresentou uma grande ocupação, chegando a quase -40 dBm de amplitude de sinal. Os Gateways com endereços 3 e 5, mais próximos ao ponto de acesso sem fio que utilizava o canal 11, apresentaram amplitudes de sinal geradas por todos pontos de acesso, mas no caso do Gateway 3, o tráfego do canal 11 mostrou-se mais intenso gerando sinal próximo a -55 dBm. Por último, o Gateway 4, que estava acomodado na garagem, apresentou somente amplitude elevada no canal 6 do Wi-Fi, não ultrapassando -60 dBm. Estes níveis de amplitude de sinal só apareceram após a transferência de grande massa de dados, passando através de cada ponto de acesso sem fio. É possível averiguar espúrios decorrentes do tráfego acentuado, no entanto o formato de 22 MHz de cada canal Wi-Fi utilizado ficou bem desenhado nas imagens adquiridas através do analisador de espectro.

### 5.2.3 Experimentos sem a Execução do Algoritmo de Auto-organização

A Tabela 13 apresenta a varredura de ScanED sem a execução do algoritmo de Auto-organização. Neste momento, o ponto de acesso do escritório que estava operando no canal 1 do Wi-Fi foi desligado para liberar a ocupação desta faixa de frequência, assim os canais 11, 12, 13 e 14 do IEEE 802.15.4 estavam liberados para serem escolhidos.

**Tabela 13 - Varredura de ScanED dos nodos sem a execução do algoritmo AO (valores em dBm).**

Canal	ScanED Endereço 1	ScanED Endereço 2	ScanED Endereço 3	ScanED Endereço 4	ScanED Endereço 5	Maior	Média
Canal 11	-100	-46	-67	-92	-71	-46	-75,2
Canal 12	-100	-42	-73	-89	-73	-42	-75,4
Canal 13	-100	-43	-74	-92	-68	-43	-75,4
Canal 14	-99	-49	-82	-91	-73	-49	-78,8
Canal 15	-80	-73	-96	-88	-88	-73	-85,0
Canal 16	-85	-76	-73	-57	-70	-57	-72,2
Canal 17	-79	-82	-70	-52	-69	-52	-70,4
Canal 18	-87	-88	-71	-53	-70	-53	-73,8
Canal 19	-100	-95	-76	-58	-75	-58	-80,8
Canal 20	-96	-100	-85	-89	-95	-85	-93,0
Canal 21	-90	-97	-54	-94	-75	-54	-82,0
Canal 22	-82	-97	-53	-93	-74	-53	-79,8
Canal 23	-79	-96	-55	-88	-77	-55	-79,0
Canal 24	-79	-95	-60	-88	-81	-60	-80,6
Canal 25	-100	-95	-89	-100	-100	-89	-96,8

Caso o algoritmo AO fosse executado, o canal selecionado seria o 25, pois ele é o que apresenta o melhor (-89 dBm) dos piores níveis de ruído encontrados na coluna “Maior” da Tabela 13. Se estivesse implementado a utilização da menor média, o valor encontrado seria -96,8 dBm e o mesmo canal seria o escolhido ao executar o algoritmo de Auto-organização.

Com o ponto de acesso sem fio do canal 1 desligado, o canal escolhido para a RSSF operar foi o canal 11. Como pode ser verificado na Figura 31, os canais 11, 12, 13, 19 e 25 foram avaliados do ponto de vista do Gateway FFD Coordenador 1 sem interferências eletromagnéticas, ou seja, com nível de ruído em -100 dBm. Portanto, o primeiro canal mais limpo foi selecionado para operação desta RSSF. Este é o procedimento executado antes do pareamento com os nodos e, conseqüentemente, o único *ScanED* utilizado para a tomada de decisão é o executado pelo próprio nodo FFD Coordenador.

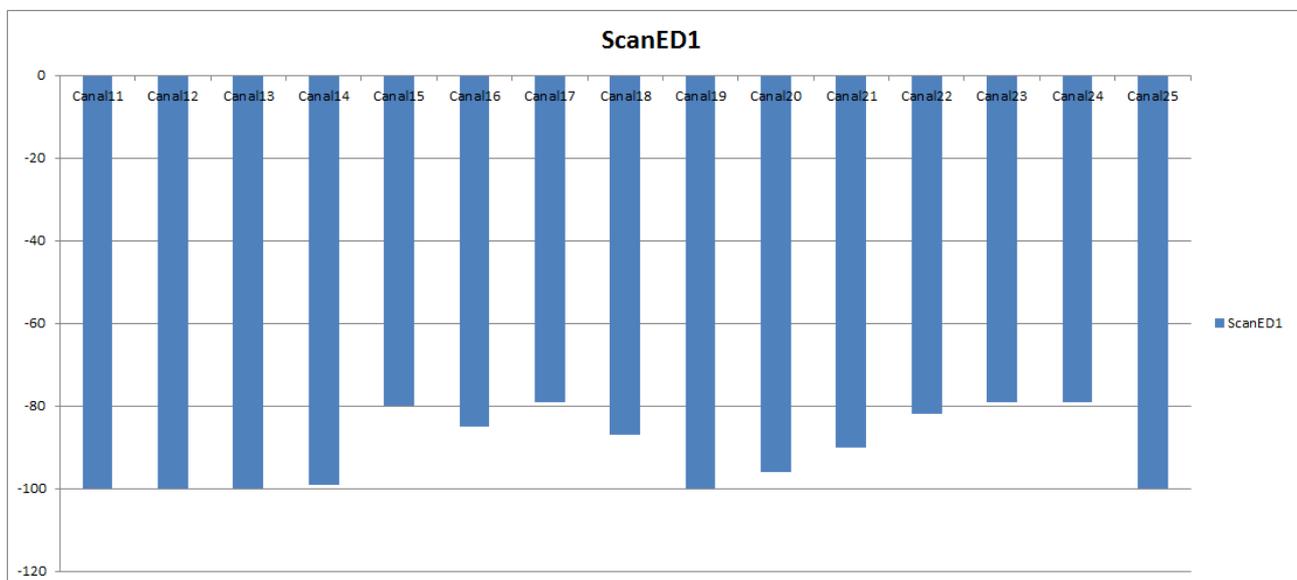


Figura 31 - Resultado da varredura *ScanED* do endereço 1 antes da execução do algoritmo AO [Elaborada pelo autor].

A Figura 31 mostra que o FFD Coordenador consegue identificar os canais 6 e 11 do IEEE 802.11, onde estavam operando os outros pontos de acesso sem fio. Isto valida a utilização da saída da função de *ScanED* como uma métrica para seleção do canal que deverá ser utilizado para operação.

A Figura 32 e a Figura 33 apresentam a topologia formada e os dados adquiridos para a execução do *site survey*. É possível verificar através dos valores dos LQIs que os nodos não executaram o algoritmo de RPO. Adicionalmente, a topologia criada foi a

seguinte: (i) o nodo FFD Coordenador 1 estabeleceu um canal de comunicação com os nodos 2 e 5, e (ii) os nodos 3 e 4 parearam com o repetidor 5.

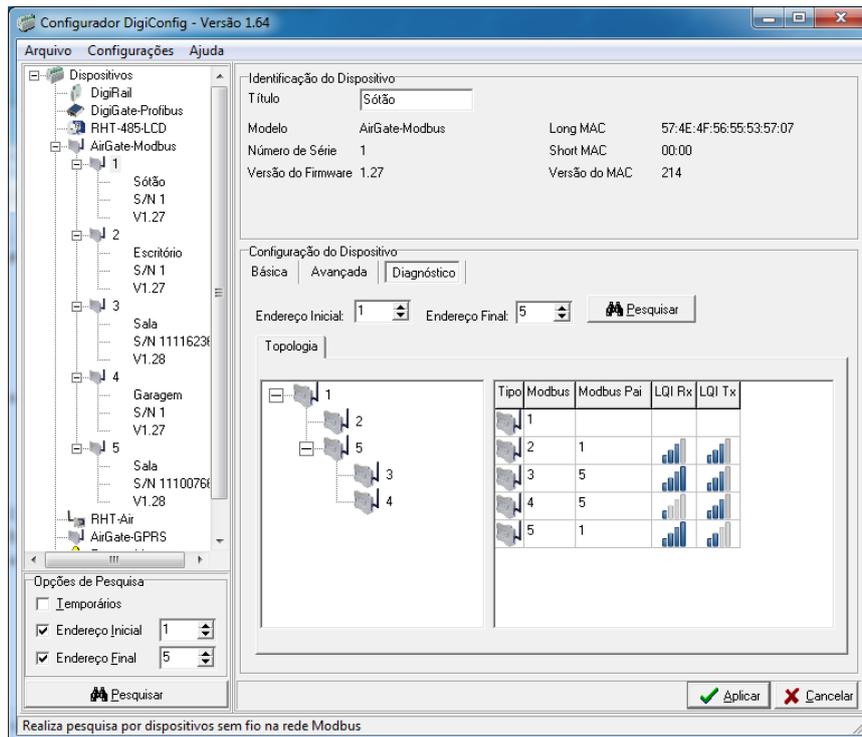


Figura 32 - Topologia formada antes de executar o algoritmo de Auto-Organização [Elaborada pelo autor].

O algoritmo AO pode forçar a reordenação da RSSF, alterando sua topologia. Por este motivo, a Figura 32 mostra a topologia antes de executar o algoritmo.

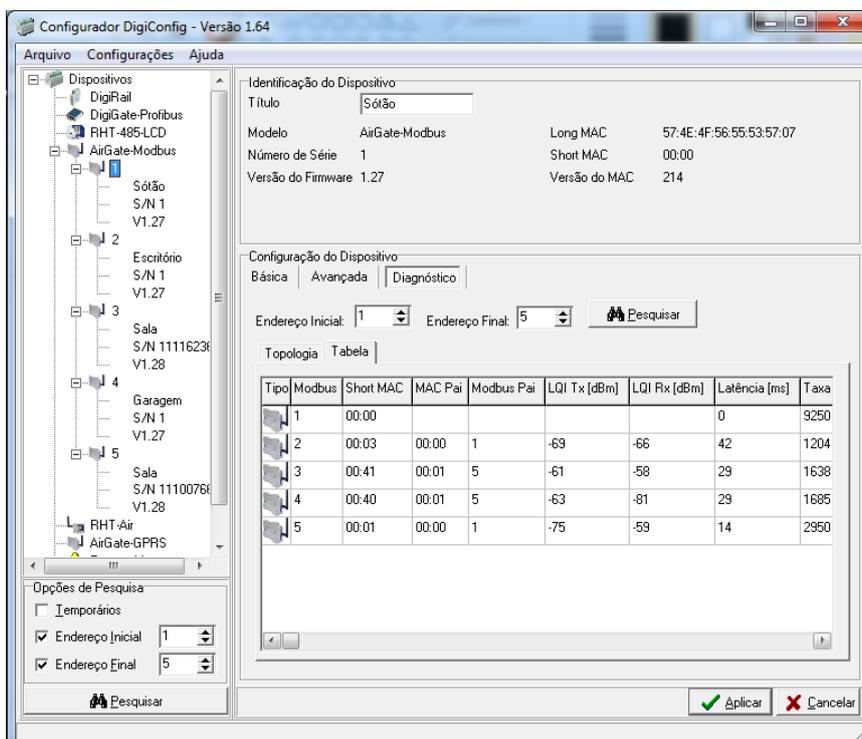


Figura 33 - Imagem do DigiConfig com os dados da RSSF antes de executar o algoritmo AO [Elaborada pelo autor].

A segunda linha da primeira coluna da Figura 34 apresenta a topologia formada com os enlaces estabelecidos. As análises do espectro eletromagnético que cercam cada nodo estão indicadas através das flechas. Assim, é possível averiguar que o nodo FFD Coordenador está operando no canal 11 da norma IEEE 802.15.4 com uma amplitude de sinal bem elevada, chegando a -15 dBm. O espectro eletromagnético próximo ao Gateway 2 indica que este tem dificuldades de comunicação após o ponto de acesso sem fio do canal 1 ter sido reiniciado e colocado para tráfego intenso de dados. Um pequeno pico acima de -40 dBm pôde ser verificado no canal de operação 11 do IEEE 802.15.4. Nos outros locais onde estão instalados os nodos 3, 4 e 5 é possível verificar que estes estão comunicando com amplitude de sinal entre -40 e -30 dBm.



Figura 34 - Espectro eletromagnético sem executar o algoritmo de Auto-organização [Elaborada pelo autor].

#### 5.2.4 Experimentos com a Execução do Algoritmo de Auto-organização

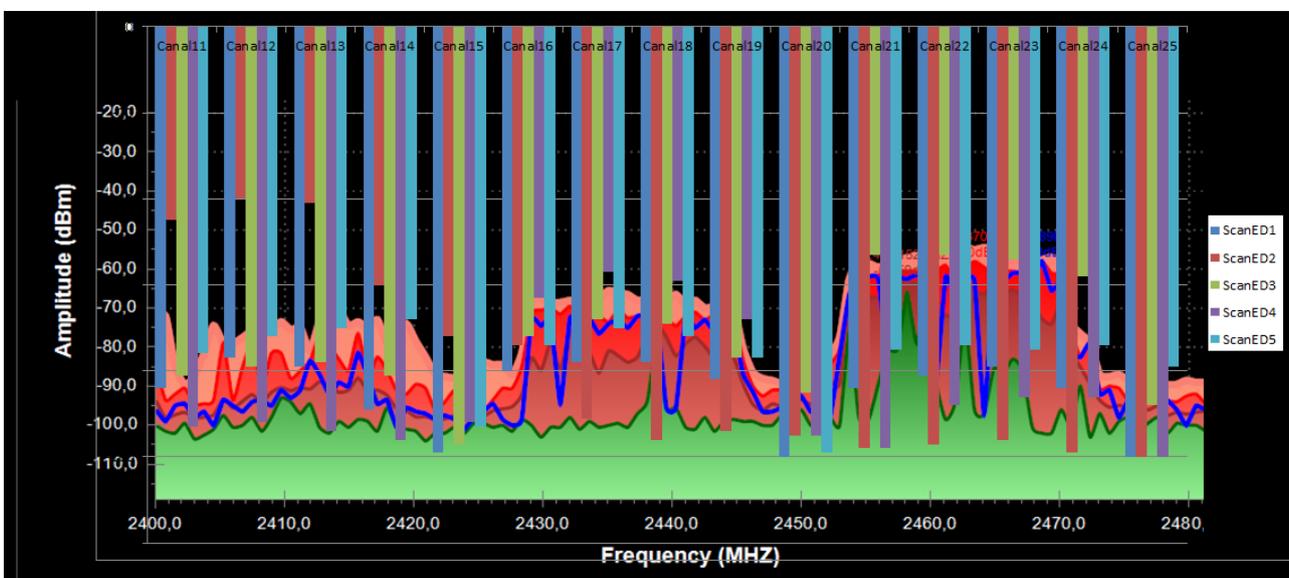
O ambiente de testes avaliado com a execução do algoritmo está apresentado na Tabela 14, onde o ScanED mostra que os canais de operação do IEEE 802.15.4,

sobrepostos aos do IEEE 802.11, estão com ocupação elevada (1, 6 e 11). Assim, ao executar o algoritmo de Auto-organização, o canal de operação que anteriormente havia sido forçado a ser selecionado para validar a execução do algoritmo (canal 11) foi alterado para o canal 20. Na coluna “Maior” da Tabela 14 o canal com menor interferência encontrada foi no canal 20 (-85 dBm), o que ocorreria também caso a seleção fosse através de média de nível de ruído do canal.

**Tabela 14 - Varredura *ScanED* dos nodos com a execução do algoritmo AO (valores em dBm).**

Canal	ScanED Endereço 1	ScanED Endereço 2	ScanED Endereço 3	ScanED Endereço 4	ScanED Endereço 5	Maior	Média
Canal 11	-84	-45	-81	-93	-76	-45	-75,8
Canal 12	-77	-40	-79	-92	-72	-40	-72,0
Canal 13	-79	-41	-78	-94	-70	-41	-72,4
Canal 14	-89	-60	-81	-96	-68	-60	-78,8
Canal 15	-99	-72	-97	-92	-93	-72	-90,6
Canal 16	-80	-74	-72	-63	-74	-63	-72,6
Canal 17	-78	-91	-68	-57	-70	-57	-72,8
Canal 18	-78	-96	-69	-59	-72	-59	-74,8
Canal 19	-82	-94	-77	-68	-77	-68	-79,6
Canal 20	-100	-95	-85	-95	-99	-85	-94,8
Canal 21	-84	-98	-53	-98	-75	-53	-81,6
Canal 22	-81	-97	-53	-88	-74	-53	-78,6
Canal 23	-79	-96	-54	-86	-75	-54	-78,0
Canal 24	-84	-99	-58	-86	-74	-58	-80,2
Canal 25	-100	-100	-88	-100	-79	-79	-93,4

A Figura 35 apresenta o resultado da execução do algoritmo, juntamente com os resultados dos *ScanEDs* e a avaliação do espectro magnético do ambiente de testes.



**Figura 35 - Varredura *ScanED* de todos os nodos durante a execução do algoritmo AO [Elaborada pelo autor].**

Essa forma de apresentar os dados permite verificar o motivo de escolher o canal de operação 20 após a execução do algoritmo, pois é possível constatar que o vale entre os canais de operação 6 e 11 do IEEE 802.11 se encontra menos obstruído durante as varreduras realizadas. Assim, a amplitude de sinal no canal 20 do IEEE 802.15.4 demonstrou ser a de menor intensidade (próximo de -100 dBm quando analisada por todos os nodos) e, por isso, esta foi a frequência escolhida para operar a RSSF.

A Figura 36 ilustra a mudança topológica da RSSF após a execução do algoritmo de Auto-organização. O nodo FFD Coordenador 1 estabeleceu o canal de comunicação entre os nodos 2 e 3. Os nodos Repetidores 2 e 3 parearam com os nodos 5 e 4, respectivamente. Adicionalmente, devido à execução da parte RPO presente no algoritmo de AO, é possível verificar uma padronização nas colunas de LQIs, ou seja, o ajuste de potência ótima foi executado com sucesso buscando aproximar os LQIs (Tx e Rx) ao valor de -70 dBm.

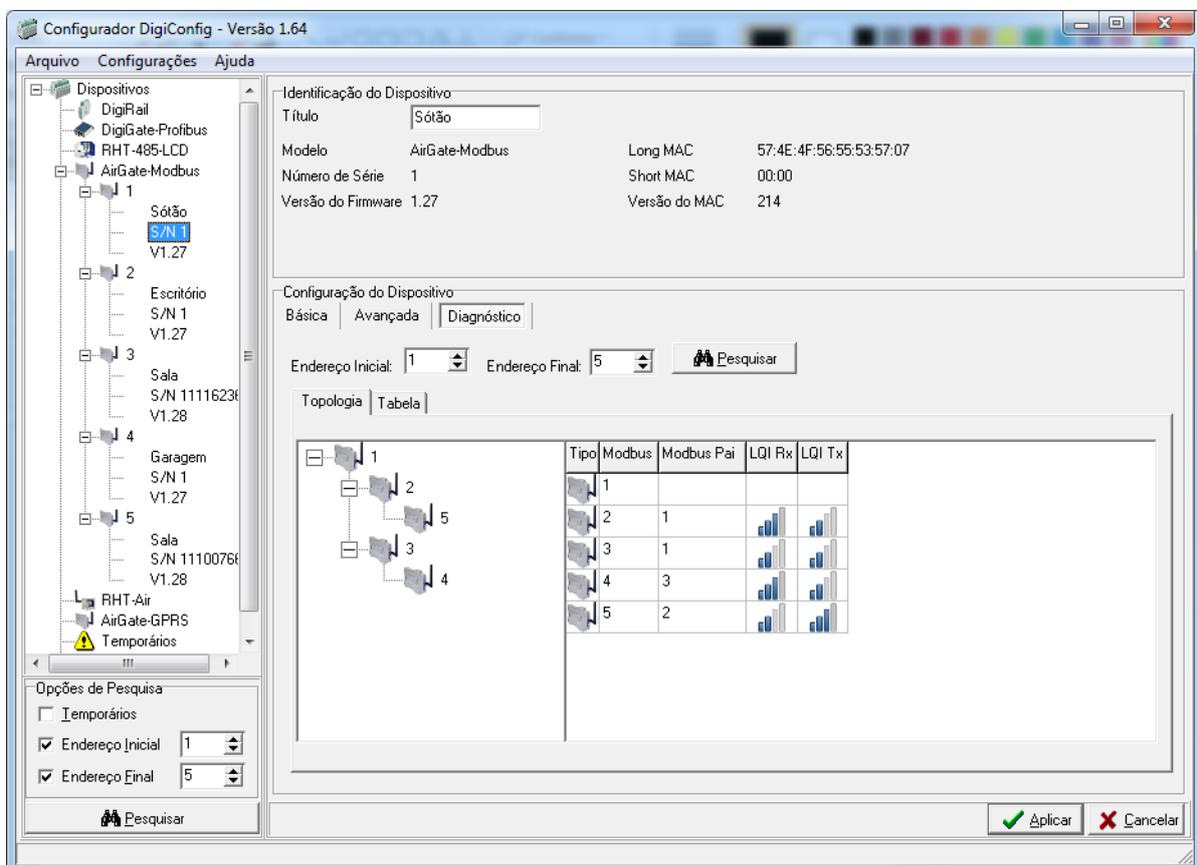


Figura 36 - Imagem do DigiConfig com a topologia formada após a execução do algoritmo AO [Elaborada pelo autor].

Na Figura 37, os dados de *site survey* apresentados pelo DigiConfig comprovam a execução e eficácia da parte RPO do algoritmo AO, uma vez que os valores de LQI ficaram próximos ao desejado (-70 dBm).

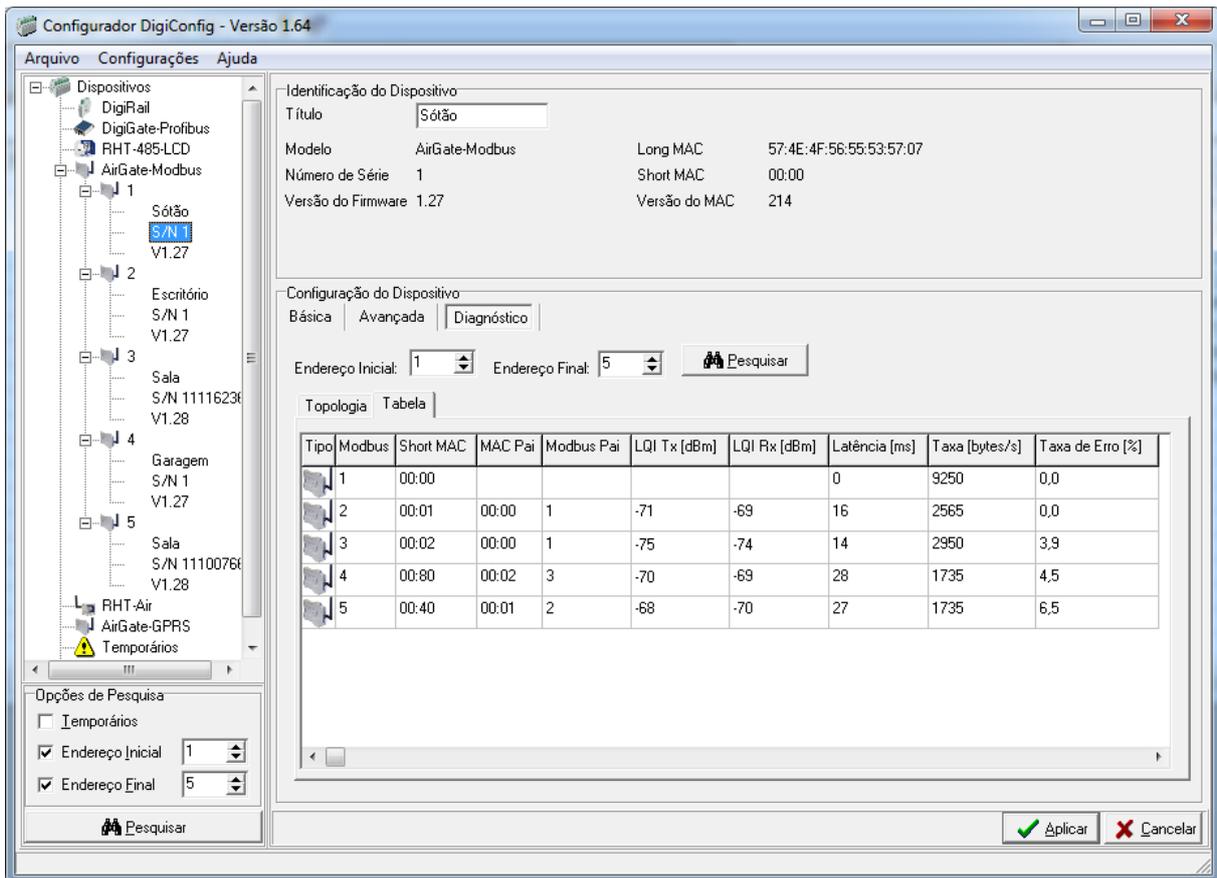


Figura 37 - Imagem do DigiConfig com os dados da RSSF após executar o algoritmo AO [Elaborada pelo autor].

A Tabela 15 consolida a parte de Reorganização de Potência Ótima do algoritmo de Auto-organização. Nela, é possível verificar todos os enlaces estabelecidos sendo analisados dos pontos de vista de todos os nodos da RSSF. Como resultado, os nodos obtiveram suas potências de transmissão ótimas ajustadas e, assim, os LQIs ficaram próximos ao valor desejado (em torno de -70 dBm).

Tabela 15 - RSSF com potências dos canais estabelecidos após executar o algoritmo AO.

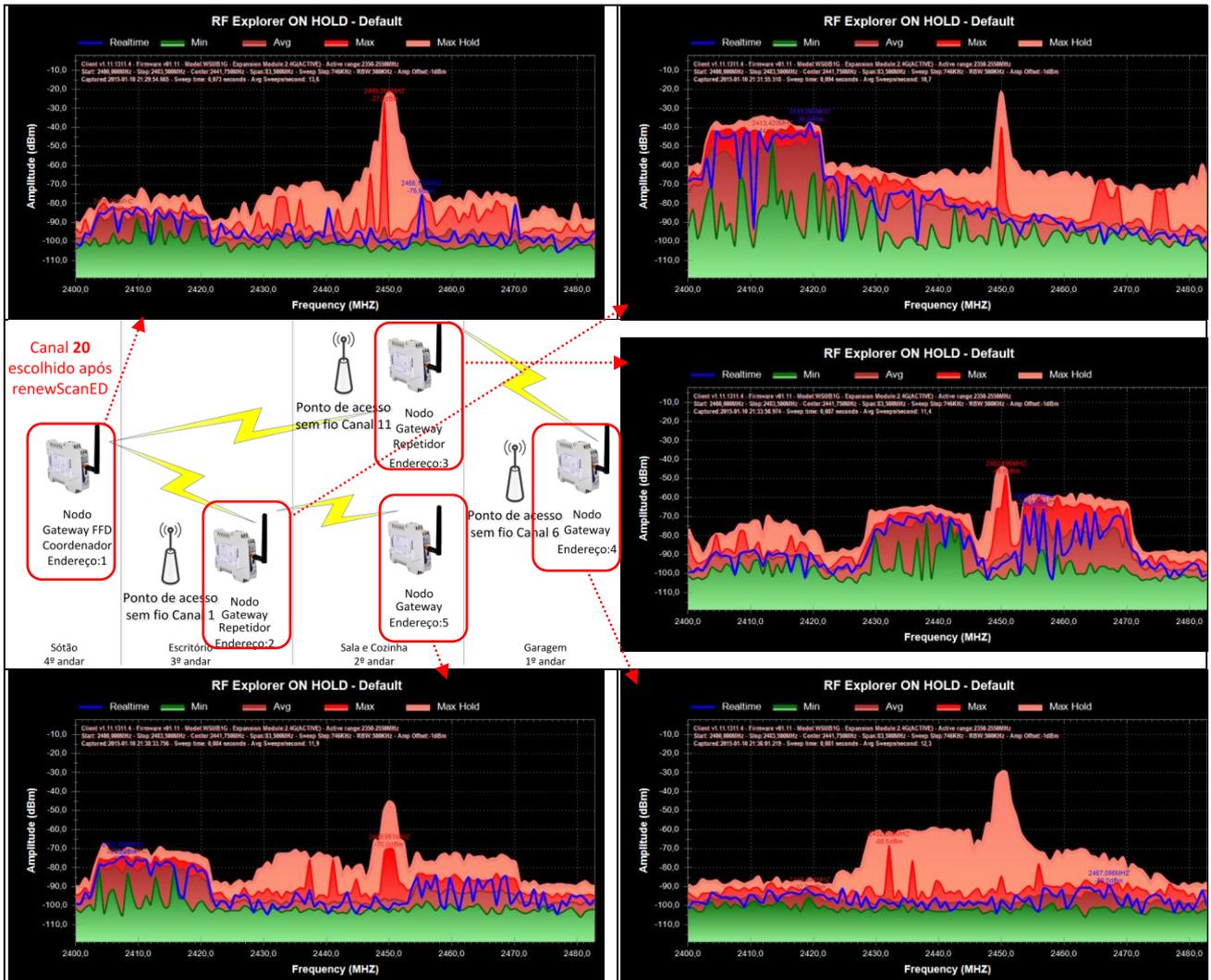
Nodo avaliado (Endereço)	Nodo pareado (Endereço)	LQI Tx (dBm)	LQI Rx (dBm)	PTx ótima (dBm)
1	2	-69	-71	14
1	3	-74	-75	20
2	1	-71	-69	20
2	5	-70	-68	10
3	1	-75	-74	20
3	4	-69	-70	10
4	3	-70	-69	8
5	2	-68	-70	10

A análise de ganho percentual da execução do algoritmo AO em relação à execução básica está apresentada na Tabela 16. Enquanto a média de LQI antes da execução do algoritmo era de -57,1 dBm, após a execução ela passou para -70,75 dBm, valor muito próximo do objetivo de nível de sinal de -70 dBm. A média de LQI apresentou um ganho percentual de 23,85% e a diminuição na média de potência ótima de transmissão teve um ganho percentual de 30%, passando de 20 dBm antes da execução para 14 dBm após a execução do algoritmo Auto-organização.

**Tabela 16 - Ganho percentual da média de LQI e diminuição da potência ótima após a execução do algoritmo AO.**

Execução básica					Execução algoritmo AO				
Nodo avaliado (Endereço)	Nodo pareado (Endereço)	LQI Tx (dBm)	LQI Rx (dBm)	PTx ótima (dBm)	Nodo avaliado (Endereço)	Nodo pareado (Endereço)	LQI Tx (dBm)	LQI Rx (dBm)	PTx ótima (dBm)
1	2	-65	-69	20	1	2	-69	-71	14
2	1	-69	-65	20	1	3	-74	-75	20
2	3	-74	-69	20	2	1	-71	-69	20
3	2	-69	-74	20	2	5	-70	-68	10
3	4	-56	-55	20	3	1	-75	-74	20
3	5	-35	-34	20	3	4	-69	-70	10
4	3	-55	-56	20	4	3	-70	-69	8
5	3	-34	-35	20	5	2	-68	-70	10
<b>Médias</b>		-57,1	-57,1	20			-70,75	-70,75	14
<b>Ganho Percentual</b>							23,85%	23,85%	30%

A Figura 38 exibe o resultado da execução do algoritmo AO e o espectro eletromagnético do ambiente próximo a cada nodo pertencente a esta RSSF. As imagens, contendo a análise de espectro, mostram a escolha do canal 20 para operação desta RSSF, executada pela parte de ECOBS do algoritmo AO. Além disso, a execução do algoritmo AO forçou uma mudança topológica importante, que pode ser verificada seguindo os raios amarelos que representam os canais de comunicação estabelecidos. O canal entre os nodos 1 e 2, que apresentava problema, passou a operar com melhor qualidade e pôde, inclusive, tornar-se um nodo Repetidor, estabelecendo duas rotas uniformes para a RSSF.



**Figura 38 - Topologia relacionada à análise de espectro eletromagnético local com a execução do algoritmo de Auto-organização [Elaborada pelo autor].**

A execução do algoritmo AO, que implica a execução conjunta dos algoritmos RPO e ECOBS, resultou em uma RSSF com: (i) topologia organizada de acordo com as métricas estabelecidas; (ii) potencial de economia de energia; (ii) melhores rotas de comunicação; (ii) interferência eletromagnética reduzida; e (ii) um canal de operação melhor escolhido e revisado temporalmente. Estes resultados atestam a qualidade da abordagem de auto-organização proposta neste trabalho.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As pesquisas realizadas neste trabalho mostraram a existência de mecanismos que buscam melhorar a organização das RSSFs, tanto durante a sua formação quanto durante a sua operação. Partindo desta ideia, este trabalho apresentou resultados interessantes para que as RSSFs tornem-se mais eficientes, seguras e robustas. Os algoritmos implementados neste trabalho foram propostos para suprir demandas da RSSF durante a sua operação. O conjunto formado pelos algoritmos de RPO e ECOBS viabilizou o desenvolvimento do algoritmo AO, e estes foram avaliados e validados através de resultados experimentais.

Observamos que, quando executados os algoritmos nos nodos, a RSSF em forma de árvore tornou-se mais eficiente, sendo possível constatar que o ambiente onde os nodos estavam instalados obteve uma mudança positiva no espectro eletromagnético (a faixa de frequência destinada para cada equipamento que divide esta banda estava praticamente individualizada), inclusive diminuindo a média de potência de transmissão ótima na ordem de 42,5%.

Os resultados quanto à mudança topológica também demonstraram que os algoritmos tornaram os nodos mais inteligentes, podendo contornar problemas que um canal de comunicação desprovido de cabeamento estruturado pode gerar. Estes problemas ocorrem devido ao fato de que o ambiente pode ser alterado por objetos no caminho das ondas eletromagnéticas emitidas pelos rádios, por outros equipamentos geradores de interferências eletromagnéticas ou por variações climáticas. Nota-se que a topologia de rede inicialmente formada foi modificada em tempo de operação, tornando, assim, a rede mais segura e robusta.

Como trabalho futuro e diretamente ligado ao tema de auto-organização, sugere-se um projeto para o desenvolvimento de um algoritmo de balanceamento de carga dos níveis de profundidade para RSSFs que operam na topologia em forma de árvore, baseadas no padrão IEEE 802.15.4. O balanceamento de carga dos níveis de profundidade dos nodos consiste na técnica de verificação de necessidade de ajuste da profundidade da rede, ou seja, os nodos deverão ser avaliados para que seja determinado se o nível em que estão está de acordo com o ideal para determinada RSSF. Assim, ao ser diagnosticado se os nodos estão pareados com quem deveriam estar, será possível definir se os nodos estão posicionados de maneira coerente e, caso seja necessário e baseando-se em métricas, deverá ser forçado um reposicionamento dos nodos que

estiverem formatando a rede topologicamente de maneira inadequada. A ideia é analisar algoritmos já existentes para o balanceamento de nodos para a estrutura de dados em árvore e, assim, propor uma especificação compondo as alterações necessárias para que este possa ser utilizado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [BIR11] Biradar, R.; Sawant, S.; Mudholkar, R.; Patil, V. "Multihop Routing In Self-Organizing Wireless Sensor Networks". International Journal of Computer Science Issues, Jan 2011, vol. 8, p. 155.
- [BUR11] Buratti, C.; Maratalò, M.; Verdone, R.; Ferrari, G. "Sensor Networks with IEEE 802.15.4 Systems, Distributed Processing, MAC, and Connectivity". Springer, 2011, 269p.
- [CHE10] Chen, D.; Nixon, M.; Mok, A. "WirelessHart, Real-Time Mesh Network for Industrial Automation". Springer, 2010, 282p.
- [COL04] Collier, T.; Taylor, C. "Self-Organization in Sensor Networks". Journal of Parallel and Distributed Computing, vol. 64, Jul 2004, pp. 866-873.
- [GUA12] Guarese, G. "Arquitetura Híbrida de Comunicação para Ambientes de Automação Industrial: Protocolos IEEE 802.15.4 e Modbus RTU sobre RS485". Trabalho de Conclusão de Curso, Programa de Graduação em Engenharia da Computação, PUCRS, 2012, 61p.
- [GUA14] Guarese, G. "Implementação e Avaliação de uma Arquitetura de Rede sem fio com Topologia Baseada em Árvore". Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, PUCRS, 2014, 66p.
- [IEE03] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. "IEEE Std. 802.15.4 - 2003: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)". Capturado em: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2003.pdf>, Dez. 2013.
- [IEE08] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications. Capturado em: [http://www.ieee802.org/3/av/public/2008\\_04/3av\\_0804\\_remein\\_2.pdf](http://www.ieee802.org/3/av/public/2008_04/3av_0804_remein_2.pdf), Dez. 2013.
- [IEE11] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. "Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)". Capturado em: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2011.pdf>, Dez. 2013.
- [IEE12] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. "Part11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications". Capturado em: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-2012.pdf>, Dez. 2013.
- [ISA09] INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. "ISA-100.11a-2009 Wireless systems for industrial automation: Process control and related applications". Capturado em: <http://infostore.saiglobal.com/store/details.aspx?ProductID=1372695>, Dez. 2014.
- [KAL10] Kalita, H.; Kar, A. "A New Algorithm of Self Organization in Wireless Sensor Network". Wireless Sensor Network, vol. 2, No. 1, 2010, pp. 43-47.

- [LEE11] Lee, K.; Lee, H. "A Self-Organized and Smart-Adaptive Clustering and Routing Approach for Wireless Sensor Networks". *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2012, 2012, Article ID 156268.
- [MOD06a] MODBUS-IDA. "Modbus over Serial Line Specification and Implementation Guide v1.02". Capturado em: [modbus.org/docs/Modbus\\_over\\_serial\\_line\\_V1\\_02.pdf](http://modbus.org/docs/Modbus_over_serial_line_V1_02.pdf), Dez. 2013.
- [MOD06b] MODBUS-IDA. "Modbus Messaging on TCP/IP Implementation Guide V1.0b". Capturado em: [modbus.org/docs/Modbus\\_Messaging\\_Implementation\\_Guide\\_V1\\_0b.pdf](http://modbus.org/docs/Modbus_Messaging_Implementation_Guide_V1_0b.pdf), Dez. 2013.
- [MOD12] MODBUS-IDA. "Modbus Application Protocol Specification V1.1b3". Capturado em: [www.modbus.org/docs/Modbus\\_Application\\_Protocol\\_V1\\_1b3.pdf](http://www.modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf), Dez. 2013.
- [MAO09] Mao, G.; Fidan, B. "Localization Algorithms and Strategies for Wireless Sensor Networks". IGI Global, 2009, 527p.
- [MIS09] Misra, S.; Woungang, I.; Misra, S. "Guide to Wireless Sensor Networks". Springer, 2009, 725p.
- [NOV15] Novus S.A. Software DigiConfig. <http://www.novus.com.br/downloads/?ID=636170>. Fev. 2015.
- [PAR07] Park, S.; Park, S.; Shin, K.; Abraham, A.; Han, S. "Optimized Self Organized Sensor Networks". *Sensors*, 2007, vol. 5, pp. 730-742.
- [RAG04] Raghavendra, C.; Sivalingam, K.; Znati, T. "Wireless Sensor Networks". Kluwer Academic Publishers, 2004, 443p.
- [SAN05] Santi, P. "Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks". John Wiley & Sons Ltd, 2005, 282p.
- [SIE11] Sieben, F.; Dillenburg, M.; Guarese, G. "Soluções Inovadoras para Implementação Wireless Modbus". In: 15th International Congress and Exhibit on Automation, Systems and Instrumentation – Brazil Automation ISA, 2011.
- [SIE12a] Sieben, F.; Dillenburg, M.; Guarese, G. "Solução de Wireless Site Survey para IEEE 802.15.4". In: 16th International Congress and Exhibit on Automation, Systems and Instrumentation - Brazil Automation ISA, 2012.
- [SIE12b] Sieben, F.; Guarese, G.; Webber, T.; Dillenburg, M.; Marcon, C. "Exploiting Modbus Protocol in Wired and Wireless Multilevel Communication Architecture". In: Brazilian Symposium on Computing System Engineering (SBESC), 2012, pp. 13-18.
- [SIR14] Sirsikar, S.; Chunawale, A.; Chandak, M. "Self-organization Architecture and Model for Wireless Sensor Networks". In: International Conference on Electronic Systems, Signal Processing and Computing Technologies, 2014, pp. 204-208.
- [SME08] Smeets, H.; Steenhaut, K.; Nowe, A. "An efficient distributed self-organizing routing algorithm for Wireless Sensor Networks". In: International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems, 2008, pp. 19-25.

- [USC81] UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA. "Transmission control protocol - Darpa internet program - Protocol specification". Capturado em: <http://www.ietf.org/rfc/rfc793.txt>, Dez. 2012.
- [VAS10] Vasseur, J.; Dunkels, A. "Interconnecting Smart Objects with IP, The next Internet". Morgan Kaufmann Publishers, 2010, 432p.
- [WEN13] Wenyang, L.; Xue, L. "A Study of Application of Self-Organizing Networks in Designing Appliances of Internet of Things". In: 3rd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2013, pp. 45-48.
- [ZIG01] ZIGBEE ALLIANCE. "ZigBee Retail Services Standard". Capturado em: <http://zigbee.org/download/standards-retail-services-standard>, Dez. 2014.