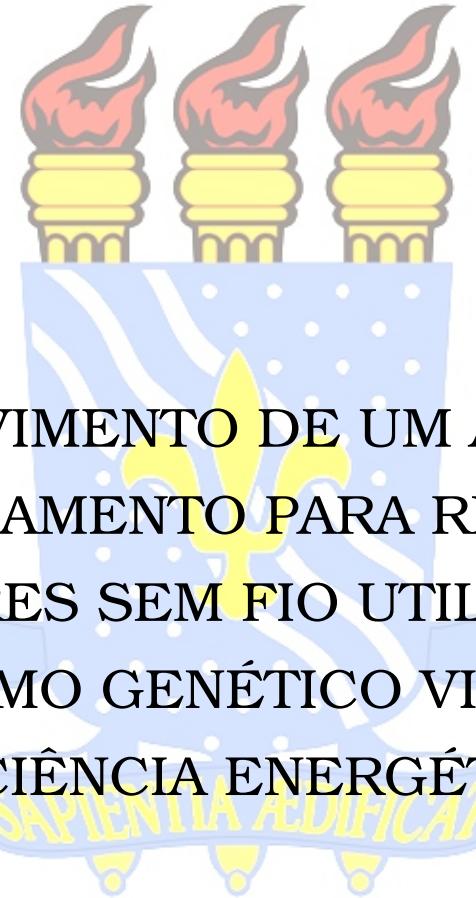


UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



DESENVOLVIMENTO DE UM ALGORITMO
DE ROTEAMENTO PARA REDES DE
SENSORES SEM FIO UTILIZANDO
ALGORITMO GENÉTICO VISANDO A
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Kaíque Rhuan de Azevedo Albuquerque

João Pessoa
Fevereiro - 2020

KAÍQUE RHUAN DE AZEVEDO ALBUQUERQUE

**Desenvolvimento de um Algoritmo de Roteamento para
Redes de Sensores Sem Fio Utilizando Algoritmo
Genético Visando a Eficiência Energética**

Trabalho Final apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Juan M. Maurício Villanueva

Coorientador: Prof. Dr. Euler C. Tavares de Macedo

João Pessoa - PB

**Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação**

A345d Albuquerque, Kaíque Rhuan de Azevedo.

Desenvolvimento de um Algoritmo de Roteamento para Redes de Sensores Sem Fio Utilizando Algoritmo Genético Visando a Eficiência Energética / Kaíque Rhuan de Azevedo Albuquerque. - João Pessoa, 2020.

90 f. : il.

Orientação: Juan Moisés Mauricio Villanueva.

Coorientação: Euler Cássio Tavares de Macêdo.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Rede de Sensores Sem Fio. 2. Nô Sensor. 3. Algoritmo de Roteamento. 4. Algoritmo Genético. 5. Balanceamento Energético. I. Villanueva, Juan Moisés Mauricio. II. Macêdo, Euler Cássio Tavares de. III. Título.

UFPB/BC

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA - UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS - CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA -
PPGEE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação de Mestrado

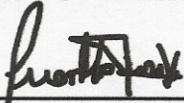
**Desenvolvimento de um Algoritmo de Roteamento para
Redes de Sensores Sem Fio Utilizando Algoritmo
Genético Visando a Eficiência Energética**

Elaborada por

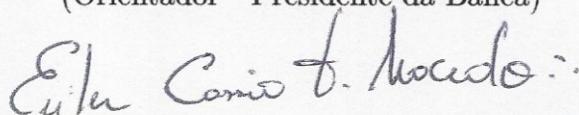
KAÍQUE RHUAN DE AZEVEDO ALBUQUERQUE

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

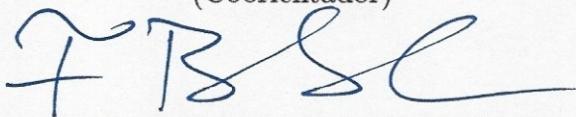
COMISSÃO EXAMINADORA



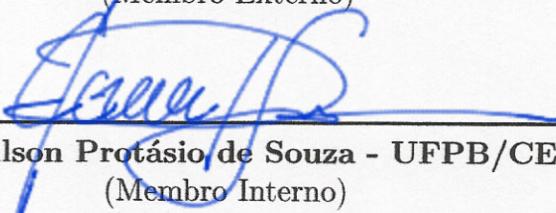
Prof. Dr. Juan M. Maurício Villanueva - UFPB/CEAR/DEE
(Orientador - Presidente da Banca)



Prof. Dr. Euler C. Tavares de Macedo - UFPB/CEAR/DEE
(Coorientador)



Prof. Dr. Fabrício Braga Soares de Carvalho -
UFPB/CEAR/DEE
(Membro Externo)



Prof. Dr. Cleonilson Protásio de Souza - UFPB/CEAR/DEE
(Membro Interno)

João Pessoa/PB, 27 de Fevereiro de 2020.

Dedicatória

*A Deus, aos meus pais e a Thaíse
Dedico.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus.

Agradeço aos meus pais, Francisco e Francisca, por todo seu amor, por me guiarem sempre em minha jornada, que nunca permitiu me desviar do caminho para meu objetivo.

A Thaíse pelo que estamos vivendo juntos, sua companhia me permitiu superar muitas dificuldades e evoluir a partir delas. Estar ao seu lado é o que motiva a seguir em frente.

Aos meus irmãos Kaio e Kássio, pelo companheirismo e amizade, que me ajudaram a construir parte do que sou hoje em dia.

Agradeço ao meu orientador, Juan Mauricio Villanueva, por todos os conselhos, pela paciência e ajuda nesse período.

Aos meus amigos, em especial todos que estiveram comigo ao longo desse período no GICA: Jonathan, Frank, Diego, Ricardo, Rafael, Celso, José Carlos e tantos outros que conheci durante minha jornada.

Aos professores por todo o conhecimento transmitido.

À Inovathys pelo apoio financeiro para realização deste trabalho de pesquisa, desejo à nossa equipe todo o sucesso do mundo.

*“Não sei se paro aqui,
Não sei se paro ou se faço o dobro do que faço,
Eu já faço o dobro do que eu posso.
(Zudzilla)*

Resumo

Empregados em diversos setores da sociedade, nós sensores compõem uma rede de troca de dados que auxiliam na leitura de fenômenos físicos e no controle de sistemas diversos, seja fazendo medições ou até mesmo gerando sinais de controle. Devido a limitações de projeto, em muitos casos estes nós possuem uma fonte de energia esgotável. Sendo assim, uma das maiores problemáticas que devem ser solucionadas no funcionamento de uma rede de nós sensores é a manutenção da fonte de energia. E uma das formas de realizar essa manutenção é a criação de rotas eficientes para troca de dados. Nesse trabalho é apresentado o desenvolvimento de um algoritmo de roteamento para Redes de Sensores Sem Fio (RSSF). O algoritmo baseia-se no Algoritmo Genético (AG), estratégia de otimização que busca soluções ótimas para problemas com técnicas inspiradas em processos naturais de evolução das espécies. Neste trabalho é apresentada uma forma de calcular rotas válidas entre um transmissor e um receptor para entrega de pacotes de dados além de realizar o balanceamento do consumo energético dos nós da rede. É pretendido que haja uma distribuição de maneira equilibrada da energia consumida na RSSF. A proposta foi avaliada em um cenário de simulação das etapas de transmissão e recepção de dados em uma RSSF, em que houve a avaliação do equilíbrio do consumo de energia dos nós da rede. Este resultado afeta diretamente o consumo de energia pelos nós e o prolongamento do tempo de vida da rede. Os resultados foram obtidos por simulação usando a ferramenta computacional MATLAB® e comparados com técnicas clássicas de traçado de rotas, tais como o algoritmo de Busca Exaustiva e o de Roteamento Oportunista.

Palavras-chave: Rede de Sensores Sem Fio. Nô Sensor. Algoritmo de Roteamento. Algoritmo Genético. Balanceamento Energético.

Abstract

Employed in different sectors of society, sensor nodes compose a data exchange network that helps in the reading of physical phenomena and in the control of different systems, whether making measurements or even generating control signals. Due to design limitations, in many cases these nodes have an exhaustible power source. Thus, one of the biggest problems that must be solved in the operation of a network of sensor nodes is the maintenance of the energy source. And one of the ways to carry out this maintenance is to create efficient routes for data exchange. This work presents the development of a routing algorithm for Wireless Sensor Networks (WSN). The algorithm is based on the Genetic Algorithm (AG), an optimization strategy that seeks optimal solutions to problems with techniques inspired by natural processes of evolution of species. This work presents a way to calculate valid routes between a transmitter and a receiver for delivering data packets, in addition to balancing the energy consumption of the network nodes. It is intended that there is a balanced distribution of the energy consumed in the WSN. The proposal was evaluated in a scenario of simulation of the stages of data transmission and reception in an WSN, in which the balance of energy consumption of the network nodes was assessed. This result directly affects the energy consumption by the nodes and the extension of the network's lifetime. The results were obtained by simulation using the computational tool MATLAB® and compared with classic route mapping techniques, such as the Exhaustive Search algorithm and the Opportunistic Routing algorithm.

Keywords: Wireless Sensor Network. Sensor Node. Routing Algorithm. Genetic Algorithm. Energy Balance.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Esquema geral de uma RSSF	26
Figura 2 – Topologia de malhas em uma RSSF	27
Figura 3 – Arquitetura de um nó sensor	29
Figura 4 – Diagrama temporal de execução de uma sub-rotina	33
Figura 5 – Modelo de transmissão de uma mensagem	34
Figura 6 – Classificações de RP de acordo com seus arranjos	38
Figura 7 – Estruturas de rede plana e hierárquica	41
Figura 8 – Etapas que ocorrem a cada geração	45
Figura 9 – Cruzamento de símbolos entre dois indivíduos	46
Figura 10 – Mutação de um símbolo em um indivíduo	46
Figura 11 – Distribuição de nós sensores por setores	49
Figura 12 – Fluxograma de Execução do Procedimento Proposto	52
Figura 13 – Grafo Ponderado Orientado	53
Figura 14 – Exemplo de RSSF	54
Figura 15 – Representação da distância entre nós sensores	54
Figura 16 – Raio de cobertura do nó sensor	55
Figura 17 – Cromossomo baseado em chaves aleatórias	56
Figura 18 – Exemplo de distribuição de nós seguindo a topologia proposta	62
Figura 19 – Comparativo dos métodos de roteamento	67
Figura 20 – Cenário simulado da RSSF para o estudo de caso 1	69
Figura 21 – Tempo de vida da RSSF para o estudo de caso 1	70
Figura 22 – Taxa de perda de pacotes média da RSSF para o estudo de caso 1	71
Figura 23 – Média da energia residual na RSSF ao longo das rodadas para o estudo de caso 1	73
Figura 24 – Desvio padrão da energia residual na RSSF ao longo das rodadas para o estudo de caso 1	73
Figura 25 – Desvio sobre a média da energia residual na RSSF para o estudo de caso 1	74
Figura 26 – Cenário simulado da RSSF para o estudo de caso 2	75
Figura 27 – Tempo de vida da RSSF para o estudo de caso 2	77
Figura 28 – Valor médio do total de pacotes perdidos para o estudo de caso 2	78
Figura 29 – Média da energia residual na RSSF ao longo das rodadas para o estudo de caso 2	79
Figura 30 – Desvio padrão da energia residual na RSSF ao longo das rodadas para o estudo de caso 2	80
Figura 31 – Desvio sobre a média da energia residual na RSSF para o estudo de caso 2	81

Lista de tabelas

Tabela 1 – Equações para modelagem de consumo energético	37
Tabela 2 – Especificações de funcionamento do transceptor	50
Tabela 3 – Características energéticas dos nós da RSSF	50
Tabela 4 – Tabela de distâncias	55
Tabela 5 – Ramos de ligação direta	56
Tabela 6 – Faixas de distância para determinação da taxa de perda de pacotes. . .	63
Tabela 7 – Parâmetros restantes do cenário de simulação	64
Tabela 8 – Parâmetros para execução do AG	65
Tabela 9 – Consumo de energia e capacidade da bateria para o cenário simulado .	69
Tabela 10 – Parâmetros para simulação do estudo de caso 2	76

Lista de abreviaturas e siglas

AG	Algoritmo Genético
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i> / Mudança por Deslocamento de Amplitude
ADC	<i>Analogic Digital Converter</i> / Conversor Analógico-Digital
AODV	<i>Ad-hoc On Demand Distance Vector</i> / Vetor de Distâncias Ad hoc sob Demanda
BE	Busca Exaustiva
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i> / Chaveamento Binário de Mudança de Fase
CC	Corrente Contínua
DSDV	<i>Destination-Sequenced Distance Vector</i> / Vetor de Distâncias Sequenciado por Destino
ExOR	<i>Exclusive Opportunistic Routing</i> / Roteamento Oportunista Exclusivo
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i> / Matriz de Portas Programável em Campo
GEAR	<i>Geographical Eneregy Aware Routing</i> / Roteamento Geográfico e Ciente de Energia
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i> / Circuito Inter-Integrado
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i> / Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos
LEACH	<i>Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy</i> / Hierarquia de Cluster Adaptável de Baixo Consumo
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i> / Amplificador de Baixo Ruído
LQI	<i>Link Quality Indicator</i> / Indicador de Qualidade de Conexão
MAC	<i>Medium Access Control</i> / Controle de Acesso de Meio
MEMS	<i>MicroElectroMechanical Systems</i> / Sistemas Micro Eletro-Mecânicos
O-QPSK	<i>Offset-Quadrature Phase Shift Keying</i> / Chaveamento de Deslocamento de Fase em Quadratura Deslocada

OR	<i>Opportunistic Routing</i> / Roteamento Oportunista
PA	<i>Power Amplifier</i> / Amplificador de Potência
PEGASIS	<i>Power Efficient Gathering in Sensor Information Systems</i> / Coleta com Eficiência de Energia em Sistemas de Informações de Sensores
PLR	<i>Packet Loss Ratio</i> / Taxa de Perda de Pacotes
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i> / Otimização por Enxame de Partículas
QoS	<i>Quality of Service</i> / Qualidade de Serviço
RF	Rádio Frequência
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i> / Indicador de Intensidade do Sinal Recebido
RP	<i>Routing Protocol</i> / Protocolo de Roteamento
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> / Interface Periférica Serial
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i> / Rede Pessoal Sem Fio
ZRP	<i>Zone Routing Protocol</i> / Protocolo de Roteamento por Zona

Lista de símbolos

C_{tot}	Capacitância Chaveada Total Durante a Execução de uma Sub-rotina (F)
C_L	Capacitância Média Chaveada num Microprocessador (F)
λ	Comprimento de Onda do Sinal (m)
V	Conjunto de Vértices do Grafo Orientado Ponderado
E	Conjunto de Arestas do Grafo Orientado Ponderado
I_{leak}	Corrente de Vazamento (A)
d	Distância entre Dois Nós Sensores (m)
η_{amp}	Eficiência do Amplificador de Potência
E_0	Energia Inicial em um Nô Sensor (J)
ε_{amp}	Energia para Amplificação do Sinal na Transmissão ($\frac{J}{bit \cdot m^\gamma}$)
E_{Rx}	Energia para Processamento do Pacote da Dados no Circuito de Recepção (J/bit)
E_{Tx}	Energia para Processamento do Pacote da Dados no Circuito de Transmissão (J/bit)
E_{recep}	Energia para Recepção de um Pacote de Dados (J)
E_{trans}	Energia para Transmissão de um Pacote de Dados (J)
E_r	Energia Remanescente em um Nô Sensor (J)
E_{tot}	Energia Total Consumida Durante a Execução de uma Sub-rotina (J)
E_{MS}	Energia Total Consumida para Transmissão de um Pacote até o Coletor (J)
S	Espaço de Busca de Soluções
γ	Fator de Perda no Canal
NF_{Rx}	Figura de Ruído na Recepção
f	Frequência de Operação do Sistema de Processamento (Hz)

P	Função a Ser Otimizada
ω	Função Peso de um Grafo
G_{ant}	Ganho da Antena
G	Grafo Orientado Ponderado
Δt_{sub}	Intervalo de Execução de Uma Sub-Rotina (s)
BW	Largura de Banda no Canal (Hz)
N	Número de Nós que Compõem uma Rota
n_{sym}	Número de Símbolos Componentes de um Indivíduo
N_{tick}	Número de Ciclos de <i>Clock</i> para Execução de uma Sub-rotina
n_{tot}	Número Total de Nós de uma Rede de Sensores Sem Fio
$\%E_{res}$	Percentual de Energia Residual em um Nó Sensor
δ	Peso do Caminho Mais Curto em um Grafo Orientado Ponderado
P_{dyn}	Potência Dinâmica (W)
P_{stat}	Potência Estática (W)
P_{tot}	Potência Total (W)
p_c	Probabilidade de Cruzamento
p_{mut}	Probabilidade de Mutação
Tx_{range}	Raio de Cobertura de um Nó Sensor
$\frac{S}{N}$	Relação Sinal-Ruído
r	Vetor de Saltos que Representa uma Rota
N_0	Ruído Térmico Ambiente (J)
x	Solução Contida em um Espaço de Busca
n	Tamanho do Pacote de Dados (bits)
R_{bit}	Taxa de Transferência no Canal (bits/s)
V_{dd}	Tensão de Alimentação do Nós Sensor (V)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Motivação	20
1.2	Trabalhos Relacionados	21
1.3	Objetivos	24
1.3.1	Objetivo Geral	24
1.3.2	Objetivos Específicos	24
1.4	Organização do Texto	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	Redes de Sensores Sem Fio	25
2.2	Definições Padrão para Configuração da RSSF	28
2.3	Modelo de Consumo de Energia	31
2.3.1	Modelo de Energia para o Processamento	31
2.3.2	Modelo de Energia para a Comunicação	33
2.3.3	Modelo de Energia para RSSF Multi-saltos	35
2.4	Protocolos de Roteamento para RSSF	36
2.4.1	Forma de Operação	37
2.4.2	Seleção do Próximo Salto	39
2.4.3	Estabelecimento de Caminho	40
2.4.4	Estrutura de Rede	41
2.5	Algoritmo Genético	42
2.5.1	Etapas de Execução de um Algoritmo Genético	44
3	ALGORITMO OTIMIZADO PARA O ROTEAMENTO DE RSSF	48
3.1	Topologia da RSSF	48
3.2	Descrição dos Nós	49
3.3	Definição do Protocolo de Comunicação	51
3.4	Traçado de Rotas Utilizando Algoritmo Genético	51
3.4.1	Definição do Problema	52
3.4.2	Codificação do Cromossomo	53
3.4.3	Decodificação do Cromossomo	56
3.4.4	Função de Aptidão	58
3.4.5	Gerações e Operadores genéticos	60
3.5	Proposta de Cenário para Simulação	60
3.5.1	Algoritmos para o Traçado de Rotas	65

4	RESULTADOS	68
4.1	Estudo de Caso 1	68
4.2	Estudo de Caso 2	75
5	CONCLUSÕES	82
5.1	Contribuições da Pesquisa	83
5.2	Trabalhos Futuros	83
	REFERÊNCIAS	84

1 Introdução

Os nós sensores surgem no final do século XX, dado aos crescentes avanços nos ditos sistemas micro-eletromecânicos (*MEMS*, sigla em inglês para *Microelectromechanical systems*), sistemas que possibilitaram a redução no tamanho dos chips e no seu custo de fabricação. Outro ponto que permitiu o surgimento dos nós sensores foi o avanço nos sistemas de comunicação sem fio. Estes têm por característica o tamanho reduzido e a capacidade de comunicar-se a curtas distâncias, por meio de técnicas com baixo custo e baixo consumo de energia (AKYILDIZ *et al.*, 2002).

Uma rede de sensores sem fio (RSSF) pode ser formada por um conjunto de nós sensores interligados, operando colaborativamente para medição de grandezas em uma determinada área. O papel do nó na rede é realizar coleta de dados através de seus sensores, realizar algum nível de processamento deste dado e enviá-lo através de comunicação sem fio, em rádio frequência (RF), para a unidade responsável por dar uma utilidade para os dados coletados como: processamento em alto nível, armazenamento ou criar sinais de controle caso necessário. Quanto à rede em si, ela é responsável por coordenar e interligar os nós sensores que a compõem, fazendo-se possível a comunicação entre todos eles com a unidade responsável, denominada sorvedouro.

A atuação dos nós sensores é observada em muitos setores da sociedade atual: segurança, saúde, agricultura, indústria, gerenciamento de utilidades urbanas e na domótica (proporcionando comodidade para habitantes de uma residência, por exemplo). Como exemplos mais específicos pode-se citar a utilização de dispositivos para acionamento de portas e janelas numa casa de maneira automática, conforme mostrado em García e Vega (2018); o monitoramento de florestas para detectar incêndios florestais mostrado em Souza *et al.* (2016) e até mesmo coleta de informação sobre tráfego de veículos, tópico sobre o qual o trabalho de Luo *et al.* (2014) desenvolve uma nova visão sobre o assunto, trazendo a eficiência energética para a rede nesse tipo de aplicação.

Um dos principais obstáculos a ser vencido para redes de sensores sem fio é a limitação de energia. Outros obstáculos que podem ser relacionados envolvem limitações de *hardware*, *software*, *firmware*, como também a taxa de transmissão de dados e a latência. Comumente são utilizadas baterias para alimentar estes sensores, que muitas vezes não podem nem ser recarregadas ou nem mesmo trocadas, inutilizando em certos casos o nó sensor. É possível afirmar que a vida útil de um nó sensor é flexível e está relacionada com sua aplicação (DARGIE; POELLABAUER, 2010), como por exemplo monitoramento do crescimento de plantas em um jardim de uma escola que podem durar meses ou anos (LOPEZ-ITURRI *et al.*, 2018), enquanto que uma rede voltada para a transmissão de

dados multimídia só precisa durar o tempo de transmissão dos dados (HOSSAIN *et al.*, 2019).

Novas tecnologias estão sendo desenvolvidas para contornar o problema de manutenção da vida útil de um nó sensor. Um exemplo que pode ser citado é o *Energy Harvesting*. Esta tecnologia surge para substituir a necessidade da bateria de um nó sensor ser trocada, fazendo com que sua vida útil se estenda ainda mais. Consiste em extrair energia de fontes acessíveis e suprir as necessidades de energia dos nós da rede, proporcionando um maior tempo de vida para a RSSF. As fontes são diversas, como energia solar, térmica e eólica por exemplo. Um exemplo da aplicação da técnica foi apresentada em Medeiros *et al.* (2018), em que foi utilizado o princípio de coleta de energia para alimentar nós sensores através de bobinas magnéticas acopladas a linhas de transmissão para captar energia e alimentar o nó sensor. A rede é utilizada para monitorar a invasão de vegetação na área da linha de transmissão para evitar que a invasão cause algum problema na rede elétrica. Outro exemplo é mostrado em Souza *et al.* (2016), onde os nós sensores coletam energia térmica de tronco de árvores. Aqui o objetivo é monitorar florestas para detecção de incêndios florestais.

Em RSSF, o consumo de energia pode ser quantificado tanto pelo processamento interno e mudança de estados no nó quanto pelo processo de transmissão e recepção de mensagens. Redução do tráfego de dados pela definição de protocolos de roteamento (RP, sigla em inglês para *Routing Protocol*) e um controle de acesso ao meio (MAC, sigla em inglês para *Medium Access Control*) que otimizam o número de mensagens que trafegam pela rede podem garantir que a rede tenha um desempenho mais elevado, durando por mais tempo e portanto fornecendo mais dados (PANT; BHADAURIA, 2016; DEVI; RAO, 2016).

A camada MAC é responsável por fornecer o acesso dos nós sensores ao canal de comunicação sem fio. Seu papel é garantir que as colisões entre mensagens no canal da rede não influencie a comunicação de forma definitiva, e que eventualmente cada tentativa de transmissão consiga ser realizada (DARGIE; POELLABAUER, 2010). O RP utiliza algoritmos para otimização de rota e detecção de caminho para definir a melhor rota de uma mensagem entre um transmissor e um receptor. É desejável que o protocolo garanta a confiabilidade da mensagem, da maneira menos custosa e simples possível.

Protocolos de roteamento são extensamente pesquisados em ambiente acadêmico, como em outros ambientes de pesquisa de novas tecnologias. Várias estratégias são propostas objetivando diferentes resultados de desempenho da rede, sendo a eficiência energética uma das principais preocupações no projeto de protocolos de roteamento. Em Sujata (2017) relaciona algumas das principais classes de RP, como por exemplo: protocolos hierárquicos, protocolos de multi-caminho e protocolos baseados nas métricas de qualidade de serviço (QoS, do inglês *Quality of Service*).

Ainda há outras formas de se projetar um RP, como por exemplo protocolos ditos como oportunistas (*Opportunistic Routing* em inglês, OR), que são baseados no encaminhamento de mensagens sem uma rota definida inicialmente; e no geral cada nó que recebe uma mensagem escolhe o próximo destino que mais se aproxima do sorvedouro. Em Hajer e Bouallegue (2018) e Fradj *et al.* (2017) são feitos estudos comparativos de diversas técnicas de OR implementadas, analisando seu desempenho quanto a parâmetros indicadores de qualidade da RSSF.

Alguns autores utilizam também métodos de otimização para desenvolvimento de formas de roteamento; estes métodos muitas vezes envolvem algoritmos heurísticos, como algoritmos genéticos (KONG *et al.*, 2018), redes neurais (VINUTHA; NALINI; VEERESH, 2017), otimização por enxame de partículas (RUAN; HUANG, 2019) e colônia de formiga (LI *et al.*, 2019). Os objetivos e técnicas aplicadas são diversos, tomando como exemplo o algoritmo genético (AG) que é utilizado neste trabalho. Sujee e Kannammal (2017) propõe o desenvolvimento de um algoritmo hierárquico do tipo LEACH (*Low-energy adaptive clustering hierarchy*) otimizado com algoritmo genético. Outro exemplo é visto em Barolli *et al.* (2011), onde foi utilizado, além de algoritmo genético, otimização multi-objetivo para melhorar o desempenho de um algoritmo baseado em QoS.

O mercado de produtos e serviços que envolve a aplicação de RSSF, que envolve desde oferta de serviços para indústria à venda de nós sensores e serviços que garantem conectividade, foi avaliado no ano de 2016 em cerca de 29,06 bilhões de dólares¹, com uma perspectiva de valor de mercado de cerca 93,86 bilhões para 2023, com um crescimento cumulativo anual de 18,55%, durante o período 2017-2023. Este valor de mercado é animador e gera perspectivas otimistas de crescimento futuro, visto que em Viswanathan (2006) havia uma projeção do valor de mercado para aplicações com RSSF de 1,85 bilhão de dólares em 2012 (um crescimento de mais de 90 bilhões de dólares em 10 anos).

Impulsionando o crescimento do valor de mercado da tecnologia de RSSF está a crescente demanda por dispositivos de monitoramento remoto e dispositivos inteligentes, tais como centrais de controle de residências e dispositivos vestíveis inteligentes (*wearables*, em inglês) que crescem como tendência entre as principais empresas de tecnologia. Exemplos podem ser citados: a assistente pessoal Amazon Alexa® e os relógios inteligentes (*smartwatches*, em inglês) Apple Watch® e Amazfit®.

Mesmo sendo amplamente pesquisada, sob os mais diversos aspectos, a tecnologia ainda pode ser considerada nova e com grande potencial para expansão, desde ideias, aplicações até novas tecnologias. Ainda há um vasto campo para se explorar, tendo tanto relevância acadêmica quanto de mercado. Sabendo-se da relevância acadêmica e do valor das RSSF para a indústria, este trabalho se propõe a desenvolver um algoritmo

¹ Informação disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/wireless-sensor-networks-market-445.html>, acessado em maio de 2019

de roteamento para RSSF; otimizado através da execução de um AG com o objetivo de promover uma eficiência no consumo de energia pelos nós sensores para transmissão de dados. O AG é executado considerando-se a necessidade de realizar saltos entre os nós sensores da rede e fornece como resposta a rota, que define o caminho desde o nó que envia a mensagem até seu destino final.

1.1 Motivação

Há um sem-número de aplicações para RSSF, abrindo a possibilidade da realização de estudos e desenvolvimento de aplicações na área, apesar do tema ser explorado faz mais de duas décadas. Nenhuma solução envolvendo RSSF é igual à outra; são diversos os cenários, as aplicações e as necessidades a serem supridas por RSSF. Para o projeto de uma RSSF, então, é necessária a escolha de diversos requisitos de projeto. Número de nós sensores, modelos de consumo de energia, vida útil de baterias, alcance de transmissão dos nós sensores, taxa de transmissão, banda de operação dos módulos de rádio. Todos estes e outros fatores são mutáveis em projetos de uma RSSF e combinados entre si geram restrições que influenciam na forma com que são usados os recursos para gerenciamento da rede. Como exemplo, pode-se citar os supracitados protocolo de roteamento e controle de acesso ao meio. E, é nesta pluralidade de abordagens, que surge a necessidade de renovação e desenvolvimento de novas técnicas.

No que se refere a protocolos de roteamento, o principal foco é no desenvolvimento de estratégias de roteamento. Estas estratégias devem encontrar o caminho com o menor consumo de energia entre o transmissor e o sorvedouro com o objetivo de gerar um consumo ótimo de energia. Entretanto, o projeto de um RP eficiente em energia não envolve somente achar o menor caminho com o menor consumo. Balancear o consumo de energia entre os nós da rede, na perspectiva de aumentar o seu tempo de vida (LUO *et al.*, 2014) é uma prática que deve ser levada em consideração; pois em certos casos quando a energia de um nó se esgota, este torna-se inutilizável.

Levando-se em consideração estas premissas, surge a necessidade da otimização do balanceamento do consumo de energia da RSSF. Desta maneira, é proposta a utilização de Algoritmos Evolutivos; definidos como meta-heurísticas evolutivas que têm por objetivo encontrar soluções otimizadas de problemas complexos, com várias variáveis correlacionadas.

Tendo em vista a natureza de análise do consumo de energia em uma RSSF, é comum a maioria dos trabalhos relacionados apresentar como resultado a característica de consumo energético da rede. Para esta análise há um frequente uso de *softwares* simuladores de rede como: Network Simulator 3 (NS3) (VU *et al.*, 2019), NS2 (AGNIHOTRI; GUPTA, 2018) e Matlab (DHAMI; GARG; RANDHAWA, 2018), os quais permitem desenvolver cada

aspecto da RSSF, desde número e disposição de nós, localização do sorvedouro, definições das camadas de rede, RP, entre vários outros. A partir dos resultados de simulação é verificado o comportamento da rede ao longo do tempo trocando pacotes de dados entre os nós sensores e o sorvedouro².

A premissa inicial é ter um consumo eficiente por toda a RSSF. Um meio de alcançar este objetivo é através do desenvolvimento de um algoritmo de roteamento voltado para o consumo de energia. Com o auxílio de ferramentas para simulação de desempenho de redes, acredita-se que o trabalho aqui proposto pode contribuir para esta área de comunicação sem fio, em especial para RSSF, através do desenvolvimento de um algoritmo genético (AG) para traçado de rotas em RSSF. Desta maneira, o objetivo desta proposta é realizar um roteamento otimizado baseado em AG que leve em consideração os critérios de energia residual em cada nó e a distância entre os nós.

1.2 Trabalhos Relacionados

Apesar de terem sido discutidos ao longo de duas décadas, os conceitos de redes de sensores sem fio, protocolos de roteamento e até de algoritmos de rotas ainda possuem relevância acadêmica e são discutidos e desenvolvidos métodos que propõem melhorias em inúmeros aspectos deste tema. O trabalho apresentado neste texto possui relação com estes trabalhos relacionados.

As aplicações de AG são diversas. Em Liang e Lin (2018), uma aplicação envolvendo AG é utilizada para solucionar um problema de cobertura para RSSF móveis, cujo problema de otimização tem como objetivo a minimização de dois fatores importantes para a rede: a distância total percorrida pelos nós sensores e o quanto distante um nó tem de estar do outro. A solução do problema determina o posicionamento dos nós e o quanto eles devem ser deslocados para cobrir toda a área a ser inspecionada com o menor custo possível. Este custo está relacionado com economia de energia na rede. Para análise dos resultados foi adotado o indicador de qualidade da solução (considerado no AG como a função de aptidão) ao fim do algoritmo genético ao longo de cem iterações. Este foi comparado com a resposta analítica, que no trabalho citado é possível pois a rede possuía cinco nós sensores, o que viabiliza um cálculo analítico; redes com maiores números geram uma complexidade de tempo polinomial não determinístico (NP, sigla em inglês para *nondeterministic polynomial time*), *vide* a semelhança com o problema clássico do caixeiro viajante.

Um uso comum para algoritmos genéticos em RSSF é na coordenação de ações na rede, em que o resultado obtido com o emprego da técnica é utilizado para delegar funções aos nós da rede, como é o caso dos exemplos citados a seguir. Em Khan *et al.*

² Na situação abordada neste trabalho, o sorvedouro somente recebe os dados enviados pelos nós sensores para encaminhá-los à unidade de processamento, podendo haver outras funções que este pode desempenhar

(2016), o AG é utilizado para determinar os nós que fazem o papel de agentes ontológicos³, avaliando-os em relação à memória e capacidade energética, pois estes nós precisam de elevada robustez de ambos fatores para agirem como agentes ontológicos. Como resultados obtidos novamente, é avaliada a progressão da função de aptidão ao passar das gerações do AG.

Sujee e Kannammal (2017), por sua vez, utiliza AG para determinação de cabeça de grupo (tradução literal de *Cluster Head*) em um protocolo de agrupamento (*Cluestering Protocol*, em inglês), mais especificamente, o LEACH. O agrupamento atua dividindo os nós sensores em grupos e faz o balanceamento do consumo de energia pela rede escolhendo um nó para atuar como líder deste grupo. O líder, ou cabeça do grupo, é responsável não só por coletar todos os dados dos nós sensores do grupo, mas também de utilizar das técnicas de agregação (BRINDHA; VANITHA, 2017) e fusão de dados. Ambas as técnicas são usadas para comprimir as informações recebidas em uma única mensagem que é transmitida para o sorvedouro.

Ainda em Sujee e Kannammal (2017), é descrito que a unidade de processamento, realiza a coleta de informações sobre o posicionamento geográfico, identificação dos nós da rede e a condição de cada nó sensor à respeito de sua elegibilidade como cabeça de grupo. Após isso executa o AG para determinar quais destes nós são escolhidos como cabeças de grupo. No protocolo LEACH tradicional, a escolha é feita a partir de um cálculo probabilístico, executado no próprio nó sensor, respeitando uma margem que caso ultrapassada elege o nó como sendo cabeça de grupo. Nesta citação, o cálculo probabilístico é substituído pela probabilidade ótima calculada recursivamente de forma evolutiva pelo AG. Os resultados são obtidos por meio de comparações entre o LEACH tradicional e o LEACH otimizado com o algoritmo genético. A métrica comparada é a energia residual da rede para quatro populações de nós sensores diferentes ao longo de rodadas, onde cada rodada um conjunto de cabeças de grupo diferentes é utilizado. O LEACH otimizado com o algoritmo genético foi superior ao tradicional em todos os cenários simulados.

No trabalho de Agnihotri e Gupta (2018), a estratégia de roteamento utiliza de uma combinação do AG com uma otimização por enxame de partícula para a formação dos agrupamentos de nós sensores. O emprego do AG nesta citação se assemelha com a proposta de trabalho apresentado neste texto. Aqui, os nós cabeça de grupo atuam tanto recebendo mensagens dos outros nós do grupo, quanto retransmitindo mensagens de outros cabeças de grupo para o sorvedouro. O roteamento partindo de nós que não se conectam ao sorvedouro é feita por uma rede multi-saltos e os saltos são otimizados por AG. A codificação do cromossomo relaciona os possíveis caminhos até o sorvedouro, e o algoritmo otimiza o tempo de vida da rede com base no consumo de cada cabeça de grupo

³ Conceito filosófico empregado em ciências da computação, utilizado em inteligência artificial para conceituar os agentes que possuem conhecimento sobre certa especificidade (conceitualização), sendo úteis para validação de dados(FRANÇA, 2009).

em separado. As métricas para avaliação dos resultados foram o tempo de vida da rede e a taxa de entrega de pacotes, para diferentes números de nós.

Luo *et al.* (2014) apresenta um algoritmo de roteamento oportunista (OR, sigla em inglês para *Opportunistic Routing*) para seleção de nós de retransmissão. Há uma relação entre o trabalho proposto por Luo *et al.* (2014) e o que é desenvolvido posteriormente neste texto na forma como é feita a seleção dos nós. A diferença está na execução do encaminhamento ao longo dos nós de retransmissão até o sorvedouro. Na citação, assim como é característica de protocolos OR, a seleção da rota é realizada pelos próprios nós que encaminham a mensagem, havendo uma rodada de seleção a cada encaminhamento. A escolha é baseada em economia de energia, sendo aqueles com maior energia residual os nós com maior prioridade para retransmissão. A citação traz dois cenários para análise de resultados; um deles é uma simulação, outro é uma implementação utilizando dispositivos de comunicação sem fio. As métricas para obtenção dos resultados foram a energia residual média da rede ao longo do tempo, desvio padrão da energia ao longo do tempo de simulação, taxa de perda de pacotes e o tempo decorrido até a bateria do primeiro nó da rede descarregar.

Outro algoritmo OR pode ser visto em (SO; BYUN, 2016; FRADJ *et al.*, 2017; FRADJ; ANANE; BOUALLEGUE, 2018), cuja técnica se enquadra dentro dos protocolos ditos centralizados. Por definição, protocolos centralizados realizam o encaminhamento de mensagens baseados em teorias probabilísticas, ou por intermédio de estratégias de otimização, utilizando métodos clássicos de otimização como algoritmos heurísticos para encontrar a rota ótima em questão de balanceamento de energia, partindo de informações globais sobre a rede (LI; GUAN, 2013). Além do método de algoritmo genético que é estudado neste trabalho, outros métodos de otimização podem ser utilizados, como por exemplo, aqueles baseados na otimização por colônia de formiga (KULKARNI; KADAM; MALATHI, 2017; SHARMIN; ANWAR; MOTAKABBER, 2018).

Os trabalhos apresentados nesta seção fornecem subsídios para a construção do estado da arte sobre os métodos que estão sendo desenvolvidos e as formas como estes operam, dando base para o trabalho aqui apresentado. Além disso apresentam métricas que podem ser utilizadas para avaliar o desempenho do algoritmo de roteamento aqui proposto. Como os trabalhos têm proposto a eficiência energética, a principal preocupação é a energia residual da rede. Esta é tida como sendo a média de energia remanescente nos nós da rede ao fim da aplicação.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de uma estratégia de roteamento para redes de sensores sem fio que realize o balanceamento do consumo energético da rede. A proposta é a execução de um algoritmo genético para traçar rotas, com foco na minimização da distância total do nó sensor ao sorvedouro, o balanceamento do nível energético dos nós sensores, o prolongamento do tempo de vida da RSSF e a redução da taxa de perda de pacotes pela rede.

1.3.2 Objetivos Específicos

Mais especificamente, o trabalho destina-se a:

- Desenvolver uma nova codificação da população do AG com a finalidade de que se adapte ao problema para a procura de soluções ótima.
- Desenvolver uma função de aptidão para avaliação dos indivíduos no AG que minimize os parâmetros de distância total entre sorvedouro e nó transmissor e de nível energético dos nós sensores da rota;
- Avaliar, por meio de ferramentas computacionais para simulação, o desempenho do algoritmo para traçado de rotas de uma RSSF com AG, sob os parâmetros de: validade da rota calculada, o tempo de operação da rede, taxa de perda de pacotes e a média de consumo de energia de toda a rede durante o tempo de operação.

1.4 Organização do Texto

O trabalho está estruturado em 5 capítulos. Além deste capítulo de introdução, no Capítulo 2 será apresentada a Fundamentação Teórica, que reúne conceitos relevantes acerca de redes de sensores sem fio, algoritmos de roteamento e algoritmo genético. Os conceitos são usados como base para a descrição do Sistema Proposto no Capítulo 3. É exibido neste capítulo o desenvolvimento da estratégia de roteamento utilizando AG para encaminhamento de mensagens por nós sensores ao sorvedouro. No Capítulo 4 é realizada uma avaliação do algoritmo proposto, a fim de definir suas características de consumo de energia. O Capítulo 5 é dedicado às considerações finais, além de ser usado para mostrar os trabalhos publicados até aqui na pesquisa e o cronograma para sua finalização.

2 Fundamentação Teórica

Ao longo deste capítulo serão apresentados conceitos que são de utilidade para entendimento do trabalho de pesquisa aqui apresentado. A próxima seção discorre acerca de redes de sensores sem fio e seus conceitos.

2.1 Redes de Sensores Sem Fio

Redes de sensores sem fio são viabilizadas a partir da expansão da tecnologia de processamento em baixo consumo, dispositivos de transmissão sem fio, sistemas embarcados e equipamentos de sensoriamento. Sua área de aplicação envolve muitos setores da sociedade: segurança e aplicações militares, na saúde, áreas industriais e também residenciais, como também em aplicações subaquáticas e para aquisição de sinais de áudio e vídeo, mais conhecidos como Sistemas Multimídia. (PRATHAP *et al.*, 2012).

Em sua essência, uma RSSF é uma rede *ad-hoc*¹ formada por nós sensores que possuem limitações de operação, sendo uma das principais sua fonte de energia, em que muitas vezes é não-recarregável ou de inviável substituição por outra fonte (PARK; SAHNI, 2006; ZHAOHUA; MINGJUN, 2009). Aliado à baixa capacidade energética o nó sensor ainda possui limitações em sua potência de transmissão, mas em compensação são dispositivos de baixo custo, baixo consumo energético e com múltiplas funcionalidades.

O nó sensor tem por função a coleta e processamento dos dados, assim como transmissão desses dados por um meio sem fio através de um canal RF, podendo se comunicar com outros nós sensores ou com o sorvedouro. No projeto de RSSF, quando nós sensores não conseguem uma conexão direta com o sorvedouro é necessário o uso de nós roteadores e o respectivo protocolo de roteamento, que traça o caminho ao qual percorre a mensagem desde o nó sensor ao sorvedouro.

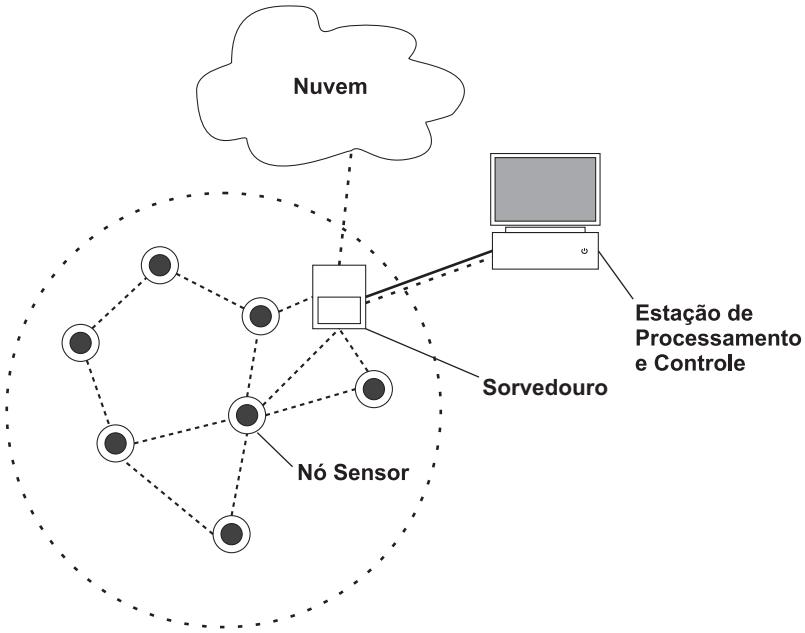
É ilustrado na Figura 1 um esquema típico de RSSF em que estão dispostos nós sensores sobre uma área, conectados entre si e o sorvedouro por intermédio do meio sem fio. O sorvedouro, por sua vez, é conectado a uma estação de processamento e controle ou diretamente à nuvem², responsáveis pelo devido uso dos dados coletados pela RSSF. A conexão entre o sorvedouro e a estação é feita por qualquer via, sendo fixa ou sem fio, na forma mais segura e conveniente para a aplicação, enquanto que pode haver uma conexão

¹ Categoria de rede de transmissão sem fio em que os módulos componentes possuem restrições quanto à área de cobertura do sinal (YU; LI, 2003)

² A aplicação da nuvem para dispositivos sem fio de maneira simplificada é quando os dados de um dispositivo é armazenado e processado fora do dispositivo, geralmente por conexões com servidores dedicados através da internet (RAJA; CHITRA; JONAFARK, 2018)

direta com a nuvem por meio de acesso à internet sem fio.

Figura 1 – Esquema geral de uma RSSF



Fonte: Próprio Autor

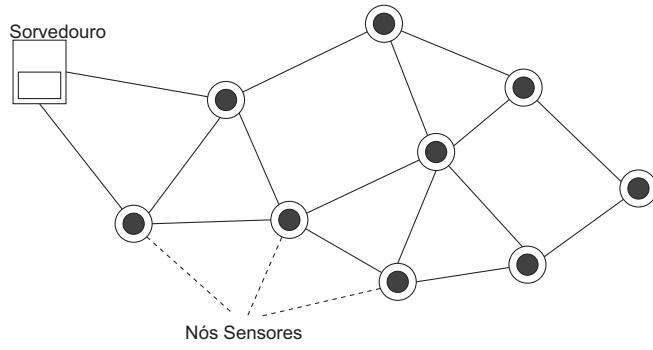
A limitação de potência de transmissão e de raio de cobertura dos nós sensores acarreta, em certas situações, a necessidade de um pacote de dados ser transmitido para outros nós sensores que estejam mais próximos do sorvedouro, para que estes então consigam encaminhar a mensagem ao seu destino final. Para redes com esta característica é dada a denominação de redes multi-saltos (*multi-hop wireless networks*, em inglês), que é definida como redes que possuem um ou mais nós intermediários responsáveis por receber e encaminhar pacotes por conexões sem fio. Além da definição de redes multi-saltos aqui citada, Braun *et al.* (2009) ainda elenca algumas das vantagens da rede multi-saltos, sendo elas:

- Conexões entre os nós aumentam o raio de cobertura da rede que pode se estender o tanto quanto for possível expandir o número de nós na rede. Quanto mais conexões são formadas maior e mais fácil é a capacidade de comunicação da RSSF.
- O reduzido raio de transmissão acarreta na redução da potência necessária para transmissão e recepção de pacotes, possibilitando assim um uso eficiente das fontes de energia que alimentam os nós.

- Possibilidade de altas taxas de transmissão com sistemas não muito robustos. Isso se dá devido ao limitado raio de cobertura, o que significa um rápido fluxo de mensagens pela rede.
- Dependendo do protocolo de roteamento da rede, há a possibilidade de vários caminhos para uma única mensagem, significando uma maior robustez da rede.

Em uma RSSF não há uma estratégia fixa de topologia da rede e em certos casos (lugares inóspitos, de difícil acesso por qualquer meio) não há meios físicos para aplicar uma topologia. O uso de uma topologia acarreta diretamente no tempo de vida útil da rede, por isso a disposição de nós sensores de forma ordenada consegue diminuir drasticamente o uso de energia e assim prolongar o funcionamento da rede. Muito embora para os casos citados anteriormente e para redes de grande porte (redes que podem conter milhares de nós) não seja possível a disposição coordenada de nós, Kaur e Garg (2012) mostram algumas topologias que podem ser úteis para diversas situações. A Figura 2 é usada para ilustrar um exemplo de topologia em malhas (*mesh and grid*, em inglês), muito utilizada em RSSF, cujo objetivo é maximizar a área de cobertura e a robustez (associado à confiabilidade) da rede. Os nós encaminham mensagens através de multi-saltos por caminhos definidos por protocolos de roteamento de mensagem, para que possam chegar ao sorvedouro.

Figura 2 – Topologia de malhas em uma RSSF



Fonte: Próprio Autor

Por fim, sobre RSSF em si, é necessário discorrer sobre a arquitetura do nó sensor. De acordo com Dargie e Poellabauer (2010) é possível dividir um nó sensor em quatro sub-sistemas. São eles: sensoriamento, processamento, comunicação e alimentação. Processamento é o principal subsistema, este é responsável por coordenar todos os processos que ocorrem no nó sensor. É ele quem mais contribui para a relação eficiência *versus* flexibilidade, em termos de consumo e desempenho. Pois pode coordenar as ações dos outros subsistemas e determinar suas prioridades tanto para consumo de energia quanto para desempenho da aplicação (coleta e transmissão de dados). Alguns exemplos de unidades de processamento são os microcontroladores, processadores digitais de sinais e uma matriz

de portas programável em campo (FPGA, sigla em inglês para *field programmable gate arrays*).

O subsistema de sensoriamento é responsável pela coleta de dados através de sensores. Alguns exemplos podem ser citados, como: acelerômetros, sensores de temperatura, piezoelétricos, giroscópio, entre outros diversos. Os dados são convertidos por conversores analógico-digital (ADC, sigla em inglês para *analogic digital converter*) e enviados para o processador diretamente através de barramento I2C (sigla em inglês para *inter-integrated circuit*) ou da interface periférica serial (SPI, sigla em inglês para *serial peripheral interface*, do inglês).

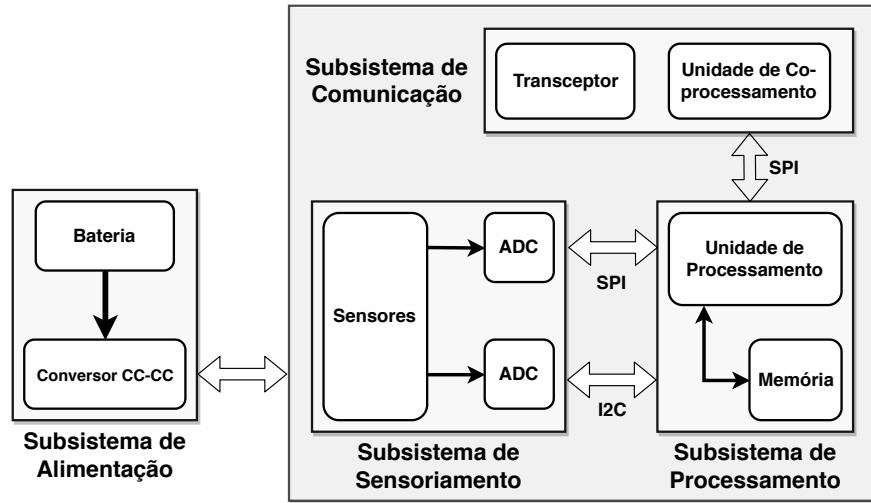
O subsistema de comunicação é responsável pelo controle e utilização do canal de comunicação de todos os dispositivos de transmissão que pertencem a uma RSSF. É reconhecidamente o subsistema que mais consome energia num nó sensor, apesar das evoluções dos transceptores (ANASTASI *et al.*, 2009). O transceptor é responsável pela transmissão e recepção de mensagens na rede. Por vezes é dotado de um sistema próprio de processamento interno, que opera os sinais de forma a evitar que o processador principal se ocupe desta tarefa. Usualmente se comunicam com o subsistema de processamento através de SPI. Podem vir dotados da funcionalidade de troca de estados, a partir do que o transceptor transita entre estados de transmissão, recepção, *stand-by* e *sleep*. Regular os estados do transceptor pode ser uma saída para seu consumo energético, pois o estado de *sleep* consome consideravelmente menos energia que os outros três estados citados (ANASTASI *et al.*, 2009).

O último subsistema é o de alimentação, responsável por manter todos os outros subsistemas e por consequência o nó sensor ativo, alimentando através de corrente contínua (CC) todo o nó sensor. A Figura 3 é usada para ilustrar a arquitetura de um nó sensor mostrando todas as conexões entre os subsistemas comentados nessa seção. Na próxima seção é descrita o padrão de rede de comunicação sem fio, o IEEE 802.15.4 WPAN que define configurações para a camada física e de controle de acesso de meio, servindo como base para o sistema proposto neste trabalho.

2.2 Definições Padrão para Configuração da RSSF

Apesar de uma estrutura geral, que define as noções básicas de uma RSSF (coleta e transmissão de dados pelo canal sem fio), um nó sensor como também uma RSSF podem ser formados a partir de componentes únicos, tendo especificações próprias e distintas de outras redes ou até mesmo dentro dos componentes da própria rede. Para facilitar o uso de uma RSSF, assim como redes de comunicação como um todo, é proposto a criação de padrões e protocolos cuja função é definir o modo de operação da rede de modo que todos os elementos componentes se comuniquem de maneira uniforme, de modo que qualquer

Figura 3 – Arquitetura de um nó sensor



Fonte: Próprio Autor

dispositivo consiga estabelecer contato com outro.

Por definição, um padrão é uma norma determinada e aprovada consensualmente pela maioria, ou por uma autoridade, que é usada como base para estabelecer uma comparação (HOLANDA *et al.*, 2010). No contexto do trabalho desenvolvido, o padrão adotado é o 802.15.4, determinado e aprovado pelo Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (IEEE, sigla em inglês para *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e é usada como base para redes de comunicação sem fio que formam uma dita Rede Pessoal Sem Fio (WPAN, sigla em inglês para *Wireless Personal Area Network*). O padrão define as duas camadas mais baixas da pilha de formação da rede, a camada física (mais conhecida como PHY) e a de controle de acesso ao meio (MAC).

A camada PHY está relacionada com o meio físico e seu principal objetivo é realizar a transmissão e recepção dos dados através de técnicas de modulação, demodulação e diversificação de canal, além da interação direta com a camada MAC e definição de protocolos. Entretanto, a camada PHY não se restringe a essas aplicações, seu outro papel é o estabelecimento de um nível mínimo de capacidade física que os módulos de comunicação devem possuir para integrar uma rede. Pode-se citar dentro destas características físicas, o mínimo de sensibilidade a sinais do circuito de recepção como também a potência de saída do sinal gerado pelo circuito de transmissão (FARAHANI, 2011; RETZ *et al.*, 2009).

Mais especificamente no padrão 802.15.4, a camada física (PHY) é definida a partir dos seguintes elementos (RASHID *et al.*, 2014):

- Três bandas de frequência de operação, todas pertencentes à faixa do espectro não-licenciada conhecida como banda Industrial, Científica e Médica (ISM, sigla em inglês para *Industrial, Scientific and Medical band*). Correspondem às bandas de

frequência que são de livre uso para todos os usuários, ao contrário de certas faixas que são restritas à televisão e emissoras de rádio por exemplo, em 868 e 915 MHz, além de 2,4 GHz;

- Divisão das bandas em canais, sendo um único canal para a banda de 868 MHz, dez canais para a banda de 915 MHz e dezesseis para a de 2,4 GHz;
- Três tipos de esquema de modulação são recomendados para uso: chaveamento binário de mudança de fase (BPSK, sigla em inglês para *Binary Phase Shift Keying*), mudança por deslocamento de amplitude (ASK, sigla em inglês para *Amplitude Shift Keying*) e chaveamento de deslocamento de fase em quadratura deslocada (O-QPSK, sigla em inglês para *Offset-Quadrature Phase Shift Keying*).
- Taxas de transferência de dados pelo canal de 20 (868 MHz), 40 (915 MHz) e 250 kbps (2,4 GHz).

Há outras definições que o padrão 802.15.4 aborda, mas o mais importante de ser citado para este trabalho são estas, como também que o módulo transceptor deve reservar uma variável de até 8 bits para o indicador de qualidade de conexão (LQI, sigla em inglês para *Link Quality Indicator*). O LQI é utilizado para definir a qualidade do sinal captado pelo receptor, conhecido como indicador de intensidade do sinal recebido (RSSI, sigla em inglês para *Received Singnal Strenght Indicator*). Usualmente o RSSI é representado em uma escala dBm referente à potência do sinal captado na antena de recepção.

A camada de controle de acesso ao meio (MAC), por sua vez, trata de coordenar a interface entre a camada física PHY e as camadas superiores da rede. De forma simplificada, é a responsável por indicar que houve recepções, comandar transmissões, repassar informações de *status* da rede para que o nó possa trabalhar de forma coordenada dentro da rede, dentre outros (FARAHANI, 2011).

Acima da camada MAC encontram-se as camadas de gerenciamento de rede e aplicação, que variam de acordo com o padrão utilizado. Exemplo de padrão projetado nas bases do 802.15.4 está o ZigBee (ALLIANCE, 2008). Talvez o mais famoso entre os padrões, propõe uma aplicação de redes sem fio de baixo consumo de energia e baixo custo de fabricação, podendo ser aplicado em diversos setores da sociedade de maneira simplificada. Outros que podem ser mencionados são os padrões para implementação de RSSF em ambiente industrial: o ISA 100.11a (STANDARD, 2009) e o WirelessHART (COMMISSION *et al.*, 2010).

Estes padrões mencionados são responsáveis por, entre outros inúmeros aspectos, definir os tipos de nós que compõem a rede, a forma com que esses nós formam ligações, os tipos de mensagem que circulam na rede e como essas mensagens circulam. Estes pontos citados são abordados neste trabalho, embora não é adotado nenhum outro padrão

existente para as camadas mais altas (como as camadas de rede e de aplicação). Em outras palavras, é proposto neste trabalho uma forma de avaliar uma técnica de roteamento, relacionado à camada de rede, através de um sistema particular nas bases da camada física e de controle de acesso ao meio definidos pelo 802.15.4. Na próxima seção estão contidos os modelos de consumo de energia pelo nó sensor, tanto em termos de processamento quanto do envio e recepção de mensagens.

2.3 Modelo de Consumo de Energia

De todas as restrições associadas a uma RSSF, a limitação de energia do nó sensor é uma das mais impactantes no projeto de uma rede. Sendo assim, é vital o uso otimizado das fontes de energia dos nós sensores. Os modelos apresentados nesta seção são propostos para equacionar o consumo de energia tanto internamente ao nó sensor, quanto à transmissão e recepção de mensagens, fazendo referência aos subsistemas de processamento e comunicação respectivamente.

2.3.1 Modelo de Energia para o Processamento

Assim como é citado na Seção 2.1, o subsistema de processamento é composto geralmente por unidades de microprocessamento como microcontroladores e FPGAs. De acordo com Sinha e Chandrakasan (2000), a potência consumida por um sistema microprocessado durante a execução de uma sub-rotina³ pode ser expressa de acordo com a Equação 2.1. Em que a potência total (P_{tot}) é a soma da potência dinâmica (P_{dyn}) mais a potência estática (P_{stat}).

A potência dinâmica é representada pela relação entre a média da capacitância total que está sendo chaveada na execução da sub-rotina por ciclo de *clock* (C_L), com o quadrado da tensão de alimentação do transistor (V_{dd}) e a frequência em que ocorre um ciclo de *clock* (desde que suponha-se não haver correntes de polarização no seu núcleo) (f).

A potência estática por sua vez é relação entre a potência dissipada pelo transistor em forma da corrente de fuga⁴ (I_{leak}) e V_{dd} .

$$P_{tot} = P_{dyn} + P_{stat} = C_L V_{dd}^2 f + I_{leak} V_{dd} \quad (2.1)$$

³ Aqui uma sub-rotina refere-se a uma parte do *firmware*, ou da aplicação que o sistema microprocessado executa. Sub-rotinas permitem que uma mesma sequência de instruções seja executada em diferentes pontos de uma aplicação, sob diferentes conjuntos de dados. Exemplos de sub-rotinas para o nó sensor são a aquisição de dados, transmissão e recepção de dados e retransmissão de mensagens. Todas essas são partes do *firmware* do nó sensor, que operam em momentos independentes dentro da aplicação.

⁴ *Leakage current* do inglês, geralmente associada aos transistores da unidade de processamento. Estas perdas estão associadas à redução da tensão de alimentação, que demanda um maior limiar de tensão de operação dos transistores para que seja mantida a corrente de acionamento. Como consequência do aumento deste limiar, há um aumento substancial da corrente de fuga (ROY; MUKHOPADHYAY; MAHMOODI-MEIMAND, 2003).

Levando em consideração uma sub-rotina cuja execução tem um intervalo de tempo Δt_{sub} , é possível calcular a energia consumida durante toda uma execução desta sub-rotina. Durante o intervalo Δt_{sub} , há um número determinado de ciclos de *clock*, ou seja o valor do tempo de execução é o número total de ciclos (N_{tick}) dividido pela duração de cada ciclo (f), na forma $\frac{N_{tick}}{f}$. Se levarmos em consideração que C_L é a capacidade total média por ciclo, a capacidade total chaveada durante a execução de uma sub-rotina (C_{tot}) é o valor de C_L vezes o número total de ciclos N_{tick} . Isto posto, é possível obter a equação que determina a energia consumida (E_{tot}) através da Equação 2.1, conforme a Equação 2.2, na forma de P_{tot} vezes o intervalo de tempo Δt_{sub} (SINHA; CHANDRAKASAN, 2000).

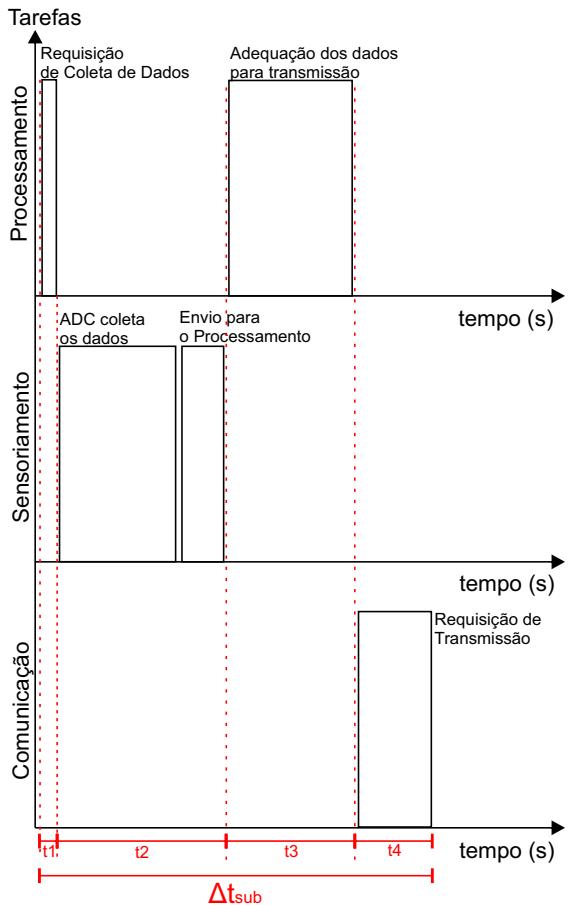
$$\begin{aligned}
 E_{tot} &= P_{tot}\Delta t_{sub} = (C_L V_{dd}^2 f + I_{leak} V_{dd}) \cdot \Delta t_{sub} \\
 E_{tot} &= \left[(C_L V_{dd}^2 f) \cdot \frac{N_{tick}}{f} \right] + I_{leak} V_{dd} \Delta t_{sub} \\
 E_{tot} &= [(C_L \cdot N_{tick}) V_{dd}^2] + I_{leak} V_{dd} \Delta t_{sub} \\
 E_{tot} &= C_{tot} V_{dd}^2 + I_{leak} V_{dd} \Delta t_{sub}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Na Equação 2.2, C_{tot} se refere ao valor total durante a execução da sub-rotina e não é associado ao tempo de execução da sub-rotina, pois essencialmente o número de transições no circuito integrado (ligado ao valor de N_{tick}) são executadas para uma mesma sub-rotina. A variação no consumo de energia estaria associado então a corrente de fuga durante o tempo de execução da sub-rotina, como é apontado por Sinha e Chandrakasan (2000).

Com o modelo apresentado na Equação 2.2 é possível modelar o consumo de um nó sensor por processamento no intervalo de tempo de execução. Esta modelagem está condicionada às características de construção do nó sensor; em que é necessário saber a capacidade média total no nó sensor, e assim determinar o consumo total de energia numa sub-rotina dentro do nó sensor.

Um exemplo que pode ser dado é: a unidade de processamento faz uma requisição de dados coletados pelo subsistema de sensoriamento, os dados convertidos pelo ADC são transmitidos ao subsistema de processamento, o processador ajusta os dados no formato do protocolo de mensagem da rede pelo processador, a mensagem é então encapsulada no formato do protocolo, para ser então encaminhada ao subsistema de comunicação via SPI. A capacidade total chaveada, para todos os transistores que participaram na execução de todas essas ações é C_{tot} e o tempo total decorrido da operação é Δt_{sub} . A Figura 4 é usada para mostrar um diagrama temporal que apresenta todas as tarefas executadas e seus respectivos tempos de execução do exemplo citado em cada subsistema, além de apontar o tempo total de execução Δt_{sub} .

Figura 4 – Diagrama temporal de execução de uma sub-rotina



Fonte: Próprio Autor

Na transmissão de mensagens é utilizado outro modelo de consumo de energia, baseado na energia consumida para que seja possível a transmissão e recepção de pacotes de dados. Este outro modelo, será apresentado na seção 2.3.2, a qual é o adotado para a validação dos resultados à respeito do desempenho do sistema proposto neste trabalho.

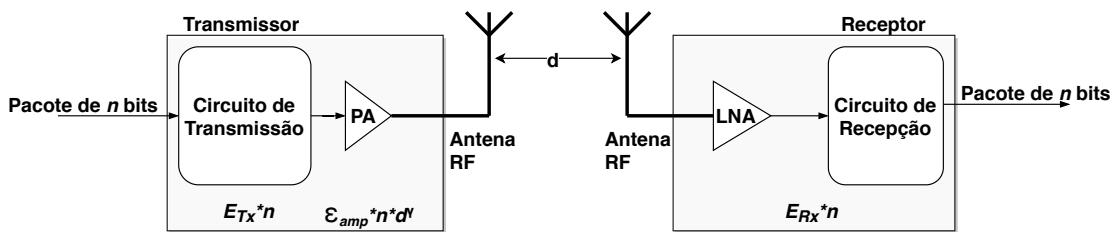
2.3.2 Modelo de Energia para a Comunicação

Modelos para determinação do consumo do subsistema de comunicação são extensamente propostos por trabalhos científicos da área. A principal abordagem é a quantificação da energia consumida para gerar um sinal com a potência necessária para atravessar o meio ao qual é submetida a RSSF e que consiga ir de um nó sensor a outro ou ao sorvedouro. Além da quantificação da energia que se consome para receber este sinal transmitido de forma correta, este modelo é apresentado em detalhes por Tudose, Gheorghe e Tapus (2013), principalmente o modelo para RSSF multi-saltos adotado neste trabalho. Outros modelos de consumo de energia são apresentados a seguir: um é baseado no meio de transmissão, sendo levado em consideração fatores como probabilidade de erro, largura de banda do canal, esquema de modulação, fator de perda do canal(ZARDOSHT; ALMODARRESI,

2012). O outro modelo baseia-se na energia consumida ao longo do tempo em que o nó sensor está operando. Observando neste caso o tempo em que o módulo de rádio passa em seus estados de operação: transmissão, recepção, *stand-by* e *sleep*. (MIGABO *et al.*, 2015).

Para a modelagem da energia consumida durante a comunicação de um nó sensor, é necessária uma visualização da estrutura básica do problema: estimar a energia necessária para encaminhar um pacote de n bits de um transmissor para um receptor. Na Figura 5 há uma representação do modelo de consumo baseado no problema citado. Este modelo é apresentado por Tudose, Gheorghe e Tapus (2013) que equaciona o consumo energético de uma RSSF multi-saltos.

Figura 5 – Modelo de transmissão de uma mensagem



Fonte: Adaptado de Tudose, Gheorghe e Tapus (2013)

Nesta figura, o módulo de transmissão é composto por um circuito de transmissão e um amplificador de potência (PA, sigla em inglês para *Power Amplifier*). Recebe como entrada um pacote de n bits, que é processado e amplificado pelo PA e transmitido pela antena RF. O módulo de recepção é composto por um amplificador de baixo ruído (LNA, sigla em inglês para *Low Noise Amplifier*)⁵ e um circuito de recepção. A mensagem transmitida pelo módulo de transmissão é captada por o de recepção, esta mensagem é amplificada pelo LNA e logo após processada pelo circuito de recepção que tem por objetivo reconstituir o pacote de n bits enviado pelo transmissor.

Estando os dois módulos separados por uma distância d , o transmissor precisa de uma energia E_{trans} para que possa enviar um pacote de dados para o receptor. Esta energia depende da distância d e o número de bits n , e é definida pela seguinte equação:

$$E_{trans}(n, d) = E_{Tx} \cdot n + \varepsilon_{amp} \cdot n \cdot d^\gamma \quad (2.3)$$

Em que: E_{Tx} é a energia necessária para o circuito de transmissão realizar o processamento por bit (sua unidade é joule por bit) e $\varepsilon_{amp} \cdot n \cdot d^\gamma$ é a energia consumida por bit pelo PA para gerar a amplificação necessária para que o sinal produzido no circuito de transmissão

⁵ Têm por principal função fornecer ganho o suficiente para o sinal, que possa superar o ruído gerado no circuito de recepção (SETTE *et al.*, 2015).

possa chegar no receptor (sua unidade é joule por bit) e γ representa o fator de perda no canal⁶.

A potência total do PA é dependente da sua construção física, que varia entre diversas implementações de rádios RF. É dependente de fatores como característica de carga, potência de saída do PA, frequência de operação do rádio e condições de polarização da fonte em corrente contínua (WANG; HEMPSTEAD; YANG, 2006). Para dimensionamento do valor representado por ε_{amp} Chen, O'Dea e Callaway (2002) equaciona, para utilização ótima do PA, da forma apresentada na Equação 2.4.

$$\varepsilon_{amp} = \frac{\left(\frac{S}{N}\right)(NF_{Rx})(N_0)(BW)\left(\frac{4(\pi)}{\lambda}\right)^\gamma}{(G_{ant})(\eta_{amp})(R_{bit})} \quad (2.4)$$

Em que: $\frac{S}{N}$ é o valor mínimo de relação sinal ruído, que relaciona a amplitude do sinal com a amplitude do ruído percebido no receptor (valor numérico). NF_{Rx} por sua vez é a figura de ruído na recepção (valor numérico), N_0 é o ruído térmico ambiente na banda de 1 Hz (sua unidade é joule). BW representa a largura de banda do canal (sua unidade é hertz) e λ o comprimento de onda do sinal (sua unidade é metros). G_{ant} representa o ganho da antena (valor numérico), η_{amp} (valor numérico), a eficiência do PA e, por fim, R_{bit} é a taxa de transferência de dados pelo canal (sua unidade é bits por segundo). Associando todas as unidades de medida das grandezas que compõem o valor de ε_{amp} . A unidade que representa o valor de ε_{amp} é joule por bit metro elevado à γ ($\frac{J}{bit \cdot m^\gamma}$).

A energia consumida para a recepção de um sinal (E_{recep}) é representado em Tudose, Gheorghe e Tapus (2013) pela relação entre a energia necessária para o processamento do pacote de dados (E_{Rx}) e seu tamanho n . Esta relação é representada na Equação 2.5.

$$E_{recep} = E_{Rx} \cdot n \quad (2.5)$$

Esse modelo é proposto assumindo que a comunicação entre dois nós sensores é simétrica e o custo para se enviar uma mensagem de um nó para outro é igual em ambos os sentidos. Ainda, o modelo representa uma comunicação entre dois nós sensores, para uma rede multi-saltos é necessário uma análise em toda a rede.

2.3.3 Modelo de Energia para RSSF Multi-saltos

Devido à característica da rede multi-saltos, um pacote de dados emitido por um nó sensor pode necessitar passar por outros nós sensores que encaminham esta mensagem para o sorvedouro. Neste tráfego é realizado sucessivas recepções e retransmissões ao longo do caminho. Este caminho comumente é determinado por um algoritmo de rotas que

⁶ Valor numérico que está relacionado com perdas para o meio, é avaliado através de aproximação estatística do modelo de propagação eletromagnética do sinal, tem valor entre 2 e 4. Para propagação ao ar livre, por exemplo, γ vale 2 (MIRANDA *et al.*, 2013).

determina o menor caminho possível dentro de suas restrições. Ao longo de uma rota traçada com N nós, em que o sorvedouro não é tratado como um nó sensor^{7,8} e o nó que origina a mensagem tratado como o N -ésimo nó, é realizado um total de N transmissões e $N - 1$ recepções. Seguindo o modelo apresentado na seção 2.3.2, Tudose, Gheorghe e Tapus (2013) apresenta um modelo de consumo de energia para RSSF multi-saltos (E_{MS}) na forma apresentada na Equação 2.6.

$$E_{MS}(N, n, d) = N \cdot E_{trans}(n, d) + (N - 1) \cdot E_{recep}(n) \quad (2.6)$$

Utilizando das Equações 2.3 e 2.5 é possível obter a expansão da Equação 2.6, na forma da Equação 2.7:

$$\begin{aligned} E_{MS} &= N(E_{Tx} \cdot n + \varepsilon_{amp} \cdot n \cdot d^\gamma) + (N - 1)(E_{Rx} \cdot n) \\ &= n \cdot (N \cdot (E_{Tx} + E_{Rx} + \varepsilon_{amp} \cdot d^\gamma) - E_{Rx}) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Com este modelo definido é possível avaliar o consumo de energia para um nó sensor enviar informações até o sorvedouro por meio de $(N - 1)$ intermediários, tendo rotas fixas ou mutáveis de acordo com a necessidade. Na proposta deste trabalho, o papel do algoritmo de roteamento é alterar a rota de forma a balancear o consumo de energia de toda a rede, de forma que evite que a rota seja traçada por somente um caminho, prejudicando os nós próximos ao sorvedouro, que possuem um elevado tráfego de mensagens, podendo ficar inutilizados muito mais rápido. Na próxima seção é tratado sobre protocolos e algoritmos de roteamento. A Tabela 1 é usada para listar as principais equações utilizadas posteriormente neste trabalho.

2.4 Protocolos de Roteamento para RSSF

De forma direta, o papel do protocolo de roteamento é encontrar o melhor caminho entre um nó emissor e um nó de destino. Realizando esta tarefa através da criação de uma tabela de direções, um protocolo tenta encontrar a menor e mais eficiente rota de acordo com o critério de desempenho adotado para a rede (KUMARI; NAND, 2016).

No geral, é atribuído ao protocolo a função de estabelecer comunicação entre nós, traçar a rota, organizar a estrutura da rede e definir próximo salto direcionando a mensagem ao destinatário. Desta forma, um protocolo de roteamento possui quatro arranjos a serem definidos: Forma de operação; Seleção de próximo salto; Estabelecimento de Caminho; Estrutura de Rede. (MISHRA *et al.*, 2017).

⁷ Implicando que para efeitos da avaliação do consumo de energia, não é computado sua recepção dos dados transmitidos.

⁸ Para levantamento do modelo, o sorvedouro é ignorado, pois é tratado como possuindo uma fonte ininterrupta de energia.

Tabela 1 – Equações para modelagem de consumo energético

Equação	Descrição	Observação
$E_{trans}(n, d)$	Consumo energético para transmissão de mensagens	Sempre que um nó sensor realiza uma transmissão, sua reserva energética é deduzida no valor calculado nessa equação. É dependente da distância entre o transmissor e o receptor, de características como o canal de transmissão e circuito de amplificação de sinal inerente ao transceptor de rádio. O tamanho da mensagem a ser enviada também afeta diretamente o valor do consumo de energia.
E_{recep}	Consumo energético para recepção de mensagens	Está vinculado a recepção de dados por um módulo transceptor. Depende somente de características do transceptor, além do tamanho em bits da mensagem interceptada.
$E_{MS}(N, n, d)$	Energia total consumida para enviar uma mensagem por uma rota	Em uma RSSF multi-saltos, para enviar uma mensagem por uma rota é necessário realizar sucessivas retransmissões de mensagens. Uma retransmissão significa que o nó sensor executou uma recepção e uma transmissão. Esta equação relaciona então a quantidade de transmissões e recepções de mensagens realizadas em uma rota e estima o consumo energético a partir daí. É dependente das outras duas equações apresentadas anteriormente nesta Tabela.

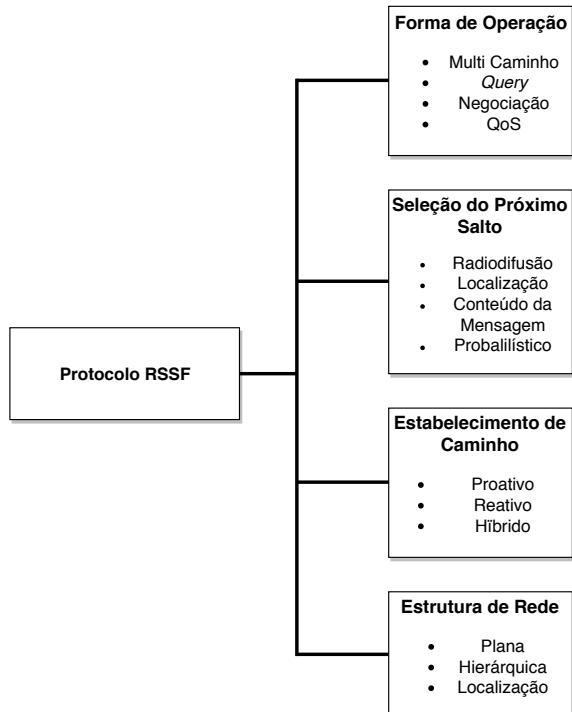
Fonte: Próprio Autor

Dentro de cada um dos arranjos é possível alocar diferentes formas de se projetar um RP, sendo este protocolo formado pela junção de características de cada arranjo. Mishra *et al.* (2017) cita alguns dos possíveis tipos de protocolos dentro dos arranjos, como pode ser visto na Figura 6. A seguir é elencado características de protocolos alguns dos protocolos listados que são relevantes para o trabalho.

2.4.1 Forma de Operação

A forma de operação é relacionada com a forma que uma RSSF prioriza e direciona o funcionamento da rede. Um protocolo QoS, por exemplo, objetiva-se em operar a rede de forma que esta apresente desempenho favorável em relação a métricas predefinidas.

Figura 6 – Classificações de RP de acordo com seus arranjos



Fonte: Adaptado de Mishra *et al.* (2017)

Aqui são apresentados o protocolo de multi caminho e baseado em QoS.

Protocolos de multi caminho descobrem mais de uma rota para encaminhar mensagens de um emissor ao receptor. A mesma mensagem é enviada pelas rotas descobertas, sem a avaliação das rotas como as melhores possíveis. Como principal ponto positivo está a confiabilidade proporcionada pelas múltiplas rotas, a principal desvantagem é o fato de que boa parte da energia consumida pela rede vai para a descoberta de rotas, escalando com o tamanho da rede (TAHA *et al.*, 2017).

QoS é definido como um conjunto de requisitos que uma rede precisa cumprir para garantir a qualidade com que mensagens são trocadas entre nós. Entre as métricas que definem a QoS estão: Taxa de transferência mínima da rede (bps); *Delay* máximo tolerável para a mensagem ir do remetente ao destinatário; Balanceamento do consumo de energia da rede; Taxa de perda de pacotes máxima tolerável. A priorização destas métricas varia de acordo com a utilização da RSSF, mas para que um protocolo seja considerado baseado em QoS, deve cumprir ao menos uma destas métricas (BAROLLI *et al.*, 2011).

Entre os métodos de roteamento baseado em QoS, dois são destacados aqui: roteamento que maximiza o tempo de vida da RSSF e um protocolo que realiza encaminhamento de mensagens com o menor custo possível. O roteamento se destina a definir custos aos possíveis caminhos formados entre nós. Para protocolos de roteamento cliente de energia, este custo é baseado na energia remanescente no nó sensor e na energia necessária para

transmitir um pacote por este caminho. Como solução, o papel do roteamento é prolongar ao máximo a duração da bateria dos nós sensores na RSSF.

O encaminhamento de mensagens tenta de forma simples e escalável encontrar o menor caminho dentro de uma RSSF de muitos nós sensores. A função de custo se utiliza das métricas de QoS para determinar as rotas com menores custos. O protocolo utiliza destes custos para montar multicaminhos para uma mensagem, que pode ser descartada se a rede detectar que não é preferível continuar seu encaminhamento através da rede. Desta forma, deve-se através de um encaminhamento eficiente de mensagens minimizar o número de saltos pela rede, o que afeta por exemplo o *delay* máximo entre a mensagem ser enviada pelo nó sensor e ser recebida pelo sorvedouro(GOYAL; TRIPATHY, 2012).

2.4.2 Seleção do Próximo Salto

Como o próprio nome cita, a seleção de próximo salto foca na forma com que o protocolo determina o próximo salto da mensagem de um nó sensor para outro, ou para o sorvedouro. A forma mais básica é por radiodifusão de mensagens (*Broadcast*, em inglês) e consiste em transmitir para todos os nós de forma indiscriminada dentro de seu raio de cobertura de forma a garantir que a mensagem atinja o módulo de destino. Bambere e Ghosh (2016) aponta a vantagem da radiodifusão para redes em que os nós funcionam de forma síncrona, pois há uma maior garantia que os nós estejam em funcionamento no instante de difusão da mensagem, gerando menos custo energético para a RSSF. Porém, o caso mais comum e mais viável é a operação da rede de forma assíncrona, gerando uma incerteza⁹ que pode ser bastante custosa para a utilização de protocolos baseado em difusão.

Para seleção de salto baseado em localização é necessário que os nós componentes da rede saibam a distância entre ele e o restante dos nós da rede. A partir da informação da posição, a rota é traçada de forma que a mensagem percorra a menor distância. Este arranjo age principalmente na execução do algoritmo de roteamento. Kumari *et al.* (2015) lista alguns protocolos baseados em localização, como o GEAR (*Geographic and Energy Aware Routing*, em inglês), que utiliza um sistema de informação geográfica para determinar a localização dos nós, e encaminha as mensagens de acordo com o nível energético dos nós vizinhos.

Protocolos pautados em aproximações probabilísticas para seleção utilizam de métodos matemáticos ou algoritmos heurísticos para cálculo ótimo da rota. O objetivo é gerar uma rota que otimize parâmetros de qualidade da rede, proporcionando principalmente uma melhoria no consumo energético da rede, muito embora outros parâmetros de QoS possam ser otimizados. Em Singh e Sharma (2012) é apresentado um exemplo de seleção

⁹ Não saber quais são os nós que estão ativos ou inativos no momento da comunicação.

de salto baseado em otimização por algoritmo genético, em que o foco é elaborar uma estratégia de elitismo para melhorar o desempenho do protocolo de roteamento.

2.4.3 Estabelecimento de Caminho

O arranjo de estabelecimento de caminho é relacionado com a forma de descoberta de possíveis caminhos, quais e quantos nós sensores há na vizinhança e a possibilidade de conexão com estes. É dividido em três categorias: Protocolo pró-ativo, reativo e híbrido. Em protocolos pró-ativos cada nó sensor é responsável por montar sua rota até o sorvedouro, e para isso se utilizam de tabelas de distância entre nós ou outras formas para se determinar quais os caminhos disponíveis. Um exemplo clássico de protocolo pró-ativo é o DSDV (do inglês *Destination-sequenced distance vector*), neste protocolo a estação de processamento envia através do sorvedouro, para os nós sensores, rotas etiquetadas. Estas rotas são desde os nós sensores até o sorvedouro, a etiqueta associa a rota sua data de criação. Os nós sensores por sua vez calculam novas rotas, se estas possuem uma etiqueta mais atual que a informada pela central, como resultado, há então uma substituição da rota. Desta forma, há duas maneiras de realizar o roteamento: o sorvedouro é responsável por atualizar a tabela de rotas de todos os nós sensores ou os nós sensores atualizam suas rotas que possuem etiquetas mais atuais(em inglês esses dois métodos são conhecidos como *full dump* e *incremental update* respectivamente) (RAHMAN; ZUKARNAIN, 2009).

Protocolos reativos, por sua vez, estabelecem caminhos por demanda, difundindo pela rede mensagens de requisição de rota. Nesse tipo de protocolo, o nó sensor interessado em enviar dados ao sorvedouro inunda a rede com mensagens para descoberta dos possíveis caminhos ao destino. Os outros nós componentes da rede enviam resposta de volta ao nó que deseja enviar seus dados, então a partir destas informações o nó sensor estabelece as rotas para encaminhamento de mensagem. Um exemplo comum deste protocolo é o AODV (do inglês *Ad-hoc on-demand distance vector*) que é uma adaptação do protocolo de Bellman-Ford¹⁰ para redes *ad-hoc* e posteriormente para RSSF.

Por último, protocolos híbridos, são uma aglutinação de características de protocolos reativos e pró-ativos, geralmente utilizando-se de requisições de rotas para manutenção da tabela de roteamento nos nós sensores, outro exemplo comum de protocolo híbrido é o ZRP (que em inglês escreve-se *Zone routing protocol*). No ZRP, zonas de nós sensores são formados e o raio que delimita uma zona é a quantidade de saltos de distância de um nó sensor central. Se o nó remetente da mensagem é o central e o destino está dentro de sua zona, utiliza-se uma tabela de roteamento, caso contrário o caminho é estabelecido por meio de um protocolo reativo (DILLI; REDDY, 2016).

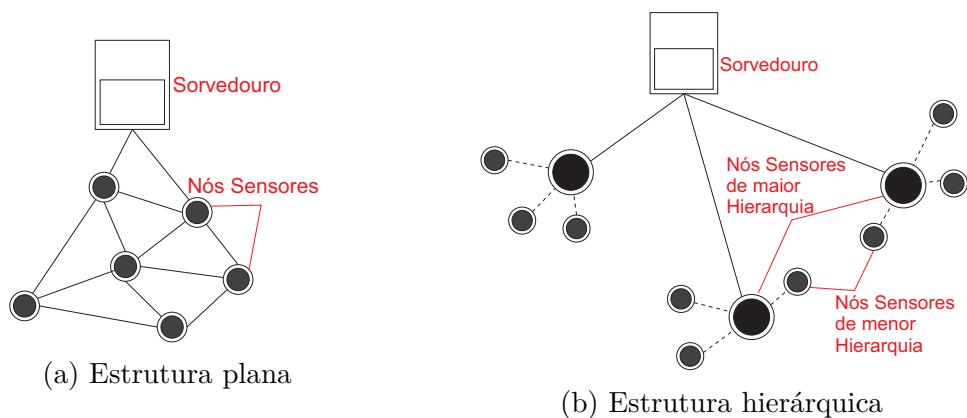
¹⁰ Baseado no algoritmo de Bellman-Ford, que é uma solução do caminho mais curto de única origem para casos gerais (CORMEN *et al.*, 2002).

2.4.4 Estrutura de Rede

Quanto ao arranjo de estrutura de rede, os protocolos são classificados de acordo com as classes de nós sensores e seu papel para a RSSF. Para um melhor entendimento é comparado aqui a estrutura plana com a hierárquica. Na estrutura plana, todos os nós sensores desempenham o mesmo papel e por isto cabem a eles enviarem seus dados diretamente ao sorvedouro. Se por ventura o roteamento é realizado com retransmissão de mensagens, eventualmente os nós sensores que participarem da rota traçada agregam seus dados à mensagem gerada. Este agregamento de dados cria uma certa eficiência no funcionamento do protocolo, pois ao complementarem uma mensagem que estes nós retransmitem com seus próprios dados, elimina-se a necessidade de ser traçadas novas rotas para que estes nós enviem seus dados (TUDOSE; GHEORGHE; TAPUS, 2013).

Enquanto isso na estrutura hierárquica há uma divisão dos nós sensores quanto ao seu papel na rede. Por serem habitualmente focados em eficiência energética¹¹, nós com maior capacidade energética ficam responsáveis por reter os dados transmitidos por nós sensores com menor capacidade energética para então encaminhar todos os dados para a central de processamento. Então assim, há uma estratificação do papel dos nós sensores em que cria-se um dependência daqueles de menor classe para os de maior classe. O esquema apresentado na Figura 7 é usado para mostrar a diferença entre as duas formas de montar a estrutura da rede, em que é mostrado na Figura 7a, a estrutura plana, e na Figura 7b, a hierárquica.

Figura 7 – Estruturas de rede plana e hierárquica



Com a definição dos possíveis arranjos de um protocolo, é possível descrever o método proposto neste trabalho como sendo de estrutura hierárquica, pró-ativo, baseado em *QoS* e o próximo salto definido pela combinação entre a localização e o nível de bateria dos nós sensores. No Capítulo 3 há uma descrição mais aprofundada dos motivos para tais escolhas de protocolo.

¹¹ Como fica claro nos protocolos LEACH (JIANG, 2018; BIRAJDAR; SOLAPURE, 2017) e PEGASIS (SUJATA, 2017) (sigla em inglês para *Power-efficient gathering in sensor information systems*)

2.5 Algoritmo Genético

Por definição, a solução de um problema de otimização é encontrar dentre um conjunto de respostas, aquela que proporciona o melhor desempenho do que se quer otimizar, dentro das limitações impostas pelo problema (JR; YONEYAMA, 2000). Esta solução pode ser somente uma solução local, muitas vezes não sendo a melhor possível, e é considerada ótima pois todas as outras soluções contidas no conjunto disponível não a superaram dentro de todos os objetivos considerados (AUSIELLO *et al.*, 2012; ZITZLER; THIELE, 1998). De forma geral, o problema enfrentado no roteamento eficiente para RSSF é de otimização devido à estrutura de nós da rede, que proporciona inúmeras soluções para a rota desejada. Ou seja, é necessário obter uma solução ótima dentro das possíveis rotas.

Os objetivos se relacionam a todos os fatores, e combinações destes, que envolvem a formulação do problema e suas soluções. Otimizar é, então, maximizar ou minimizar¹² uma função $P(x)$, em que x é uma solução contida num espaço de busca de soluções possíveis S (TANOMARU, 1995). A Equação 2.8 expressa, de forma matemática, o conceito apresentado.

$$\min \quad P(x) | x \in S \quad (2.8)$$

Três métodos gerais de otimização podem ser classificados: métodos probabilísticos, numéricos e enumerativos, além de métodos híbridos que misturam características dos outros métodos.

Métodos numéricos se utilizam de aproximações matemáticas para cálculo da função $P(x)$. Pode ser resolvida de forma analítica, desde que a função seja explicitamente conhecida e derivável, ou alguma aproximação por derivação, em que é possível calcular sua derivada e igualar a zero. Outro método é através de cálculo numérico. É empregado quando não há aplicação do método analítico, e utiliza-se de métodos diretos ou iterativos para equações lineares¹³ ou de aproximações para equações não-lineares¹⁴. Como carga negativa, estes métodos são capazes de gerar somente ótimos locais e em funções no espaço discreto, não é possível utilizar uma resposta analítica (TANOMARU, 1995).

Métodos enumerativos se utilizam de buscas exaustivas para procura de soluções. Consiste basicamente em aplicar todas as soluções possíveis ao problema e determinar assim o máximo global do problema. O ponto negativo é que para conjuntos de soluções infinitos ou muito grandes, esse método é infactível (ARROYO *et al.*, 2002).

Métodos probabilísticos fazem uso de parâmetros estocásticos e análise de dados para otimização de processos baseado diretamente na análise da qualidade das soluções

¹² Para problemas relacionados com roteamento em RSSF, está relacionada com a minimização do custo do caminho percorrido pelos dados numa rota, embora sua conversão para maximização ocorre de maneira simples, como um operador matemático -1 por exemplo.

¹³ Como exemplos o Método da Eliminação Gaussiana ou de Jacobi (CUNHA, 2000).

¹⁴ Método de Newton, por exemplo (CUNHA, 2000).

x para a função $P(x)$. Como principal vantagem frente aos outros métodos, está a possibilidade de se trabalhar com qualquer sistema desde que haja parâmetros suficientes, retornando soluções ótimas com precisão satisfatória. Algoritmos heurísticos estão relacionados à métodos probabilísticos. Surgem da necessidade de obter-se solução para problemas de dificuldade não-polinomial de forma satisfatória e em tempo hábil, objetivo que não é possível por métodos numéricos analíticos (ARROYO *et al.*, 2002).

Heurísticas podem ser classificados em heurísticas construtivas, de busca local e as metaheurísticas. As construtivas são específicas para um problema e incorpora elementos particulares deste problema para gerar soluções. É visível sua limitação quanto à usabilidade de métodos construtivos, pois se restringem somente ao problema em particular. Busca local se utiliza de todas as soluções do problema para criar um espaço de busca limitado que se movimenta através do espaço de soluções, incorporando a melhor solução que encontrar durante a busca. Aqui a eficiência de execução de uma heurística de busca local está relacionada com o conjunto inicial de soluções, que pode restringir a execução do algoritmo e limitar a escolha de soluções dentro do espaço.

Métodos metaheurísticos, por sua vez, são flexíveis e adotam características dos outros dois métodos heurísticos. Mas, diferente do método construtivo, esse é proposto como um método genérico, que se adaptam a novas situações com facilidade. Incorpora também a capacidade de exploração do espaço de busca dos métodos de busca local. É um método utilizado para encontrar ótimos locais, muito embora não há garantia de se encontrar a resposta global do sistema (ARROYO *et al.*, 2002).

Como exemplos de metaheurísticas tem-se os algoritmos de busca tabu, otimização por enxame de partículas (VIJAYALAKSHMI; ANANDAN, 2019) (PSO, sigla em inglês para *Particle swarm optimization*), colônia de formiga (SOUZA; LOPES; ALENCAR, 2011) e o próprio algoritmo genético (AG). Colônia de formiga e AG são exemplos de heurísticas baseadas em processos físicos e fenômenos da natureza, interesse comum em muitos estudos para desenvolvimento de algoritmos heurísticos, tendo como um dos primeiros estudos o AG proposto por Holland (1992) (SRINIVAS; PATNAIK, 1994).

Dentre estes algoritmos citados, o AG é o escolhido para este trabalho por sua característica de explorar conjuntos de soluções no espaço de busca tentando direcionar a busca para possíveis pontos ótimos. Este aspecto é positivo para um espaço com muitas soluções¹⁵, de forma que é possível explorar dentro de um conjunto de soluções uma extensa área do espaço e estas soluções se aprimorarem até um possível ótimo local.

O AG surge inspirado nos processos naturais de evolução das espécies através da alteração do seu código genético. Emprega-se modelagem computacional para aproximar os fenômenos de cruzamento, mutação, seleção natural e reprodução dos indivíduos de um

¹⁵ Como são as possíveis rotas em uma RSSF com um grande número de nós sensores.

espécie dentro de um ambiente (LINDEN, 2008).

Esses processos se traduzem para a execução do algoritmo genético para otimização, em que um conjunto de possíveis soluções é denominado de população e cada solução desta população é conhecido como indivíduo ou cromossomo. Estes indivíduos passam por etapas de cruzamento, mutação e seleção para gerar uma nova população. Estas etapas são repetidas em iterações conhecidas por gerações. Cada indivíduo é associado à um valor de aptidão, uma estimativa de sua função objetiva, o que o qualifica entre outros indivíduos, em que a melhor aptidão gera os melhores indivíduos com maiores chances de transmitirem seu código genético para as próximas gerações. Ao fim do número de gerações estipulados a melhor aptidão elege o melhor indivíduo que decodificado fornece a solução para o problema, com grandes chances da mesma ser o ótimo local do conjunto escolhido. A seção 2.5.1 explana de forma mais detalhada as etapas de execução de um AG.

2.5.1 Etapas de Execução de um Algoritmo Genético

A primeira etapa para execução de um AG é a codificação do indivíduo. Tanomaru (1995) apresenta uma definição da codificação como sendo a forma de representar cada possível solução x dentro de um espaço S como uma sequência de símbolos gerados a partir de um alfabeto. Um exemplo simples de alfabeto é o binário, em que representa-se cada símbolo como sendo 0 ou 1.

Outro exemplo é o método de codificação empregado neste trabalho, o método de chaves aleatórias (BARAN; WU, 1989). Esta codificação representa os símbolos utilizando um alfabeto de números aleatórios. Estes números servem de critério de escolha na etapa de decodificação da solução. Sua principal vantagem consiste na eliminação do problema de inviabilidade de solução após um cruzamento de indivíduos (BEAN, 1994). Uma aplicação para esta codificação pode ser vista em Snyder e Daskin (2006), em que um AG com codificação de chaves aleatórias é usado para avaliar soluções para o problema do Caixeiro Viajante¹⁶. O método é mais bem detalhado com a aplicação proposta no Capítulo 3.

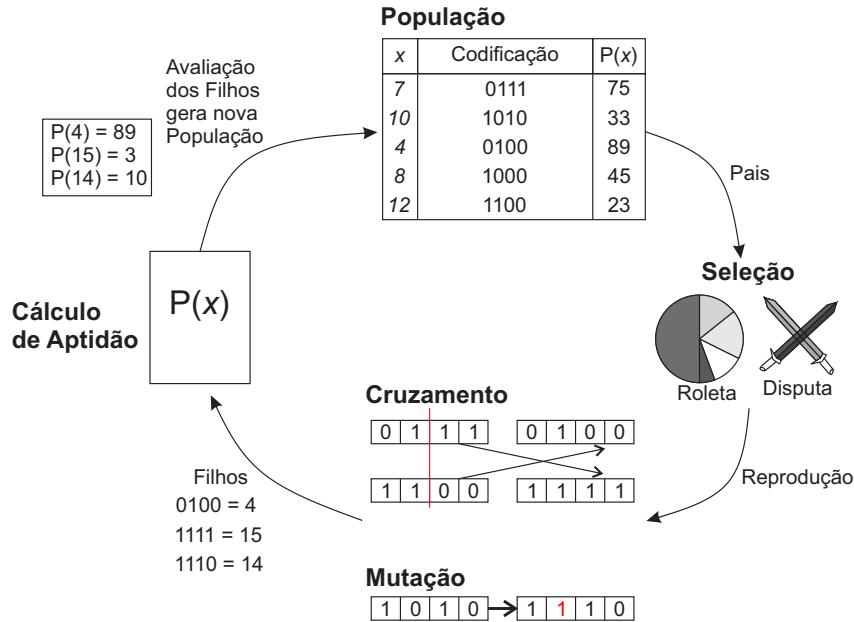
A etapa seguinte é a criação da população inicial, em que é gerado de forma aleatória uma quantidade de indivíduos codificados a partir de um conjunto de soluções do espaço S . Na terceira etapa há uma avaliação da aptidão desses indivíduos.

Na etapa de aptidão, é calculado o valor da função objetiva $P(x)$ para cada solução do conjunto escolhido para a população inicial. Com a população inicial definida e o valor de aptidão de cada indivíduo calculado, passa-se à primeira geração do AG. Cada geração é composta pela etapa de seleção, cruzamento e mutação para geração de uma

¹⁶ Problema clássico de otimização que visa descobrir a menor rota em termos de distância que um caixeiro viajante precisa seguir para visitar todas as cidades de uma determinada lista.

nova população com o mesmo número de indivíduos. As etapas e um resumo de cada uma delas são ilustradas na Figura 8, usando codificação com alfabeto binário.

Figura 8 – Etapas que ocorrem a cada geração



Fonte: Próprio Autor

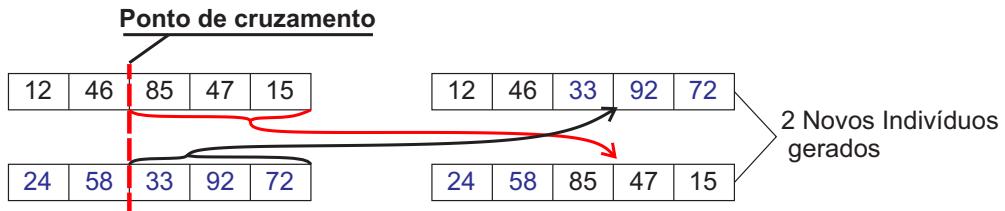
A etapa de seleção emula o processo natural de sobrevivência do mais forte, escolhendo entre os indivíduos da população aqueles que participam do processo evolutivo. Soluções com a melhor aptidão tendem a serem escolhidos em detrimento daqueles de menor aptidão. Vários métodos de seleção são empregados em AG, sendo o mais conhecido o método de roleta ou método de seleção proporcional. Neste método, cada indivíduo ocupa uma fatia proporcional à sua aptidão, assim, suas chances de seleção são maiores (SRINIVAS; PATNAIK, 1994; BRUDERER; SINGH, 1996). Outro método citado, empregado neste trabalho, é o de disputa ou torneio. Neste método de seleção pares de indivíduos escolhidos aleatoriamente disputam entre si, quem possui a melhor aptidão, o melhor é selecionado, esta etapa repete-se até o número de indivíduos da população, os selecionados passam então a fase de cruzamento e mutação (MILLER; GOLDBERG *et al.*, 1995; BLICKLE; THIELE, 1996).¹⁷

Na etapa de cruzamento ou recombinação é aplicada a troca de material genético entre dois cromossomos. Desta maneira, pares de indivíduos, condicionados à uma probabilidade de cruzamento (p_c) trocam informação entre eles. Para cada teste é anunciado um valor aleatório, que caso seja menor que o valor de p_c é realizado o cruzamento no par. Numa situação em que há o cruzamento de dois indivíduos, estes ambos representados por

¹⁷ Outros método que podem ser citados é o de seleção estocástica (BAKER, 1987) e o de truncamento (CROW; KIMURA, 1979).

uma palavra de n_{sym} símbolos cada, é arbitrado então um ponto de cruzamento entre 2 e $n_{sym} - 1$ que determina o ponto de quebra dos indivíduos (LINDEN, 2008). Nesta quebra os indivíduos trocam símbolos entre eles no ponto de troca. É necessário comentar que há também outras formas de realizar cruzamento e esta descrita é só uma delas. Ilustra-se na Figura 9 o processo de troca de informação.

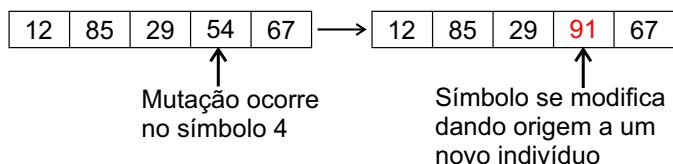
Figura 9 – Cruzamento de símbolos entre dois indivíduos



Fonte: Próprio Autor

Neste exemplo, n_{sym} é 5 e o ponto de cruzamento é no segundo símbolo, desta forma dois novos indivíduos são formados pela alternação da informação dos outros indivíduos. A mutação consiste em selecionar um símbolo que compõe um indivíduo e mudá-lo aleatoriamente para outro símbolo válido. Analogamente ao cruzamento é condicionado a uma probabilidade de mutação (p_{mut}) que realiza um teste para saber se haverá mutação do indivíduo nesta geração (TANOMARU, 1995). É uma operação simples mas que pode alterar de forma significativa a aptidão do indivíduo. A Figura 10 é usada para ilustrar a operação de mutação em um cromossomo.

Figura 10 – Mutação de um símbolo em um indivíduo



Fonte: Próprio Autor

Ao fim da aplicação dos dois operadores genéticos é gerada uma nova população que substitui a anterior. É verificado então o critério de parada (que nesta aplicação é definido como sendo o número máximo de gerações), que se não alcançado, dá continuidade as etapas iterativas. Em seguida, é avaliado a aptidão da nova população gerada para que haja uma nova etapa de seleção, dando assim continuidade no ciclo das gerações. Quando detectado o critério de parada, é avaliado a melhor aptidão dentro da população e o indivíduo é então decodificado então na solução ótima local do problema.

Em se tratando de roteamento para RSSF, o problema consiste em traçar a rota ótima, levando em consideração os parâmetros de otimização da rede, entre um emissor e

um receptor. Este problema é indiferente a origem e destino, mas usualmente deseja-se otimizar a rota entre um nó sensor e o sorvedouro. Desta forma, dada as características do protocolo enunciadas na Seção 2.4, o AG é executado de forma a codificar as possíveis soluções relacionadas e ao fim determinar a rota ótima na RSSF a partir da decodificação do melhor indivíduo encontrado no AG. No próximo capítulo é descrita de forma detalhada a proposta de pesquisa deste trabalho. O algoritmo 1 é usado para mostrar o pseudocódigo utilizado para executar o AG aqui descrito.

Para o algoritmo descrito a seguir é definido que: Pop representa o tamanho da população, Ind um indivíduo, g a geração atual, g_{max} o número máximo de gerações, i_{best} índice do indivíduo com melhor resultado na população, Ind_{best} é o indivíduo com o melhor resultado da população e x_{best} melhor resultado decodificado.

Algoritmo 1: Execução do AG

```

1 início
2   Define  $p_c$ ,  $p_{mut}$ ,  $g_{max}$ 
3    $g \leftarrow 0$ 
4   Inicia  $Pop$  codificada
5   Calcula  $P(x)$  para cada Indivíduo da População Inicial
6   for  $g$  de 1 até  $g_{max}$  do
7     while  $Ind$  selecionados < tamanho de  $Pop$  do
8       Seleciona  $Ind$  por Disputa
9       Aplica operadores genéticos em  $Ind$ 
10      end
11      Nova  $Pop$  gerada
12      Calcula  $P(x)$  para cada  $Ind$  da nova  $Pop$ 
13       $g \leftarrow g + 1$ 
14    end
15     $i_{best} \leftarrow$  índice de  $\min(P(x))$ 
16     $Ind_{best} \leftarrow Ind(i_b)$ 
17    Decodifica  $Ind_{best}$  em  $x_{best}$ 
18    retorna  $x_{best}$ 
19 fim

```

3 Algoritmo Otimizado para o Roteamento de RSSF

O algoritmo de roteamento utilizando AG visa encontrar uma solução para o problema do traçado de rotas para RSSF que possa obter rotas otimizadas tanto em consumo energético, quanto em distância percorrida. Ou seja, é necessário desenvolver uma estratégia de roteamento para RSSF que realize o balanceamento do consumo de energia pelos nós sensores da rede. Para isso, é necessário o desenvolvimento de um sistema que calcule soluções de rotas para encaminhamento de mensagens utilizando AG, em que o foco deste algoritmo de otimização é a minimização da distância total do nó transmissor até o sorvedouro, além do balanceamento do nível energético dos nós sensores.

O detalhamento do sistema proposto divide-se na descrição da RSSF, que subdivide-se na topologia de rede (em que é comentado sobre a distribuição dos nós), na descrição das especificações físicas dos nós, nas características do protocolo de roteamento adotado (em que são apresentadas as justificativas para as escolhas tomadas) e, por fim, a proposta do algoritmo de roteamento, com o passo-a-passo das etapas para cálculo das rotas. A partir do sistema detalhado, é proposto um cenário de simulação para a avaliação de parâmetros de desempenho da RSSF.

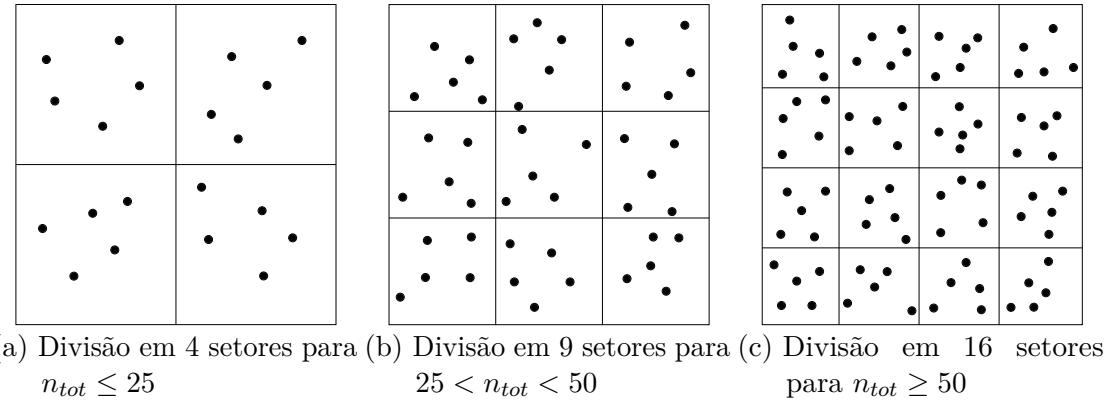
3.1 Topologia da RSSF

Para ser possível discorrer sobre o funcionamento do algoritmo proposto é necessário descrever as características da rede com a qual se propõe avaliar. Um dos aspectos é a topologia de rede adotada/ como comentado no Capítulo 2 dificilmente uma RSSF possui uma estratégia fixa de topologia, podendo muitas vezes nem ser empregada uma única.

Para o sistema deste trabalho é utilizada uma topologia de malhas e a distribuição dos nós sensores é baseada no trabalho de Khan *et al.* (2014), em que os nós sensores são divididos entre os setores de iguais dimensões que dividem a área de cobertura da rede. A divisão é baseada no número de nós sensores da RSSF e se objetiva a distribuir uniformemente os nós de forma a evitar aglomerações, visando otimizar a relação entre consumo de energia pelos nós e a entrega de pacotes sem a necessidade da utilização de mais sorvedouros ou de nós com capacidade energética aumentada. Os nós são distribuídos em igual número para os setores e são dispostos de maneira aleatória seguindo uma distribuição uniforme. As Figuras 11a, 11b e 11c são usadas para ilustrar um exemplo desta forma de disposição, em que é sugerida a relação entre o número total de nós sensores (n_{tot}) e setores. Na Figura 11a são ilustrados 20 nós sensores, sendo divididos em quatro

quadrantes de cinco nós cada; na mesma lógica, na Figura 11b a divisão de 45 em nove quadrantes, com cada quadrante possuindo cinco nós. Por último, na Figura 11c é ilustrada a disposição de 80 nós sensores divididos em 16 setores.

Figura 11 – Distribuição de nós sensores por setores



Fonte: Próprio Autor

Ao fim, é importante citar que o posicionamento dos nós da rede são estáticos, ou seja, ao longo do funcionamento da RSSF não há deslocamento geográfico por parte dos elementos que compõem a rede.

3.2 Descrição dos Nós

A primeira característica a ser citada é a heterogeneidade da rede, isso significa que os nós desempenham diferentes papéis dentro da RSSF. Apesar disso, os nós possuem as mesmas configurações de *hardware*, seja a unidade de processamento, seja a de comunicação. A diferença está no papel desempenhado pelos nós na rede. Três tipos de nós são propostos: nó sensor, nó roteador e o sorvedouro.

O nó sensor coleta dados e transmite para o sorvedouro; como na maioria dos casos não há conexão direta entre o nó sensor e o sorvedouro, é necessário que outros nós façam a retransmissão dos dados, que é o papel desempenhado pelos nós roteadores. Estes são nós que se dedicam exclusivamente à comunicação na RSSF. O sorvedouro por sua vez recebe os dados coletados pelos nós sensores e os encaminha para a unidade de processamento. Outro papel desempenhado pelo sorvedouro é comunicar aos nós sensores mudanças em suas rotas. Esta mudança se dá ao longo do funcionamento do sistema de acordo com o cálculo de rotas realizado pela unidade de processamento da RSSF.

Para a caracterização da parte física dos nós deve-se abordar suas especificações operacionais. Os primeiros parâmetros são escolhidos para que estes satisfaçam os requisitos do padrão IEEE 802.15.4, descrito na Seção 2.2. Estes parâmetros são descritos na Tabela

2, onde estão contidos a frequência de operação, o esquema de modulação, a taxa de transferência de dados pelo canal e a potência de transmissão.

Tabela 2 – Especificações de funcionamento do transceptor

Especificação	Valor
Banda de Operação	2,4 GHz
Modulação	O-QPSK
Taxa de Transferência de Dados	250 kbps
Potência de Transmissão	1 mW

Fonte: Próprio Autor

O outro parâmetro de operação relevante para o sistema é sua questão energética. É abordada a questão do consumo para realizar transmissões e recepções de dados, como também a capacidade de energia armazenada no subsistema de alimentação dos nós. A Tabela 3 é usada para relacionar os valores de consumo de energia, mais especificamente as características que satisfazem as equações do modelo de energia para comunicação apresentado na seção 2.3. Os consumos de energia são representados por E_{TX} , E_{RX} , η_{amp} e energia inicial do nó E_0 , e todos os valores escolhidos para estes parâmetros são baseados na aplicação disponível em Homaei (2014). É importante citar que para o sistema proposto o sorvedouro é considerado como tendo uma fonte permanente de energia, diferente dos outros nós que são conectados a bateria, desta forma não há necessidade de incluí-lo nos cálculos de consumo energético.

Tabela 3 – Características energéticas dos nós da RSSF

Parâmetro	Valor
E_0	0,5 J
E_{TX}	50 nJ/bit
E_{RX}	50 nJ/bit
ε_{amp}	10 $\frac{pJ}{bit \cdot m^2}$

Fonte: Próprio Autor

Após a descrição dos parâmetros de funcionamento dos nós, agora é possível explanar a parte da lógica de funcionamento da RSSF, mais especificamente a camada de rede e o método de transmissão de mensagens. O primeiro passo é a definição do protocolo de comunicação da rede de acordo com o que foi apresentado na seção 2.4.

3.3 Definição do Protocolo de Comunicação

A definição do protocolo se dá como: estrutura hierárquica, pró-ativo, baseado em QoS e próximo salto definido por localização dos nós sensores e estado da bateria do nó sensor. Começando pela estrutura hierárquica, é assim pois a rede possui dois tipos de nós (fora o sorvedouro): o nó sensor e o roteador.

Ser pró-ativo significa que os nós necessitam conhecer as informações de todos os outros nós da rede e para isso é necessária uma tabela de roteamento. Esta tabela lista as relações entre nós e sorvedouro, a fim de se estabelecer rotas a partir desta tabela. No caso do protocolo proposto, a tabela de manutenção de rotas tem dois componentes: uma tabela de distâncias euclidianas entre os nós e uma lista de ramos de ligação direta entre os nós. A lista contém informação sobre os nós que se conectam uns aos outros por um salto de diferença. A tabela de manutenção de rotas desempenha um papel de grande relevância na execução do algoritmo genético que retorna a rota ótima entre dois pontos distintos da RSSF, é por esse motivo opta-se pela escolha de um protocolo pró-ativo.

Para que uma rede opere baseada em QoS, o algoritmo de roteamento precisa manter a qualidade de serviço da rede. Aqui é realizado um esforço para alcançar eficiência energética da rede priorizando nós sensores com um maior nível de carga de bateria, em detrimento de nós próximos a se descarregarem. Este arranjo é escolhido pois não há a necessidade, a priori, de um protocolo multi-caminho e apesar do QoS englobar diversas outras métricas, opta-se por focar em eficiência energética.

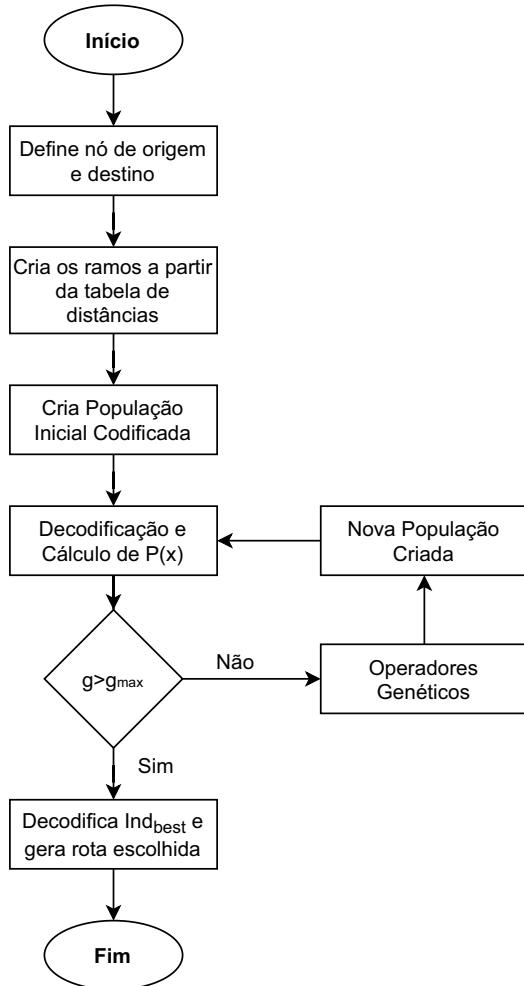
Por último, o protocolo se baseia em localização e no nível de bateria dos nós para escolha de próximo salto. Isso se deve ao fato de que a distância euclidiana entre nós, e a energia residual da bateria participam de forma ativa no cálculo da aptidão dos indivíduos no AG. Basear esta escolha em localização pode gerar dúvidas, pois dada a codificação de chaves aleatórias no AG a seleção do próximo salto pode ser classificada como probabilística, afinal cada símbolo representa um salto, e este depende do valor aleatório da chave; porém, o que realmente define a rota no cálculo do AG é o valor da função de aptidão dos indivíduos, e esta função é diretamente ligada com o valor da distância entre os nós e o nível da bateria. Portanto, a escolha do próximo salto é baseada de fato nestes dois pontos. Com todos os arranjos definidos do protocolo, é detalhado na Seção 3.4 as etapas de execução do algoritmo genético para traçado de rota.

3.4 Traçado de Rotas Utilizando Algoritmo Genético

O traçado de rotas baseia-se na execução das etapas do AG de forma em que cada uma destas (codificação, decodificação, função de *fitness*, operadores genéticos) compõe uma parte da aplicação que destina-se a obter uma rota entre dois elementos de uma

RSSF. Um fluxograma de execução do sistema proposto é mostrado na Figura 12, em que é relacionado o passo-a-passo para cálculo de uma rota utilizando o AG. Esse fluxograma demonstra os procedimentos que serão descritos ao longo desta seção.

Figura 12 – Fluxograma de Execução do Procedimento Proposto

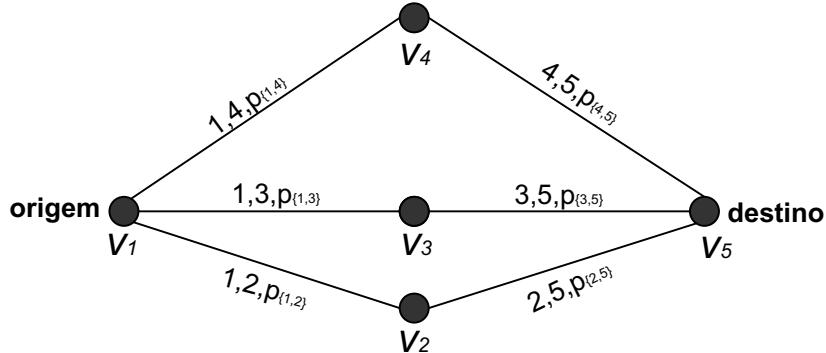


Fonte: Próprio Autor

3.4.1 Definição do Problema

Inicialmente, o problema é considerado como o de caminhos mais curtos de única origem, em que a RSSF é modelada como um grafo orientado ponderado $G = (V, E)$, em que $V = \{v_0, v_1, v_1, \dots, v_n\}$ representa o conjunto de vértices e $E = \{e_i, e_j, p_{i,j}\}$ corresponde às arestas de uma função peso ($\omega : E \rightarrow \mathbb{R}$) que mapeiam os vértices do grafo com pesos (p) de valores reais (CORMEN *et al.*, 2002). A Figura 13 é usada para ilustrar um esquema de grafo orientado com vértices, arestas e pesos.

Figura 13 – Grafo Ponderado Orientado



Fonte: Próprio Autor

Na figura há cinco vértices e seis arestas; a aresta é caracterizada pelo valor de origem, destino e peso da aresta que liga seus dois vértices. O peso total de uma rota $p = \langle v_0, v_1, v_2, \dots, v_k \rangle$ é o somatório dos pesos das respectivas arestas que compõem a rota, tal que a função peso ω é representada pela Equação 3.1.

$$\omega(p) = \sum_{i=0}^{k-1} \omega(v_i, v_{i+1}) \quad (3.1)$$

O peso do caminho mais curto entre os vértices de origem (v_o) e destino (v_d) é então definido como o valor mínimo $\delta(v_o, v_d)$ da função $\omega(p)$, na forma:

$$\delta(v_o, v_d) = \begin{cases} \min\{\omega(p) : v_o \xrightarrow{p} v_d\} & \text{se existe um caminho de } v_o \text{ até } v_d, \\ \infty & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

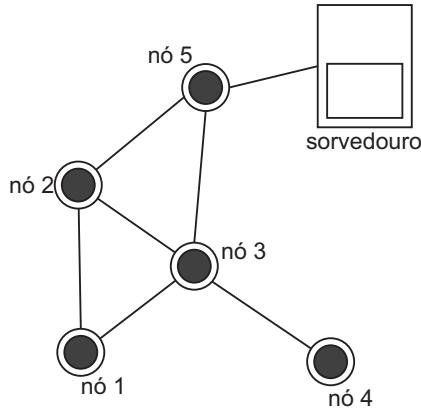
Então, a melhor rota para se seguir é aquela em que o caminho possui um peso total p igual a $\omega(p) = \delta(v_o, v_d)$ (CORMEN *et al.*, 2002). Essa definição, então, é a base na qual se sustenta a construção do algoritmo genético proposto neste trabalho, em que a resposta fornecida se aproxima do valor de $\delta(v_o, v_d)$.

Fazendo uma associação entre o problema de caminhos mais curtos com o deste trabalho, o grafo é a RSSF, o conjunto de vértices são os nós sensores juntamente ao sorvedouro e as arestas são os ramos de ligação direta. A função de pesos $\{\omega(p)\}$ é diretamente relacionada com a função de aptidão do AG ($P(x)$) e, o menor peso ($\delta(v_o, v_d)$), é o objetivo de otimização que resolve a Equação 2.8.

3.4.2 Codificação do Cromossomo

Para auxiliar no esclarecimento do sistema proposto (mais especificamente como se dá o processo de codificação do cromossomo) é apresentada a ilustração de uma RSSF na Figura 14. A forma como os nós estão dispostos nesta ilustração foi escolhida de forma arbitrária pelo autor.

Figura 14 – Exemplo de RSSF

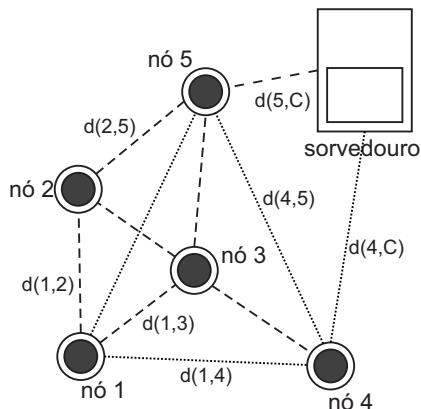


Fonte: Próprio Autor

Na Figura 14, a rede é composta por cinco nós, sendo o nó 1 um nó sensor, enquanto que os outros são nós roteadores; além de um sorvedouro. Suas ligações são determinadas de acordo com o raio de cobertura (Tx_{range}) de cada nó, como também do sorvedouro. Dadas as características de arquitetura dos nós serem as mesmas, Tx_{range} é considerado o mesmo para todos os componentes da rede. São conhecidas as coordenadas geográficas de cada componente em relação à área da RSSF, e com essas informações é possível a criação de uma tabela de distâncias euclidianas entre os componentes da rede. A Tabela 4 é montada a partir das informações da Figura 15, e indica a relação de distância entre todos os nós da rede.

Na Figura 15, as distâncias estão representadas por $d(origem, destino)$ e o sorvedouro é representado como C para simplificação do desenho. A partir destas ligações, com o valor definido de Tx_{range} , é possível montar agora a tabela de ramos de ligação direta.

Figura 15 – Representação da distância entre nós sensores



Fonte: Próprio Autor

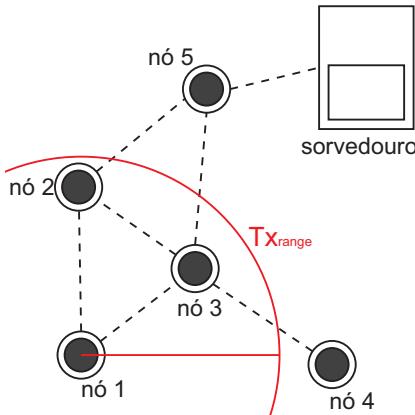
Tabela 4 – Tabela de distâncias

	nó 1	nó 2	nó 3	nó 4	nó 5	C
nó 1	0	$d(1,2)$	$d(1,3)$	$d(1,4)$	$d(1,5)$	$d(1,C)$
nó 2	$d(1,2)$	0	$d(2,3)$	$d(2,4)$	$d(2,5)$	$d(2,C)$
nó 3	$d(1,3)$	$d(2,3)$	0	$d(3,4)$	$d(3,5)$	$d(3,C)$
nó 4	$d(1,4)$	$d(2,4)$	$d(3,4)$	0	$d(4,5)$	$d(4,C)$
nó 5	$d(1,5)$	$d(2,5)$	$d(3,5)$	$d(4,5)$	0	$d(5,C)$
C	$d(1,C)$	$d(2,C)$	$d(3,C)$	$d(4,C)$	$d(5,C)$	0

Fonte: Próprio Autor

Quando dois nós estão no raio de cobertura um do outro, estes formam um ramo de ligação. Para o sistema proposto, é considerado o raio de cobertura (Tx_{range}) como o de uma circunferência a partir do centro do nó sensor, e tudo que está dentro desta circunferência forma um ramo. A Figura 16 é usada para ilustrar o exposto, em que o raio de cobertura que parte do nó 1 engloba somente os nós dentro do seu limite, ignorando ligações com outros nós.

Figura 16 – Raio de cobertura do nó sensor



Fonte: Próprio Autor

Seguindo a lógica para ramos de ligação direta, são apresentados na Tabela 5 os ramos para o exemplo inicialmente ilustrado na Figura 14.

Com a tabela de distâncias e a de ramos é possível iniciar as etapas de execução do algoritmo genético. Na primeira etapa, a de codificação, o número de ramos de ligação direta é igual ao número de símbolos (n_{sym}) do indivíduo. Desta forma, cada símbolo do cromossomo é um ramo da rede. Utilizando a codificação de chaves aleatórias, cada ramo de ligação direta possui um valor aleatório de 0 a 100, menor e maior probabilidade de ser escolhido respectivamente. Esta codificação é adotada de maneira arbitrária, e o objetivo foi empregar uma codificação que conseguisse gerar soluções válidas e explorar de forma aleatória o espaço de busca das soluções.

Tabela 5 – Ramos de ligação direta

De	1	1	2	2	2	3	3	3	3	4	5	5	5
Para	2	3	1	3	5	1	2	4	5	3	2	3	C

Fonte: Próprio Autor

Na etapa de decodificação o valor da chave aleatória representa a probabilidade de o ramo ser escolhido. Um exemplo de indivíduo utilizando esta codificação é mostrado na Figura 17, em que cada símbolo é marcado como sendo *origem – destino*. Por exemplo, para o símbolo *s1* (marcado na parte de baixo de cada símbolo como em *s2*, *s3* e assim por diante) a origem é o nó 1 e o destino é o nó 2 (indicado na parte de cima do símbolo como 1 – 2) e a probabilidade de ser escolhido é 10 (marcado no centro do símbolo). Os outros símbolos do cromossomo seguem a mesma lógica, e como foi mencionado anteriormente, todo símbolo é a representação de uma possível ligação entre origem e destino em um único salto; por isso a ligação 1 – 2 (pertencente ao símbolo *s1*) difere da ligação 2 – 1 (pertencente ao símbolo *s3*). Sendo assim, cada símbolo obedece a sequência de colunas representada na Tabela 5 para sua origem e destino. Outro ponto que deve ser descrito é o fato que os outros cromossomos que vão formar uma população devem obrigatoriamente seguir esta mesma estrutura de cromossomos, tendo alterações somente no valor das chaves aleatórias.

Figura 17 – Cromossomo baseado em chaves aleatórias

1-2	1-3	2-1	2-3	2-5	3-1	3-2	3-4	3-5	4-3	5-2	5-3	5-C
s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8	s9	s10	s11	s12	s13
10	23	45	39	72	57	92	88	16	61	82	77	53

Fonte: Próprio Autor

3.4.3 Decodificação do Cromossomo

Uma população inicial então é formada com um determinado número de indivíduos, em que cada indivíduo corresponde à um cromossomo codificado em chaves aleatórias da mesma maneira do apresentado no exemplo da Figura 17. Após a criação da população inicial é avaliado o valor da função de aptidão $P(x)$ para cada indivíduo, para isso é necessário que cada cromossomo seja decodificado para gerar uma rota.

Retomando o cromossomo representado na Figura 17 como exemplo, a seguir é descrito o processo de decodificação de uma solução para uma possível rota entre uma origem, escolhida como o nó 1, e um destino, escolhido como sorvedouro. É importante ressaltar duas coisas: a) se a origem e/ou o destino fossem diferentes, para esse cromossomo do exemplo em específico, a rota obtida por meio da decodificação seria diferente; b) para o mesmo par de origem e destino (como nó 1 e sorvedouro descritos neste exemplo) um

cromossomo (que obrigatoriamente possui o mesmo número de símbolos) codificado com chaves aleatórias com valores diferentes do apresentado na Figura 17 pode conter uma rota diferente para o mesmo par de origem e destino.

O primeiro passo é identificar quais símbolos no cromossomo possuem como origem no campo de origem e destino o nó de origem definido (no caso o nó 1), a finalidade é definir qual o próximo salto da rota. Os símbolos que possuem o nó 1 como origem são os símbolos s_1 e s_2 , são comparados então os valores da chaves aleatórias e o símbolo com o maior valor de chave (o símbolo s_2 , pois $23 > 10$) define o primeiro par de salto da rota. Definido o primeiro par, 1 – 3, é checado se o destino é o destino final, como não é o destino final (o sorvedouro C) há a necessidade de se realizar um novo salto.

Seguindo na decodificação do cromossomo para o traçado da rota, o nó 3 torna-se a origem do novo par e repete-se a etapa de identificação dos símbolos que possuem o nó 3 como origem. Neste caso os símbolos s_6 , s_7 e s_8 disputam entre si qual valor de chave aleatória é maior. O símbolo com o maior valor de chave aleatória define o novo salto, de 3 – 2, e como 2 não é o nó de destino um novo salto é efetuado. A mesma sequência de passos é efetuada a cada salto até que se atinja o destino final e seja concluído o processo de decodificação de um cromossomo para a obtenção de uma possível rota.

O cromossomo é decodificado em um vetor rota (r), uma sequência de saltos que a mensagem precisa realizar – na forma $r = [1 \ 3 \ 2 \ 5 \ C]$, no caso do exemplo do cromossomo da Figura 17 – em que cada posição do vetor corresponde a um nó. A rota é traçada a partir da primeira posição do vetor (1, no exemplo) e o elemento seguinte é para onde a mensagem deve ser encaminhada (3, no exemplo); o vetor é percorrido ponto a ponto e sua última posição representa o destino final (C , no exemplo), em que é determinado o fim da rota.

Devido à codificação de chaves aleatórias, não é possível garantir que ao fim da decodificação do indivíduo há uma solução satisfatória, ou neste caso, que o último elemento do vetor r seja o destino. Portanto, há duas possibilidades de resposta: a resposta é correta e o destino foi alcançado ou a resposta é incorreta e o pacote é perdido. Assume-se então regras que auxiliam a encontrar uma solução satisfatória; são elas:

- O destino é prioridade; se um nó sensor forma ramo de ligação direta, este é escolhido independente do seu valor de chave aleatória;
- Um nó sensor só participa uma única vez de uma rota, ou seja, não há a possibilidade de um nó ser escolhido se este faz parte da rota neste momento; e
- Se acabou a possibilidade de saltos e o pacote não chegou ao seu destino, esta solução é penalizada com o objetivo de reduzir as chances de sua escolha ao longo

do algoritmo genético e, então, esta é substituída por uma solução válida, ou com melhor valor de aptidão.

3.4.4 Função de Aptidão

Com o indivíduo decodificado é então calculada sua função objetivo $P(x)$. São propostas duas funções objetivo: $P_1(x)$, que é elaborada a partir da visão inicial do problema - balancear o consumo energético da RSSF e garantir que cada rota percorra a menor distância euclidiana possível; e a segunda, $P_2(x)$, foi proposta após a análise do desempenho da primeira, em que houve a constatação de outros pontos que a função objetivo poderia otimizar. É necessário comentar que ambas as funções objetivo $P_1(x)$ e $P_2(x)$ são frutos da pesquisa realizada neste trabalho.

Para a elaboração da nova função objetivo ($P_2(x)$), a primeira necessidade é dar prioridade às rotas que possuem o menor número de saltos possível, pois com uma menor rota há um menor número de transmissores e receptores diminuindo o consumo energético por envio de pacote. O outro ponto é a taxa de perda de pacotes (PLR, sigla em inglês para *Packet Loss Ratio*), que representa o total de pacotes perdidos dado qualquer falha de transmissão ou recepção dos pacotes. Então, minimizar a PLR implica na diminuição da necessidade de reenvio destes, poupando energia dos nós da RSSF.

Ambas as funções objetivas são calculadas a partir do vetor r , que gera para um indivíduo uma solução x . A solução x pode ser obtida de acordo com a função $P_1(x)$ descrita na Equação 3.2, que relaciona a distância euclidiana total percorrida pela mensagem na rota ($\sum_{n=1}^{N-1} d(r(n), r(n+1))$), a energia residual dos nós que compõem a rota ($\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \%E_{res}(n)$)¹ e uma penalidade (*peso*), cuja finalidade é punir indivíduos que apresentem rotas que não encontram o destino final.

$$P_1(x) = \left(\frac{\sum_{n=1}^{N-1} d(r(n), r(n+1))}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \%E_{res}(r(n))} \cdot peso \right)_x \quad (3.2)$$

Esta equação é proposta pelo autor deste texto e baseia-se na rota fornecida r . A rota r é fornecida após a decodificação de cada indivíduo da população do AG, e cada indivíduo possui sua própria rota r . A rota r é representado por um vetor de N posições em que em cada uma dessas posições está contido o próximo nó que faz a retransmissão até o último nó constituinte da rota, que pode ou não ser o nó de destino.

O objetivo é a minimização da função de aptidão; quanto menor o seu valor melhor a resposta obtida pela execução do AG. Por este motivo, a função tem seu menor valor quando d tende ao seu menor valor e $\%E_{res}$ ao seu maior valor. O nó sensor tem um valor

¹ O percentual de energia residual de um nó sensor ($\%E_{res}$) é a relação entre a energia remanescente num nó (E_r) e sua energia inicial (E_0), na forma $\frac{E_r}{E_0}$.

inicial de energia remanescente representado por $E_r = E_0$; à medida que o tempo passa, pacotes de dados vão sendo transferidos pelos nós da RSSF. Então, com a transferência de pacotes de dados, os nós sensores executam uma série de transmissões e recepções de acordo com cada rota traçada. Com esse processo de sucessivas comunicações, o valor de E_r vai decaendo seguindo as equações de consumo energético para transmissão e recepção, Equação 2.3 e Equação 2.5 respectivamente. Por se tratar de uma RSSF multi-saltos o modelo de consumo energético para uma rota r é calculado usando a Equação 2.7.

Com a queda do valor de E_r é natural que a relação $\frac{E_r}{E_0}$ também tenha uma queda de valor, aumentando assim o valor da função de aptidão. Por consequência, as rotas que utilizam nós sensores com baixo nível energético se prejudicam e começam a dar espaço para rotas que utilizam nós com alto nível percentual de carga. Por fim, a média do percentual de carga remanescente $\left(\frac{1}{(N)} \sum_{n=1}^N \%E_{res}(n)\right)$ é usada para balanceamento de energia na rota. A variável, *peso*, por sua vez pode assumir dois tipos de valores:

- *peso* = 1, quando $r(N)$ é o nó de destino da mensagem;
- *peso* = $d(r(N), destino)$, quando $r(N)$ não é o nó de destino.

Quando *peso* = 1, o objetivo é não punir uma rota correta, pois assim o valor de *peso* não afeta o cálculo da aptidão do indivíduo. Por outro lado, *peso* = $d(r(N), destino)$ é a distância euclidiana entre o último nó da rota r e o destino de fato, punindo a rota de acordo com a distância que a mesma está do destino.

O valor da solução x pode também ser obtido através de $P_2(x)$, que inclui o número de saltos e a taxa de perda de pacotes na rota, seguindo a Equação 3.6. Nela há a relação entre a distância euclidiana total percorrida pela mensagem na rota, normalizada pela maior distância que uma mensagem poderia percorrer numa rota (Tx_{range}). A Equação 3.3 é usada para descrever o valor da distância euclidiana total normalizada representado por D e varia de um valor entre 0 e 1. Outra parte da equação é a energia residual normalizada de todos os nós que compõem a rota, representada por B de acordo com a Equação 3.4 e seu valor varia entre 0 e 1.

Há ainda a taxa de perda de pacotes normalizada, representada por L como na Equação 3.5 que relaciona o somatório da probabilidade de perda de pacote de cada nó ($\%PLR$) com a maior probabilidade de perda de pacote (PLR_{max}) para cada nó vezes a quantidade de saltos da rota ($N - 1$). O valor de PLR_{max} varia de acordo com o alcance do nó (Tx_{range}), quanto maior for o raio de transmissão que o nó pode alcançar maior será a probabilidade deste nó perder pacotes nesta distância máxima, a faixa de valores ao qual varia L está entre 0 e 1. Os outros componentes da função objetivo $P_2(x)$ são o *peso*, que segue o mesmo raciocínio de funcionamento da Equação 3.2 e o número de saltos ($N - 1$)

que é a quantidade de saltos realizados para execução da rota calculada.

$$D = \sum_{n=1}^{N-1} d(r(n), r(n+1)) / (Tx_{range} \cdot (N-1)) \quad (3.3)$$

$$B = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \%E_{res}(n) \quad (3.4)$$

$$L = \sum_{n=1}^{N-1} \frac{\%PLR(n)}{(N-1) \cdot PLR_{max}} \quad (3.5)$$

$$P_2(x) = \left((3 \cdot D + 4 \cdot (1 - B) + 3 \cdot L) \cdot peso \cdot (N - 1) \right)_x \quad (3.6)$$

Na função objetiva $P_2(x)$, pesos são atribuídos aos valores de D , $(1 - B)$ e L , desta forma a soma entre eles varia num valor entre 0 e 10 e os valores dos pesos foram escolhidos de forma a balancear a prioridade destas variáveis na aptidão da rota. O *peso* assume o mesmo valor que na função $P_1(x)$ e o número de saltos varia por rota decodificada. Analogamente à $P_1(x)$, $P_2(x)$ é uma função de minimização desta forma; a menor solução x representa a melhor rota para o nó transmitir seus dados. Detalhadas as duas formas de cálculo da aptidão, calculada para todos os indivíduos da população inicial, é possível avançar para a descrição das próximas etapas do AG.

3.4.5 Gerações e Operadores genéticos

O próximo passo é a execução das gerações, etapa iterativa em que são executadas as operações de seleção², cruzamento e mutação³. Assim como ilustrado na Figura 8, ao fim das operações em cada geração é formado uma nova população à qual é submetida o cálculo de aptidão dos indivíduos e novamente as operações de seleção, cruzamento e mutação. Ao fim das gerações, o indivíduo com o menor valor de $P(x)$ é escolhido e sua rota r decodificada é a rota escolhida para transmitir um pacote de dados de um nó de origem até um destino. Na próxima seção é descrito um cenário de simulação onde é avaliado a execução do sistema proposto, onde este é comparado com outros dois algoritmos clássicos de traçado de rotas.

3.5 Proposta de Cenário para Simulação

Para avaliar o desempenho do algoritmo para traçado de rotas, é proposta a simulação de uma RSSF em que os nós sensores enviam pacotes de dados para o sorvedouro

² A seleção é feita a partir de disputa, como visto na Seção 2.5.1, e é executada comparando dois indivíduos aleatórios da população e selecionando aquele com melhor valor de aptidão (etapa repetida até formar um conjunto do mesmo tamanho da população).

³ Cruzamento e mutação são executados da forma descrita na Seção 2.5.1

utilizando as rotas traçadas. Com o auxílio de ferramentas que possibilitem a simulação de uma RSSF, é proposta a observação de características da rede sob a atuação do algoritmo tais como a validade da rota calculada pelo algoritmo, o tempo de vida da rede, a taxa de perda de pacotes e o consumo de energia associado ao balanceamento energético da rede.

A validade da rota obtida é observada pela quantidade de vezes que a execução do AG tem como retorno uma rota válida. No sistema proposto, a validade das rotas é o critério de parada; quando não é mais possível para o algoritmo calcular rotas válidas, este é um indicativo de que não há mais conexão possível entre os nós sensores e o sorvedouro. Avaliar essa métrica, é avaliar a qualidade da codificação do indivíduo no AG, pois dada a taxa de sucesso na execução do algoritmo genético, é possível validar a forma de codificação como uma solução para o problema apresentado.

O tempo de operação ou tempo de vida está relacionado com o número de pacotes de dados que podem ser enviados pela rede até que os nós sensores componentes tenham sua energia esgotada e torne-se impossível um nó se comunicar com o sorvedouro⁴. Há basicamente duas situações que cumprem essa condição; quando um nó sensor vai enviar uma mensagem, e não forma mais ramos de ligação direta, ou quando o sorvedouro não forma ramos de ligação direta com os nós dentro de seu raio de cobertura.

Ao passo da execução de uma aplicação, os nós sensores vão degenerando sua fonte de energia. Quando a fonte de energia se esgota, o nó sensor é desativado, esgotando aos poucos a disponibilidade de caminhos pela RSSF. Com o esvaziamento total de ramos de ligação direta, o nó sensor fica impossibilitado de enviar seus dados coletados, comprometendo assim a funcionalidade da RSSF, datando então o tempo de vida da rede. No cenário proposto cada evento em que uma mensagem é enviada conta como um passo de tempo para avaliação do tempo de vida da RSSF; este evento é tratado daqui por diante como uma rodada.

A taxa de perda de pacotes está associada diretamente com o raio de cobertura de um nó sensor e a potência de transmissão do sinal pelo módulo de rádio. Ao longo do raio de cobertura, há uma tendência de diminuição da potência do sinal transmitido pelo nó, o que aumenta as chances de que haja por parte do receptor uma leitura errada dos dados, fazendo com que este pacote seja perdido. Desta forma, a taxa de perda de pacotes pode ser avaliada como uma relação direta entre a quantidade de pacotes esperados pelo sorvedouro e o total de pacotes que efetivamente foram recebidos de forma correta.

Por fim, o balanceamento energético pode ser evidenciado por métricas estatísticas de média e desvio padrão da energia residual da rede. A taxa de decaimento da média está relacionada com o tempo de vida da rede. Quanto menor esta taxa maior será o tempo de vida da rede, pois significa que os nós estão perdendo menos energia ao longo do uso

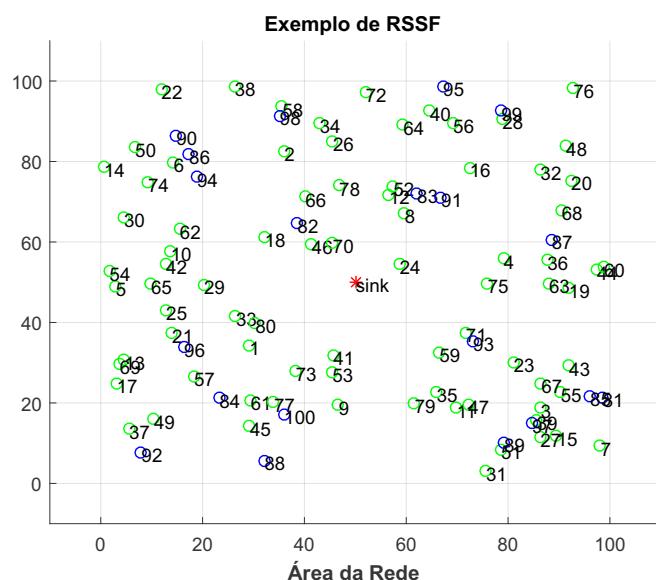
⁴ Traçando um paralelo com a teoria de grafos orientados, o tempo de vida da RSSF vai até a condição $\delta(v_o, v_d) = \infty$ ser alcançada.

da RSSF. Valores altos de desvio padrão significam uma dissipação desigual de energia pelos nós da rede, o que significa que alguns nós estão sendo escolhidos em detrimento de outros, precarizando o balanceamento energético (LUO *et al.*, 2014).

O cenário simulado começa a ser descrito por sua estrutura física. Primeiramente, é definido uma área geográfica onde os nós são distribuídos; a distribuição segue a topologia descrita na Seção 3.1. A proposta consiste em realizar a divisão de uma área de 100×100 metros, onde cada nó da rede ocupa uma área de 1×1 metro, como é feito em outras abordagens clássicas para RSSF. São 100 nós distribuídos em quatro quadrantes abrangendo o mesmo número de nós sensores e roteamento. O sorvedouro é posicionado no centro da área da RSSF. Ao todo são 20 nós sensores e 80 roteadores, distribuídos de maneira aleatória seguindo uma distribuição uniforme em seu respectivo quadrante, sendo todos os nós fixos na sua posição. O nó sensor é responsável por coletar dados e encaminhar os dados para a unidade de processamento, para isso estes contam com o auxílio de nós roteadores, que atuam como alternativas de rota para o nó sensor. Os nós roteadores especificamente auxiliam no traçado de rota sendo dispositivos com a função exclusiva de comunicação. A diferença entre os dois em questão de consumo seria então somente que o nó roteador não origina mensagens.

Na Figura 18 é mostrado um exemplo da distribuição dos nós na forma como foi descrito, onde os nós sensores são representados na cor azul escuro, os nós roteadores na cor verde, todos com sua respectiva numeração, nós roteadores numerados de 1-80 e nós sensores de 81-100. O sorvedouro a estrela vermelha no centro, representado na Figura 18 como seu nome em inglês *sink*, a posição é escolhida de forma arbitrária com base no que é abordado na literatura.

Figura 18 – Exemplo de distribuição de nós seguindo a topologia proposta



Fonte: Próprio Autor

Com a topologia da rede definida, o próximo passo são as características dos nós, abordadas na Seção 3.2. Todos os nós adotam o padrão IEEE 802.4.15 com os mesmos parâmetros explicitados na Tabela 2. Estas características (principalmente a potência de transmissão) auxiliam na determinação da curva de intensidade do sinal transmitido, curva esta que é utilizada para determinar a PLR (*Packet Loss Ratio*) para a distância entre os nós. O trabalho descrito em Adi e Kitagawa (2019) faz uma comparação entre a curva teórica e uma curva experimental da intensidade do sinal *versus* a distância entre dois nós no espaço livre para um transceptor que adota o padrão IEEE 802.15.4. A curva foi usada como base para a determinação do valor de $\%PLR$ (utilizado na Equação 3.5). É proposta a divisão em três faixas de distância entre nós (d) indo de 0 até o valor de Tx_{range} (que para a aplicação é escolhido como sendo 20 m), em que cada faixa é associada a um valor de $\%PLR$.

Os valores de $\%PLR$ são escolhidos com base na qualidade do sinal, de acordo com o que é encontrado em Adi e Kitagawa (2019). Para uma faixa entre 0 e 20 m, o valor de intensidade do sinal varia entre -22 a -42 dBm, aproximadamente. Esta faixa de variação não afeta significativamente a qualidade da ligação entre dois nós, pois uma degradação efetiva no sinal ocorre quando este possui intensidade menor que -60 dBm, e abaixo de -85 dBm o sinal não consegue ser captado no receptor. Os valores apresentados são de acordo com a operação do Zigbee, e são assumidos sem a utilização de uma antena auxiliar, com uma antena auxiliar o valor passa para -102 dBm. A Tabela 6 é usada para mostrar os valores adotados para as faixas de distância determinadas.

Tabela 6 – Faixas de distância para determinação da taxa de perda de pacotes.

Faixa de Distância (em metros)	$\%PLR$
$0 \leq d < 5$	0 %
$5 \leq d < 15$	2 %
$15 \leq d \leq 20$	5 %

Fonte: Próprio Autor

No que diz respeito ao consumo de energia e à fonte de energia dos nós, estes são representados como nas características apresentadas na Seção 3.2; mas especificamente o conteúdo da Tabela 3 descreve os valores de energia consumida no processamento para transmissão e recepção (E_{TX} e E_{RX} , respectivamente), além do valor de ε_{amp} e a energia inicial nos nós E_0 . É ressaltado que o sorvedouro se comporta como sendo conectado a uma fonte permanente de energia, e portanto não é incluído nos cálculos de consumo energético. Outros parâmetros que fazem parte da construção do cenário de simulação são o tamanho em bytes dos pacotes de dados e o fator de perda do canal (γ). O cenário simulado leva em consideração somente um tipo de pacote sendo transmitido, com um tamanho de 20 bytes e o fator de perda do canal é o mesmo que para o espaço livre, ou seja, γ vale 2. Estes dois parâmetros, além de outros citados que não constam em

tabelas anteriores, são mostrados na Tabela 7, que sumariza o restante dos parâmetros do cenário de simulação. Com estes parâmetros descritos, é possível seguir adiante com o passo-a-passo do procedimento proposta, detalhando como é realizado o cálculo das rotas e como os pacotes de dados são enviados dos nós sensores para o sorvedouro.

Tabela 7 – Parâmetros restantes do cenário de simulação

Parâmetro	Valor
Área da Rede	100 × 100 m
Distribuição do Nós	Aleatório com distribuição uniforme
Nº de Nós Sensores	20
Nº de Nós Roteadores	80
Sorvedouro	1
Tx_{range}	20 m
γ	2
n	20 bytes

Fonte: Próprio Autor

Na aplicação o primeiro passo é a determinação, por parte da unidade central, das rotas de todos os nós sensores com destino ao sorvedouro. Mais adiante é detalhado os algoritmos de roteamento utilizados para calcular a rotas dos nós sensores (os algoritmos são o AG e mais dois métodos clássicos: a Busca Exaustiva (BE) e o roteamento oportunista). Calculadas as rotas, a unidade central utiliza-se do sorvedouro para enviar as rotas para os respectivos nós sensores⁵. O sorvedouro passa então um determinado período de tempo recebendo mensagens de nós sensores, aguardando o um intervalo de tempo que permita a transmissão de 2000 mensagens. Após esse intervalo, a central conta o número de pacotes que realmente chegaram (para avaliar a taxa de perda de pacotes), além de realizar a dedução da energia consumida de acordo com as transmissões recebidas.

Com o novo valor de energia residual dos nós da RSSF, a central recalcula as rotas de transmissão dos nós sensores e sinaliza as rotas inválidas⁶. Caso não seja acionado o critério de parada⁷, a central aciona o sorvedouro, que envia todas as rotas válidas para seus respectivos nós sensores, e o ciclo de recepção das mensagens dos nós sensores é reiniciado. As rotas inválidas não são enviadas para os nós sensores e estes ficam de fora do ciclo de transmissão. Nós sensores que não possuem mais energia residual também não entram no cálculo de rota. O critério de parada indica que não há mais nenhum nó

⁵ As transmissões realizadas pelo nó central não foram levadas em consideração no cálculo de consumo energético.

⁶ Rotas inválidas correspondem à todas as rotas calculadas cujo destino não seja o sorvedouro.

⁷ O critério de parada da simulação é quando todas as rotas calculadas para os nós sensores são inválidas

sensor apto a enviar mensagens ao sorvedouro, seja porque estes não possuem mais energia armazenada, seja pelo fato de não haver mais nós ativos que formem ramos de ligação direta com o sorvedouro.

Do ponto de vista dos nós sensores o processo se inicia quando estes recebem do sorvedouro as rotas calculadas. Estes então iniciam seu processo de envio de dados utilizando as rotas calculadas pela central. A medida que os dados são propagados pelos nós que compõem uma rota, há a possibilidade da perda do pacote de acordo com o valor de $\%PLR$ seguindo a Tabela 6. Quando o intervalo de tempo de transmissão acaba, os nós sensores finalizam suas transmissões e aguardam as novas rotas. Ao receberem as novas rotas vindas do sorvedouro os nós sensores reiniciam suas rotinas de transmissão de dados utilizando a nova rota calculada. Caso não recebam rotas significa que houve um erro ao calcular sua rota e os nós sensores aguardam o próximo intervalo de recebimento de rotas válidas.

A seguir é explanado sobre os dois algoritmos de traçado de rotas que serão utilizados como base de comparação para o AG: a Busca Exaustiva (BE) e o roteamento oportunista, além de ser feita uma análise comparativa na forma com que os três operam.

3.5.1 Algoritmos para o Traçado de Rotas

Na Seção 3.4 foi tratado sobre o algoritmo de traçado de rotas proposto. Baseado em estratégias evolutivas, o AG busca uma resposta otimizada para o problema do traçado de rotas para RSSF. O algoritmo segue todos os passos de execução: uma população inicial aleatória, em que cada indivíduo tem associado um valor de aptidão, que é calculado pelas Equações 3.2 e 3.6. Após isso, o AG entra na etapa iterativa com as ferramentas de seleção, mutação e cruzamento. O processo iterativo se prolonga ao longo das gerações e, ao fim, retorna a rota ótima encontrada.

A Tabela 8 é usada para mostrar os parâmetros utilizados para a execução do AG, em que é descrito o número de gerações e de indivíduos além da taxa de mutação e cruzamento. Vale salientar que os valores são escolhidos a partir de um ajuste dos parâmetros para que haja um equilíbrio entre o tempo de execução e a convergência do algoritmo para uma rota válida.

Tabela 8 – Parâmetros para execução do AG

Parâmetro	Valor
Nº de Gerações	40
Nº de Indivíduos	30
p_{mut}	1 %
p_c	40 %

Uma forma de se avaliar o desempenho do AG é traçando métricas baseadas na

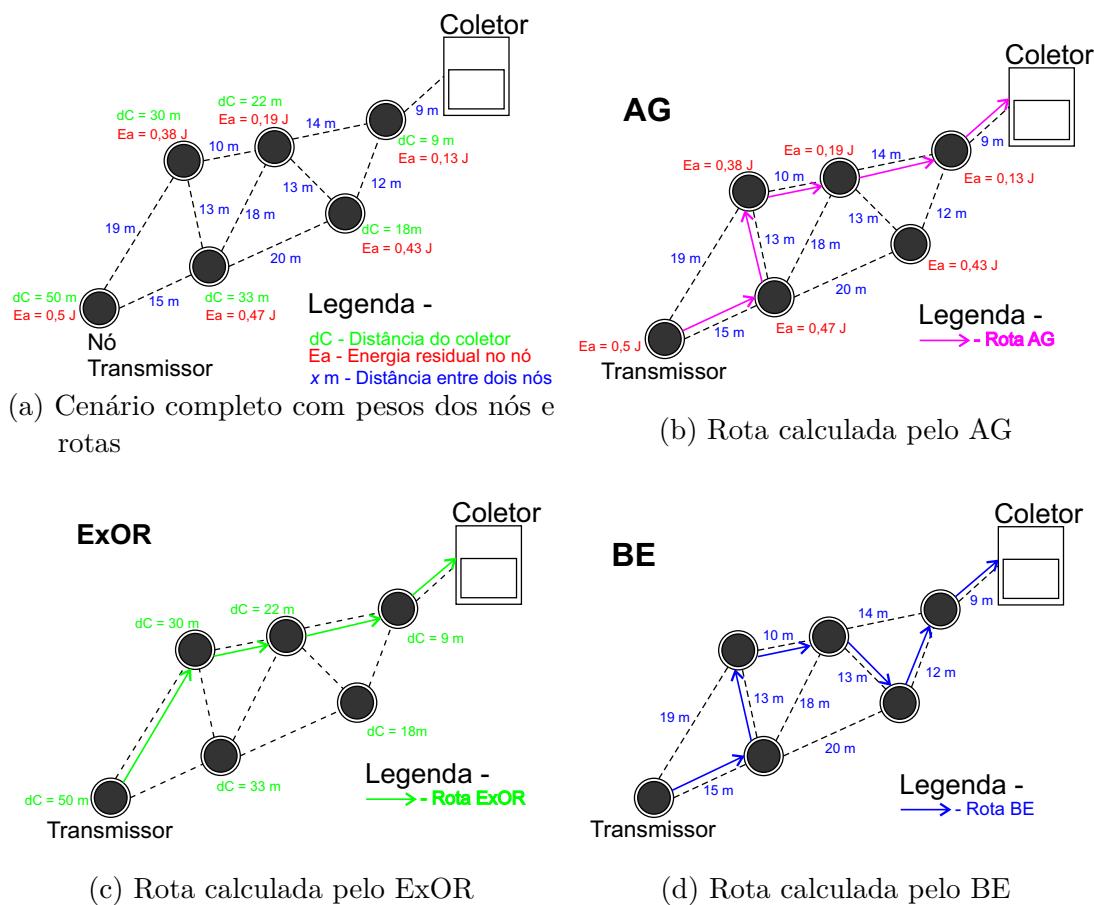
qualidade do serviço proporcionado pelo algoritmo proposto. Estas métricas são usadas como forma de comparação do AG com outros dois algoritmos de traçado de rotas. O primeiro é um método simples para traçado de rotas, a BE, no qual a rota é traçada de forma que os nós roteadores são escolhidos de acordo com a distância do nó que está transmitindo atualmente. O nó descobre todos os nós ao seu redor que estão dentro do seu raio de cobertura (Tx_{range}) e escolhe aquele que tem a menor distância dele. Assim o pacote de dados transmitido vai saltando até encontrar o sorvedouro, ou até esgotarem-se as possibilidades de salto. O outro método, o de roteamento oportunista é semelhante à BE, exceto na escolha do próximo salto. Neste método, o nó sensor dentro do raio de cobertura do transmissor que tiver a menor distância euclidiana para o sorvedouro é escolhido como próximo salto. Este segundo método é o utilizado no protocolo de roteamento oportunista chamado de "*Exclusive Opportunistic Routing*"(ExOR)⁸.

A Figura 19 é usada para ilustrar a forma com que os três métodos calculam sua rota. Na Figura 19a é apresentada a RSSF com as informações de estado de energia residual de cada nó, a distância entre eles e a distância entre os nós e o coletor. Na Figura 19b a representação de uma rota traçada pelo AG, que leva em consideração o nível de energia atual e a distância entre os nós, calculado pela função de aptidão na Equação 3.2 é determinada, na Figura 19d se encontra uma rota traçada pelo método de busca exaustiva, que se baseia na menor distância entre dois nós para decidir o próximo salto. A Figura 19c é usada para mostrar o traçado no método ExOR, onde a escolha do próximo salto depende da distância do nó para o coletor. É possível observar que para uma mesma situação, os três métodos apresentaram uma solução diferente cada, pois seus critérios de escolha diferem entre si.

No próximo capítulo é feita a discussão sobre os resultados obtidos a partir do cenário simulado, em que para o mesmo cenário são submetidos quatro algoritmos de traçado de rotas: o AG utilizando a Equação 3.2 como função objetivo, o AG utilizando a Equação 3.6 como função objetivo, o algoritmo de BE e o algoritmo ExOR. Além disso é proposto um cenário de simulação com características próximas a aplicações em domótica, visando aplicações de automação residencial, no qual pode ser avaliado o desempenho do AG para o traçado de rotas em um ambiente físico de uma RSSF.

⁸ Sua sigla em inglês é ExOR e vai nomear o terceiro método. Li, Chen e Zhang (2009) traz mais informações sobre o método

Figura 19 – Comparativo dos métodos de roteamento



Fonte: Autor Próprio

4 Resultados

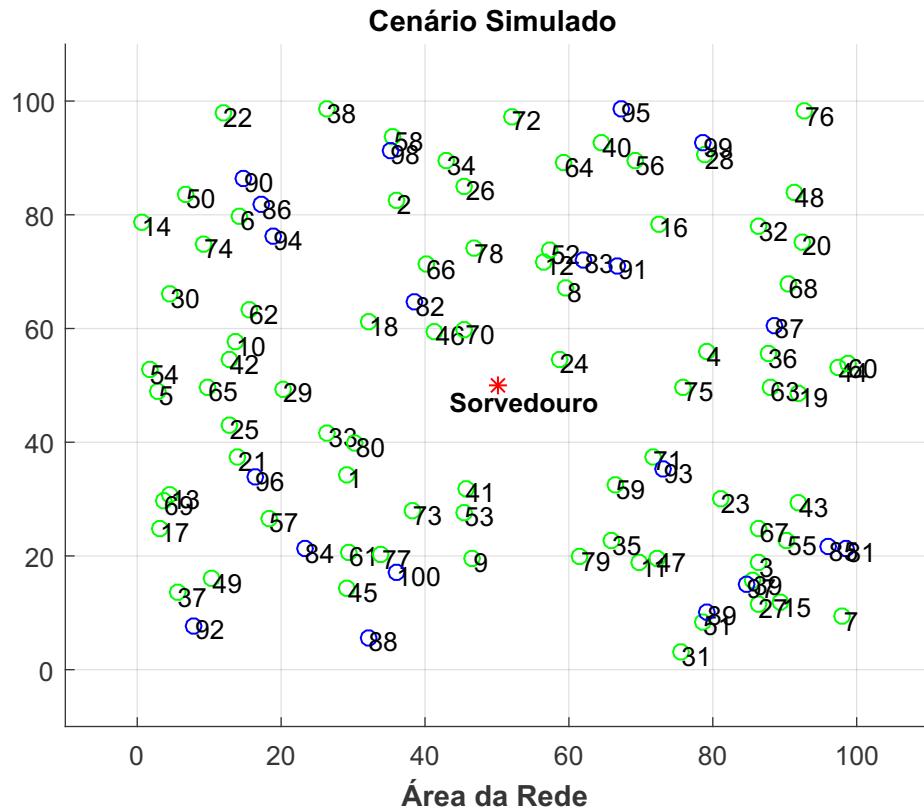
Neste Capítulo são apresentados os resultados das simulações executadas para avaliar o sistema proposto diante de cenários de RSSF. Mais especificamente são mostrados dois cenários distintos, separados em dois estudos de caso. No Estudo de Caso 1 a simulação é feita para um cenário de uma RSSF utilizada em uma grande área aberta, onde os nós são distribuídos de maneira aleatória sobre a área de cobertura da rede. O objetivo com o estudo de caso 1 é analisar o desempenho do algoritmo de traçado de rotas com AG para uma rede com muitos nós, saber através dos parâmetros analisados como o sistema proposto se comporta diante da vasta possibilidade de caminhos. No Estudo de Caso 2 a simulação é feita levando em consideração uma RSSF montada em uma área fechada, no exemplo uma moradia, onde um número reduzido de nós sensores é distribuído sobre uma área que emula a planta de uma residência. Os nós sensores são postos em posições pré-determinadas, emulando a coleta de dados de cargas na residência (iluminação, ar-condicionado, eletrodomésticos em geral, por exemplo). O objetivo com o segundo estudo de caso é a análise de um cenário mais próximo do que seria uma aplicação real do sistema proposto.

4.1 Estudo de Caso 1

O cenário proposto é simulado com o auxílio da ferramenta computacional Matlab, em que foi implementada a topologia dos nós sensores, com 100 nós distribuídos de acordo com o proposto no Capítulo 3. Na Figura 20, é mostrado o cenário simulado, e a distribuição dos nós é escolhida de forma aleatória. O sorvedouro é posicionado no centro e está representado pela estrela vermelha, os nós sensores pelos círculos azuis e os nós de retransmissão pelo círculo verde.

A característica de energia dos nós segue a mesma referência do que foi descrito no capítulo anterior e pode ser revista com os dados da Tabela 9. O cálculo do traçado de rotas realizado pelos algoritmos descritos no Capítulo 3 (o algoritmo genético, a busca exaustiva e o roteamento oportunista). O fluxo de envio de mensagens pela RSSF é feito por etapas, que inicia com o cálculo das rotas dos nós sensores; a próxima etapa é a de transmissão das mensagens, onde os nós sensores enviam mensagens para o sorvedouro. O envio de mensagens de um nó sensor para o sorvedouro será a partir daqui nomeado de rodada, a cada rodada é realizado o teste para saber se este alcançou o sorvedouro, ou se o pacote foi perdido. A próxima etapa consiste na subtração da energia consumida dos nós da rede numa rodada (dado as sucessivas transmissões e recepções) da energia residual correspondente de cada nó da RSSF. Por fim a última etapa é a verificação da

Figura 20 – Cenário simulado da RSSF para o estudo de caso 1



Fonte: Próprio Autor

condição de parada da simulação, que consiste na inutilização total da rede, isto é, onde nenhum nó sensor consegue possuir comunicação com o sorvedouro, portanto não restando mais nenhuma alternativa de coleta de dados. Caso a condição de parada não é alcançada dá-se início a um novo ciclo de etapas.

Tabela 9 – Consumo de energia e capacidade da bateria para o cenário simulado

Parâmetro	Valor
E_0	0,5 J
E_{TX}	50 nJ/bit
E_{RX}	50 nJ/bit
ε_{amp}	10 $\frac{pJ}{bit \cdot m^2}$

Fonte: Próprio Autor

O sistema é simulado com o objetivo de avaliar o desempenho do AG para traçado de rotas sob o aspecto de:

- Validade da rota;
- Tempo de vida da rede;

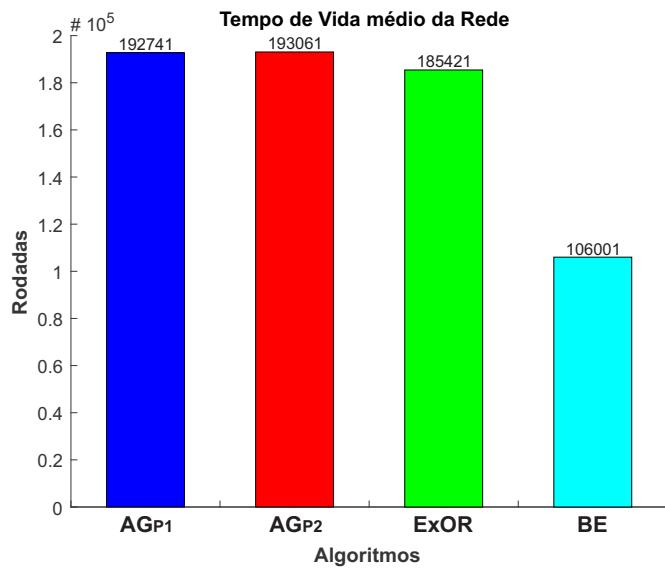
- Taxa de perda de pacotes;
- Consumo de energia pelos nós ao longo do tempo de execução.

O cenário é simulado para quatro algoritmos de roteamento, sendo que, para cada algoritmo, foram realizadas 100 repetições de simulação do mesmo cenário. Os quatro algoritmos testados são o de busca exaustiva (BE), roteamento oportunista (ExOR), o AG sendo executado com a função objetiva da Equação 3.2 (AG_{P1}) e o AG sendo executado com a função objetiva da Equação 3.6 (AG_{P2}).

Ao longo da simulação foi contabilizado o total de rodadas executadas, e em quantas dessas rodadas houve uma falha na entrega do pacote. Quando alcançado o critério de parada, ou seja, quando nenhuma rota calculada para os 20 nós sensores é válida, uma nova simulação é iniciada com a repetição do mesmo cenário de simulação.

No primeiro ponto de desempenho, a validade da rota calculada pelo AG para o cenário proposto alcançou uma taxa máxima de acerto em que, somente houve erros de rota, quando as rotas pretendidas não estavam fisicamente disponíveis (quando de fato não havia conexão entre o nó sensor e o sorvedouro). Quanto ao tempo de vida da RSSF, a Figura 21 é usada para mostrar o comparativo do tempo de vida sob a execução de cada algoritmo de roteamento. Na sequência está o número médio de rodadas que durou a RSSF com cada método, indo do AG_{P1} , passando para o AG_{P2} , na sequência o ExOR e, por fim, o algoritmo BE.

Figura 21 – Tempo de vida da RSSF para o estudo de caso 1



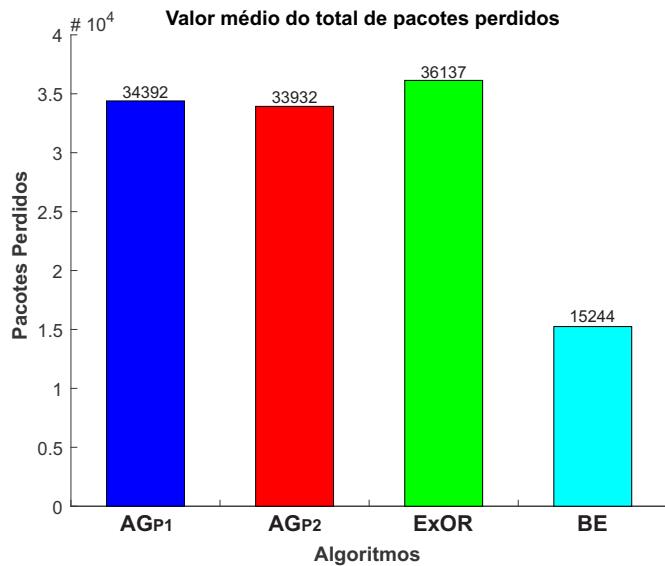
Fonte: Próprio Autor

O algoritmo AG_{P2} apresentou a melhor média do tempo de vida entre os quatro, seguido do AG_{P1} , ExOR e por último o BE que apresentou o pior desempenho. Para

o cenário simulado, o resultado obtido demonstra a efetividade do método proposto, em que ambos os algoritmos que executam o AG se saíram melhor que os outros dois algoritmos de comparação sobrevivendo em média 7000 rodadas a mais (uma diferença de aproximadamente 4%) que o ExOR e 90000 a mais que o BE (diferença de aproximadamente 85%).

Com relação a taxa de perda de pacotes (PLR) é feita a comparação do total médio de pacotes perdidos, que é apresentado na Figura 22, com o tempo de vida da RSSF representado pelo total médio de rodadas executadas para cada algoritmo de roteamento. Sempre que um salto é realizado, há uma chance de perda de pacote seguindo os parâmetros da Tabela 6, um número aleatório (entre 0 e 1) é gerado para representar essa perda, se este número gerado estiver abaixo das porcentagens (se o número for abaixo de 0,05 para 5%, por exemplo) relacionadas na tabela, significa que houve uma perda de pacotes e há a indicação de pacote perdido. Semelhante à Figura 21, a Figura 22 apresenta na sequência a média de pacotes perdidos por simulação do cenário utilizando os algoritmos: AG_{P1}, AG_{P2}, ExOR e por fim BE.

Figura 22 – Taxa de perda de pacotes média da RSSF para o estudo de caso 1



Fonte: Próprio Autor

Em uma aplicação real, o valor de PLR é obtido da relação direta entre a quantidade de pacotes enviados com a quantidade de pacotes efetivamente recebidos. Para amenizar o efeito da perda de pacotes algumas técnicas são aplicadas, como a de redundância de mensagem, que faz com que mais de uma cópia do pacote de dados seja enviado para que garanta a comunicação entre transmissor e receptor. No cenário simulado, nenhuma técnica (como a de redundância) foi aplicada e os resultados obtidos são reflexo desta escolha. Altas taxas de perda de pacote são registradas, mas apesar destes valores é possível analisar que a proposta da segunda função objetiva $P_2(x)$ neste caso foi cumprida. De acordo com o

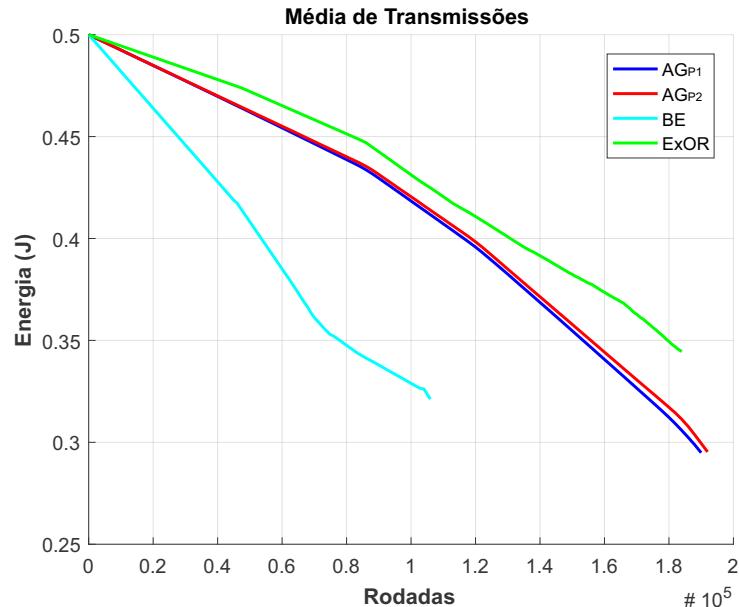
que é mostrado na Figura 22, o AG_{P2} apresenta menor número de pacotes perdidos se comparado a AG_{P1} e ExOR, enquanto BE possui o menor entre todos. Em valores de PLR, o cenário simulado com o algoritmo de roteamento AG_{P2} apresentou uma perda média de 17,58% dos seus pacotes, o cenário com o AG_{P1} perdeu 17,85%, o cenário com o ExOR perdeu 19,49% dos pacotes que foram transmitidos e por fim o cenário simulado com o algoritmo de BE para traçado de rotas obteve uma PLR de 14,38%.

O desempenho da rede com o algoritmo AG_{P2} sendo executado obteve um maior êxito com relação ao algoritmo AG_{P1} , se comparado o tempo de vida da rede, embora não houve nenhuma diferença significativa entre os dois. Uma maior diferença pode ser alcançada se houver alteração na função objetiva $P_2(x)$ que possibilite uma maior priorização na otimização da PLR. Com relação ao melhor desempenho do algoritmo de BE, dois motivos podem ser apontados: primeiro por ser o algoritmo que apresentou o menor tempo de vida, este entregou menos pacotes, tendo assim menos pacotes para perder. O segundo motivo, e talvez o mais significativo, é a sua escolha de próximo salto que prioriza o nó mais próximo; quanto maior a proximidade entre nós menor a chance de haver uma perda de pacote. Esta lógica pode ser utilizada de maneira semelhante para analisar o desempenho do cenário com o algoritmo ExOR; por este priorizar os nós mais próximos ao sorvedouro, cada salto naturalmente tende a cobrir a maior distância possível, acarretando em um maior valor de PLR.

O último parâmetro a ser analisado é o de consumo de energia pela RSSF. O consumo energético é avaliado relacionando a média e o desvio padrão da energia residual nos nós da RSSF para os quatro métodos comparados. Para cada algoritmo de roteamento foi analisado o consumo de energia de todos os nós da rede, e com essa informação foi construída uma curva que relaciona a média da energia residual de todos os nós ao longo das rodadas de transmissão. Na Figura 23 está a representação da curva levantada ao longo de todo o tempo de vida da RSSF, para todos os algoritmos de roteamento comparados.

Neste teste o resultado da média da energia residual da RSSF apontou que a taxa de queda média de 0,0274% da energia residual do nó por rodada para o algoritmo AG_{P2} , enquanto que o algoritmo AG_{P1} apresentou uma taxa de queda de 0,0282%; por fim, o método ExOR teve uma taxa de queda de 0,0208% por rodada e a BE uma taxa de 0,0353%. O método ExOR obteve uma menor taxa de queda da média da energia residual, apresentando o melhor resultado. Apesar disso, em média seu tempo de vida é menor, o que pode ser explicado pelo fato deste método alcançar a condição de parada mais rapidamente que os cenários simulados com o AG, o que mostra que o consumo de energia é mais desigual para o ExOR do que para o AG. Novamente entre o AG_{P2} e o AG_{P1} houve uma diferença mínima (uma diferença aproximada de 3%) no desempenho se comparado este parâmetro e qualquer mudança significativa deve ser apresentada em uma mudança na função objetiva que avalia os indivíduos durante a execução do AG. Para avaliar a

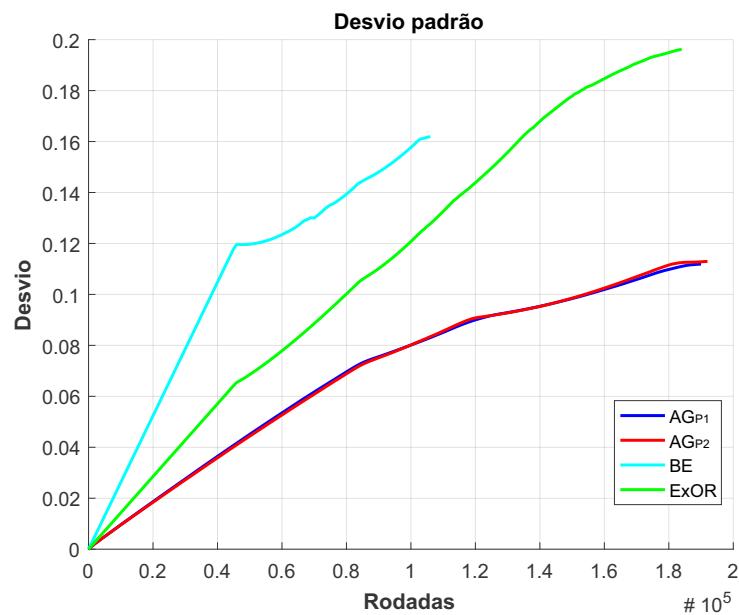
Figura 23 – Média da energia residual na RSSF ao longo das rodadas para o estudo de caso 1



Fonte: Próprio Autor

questão do balanceamento energético é preciso analisar agora o desvio padrão da energia residual nos nós da RSSF. Na Figura 24 é representado o desvio padrão para os quatro métodos de acordo com a média apresentada na Figura 23.

Figura 24 – Desvio padrão da energia residual na RSSF ao longo das rodadas para o estudo de caso 1

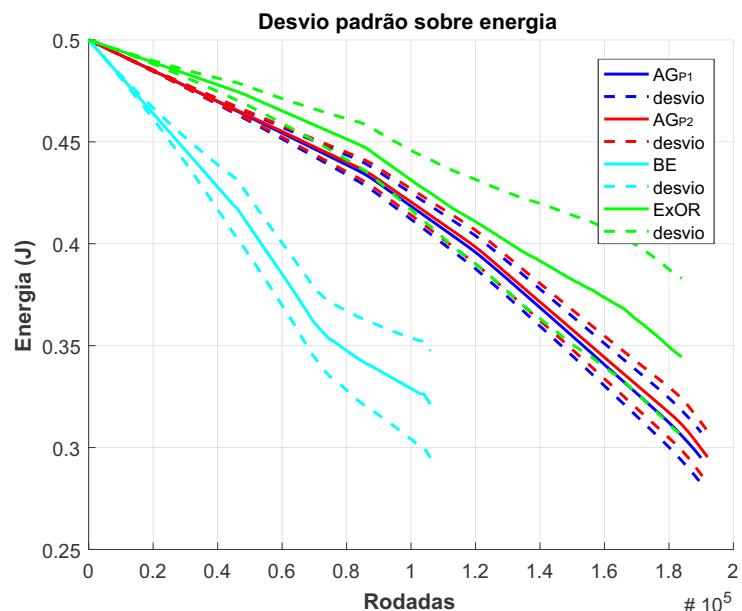


Fonte: Próprio Autor

Pela análise da Figura 24 é possível observar como se comporta a distribuição de energia residual por entre os nós. No algoritmo ExOR, por exemplo, quando este se

aproxima ao fim de seu tempo de vida, o desvio dos nós em torno da média próximo a 200 mJ¹; enquanto isso, AG_{P2} e AG_{P1}, ao fim da execução das simulações apresentam um desvio padrão menor que 120 mJ. Analisando essa diferença, pode-se afirmar que o algoritmo ExOR tem mais chances de apresentar nós que descarregam mais rápido que outros, enquanto no algoritmo genético há uma menor disparidade e no geral os nós estão todos próximos de um mesmo nível de energia residual. Esta diferença pode ser melhor observada a partir da observação da projeção do desvio padrão sobre a média da energia residual, como é representado na Figura 25. Nela, a linha tracejada representa o desvio sobre a média, indicando que a energia residual dos nós estão concentrados entre as linhas tracejadas. Por fim, essa concentração representa uma maior probabilidade de os nós apresentarem a mesma energia residual, e portanto um melhor balanceamento energético se comparado aos outros métodos simulados.

Figura 25 – Desvio sobre a média da energia residual na RSSF para o estudo de caso 1



Fonte: Próprio Autor

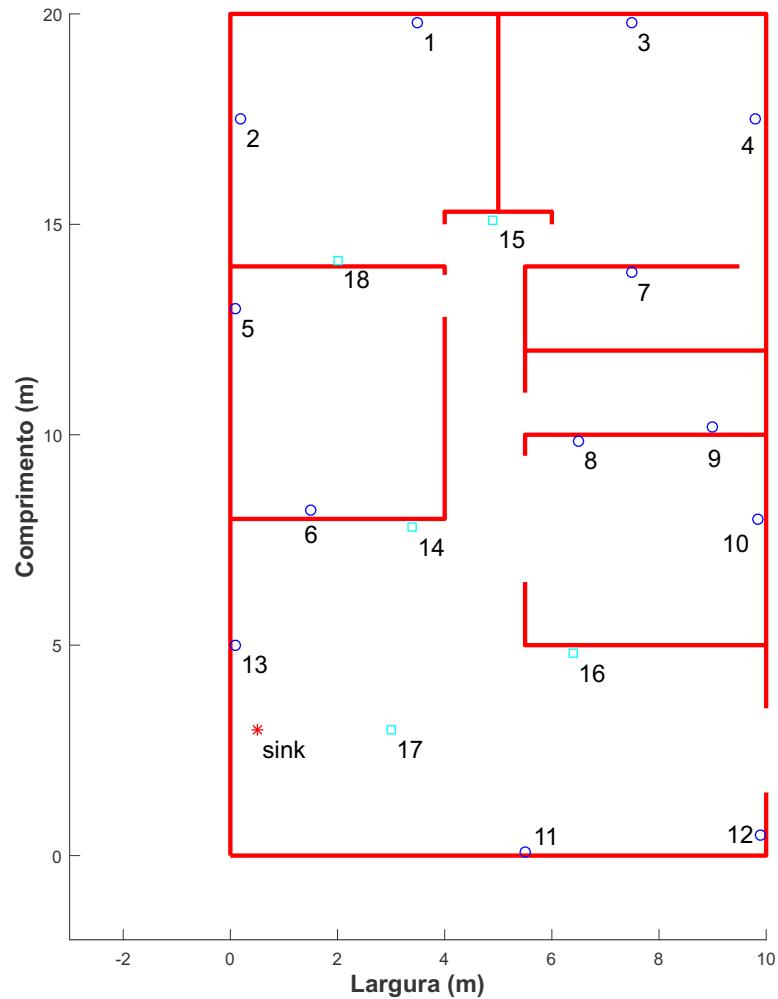
Em resumo, os resultados apresentados mostram que o método AG_{P2}, que trata da execução do AG com a função objetiva $P_2(x)$, obteve o melhor resultado na simulação. Isso demonstra que a elaboração da nova função objetiva se mostrou mais eficiente se comparada com a função objetiva $P_1(x)$.

¹ A unidade mJ é comumente utilizada na literatura quando se aborda comunicações sem fio. Mesmo se tratando de energia armazenada na bateria, a unidade é adotada para estar de acordo com as equações de consumo para transmissão e recepção que são utilizadas para analisar o desempenho energético da rede.

4.2 Estudo de Caso 2

O cenário proposto é simulado com o auxílio da ferramenta computacional Matlab, em que foi implementada a topologia dos nós sensores, com 18 nós distribuídos sobre uma área que se assemelha a um imóvel, possuindo 3 quartos (Q1, Q2 e Q3), 2 banheiros (B1 e B2), 1 cozinha e uma sala de estar. Na Figura 26, é mostrado o cenário simulado, e a distribuição dos nós é escolhida como se estes estivessem conectados a cargas da casa (iluminação, ar-condicionado, eletrodomésticos, entre outros) de forma a emular a coleta de dados destas cargas. Os nós de retransmissão são posicionados de forma a auxiliar o roteamento para a RSSF. O sorvedouro é posicionado na sala de estar, está representado pela estrela vermelha, os nós sensores pelos círculos azuis (sendo um total de 13 nós) e os nós roteadores pelos quadrados cianos (num total de 5).

Figura 26 – Cenário simulado da RSSF para o estudo de caso 2



Fonte: Próprio Autor

Assim como no estudo de caso 1, as características de energia dos nós seguem o que é apontado no capítulo anterior e apresentam os mesmos valores presentes na Tabela

9. O cálculo do traçado de rotas é realizado pelos algoritmos descritos no Capítulo 3 (o algoritmo genético, a busca exaustiva e o roteamento oportunista). O fluxo de mensagens ocorre da mesma forma que no cenário anterior. As principais mudanças nesse novo cenário estão nos parâmetros de simulação da RSSF, pois estes diferem-se do apresentado na Tabela 7, pode ser citado o número de nós, o tamanho total da área da rede, o raio de cobertura (Tx_{range}) dos nós e o coeficiente de perda do canal (γ). Os novos valores dos parâmetros de simulação para o cenário do estudo de caso 2 são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros para simulação do estudo de caso 2

Parâmetro	Valor
Área da Rede	10×20 m
Distribuição do Nós	Posições Pré-determinadas
Nº de Nós	13
Sensores	
Nº de Nós Roteadores	5
Sorvedouro	1
Tx_{range}	6 m
γ	4
n	20 bytes

Fonte: Próprio Autor

Para análise do desempenho do sistema proposto, como também dos outros algoritmos comparativos, são analisados os seguintes parâmetros:

- Validade da rota;
- Tempo de vida da rede;
- Taxa de perda de pacotes;
- Consumo de energia pelos nós ao longo do tempo de execução.

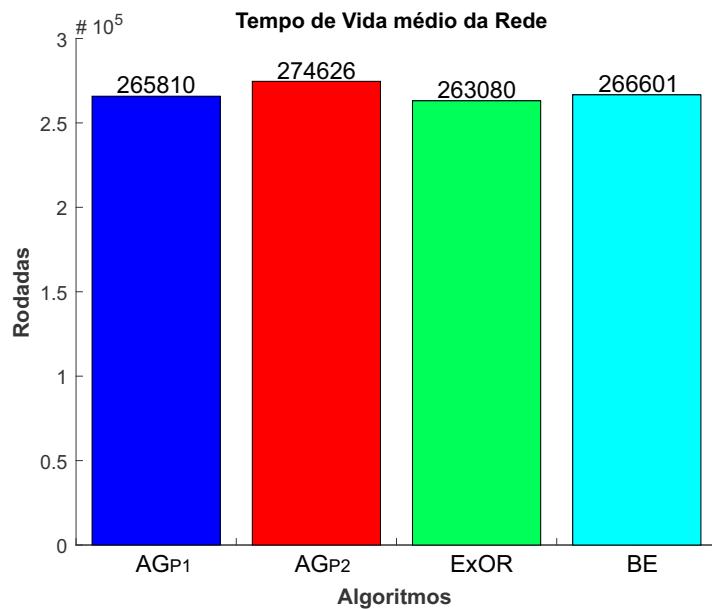
O cenário é simulado para quatro algoritmos de roteamento, sendo que, para cada algoritmo, foram realizadas 100 repetições de simulação do mesmo cenário. Os quatro algoritmos testados são o de busca exaustiva (BE), roteamento oportunista (ExOR), o AG sendo executado com a função objetiva da Equação 3.2 (AG_{P1}) e o AG sendo executado com a função objetiva da Equação 3.6 (AG_{P2}).

Ao longo da simulação foi contabilizado o total de rodadas executadas, e em quantas dessas rodadas houve uma falha na entrega do pacote. Uma falha é indicada da mesma forma que no estudo de caso anterior Quando alcançado o critério de parada, ou seja,

quando nenhuma rota calculada para os 20 nós sensores é válida, uma nova simulação é iniciada com a repetição do mesmo cenário de simulação.

No primeiro ponto de desempenho, a validade da rota calculada pelo AG para o cenário proposto alcançou uma taxa máxima de acerto em que, somente houve erros de rota, quando as rotas pretendidas não estavam fisicamente disponíveis (quando de fato não havia conexão entre o nó sensor e o sorvedouro). No aspecto relacionado a duração da RSSF, a Figura 27 é usada para mostrar os resultados de tempo de vida da RSSF sob a execução de cada algoritmo de roteamento. Estes números representam a quantidade de transmissões que foram realizadas até que fosse alcançado a condição de parada. Na sequência está o número médio de rodadas que durou a RSSF com cada método, indo do AG_{P1}, passando para o AG_{P2}, na sequência o ExOR e, por fim, o algoritmo BE.

Figura 27 – Tempo de vida da RSSF para o estudo de caso 2

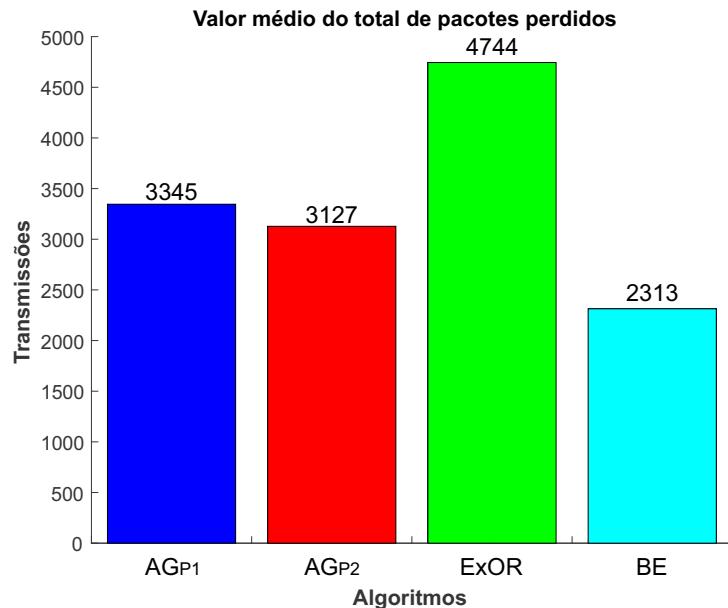


Fonte: Próprio Autor

Nesta comparação do tempo de vida, é possível observar que todos os algoritmos executados obtiveram um valor bem próximo de tempo de vida. Ainda assim, algoritmo AG_{P2} apresentou a melhor média do tempo de vida entre os quatro, seguido do BE, AG_{P1} e por último o ExOR, que apresentou o pior desempenho. Dentro do estudo de caso observado, é possível observar uma equivalência entre os métodos comparados, mesmo assim houve uma maior sobrevivência da rede no método AG_{P2} em que a rede realizou cerca de 8000 transmissões a mais que o segundo melhor em desempenho (O algoritmo BE). Fazendo-se uma comparação com o primeiro estudo de caso, pode-se apontar um volume bem mais elevado de transmissões sob as mesmas condições de consumo. Um motivo para tal fato ocorrer é o menor número de nós leva a rotas menores e por consequência a menos gasto energético por transmissão.

Com relação a taxa de perda de pacotes (PLR) é feita a comparação do total médio de pacotes perdidos, que é apresentado na Figura 28, com o tempo de vida da RSSF representado pelo total médio de rodadas executadas para cada algoritmo de roteamento. A forma com que é representado as chances de haver perda de pacotes é a mesma que no estudo de caso 1. Semelhante à Figura 27, a Figura 28 apresenta na sequência a média de pacotes perdidos por simulação do cenário utilizando os algoritmos: AG_{P1} , AG_{P2} , ExOR e por fim BE.

Figura 28 – Valor médio do total de pacotes perdidos para o estudo de caso 2

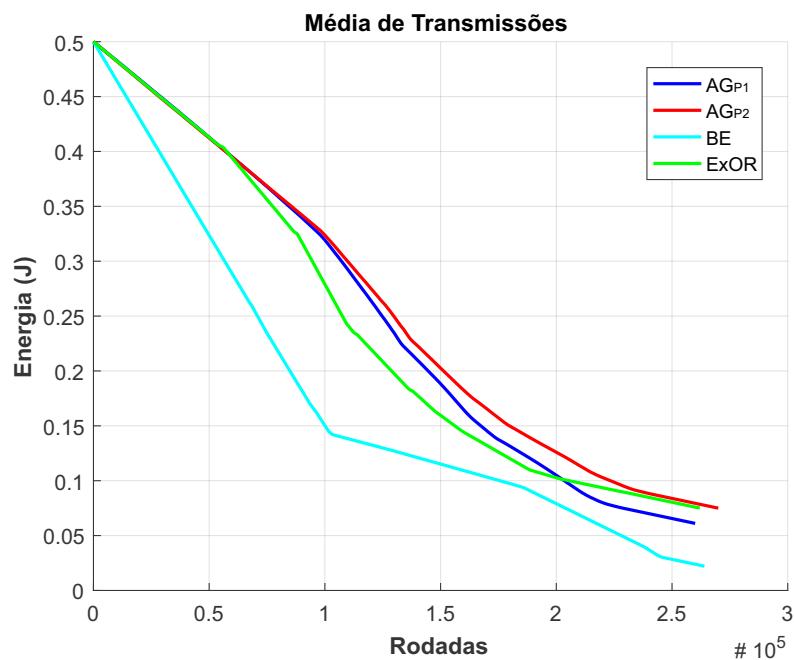


Fonte: Próprio Autor

Como foi optado por utilizar o mesmo modelo de perda de pacotes adotado no estudo de caso 1, a quantidade de pacotes perdidos foram muito pequenas se comparadas com o número médio de transmissões (ou o tempo de vida da RSSF). Desta forma, o que se observa é um menor impacto da perda de pacotes no desempenho geral da rede. Observando a média da quantidade de pacotes perdidos pela média do tempo de vida da rede tem-se que o algoritmo BE obteve o melhor desempenho, perdendo cerca de 0,86% dos seus pacotes, enquanto que o método proposto AG_{P2} obteve um PLR de 1,13%. Seguindo com o algoritmo AG_{P1} com uma perda de 1,25% dos seus pacotes e por último o ExOR, que perdeu 1,8% dos dados transmitidos. Apesar da perda ser bem menos elevada se comparado com o que aconteceu no primeiro cenário, observa-se que a simulação obteve a mesma tendência do ocorrido no estudo de caso 1. O algoritmo BE obteve o menor valor de PLR devido a sua lógica de traçado de rotas, em que há uma priorização do salto para os nós mais próximos; quanto mais próximo um nó estiver do outro menor é a chance de haver a perda de pacotes. O desempenho do AG_{P2} foi melhor que o AG_{P1} pois sua função objetivo ($P_2(x)$) é construída também para minimizar o valor de PLR.

O último parâmetro a ser analisado é o de consumo de energia pela RSSF. O consumo energético é avaliado relacionando a média e o desvio padrão da energia residual nos nós da RSSF para os quatro métodos comparados. Para cada algoritmo de roteamento foi analisado o consumo de energia de todos os nós da rede, e com essa informação foi construída uma curva que relaciona a média da energia residual de todos os nós ao longo das rodadas de transmissão. Na Figura 29 está a representação da curva levantada ao longo de todo o tempo de vida da RSSF, para todos os algoritmos de roteamento comparados.

Figura 29 – Média da energia residual na RSSF ao longo das rodadas para o estudo de caso 2



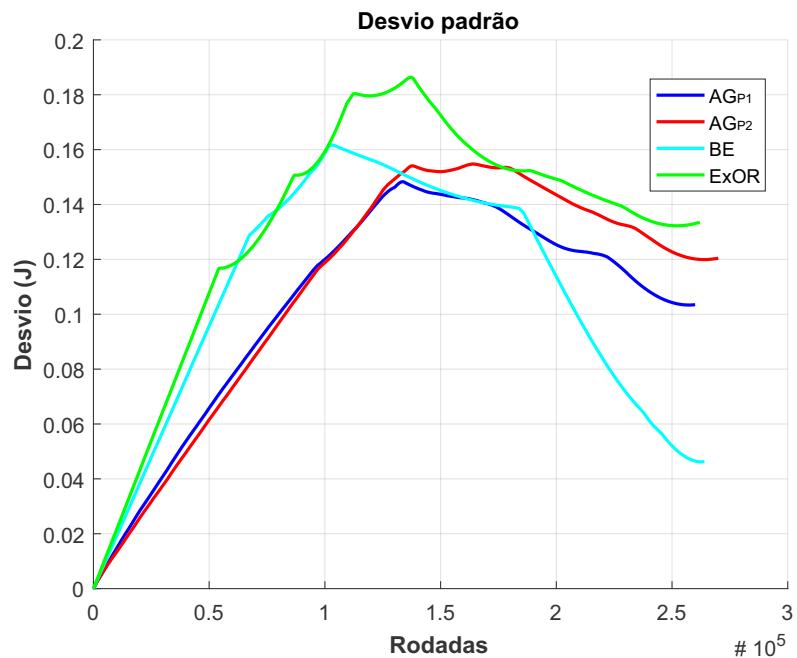
Fonte: Próprio Autor

O método AGP₂ obteve uma menor taxa de queda da média da energia residual, apresentando ao final da sua execução a maior média de energia residual. O que acaba por refletir no seu desempenho no tempo de vida (o método obteve a maior média do tempo de vida da RSSF), evidenciando seu maior balanceamento energético se comparado aos outros métodos, o que é comprovado com o resultado de desvio padrão apresenta mais adiante. O algoritmo ExOR obteve o segundo melhor desempenho de média de energia residual nos nós, apesar disso, em média seu tempo de vida é o menor entre todos os métodos. Este fato pode ser explicado pois o método tende a alcançar a condição de parada mais rapidamente (pela opção de traçado de rotas que prioriza os nós mais próximos do sorvedouro), o que mostra que o consumo de energia é mais desigual para o ExOR do que para o AG. Novamente entre o AGP₂ e o AGP₁ houve uma diferença mais acentuada se comparada ao estudo de caso anterior, o que pode ser explicado pelo fato da função objetiva do AGP₂ aqui possuir uma diferença mais significativa que no outro cenário. O desempenho do BE pode ser explicado pela tendência do seu traçado de rotas de calcular

rotas com muitos saltos, por isso o mesmo tem o maior decaimento de energia residual durante o tempo de execução da RSSF (maior número de nós consumindo energia por rodada).

Para avaliar a questão do balanceamento energético é preciso analisar agora o desvio padrão da energia residual nos nós da RSSF. Na Figura 30 é representado o desvio padrão para os quatro métodos de acordo com a média apresentada na Figura 29.

Figura 30 – Desvio padrão da energia residual na RSSF ao longo das rodadas para o estudo de caso 2



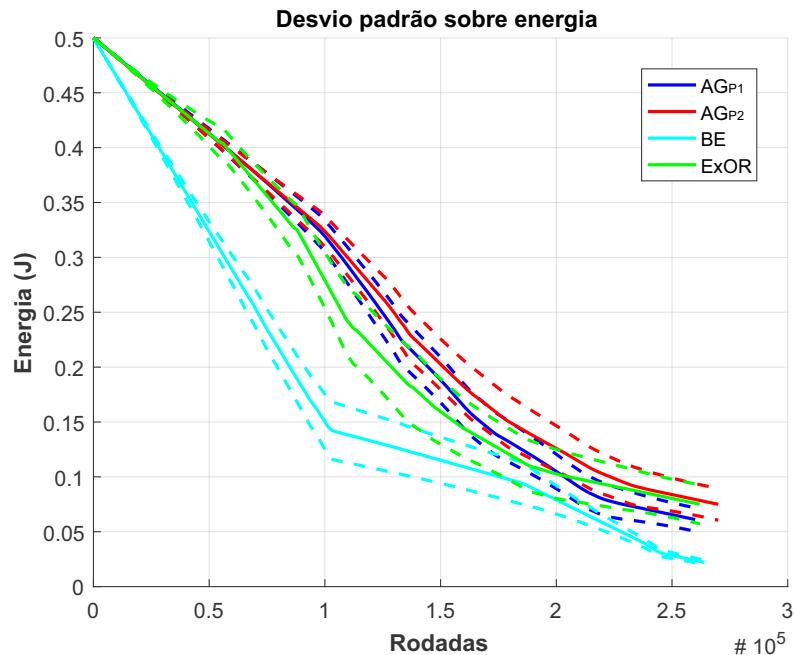
Fonte: Próprio Autor

Pela análise da Figura 30 é possível observar como se comporta a distribuição de energia residual por entre os nós. No algoritmo ExOR, por exemplo, quando este se aproxima ao fim de seu tempo de vida, o desvio dos nós em torno da média próximo a 140 mJ, chegando a ter um pico de mais de 180 mJ; enquanto isso, AG_{P2} e AG_{P1}, ao fim da execução das simulações apresentam um desvio padrão de 120 e 103 mJ, respectivamente. Analisando essa diferença, pode-se afirmar que o algoritmo ExOR tem mais chances de apresentar nós que descarregam mais rápido que outros, enquanto no algoritmo genético há uma menor disparidade e no geral os nós estão todos próximos de um mesmo nível de energia residual. O caso mais singular é o do algoritmo BE, que ao fim apresenta um desvio de aproximadamente 45 mJ, sendo que em seu pico este desvio é de aproximadamente 160 mJ. O principal motivo deste valor de desvio para o BE é que seus nós ao fim das simulações estavam quase que em sua maioria esgotados de energia, motivo que explica também sua média de energia residual.

Esta diferença pode ser melhor observada a partir da observação da projeção do

desvio padrão sobre a média da energia residual, como é representado na Figura 31. Nela, a linha tracejada representa o desvio sobre a média, indicando que a energia residual dos nós estão concentrados entre as linhas tracejadas. Por fim, essa concentração representa uma maior probabilidade de os nós apresentarem a mesma energia residual, e portanto um melhor balanceamento energético se comparado aos outros métodos simulados.

Figura 31 – Desvio sobre a média da energia residual na RSSF para o estudo de caso 2



Fonte: Próprio Autor

Em resumo, os resultados apresentados mostram que o método AG_{P2}, que trata da execução do AG com a função objetiva $P_2(x)$, obteve o melhor resultado na simulação se for levar em consideração o tempo de vida da RSSF. Muito embora para este cenário todos os métodos se demonstrem equiparados em desempenho. No próximo capítulo são realizadas as discussões sobre os resultados obtidos, além de ser feita uma comparação entre estes resultados e os objetivos definidos no início do trabalho. São também propostos trabalhos futuros que podem surgir a partir da pesquisa aqui mostrada.

5 Conclusões

O trabalho desenvolvido nesta dissertação teve como objetivo desenvolver uma estratégia de roteamento para redes de sensores sem fio. Esta estratégia foi desenvolvida através da implementação de um algoritmo genético, um método de busca de soluções que visa traçar a rota entre um nó sensor da rede e o sorvedouro de dados. A partir dos resultados obtidos, em comparação com outros dois métodos, é possível observar que a proposta do algoritmo foi alcançada, ou seja, desenvolveu-se uma estratégia de traçado de rotas que realize o balanceamento energético dos nós da rede. Esse aspecto foi atingido devido às propriedades de otimização do AG, que prioriza soluções que escolham nós para compor a rota com um maior nível de carga, em detrimento de nós com menor nível energético.

Além desse, os outros objetivos propostos foram atingidos, como por exemplo o desenvolvimento de uma nova forma de codificação do indivíduo no AG; esta proposta gera soluções viáveis, rotas que são calculadas com precisão sob condições normais de operação da rede. O cálculo de rotas erradas ocorreu somente quando estas não estavam de fato disponíveis, pelo fato do nó sensor ou do sorvedouro não ter nenhum nó ativo para uma ligação direta. O outro objetivo foi alcançado com a proposição da função objetiva, que pode ser validada pelo resultado do balanceamento energético. Ambas as funções objetivas foram desenvolvidas neste trabalho, e em sua análise notou-se o impacto no consumo de energia pelos nós da rede, aumentando o tempo de vida da rede e o balanceamento energético dos nós sensores. Enquanto os métodos que serviram de comparação (em especial o ExOR) obtiveram um menor balanceamento energético e menor tempo de vida se comparado a técnica baseada em AG.

Em um balanço geral o algoritmo baseado em AG se mostra aplicável como solução do problema de traçado de rotas para RSSF e pode ser adaptado para qualquer rede desde que se tenha conhecimento do que se deve otimizar na sua operação. Esta afirmação pode ser feita com base nos dados obtidos da simulação, em que ambos os cenários onde o traçado de rotas foi executado pelo AG (AG_{P1} e AG_{P2}) obtiveram melhor desempenho nos parâmetros comparados com os outros dois métodos simulados (BE e ExOR).

Mais especificamente, o uso da função objetiva $P_2(x)$ para o cálculo da aptidão dos indivíduos se mostrou mais eficiente. Devido ao fato de o cenário simulado AG_{P2} , que utilizou esta função objetiva no cálculo do AG, ter apresentado um melhor resultado dentre todos os outros métodos comparados. Apresentando um maior balanceamento energético da rede, que proporcionou o maior tempo de vida da rede. Este ponto é evidenciado pela média de seu desvio padrão, que foi a menor entre todos os algoritmos comparados.

5.1 Contribuições da Pesquisa

Ao longo do tempo de pesquisa sobre os assuntos que envolvem este trabalho, foram alcançadas algumas contribuições na área de RSSF e algoritmos de otimização. Foi desenvolvido um novo algoritmo de roteamento para RSSF onde é executado um AG para o cálculo das rotas. As principais contribuições são na execução do AG com uma forma de codificação que gera soluções válidas para qualquer topologia em malhas de RSSF. Fora isso, duas funções de aptidão que avaliam as soluções geradas de acordo com alguns dos principais parâmetros de desempenho da RSSF (distância percorrida, consumo de energia e perda de pacotes).

As contribuições alcançadas neste trabalho agregam valor também ao projeto de pesquisa realizado pela equipe da Inovathys, que vêm desde 2016 desenvolvendo soluções na área de domótica e comunicação sem fio. Espera-se que os resultados obtidos, junto com o sistema desenvolvido sirva de base para a ampliação e modernização das soluções disponibilizadas pela equipe da Inovathys.

No âmbito acadêmico, a pesquisa rendeu no mês de maio de 2019 uma publicação no congresso internacional I2MTC que ocorreu na Nova Zelândia de um artigo intitulado: "Avaliação do Desempenho de uma Rede Mesh Sem Fio construída com Transceptores Sub-GHz". No artigo é mostrado uma abordagem experimental sobre comunicações sem fio, em que é tratado sobre parâmetros físicos de um módulo transceptor, e desempenho quanto à roteamento. É planejado ainda publicações que reportem os resultados obtidos do sistema proposto neste trabalho.

5.2 Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros pode-se citar a aplicação do algoritmo em um ambiente real com nós sensores construídos para alguma aplicação, e observar como este se comporta; outro ponto que pode ser trabalhado é a melhora do algoritmo em si, fazendo-se uma análise sobre o método de otimização utilizado a fim de melhorar seu desempenho. Melhorar o desempenho do AG pode ser feito através de testes de novas funções objetivas, ajustes de regras na codificação dos indivíduos e a aplicação de novos parâmetros para os operadores genéticos: como o número de gerações e indivíduos e as taxas de cruzamento de mutação. A finalidade é encontrar um ponto de balanceamento entre a exatidão do método e seu tempo de execução.

Para aplicação em um ambiente real é necessário definir algumas características operacionais, além de qual a aplicação da RSSF e qual sua finalidade. A proposta é fazer com quê uma unidade de processamento real execute o AG para traçado de rotas de uma rede física que colete dados de interesse dentro de um ambiente de uma RSSF.

Referências

- ADI, P. D. P.; KITAGAWA, A. Zigbee radio frequency (rf) performance on raspberry pi 3 for internet of things (iot) based blood pressure sensors monitoring. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, v. 10, n. 5, 2019. Citado na página 63.
- AGNIHOTRI, A.; GUPTA, I. K. A hybrid pso-ga algorithm for routing in wireless sensor network. In: IEEE. *2018 4th International Conference on Recent Advances in Information Technology (RAIT)*. [S.l.], 2018. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.
- AKYILDIZ, I. F. *et al.* Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, Elsevier, v. 38, n. 4, p. 393–422, 2002. Citado na página 17.
- ALLIANCE, Z. Zigbee specification. document 053474r17. *Zigbee Alliance*, Jan, 2008. Citado na página 30.
- ANASTASI, G. *et al.* Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. *Ad hoc networks*, Elsevier, v. 7, n. 3, p. 537–568, 2009. Citado na página 28.
- ARROYO, J. E. C. *et al.* Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatória multiobjetivo. [sn], 2002. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.
- AUSIELLO, G. *et al.* *Complexity and approximation: Combinatorial optimization problems and their approximability properties*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. Citado na página 42.
- BAKER, J. E. Reducing bias and inefficiency in the selection algorithm. In: *Proceedings of the second international conference on genetic algorithms*. [S.l.: s.n.], 1987. v. 206, p. 14–21. Citado na página 45.
- BAMBERE, P.; GHOSH, S. Performance evaluation of energy efficient multi-hop broadcast protocol for wireless sensor networks. IET, 2016. Citado na página 39.
- BARAN, M.; WU, F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing, iee transactions on power delivery, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407. 1989. Citado na página 44.
- BAROLLI, A. *et al.* Application of ga and multi-objective optimization for qos routing in ad-hoc networks. In: IEEE. *2011 14th International Conference on Network-Based Information Systems*. [S.l.], 2011. p. 50–59. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 38.
- BEAN, J. C. Genetic algorithms and random keys for sequencing and optimization. *ORSA journal on computing*, INFORMS, v. 6, n. 2, p. 154–160, 1994. Citado na página 44.
- BIRAJDAR, D. M.; SOLAPURE, S. S. Leach: An energy efficient routing protocol using omnet++ for wireless sensor network. In: IEEE. *2017 International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT)*. [S.l.], 2017. p. 465–470. Citado na página 41.

- BLICKLE, T.; THIELE, L. A comparison of selection schemes used in evolutionary algorithms. *Evolutionary Computation*, MIT Press, v. 4, n. 4, p. 361–394, 1996. Citado na página 45.
- Braun, T. *et al.* Qos management in wireless multimedia networks. In: _____. [S.l.]: COST 290, 2009. v. 31, cap. 5. Citado na página 26.
- BRINDHA, N.; VANITHA, S. The data aggregation approach to enhance the lifetime of wireless sensor network. In: IEEE. *2017 International Conference on Innovations in Green Energy and Healthcare Technologies (IGEHT)*. [S.l.], 2017. p. 1–5. Citado na página 22.
- BRUDERER, E.; SINGH, J. V. Organizational evolution, learning, and selection: A genetic-algorithm-based model. *Academy of management journal*, Academy of Management Briarcliff Manor, NY 10510, v. 39, n. 5, p. 1322–1349, 1996. Citado na página 45.
- CHEN, P.; O'DEA, B.; CALLAWAY, E. Energy efficient system design with optimum transmission range for wireless ad hoc networks. In: IEEE. *2002 IEEE International Conference on Communications. Conference Proceedings. ICC 2002 (Cat. No. 02CH37333)*. [S.l.], 2002. v. 2, p. 945–952. Citado na página 35.
- COMMISSION, I. *et al.* Industrial communication networks-wireless communication network and communication profiles-wirelesshart™. Switzerland: IEC, p. 944, 2010. Citado na página 30.
- CORMEN, T. H. *et al.* Algoritmos: teoria e prática. *Editora Campus*, v. 2, p. 2, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 40, 52 e 53.
- CROW, J. F.; KIMURA, M. Efficiency of truncation selection. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, National Acad Sciences, v. 76, n. 1, p. 396–399, 1979. Citado na página 45.
- CUNHA, M. C. C. *Métodos numéricos*. [S.l.]: Editora da UNICAMP, 2000. Citado na página 42.
- DARGIE, W.; POELLABAUER, C. *Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 17, 18 e 27.
- DEVI, L. N.; RAO, A. N. Optimization of energy in wireless sensor networks using clustering techniques. In: IEEE. *2016 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*. [S.l.], 2016. p. 1–4. Citado na página 18.
- DHAMI, M.; GARG, V.; RANDHAWA, N. S. Enhanced lifetime with less energy consumption in wsn using genetic algorithm based approach. In: IEEE. *2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*. [S.l.], 2018. p. 865–870. Citado na página 20.
- DILLI, R.; REDDY, P. C. S. Trade-off between length of the hash code and performance of hybrid routing protocols in manets. In: IEEE. *2016 2nd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT)*. [S.l.], 2016. p. 732–735. Citado na página 40.
- FARAHANI, S. *ZigBee wireless networks and transceivers*. [S.l.]: Newnes, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

- FRADJ, H. B. *et al.* A range-based opportunistic routing protocol for wireless sensor networks. In: IEEE. *2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*. [S.l.], 2017. p. 770–774. Citado na página 23.
- FRADJ, H. B.; ANANE, R.; BOUALLEGUE, R. Energy consumption for opportunistic routing algorithms in wsn. In: IEEE. *2018 IEEE 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*. [S.l.], 2018. p. 259–265. Citado na página 23.
- FRADJ, H. B. *et al.* Comparative study of opportunistic routing in wireless sensor networks. In: IEEE. *2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*. [S.l.], 2017. p. 775–779. Citado na página 19.
- FRANÇA, P. C. Conceitos, classes e/ou universais: com o que é que se constrói uma ontologia? *Linguamática*, v. 1, n. 1, p. 105–121, 2009. Citado na página 22.
- GARCÍA, V.; VEGA, N. Low power sensor node applied to domotic using iot. In: SPRINGER. *International Congress of Telematics and Computing*. [S.l.], 2018. p. 56–69. Citado na página 17.
- GOYAL, D.; TRIPATHY, M. R. Routing protocols in wireless sensor networks: A survey. In: IEEE. *2012 Second International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies*. [S.l.], 2012. p. 474–480. Citado na página 39.
- HAJER, B. F.; BOUALLEGUE, R. Comparative analysis of opportunistic routing protocol algorithms in wireless sensor network. In: IEEE. *2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*. [S.l.], 2018. p. 158–163. Citado na página 19.
- HOLANDA, A. B. d. *et al.* Dicionário da língua portuguesa. Séc. XXI. Versão, v. 3, 2010. Citado na página 29.
- HOLLAND, J. H. Adaptation in natural and artificial systems. 1975. *Ann Arbor, MI: University of Michigan Press and*, 1992. Citado na página 43.
- HOMAEI, M. H. *LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy protocol)*. 2014. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/48162-leach-low-energy-adaptive-clustering-hierarchy-protocol>>. Citado na página 50.
- HOSSAIN, M. S. *et al.* Qos-oriented multimedia transmission using multipath routing. *Future Generation Computer Systems*, Elsevier, v. 99, p. 226–234, 2019. Citado na página 18.
- JIANG, S. Leach protocol analysis and optimization of wireless sensor networks based on pso and ac. In: IEEE. *2018 10th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*. [S.l.], 2018. v. 2, p. 246–250. Citado na página 41.
- JR, C. L. N.; YONEYAMA, T. Inteligência artificial em controle e automação. *Editora Edgard Blücher Ltda*, 2000. Citado na página 42.
- KAUR, G.; GARG, R. M. Energy efficient topologies for wireless sensor networks. *International Journal of Distributed and Parallel Systems*, Academy & Industry Research Collaboration Center (AIRCC), v. 3, n. 5, p. 179, 2012. Citado na página 27.

- KHAN, A. W. *et al.* Vgdra: a virtual grid-based dynamic routes adjustment scheme for mobile sink-based wireless sensor networks. *IEEE sensors journal*, IEEE, v. 15, n. 1, p. 526–534, 2014. Citado na página 48.
- KHAN, I. *et al.* A genetic algorithm-based solution for efficient in-network sensor data annotation in virtualized wireless sensor networks. In: IEEE. *2016 13th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. [S.l.], 2016. p. 321–322. Citado na página 22.
- KONG, L. *et al.* An energy-aware routing protocol for wireless sensor network based on genetic algorithm. *Telecommunication Systems*, Springer, v. 67, n. 3, p. 451–463, 2018. Citado na página 19.
- KULKARNI, P.; KADAM, D.; MALATHI, P. To maximize energy efficiency in wsn using aco. In: IEEE. *2017 International Conference on Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA)*. [S.l.], 2017. p. 1–4. Citado na página 23.
- KUMARI, R.; NAND, P. Performance comparison of various routing protocols in wsn and wban. In: IEEE. *2016 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*. [S.l.], 2016. p. 427–431. Citado na página 36.
- KUMARI, U. *et al.* Few location based routing protocols in wireless sensor network. In: IEEE. *2015 International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT)*. [S.l.], 2015. p. 749–752. Citado na página 39.
- LI, X. *et al.* Energy-efficient load balancing ant based routing algorithm for wireless sensor networks. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 113182–113196, 2019. Citado na página 19.
- LI, X.-H.; GUAN, Z.-H. Energy-aware routing in wireless sensor networks using local betweenness centrality. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 9, n. 5, p. 307038, 2013. Citado na página 23.
- LI, Y.; CHEN, W.; ZHANG, Z.-L. Optimal forwarder list selection in opportunistic routing. In: IEEE. *2009 IEEE 6th International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems*. [S.l.], 2009. p. 670–675. Citado na página 66.
- LIANG, C.-K.; LIN, Y.-H. A coverage optimization strategy for mobile wireless sensor networks based on genetic algorithm. In: IEEE. *2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI)*. [S.l.], 2018. p. 1272–1275. Citado na página 21.
- LINDEN, R. *Algoritmos genéticos (2a edição)*. [S.l.]: Brasport, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 46.
- LOPEZ-ITURRI, P. *et al.* Integration of autonomous wireless sensor networks in academic school gardens. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 11, p. 3621, 2018. Citado na página 17.
- LUO, J. *et al.* Opportunistic routing algorithm for relay node selection in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 11, n. 1, p. 112–121, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 17, 20, 23 e 62.

- MEDEIROS, T. Í. O. de *et al.* Vegetation encroachment monitoring system for transmission lines using wireless sensor networks. In: IEEE. *2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. [S.I.], 2018. p. 1–5. Citado na página 18.
- MIGABO, M. *et al.* A stochastic energy consumption model for wireless sensor networks using gbr techniques. In: IEEE. *AFRICON 2015*. [S.I.], 2015. p. 1–5. Citado na página 34.
- MILLER, B. L.; GOLDBERG, D. E. *et al.* Genetic algorithms, tournament selection, and the effects of noise. *Complex systems*, [Champaign, IL, USA: Complex Systems Publications, Inc., c1987-], v. 9, n. 3, p. 193–212, 1995. Citado na página 45.
- MIRANDA, J. *et al.* Path loss exponent analysis in wireless sensor networks: Experimental evaluation. In: IEEE. *2013 11th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. [S.I.], 2013. p. 54–58. Citado na página 35.
- MISHRA, S. *et al.* A literature survey on routing protocol in wireless sensor network. In: IEEE. *2017 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS)*. [S.I.], 2017. p. 1–4. Citado 3 vezes nas páginas 36, 37 e 38.
- PANT, Y.; BHADAURIA, H. Performance study of routing protocols in wireless sensor network. In: IEEE. *2016 8th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)*. [S.I.], 2016. p. 134–138. Citado na página 18.
- PARK, J.; SAHNI, S. An online heuristic for maximum lifetime routing in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Computers*, IEEE, v. 55, n. 8, p. 1048–1056, 2006. Citado na página 25.
- PRATHAP, U. *et al.* Wireless sensor networks applications and routing protocols: survey and research challenges. In: IEEE. *2012 International Symposium on Cloud and Services Computing*. [S.I.], 2012. p. 49–56. Citado na página 25.
- RAHMAN, A. H. A.; ZUKARNAIN, Z. A. Performance comparison of aodv, dsdv and i-dsdv routing protocols in mobile ad hoc networks. *European Journal of Scientific Research*, Citeseer, v. 31, n. 4, p. 566–576, 2009. Citado na página 40.
- RAJA, C. V.; CHITRA, K.; JONAFARK, M. A survey on mobile cloud computing. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, v. 3, n. 3, 2018. Citado na página 25.
- RASHID, T. *et al.* Performance evaluation of zigbee network for multi-patient cardiac monitoring in telemedicine scenario. In: *Medical Imaging, m-Health and Emerging Communication Systems (MedCom), 2014 International Conference*. [S.I.]: DOI, 2014. Citado na página 29.
- RETZ, G. *et al.* Radio transceivers for wireless personal area networks using ieee802. 15.4. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 47, n. 9, p. 150–158, 2009. Citado na página 29.
- ROY, K.; MUKHOPADHYAY, S.; MAHMOODI-MEIMAND, H. Leakage current mechanisms and leakage reduction techniques in deep-submicrometer cmos circuits. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 91, n. 2, p. 305–327, 2003. Citado na página 31.

- RUAN, D.; HUANG, J. A pso-based uneven dynamic clustering multi-hop routing protocol for wireless sensor networks. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 8, p. 1835, 2019. Citado na página 19.
- SETTE, E. *et al. Design and characterization of a 2.4 GHz LNA in 180 nm CMOS Technology*. 2015. Citado na página 34.
- SHARMIN, A.; ANWAR, F.; MOTAKABBER, S. A noble approach of aco algorithm for wsn. In: IEEE. *2018 7th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)*. [S.l.], 2018. p. 152–156. Citado na página 23.
- SINGH, V. K.; SHARMA, V. Elitist genetic algorithm based energy efficient routing scheme for wireless sensor networks. *International Journal Of Advanced Smart Sensor Network Systems (IJASSN)*, v. 2, n. 2, 2012. Citado na página 39.
- SINHA, A.; CHANDRAKASAN, A. P. Energy aware software. In: IEEE. *VLSI Design 2000. Wireless and Digital Imaging in the Millennium. Proceedings of 13th International Conference on VLSI Design*. [S.l.], 2000. p. 50–55. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- SNYDER, L. V.; DASKIN, M. S. A random-key genetic algorithm for the generalized traveling salesman problem. *European journal of operational research*, Elsevier, v. 174, n. 1, p. 38–53, 2006. Citado na página 44.
- SO, J.; BYUN, H. Load-balanced opportunistic routing for duty-cycled wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, IEEE, v. 16, n. 7, p. 1940–1955, 2016. Citado na página 23.
- SOUSA, M. P.; LOPES, W. T. A.; ALENCAR, M. S. d. Ant colony optimization with fuzzy heuristic information designed for cooperative wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 14th ACM international conference on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 51–58. Citado na página 43.
- SOUZA, C. P. *et al.* On harvesting energy from tree trunks for environmental monitoring. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 12, n. 6, p. 9383765, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- SRINIVAS, M.; PATNAIK, L. M. Genetic algorithms: A survey. *computer*, IEEE, v. 27, n. 6, p. 17–26, 1994. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 45.
- STANDARD, I. Wireless systems for industrial automation: process control and related applications. *ISA-100.11 a-2009*, 2009. Citado na página 30.
- SUJATA, B. Energy efficient pegasis routing protocol in wireless sensor network. *Int Res J Eng Tech*, v. 4, n. 7, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 41.
- SUJEE, R.; KANNAMMAL, K. Energy efficient adaptive clustering protocol based on genetic algorithm and genetic algorithm inter cluster communication for wireless sensor networks. In: IEEE. *2017 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*. [S.l.], 2017. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 22.
- TAHA, A. *et al.* Energy efficient multipath routing protocol for mobile ad-hoc network using the fitness function. *IEEE access*, IEEE, v. 5, p. 10369–10381, 2017. Citado na página 38.

- TANOMARU, J. Motivação, fundamentos e aplicações de algoritmos genéticos. In: *II Congresso Brasileiro de Redes Neurais*. [S.l.: s.n.], 1995. p. 373–403. Citado 3 vezes nas páginas 42, 44 e 46.
- TUDOSE, D.; GHEORGHE, L.; TAPUS, N. Radio transceiver consumption modeling for multi-hop wireless sensor networks. *UPB Scientific Bulletin, Series C*, v. 75, n. 1, p. 17–26, 2013. Citado 5 vezes nas páginas 33, 34, 35, 36 e 41.
- VIJAYALAKSHMI, K.; ANANDAN, P. A multi objective tabu particle swarm optimization for effective cluster head selection in wsn. *Cluster computing*, Springer, v. 22, n. 5, p. 12275–12282, 2019. Citado na página 43.
- VINUTHA, C.; NALINI, N.; VEERESH, B. Energy efficient wireless sensor network using neural network based smart sampling and reliable routing protocol. In: IEEE. *2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*. [S.l.], 2017. p. 2081–2085. Citado na página 19.
- VISWANATHAN, M. World wireless sensor markets. In: *International Congress for Wireless Sensors and Networks (ICWSN)*. [S.l.: s.n.], 2006. Citado na página 19.
- VU, M. *et al.* Efficient systematic testing of network protocols with temporal uncertain events. In: IEEE. *IEEE INFOCOM 2019-IEEE Conference on Computer Communications*. [S.l.], 2019. p. 604–612. Citado na página 20.
- WANG, Q.; HEMPSTEAD, M.; YANG, W. A realistic power consumption model for wireless sensor network devices. In: IEEE. *2006 3rd annual IEEE communications society on sensor and ad hoc communications and networks*. [S.l.], 2006. v. 1, p. 286–295. Citado na página 35.
- YU, D.; LI, H. On the definition of ad hoc network connectivity. In: IEEE. *International Conference on Communication Technology Proceedings, 2003. ICCT 2003*. [S.l.], 2003. v. 2, p. 990–994. Citado na página 25.
- ZARDOSHT, M. J.; ALMODARRESI, S. M. T. Energy optimization in multi-hop wireless sensor networks. In: IEEE. *6th International Symposium on Telecommunications (IST)*. [S.l.], 2012. p. 450–454. Citado na página 34.
- ZHAOHUA, L.; MINGJUN, G. Survey on network lifetime research for wireless sensor networks. In: IEEE. *2009 2nd IEEE International Conference on Broadband Network & Multimedia Technology*. [S.l.], 2009. p. 899–902. Citado na página 25.
- ZITZLER, E.; THIELE, L. Multiobjective optimization using evolutionary algorithms—a comparative case study. In: SPRINGER. *International conference on parallel problem solving from nature*. [S.l.], 1998. p. 292–301. Citado na página 42.