



LUIZ CARLOS BRANQUINHO CAIXETA FERREIRA

PROPOSTA DE PROTOCOLO DE ROTEAMENTO GEOGRÁFICO UTILIZANDO
ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO BASEADO EM MEDIDAS DE INTENSIDADE DE
SINAL

CAMPINAS 2014



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

LUIZ CARLOS BRANQUINHO CAIXETA FERREIRA

PROPOSTA DE PROTOCOLO DE ROTEAMENTO GEOGRÁFICO UTILIZANDO
ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO BASEADO EM MEDIDAS DE INTENSIDADE DE
SINAL

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de concentração: Telecomunicações e Telemática.

Orientador: PROF. DR. PAULO CARDIERI

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO
ALUNO LUIZ CARLOS BRANQUINHO CAI-
XETA FERREIRA E ORIENTADA PELO PROF.
DR. PAULO CARDIERI.

Orientador

CAMPINAS 2014

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

F413p Ferreira, Carlos Branquinho Caixeta Luiz, 1984-
Proposta de protocolo de roteamento geográfico utilizando algoritmo de localização baseado em medidas de intensidade de sinal / Luiz Carlos Branquinho Caixeta Ferreira. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Paulo Cardieri.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Redes de sensores sem fio. 2. Roteamento (Administração de redes de computadores). 3. Localização. I. Cardieri, Paulo, 1964-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Proposed geographic routing protocol by using location algorithm based in signal measurements

Palavras-chave em inglês:

Wireless Sensor Networks

Routing (Administration computer networks)

Location

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Paulo Cardieri [Orientador]

Rausley Adriano Amaral de Souza

Michel Daoud Yacoub

Data de defesa: 01-08-2014

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Luiz Carlos Branquinho Caixeta Ferreira

Data da Defesa: 1 de agosto de 2014

Título da Tese: "Proposta de Protocolo de Roteamento Geográfico Utilizando Algoritmo de Localização Baseado em Medidas de Intensidade de Sinal"

Prof. Dr. Paulo Cardieri (Presidente):

Paulo Cardieri

Prof. Dr. Rausley Adriano Amaral de Souza:

Rausley A. A. de Souza

Prof. Dr. Michel Daoud Yacoub:

Michel Daoud Yacoub

RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta de roteamento geográfico para Redes de Sensores sem Fio (RSSF), onde a posição dos nós sensores é encontrada através do uso de um algoritmo de localização baseado em valores de RSSI (*Received Signal Strength Indication*). O objetivo é que o protocolo proposto crie um mapa da rede de sensores, analisando as condições do ambiente de funcionamento, visto que os valores de RSSI são diretamente afetados pelos fenômenos que atuam sobre o sinal de rádio. No contexto deste trabalho, o algoritmo de localização não tem o objetivo de encontrar a posição física exata do nó sensor, mas sim fazer a rede se adaptar ao ambiente, já que as posições calculadas usando os valores de RSSI coletados serão afetadas pelos efeitos de degradação de sinal existentes. A proposta visa ser uma alternativa a protocolos adaptativos existentes, que usam o monitoramento dos valores de RSSI entre os sensores existentes em uma rede, buscando se adaptar ao meio. O trabalho é composto de simulação e experimental. Os resultados mostram que a estratégia adotada pelo protocolo descobre rotas de comunicação eficientes, com uma menor quantidade de troca de mensagens de controle e um menor consumo de energia, se comparados à outra técnica que usa o monitoramento dos valores de RSSI entre os enlaces.

Palavras-chave: Redes de Sensores sem Fio, roteamento, localização, consumo de energia.

ABSTRACT

This work proposes a geographic routing for Wireless Sensor Network (WSN), where the position of sensor nodes is found by the algorithm of a location based on RSSI values (Received Signal Strength Indication). The goal is that the proposed protocol create a network map, analyzing the conditions of the operating environment, since the RSSI values are directly affected by phenomena acting on the radio signal . In the context of this work, the location algorithm does not aim to find the exact physical location of the sensor node, but rather make the network adapt to the environment, since the positions calculated using the RSSI values collected will be affected by the effects of signal degradation. The proposal aims to be an alternative to existing adaptive protocols, which use the monitoring of RSSI values between existing sensors in a network , seeking to adapt to the environment . The work consists of experimental and simulation . The results show that the strategy adopted by the protocol discovers routes for efficient communication, with a minor overhead and lower power consumption , compared to the other technique that uses monitoring the RSSI values between sensors .

Keywords: Wireless Sensor Network, routing, localization, energy consumption.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XVII
LISTA DE TABELAS.....	XXI
GLOSSÁRIO.....	XXIII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES	2
1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	3
2 REDES DE SENSORES SEM FIO	5
2.1 ROTEAMENTO EM RSSF.....	9
2.1.1 PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems)	9
2.1.2 LEACH-C (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)	11
2.1.3 D-RCPDS (Dynamic Route Construction based on Packet Delivery ratio and Signal to noise ratio)	11
2.2 LOCALIZAÇÃO EM RSSF.....	12
2.2.1 Sistema de Localização	13
2.2.2 Estimativa da Distância/Ângulo	15
2.2.2.1 Intensidade do Sinal Recebido	15
2.2.2.2 Tempo de Chegada (TDoA/ToA)	16
2.2.2.3 Ângulo/Direção de Chegada (AoA/DoA)	16
2.2.3 Estimação da Posição	16
2.2.3.1 Trilateração	17
2.2.3.2 Multilateração	18
2.2.4 Algoritmo de Localização	19
3 PROTOCOLO PROPOSTO.....	21
3.1 COLETA DAS MEDIDAS DE RSSI ENTRE O NÓ SENSOR E OS NÓS ÂNCORAS	22
3.2 CÁLCULO DA “POSIÇÃO RÁDIO”	25
3.3 ESTABELECIMENTO E DISTRIBUIÇÃO DAS ROTAS	28
3.4 REVALIDAÇÃO DAS ROTAS.....	30

3.5 VERIFICAÇÃO DE ATIVIDADE DOS NÓS SENSORES	32
4 SIMULAÇÃO E EXPERIMENTOS	35
4.1 MODELO DO CANAL.....	35
4.2 FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO.....	36
4.3 CENÁRIOS SIMULADOS	44
4.3.1 Ambiente de Escritório Com Divisórias.....	45
4.3.2 Ambiente Outdoor em Área Urbana.....	49
4.3.3 Ambiente Outdoor com Visada Livre	53
4.4 IMPLEMENTAÇÃO E EXPERIMENTOS	56
4.4.1 Plataforma Rádiuino.....	56
4.4.2 Implementação	58
4.5 EXPERIMENTOS	61
4.5.1 Cenário1	61
4.5.2 Cenário 2	64
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E DOS TESTES EXPERIMENTAIS	69
5.1 ANÁLISE DE <i>OVERHEAD</i>	69
5.2 CONSUMO DE ENERGIA.....	70
5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	72
5.3.1 Resultados Coletados	72
5.3.1.1 Cenário de Escritório com Divisórias.....	72
5.3.1.2 Ambiente Outdoor em Área Urbana	74
5.3.1.3 Ambiente Outdoor com Visada Livre.....	75
5.3.2 Análise dos Resultados.....	76
5.3.2.1 Grupo 1	77
5.3.2.2 Grupo 2	80
5.3.2.3 Grupo 3	83
5.3.3 Análise da Alteração da Posição dos Nós Âncoras	86
5.3.3.1 Grupo 1	87
5.3.3.2 Grupo 2	89
5.3.3.3 Grupo 3	92
5.4 ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS	94

5.4.1 Cenário 1	94
5.4.2 Cenário 2	95
6 CONCLUSÕES	99
6.1 TRABALHOS FUTUROS	99
REFERÊNCIAS	101

*Aos meus pais, Luiz Carlos e Marta, aos meus
irmãos Thiago e Aline e a minha esposa Iara.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Jesus, que é minha inspiração e razão para todas as coisas. Agradeço por me capacitar e abençoar a cada dia da minha vida, me dando força e me sustentando em todas as situações, por mais difíceis que sejam.

Agradeço aos meus pais, Luiz Carlos e Marta, que, não tendo seguido na vida acadêmica, me ensinaram valores e princípios que nem a melhor das universidades poderia me ensinar. Agradeço por sempre estarem ao meu lado em todos os momentos e me darem o suporte necessário sempre que preciso.

Agradeço a minha esposa Iara, por me apoiar em todos os momentos difíceis durante o desenvolvimento deste trabalho. Por aguentar os dias de mau humor, cansaço e desânimo, sempre me motivando e dando a força necessária para superar as dificuldades. Enfim, agradeço por ser essa pessoa tão especial e linda que me inspira a cada dia.

Agradeço aos meus irmãos Thiago e Aline, pela amizade e apoio que sempre encontrei.

Agradeço ao Prof. Dr. Paulo Cardieri, pela oportunidade, por sempre estar disponível quando precisei e por acreditar neste trabalho, dando todo o suporte e orientação necessária.

Um agradecimento especial ao Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho, pois sem sua contribuição e interesse não seria possível a conclusão deste trabalho. Agradeço acima de tudo pela amizade, paciência e atenção dispensada a mim. Agradeço pelas conversas, reuniões, cobranças e elogios, que foram frequentes durante todo este projeto e foram o combustível deste trabalho.

Agradeço aos amigos do IFSULDEMINAS pelo apoio durante este trabalho. Em especial agradeço ao Prof. Thiago Caproni Tavares e ao Prof. Vinicius Ferreira de Souza, pela ajuda e pelas conversas e discussões que enriqueceram este trabalho.

Ao IFSULDEMINAS por me conceder o regime de horário especial para capacitação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Arquitetura de RSSF [1]	5
Figura 2.2 – Nó Sensor Mica2 Mote [1].....	6
Figura 2.3 - Funcionamento PEGASIS [7].....	10
Figura 2.4 - Sistema de Localização.....	15
Figura 2.5 - Trilateração [13]	17
Figura 2.6 - Trilateração com conjunto de possíveis soluções [13]	18
Figura 2.7 – Multilateração [13].....	18
Figura 3.1- Topologia da Rede	21
Figura 3.2 - Corrente de Sensores	22
Figura 3.3 - Nós âncoras e comuns distribuídos.....	23
Figura 3.4 - Diagrama de Fluxo da etapa de coleta de informações dos nós Âncoras	24
Figura 3.5 - Diagrama de Fluxo da Etapa de Cálculo de Posição	27
Figura 3.6 - Diagrama de Fluxo de montagem da Corrente	30
Figura 4.1 - Distribuição dos nós sensores de acordo com a matriz “Sensores”.....	37
Figura 4.2 - Configuração da Corrente de acordo com a matriz corrente_rssi.....	41
Figura 4.3 – Cenário inicial de posicionamento dos nós na rede.	45
Figura 4.4 - Corrente de Sensores usando valores de RSSI	46
Figura 4.5 - Corrente gerada pelo Protocolo	47
Figura 4.6 - Posições dos âncoras alterados	48
Figura 4.7 - Corrente depois da alteração de posicionamento dos Âncoras.....	49
Figura 4.8 - Corrente de Sensores usando valores de RSSI	50
Figura 4.9 - Corrente gerada pelo Protocolo	51
Figura 4.10 - Alteração dos Nós Âncoras.....	51
Figura 4.11 - Corrente com alteração dos âncoras	52
Figura 4.12 - Corrente com alteração dos âncoras	53
Figura 4.13 - Corrente de sensores gerada pelo protocolo	54

Figura 4.14 - Nós âncoras alterados	55
Figura 4.15 - Corrente gerada após mudança de âncoras	56
Figura 4.16 - Estrutura em camadas Radiumino [22].....	57
Figura 4.17 – Nó Sensor Radiumino [22].....	58
Figura 4.18 - Quadro QRL	59
Figura 4.19 - Quadro QRA.....	59
Figura 4.20 - Quadro R-QRA.....	60
Figura 4.21 - Quadro R-QRL	61
Figura 4.22 - Distribuição dos sensores no ambiente no Cenário 1.	62
Figura 4.23 - Foto do ambiente de teste	63
Figura 4.24 - Corrente formada	63
Figura 4.25 - Distribuição dos sensores no Cenário 2.....	64
Figura 4.26 - Foto do cenário 2	65
Figura 4.27 - Corrente de sensores usando os valores de RSSI	66
Figura 4.28 - Corrente formada pelo protocolo.....	67
Figura 5.1 - Comparação de <i>Overhead</i>	70
Figura 5.2 - Consumo na potência de 10 dBm	72
Figura 5.3 – Diagrama de Pareto	78
Figura 5.4 - Gráfico de Efeitos Principais	79
Figura 5.5 - Gráfico de interação entre fatores.....	79
Figura 5.6 - Intervalos de Confiança para as médias de RSSI	80
Figura 5.7 – Diagrama de Pareto	81
Figura 5.8 - Gráfico de efeitos principais	82
Figura 5.9 - Gráfico de interação entre fatores.....	82
Figura 5.10 - Gráfico de intervalos de confiança	83
Figura 5.11 - Diagrama de Pareto	84
Figura 5.12 - Gráfico de efeitos principais	84
Figura 5.13 - Gráfico de interação entre fatores.....	85
Figura 5.14 - Gráfico de intervalos de confiança	85
Figura 5.15 – Diagrama de Pareto	87
Figura 5.16 - Gráfico de efeitos principais	88

Figura 5.17 - Gráfico de interação entre fatores	88
Figura 5.18 - Gráfico de intervalos de confiança	89
Figura 5.19 - Diagrama de Pareto.....	90
Figura 5.20 - Gráfico de efeitos principais	90
Figura 5.21 - Gráfico de interação entre fatores	91
Figura 5.22 - Gráficos de intervalos de confiança.....	91
Figura 5.23 – Diagrama de Pareto	92
Figura 5.24 - Gráfico de efeitos principais	93
Figura 5.25 - Gráfico de interação entre fatores	93
Figura 5.26 - Gráfico de intervalos de confiança	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação segundo a Configuração.....	7
Tabela 2.2 - Classificação segundo o Sensoriamento	7
Tabela 2.3 - Classificação segundo a Comunicação	8
Tabela 2.4 - Protocolos dispostos em camadas [1].....	8
Tabela 4.1 - Valores de η [18].....	35
Tabela 4.2 - Valores de σ_{dB} [18].....	36
Tabela 4.3 - Posições Rádio X Posições Físicas	46
Tabela 4.4 - Posição Rádio X Física, com mudança de âncoras	48
Tabela 4.5 - Posições Rádio x Posições Físicas	50
Tabela 4.6 - Posições Rádio x Posições Físicas, com mudança de âncoras	51
Tabela 4.7 - Posição Rádio x Posição Física.....	53
Tabela 4.8 - Posição Rádio x Posição Física, com alteração dos âncoras.....	55
Tabela 4.9 - Posição calculada do Sensor 2.....	63
Tabela 4.10 - Valores de RSSI entre todos os sensores (dBm).....	65
Tabela 4.11 - Desvios Padrão (dB).....	66
Tabela 4.12 - Posições Físicas x Posições Rádio	67
Tabela 5.1 – Consumo de transmissão do rádio CC1101 (<i>DataSheet</i> do equipamento) [25].....	71
Tabela 5.2 - Resultados da simulação	73
Tabela 5.3 - Desvios padrão	73
Tabela 5.4 - Resultados do cenário.....	74
Tabela 5.5 - Desvios padrão	74
Tabela 5.6 - Resultados da simulação	75
Tabela 5.7 - Desvios padrão	76
Tabela 5.8 - Cenários para análise.....	77
Tabela 5.9 - Grupos para Análise da Alteração de Posição dos Âncoras.....	87
Tabela 5.10 - Corrente gerada usando valores de RSSI (Médias).....	96
Tabela 5.11 - Corrente gerada pelo protocolo proposto (médias).....	96

GLOSSÁRIO

2-FSK	Binary Frequency Shift Keying
4-FSK	Quaternary Frequency Shift Keying
ADC	Analog-to-digital Converter
AoA	Angle of Arrival
BS	Base Station
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
DoA	Direction of Arrival
D-RCPDS	Dynamic Route Construction based on Packet Delivery ratio and Signal to noise ratio
DToA	Time Difference of Arrival
ERB	Estação Rádio Base
GFSK	Gaussian shaped Frequency Keying
GPS	Global Positioning System
IP	Internet Protocol
LEACH-C	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy
MSK	Minimum Shift Keying
OOK	On-Off Keying
PEGASIS	Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems
QRA	Quadro de Requisição de Dados dos Âncoras
QRL	Quadro de Requisição de Localização
RAM	Random Access Memory

RCPDS	Route Construction based on Packet Delivery ratio and Signal to noise ratio
RF	Radiofrequência
RISC	Reduced Instruction Set Computing
ROM	Read Only Memory
R-QRA	Quadro de Resposta ao QRA
R-QRL	Quadro de Resposta ao QRL
RSSF	Redes de sensores sem fio
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SNR	Signal-to-noise Ratio
TCP	Transmission Control Protocol
ToA	Time of Arrival
UTM	Universal Transverse de Mercator

1 INTRODUÇÃO

Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) [1] são formadas em sua maioria por pequenos nós sensores cujos recursos de energia, largura de banda, processamento e armazenamento são extremamente escassos. Estes sensores, por sua vez, se conectam com o mundo externo por meio de dispositivos com mais recursos, chamados de nós sorvedouros (*sink*) ou Estações Rádio Base (ERBs). RSSFs podem ser utilizadas em diversos tipos de aplicações. Dentre sua vasta gama de aplicações está o monitoramento em áreas de conflito e/ou desastre, monitoramento de ambientes industriais, detecção de exploração ilegal de recursos naturais, monitoramento de umidade e temperatura em lugares fechados, entre outros [2].

Uma RSSF pode ser formada de dezenas a milhares de sensores, que cooperativamente executam uma tarefa específica. O uso desta tecnologia em ambientes controlados está se tornando cada vez mais viável, pois a necessidade de coletar dados, automatizar processos e monitorar ambientes vem crescendo ao longo dos anos. Neste contexto existem padrões que foram criados para tarefas de automação residencial, como o *Z-wave* [3], ou para automação industrial, como o *WirelessHart* [4].

Por se tratarem de equipamentos com poucos recursos computacionais, as funcionalidades mais comuns a redes convencionais podem se tornar complexas para estes tipos de redes. Um exemplo destas funcionalidades é o roteamento, onde é necessário definir qual o melhor caminho para o encaminhamento dos dados. Com poucos recursos de transmissão, processamento e armazenamento, esta tarefa se torna um desafio. Na literatura existem diversos métodos que buscam resolver este problema de maneira eficiente.

Este trabalho traz uma proposta de protocolo de roteamento geográfico para RSSF's supervisionadas, usando um algoritmo de localização baseado em medidas de intensidade de sinal. Na literatura existem protocolos de roteamento que buscam se adaptar ao ambiente de funcionamento da RSSF, usando para isso as medidas de intensidade de sinal (RSSI - *Received Signal Strength Indicator*) [5] ou de relação sinal/ruído (SNR - *Signal-to-Noise Ratio*) [6] entre os enlaces de comunicação. O monitoramento destas medidas tem como objetivo obter uma leitura da RSSF do ponto de vista do canal de comunicação, tentando se adaptar e contornar eventuais efeitos que podem degradar a comunicação entre dois nós sensores.

O protocolo proposto neste trabalho tem como objetivo estabelecer as rotas de comunicação se adaptando ao ambiente de funcionamento, mas com uma abordagem diferente das existentes, pelo fato de tentar se adaptar as condições do ambiente por meio de um algoritmo de localização, que usa as medidas de intensidade de sinal para obter a posição do nó sensor.

O algoritmo de localização, no contexto deste trabalho, não tem a função de encontrar a sua posição física. O objetivo é encontrar uma posição que leve em consideração as condições do ambiente, ou como definimos neste trabalho, sua “posição rádio”. Como os valores de RSSI são diretamente afetados pelos fenômenos que atuam sobre um canal de comunicação, o algoritmo de localização irá encontrar uma posição não física, mas sim sua “posição rádio”. O sistema de localização utilizado usa as medidas de RSSI para calcular as distâncias do nó sensor até os nós usados como referência, ou nós âncoras. O objetivo é que a RSSF se adapte às mudanças do ambiente de operação de uma maneira satisfatória, consumindo menos recursos que as técnicas de monitoramento de valores de RSSI.

1.1 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

O objetivo deste trabalho é propor um protocolo de roteamento geográfico para RSSF's supervisionadas, usando um algoritmo de localização baseado em medidas de intensidade de sinal.

O protocolo desenvolvido usa como base alguns protocolos existentes na literatura, dando um embasamento teórico sólido.

A proposta é analisada por meio de simulação e implementação do protocolo em uma plataforma de rede de sensores sem fio real, avaliando seu comportamento e a comparando com outras abordagens já existentes.

Os fatores analisados são o consumo de energia, o *overhead* de comunicação e a confiabilidade das rotas estabelecidas, verificando se o protocolo consegue se adaptar ao meio de comunicação mantendo a economia de recursos e a escalabilidade da rede.

As principais contribuições do trabalho podem ser resumidas em duas:

- A proposta de protocolo de roteamento para redes de sensores sem fio;

- Uso de algoritmo de localização baseado em leituras de intensidade de sinal como método de adaptação ao meio.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está organizada da seguinte maneira:

- Capítulo 2: Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre Redes de Sensores sem Fio. É abordado o roteamento em RSSF, apresentando conceitos importantes e citando os principais protocolos de roteamento que serviram como embasamento para o protocolo proposto neste trabalho. São apresentadas também técnicas de localização em RSSF, pois para o desenvolvimento do protocolo proposto foi utilizada uma técnica de localização, sendo um de seus principais componentes.
- Capítulo 3: Este capítulo descreve o protocolo proposto.
- Capítulo 4: Neste capítulo são apresentadas as simulações realizadas com o protocolo proposto, comparando o seu funcionamento com técnicas já existentes, e os passos seguidos para a implementação do protocolo proposto em uma plataforma de RSSF real, bem como os experimentos executados.
- Capítulo 5: Neste capítulo são analisados os resultados das simulações e dos experimentos, traçando comparações com técnicas já existentes, analisando questões como consumo de energia, *overhead* e qualidade de rotas.
- Capítulo 6: Por fim, este capítulo traz as conclusões do trabalho.

2 REDES DE SENSORES SEM FIO

Este tipo de rede é formada geralmente por centenas ou milhares de dispositivos autônomos que tendem a ser projetados com pequenas dimensões (cm^3 ou mm^3) chamados nós sensores. Os principais componentes de um nó sensor são transceptor para comunicação sem fio, fonte de energia, unidade de sensoriamento, memória e processador. O componente lógico de um nó sensor é o software que executa no processador [1] [2]. Existem casos em que uma RSSF também pode ser composta de dispositivos chamados atuadores que permitem ao sistema controlar parâmetros do ambiente monitorado.

Os nós individualmente possuem pouca capacidade computacional e de energia, mas um esforço colaborativo entre os mesmos permite a realização de uma grande tarefa [2]. Os nós sensores podem ser lançados sobre áreas remotas (reservas ambientais, oceanos, vulcões, rios, florestas etc.) e, sem intervenção de técnicos ou operadores, formar uma rede sem fio *ad-hoc* que coleta dados sobre os fenômenos de interesse, realiza processamento local, e disseminam as informações para um ponto de acesso em um esquema de comunicação multi-saltos (*multi-hop*). O ponto de acesso é o elemento através do qual a rede comunica-se com outras redes ou com um ou mais observadores [1]. O ponto de acesso pode ser implementado em um nó sensor que será chamado de nó sorvedouro (*sink node*) ou em uma estação base (*BS - Base Station*). A Figura 2.1 mostra o funcionamento de uma RSSF.

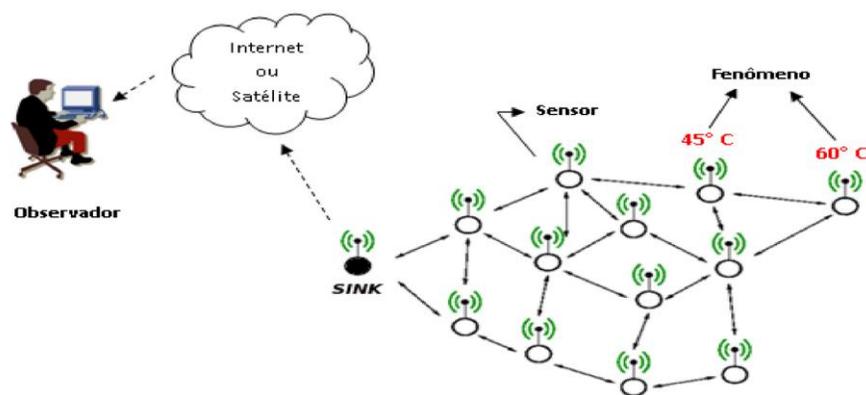


Figura 2.1 - Arquitetura de RSSF [1]

Os nós de uma RSSF podem ser descartados, perdidos ou saírem de serviço por diferentes razões como falta de energia, problemas na deposição, ameaças e ataques a segurança, falhas nos componentes e falha de comunicação [2]. Devido a isso, são necessários mecanismos de auto-gerenciamento (auto-configuração, auto-manutenção, auto-proteção, auto-organização, etc), pois se trata de uma rede com topologia dinâmica, pouca capacidade individual e sua distribuição pode ser feita em áreas remotas, de difícil acesso.

O projeto de uma RSSF é influenciado por vários fatores, das quais podemos citar tolerância a falhas, custo de produção, escalabilidade, topologia da rede, ambiente operacional, consumo de energia, restrições de hardware e meio de transmissão. Cada um destes fatores exige requisitos específicos na concepção e projeto dos nós, assim como em todas as camadas da pilha de protocolos. Todos os fatores citados acima são influenciados pelos requisitos da aplicação, isto porque, uma RSSF é um tipo de sistema dependente da aplicação. Os parâmetros de operação, configuração, e manutenção variam com os objetivos da aplicação. Protocolos para cada uma das camadas da pilha têm sido propostos, levando em consideração todos esses fatores, inclusive a dependência da aplicação. Para exemplificar a limitação de um nó sensor, a Figura 2.2 mostra um sensor Mica2 Mote, que contém um microprocessador Atmega de 128L da Atmel. Este microcontrolador de 8 bits, com 128 kBytes Flash ROM, 4 kBytes de RAM, ADC (Conversor analógico digital) de 10 bits é alimentado por uma pilha AA (2850mAh).



Figura 2.2 – Nó Sensor Mica2 Mote [1]

A classificação de uma rede de sensores depende do objetivo e da aplicação da rede. As funções executadas pelos nós, a composição destes nós (processador, memória, fonte de energia, sensor, transceptor), a quantidade de nós na rede, a forma como estes nós serão distribuídos na área monitorada, os protocolos utilizados, os tipos de dados que serão tratados, isto tudo depende da aplicação da rede e todos estes fatores irão ditar o tempo de vida da mesma [5].

Segundo [1], redes de sensores sem fio podem ser classificadas de acordo com sua configuração (Tabela 2.1), sensoriamento (Tabela 2.2), tipo de comunicação (Tabela 2.3):

Tabela 2.1 - Classificação segundo a Configuração

Configuração		
Composição	Homogênea	Rede composta de nós que apresentam a mesma capacidade de hardware. Eventualmente os nós podem executar software diferente.
	Heterogênea	Rede composta por nós com diferentes capacidades de hardware.
Organização	Hierárquica	RSSF em que os nós estão organizados em grupos (<i>clusters</i>). Cada grupo terá um líder (<i>cluster-head</i>) que poderá ser eleito pelos nós comuns. Os grupos podem organizar hierarquias entre si.
	Plana	Rede em que os nós não estão organizados em grupos
Mobilidade	Estacionária	Todos os nós sensores permanecem no local onde foram depositados durante todo o tempo de vida da rede.
	Móvel	Rede em que os nós sensores podem ser deslocados do local onde inicialmente foram depositados.
Densidade	Balanceada	Rede que apresenta uma concentração e distribuição de nós por unidade de área considerada ideal segundo a função objetivo da rede.
	Densa	Rede que apresenta uma uma alta concentração de nós por unidade de área.
	Esparsa	Rede que apresenta uma baixa concentração de nós por unidade de área.
Distribuição	Irregular	Rede que apresenta uma distribuição não uniforme dos nós na área monitorada.
	Regular	Rede que apresenta uma distribuição uniforme de nós sobre a área monitorada.

Tabela 2.2 - Classificação segundo o Sensoriamento

Sensoriamento		
Coleta	Periódica	Os nós sensores coletam dados sobre o(s) fenômeno(s) em intervalos regulares. Um exemplo são as aplicações que monitoram o canto dos pássaros. Os sensores farão a coleta durante o dia e permaneceram desligados durante a noite.
	Contínua	Os nós sensores coletam os dados continuamente. Um exemplo são as aplicações de exploração interplanetária que coletam dados continuamente para formação de base de dados para pesquisas.
	Reativa	Os nós sensores coletam dados quando ocorrem eventos de interesse ou quando solicitado pelo observador. Um exemplo são as aplicações que detectam a presença de objetos na área monitorada.

Tabela 2.3 - Classificação segundo a Comunicação

Classificação segundo a Comunicação		
Disseminação	Programada	Os nós disseminam os dados em intervalos regulares.
	Contínua	Os nós disseminam os dados continuamente.
	Sob Demanda	Os nós disseminam os dados em resposta a consulta do observador e a ocorrência de eventos.
Tipo Conexão	Simétrica	Todas as conexões existentes entre os nós sensores, com exceção do nó sorvedouro tem o mesmo alcance.
	Assimétrica	As conexões entre os nós comuns tem alcance diferente.
Transmissão	<i>Simplex</i>	Os nós sensores possuem transceptor que permite apenas transmissão da informação.
	<i>Half-Duplex</i>	Os nós sensores possuem transceptor que permite transmitir ou receber em um determinado instante.
	<i>Full-Duplex</i>	Os nós sensores possuem transceptor que permite transmitir ou receber dados ao mesmo tempo.

Os protocolos normalmente utilizados em redes *ad-hoc*, geralmente, não podem ser utilizados diretamente em redes de sensores sem fio, pois eles não se preocupam tanto com consumo de memória, processamento e energia. Novos protocolos têm sido propostos, tentando se adequar as limitações de redes de sensores sem fio. Esses protocolos podem ser vistos em camadas, como no modelo TCP/IP, como mostra a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Protocolos dispostos em camadas [1]

Camada	Protocolos
Transporte	PFSQ, ESRT, RMST.
Rede	DD, SPIN, SAR, MULTI, STORM, PROC, TinyBeaconing, LEACH, LEACH-C, TEEN, PEGASIS, ICA, GEOMOTE, GEAR, GPSR.
Enlace	S-MAC, ARC, T-MAC, B-MAC, DE-MAC, TRAMA.
Física	Transmissão em Rádio Frequência (RF), ótica e infra-vermelho.

Como se pode ver, existem diversos protocolos na literatura. O presente trabalho foca na camada de Rede, onde o objetivo é propor um protocolo de roteamento que se adapte às condições

do canal de comunicação, utilizando para isso um algoritmo de localização que usa medidas de intensidade de sinal.

2.1 ROTEAMENTO EM RSSF

A principal função da camada de rede é prover a função de roteamento, que pode ser definida como o processo pelo qual a rede consegue identificar o destinatário das mensagens e encontrar um caminho entre a origem e o destino desta mensagem [6]. Este processo é de extrema importância em todas as redes de comunicação, e em RSSFs não é diferente. Há várias formas diferentes de se fazer o roteamento entre os nós em RSSFs, e a eficiência da RSSF será obtida, em grande parte, pela forma como o roteamento das mensagens ocorre nesta rede [2].

Sobre roteamento, existem basicamente três tipos: roteamento plano, hierárquico e o geográfico [1].

No roteamento plano os nós são considerados iguais do ponto de vista funcional, ou seja, a atividade de roteamento é tratada de forma idêntica por todos os nós da rede.

No roteamento hierárquico são estabelecidas duas classes distintas de nós: nós fontes e líderes de grupo (*cluster heads*). Os líderes de grupo geralmente são encarregados de se comunicar com a estação base, enquanto os nós se comunicam apenas com seus líderes.

O roteamento geográfico utiliza informações geográficas para rotar seus dados. Estas informações costumam incluir a localização dos nós vizinhos.

Na literatura existe uma vasta gama de protocolos de roteamento, distribuídos entre as categorias citadas. Uma lista destes protocolos e suas especificações podem ser vistas em [2] e [1].

A seguir são descritos os protocolos considerados para a elaboração da proposta deste trabalho.

2.1.1 PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems)

O protocolo PEGASIS (*Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems*) [7] é um protocolo para RSSF baseado no conceito de correntes. Cada nó troca informações apenas com os

vizinhos mais próximos formando uma corrente entre os nós, e apenas um nó é escolhido a cada momento para transferir as informações coletadas ao nó *gateway*, como mostra a Figura 2.3.

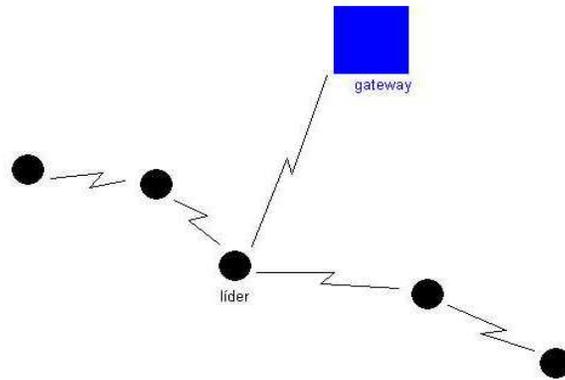


Figura 2.3 - Funcionamento PEGASIS [7]

Portanto, o número de trocas de mensagens será baixo e a comunicação será realizada entre nós próximos uns dos outros. Espera-se com isso que a energia gasta seja menor, se comparada a outros protocolos que requerem muitas trocas de mensagens para eleger líderes e formar grupos, e protocolos em que os nós constantemente trocam mensagens com o nó *gateway* de forma direta (o *gateway* geralmente se encontra distante dos nós). Isto implica um tempo de vida maior para cada nó e um consumo menor da largura de banda da rede. O PEGASIS considera o seguinte:

- O nó *gateway* (estação base) situa-se estacionado a uma distância fixa da rede;
- Os nós são capazes de transmitir dados diretamente para o nó *gateway* e para qualquer outro nó;
- Cada nó possui informação de localização dos outros nós;
- Os nós são homogêneos e com o nível de energia uniforme;
- Os nós não são móveis. A cada rodada um nó é escolhido para transmitir a informação à estação base.

A principal contribuição deste protocolo para a proposta deste trabalho é o conceito de corrente de sensores, que foi a topologia de comunicação adotada para o desenvolvimento do protocolo descrito neste trabalho.

2.1.2 LEACH-C (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy)

O LEACH-C (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) [8] é uma variação do protocolo LEACH, que é baseado na formação de *clusters*, onde há um agrupamento de nós sensores e é escolhido um líder para cada *cluster*. No LEACH-C a decisão de formação de grupos e escolha de líderes é feita pela Estação Base. Cada nó, na fase de inicialização da rede, envia sua posição geográfica e energia disponível para a estação base. Baseando-se nesta informação, a estação determina os grupos de forma centralizada.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizada a característica do LEACH-C de ser hierárquico, ou seja, existe uma entidade que é responsável por receber as informações dos nós sensores e definir as rotas.

2.1.3 D-RCPDS (Dynamic Route Construction based on Packet Delivery ratio and Signal to noise ratio)

O protocolo RCPDS (*Route Construction based on Packet Delivery ratio and Signal to noise ratio*) [9] determina as rotas e a potência de transmissão dos nós antes de iniciar a operação de uma RSSF, admitindo que as características de propagação de rádio não mudam. Assim, não pode trabalhar em um ambiente dinâmico, em que as características de propagação de rádio se alteram dinamicamente devido à interferência de rádio e obstáculos móveis. Para resolver este problema foi proposto o D-RCPDS (*Dynamic Route Construction based on Packet Delivery ratio and Signal to noise ratio*) [10], que dinamicamente constrói as rotas de acordo com a alteração das características de propagação de rádio.

No D-RCPDS, cada nó monitora os valores de RSSI ou SNR de seus nós vizinhos para si. Um nó vizinho é definido para cada nó como um nó cujos pacotes transmitidos são ouvidos. Quando a qualidade da comunicação a partir de um nó vizinho se deteriora, o nó reconstrói o percurso do nó vizinho.

Além disso, quando a qualidade da comunicação torna-se excessivamente melhor do que o requisito especificado pelo aplicativo, D-RCPDS tenta encontrar outro caminho que é mais eficiente em termos energéticos.

A principal característica deste protocolo é tentar se adaptar as mudanças no ambiente, usando para isso as leituras de intensidade de sinal e SNR entre os enlaces de comunicação.

O problema que esta abordagem traz é o alto *overhead*, caso a rede possua muitos nós sensores, pois se todos puderem receber dados de todos, a necessidade de monitorar todos os seus vizinhos irá fazer com que a rede troque muita informação de controle, o que conseqüentemente poderá implicar em um maior consumo de energia.

O protocolo proposto neste trabalho se baseia na característica de se adaptar ao canal de comunicação do D-RCPPDS, mas utilizando uma abordagem diferente. É utilizado um algoritmo de localização baseado em medidas de intensidade de sinal, ao invés de fazer o monitoramento destes valores entre todos os possíveis enlaces.

2.2 LOCALIZAÇÃO EM RSSF

A simples intuição de “providenciar informações sobre a localização de um nó” tem algumas propriedades que devem ser classificadas para tornar o processo de localização claro. Sendo assim, as propriedades mais importantes dentro do sistema de localização são [11]:

- Posição física ou localização simbólica: o sistema fornece a posição física de um nó (em alguns casos, coordenadas numéricas) ou faz o nó aprender a sobre sua localização simbólica (por exemplo, “uma sala” ou “um quarto em hotel”).
- Coordenadas absolutas ou relativas: um sistema de coordenadas absolutas é válido para todos os objetos e é incorporado em alguns quadros de referência geral. Por exemplo, as posições no *Universal Transverso de Mercator* (UTM), onde as coordenadas formam um sistema de coordenadas absolutas para qualquer lugar na Terra. As coordenadas relativas, por outro lado, podem ser diferentes para qualquer objeto localizado ou conjunto de objetos.
- Computação localizada ou centralizada: a computação localizada busca realizar todos os cálculos nos próprios nós sensores, enquanto que a computação centralizada as informações de distância são enviadas para a base (ou gerência) que realiza os cálculos e as distribui de volta para os nós sensores.
- Exatidão e precisão: Os dois mais importantes fatores de mérito para um sistema de localização são a exatidão e a precisão de seus resultados. Precisão é a distância mais próxima medida

que um algoritmo de localização poderá chegar da posição real do nó sensor na RSSF (alta precisão indica um pequeno desencontro). No entanto, a exatidão é a posição real do nó sensor dentro do sistema de coordenadas relativa, ou seja, é a medida perfeita. Por exemplo, um sistema pode pretender dar uma exatidão de 20 cm, com pelo menos 95% de precisão. Evidentemente, os valores de exatidão e precisão só fazem sentido quando consideradas em conjunto, formando a exatidão/precisão característica de um sistema.

- Escala: Está relacionada às dimensões da região onde a RSSF é implantada. Duas métricas importantes aqui são a área que a RSSF pode cobrir por unidade de infraestrutura, e o número de objetos localizáveis por unidade de infraestrutura por intervalo de tempo.
- Limitações: Para algumas técnicas de posicionamento, existem limitações de implantação inerentes. O GPS (*Global Positioning System*), por exemplo, não funciona dentro de ambientes fechados; outros sistemas têm apenas faixas limitadas sobre as quais atuam.
- Custos: Sistemas de posicionamento possuem custos de tempo (instalação de infraestrutura, administração), espaço (tamanho do dispositivo, espaço para infraestrutura), energia (durante a operação) e capital (preço de um nó, a instalação de infraestrutura).

As propriedades descritas acima auxiliaram no entendimento do sistema de localização ao permitir compreender os principais aspectos envolvidos no processo para determinar a posição dos nós sensores na RSSF [2].

2.2.1 Sistema de Localização

Os protocolos de roteamento geográfico usam informações de posicionamento dos nós sensores. Para obter estas informações de posicionamento dos nós deve ser utilizado algum mecanismo para determinar as distâncias e estimar as posições.

Soluções como dispositivos de localização por satélite (GPS), largamente utilizadas, trazem algumas desvantagens para redes de sensores sem fio [12]:

- Alto custo de hardware;
- Dispositivos geralmente grandes para serem instalados e utilizados em grande escala;

- Necessita de linha de visada com satélites, o que pode impossibilitar o funcionamento em locais cobertos;
- Alto consumo de energia.

Devido a isso, existem algumas técnicas alternativas, para inferir a posição de determinado objeto, que podem ser utilizadas de uma forma mais eficiente em um ambiente com fortes restrições, como em uma rede de sensores sem fio. Estes esquemas basicamente utilizam nós âncoras, que são nós cujas posições são conhecidas, e servem como parâmetro para os outros nós calcularem suas distâncias até esses nós especiais e, conseqüentemente, suas posições.

Neste caso, os nós sensores podem determinar a distância existente entre eles e com base nesta informação estimar sua posição. Uma proposta para determinar esta posição de forma genérica foi elaborada por Langendoen, em que foram identificadas três etapas para algoritmos de localização distribuídos [11]:

1. Determinar as distâncias entre nós âncoras e não âncoras;
2. Estimar as posições dos nós sensores em relação aos nós âncoras;
3. Refinamento das estimativas.

Segundo Oliveira [13], os sistemas de localização são divididos em três componentes:

1. Estimador de proximidade/distância/ângulo, que é responsável por obter as informações de proximidade, distâncias ou ângulo entre os nós âncoras e não âncoras.
2. Estimador de posição, baseado nas informações do item anterior;
3. Algoritmo de localização, que é responsável por usar informações adicionais quando as informações obtidas não são suficientes ou são equivocadas.

A Figura 2.4 ilustra a interação entre os três componentes citados anteriormente.

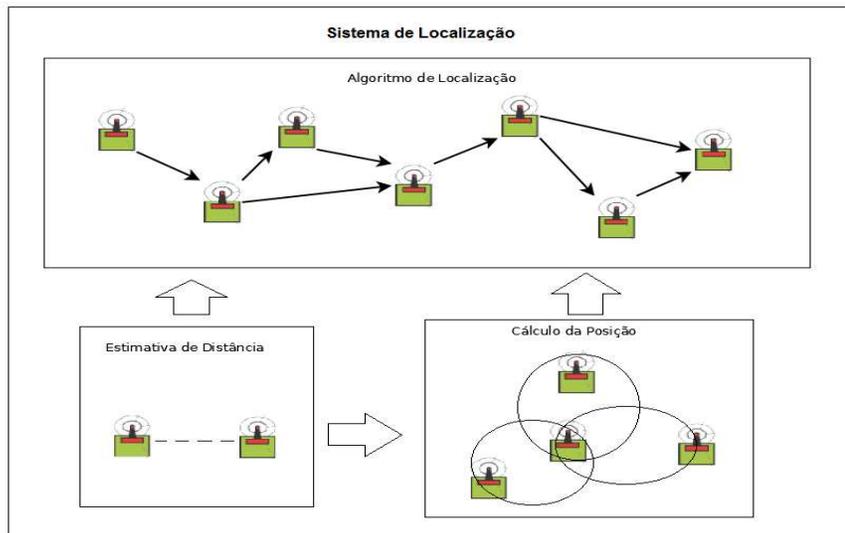


Figura 2.4 - Sistema de Localização

2.2.2 Estimativa da Distância/Ângulo

A estimativa da distância/ângulo é uma etapa importante para sistemas de localização, onde se busca mensurar as distâncias entre os nós de uma RSSF, utilizando para isso a potência do sinal recebido, o tempo de propagação do sinal, ou o ângulo de chegada. São descritos a seguir os principais métodos para a estimativa de distância.

2.2.2.1 Intensidade do Sinal Recebido

É possível estimar a posição de um nó sensor vizinho por meio da potência do sinal recebido, uma vez que essa potência é relacionada à distância percorrida pelo sinal, desde a antena transmissora até a antena receptora [13] [14].

A principal vantagem deste método é seu baixo custo e a facilidade para ser implementado, pois qualquer receptor é capaz de estimar a potência do sinal recebido, possibilitando uma forma atrativa de determinar o posicionamento dos nós. Por outro lado, a precisão de técnicas baseadas em intensidade de sinal é pobre, devido às interferências e ruídos existentes no percurso do sinal, de difícil caracterização [14] [13].

2.2.2.2 Tempo de Chegada (TDoA/ToA)

Os métodos baseados no tempo de chegada (*Time of arrival*, ToA) ou na diferença do tempo de chegada (*Time difference of arrival*, TDoA) usam o tempo de propagação para determinar a distância. Estes métodos podem ser aplicados com vários sinais diferentes, tal como RF, acústico e ultrassom [14].

Supondo conhecida a velocidade de propagação s_r do sinal transmitido, a distância entre o transmissor e o receptor é

$$d = s_r(t_2 - t_1) \quad (2.1)$$

onde t_1 e t_2 são os tempos de saída e de chegada do sinal.

O TDoA tem por base a diferença entre os tempos que um sinal leva para chegar a múltiplos nós ou a diferença entre os tempos que múltiplos sinais levam para chegar a um nó.

Note-se que as técnicas baseadas em tempo de chegada requerem que os nós estejam sincronizados, o que pode ser um impeditivo para o uso em redes de sensores, onde a capacidade de processamento geralmente é reduzida.

2.2.2.3 Ângulo/Direção de Chegada (AoA/DoA)

Por meio do ângulo de chegada de dois ou mais sinais, transmitido por terminais de posições conhecidas, é possível estimar a posição do terminal receptor [13] [14]. A principal desvantagem desses métodos é a necessidade de hardware especiais para a medida do ângulo de chegada.

2.2.3 Estimação da Posição

Com base nas estimativas de distância/tempo de chegada/ângulo de chegada de um nó de posição desconhecida, sua posição pode ser estimada por meio de manipulação dessas informações, como brevemente descrito a seguir.

2.2.3.1 Trilateração

O método mais básico para estimar posições é o da trilateração, onde a posição pode ser estimada quando se tem três referências e a distância das referências até o ponto que se deseja estimar é conhecida [14]. Os nós âncoras são vistos graficamente como círculos centrados nas suas respectivas posições e com raio igual à distância que estão do ponto que se deseja calcular. A posição é determinada como a intersecção dos três círculos, como mostra a Figura 2.5.

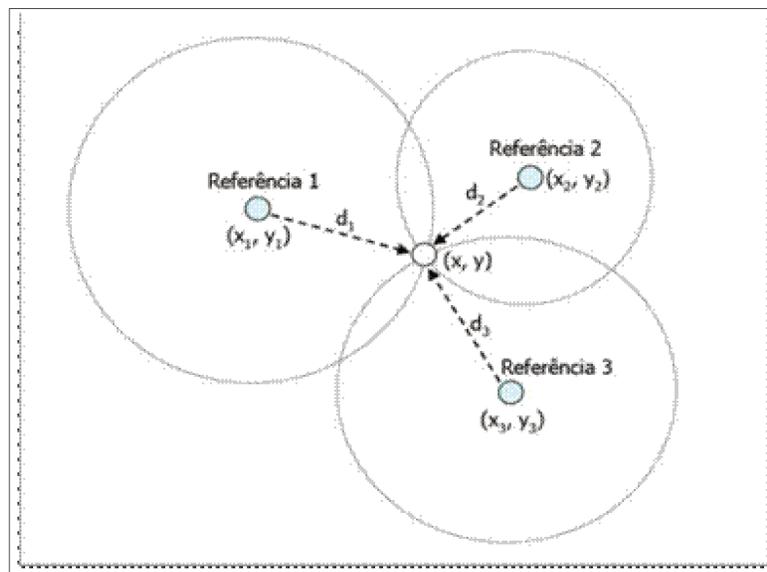


Figura 2.5 - Trilateração [13]

Por esta representação, tem-se [2]:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = d_i^2 \quad (2.2)$$

Em que (x, y) é a posição que se deseja calcular, (x_i, y_i) é a posição da referência i e d_i é a distância do sensor até a referência i .

Levando em consideração as três referências, temos três equações quadráticas com duas variáveis desconhecidas, que nos leva a um sistema linear que pode ser resolvido por meio de algum método matemático.

Se as distâncias d_i são exatas, a posição estimada se encontra no ponto de intersecção entre as três circunferências. No entanto, caso as distâncias d_i disponíveis sejam corrompidas por erros,

o resultado obtido pode ser uma zona onde a posição verdade pode estar localizada, como mostra a Figura 2.6. Isto requer métodos mais elaborados para obter uma estimativa mais precisa.

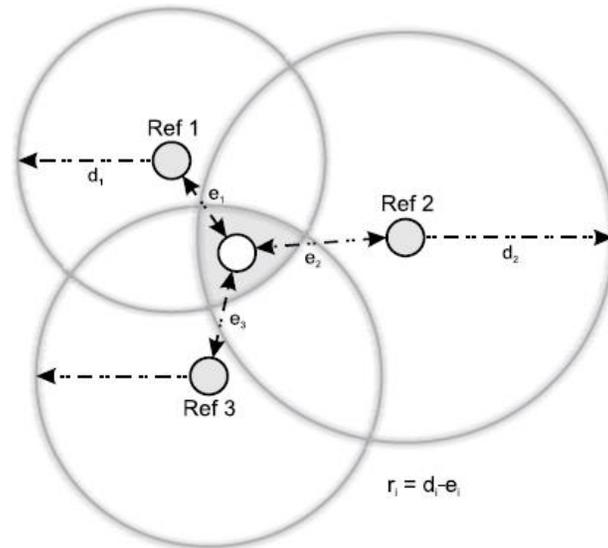


Figura 2.6 - Trilateração com conjunto de possíveis soluções [13]

2.2.3.2 Multilateração

A multilateração nada mais é que a trilateração usando no mínimo quatro pontos de referência, sendo, portanto, uma generalização da trilateração [17], como mostra a figura 2.7.

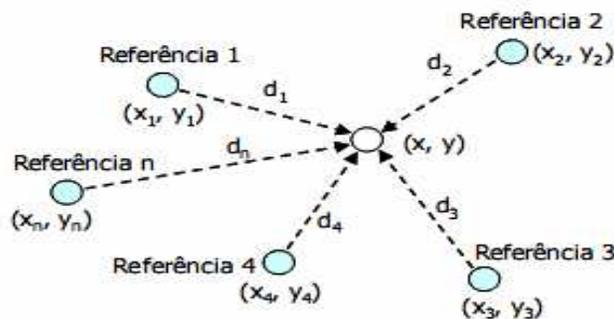


Figura 2.7 – Multilateração [13]

Dado o conjunto de referências, têm-se um sistema de equações [2]:

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = d_1^2 \\ \vdots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 = d_n^2 \end{cases} \quad (2.3)$$

Para resolver este sistema substitui-se uma das equações nas n-1 equações e resolve-se o sistema resultante através de [2]:

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T c \quad (2.4)$$

em que:

$$B = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$c = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_1^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_{n-1}^2 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

e \hat{a} é um vetor com a posição (x, y) estimada.

2.2.4 Algoritmo de Localização

Os algoritmos de localização são componentes importantes em redes de sensores sem fio, pois nem sempre os nós sensores possuem informação suficiente para estimar suas posições, sendo necessária a colaboração de outros nós e entidades da rede.

Uma das maneiras de se classificar os algoritmos de localização é segundo o seu processamento [17]:

- Centralizado: há um elemento central que acumula as informações necessárias e executa os procedimentos necessários para estimar a posições dos nós.
- Distribuído: cada nó tem capacidade de estimar suas coordenadas, baseando-se nas informações que recebem de seus vizinhos. Após calculadas as posições, as mesmas são enviadas a uma estação base.

3 PROTOCOLO PROPOSTO

Considera-se neste trabalho que a rede de sensores é heterogênea quanto à capacidade computacional dos nós sensores, sendo o *sink node* dotado de maior capacidade.

Em um ambiente controlado, podemos conhecer a posição física de parte dos nós sensores, sendo estas posições usadas com um referencial, por onde a primeira configuração de rota pode ser iniciada.

O algoritmo de localização investigado nesse trabalho tem o objetivo de descobrir a “posição rádio” dos nós, que está relacionada à intensidade do sinal recebido, como definido mais adiante. Desta forma, para efeito de roteamento, não interessa mais a posição física dos nós, mas sim a posição em função das condições de propagação. Conhecidas as posições rádio de todos os nós sensores da rede, uma rota partindo do terminal *sink* e contendo todos os nós da rede será estabelecida, como ilustrado na Figura 3.1.

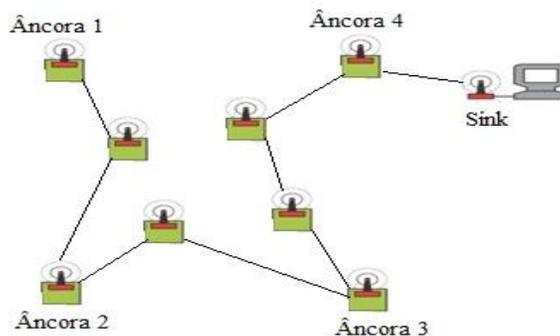


Figura 3.1- Topologia da Rede

O algoritmo de localização é executado pelo *sink node*, para o qual os nós enviam suas informações, que então monta um mapa da rede de acordo com as posições dos nós, estabelecendo as rotas.

O protocolo proposto utiliza o princípio de correntes de sensores [7], em que um nó sensor se comunica apenas com os seus dois vizinhos mais próximos, sendo um no sentido do terminal *sink* (subida), e outro no sentido contrário (descida). Assim, cada nó sensor irá manter as seguintes informações:

- 1 Seu próprio endereço;

- 2 Endereço de descida para seus pacotes;
- 3 Endereço de subida, para onde o pacote é encaminhado, na direção do *sink*.

Desta forma, é montada uma “corrente de sensores”, usada pelos nós para enviar seus pacotes. Um exemplo da corrente de sensores, com os endereços armazenados por cada nó, é mostrada na Figur 3.2.

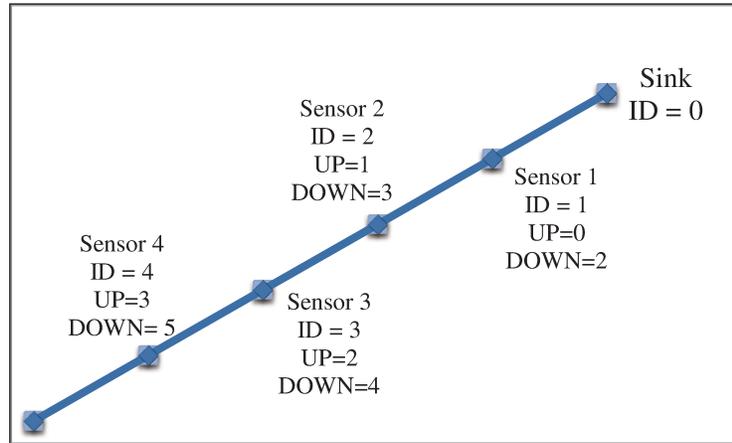


Figura 3.2 - Corrente de Sensores

Para determinar os endereços de descida e subida de cada sensor, e assim formar a corrente de nós sensores, o protocolo executa alguns passos, que são descritos a seguir.

3.1 COLETA DAS MEDIDAS DE RSSI ENTRE O NÓ SENSOR E OS NÓS ÂNCORAS

É considerado que alguns nós sensores são colocados no ambiente com suas posições geográficas conhecidas, chamados nós âncoras. Estes nós são usados como referências para os demais nós sensores que forem adicionados à rede, para a determinação de suas posições. A Figura 3.3 mostra um exemplo, na qual os nós A1, A2, A3 e A4 são os nós âncoras, e os sensores 1, 2 e 3 são nós comuns.

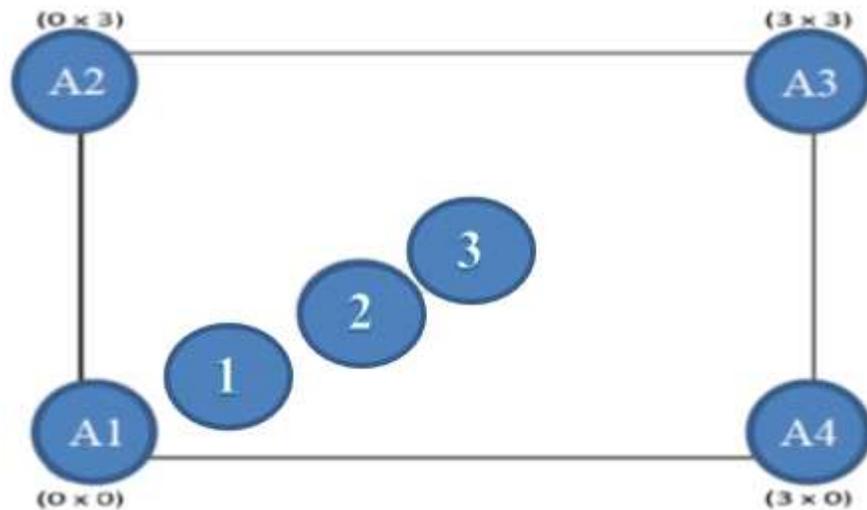


Figura 3.3 - Nós âncoras e comuns distribuídos

Os nós âncoras podem ou não ser usados para trafegar dados, ou seja, eles podem ser colocados exclusivamente para ajudar na tarefa de localização ou também podem fazer parte da corrente de nós sensores e trafegar dados. Não há nada que diferencie os nós âncoras dos nós comuns, o que possibilita que a qualquer momento, se for necessário, um nó comum venha a se tornar um âncora, ficando isso a cargo da aplicação, por exemplo.

Quando um nó sensor entra em funcionamento, ele envia um pedido periodicamente ao *sink*, para ingressar na rede, até que ele seja atendido. Ao receber este pedido, o *sink node* responde com um pedido de localização. Neste pedido são informados os endereços dos nós âncoras que devem ser requisitados. O nó sensor então irá enviar aos nós âncoras um pedido de medidas da RSSI.

Os nós âncoras respondem às requisições enviando sua posição (x,y) e o RSSI medido entre ele o sensor requisitante. Após receber as informações dos nós âncoras e armazená-las, o nó sensor envia estas informações para o *sink node*, que poderá calcular as distâncias entre aquele nó sensor e os nós âncoras, e a partir das distâncias, determinar sua posição usando o método de multilateração.

Vale a pena citar aqui o uso de agregação de dados [2] feita pelo nó sensor no envio das informações ao *sink node*. Esta técnica visa economizar energia e utilizar de uma maneira mais eficiente o recurso de comunicação do nó sensor, visto que o processo de transmissão de informações é o que mais consome energia em um nó sensor [5].

A Figura 3.4 mostra o fluxograma desta etapa do protocolo.

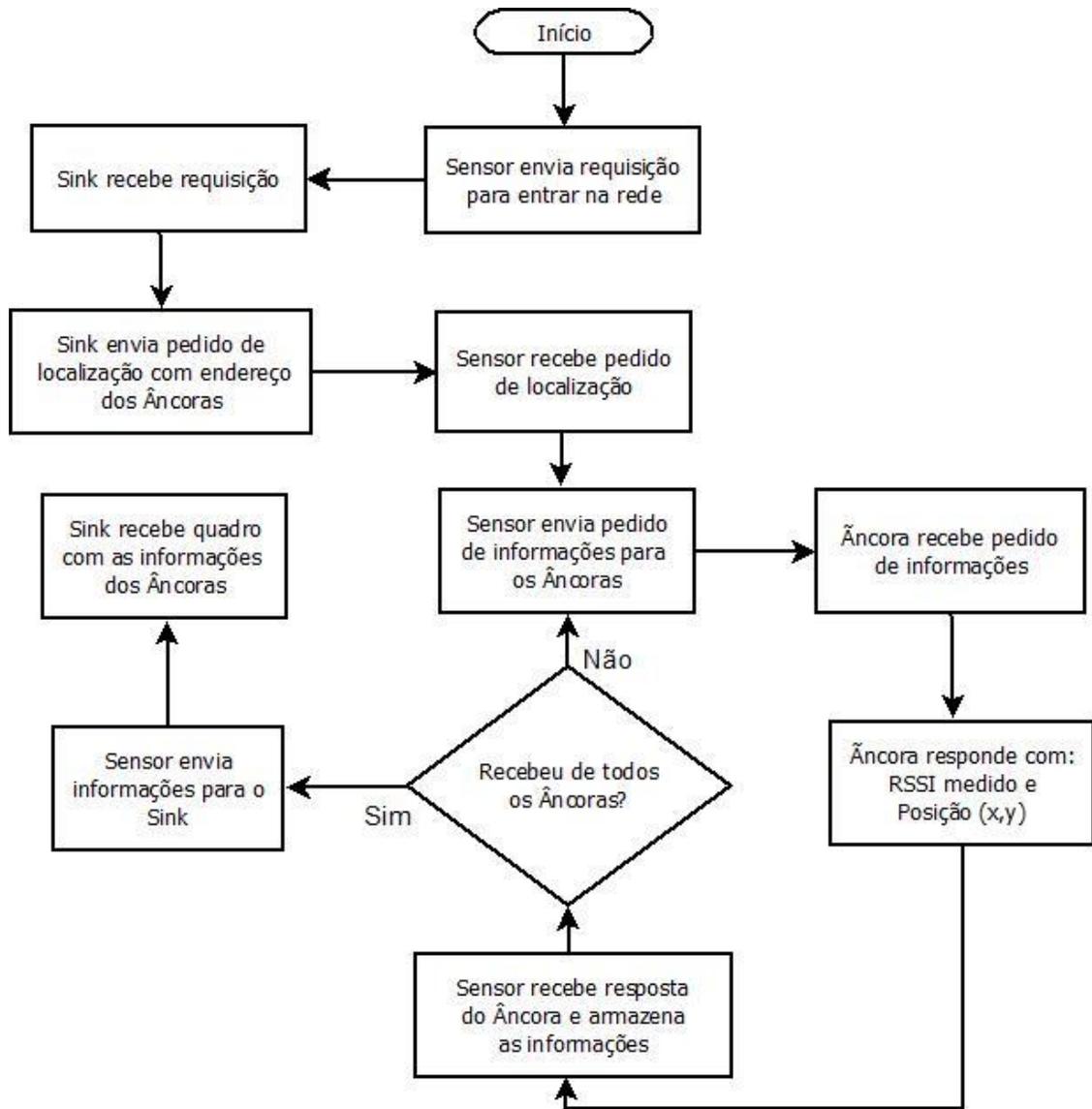


Figura 3.4 - Diagrama de Fluxo da etapa de coleta de informações dos nós Âncoras

Após esta etapa, o *sink node* recebe uma matriz com os valores de RSSI entre o nó sensor requisitante e os quatro nós âncoras. Essa matriz é chamada *INF_ÂNCORAS*, e o seu formato é dado por:

$$INF_ÂNCORAS = \begin{bmatrix} x1 & y1 & rssi1 \\ x2 & y2 & rssi2 \\ x3 & y3 & rssi3 \\ x4 & y4 & rssi4 \end{bmatrix}$$

Na matriz *INF_ÂNCORAS* $x1$ e $y1$ são a posição do âncora 1 e $rss1$ é o valor de RSSI medido entre o nó sensor requisitante e o nó âncora 1. Os demais valores são as informações dos outros três nós âncoras.

3.2 CÁLCULO DA “POSIÇÃO RÁDIO”

O algoritmo de localização implementado no protocolo proposto se baseia nas distâncias entre os nós sensores e nós âncoras, usando a técnica de multilateração para determinar a posição (x,y) do sensor.

Os valores de RSSI, coletados no passo de coleta de RSSI's, servirão para estimar as distâncias entre os nós sensores. Como os valores de RSSI medidos são afetados pelas condições de propagação do sinal, estas distâncias estimadas poderão ser diferentes das distâncias reais entre os sensores, o que influenciará no cálculo da posição dos mesmos, fazendo com que a posição encontrada seja diferente da posição real, ou posição física do sensor. Essa posição, que leva em consideração os efeitos que atuam sobre o ambiente, é definida neste trabalho como “Posição Rádio”.

Para determinar a distância entre um nó sensor de interesse e um nó âncora é utilizado o modelo de perda de percurso determinística dada por [18]

$$L_{dB} = L(d_0) + 10\eta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3.1)$$

Na Equação 3.1 a atenuação em L_{dB} é obtida levando em consideração uma distância de referência d_0 , a distância d entre o transmissor e o receptor e o coeficiente de perda de percurso η . O coeficiente de perda de percurso depende do meio de propagação e, portanto, deve ser ajustado convenientemente. Portanto, torna-se necessária uma análise prévia do ambiente, em que os valores de d_0 e η podem variar de acordo com a rede implantada e o ambiente.

Assim, a distância d pode ser estimada usando [19]:

$$d = d_0 10^{\frac{P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - 10 \log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right)^2 - P_{RX}}{10 \cdot \eta}} \quad (3.2)$$

em que P_{TX} é a potência de transmissão em dBW, G_{TX} e G_{RX} são os ganhos das antenas de transmissão e recepção em dB, λ é o comprimento de onda do sinal rádio e P_{RX} a potência de recepção em dBW.

Desta forma, os valores de RSSI contidos na matriz $INF_ANCORAS$ são transformados em distância, utilizando as equações descritas acima. Essas informações são armazenadas na matriz M , dada por

$$M = \begin{bmatrix} x1 & y1 & d1 \\ x2 & y2 & d2 \\ x3 & y3 & d3 \\ x4 & y4 & d4 \end{bmatrix}.$$

em que $x1$, $y1$ e $d1$ são coordenada x, coordenada y e distância calculada até o âncora 1, respectivamente, sendo os outros valores relativos aos outros três nós âncoras.

Como já comentado, a medida de RSSI entre o nó sensor e o nó âncora pode variar em função do ambiente. Se o ambiente for instável, com alterações frequentes, a variação de RSSI pode requerer a revalidação de rotas, a fim de se adaptar às mudanças do canal.

Para determinar a posição do nó sensor, a matriz M serve de entrada para a técnica de multilateração, descrita no item 2.2.3.2. São criadas a matriz B (Equação 2.5) e a Matriz c (Equação 2.6), e a posição é, então, calculada, usando a Equação 2.4. A seguir é descrito o algoritmo desta etapa.

Algoritmo 1 CALCULAR_POSICAO

```

1: Procedimento CALCULAR_POSICAO (INF_ANCORAS)
2:  $M = \text{Transforma\_rssi\_distancia} (INF\_ANCORAS)$  //Converte rssi em distancia
3:  $B = \text{Transformação}B(M)$  //Cria a matriz B – Equação 2.5
4:  $c = \text{Transformação}c(M)$  //Cria a matriz c – Equação 2.6
5:  $inversa\_da\_transposta\_de\_b\_po\_b = \text{Inversa} (\text{transposta de } B * B)$  //Equação 2.4
6:  $posicao = (inversa\_da\_transposta\_de\_b\_po\_b * \text{transposta de } B) * c$  //Equação 2.4
7:  $posicoes\_sensores = \text{sensor\_requisitante}, \text{posição}$  //Armazena a posição calculada

```

Na sequência a descrição do algoritmo:

- 1: A descrição do procedimento **CALCULAR_POSICAO**, que recebe como parâmetro a matriz *INF_ANCORAS*, descrita no passo anterior;
- 2: a variável *M* é a matriz resultante da transformação dos valores de RSSI coletados dos âncoras na distância até eles. A função **Transforma_rssi_distancia** executa os cálculos descritos anteriormente, para converter o RSSI em distância;
- 3: Na linha 3 é onde começam as etapas para o cálculo da multilateração. Nesta linha, é criada a Matriz *B*, descrita no capítulo 2, Equação 2.5. A função **TransformacaoB** executa os cálculos sobre a Matriz *M*;
- 4: Nesta linha é criada a Matriz *c*, descrita no Capítulo 2 Equação 2.6. A função **Transformacaoc** executa os cálculos sobre a Matriz *M*;
- 5 e 6: na linha 5 e 6 é executado o cálculo descrito no Capítulo 2 Equação 2.4, usando as funções de tratamento de matrizes disponíveis;
- 7: Na linha 7, a variável *posicoes_sensores* é uma matriz que armazena o nó sensor que enviou as informações e sua posição calculada, tendo disponível a posição de todos os nós sensores existentes na rede.

Após calcular a posição de todos os nós sensores da rede, o *sink node* possui as informações necessárias para estabelecer a rota, baseada na posição “rádio” dos nós inseridos.

A Figura 3.5 mostra o fluxograma da etapa de cálculo de posição de um nó.



Figura 3.5 - Diagrama de Fluxo da Etapa de Cálculo de Posição

Note que, para calcular sua posição, cada nó sensor trabalha com sete mensagens, sendo cinco recebidas e apenas duas enviadas.

3.3 ESTABELECIMENTO E DISTRIBUIÇÃO DAS ROTAS

De posse das posições “rádio” dos nós sensores da rede, o *sink node* determina a configuração da corrente de sensores. Uma matriz de dimensão $N \times 3$ contém o ID e as posições dos nós sensores da rede, sendo N é o número de nós sensores. Por exemplo, para $N = 4$, temos

$$posicoes_sensores = \begin{bmatrix} id1 & x1 & y1 \\ id2 & x2 & y2 \\ id3 & x3 & y3 \\ id4 & x4 & y4 \end{bmatrix}$$

O algoritmo determina o melhor caminho baseado na distância Euclidiana bidimensional entre os nós sensores, usando como ideia central um algoritmo de custo mínimo (como, por exemplo, o algoritmo de Dijkstra [20]). Os terminais da rede são vistos como pontos em um plano cartesiano. Inicialmente o *sink node* calcula a sua distância até cada um dos demais pontos da rede. O ponto que estiver mais perto é marcado como seu vizinho. O próximo ponto de partida é, então, o nó sensor escolhido como vizinho do *sink node* e o *sink node* é retirado da busca, pois já foi considerado. Este processo é aplicado repetidamente, até que todos os nós sensores façam parte da corrente, como mostra o algoritmo a seguir:

Algoritmo 2 CALCULA_ROTA

- 1: **Procedimento** CALCULA_ROTA (*posicoes_sensores*)
 - 2: *sensor_inicial* = primeiro sensor da matriz *posicoes_sensores* //1º sensor, *sink node*
 - 3: **Faça** até ultimo sensor de *posicoes_sensores* //percorrer toda matriz *posicoes_sensores*
 - 4: *menor_distancia* = *Compara_distancia* (*sensor_inicial*, *posicoes_sensores*)//distancias
 - 5: *vizinho_sensor_inicial* = *menor_distancia* //atribui como vizinho do *sensor_inicial*
 - 6: Marca na matriz *posicoes_sensores* o *vizinho_sensor_inicial* como já usado
 - 7: *sensor_inicial* = *vizinho_sensor_inicial* //atualiza o próximo a ser testado
-

```
8: corrente_protocolo = sensor_inicial, vizinho_sensor_inicial //grava origem, destino
9: FimFaça //Fim da estrutura de repetição
```

A descrição do algoritmo:

- 1: Descrição do procedimento **CALCULA_ROTA**, que recebe como parâmetro a matriz com as posições de todos os sensores da RSSF;
- 2: a variável *sensor_inicial* recebe agora o primeiro sensor da matriz *posicoes_sensores*, que é o *sink node*. A corrente de sensores vai ser calculada do *sink node* até o último sensor;
- 3: laço de repetição que irá percorrer toda a matriz *posicoes_sensores*;
- 4: a variável *menor_distancia* irá receber o sensor mais próximo ao *sensor_inicial*. O sensor é encontrado pela função **Compara_distancia**, que calcula a distância Euclidiana do *sensor_inicial* até todos os outros sensores existentes na matriz *posicoes_sensores*, e re-torna o mais próximo;
- 5: a variável *vizinho_sensor_inicial* recebe então o sensor mais próximo ao *sensor_inicial*;
- 6: é feita uma marcação no *vizinho_sensor_inicial*, pois ele não poderá ser atribuído como vizinho de nenhum outro sensor, pois já foi incluído na corrente de sensores;
- 7: é atualizado o *sensor_inicial*, sendo atribuído a ele o sensor armazenado em *vizinho_sensor_inicial*, dando assim continuidade a corrente de sensores;
- 8: a variável *corrente_protocolo* armazena a configuração da corrente gerada. A cada interação ela armazena em uma linha a origem e destino, ou o *sensor_inicial*, *vizinho_sensor_inicial*.

A Figura 3.6 mostra o diagrama de fluxo desta etapa.

Após o estabelecimento da rota, o *sink node* envia um pacote de atualização aos nós sensores, contendo seus novos endereços de Destino e de Vizinho. Esse pacote de atualização de rotas é enviado usando a última rota estabelecida. Ao receber esse pacote de atualização, cada nó sensor altera os seus endereços de sensor destino e sensor vizinho, mas repassa o pacote usando ainda a rota antiga. A nova rota é utilizada somente após todos os nós receberem o pacote de atualização e a base for notificada. Após esta etapa, a corrente de sensores estará formada usando a posição “rádio” dos nós sensores e a rede já pode ser usada para o tráfego de dados.

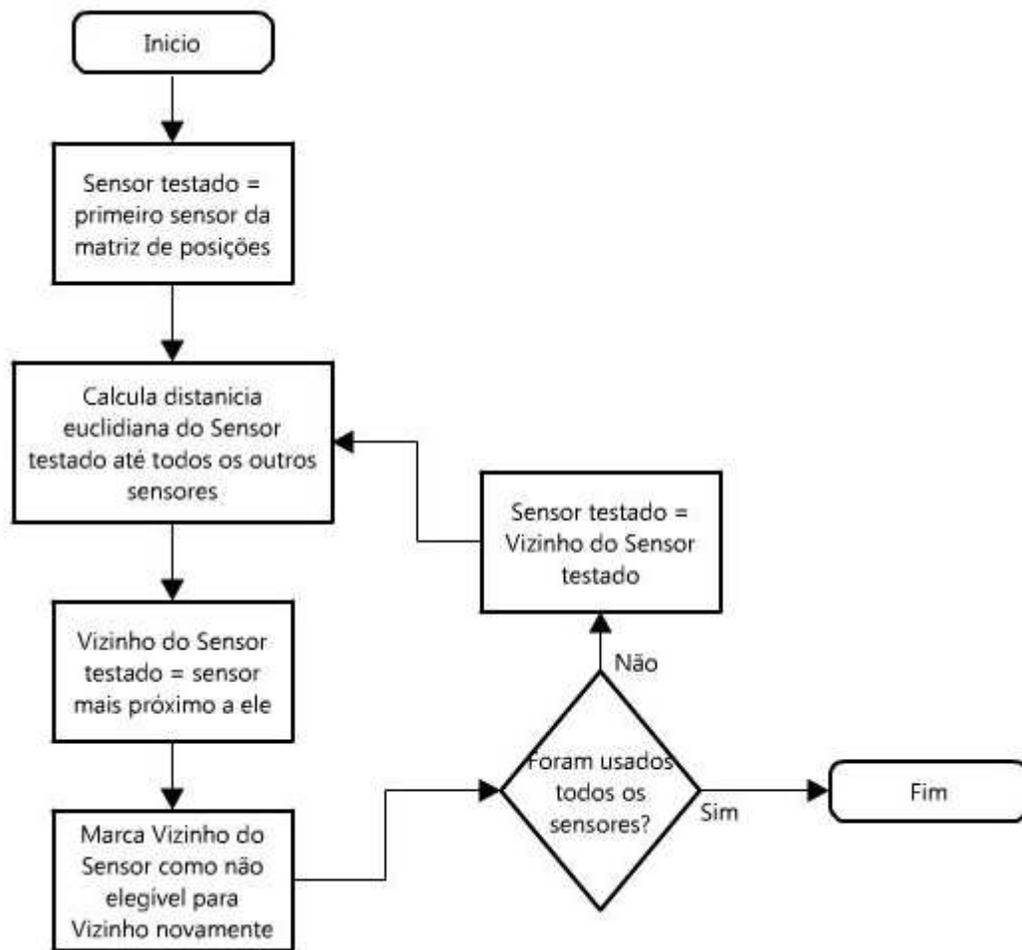


Figura 3.6 - Diagrama de Fluxo de montagem da Corrente

3.4 REVALIDAÇÃO DAS ROTAS

Devido a possíveis alterações do ambiente de propagação ou entrada e saída de nós sensores, a rota deve ser revalidada periodicamente. A frequência desta revalidação vai depender do ambiente em que a rede estiver funcionando. Isso pode ser definido pela aplicação da RSSF, usando métricas estabelecidas por camadas superiores.

A função chamada REVALIDACAO é responsável por essa revalidação da rota, e mantém um contador que indica quando iniciar a revalidação. Quando este tempo expira, o *sink node* pede novamente as informações de todos os nós sensores existentes na rede e recalcula suas posições,

recalculando a corrente de sensores. Com isso o protocolo se adapta as mudanças no ambiente de operação.

O quadro de revalidação de rotas é enviado em *broadcast*, indicando para todos os nós sensores que eles devem requisitar as informações dos nós âncoras novamente.

Após recalculando a corrente de sensores, o *sink node* só distribui os novos endereços se a nova rota for diferente da rota vigente.

A rota é também revalidada durante a verificação de atividade dos sensores, o que é descrito mais adiante.

O algoritmo da função REVALIDACAO é descrito a seguir.

Algoritmo 3 REVALIDACAO

```
1: Procedimento REVALIDACAO
2: Timeout (tempo) //Espera um período de tempo, definido em segundos
3: Envia_Pedido_Broadcast ( ) //Envia um pedido a todos os sensores
4: Enquanto não acaba tempo de espera //Espera pela resposta dos nós por um tempo
5: Recebe_Informacoes_Sensores ( ) //Recebe as informações enviadas pelos nós
6: Calcula_Posicao ( ) //Calcula a posição, usando os passos descritos anteriormente
7: Armazena_Nova_Posicao ( ) //Armazena a posição dos sensores que responderam
8: FimEnquanto //Fim do laço de repetição
9: rota_nova = Calcula_rota ( ) //Calcula a corrente usando as posições calculadas
10: Se rota_nova != rota_antiga //Se a rota nova for diferente da antiga
11: Distribui_rota ( ) //Envia nova rota aos sensores
```

Descrição:

- 1: definição do procedimento;
- 2: função **Timeout**, que espera um período de tempo determinado para entrar em funcionamento;
- 3: envia um pedido em broadcast aos sensores, indicando os endereços dos âncoras e pedindo que todos requisitem as informações dos âncoras;
- 4: laço de repetição para esperar a resposta dos sensores, fica esperando por um período de tempo definido, o sensor que não responder durante este período é considerado inativo;

- 5: função **Recebe_Informacao_Sensores**, recebe as respostas enviadas pelos sensores;
- 6: função **Calcula_Posicao**, que calcula a posição usando as funções descritas anteriormente, usando as informações recebidas pela função **Recebe_Informacao_Sensores**;
- 7: função **Armazena_Nova_Posicao**, que armazena na matriz de posições dos sensores as novas posições calculadas;
- 8: Fim do laço de repetição;
- 9: a variável *nova_rota* armazena a configuração de corrente calculada com as novas posições obtidas;
- 10 e 11: testa se a nova configuração de corrente é diferente da antiga, se for, envia a nova configuração aos nós sensores;

3.5 VERIFICAÇÃO DE ATIVIDADE DOS NÓS SENSORES

Periodicamente, o *sink node* envia um quadro endereçado ao último nó da corrente, pedindo uma resposta. Este quadro tem o objetivo de verificar se a corrente de sensores está ativa. Caso haja a resposta do último nó sensor da corrente, significa que todos os nós sensores estão ativos. Caso não haja a resposta do último nó sensor, a etapa de revalidação de rota é acionada. Assim, todos os nós sensores que estiverem ativos devem calcular suas posições novamente e uma nova corrente é gerada.

Esta etapa é importante para garantir a robustez da rede, e a frequência dessas verificações pode ser alta, pois o envio de um quadro não trará um grande *overhead* e só haverá a revalidação de rotas se algum nó sensor estiver inativo. Esta etapa garantirá o bom funcionamento da RSSF. O algoritmo desta etapa é descrito a seguir.

Algoritmo 4 VERIFICACAO

```
1: Procedimento VERIFICACAO
2: Timeout (tempo) //Espera um período de tempo, definido em segundos
3: Envia_Pedido_Ultimo ( ) //Envia um pedido para o ultimo sensor da corrente
4: Enquanto não acaba tempo de espera //Espera pela resposta do nó por um tempo
5:     resposta = Recebe_Resposta ( ) //Recebe a resposta do ultimo sensor ou acaba tempo
6: FimEnquanto //Fim do laço de repetição
7: Se resposta = FALHA //Se o sensor não responder
8:     REVALIDACAO_ROTAS //Chama a etapa de Revalidação de Rotas
9: FimSe //Fim da estrutura condicional
```

Segue a descrição do algoritmo:

- 1: definição do procedimento VERIFICACAO;
- 2: tempo de espera entre uma verificação e outra;
- 3: função que envia um pedido ao ultimo sensor da corrente;
- 4: laço que espera pela resposta do ultimo sensor;
- 5: a variável *resposta* recebe a resposta do ultimo sensor, ou falha caso não haja resposta;
- 6: fim do laço;
- 7: testa se o ultimo nó sensor respondeu ou não;
- 8: se ele não respondeu significa que algum nó da corrente falhou, então chama a etapa de revalidação de rotas;
- 9: fim da estrutura condicional;

4 SIMULAÇÃO E EXPERIMENTOS

4.1 MODELO DO CANAL

Como já descrito, o algoritmo de localização utilizado no protocolo usa medidas de intensidade de sinal para estimar a distância entre os nós comuns e os nós âncoras.

Os valores de intensidade de sinal são afetados por fenômenos de degradação de sinal, como desvanecimento, múltiplos percursos e atenuação [15]. Para simular o canal de comunicação e gerar os valores de intensidade de sinal entre os nós foi utilizado um modelo de canal incluindo o desvanecimento do tipo *shadowing*, ou sombreamento, além da perda de percurso determinística. Assim, a potência do sinal recebido é modelada como [18]:

$$P_{rxdB} = P(d_{0,dB}) - 10\eta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X \quad (4.1)$$

em que

- P_{rxdB} é a potência recebida pelo sensor a uma distância d ;
- $P(d_{0,dB})$ é a potência recebida a uma distância de referência d_0 ;
- η é o coeficiente de perda de percurso, que pode ser obtido por meio de medidas prévias no ambiente ou definido pelo tipo de ambiente.
- X é uma variável aleatória gaussiana com média nula e desvio padrão σ_{dB} , que modela o desvanecimento de longo prazo.

Segundo Rappaport [18], os valores de η e σ_{dB} variam de acordo com o ambiente de propagação, como mostrado nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 - Valores de η [18]

Ambiente		η
Outdoor	Espaço Livre	2
	Área Urbana	2,5 a 5
Indoor	Com Linha de Visada	1,6 a 1,8
	Obstruído	4 a 6

Tabela 4.2 - Valores de σ_{dB} [18]

Ambiente	σ_{dB} (dB)
Outdoor	4 a 12
Escritório com Divisórias	9,6
Linha de Visada	3 a 6

Os cenários escolhidos para a simulação, bem como os resultados obtidos são descritos nas seções seguintes.

4.2 FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO

Para simular o protocolo proposto foi desenvolvida uma ferramenta usando o software Scilab [21]. Essa ferramenta recebe como entrada de dados uma matriz Sensores $N \times 3$, sendo N o número de sensores. A primeira coluna identifica o sensor, enquanto que as colunas 2 e 3 trazem as coordenadas (x,y) do nó sensor, como exemplificado pela matriz abaixo, cuja posição dos sensores é mostrada na Figura 4.1:

$$\text{Sensores} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 2 \\ 3 & 1 & 3 \\ 4 & 2 & 3 \\ 5 & 2 & 2 \end{bmatrix}$$

É considerado que o *sink node* é o nó “0”, indicado na primeira linha da matriz.

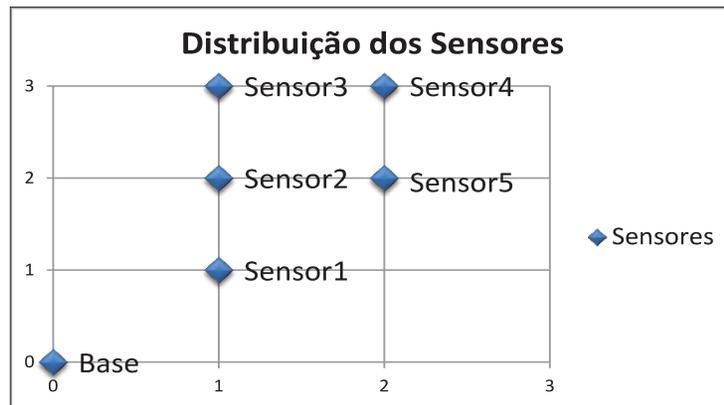


Figura 4.1 - Distribuição dos nós sensores de acordo com a matriz “Sensores”

Existem algumas variáveis que são configuradas antes da simulação, pois são valores usados nos cálculos. Os valores foram escolhidos levando em consideração a configuração da plataforma de redes de sensores Radiuino [22], que foi utilizada para testes em ambiente real. O valor do coeficiente de perda de percurso foi retirado da Tabela 4.1 para as simulações. As variáveis configuradas são:

- Potencia de transmissão = 10 dBm;
- Ganhos das antenas = 2 dB;
- Coeficiente de perda de percurso = varia de acordo com o ambiente;
- Frequência = 915 MHz;
- Distancia de referencia $d_0 = 1\text{m}$;
- Fator σ_{dB} ; Depende do tipo de ambiente simulado, encontrado na Tabela 4.2.

A ferramenta possui as funções necessárias para as simulações e comparações. As funções foram implementadas com o objetivo de (1) gerar os valores de RSSI entre todos os sensores existentes na matriz *sensores*, (2) montar as correntes de sensores usando apenas os valores de RSSI como métrica (simulando o que acontece no D-RCPDS [10], como descrito no item 2.1.3), (3) calcular as posições dos nós sensores e (4) montar a corrente de sensores baseada nas posições calculadas, que é o protocolo proposto neste trabalho. As funções são descritas a seguir, sendo apresentados os seus algoritmos e também suas explicações.

Algoritmo 5 GERAR_RSSIS

```
1: Procedimento GERAR_RSSIS (sensores)
2: sensor_atual = primeira linha matriz sensores //Começa do 1º sensor da matriz sensores
3: x=1 //Contador para percorrer a matriz
4: Enquanto existirem sensores //Loop para calcular para todos os sensores
5:     Se sensor_atual != sensores[x] //Garantir que não calcula para si mesmo
6:         d= Calcula_Distancia (sensor_atual, sensores[x]) //Distância euclidiana
7:         rssi= Shadowing(d) //Gera rssi usando a distancia calculada
8:         matriz_rssi = sensor_atual, sensores[x], rssi//Armazena ids sensores e rssi
9:         x = x+1 //Incrementa contador
10: FimSe //Fim da estrutura condicional
11: FimEnquanto //Fim da estrutura de repetição
```

Abaixo segue a descrição do algoritmo, linha a linha:

- 1: apenas a descrição do procedimento, mostrando que ele recebe como parâmetro de entrada a matriz *sensores*, explicada no início do capítulo;
- 2: a variável *sensor_atual* recebe a primeira posição da matriz *sensores*, como ponto de partida;
- 3: a variável *x* é o contador usado para percorrer a matriz *sensores*, para atualizar os nós sensores que terão suas distâncias calculadas e em seguida, o valor de rssi baseado na distancia;
- 4: Estrutura de repetição para percorrer todos os nós sensores existentes na matriz *sensores*;
- 5: Teste condicional para evitar que um nó sensor calcule o rssi para ele mesmo;
- 6: a variável *d* recebe a distância calculada entre o *sensor_atual* e o próximo nó da matriz *sensores*, representada pela variável *sensores*[*x*]. A distância euclidiana é calculada usando as posições dos nós na matriz *sensores*;
- 7: a variável *rss*i recebe o valor de RSSI gerado pela função **Shadowing**, que gera este valor usando o modelo descrito na equação 4.1, usando a distância *d*;
- 8: a variável *matriz_rssi* armazena o id do *sensor_atual*, os id's dos demais nós sensores e seus respectivos RSSI's;

- 9: a linha 9 mostra apenas o incremento do contador x ;

Como resultado, o procedimento GERAR_RSSIS irá retornar uma matriz contendo o valor de RSSI entre todos os nós sensores que foram declarados na matriz de entrada *Sensores*. Um exemplo resumido de como ficaria esta matriz é mostrado abaixo.

$$RSSIS = \begin{bmatrix} 0 & 1 & rssi \\ 0 & 2 & rssi \\ 0 & 3 & rssi \\ 0 & 4 & rssi \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 5 & 2 & rssi \\ 5 & 3 & rssi \\ 5 & 4 & rssi \end{bmatrix}$$

Usando como base a matriz *RSSIS*, foram desenvolvidas outras duas funções. A primeira é a função CALCULA_ROTAS_RSSI, que tem como objetivo montar a corrente de sensores usando como métrica os valores de RSSI entre os nós sensores, que é o que acontece no protocolo D-RCPDS, que é utilizado para comparação com o protocolo proposto neste trabalho. Segue a descrição do algoritmo.

Algoritmo 6 CALCULA_ROTAS_RSSI

```

1: Procedimento CALCULA_ROTAS_RSSI (rssis)
2: sensor_inicial = primeira sensor da matriz rssis //Começa do sink node, primeira posição
3: Faça até ultimo sensor //Loop para percorrer toda matriz rssis
4:   maior_rssi = Compara_rssi (sensor_inicial, rssis) //Acha o nó com maior rssi
5:   vizinho_sensor_inicial = maior_rssi //Atribui como vizinho do sensor_inicial
6:   Marca na matriz rssis o vizinho_sensor_inicial como já usado //Não usa denovo o nó
7:   sensor_inicial = vizinho_sensor_inicial //Atualiza o próximo a ser testado
8:   corrente_rssi = sensor_inicial, vizinho_sensor_inicial //Armazena origem, destino
9: FimFaça //Fim da estrutura de repetição

```

- 1: apenas a descrição do procedimento, indicando que ele recebe como entrada a matriz *rssis*, gerada pela função GERAR_RSSIS;

- 2: a variável *sensor_inicial* recebe o primeiro sensor da matriz *rssis*, que se trata do *sink node*, ou seja, será calculada a corrente do *sink node* até o ultimo nó sensor existente;
- 3: Estrutura de repetição para percorrer todos os nós sensores;
- 4: a variável *maior_rssi* recebe o resultado da função **Compara_rssi**. A função **Compara_rssi** encontra o nó com melhor valor de RSSI até o *sensor_inicial*.
- 5: a variável *vizinho_sensor_inicial* tem como objetivo armazenar quem será o próximo nó da corrente de sensores, por isso ela recebe o valor da variável *maior_rssi*, descrita acima;
- 6: na linha 6 é feita uma marcação no nó sensor que já foi escolhido como vizinho de alguém, pois ele não pode ser usado como vizinho novamente;
- 7: a variável *sensor_inicial* é atualizada com o valor da variável *vizinho_sensor_inicial*, pois o ponto de partida agora é o vizinho encontrado para o *sensor_inicial*, e assim por diante, até não haver mais nós sensores para serem adicionados a corrente.
- 8: na linha 8 a variável *corrente_rssi* armazena a configuração da corrente gerada. A cada interação ela armazena em uma linha a origem e destino, ou o *sensor_inicial*, *vizinho_sensor_inicial*.

Após a execução da função **CALCULA_ROTAS_RSSI**, é gerada a matriz *corrente_rssi*, que contém a configuração da corrente de sensores baseada nos valores de RSSI entre os enlaces. Um exemplo desta matriz é mostrado abaixo. A Figura 4.2 mostra como seria a corrente baseada na matriz *corrente_rssi*.

$$corrente_rssi = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 2 \\ 2 & 3 \\ 3 & 4 \\ 4 & 5 \end{bmatrix}$$

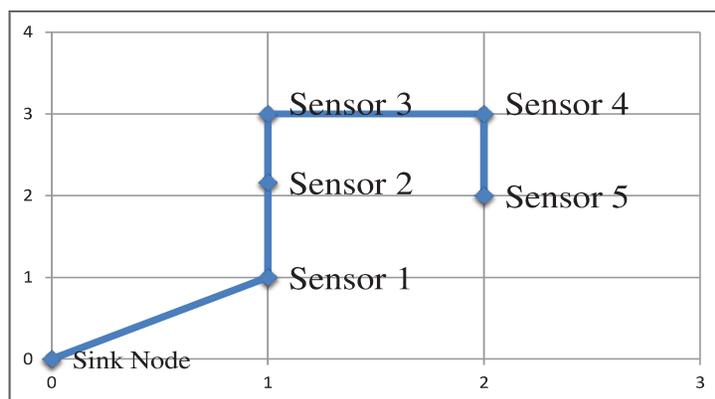


Figura 4.2 - Configuração da Corrente de acordo com a matriz corrente_rssi

A última função a ser apresentada é a que simula o funcionamento do protocolo proposto. Ela foi definida como `CALCULA_ROTA_PROTOCOLO`. Nesta função é usada como entrada a mesma matriz `rssis` gerada pela função `GERAR_RSSIS`. Nesta função são calculadas as posições dos nós sensores comuns da rede, que são armazenadas em uma matriz chamada `posicoes_radio`. Em seguida, é aplicado o mesmo algoritmo de melhor caminho usado na função `CALCULA_ROTA_RSSI`, com a diferença que a métrica utilizada não é o valor de RSSI entre os enlaces, mas sim a distância entre as posições calculadas pelo protocolo.

A seguir é descrito o algoritmo desta função.

Algoritmo 7 `CALCULA_ROTA_PROTOCOLO`

```

1: Procedimento CALCULA_ROTA_PROTOCOLO (rssis)
2: sensor_inicial = primeiro sensor da matriz rssis //Começa do sink node, primeira posição
3: ancoras = id's dos ancoras //Guarda quem são os âncoras
4: Enquanto existirem sensores em rssis //Percorre toda matriz rssis
5:   Se sensor_inicial for ancora //Se é ancora, não preciso calcular sua posição
6:     posicao_radio = sensor_inicial, posição do ancora //Armazena posição ancora
7:     sensor_inicial = próximo sensor a ser testado //Pega próximo sensor
8:   Senao //Se não é ancora, preciso calcular sua posição
9:     rssi_ancoras = Procura_rssis (sensor_inicial, rssis, ancoras) //Acha rssi
10:    posicao = Multilateração (rssi_ancoras) //Posição com rssi ate os ancoras
11:    posicoes_radio = sensor_inicial, posição //Armazena posição calculada

```

```

12:      sensor_inicial = próximo sensor a ser testado      //Pega próximo sensor
13:  FimSe                                          //Fim da estrutura condicional
14:  FimEnquanto                                  //Fim da estrutura de repetição
15:  sensor_inicial = primeiro sensor da matriz posicoes_radio //Inicia do 1º sensor, sink
16:  Faça até ultimo sensor de posicoes_radio      //Percorrer toda matriz posicoes_radio
17:  menor_distancia = Compara_distancia (sensor_inicial, posicoes_radio)//Distancias
18:  vizinho_sensor_inicial = menor_distancia //Atribui como vizinho do sensor_inicial
19:  Marca na matriz posicoes_radio o vizinho_sensor_inicial como já usado
20:  sensor_inicial = vizinho_sensor_inicial      //Atualiza o próximo a ser testado
21:  corrente_protocolo = sensor_inicial, vizinho_sensor_inicial //Grava origem, destino
22:  FimFaça                                       //Fim da estrutura de repetição

```

- 1: Apenas a descrição do procedimento, indicando que ele recebe como parâmetro de entrada a matriz *rssis*;
- 2: a variável *sensor_inicial* recebe o primeiro sensor da matriz *rssis*, que é o *sink node*, como ponto de partida;
- 3: a variável *ancoras* guarda os endereços dos nós ancoras, pois eles são necessários para localizar o valor de RSSI entre o sensor requisitante e os quatro nós ancoras;
- 4: laço de repetição para percorrer toda a matriz *rssis*, calculando as posições dos nós sensores;
- 5: teste condicional, se o *sensor_inicial* for um nó ancora, não é necessário calcular sua posição, pois ela é conhecida.
- 6: no caso do *sensor_inicial* ser um nó ancora, apenas armazena-se a sua posição na matriz *posicao_radios*;
- 7: busca o endereço do próximo nó sensor da matriz *rssis* a ter sua posição calculada e atualizo a variável *sensor_inicial*.
- 8: caso o nó sensor não seja um nó âncora, deve-se então calcular sua posição baseada nos valores de RSSI até os nós ancoras;

- 9: a variável *rss_i_ancoras* recebe os valores de RSSI do *sensor_inicial* até os quatro nós ancoras. Estes valores são encontrados através de uma busca feita pela função **Procura_rssis**, que busca na matriz *rssis* os valores de RSSI do *sensor_inicial* até cada um dos quatro nós ancoras;
- 10: a variável *posicao* recebe a posição do *sensor_inicial* calculada pelo processo de multilateração. A posição é calculada pela função **Multilateração**, que executa o cálculo descrito no capítulo 2, usando os valores de RSSI armazenados na variável *rss_i_ancoras*, obtendo assim a “posição rádio” do nó sensor;
- 11: é armazenada na matriz *posicoes_radio* o *sensor_inicial* e sua “posição rádio” calculada.
- 12: o *sensor_inicial* é atualizado, buscando o próximo nó sensor da matriz *rssis*;
- 13 e 14: Fim da etapa de cálculo das posições rádio, começa o algoritmo de melhor caminho, aplicado sobre a matriz *posicoes_radio*, que contem a posição de todos os nós sensores existentes na rede;
- 15: a variável *sensor_inicial* recebe o primeiro sensor da matriz *posicoes_radio*, que é o *sink node*. A corrente de sensores vai ser calculada do *sink node* até o ultimo nó sensor;
- 16: laço de repetição que irá percorrer toda a matriz *posicoes_radio*;
- 17: a variável *menor_distancia* irá receber o nó sensor mais próximo ao *sensor_inicial*. O nó sensor é encontrado pela função **Compara_distancia**, que calcula a distância euclidiana do *sensor_inicial* até todos os outros nós sensores existentes na matriz *posicoes_radio*, e retorna o mais próximo;
- 18: a variável *vizinho_sensor_inicial* recebe então o nó sensor mais próximo ao *sensor_inicial*;
- 19: Na linha 19 é feita uma marcação no *vizinho_sensor_inicial*, pois ele não poderá ser atribuído como vizinho de nenhum outro nó, pois já foi incluído na corrente de sensores;
- 20: Na linha é atualizado o *sensor_inicial*, sendo atribuído a ele o nó sensor armazenado em *vizinho_sensor_inicial*, dando assim continuidade a corrente de sensores;
- 21: a variável *corrente_protocolo* armazena a configuração da corrente gerada. A cada interação ela armazena em uma linha a origem e destino, ou o *sensor_inicial*, *vizinho_sensor_inicial*.

Com as funções descritas neste capítulo, a estratégia de roteamento proposta nesse trabalho será analisada e comparada com a técnica de roteamento baseada no monitoramento de RSSI entre os nós sensores.

Na próxima seção são apresentados os cenários utilizados na análise e os resultados da simulação.

4.3 CENÁRIOS SIMULADOS

Foram escolhidos três cenários, com diferentes ambientes de propagação, para a comparação entre o protocolo proposto e o método de monitoramento de valores de RSSI entre os nós sensores vizinhos.

O método de monitoramento de valores de RSSI entre os nós sensores vizinhos é usado no protocolo D-RCPDS [10], em que cada sensor monitora os valores de RSSI entre ele e seus vizinhos, ou seja, todos os nós sensores trocam informações entre si, armazenando os valores de RSSI medidos entre eles. Essas informações são enviadas ao *sink node* que define a rota usando os melhores valores de RSSI entre os enlaces.

Além da comparação entre os dois métodos, foi feita também uma análise sobre a influência do posicionamento dos nós âncoras no desempenho do protocolo proposto. Para isso, para cada cenário onde foi simulado o protocolo proposto, foi feita a simulação com duas opções de posicionamento dos nós âncoras.

Para todos os cenários, o cenário inicial é o mostrado na Figura 4.3, que contém treze sensores comuns, quatro nós âncoras e o *sink node*. Os nós âncoras estão diferenciados dos demais pela notação gráfica, sendo indicados pelos marcadores em forma quadrada e na cor vermelha.

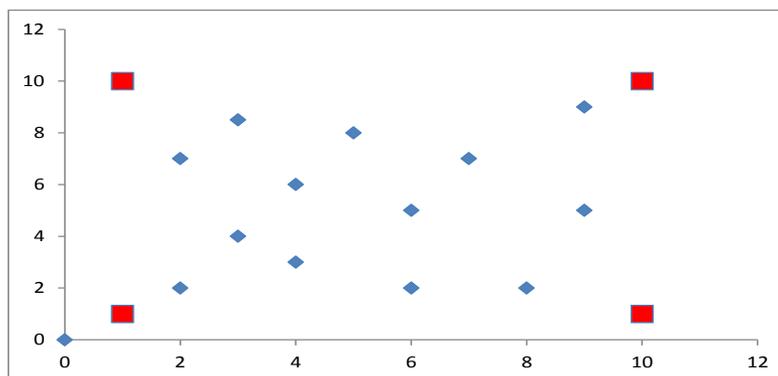


Figura 4.3 – Cenário inicial de posicionamento dos nós na rede.

Conforme mencionado anteriormente, para cada cenário descrito abaixo são realizadas 30 rodadas de simulação em cada técnica, sendo as técnicas:

- Monitoramento de Valores de RSSI entre Nós Sensores Vizinhos;
- Protocolo Proposto;
- Protocolo Proposto com um posicionamento aleatório dos nós Âncoras.

4.3.1 Ambiente de Escritório Com Divisórias

No primeiro cenário, é simulado um ambiente de escritório com divisórias, que é caracterizado usando com $\eta = 6$ e $\sigma_{dB} = 9,6$. Como descrito anteriormente, o primeiro passo da simulação é gerar os valores de RSSI entre todos os sensores da rede.

Usando a técnica baseada na comparação de valores de RSSI para a configuração da corrente de sensores, chegou-se na corrente de sensores mostrada na Figura 4.4.

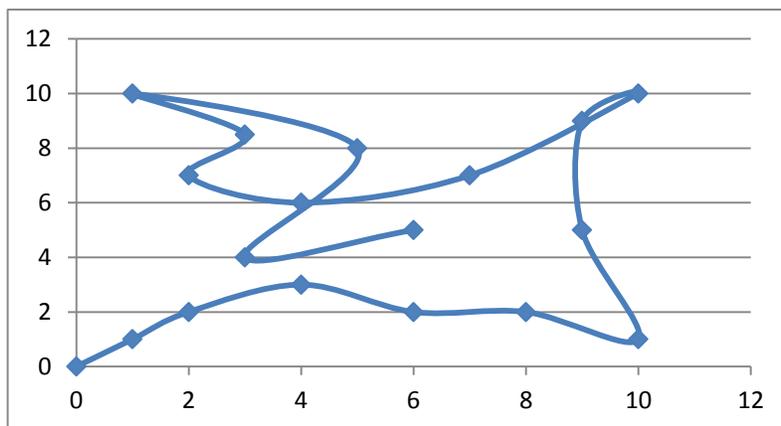


Figura 4.4 - Corrente de Sensores usando valores de RSSI

Nesta configuração de rota, partindo do *sink node* e adicionando todos os nós sensores da rede, o melhor sinal medido entre um enlace foi de -14,98 dBm, o pior sinal medido entre um enlace foi de -64,38 dBm e a média foi de -26,46 dBm, Esses valores serão analisados no Capítulo 5.

Considerando o mesmo cenário, foi determinada a corrente de sensores por meio do protocolo proposto, como descrito a seguir. A Tabela 4.3 mostra a comparação entre as posições físicas e as “posições rádio” dos nós sensores. Os nós âncoras não têm suas posições calculadas, por isso estão grafadas de vermelho.

Tabela 4.3 - Posições Rádio X Posições Físicas

ID	Posição Rádio		Posição Física (real)	
	X	Y	X	Y
<i>Sink Node</i>	0	0	0	0
1	1	1	1	1
2	1	10	1	10
3	10	10	10	10
4	10	1	10	1
5	5,21	6,17	4	3
6	6,32	11,41	4	6
7	5,08	3,78	6	5
8	10,62	7	7	7
9	4,16	5,56	3	4
10	6,32	1,83	8	2
11	11,81	5,3	9	5

12	1,45	6,87	5	8
13	2,61	4,21	2	7
14	4,1	2,48	6	2
15	7,51	8,71	9	9
16	0,18	3,3	2	2
17	0,3	6,43	3	8,5

Com base nessas posições rádio, foi gerada a corrente de sensores, conforme o protocolo proposto (ver Capítulo 3), que é mostrada na Figura 4.5.

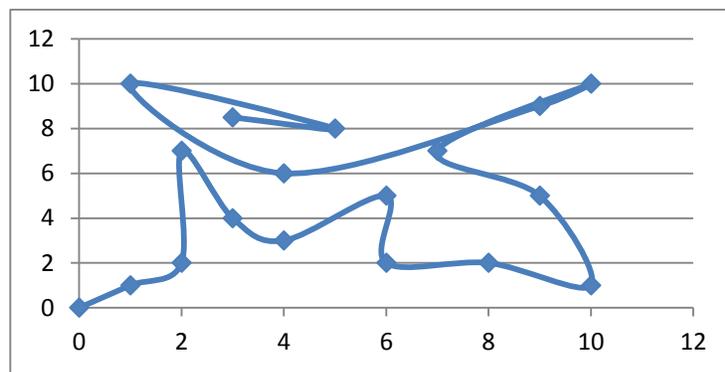


Figura 4.5 - Corrente gerada pelo Protocolo

Na configuração de rota gerada pelo protocolo proposto, partindo do *sink node* e adicionando todos os nós sensores da rede, o melhor sinal observado entre dois nós sensores foi de -14,97 dBm, o pior sinal medido entre um enlace foi de -69,22 dBm e a média foi de -26,54 dBm. Conforme mencionado anteriormente, a análise e comparação entre os resultados são discutidos no Capítulo 5.

Esse experimento foi repetido usando o protocolo proposto, alterando-se as posições dos nós âncoras, como mostra a Figura 4.6. Assim, foram feitas as 30 rodadas de simulação usando o cenário apresentado na Figura 4.6

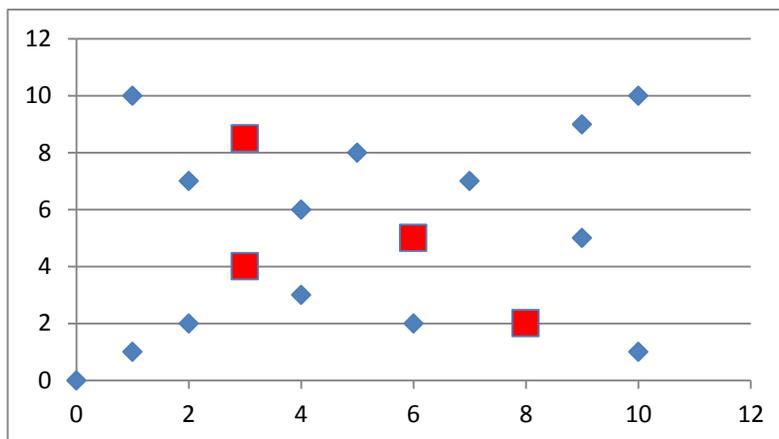


Figura 4.6 - Posições dos âncoras alterados

Foram calculadas as posições usando esta mudança de posição, a Tabela 4.4 mostra a comparação entre a posição física e posição rádio calculada.

Tabela 4.4 - Posição Rádio X Física, com mudança de âncoras

ID	Posição Rádio		Posição Física (real)	
	X	Y	X	Y
<i>Sink node</i>	0	0	0	0
1	6,14	5,62	1	1
2	36,52	32,46	1	10
3	4,25	8,52	10	10
4	26	14	10	1
5	5,22	3,32	4	3
6	9,21	8,29	4	6
7	6	5	6	5
8	10,5	9,46	7	7
9	3	4	3	4
10	8	2	8	2
11	12,6	6,48	9	5
12	5,31	6,32	5	8
13	3,85	8,19	2	7
14	10,3	7,5	6	2
15	0,5	10,9	9	9
16	4,54	6,84	2	2
17	3	8,5	3	8,5

A corrente gerada após a alteração é mostrada na Figura 4.7.

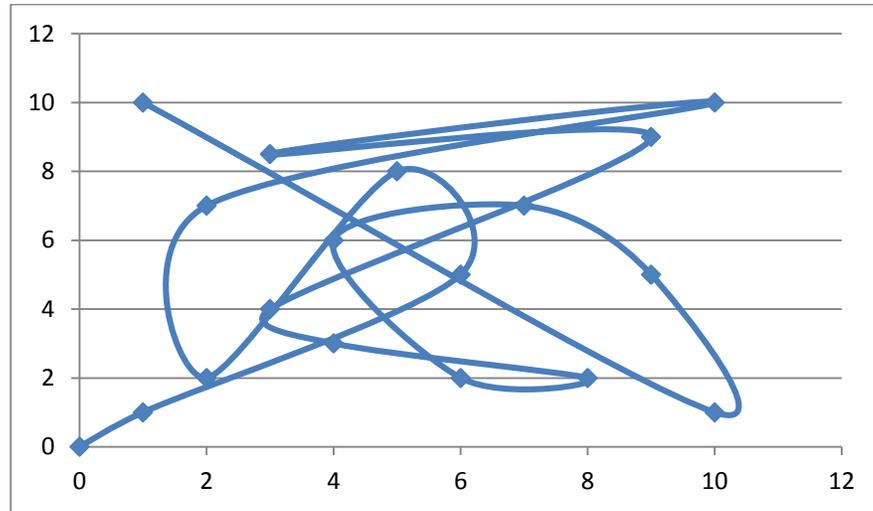


Figura 4.7 - Corrente depois da alteração de posicionamento dos Âncoras

Na corrente gerada, o melhor sinal foi de $-28,07$ dBm, o pior sinal foi de $-81,65$ e a média foi de $-39,36$ dBm.

4.3.2 Ambiente Outdoor em Área Urbana

Para este cenário outdoor foram utilizados os parâmetros $\eta = 5$ e $\sigma_{dB} = 4$, de forma a se ter um ambiente de propagação mais instável, como tipicamente encontrado em ambientes outdoor.

Usando a comparação de valores de RSSI para a configuração da corrente de sensores neste ambiente, chegou-se na configuração mostrada na Figura 4.8.

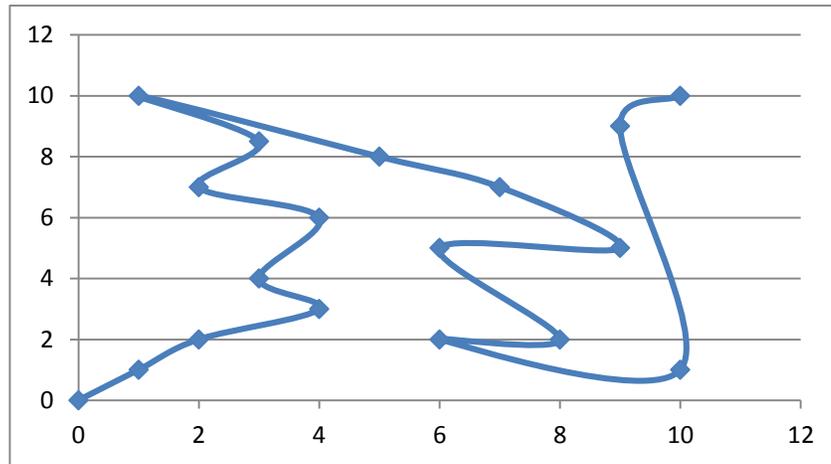


Figura 4.8 - Corrente de Sensores usando valores de RSSI

Nesta configuração de corrente o melhor sinal entre um enlace foi de $-23,95$ dBm, o pior sinal foi de $-65,27$ dBm e a média foi de $-32,55$ dBm.

Agora, usando o protocolo proposto, as posições rádio são mostradas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Posições Rádio x Posições Físicas

ID	Posição Rádio		Posição Física	
	X	Y	X	Y
<i>Sink node</i>	0	0	0	0
1	1	1	1	1
2	1	10	1	10
3	10	10	10	10
4	10	1	10	1
5	5,68	3	4	3
6	1,1	6,63	4	6
7	5,52	3,47	6	5
8	6,11	7,92	7	7
9	4,38	3,91	3	4
10	7,54	2,31	8	2
11	9,49	5,06	9	5
12	3,55	7,63	5	8
13	0,73	9,02	2	7
14	6,53	3,75	6	2
15	11,22	9,54	9	9
16	3,82	7,26	2	2
17	2,93	11,47	3	8,5

A corrente de sensores gerada pelo protocolo é mostrada na Figura 4.9.

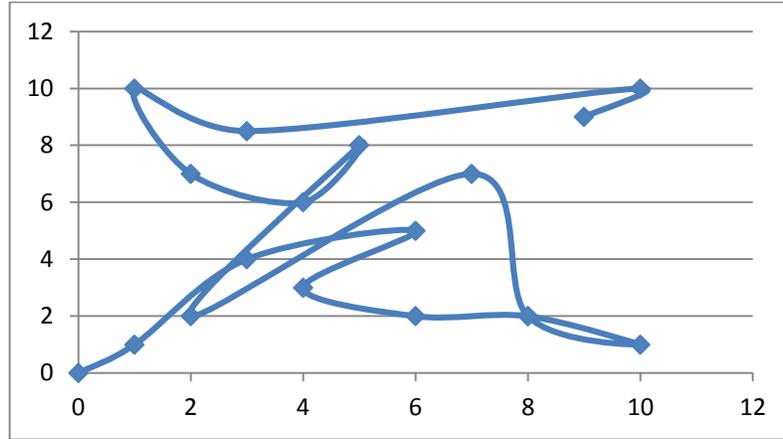


Figura 4.9 - Corrente gerada pelo Protocolo

O melhor sinal é de -22,60 dBm, o pior sinal é - 61,78 dBm e a média é de - 32,59 dBm.

A alteração dos nós âncoras para este cenário é mostrada na Figura 4.10.

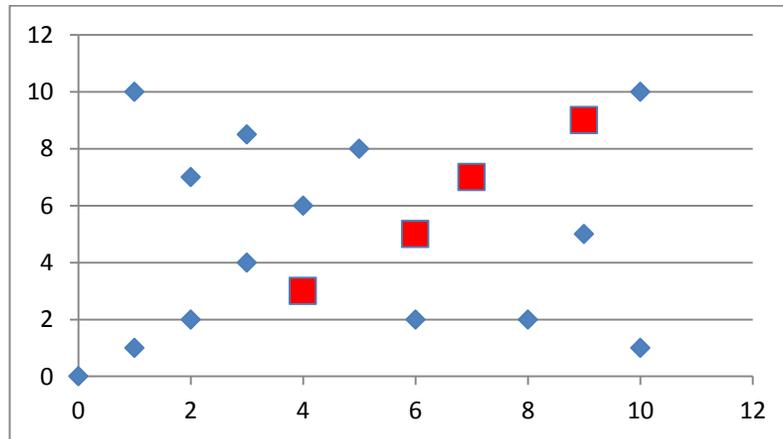


Figura 4.10 - Alteração dos Nós Âncoras

A Tabela 4.6 mostra as posições calculadas usando o protocolo proposto.

Tabela 4.6 - Posições Rádio x Posições Físicas, com mudança de âncoras

Posição Rádio	Posição Física
---------------	----------------

ID	X	Y	X	Y
<i>Sink node</i>	0	0	0	0
1	2,31	1,37	1	1
2	1,88	12,33	1	10
3	4,55	24,92	10	10
4	29,14	35,63	10	1
5	4	3	4	3
6	4,03	6,52	4	6
7	6	5	6	5
8	7	7	7	7
9	7,34	9,9	3	4
10	7,12	8,52	8	2
11	5,06	7,31	9	5
12	2,54	10,93	5	8
13	3,61	9,37	2	7
14	2,58	8,05	6	2
15	9	9	9	9
16	5,33	10,52	2	2
17	1,79	11,56	3	8,5

A corrente gerada com nós os âncoras alterados é mostrada na Figura 4.11.

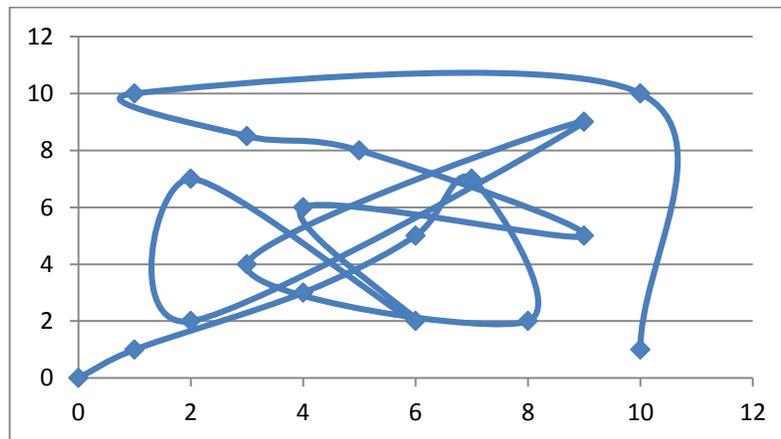


Figura 4.11 - Corrente com alteração dos âncoras

O melhor sinal da rota foi de -34,46 dBm, o pior foi -80,54 dBm e a média foi -43,32 dBm.

4.3.3 Ambiente Outdoor com Visada Livre

Neste cenário o objetivo é simular um ambiente externo com linha de visada entre todos os sensores da rede. Para isso foram utilizados os valores $\eta = 2$ e o parâmetro $\sigma_{dB} = 3$.

Seguindo os passos da simulação, a Figura 4.12 mostra a rota obtida usando os valores de RSSI como métrica.

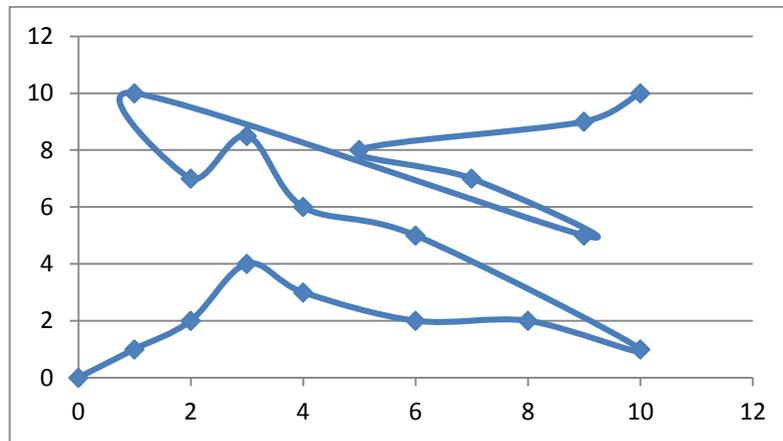


Figura 4.12 - Corrente com alteração dos âncoras

Nesta configuração, o melhor sinal é de -20,86 dBm, o pior sinal usado é de -33,61 dBm e a média é de -26,25 dBm.

Usando o protocolo proposto, as posições calculadas são mostradas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Posição Rádio x Posição Física

ID	Posição Rádio		Posição Física	
	X	Y	X	Y
<i>Sink node</i>	0	0	0	0
1	1	1	1	1
2	1	10	1	10
3	10	10	10	10
4	10	1	10	1
5	5,2	7,3	4	3
6	5,6	6,9	4	6
7	7,11	6,12	6	5
8	6,13	6,56	7	7

9	5,8	5,09	3	4
10	7,6	1,5	8	2
11	9	3,2	9	5
12	5,6	5,6	5	8
13	1,7	6,16	2	7
14	5,87	4,34	6	2
15	9,19	5,76	9	9
16	1,75	2,53	2	2
17	1,96	8,13	3	8,5

A corrente de sensores gerada pelo protocolo é exibida na Figura 4.13.

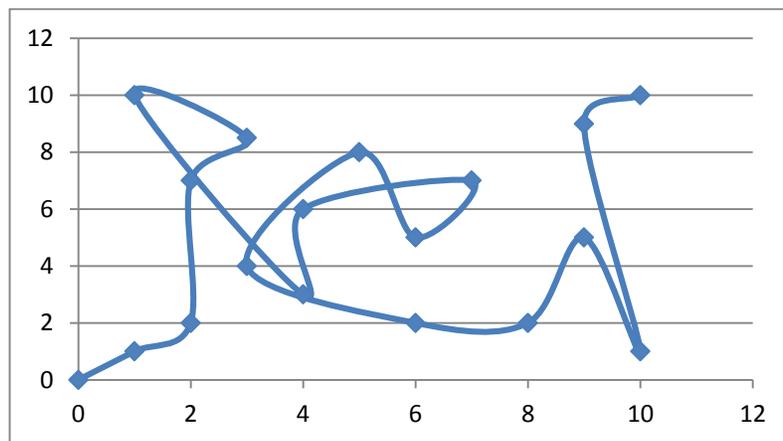


Figura 4.13 - Corrente de sensores gerada pelo protocolo

Na corrente gerada o melhor sinal foi -20,86 dBm, o pior sinal foi -40,04 dBm e a média foi de -27,08 dBm.

A modificação feita nos âncoras é mostrada na Figura 4.14.

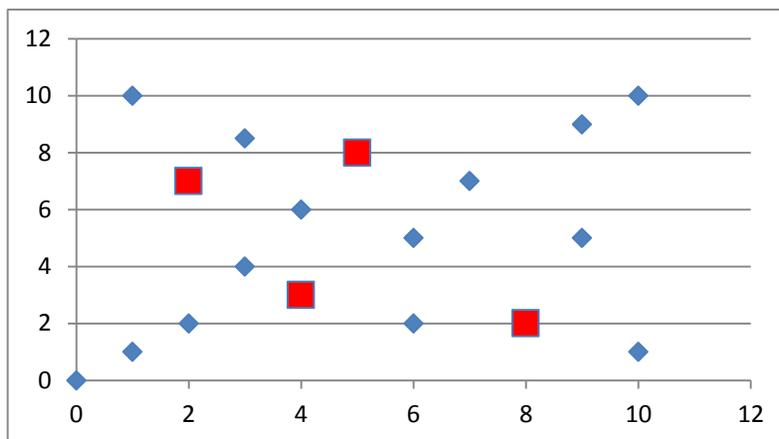


Figura 4.14 - Nós âncoras alterados

Após alterar os nós âncoras, as posições obtidas são exibidas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Posição Rádio x Posição Física, com alteração dos âncoras

ID	Posição Rádio		Posição Física	
	X	Y	X	Y
<i>Sink node</i>	0	0	0	0
1	0,54	0,88	1	1
2	1,14	7,19	1	10
3	9,43	10,38	10	10
4	7,35	2,76	10	1
5	4	3	4	3
6	4,59	5,61	4	6
7	7,2	5,14	6	5
8	5,5	6,78	7	7
9	2	4,25	3	4
10	8	2	8	2
11	6,66	4,05	9	5
12	5	8	5	8
13	2	7	2	7
14	5,43	2,4	6	2
15	11,42	8,75	9	9
16	3,88	3,32	2	2
17	5,01	7,18	3	8,5

A corrente gerada pelo protocolo proposto após a mudança dos nós de referência é mostrada na Figura 4.15.

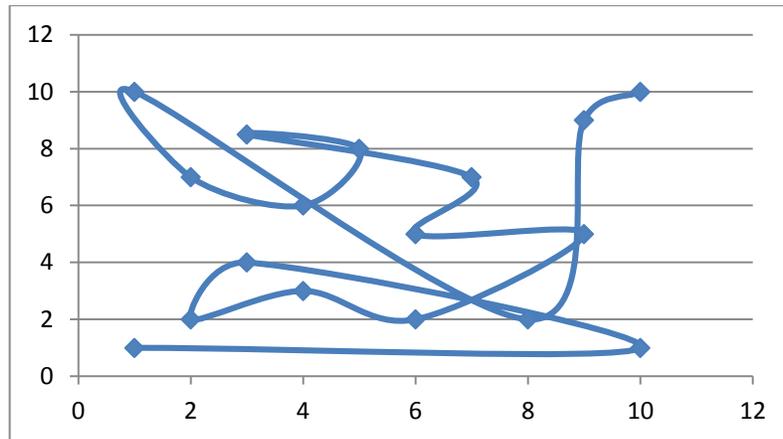


Figura 4.15 - Corrente gerada após mudança de âncoras

Nesta formação, o melhor sinal foi $-20,86$ dBm, o pior foi $-40,68$ dBm e a média dos sinais utilizados foi de $-29,01$ dBm.

4.4 IMPLEMENTAÇÃO E EXPERIMENTOS

Com o objetivo de verificar o funcionamento do protocolo, o mesmo foi implementado em uma plataforma de RSSF real. Com isso é possível verificar se em um ambiente real o protocolo proposto se adapta às características do ambiente. Nas seções posteriores será descrita a implementação, bem como os resultados obtidos com os experimentos realizados.

4.4.1 Plataforma Rádiuino

A plataforma usada para a implementação é a Rádiuino [22], formada por um conjunto de *hardware*, tendo como base o transceptor CC1101 da Texas Instruments, um microcontrolador MegaAVR e outros componentes.

O transceptor CC1101 opera nas bandas de frequência de 300-348 MHz, 387-464 MHz ou 779-928 MHz, podendo utilizar as modulações *Binary Frequency Shift Keying* (2-FSK), *Quaternary Frequency Shift Keying* (4-FSK), *Gaussian shaped Frequency Keying* (GFSK), *Minimum Shift Keying* (MSK) e *On-Off Keying* (OOK). Neste trabalho o transceptor trabalha na faixa de 915 MHz, com modulação GFSK.

Uma característica importante deste transceptor, e que incentivou o seu uso neste trabalho, é a disponibilidade de Indicação da Intensidade de Sinal Recebido (*Received Signal Strength Indication – RSSI*), que é a métrica utilizada no protocolo proposto e também na técnica usada para comparação com a proposta deste trabalho. No CC1101 o RSSI é dado em dBm.

O microcontrolador empregado é da família megaAVR produzido pela Atmel. O chip de referência para conexão com o transceptor CC1101 na plataforma é o Atmega 168, que é um microcontrolador CMOS de arquitetura RISC com 16 kBytes de memória para programa, 23 entradas ou saídas digitais e oito entradas analógicas de 10 bits.

O *firmware* utilizado na plataforma é escrito na linguagem C++ e está estruturado em uma pilha de protocolos semelhante às camadas do modelo TCP/IP. A Figura 4.16 mostra a distribuição da pilha de protocolos na plataforma Radiumo.

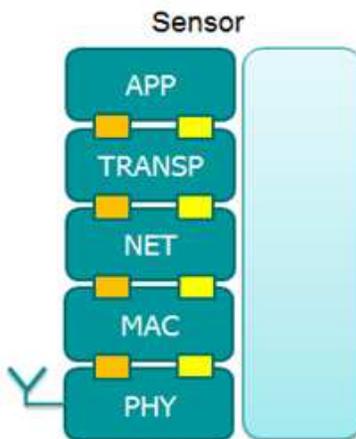


Figura 4.16 - Estrutura em camadas Radiumo [22]

A Figura 4.17 mostra um exemplo de um sensor da família Radiumo.

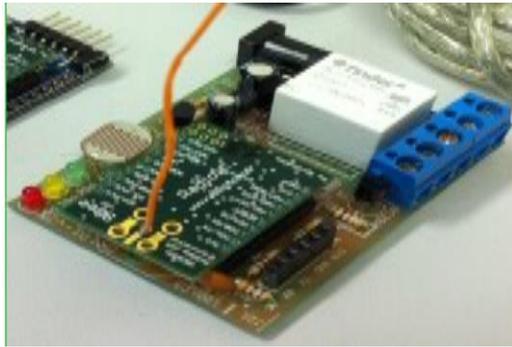


Figura 4.17 – Nó Sensor Radiumino [22]

4.4.2 Implementação

Para implementar o protocolo foi adotada a estratégia de criar quadros de controle, com marcações específicas, identificando o objetivo do quadro. A implementação foi feita com o desenvolvimento de *firmware* na linguagem C++, trabalhando sempre na camada de rede.

Foram criados quatro tipos de quadros de controle, seguindo a descrição do protocolo, apresentada no Capítulo 3. A implementação segue os algoritmos e fluxogramas apresentados no Capítulo 3.

Os quatro quadros são descritos a seguir.

- 1) Quadro de requisição de localização (QRL)

Um quadro QRL é enviado pelo nó *sink* a um nó sensor quando o primeiro deseja calcular a posição do segundo. No QRL consta a identificação (ID) dos nós âncoras que devem ser utilizados no processo de determinação da posição. A Figura 4.18 ilustra uma situação de uso desse quadro.

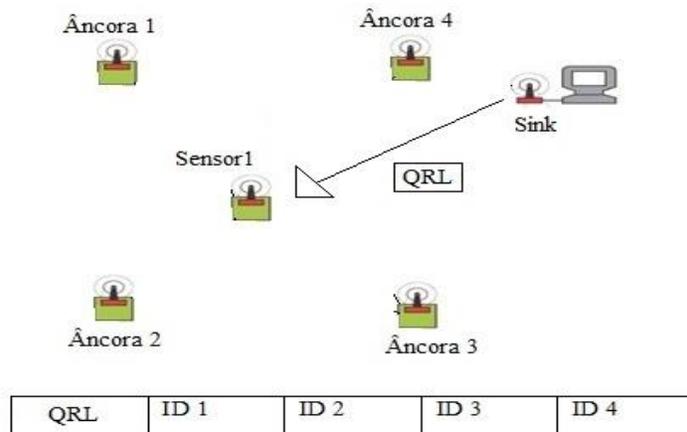


Figura 4.18 - Quadro QRL

2) Quadro de Requisição de Dados dos Âncoras (QRA)

Quando um nó sensor recebe um QRL, ele cria um QRA, contendo os endereços dos âncoras, e o transmite em Broadcast, como ilustra a Figura 4.19.

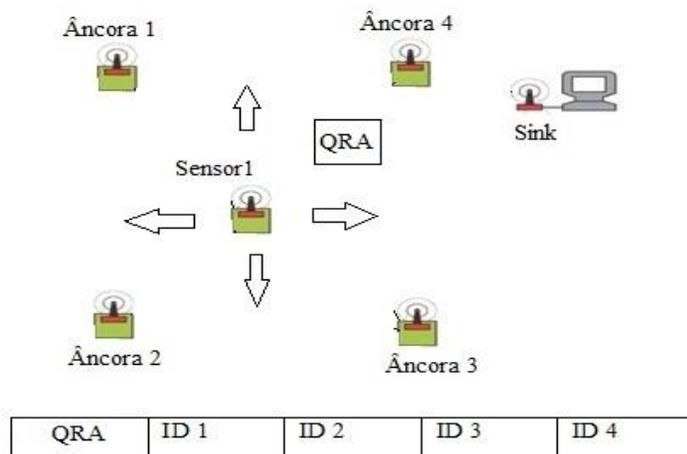


Figura 4.19 - Quadro QRA

3) Quadro de Resposta ao QRA (R-QRA)

Quando um nó âncora recebe um QRA, ele verifica se o seu ID consta na lista de endereços contida no QRA. Caso positivo, esse nó âncora criará um R-QRA, com as informações destinadas

ao nó sensor requisitante. As informações inseridas no R-QRA são o valor de RSSI medido no recebimento do QRA, sua posição (x,y) e seu ID, como mostra a Figura 4.20.

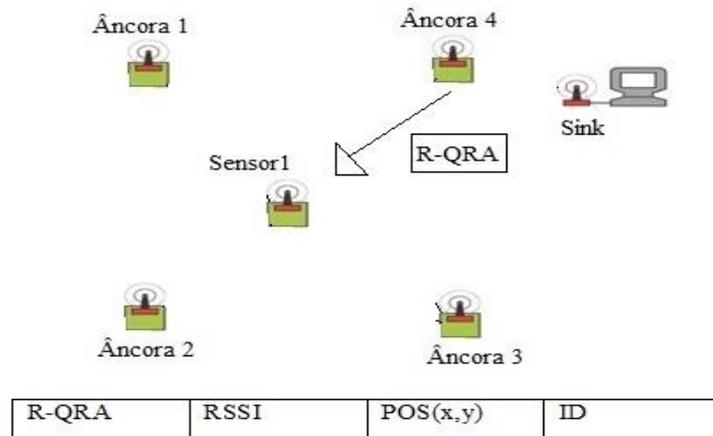


Figura 4.20 - Quadro R-QRA

Cada âncora irá enviar um R-QRA ao nó sensor requisitante.

4) Quadro de Resposta ao QRL (R-QRL)

O nó sensor que enviou o QRA irá receber quadros R-QRA (em número igual ao número de nós ancoras listados no QRA, cada um contendo a informação de um nó âncora. Após receber os quadros, o nós sensor irá agregar todas as informações dos quadros recebidos em apenas um, para enviar ao *sink node*. A estratégia de agregação de dados é atraente para RSSF, pois diminui a quantidade de informação trafegando pela rede.

Assim, o nó sensor cria um R-QRL, contendo todas as informações dos nós âncoras e envia para o *sink node*, como é visto na Figura 4.21.

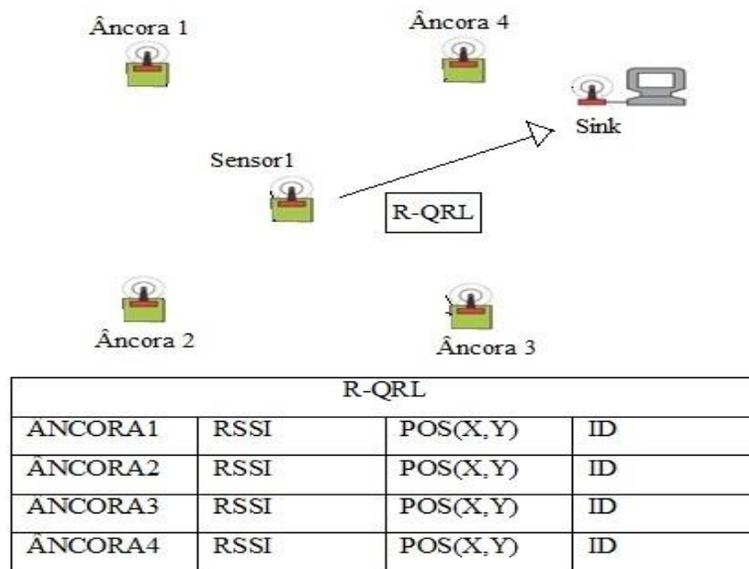


Figura 4.21 - Quadro R-QRL

Com as informações contidas no R-QRL, já é possível calcular a posição do nó sensor. Assim, as sete mensagens que são trocadas até que o nó sensor tenha sua posição calculada foram descritas.

Os cálculos de distância e localização foram implementados no *sink node*, sendo desenvolvido um *software* na linguagem de programação Python [23]. O *sink node* lê as informações do quadro R-QRL e calcula a posição usando o *software* escrito na linguagem Python.

4.5 EXPERIMENTOS

Uma rede de sensores baseada na plataforma Rádiumino foi usada em dois cenários, para a avaliação do protocolo proposto.

4.5.1 Cenário1

No primeiro cenário, foi implantada uma RSSF com 6 nós sensores: um *sink node*, quatro nós âncoras e apenas um nó sensor comum. Este cenário tem uma configuração simples e tem como

objetivo averiguar o funcionamento do protocolo em ambientes onde os nós sensores atendem regiões menores e com menores níveis de interferência ao meio.

O ambiente usado é um laboratório de informática do IFSULDEMINAS – Campus Inconfidentes, com aproximadamente 12x6m².

Neste cenário, os nós sensores foram colocados na mesma altura, com linha de visada entre eles. A Figura 4.22 mostra a distribuição dos nós sensores no ambiente, onde a unidade no sistema de coordenada corresponde a três metros, ou seja, foi criado o sistema de coordenadas mostrado abaixo, onde a distância entre os sensores é de três metros. Por exemplo, o Sensor1 está na posição (1,1) do sistema de coordenadas criado, ele está a três metros de distância do Sensor2, que tem a posição (1,2) no sistema de coordenadas.

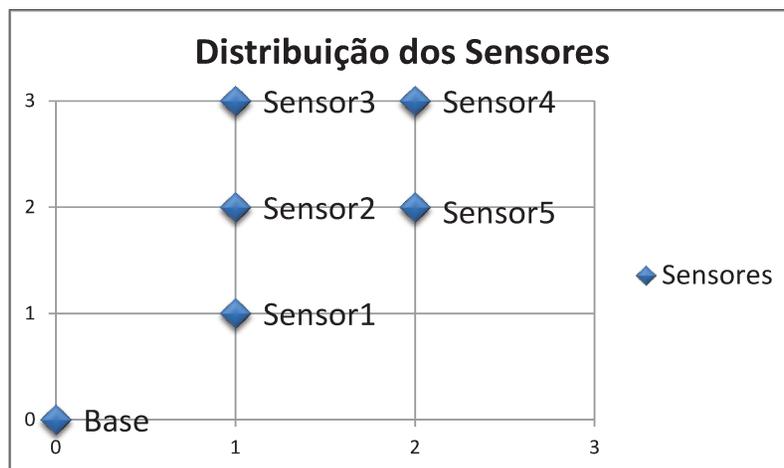


Figura 4.22 - Distribuição dos sensores no ambiente no Cenário 1.

Os nós sensores 1, 3, 4 e 5 são os nós âncoras. A Figura 4.23 apresenta uma foto do ambiente de teste. Nos experimentos não são feitos testes com alteração dos nós âncoras.



Figura 4.23 - Foto do ambiente de teste

O protocolo foi executado 30 vezes, e a posição média calculada do sensor 2 e os desvios são mostrados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Posição calculada do Sensor 2

ID_SENSOR	X	Y	X obtido	Y obtido	Desvio Padrão X	Desvio Padrão Y
Sensor 2	1	2	0,90	1,98	0,1615	0,2755

Após calcular a posição do nó Sensor 2, o protocolo gerou a configuração apresentada na Figura 4.24.

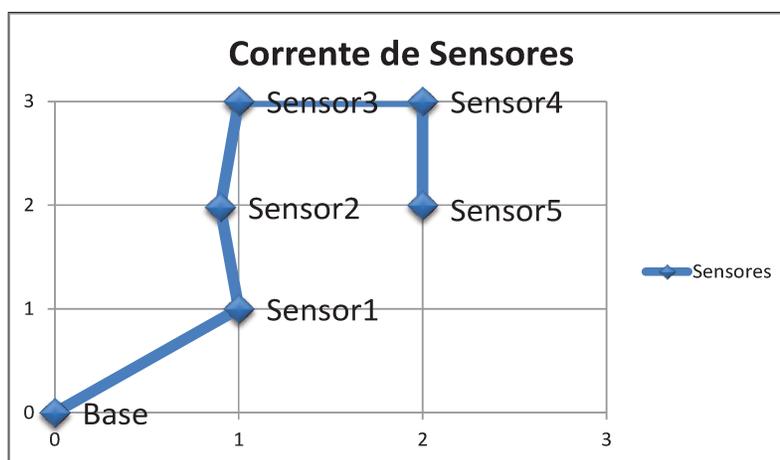


Figura 4.24 - Corrente formada

Pode-se ver que o algoritmo de localização encontrou uma posição bem próxima a posição real do sensor. Isso se deve pelo fato do ambiente não conter obstáculos e a distância de cobertura ser pequena.

4.5.2 Cenário 2

Para o segundo cenário de investigação, foi montada uma rede maior, onde foram usados quatro nós âncoras, quatro nós sensores e o *sink node*. Os nós sensores foram distribuídos no ambiente usando um plano de coordenadas locais. Neste cenário os nós sensores foram dispostos entre computadores e monitores, o que criou um ambiente com vários obstáculos entre os nós.

A distribuição dos sensores é mostrada na Figura 4.25, em que a unidade de medida entre os pontos é 1 metro. Note que os sensores indicados de 1 a 4 são os sensores âncoras, enquanto que aqueles marcados de 5 e 8 são os sensores comuns.

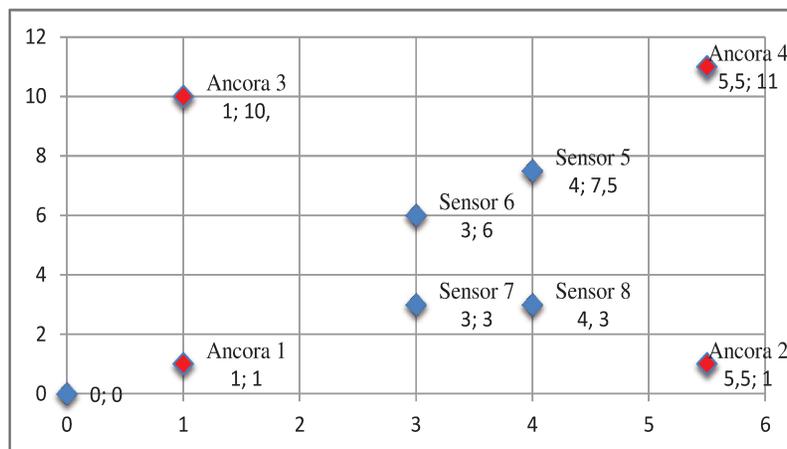


Figura 4.25 - Distribuição dos sensores no Cenário 2

A Figura 4.26 mostra uma imagem do ambiente de teste.

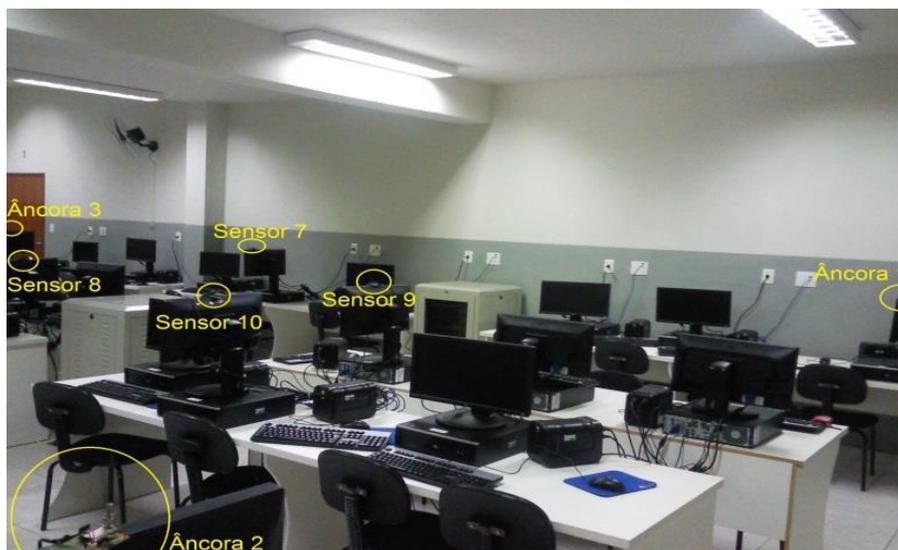


Figura 4.26 - Foto do cenário 2

Neste cenário foram realizados dois testes distintos, seguindo a metodologia das simulações. Foram feitas 30 rodadas de coleta de dados.

No primeiro teste, foram feitas medidas de RSSI entre todos os nós sensores existentes na rede, com a finalidade de comparar o método de monitoramento de valores de RSSI com o método proposto neste trabalho, que utiliza um algoritmo de localização.

A Tabela 4.10 mostra os valores médios coletados e a Tabela 4.11 mostra os desvios padrão encontrados.

Tabela 4.10 - Valores de RSSI entre todos os sensores (dBm)

Sensor RX	Sensor TX							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1		-42,38	-70,97	-57,74	-48,24	-48,74	-44,07	-63,38
2	-42,07		-63,57	-66,18	-45,47	-62,47	-49,74	-40,05
3	-71,00	-63,24		-43,47	-50,68	-52,88	-62,24	-56,88
4	-57,50	-66,47	-43,47		-44,50	-64,88	-60,88	-52,38
5	-48,18	-45,18	-50,68	-44,74		-45,97	-54,24	-48,40
6	-48,74	-63,74	-53,07	-65,97	-45,97		-54,97	-44,69
7	-44,07	-50,00	-60,57	-61,38	-55,47	-54,00		-40,05
8	-61,90	-40,05	-54,38	-51,57	-48,90	-44,69	-40,05	

Tabela 4.11 - Desvios Padrão (dB)

Sensor RX	Sensor TX							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1		0,24	0,54	0,42	0,19	0,52	0,35	0,34
2	0,42		0,23	0,27	0,37	0,35	0,27	0,41
3	0,32	0,36		0,31	0,41	0,36	0,41	0,52
4	0,39	0,49	0,26		0,23	0,24	0,26	0,35
5	0,31	0,24	0,32	0,41		0,41	0,36	0,26
6	0,55	0,49	0,22	0,39	0,39		0,39	0,45
7	0,29	0,58	0,19	0,38	0,37	0,34		0,36
8	0,45	0,31	0,29	0,31	0,41	0,24	-0,26	

Após coletar todos os valores, usando os valores de RSSI como métrica, foi montada a configuração de corrente de sensores mostrada na Figura 4.27. Assim, a rota gerada parte do *sink node* e adiciona os demais sensores existentes na rede. É usado o método descrito na seção 3.3, mas usando como métrica apenas os valores de RSSI, que é o método baseado no monitoramento dos valores de RSSI.

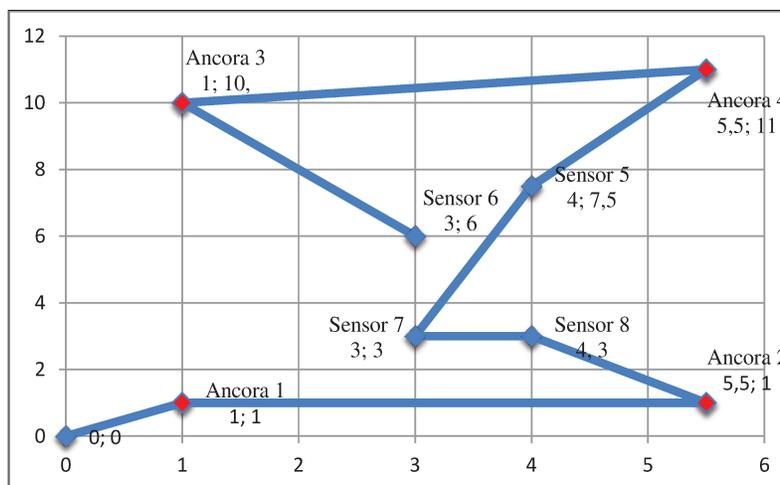


Figura 4.27 - Corrente de sensores usando os valores de RSSI

Colocando o protocolo proposto em funcionamento, foram calculadas as posições rádio dos sensores comuns (não foram calculadas as posições dos nós âncoras, pois essas já eram conhecidas). A Tabela 4.12 mostra um exemplo de resultado das posições encontradas.

Tabela 4.12 - Posições Físicas x Posições Rádio

Sensor	Posição física		Posição rádio	
	x	y	x	y
Sensor 5	4,0	7,5	4,26	5,84
Sensor 6	3,0	6,0	2,03	5,62
Sensor 7	3,0	3,0	4,42	4,85
Sensor 8	4,0	3,0	5,12	5,77

Usando as posições para o estabelecimento da corrente de sensores, chegou-se a configuração mostrada na Figura 4.28.

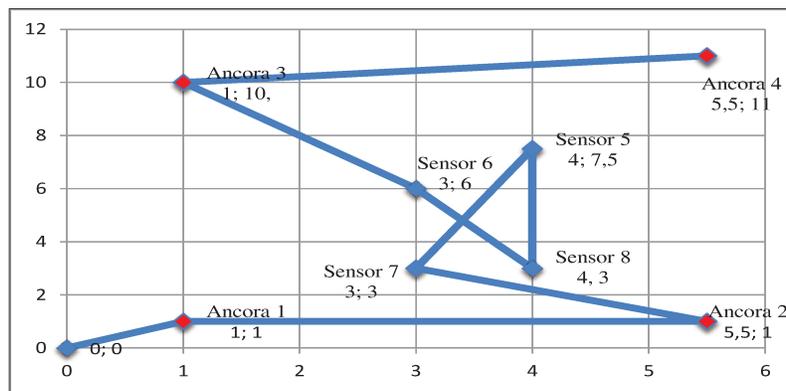


Figura 4.28 - Corrente formada pelo protocolo

Os passos descritos acima mostram o que foi feito em uma rodada de testes. Foram executadas 30 rodadas de testes e os resultados são apresentados no próximo capítulo.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E DOS TESTES EXPERIMENTAIS

5.1 ANÁLISE DE *OVERHEAD*

A quantidade de pacotes de controle que trafegam pela rede pode ser determinante no tempo de vida de uma RSSF, pois quanto mais pacotes são transmitidos, maior é o consumo de energia.

Nesse sentido, foi feita uma análise do protocolo proposto quanto às mensagens envolvidas, comparando-o com métodos que se baseiam em leituras de RSSI/SNR de todos os possíveis enlaces de comunicação. Foi considerada para esta análise apenas a fase de estabelecimento das rotas, não levando em consideração a distribuição das rotas nem a revalidação das mesmas, para deixar a análise mais clara e objetiva, uma vez que estas etapas podem sofrer influência de outros fatores, como a aplicação.

Para o protocolo proposto, são utilizadas sete mensagens até que o nó sensor tenha sua posição calculada e possa fazer parte da rede, como descrito nos capítulos anteriores. Portanto, se existem N sensores na rede, a quantidade de mensagens de informação de controle (aqui denotada por *Overhead*) necessária para que todos tenham suas posições calculadas é

$$Overhead = N \times 7 \quad (5.1)$$

Para a técnica baseada no monitoramento de RSSI entre todos os vizinhos, como o D-RCPDS [10], cada nó sensor tem que trocar informações com todos os seus vizinhos e, portanto, a quantidade de mensagens de controle necessárias é

$$Overhead = N(N - 1) \quad (5.2)$$

A Figura 5.1 mostra um gráfico comparando o parâmetro *Overhead* entre as duas técnicas, em função do número N de terminais na rede.

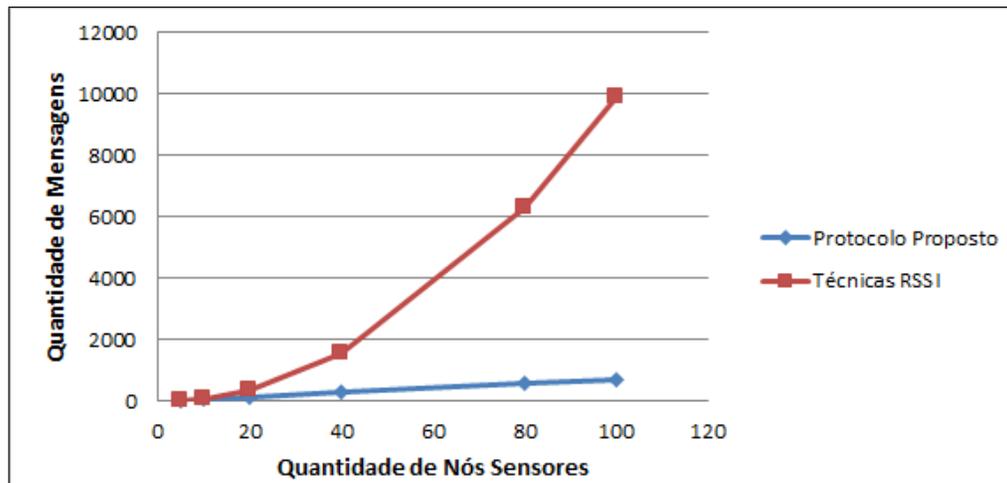


Figura 5.1 - Comparação de *Overhead*

Fica claro que, o protocolo proposto exige um número significativamente menor de mensagens de controle para redes com um grande número de nós sensores, sendo essa uma das vantagens do protocolo proposto. O número de mensagens de controle trocadas se reflete em outros aspectos do desempenho da rede, como, por exemplo, o consumo de energia devido à transmissão, e o nível de congestionamento.

5.2 CONSUMO DE ENERGIA

Outro aspecto importante na avaliação do protocolo proposto é a sua influência no consumo de energia da rede. Segundo Henning [5], a transmissão de dados em uma RSSF pode consumir mais energia que alguns milhões de instruções executadas em um processador.

Devido a esta característica, a análise de consumo neste trabalho leva em consideração a quantidade de informação trocada pela rede necessária para o estabelecimento das rotas. Para isso, foi seguida a análise de *overhead* feita na seção anterior, adicionando-se o consumo de transmissão e recebimento de mensagens pelo rádio transceptor utilizado na implementação.

Uma abordagem semelhante é utilizada no trabalho de Henning [5], em que foi utilizado um rádio transceptor para a implementação de uma RSSF para monitoramento do nível de rios. Outro trabalho que definiu o consumo desta maneira foi o de Passos [24], com uma proposta de gerenciamento dinâmico de energia para RSSF.

No presente trabalho foi utilizado o rádio transceptor CC1101, da Texas Instruments [25], como já mencionado. O consumo desse transceptor depende de diversos fatores, como taxa de transmissão/recepção, frequência de operação, mas que não afetarão o resultado da presente análise. Assim, assumiremos que a taxa de transmissão é 250 kbaud/s, que o sinal é transmitido na faixa de 915 MHz. Nesse caso, o consumo C_r na recepção de um pacote é igual a 15,1 mA. Por outro lado, o consumo na transmissão de um pacote depende também da potência de transmissão. A Tabela 5.1 mostra os valores de consumo para três possíveis valores de potência de transmissão.

Tabela 5.1 – Consumo de transmissão do rádio CC1101 (*DataSheet* do equipamento) [25].

Potência p de transmissão (dBm)	Consumo C_{tp} (mA)
10	31,1
0	16,9
-6	13,5

Para a análise do consumo, levamos em conta apenas a corrente consumida na transmissão e recepção das mensagens necessárias para o cálculo da posição dos terminais. Portanto, no protocolo proposto, temos o consumo devido a duas mensagens transmitidas e cinco recebidas. Portanto, o consumo em uma rede de N terminais, na fase de localização dos terminais, é dado por

$$\text{Consumo} = N(2C_{tp} + 5C_r), \quad (5.3)$$

em que N é o número de sensores da rede, C_{tp} é o consumo de transmissão usando a potência p e C_r é o consumo de recepção.

Para o protocolo D-RCPDS, foi modelado como

$$\text{Consumo} = (N(N - 1))(C_{tp} + 2C_r). \quad (5.4)$$

A Figura 5.2 mostra o consumo da rede para os dois protocolos, para potência de transmissão igual a 10 dBm.

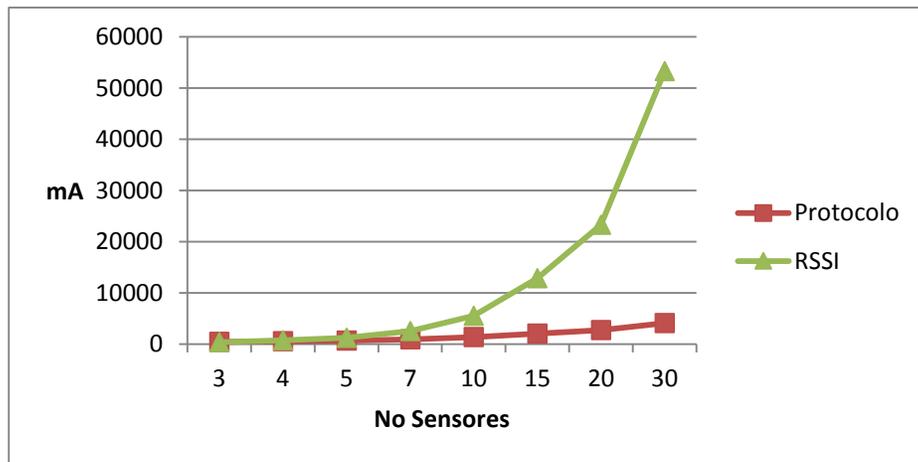


Figura 5.2 - Consumo na potência de 10 dBm

Pode ser observado que em uma rede de até cinco nós sensores os níveis de consumo com os dois protocolos são próximos, com uma leve vantagem (menor consumo) para o protocolo baseado no monitoramento de RSSI. Entretanto, para redes maiores o protocolo proposto mantém um crescimento no consumo linear, enquanto que, para a outra técnica, o crescimento é exponencial. Resultados semelhantes são obtidos para os outros casos de potência de transmissão.

Portanto, podemos concluir que, sob o ponto de vista de consumo de energia, o protocolo proposto é uma solução mais energeticamente eficiente para redes densas.

5.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

5.3.1 Resultados Coletados

5.3.1.1 Cenário de Escritório com Divisórias

Neste cenário existem vários obstáculos entre os nós sensores, o que fará com que as leituras de RSSI sejam fortemente afetadas. Como o sistema de localização é baseado no cálculo das distâncias através do RSSI, isso fará com que as distâncias encontradas não sejam as distâncias físicas corretas, mas sim “distâncias rádio”, pois levam em consideração os fenômenos atuantes sobre o sinal.

O objetivo é avaliar se a rota encontrada pelo protocolo proposto irá ser eficiente em nível de qualidade do sinal entre os enlaces. A técnica usada para comparação é o D-RCPDS, que tem como característica principal o monitoramento dos valores de RSSI/SNR entre todos os possíveis enlaces.

Como foi mostrado anteriormente, o protocolo proposto neste trabalho tem uma vantagem no que diz respeito a *overhead* e consumo de energia para redes com mais nós sensores.

Os resultados das 30 rodadas de simulação deste cenário estão resumidos na Tabela 5.2, onde são mostradas as médias dos melhores sinais, dos piores sinais e a média das médias dos sinais utilizadas em cada técnica. A Tabela 5.3 apresenta os desvios padrão.

Tabela 5.2 - Resultados da simulação

	Melhor Sinal (média)	Pior Sinal (média)	Média dos Sinais (média)
RSSI (D-RCPDS)	-14,17 dBm	-64,86 dBm	-26,46 dBm
Protocolo Proposto	-14,91 dBm	-65,38 dBm	-27,17 dBm
Mudança de Âncoras Protocolo Proposto	-27,32 dBm	-81,38 dBm	-39,13 dBm

Tabela 5.3 - Desvios padrão

	Melhor Sinal (dB)	Pior Sinal (dB)	Média (dB)
RSSI (D-RCPDS)	1,6	2,86	1,41
Protocolo Proposto	1,02	2,8	1,91
Mudança de Âncoras Protocolo Proposto	2,80	2,25	1,39

Analisando os resultados obtidos podemos observar que as correntes de sensores formadas usando os valores de RSSI e pelo protocolo proposto não são idênticas, mas são ambas consideradas muito boas em relação ao nível de sinal entre os enlaces, possuindo uma diferença de menos de 1 dB na média dos sinais utilizados.

Isto mostra que utilizando o protocolo proposto é possível obter uma rota eficiente com um menor custo de *overhead* e consumo de energia.

Na terceira linha da Tabela 5.2, são mostradas as informações da corrente gerada pelo protocolo com os nós âncoras dispostos aleatoriamente entre os nós sensores. Pode-se notar que a

qualidade da rota obtida é bem menor do que as outras. Este fato mostra que o posicionamento dos nós âncoras pode afetar o desempenho do protocolo.

Em [27] é apresentado um estudo que mostra que o posicionamento dos nós âncoras influencia diretamente no processo de localização, principalmente nos que usam a técnica de lateração. A disposição dos nós âncoras nas bordas da rede, em formato circular ou quadrático favorecem esta técnica por não deixar os nós âncoras em posição linear entre eles.

É possível verificar também que as posições encontradas pelo protocolo são bem diferentes das posições físicas dos nós sensores, como é visto na Tabela 4.3. Como já foi mencionado, isso se deve ao fato de que as medidas de distância entre os nós âncoras e o nós comuns são afetadas pelos fenômenos que atuam sobre o meio, pois eles influenciam o valor de RSSI medido.

Como todos os nós sensores calculam suas posições utilizando os mesmos nós âncoras, isso faz com que todos sofram os mesmos efeitos do ambiente. Esse é o objetivo do protocolo proposto, e como é possível ver nos resultados obtidos, faz com que a rede se adapte ao ambiente.

5.3.1.2 Ambiente Outdoor em Área Urbana

A Tabela 5.4 mostra os resultados obtidos. A Tabela 5.5 mostra os desvios padrão.

Tabela 5.4 - Resultados do cenário

	Melhor Sinal (média)	Pior Sinal (média)	Média dos Sinais (média)
RSSI (D-RCPDS)	-23,72 dBm	-64,56 dBm	-32,34 dBm
Protocolo Proposto	-23,43 dBm	-64,79 dBm	-33,34 dBm
Mudança de Âncoras Protocolo Proposto	-33,3 dBm	-80,47 dBm	-43,24 dBm

Tabela 5.5 - Desvios padrão

	Melhor Sinal (dB)	Pior Sinal (dB)	Média (dB)
RSSI (D-RCPDS)	2,9	2,53	1,39
Protocolo Proposto	1,73	2,42	1,54
Mudança de Âncoras Protocolo Proposto	2,53	2,38	1,33

Novamente é possível observar que as correntes geradas pelo D-RCPDS e pelo protocolo proposto são bem próximas. O protocolo proposto encontrou uma rota que se adaptou ao ambiente com um consumo menor de energia e de informação de controle trafegando pela rede.

Com a mudança dos nós âncoras, sendo colocados aleatoriamente no cenário, a qualidade da corrente diminuiu. Isso confirma que o posicionamento dos nós de referência pode influenciar no protocolo. Os melhores resultados obtidos até agora usam os nós âncoras dispostos nas bordas da rede em formato quadrático.

As posições rádio encontradas na Tabela 4.5 mostram que os fenômenos que atuam sobre o sinal interferem diretamente no processo de localização, modificando a posição do nó sensor do ponto de vista das condições do canal de comunicação.

Ainda é interessante observar que com a mudança das posições dos nós âncoras, algumas posições encontradas na Tabela 4.4 e 4.6 são muito afetadas, ocasionando erros muito grandes nas medições, que acabam interferindo na configuração das correntes.

5.3.1.3 Ambiente Outdoor com Visada Livre

Nesta simulação é usado um cenário outdoor com visada livre entre os sensores e um baixo desvio padrão dos sinais gerados, sendo um ambiente favorável ao canal de comunicação. A Tabela 5.6 mostra os resultados da simulação e a Tabela 5.7 mostra os desvios.

Tabela 5.6 - Resultados da simulação

	Melhor Sinal (média)	Pior Sinal (média)	Média dos Sinais (média)
RSSI (D-RCPDS)	-19,97 dBm	-33,02 dBm	-26,49 dBm
Protocolo Proposto	-20,45 dBm	-40,65 dBm	-27,22 dBm
Mudança dos Âncoras no Protocolo Proposto	-22,06 dBm	-40,79 dBm	-29,51 dBm

Tabela 5.7 - Desvios padrão

	Melhor Sinal (dB)	Pior Sinal (dB)	Média (dB)
RSSI (D-RCPDS)	1,39	2,23	1,47
Protocolo Proposto	1,76	1,09	1,69
Mudança dos Âncoras no Protocolo Proposto	2,43	1,09	1,27

Ao observar os resultados apresentados na Tabela 5.6, nota-se que todas as configurações de rotas estão bem próximas. Como nos resultados anteriores, o D-RCPDS e o protocolo proposto continuam obtendo os melhores resultados.

A mudança dos nós âncoras neste cenário não ocasionou em uma perda de qualidade tão significativa quanto nos resultados anteriores. Isso pode estar relacionado ao fato do ambiente simulado ser favorável ao canal de comunicação, não havendo obstáculos entre os sensores. Em um ambiente onde as medidas de RSSI são mais confiáveis, as distâncias calculadas chegam mais próximas das distâncias reais, o que faz com que o cálculo de posição seja mais eficiente, independente da posição dos nós âncoras. Pelo processo de multilateração, descrito no capítulo 2, quanto mais correta a estimativa de distância, menores serão as possibilidades de solução para o sistema de equações geradas. Isso faz com que as posições sejam calculadas com mais exatidão.

Isso nos faz concluir que se em um ambiente as medidas de RSSI forem exatamente proporcionais a distância, as correntes geradas pelo protocolo proposto e usando as medidas de RSSI serão idênticas, devido a relação RSSI/Distância, mostrada na Equação 3.2.

5.3.2 Análise dos Resultados

Na análise dos resultados das simulações serão usadas algumas ferramentas que permitirão avaliar a influência de fatores no desempenho do protocolo proposto. Essas ferramentas são [26]:

- Gráficos de intervalos de confiança: nesses gráficos são apresentadas as variações dos níveis de sinal usados na configuração da rota tendo em consideração a variação nos níveis de fatores. Os intervalos de confiança calculados utilizam um alpha de 0,05 (95% de confiabilidade).

- Gráficos de Pareto: nesses gráficos são apresentadas as influências de cada um dos fatores nos testes. Os gráficos de Pareto utilizam uma linha vertical que indica o ponto em que os fatores começam a ter influência nos experimentos. Ou seja, fatores que se encontram acima dessa linha tem influência nos níveis de sinal utilizados.
- Gráficos de efeitos principais: gráficos que permitem analisar quais dos fatores possuem diferenças mais acentuadas na execução dos testes.
- Gráficos de interação entre os fatores: gráficos que permitem analisar a interação entre os fatores à medida que seus níveis variam.

Para facilitar a análise, os experimentos foram divididos em grupos de dois em dois cenários, comparando o protocolo proposto com a técnica que usa o monitoramento dos valores de RSSI entre todos os enlaces. Os cenários são os fatores do experimento, sendo as técnicas os seus níveis. Como métrica de avaliação foi adotada o valor médio do sinal utilizado na formação da corrente de sensores, pois como já se tem a informação dos melhores e piores sinais em ambos os cenários, pode-se notar que os valores sempre são próximos, o que nos permite trabalhar com a média dos sinais. A Tabela 5.8 mostra essa divisão.

Tabela 5.8 - Cenários para análise

Grupos	Cenários (Fatores)	Técnicas (Níveis)	Métrica
Grupo 1	Escritório Divisórias/Outdoor Urbano	RSSI/Protocolo Proposto	Média dos Sinais
Grupo 2	Outdoor Urbano/Outdoor Visada Livre	RSSI/Protocolo Proposto	Média dos Sinais
Grupo 3	Outdoor Visada Livre/Escritório Divisórias	RSSI/Protocolo Proposto	Média dos Sinais

Para a elaboração das análises foi utilizado o *software* estatístico Minitab [28].

5.3.2.1 Grupo 1

Neste grupo os cenários de Escritório com Divisórias e Outdoor Urbano são usados para se comparar a técnicas de monitoramento de RSSI e o protocolo proposto. Os resultados da análise

podem ser vistos nas Figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6, onde são apresentados os gráficos de Pareto, efeitos principais, interação entre os fatores e de intervalo de confiança, respectivamente.

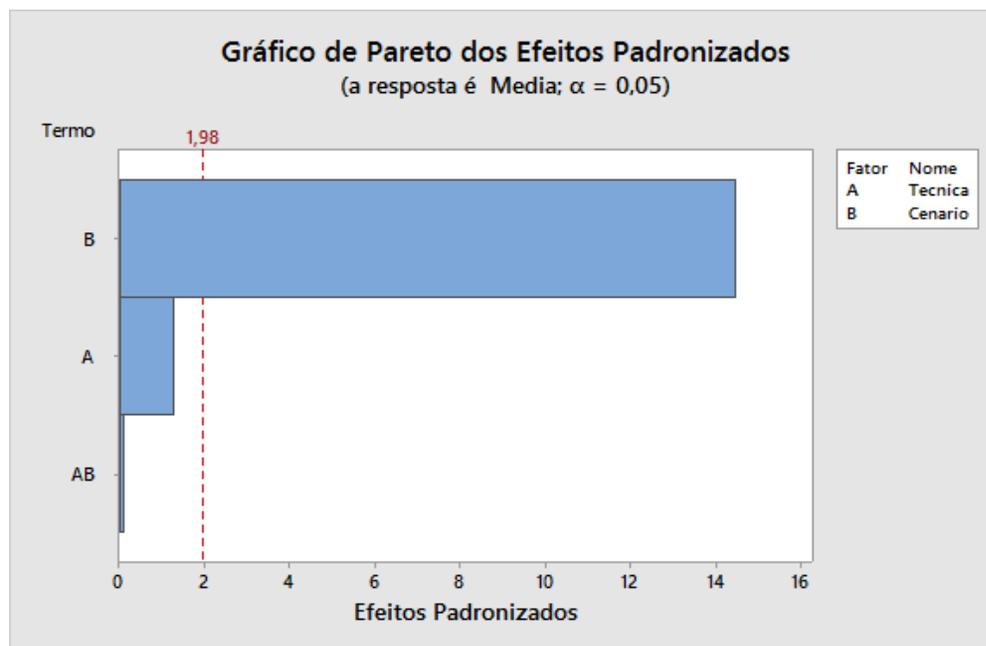


Figura 5.3 – Diagrama de Pareto

O Diagrama de Pareto (Figura 5.3) mostra que o fator que mais influencia no resultado da média dos sinais utilizados é o cenário. Pelo gráfico podemos ver que o Fator A, que são as técnicas utilizadas, não ultrapassa a linha vermelha, indicando que não é um fator significativo para o resultado, da mesma forma em que a interação entre os fatores A e B (mostrada no gráfico pela barra com legenda AB) também não interfere no resultado do experimento. Isso mostra que a técnica de monitoramento de RSSI e o protocolo proposto obtiveram resultados próximos, pois a troca da técnica não afetou o resultado do experimento.

Esta conclusão é reforçada pelo gráfico de efeitos principais, mostrado na Figura 5.4, onde podemos ver que a reta entre as técnicas está pouco inclinada, enquanto a reta entre os cenários está com uma inclinação muito acentuada, indicando que o cenário influenciou bem mais no experimento do que a técnica.

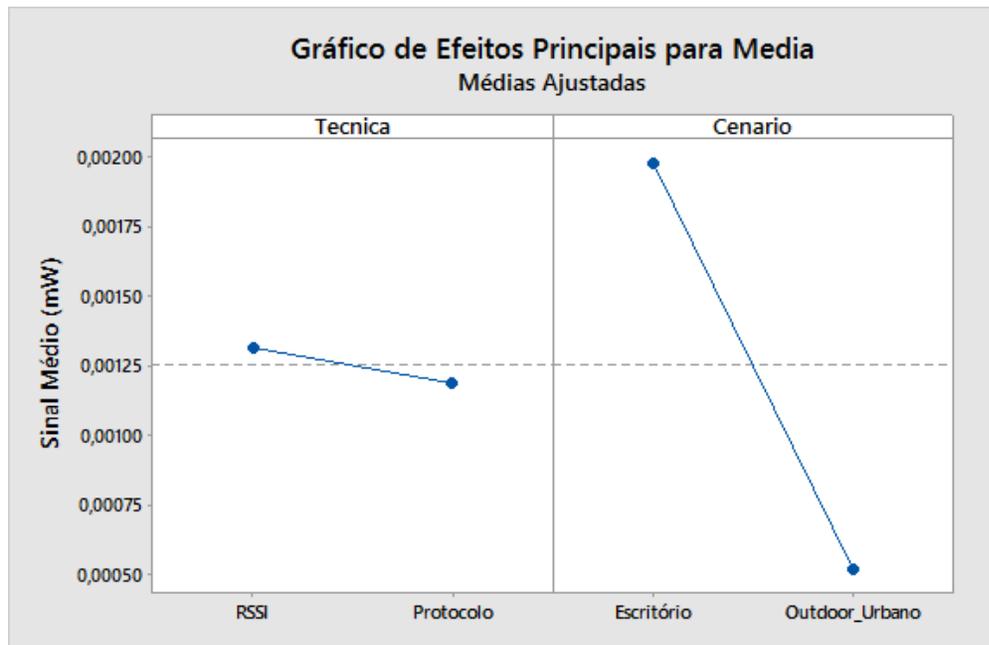


Figura 5.4 - Gráfico de Efeitos Principais

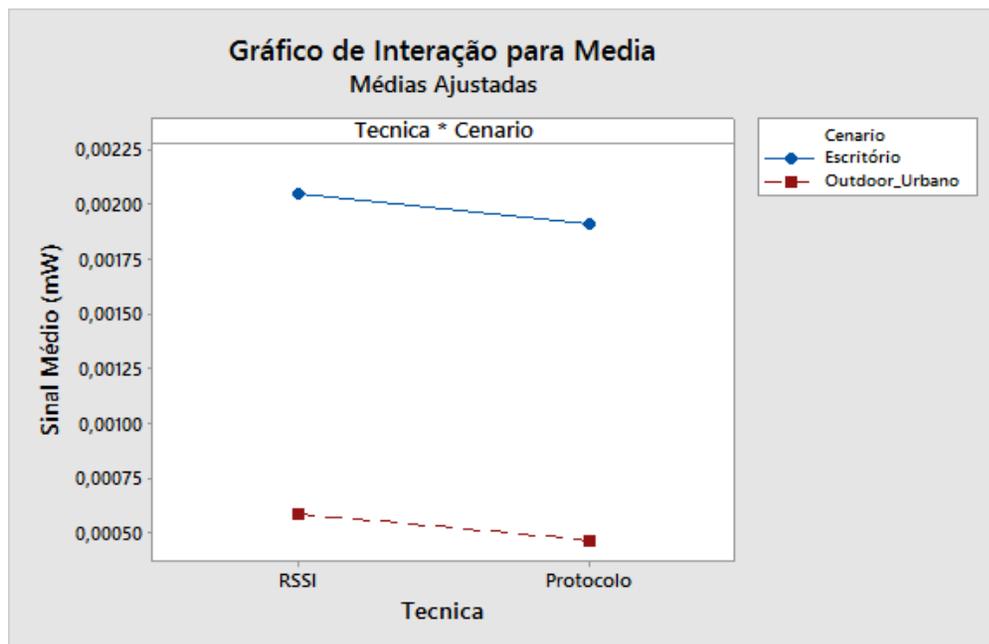


Figura 5.5 - Gráfico de interação entre fatores

O gráfico de interação entre os fatores, apresentado na Figura 5.5, mostra que as técnicas não têm interação entre si, pois ao mudar do nível mais baixo para o nível mais alto, ambas as

técnicas possuem o mesmo comportamento, ficando as retas paralelas. Isso mostra que elas possuem o mesmo comportamento, confirmando o que o gráfico de Pareto (Figura 5.3) mostra, indicando que a interação entre os fatores não é significativa para o resultado do experimento.

A Figura 5.6 mostra o gráfico de intervalos de confiança entre cada cenário com a utilização das duas técnicas, onde se pode notar que possuem sinais médios semelhantes.

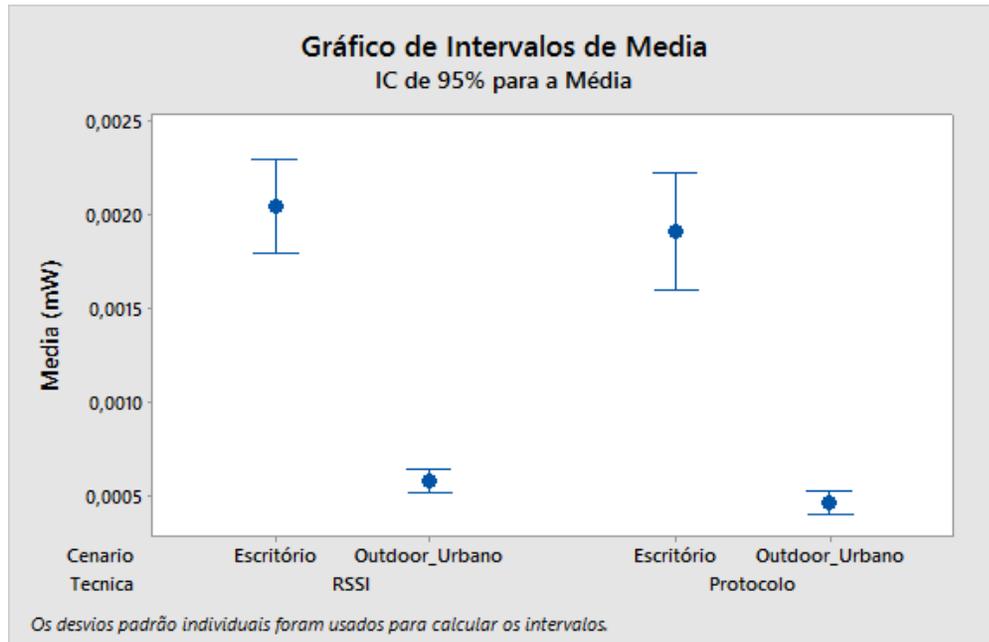


Figura 5.6 - Intervalos de Confiança para as médias de RSSI

Com essa análise é possível concluir que as técnicas obtiveram resultados extremamente próximos, obtendo uma corrente de sensores com níveis de sinais semelhantes. A vantagem do protocolo proposto é ter um consumo menor de energia e uma menor carga de controle na rede.

5.3.2.2 Grupo 2

Neste grupo os cenários de Outdoor Urbano e Outdoor com Linha de Visada são usados para a comparação das técnicas. Os resultados da análise são apresentados a seguir.

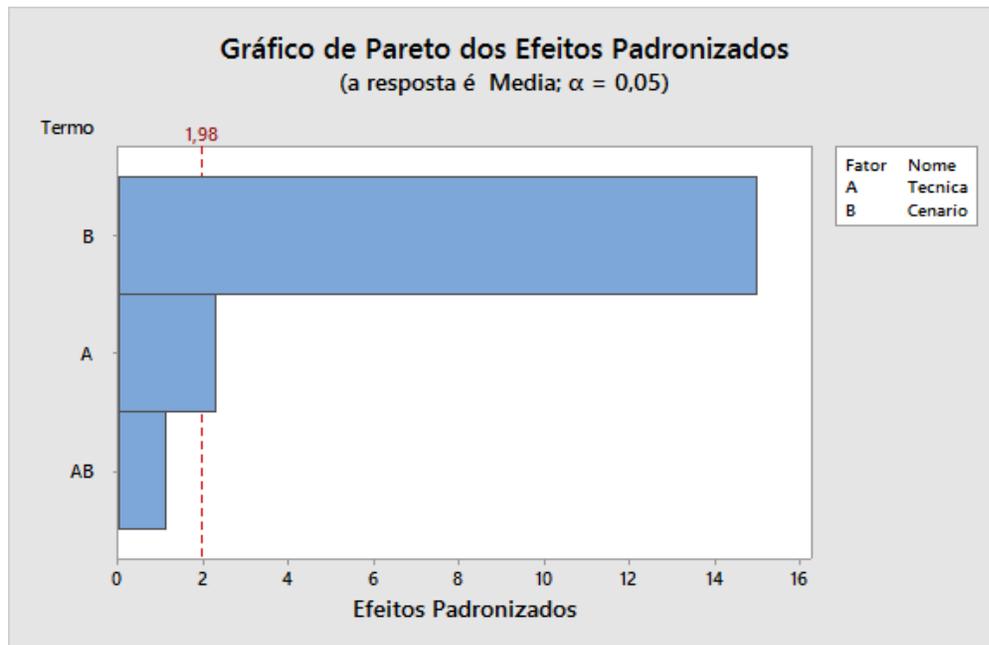


Figura 5.7 – Diagrama de Pareto

O Diagrama de Pareto (Figura 5.7) mostra que o fator que mais influencia no resultado da média dos sinais utilizados, novamente, é o cenário. No gráfico pode-se observar que o Fator A, que são as técnicas utilizadas, tem uma contribuição muito pequena para o resultado, indicando que não é um fator tão significativo para o resultado quanto a mudança do cenário. Isso mostra novamente as técnicas obtiveram resultados próximos, pois a troca da técnica continua não afetando de forma significativa o resultado do experimento, se comparado ao fator Cenário. O gráfico ainda mostra que a interação entre A e B não é significativa para o resultado do experimento.

Esta conclusão é reforçada pelo gráfico de efeitos principais, mostrado na Figura 5.8, onde a reta entre as técnicas está pouco inclinada, enquanto a reta entre os cenários está com uma inclinação muito acentuada, indicando que o cenário influenciou bem mais no experimento do que a técnica.

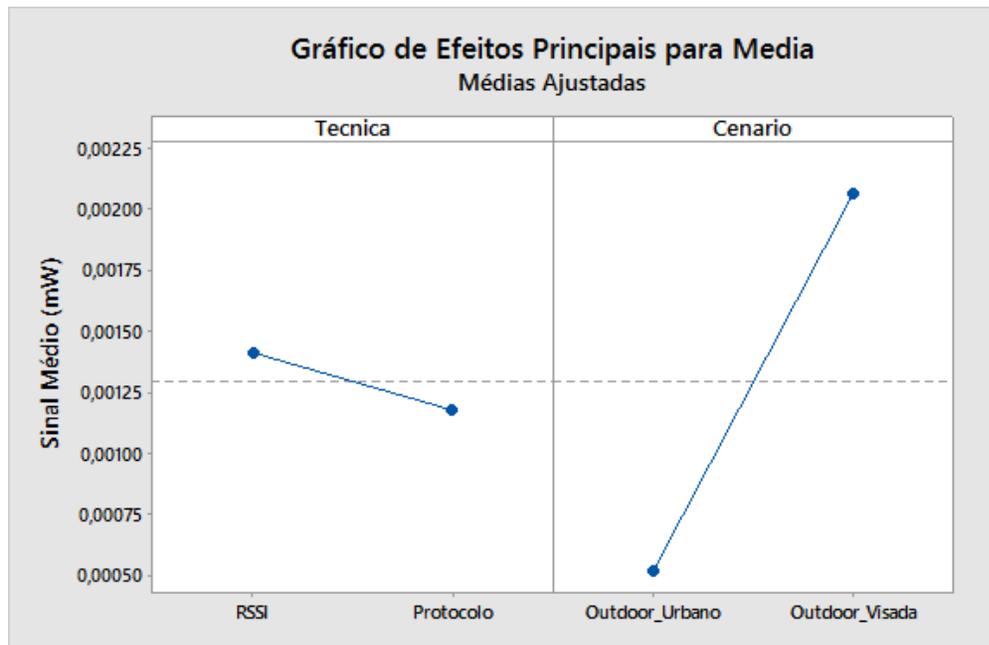


Figura 5.8 - Gráfico de efeitos principais

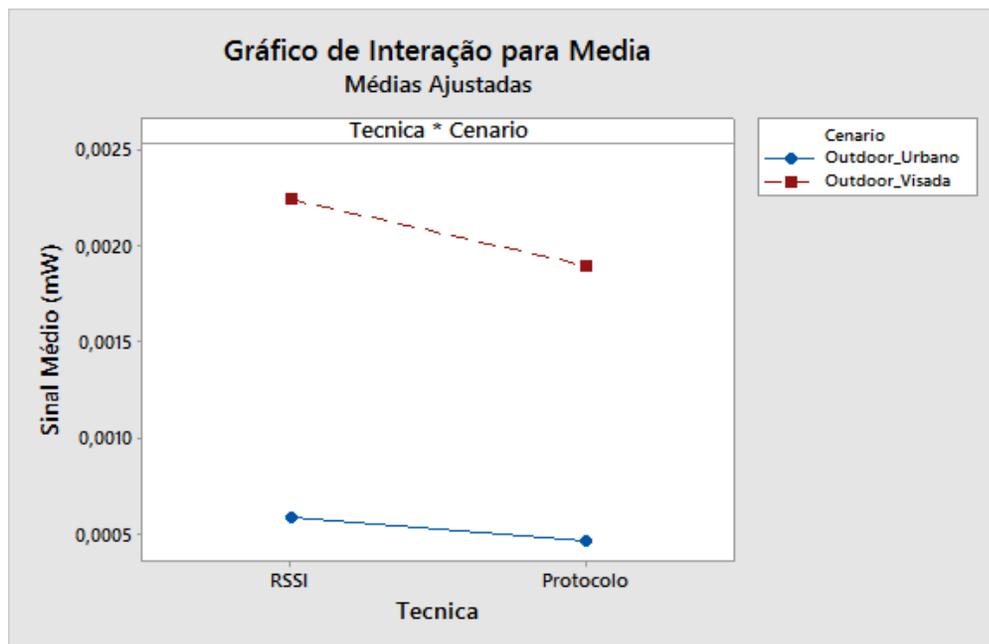


Figura 5.9 - Gráfico de interação entre fatores

No gráfico de interação entre os fatores, apresentado na Figura 5.9, é possível ver que as técnicas possuem retas quase paralelas, pois ao mudar do nível mais baixo para o nível mais alto,

ambas as técnicas possuem valores muito próximos. Isso mostra que elas possuem o mesmo comportamento. Este dado é confirmado ainda pelo Gráfico de Pareto (Figura 5.7).

A Figura 5.10 mostra o gráfico de intervalos de confiança entre cada cenário com a utilização das duas técnicas, sempre trabalhando com um intervalo de confiança de 95%.

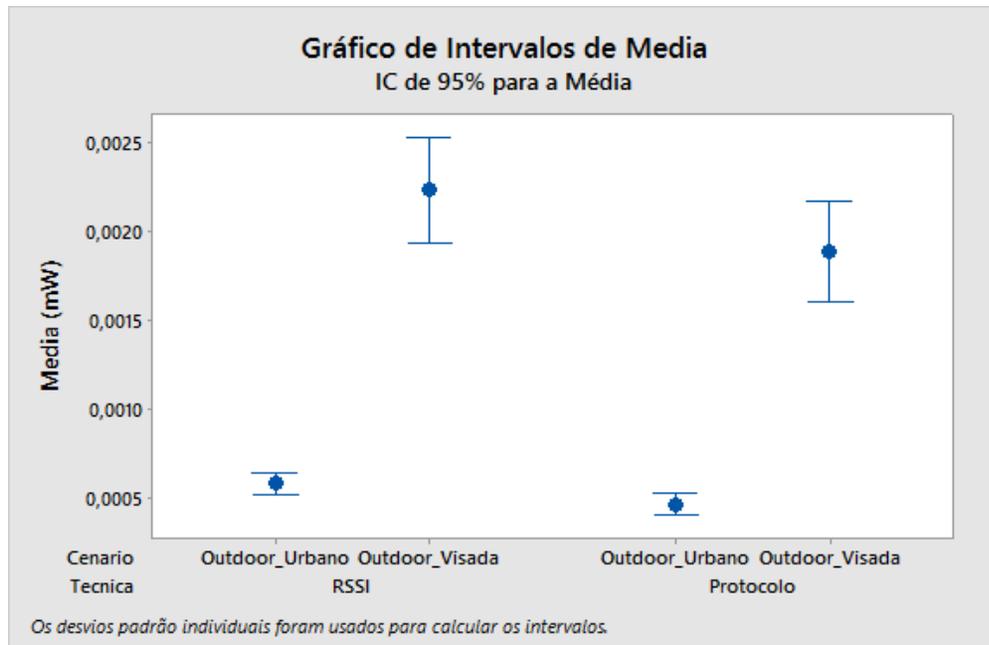


Figura 5.10 - Gráfico de intervalos de confiança

Conclui-se que as técnicas nestes cenários também possuem resultados bem próximos e comportamentos parecidos.

5.3.2.3 Grupo 3

No último grupo, são utilizados os cenários Outdoor com Linha de Visada e Escritório com Divisórias.

O gráfico de Pareto, mostrado na Figura 5.11, mostra que nesta comparação todos os fatores estão abaixo da linha vermelha, que indica a partir de onde os fatores influenciam significativamente no resultado do experimento. Neste caso, o fator Técnica aparece como sendo o fator que

mais influencia no resultado. Este resultado pode ser visto no gráfico de efeitos principais (Figura 5.12), onde a reta é mais acentuada entre as duas técnicas do que entre os dois cenários.

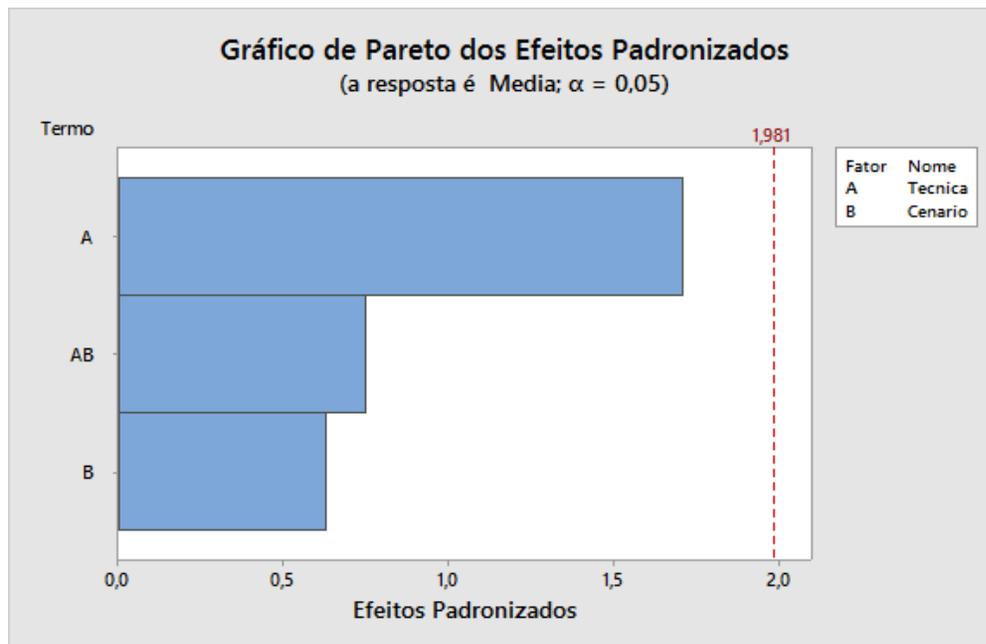


Figura 5.11 - Digrama de Pareto

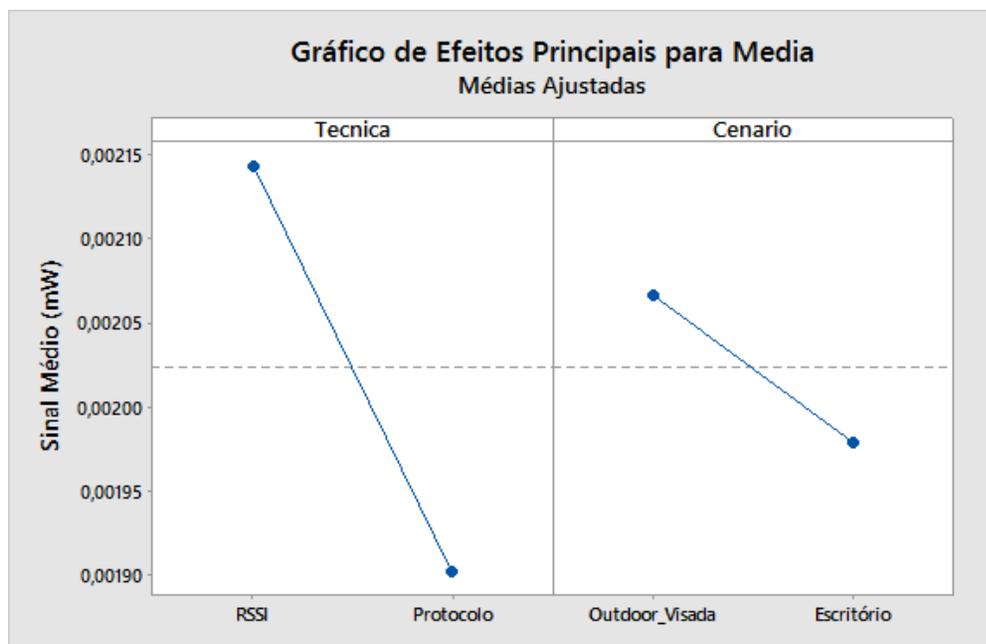


Figura 5.12 - Gráfico de efeitos principais

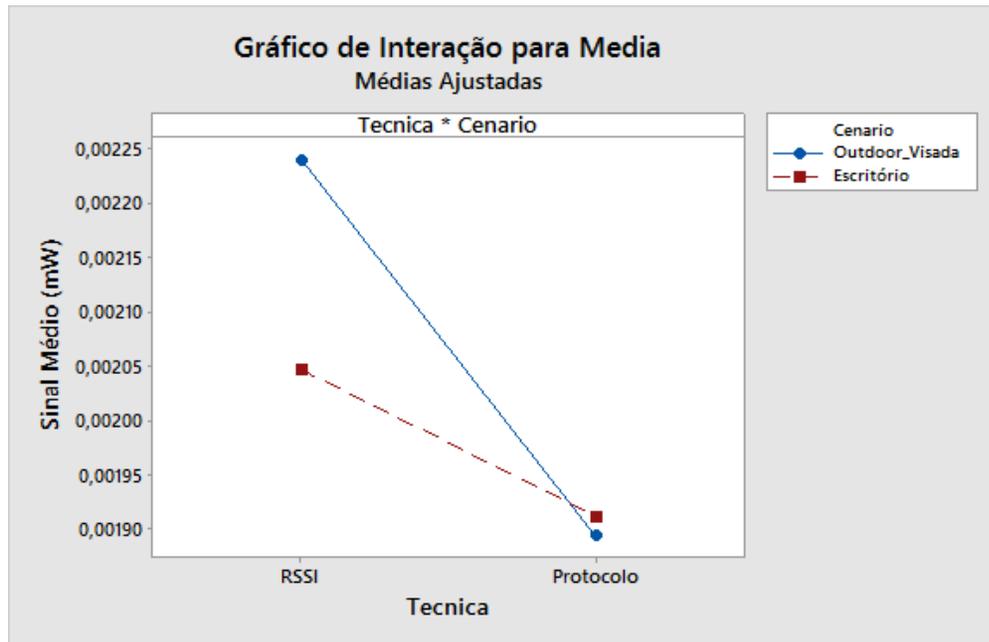


Figura 5.13 - Gráfico de interação entre fatores

No gráfico de interação entre os fatores (Figura 5.13) é possível observar uma interação maior entre as técnicas, pois elas não estão paralelas entre si, tendo uma maior interação nos níveis mais altos de sinal, confirmando o dado mostrado pelo gráfico de Pareto (Figura 5.11), onde a interação entre A e B possui mais influência no experimento do que o Cenário.

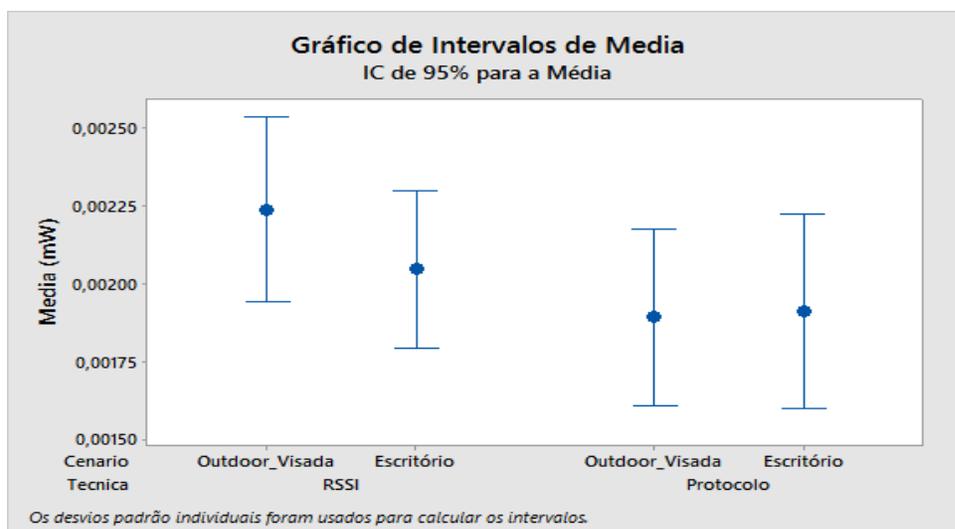


Figura 5.14 - Gráfico de intervalos de confiança

A Figura 5.14 mostra o gráfico de intervalos de confiança.

Apesar dos gráficos mostrarem que a alternância das técnicas usadas interferiram no resultado do experimento, é possível ver que os valores de sinal utilizados, que nos gráficos estão na unidade miliWatts, são muito próximos um do outro. Se forem observados os valores dos gráficos em dBm, o nível mais alto tem o valor de aproximadamente -26,9 dBm e o mais baixo de aproximadamente -27,5 dBm. A diferença entre os valores é muito pequena.

O gráfico de Pareto mostrado na Figura 5.11 representa bem esta situação, pois como foi dito anteriormente, nenhum dos fatores está acima do nível necessário para ser significativo para o resultado do experimento. Esta conclusão e a observação dos valores de sinais utilizados mostram que as técnicas alcançam um resultado muito próximo, como pode também ser observado no gráfico de intervalos de confiança do sinal médio, mostrado na Figura 5.14.

5.3.3 Análise da Alteração da Posição dos Nós Âncoras

Nesta seção é apresentada uma análise de como a alteração do posicionamento dos nós de referência pode influenciar no resultado das rotas do protocolo proposto.

Conforme explicado no Capítulo 4, para cada cenário onde foi simulado o protocolo proposto, foi feita uma alteração no posicionamento dos nós Âncoras. Assim, foram feitas 30 rodadas de simulação com o cenário original e 30 rodadas de simulação com o cenário que tem os âncoras alterados.

A alteração dos nós âncoras pode ser vista no capítulo 4, onde são mostradas as alterações para cada cenário.

Para esta etapa os grupos foram definidos conforme é mostrado na Tabela 5.9. Os cenários são mantidos, mas as Técnicas (Níveis) neste caso são definidas como:

- O protocolo proposto;
- O protocolo proposto com a posição dos nós âncora alterados.

Tabela 5.9 - Grupos para Análise da Alteração de Posição dos Âncoras

Grupos	Cenários (Fatores)	Técnicas (Níveis)	Métrica
Grupo 1	Escritório Divisórias/Outdoor Urbano	Protocolo/Alt. Âncoras	Média dos Sinais
Grupo 2	Outdoor Urbano/Outdoor Visada Livre	Protocolo/Alt. Âncoras	Média dos Sinais
Grupo 3	Outdoor Visada Livre/Escritório Divisórias	Protocolo/Alt. Âncoras	Média dos Sinais

5.3.3.1 Grupo 1

Nesta seção são mostrados os gráficos resultantes dos resultados obtidos nos cenários descritos na Tabela 5.9, definidos como Grupo 1.

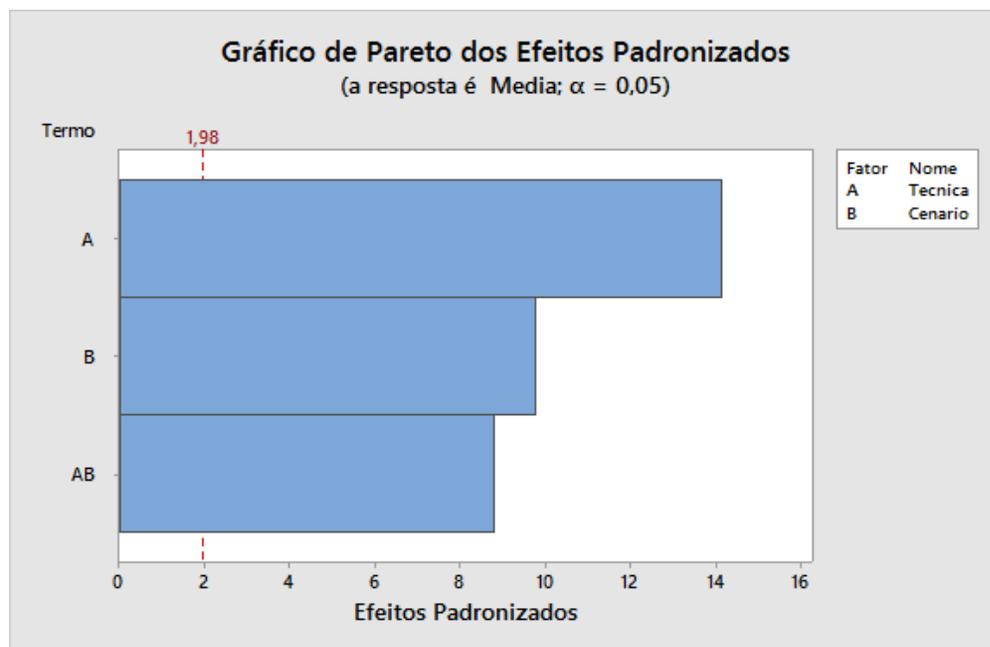


Figura 5.15 – Diagrama de Pareto

No diagrama de Pareto, mostrado na Figura 5.15 é possível observar que o fator Técnica foi o que mais influenciou no resultado do experimento, mostrando que a alteração dos nós âncoras fez com que o comportamento do protocolo mudasse, interferindo no resultado do experimento. Essa afirmação pode ser confirmada ao se analisar o gráfico de efeitos principais (Figura 5.16),

onde é mostrado que o fator Técnica tem uma variação maior do que o fator Cenário, indicando que a alternância da Técnica influenciou mais o resultado do que a mudança de Cenário.

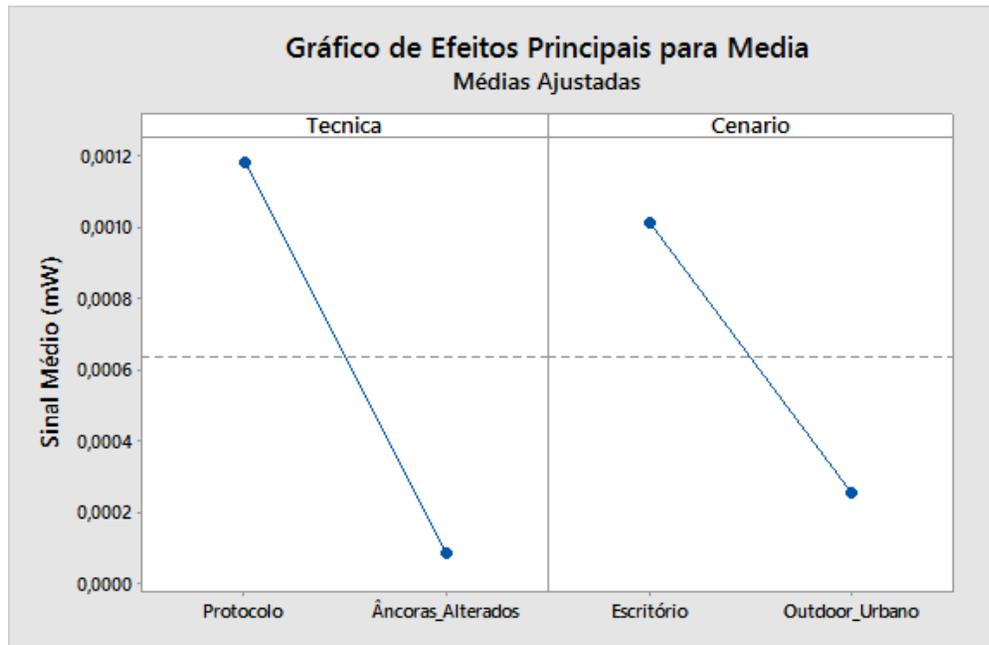


Figura 5.16 - Gráfico de efeitos principais

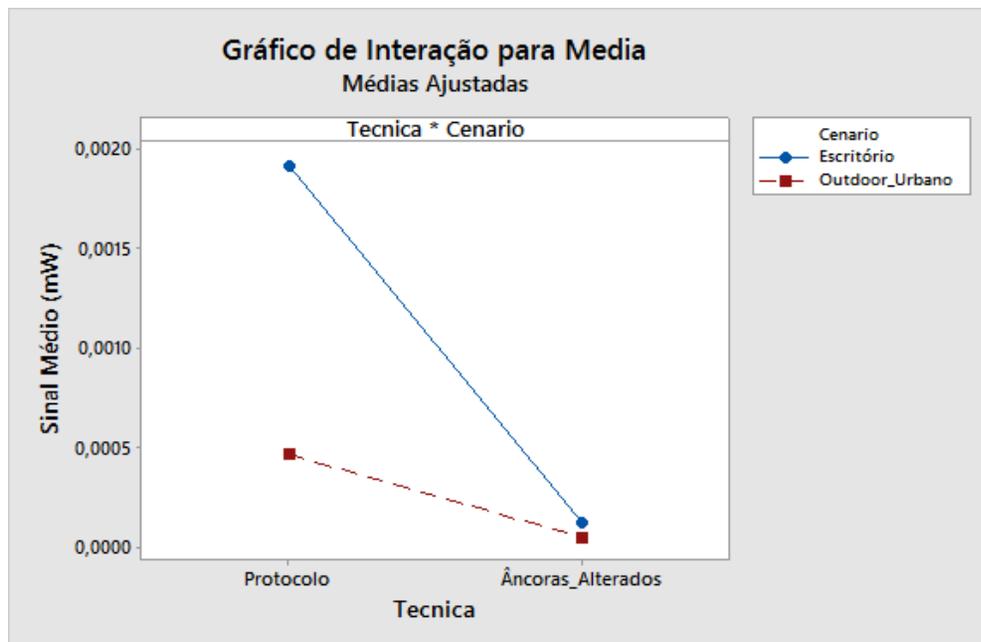


Figura 5.17 - Gráfico de interação entre fatores

No gráfico de interação entre os fatores, apresentado na Figura 5.17, nota-se que as retas do fator Técnica não são paralelas, indicando que há uma forte interação entre elas, ou seja, o comportamento das duas é diferente. Isso pode ser visto no diagrama de Pareto (Figura 5.15), onde a interação entre os fatores A e B também é significativa para o resultado do experimento.

Na Figura 5.18 é apresentado o gráfico de intervalos de confiança para as médias dos sinais utilizados na corrente, onde fica claro que as médias são muito diferentes ao se usar o protocolo proposto com os nós âncoras na borda da rede e com os nós âncoras dispostos aleatoriamente.

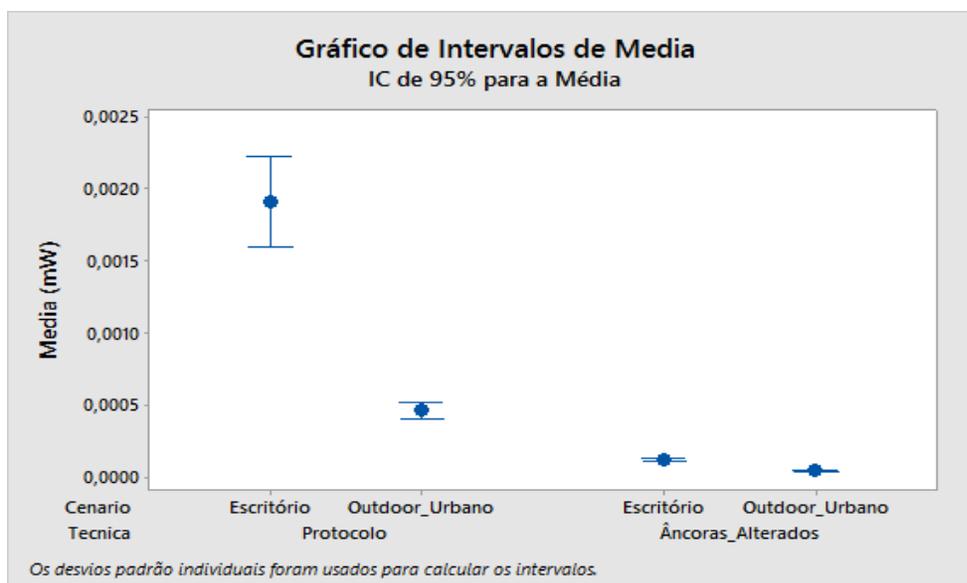


Figura 5.18 - Gráfico de intervalos de confiança

Esta análise mostra que, neste cenário, a alteração dos âncoras influenciou negativamente na escolha da rota, pois como vemos nos gráficos, os sinais são bem mais baixos.

5.3.3.2 Grupo 2

Os resultados obtidos com os dados do segundo grupo são mostrados a seguir.

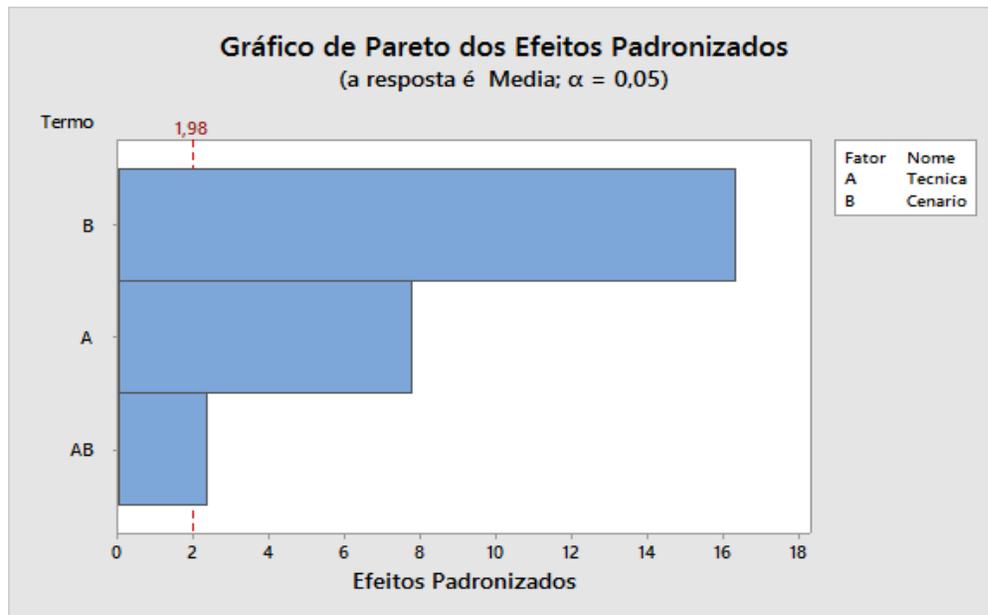


Figura 5.19 - Diagrama de Pareto

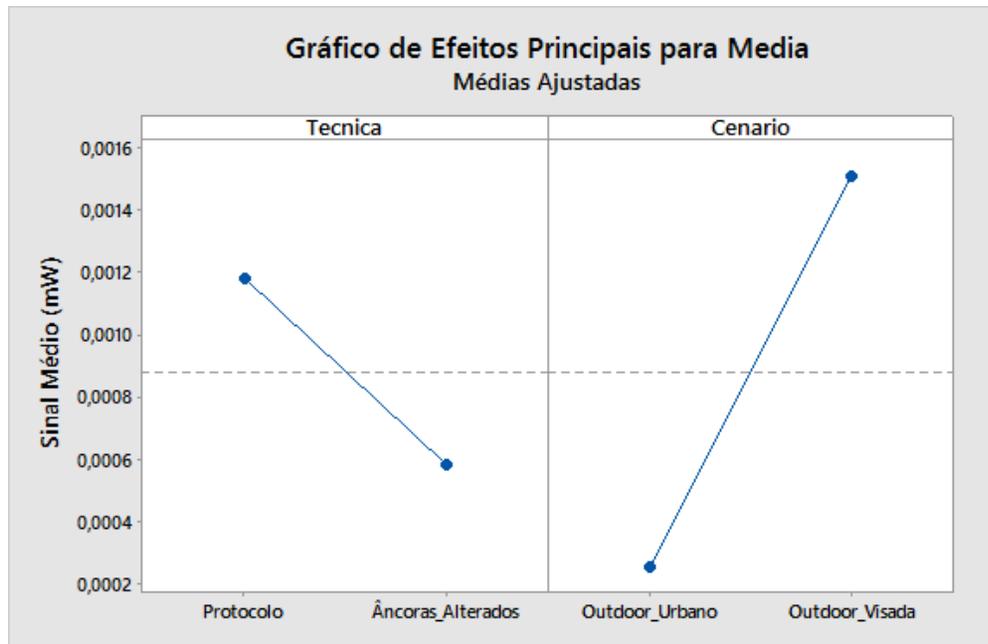


Figura 5.20 - Gráfico de efeitos principais

Ao se analisar o diagrama de Pareto (Figura 5.19) e o gráfico de efeitos principais (Figura 5.20), é possível verificar que o fator que mais influenciou no resultado deste experimento é o

cenário. O gráfico de interação entre os fatores (Figura 5.21) mostra um comportamento parecido entre as duas técnicas, pois as retas são quase paralelas.

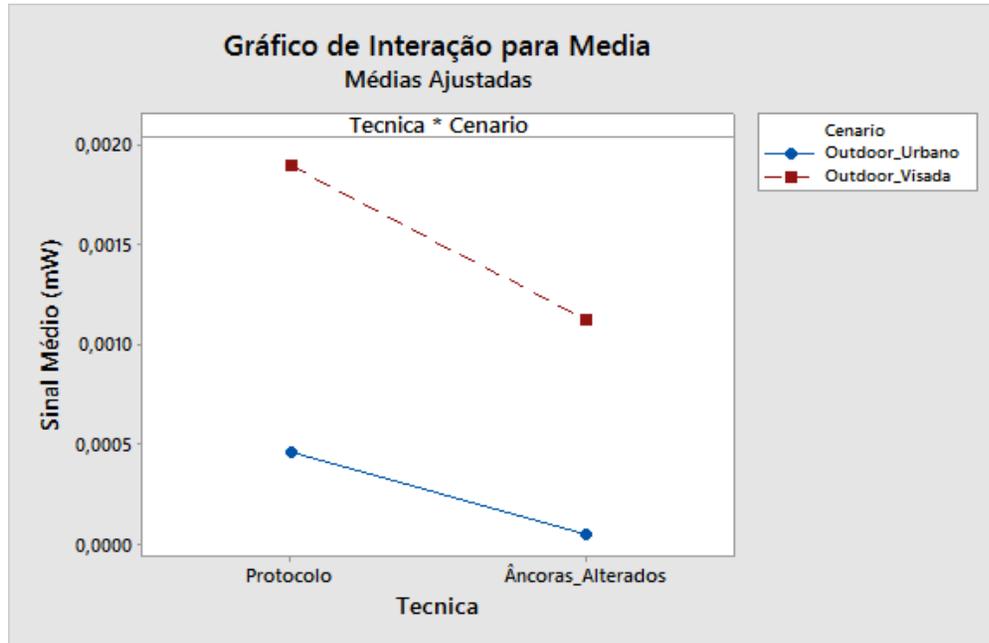


Figura 5.21 - Gráfico de interação entre fatores

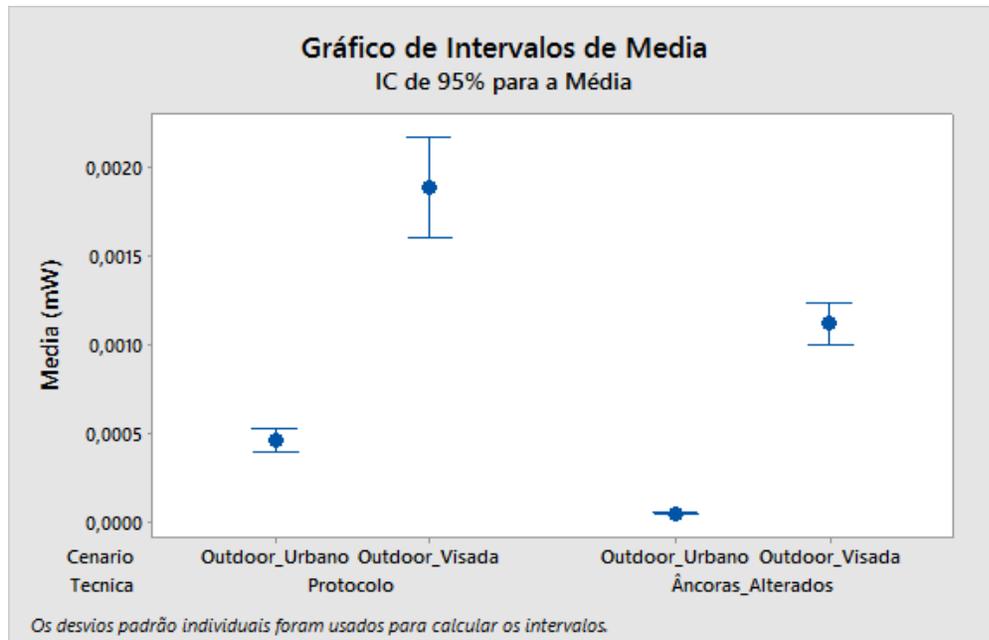


Figura 5.22 - Gráficos de intervalos de confiança

Entretanto, fica claro no gráfico de intervalos de confiança, mostrado na Figura 5.22, a diferença entre a média dos níveis de sinal utilizados entre as duas técnicas, sendo o nível de sinal mais alto no protocolo proposto com os nós âncoras nas bordas da rede.

Os gráficos mostram um comportamento semelhante das duas técnicas neste cenário, mas com níveis de sinal bem mais baixos quando se altera a posição dos nós âncoras, distribuindo-os aleatoriamente.

5.3.3.3 Grupo 3

Aqui são apresentados os gráficos para a análise do último grupo, onde se analisa os cenários Outdoor com Visada Livre e Escritório com Divisórias. Este é o último grupo a ser analisado para verificar a influência do posicionamento dos nós âncoras no protocolo de roteamento proposto neste trabalho.

Estas análises irão nortear o planejamento para posicionamento dos nós âncoras quando usado o protocolo proposto, sendo indicado sempre o uso dos nós âncoras nas bordas da rede.

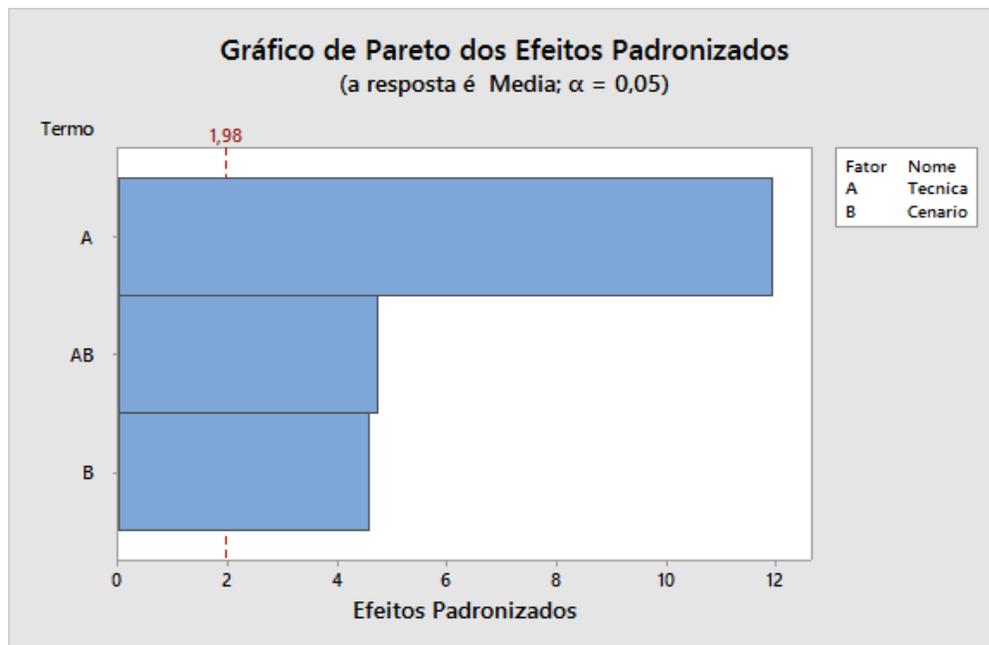


Figura 5.23 – Diagrama de Pareto

O diagrama de Pareto, apresentado na Figura 5.23, mostra que o fator Técnica foi o que mais teve influência no resultado do experimento, seguido pela interação entre os fatores A e B e depois pelo Fator B, que é o cenário. Essa afirmação é confirmada ao se observar o gráfico de efeitos principais (Figura 5.24), onde o fator Técnica tem uma variação maior do que o fator Cenário, indicando que a alternância do posicionamento dos âncoras influenciou mais no resultado do que a mudança de Cenário.

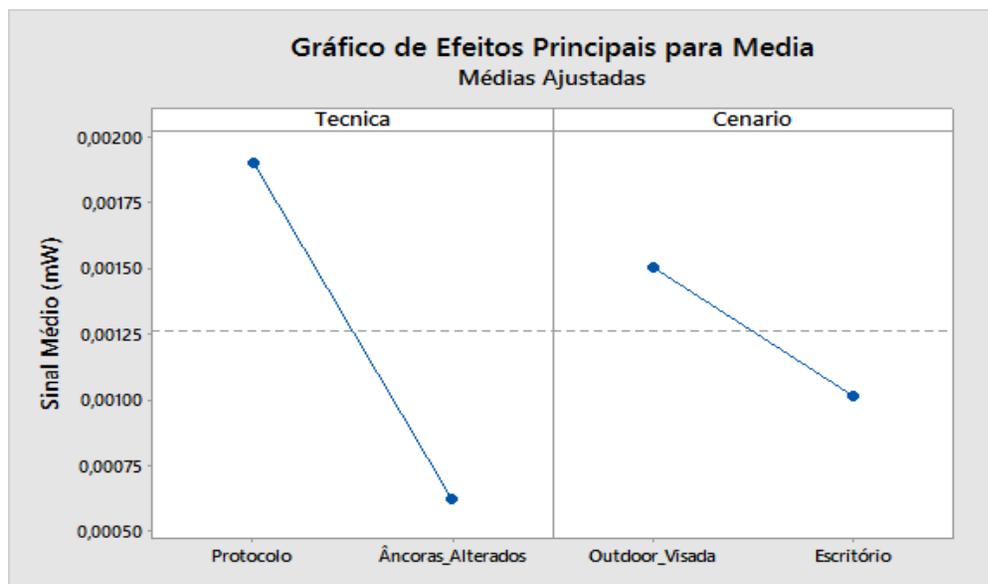


Figura 5.24 - Gráfico de efeitos principais

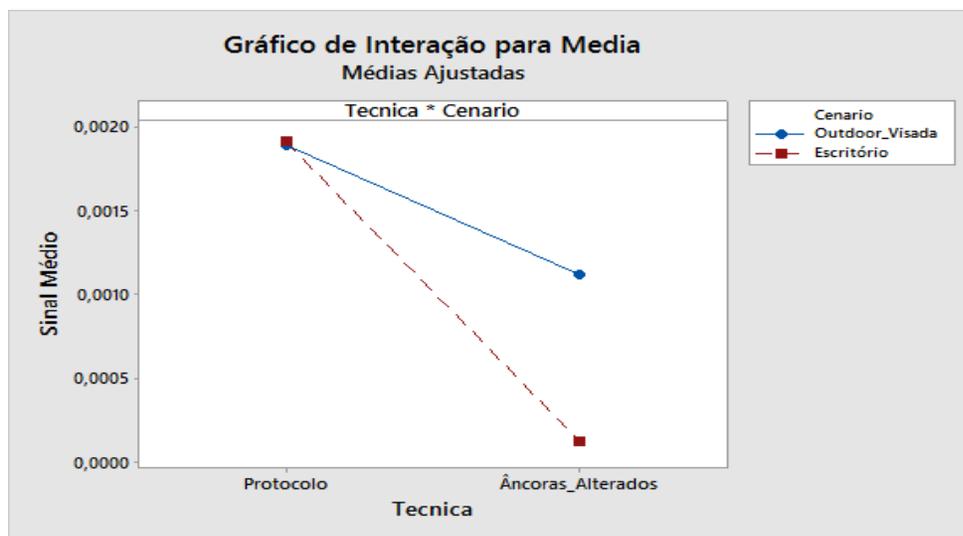


Figura 5.25 - Gráfico de interação entre fatores

No gráfico de interação entre os fatores, mostrado na Figura 5.25, observa-se que as retas do fator Técnica não são paralelas, indicando que o comportamento das duas é diferente, confirmando o que o diagrama de Pareto (Figura 5.23) mostra. A Figura 5.26 apresenta o gráfico de intervalos de confiança para as médias dos sinais utilizados, onde fica claro que as médias são muito diferentes ao se alternar as técnicas.

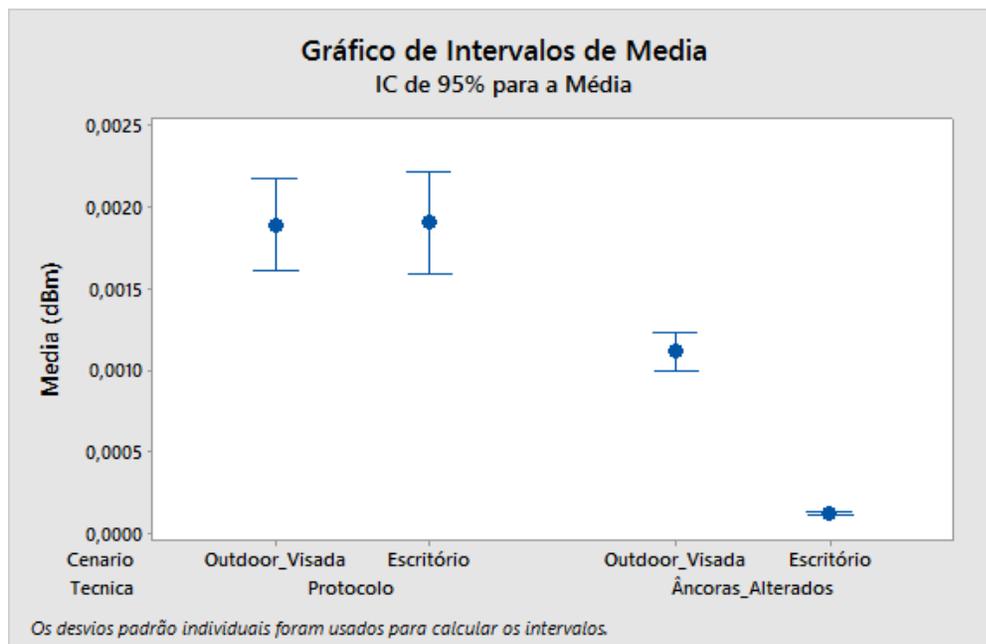


Figura 5.26 - Gráfico de intervalos de confiança

Esta análise mostra que, neste cenário, a alteração dos âncoras também influenciou negativamente na escolha da rota, pois como se vê nos gráficos, os sinais médios são menores quando se muda a posição dos nós âncoras, tirando-os da borda da rede.

5.4 ANÁLISE DOS EXPERIMENTOS

5.4.1 Cenário 1

Relembrando, no primeiro cenário foi montada uma rede pequena, com apenas um sensor que teve sua posição calculada.

Neste cenário a característica mais importante é o fato dos sensores estarem na mesma altura e com linha de visada entre eles. Estas características podem fazer com que as leituras de RSSI não sofram muitas alterações, podendo fazer com que as estimativas de distância sejam mais próximas das distâncias reais e, conseqüentemente, o cálculo de posição seja mais eficaz.

De acordo com o resultado apresentado na Tabela 4.9, pode-se notar que o cálculo da posição do sensor 2 chegou muito próximo da posição física. Isso mostra que em ambientes favoráveis ao canal de comunicação, a relação entre distância e RSSI é mais próxima da ideal, como citado no parágrafo anterior.

Este resultado do experimento realizado vai ao encontro com a análise do resultado do terceiro cenário simulado, onde o ambiente era um ambiente outdoor com linha de visada entre os sensores.

A análise feita no terceiro cenário simulado provou que quando os valores de RSSI não são muito afetados pelos fenômenos que atuam sobre o sinal, as estimativas de distância ficam mais próximas da distância real, fazendo com que as posições sejam calculadas com mais exatidão. Esta característica foi observada neste cenário real.

O objetivo deste cenário com rede menor era mostrar que é possível que em um ambiente favorável ao canal de comunicação o algoritmo de localização funcione com uma boa precisão. Para o protocolo de roteamento proposto este fato faz com que as correntes de sensores geradas sejam mais próximas das correntes geradas usando apenas os valores de RSSI entre os enlaces, a um menor custo para a rede.

5.4.2 Cenário 2

No segundo cenário, o ambiente de testes usado faz com que existam vários obstáculos entre os sensores, o que torna a comunicação mais vulnerável a fenômenos de degradação de sinal.

No primeiro teste realizado, é medida a RSSI entre todos os possíveis enlaces de comunicação, semelhante com o que ocorre com protocolos de roteamento que usam essas medidas para se adaptar as condições do canal, como o D-RCPDS [10]. Esta metodologia foi usada também nas simulações.

As Tabelas 4.10 e 4.11 mostram os resultados coletados no experimento.

Usando estes valores para criar a melhor corrente de sensores, chegou-se a uma configuração de rota, que é mostrada na Tabela 5.10, juntamente com os valores médios de RSSI entre os sensores.

Tabela 5.10 - Corrente gerada usando valores de RSSI (Médias)

RSSI (dBm)	-41	-42,07	-40,05	-40,05	-54,24	-44,5	-43,47	-53,07
Origem -> Destino	0 -> 1	1 -> 2	2 -> 8	8 -> 7	7 -> 5	5 -> 4	4 -> 3	3 -> 6

O maior sinal usado na corrente é -40,5 dBm, o menor é -54,24 dBm e a média dos valores médios usados é -44,8 dBm.

No segundo teste realizado no cenário, o protocolo proposto entra em funcionamento. Primeiramente, é calculada a posição dos sensores 5, 6, 7 e 8 usando os valores de RSSI colhidos.

Analisando a Tabela 4.12, onde é mostrado um exemplo de posição estimada em relação a posição real, podemos ver que as posições estimadas são afetadas pelos obstáculos, pois ao interferir nos valores de RSSI, acabam interferindo na estimativa de distância entre os sensores e os âncoras, acarretando na imprecisão dos resultados da multilateração, como já foi mencionado anteriormente. A ideia do protocolo é justamente esta, por isso nenhuma medida é tomada para melhorar a acurácia do algoritmo de localização. O objetivo é avaliar se usando um algoritmo de localização baseado em RSSI podemos obter uma rota com bons níveis de sinal entre os enlaces.

Na Tabela 5.11 é exibida a configuração da corrente de sensores formada pelo protocolo proposto, juntamente com os valores médios de RSSI entre os sensores.

Tabela 5.11 - Corrente gerada pelo protocolo proposto (médias)

RSSI (dBm)	-41	-42,07	-50	-54,24	-48,9	-44,69	-52,88	-43,07
Origem -> Destino	0 -> 1	1 -> 2	2 -> 7	7 -> 5	5 -> 8	8 -> 6	6 -> 3	3 -> 4

O maior sinal é -41 dBm, o menor é -54,24 dBm e o a média dos valores médios dos sinais é -47,15 dBm.

Comparando as duas correntes formadas, pode-se ver que elas não iguais. Entretanto, nota-se que os melhores e piores valores de sinal entre os enlaces são bem próximos nas duas configurações. O valor médio dos sinais utilizados tem uma diferença de aproximadamente 2,35 dB.

Pode-se notar que ambas as configurações de corrente podem ser válidas, pois ao observar a Tabela 4.10 verifica-se que existem valores muito baixos de sinal entre determinados sensores, mas nenhum destes enlaces foi considerado.

Com este cenário foi verificado um comportamento do protocolo semelhante ao que aconteceu nas simulações. Isto confirma o fato de que o protocolo proposto pode ser uma solução para a RSSF se adaptar ao meio, com um menor custo para a rede.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho trata da proposta de um protocolo de roteamento geográfico, utilizando algoritmo de localização baseado em RSSI. O protocolo proposto foi avaliado por meio de simulação e de testes de uma implementação em uma plataforma real.

O protocolo proposto foi comparado com uma técnica baseada em monitoramento de RSSI, usada em protocolos existentes na literatura, com o intuito de averiguar se o protocolo proposto se adaptar às condições do canal de comunicação e à topologia da rede.

Com os testes e simulações em ambientes livres de obstáculos, é possível verificar que o protocolo proposto pode obter os mesmos resultados que a técnica de monitoramento de valores de RSSI.

Foi apresentado um estudo de *overhead*, onde ficou mostrado que o protocolo proposto neste trabalho utiliza menos mensagens de controle na rede. Além disso, a quantidade de mensagens de controle na rede cresce em uma proporção bem menor do que a técnica usada para comparação, mantendo a escalabilidade da rede.

Nos testes e simulações em ambientes com obstáculos, os resultados demonstram que a estratégia proposta criou uma configuração de corrente de sensores válida, com bons níveis de sinal entre os enlaces, adaptando a rota da RSSF às características do ambiente.

Com os resultados apresentados pode-se concluir que o protocolo proposto é uma opção para a solução de roteamento em redes de sensores sem fio, que busca se adaptar ao ambiente de funcionamento da rede preocupando-se com a escalabilidade e o consumo de energia da RSSF.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros é possível pensar na implementação de um controle de potência para o protocolo proposto, visando obter uma maior economia de energia.

Além disso, a continuação do trabalho prevê testes usando métricas como taxa de entrega de pacotes, taxa de erros e influência dos protocolos de acesso ao meio no protocolo de roteamento.

Outra etapa para o prosseguimento da pesquisa é a implementação de uma rede de sensores que utilize o protocolo proposto em um ambiente real, com uma aplicação bem definida de coleta de dados, durante um período de tempo elevado. Com isso será possível averiguar seu funcionamento e observar lacunas que poderão ser exploradas futuramente.

REFERÊNCIAS

- [1] A. A. F., Nogueira, J. M. S., Ruiz, L. B., de Freitas Mini, R. A., Nakamura, E. F., and Figueiredo Loureiro, "Redes de sensores sem fio," in *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, 2003, pp. 179, 226.
- [2] Holger. WLLIG, Andreas KARL, *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*.: John Wiley & Sons, 2005.
- [3] (2013, Junho) www.z-wave.com. [Online]. www.z-wave.com
- [4] Jianping et al SONG, "WirelessHart: Applying Wireless Technology in Real-Time Industrial Process Control," in *IEEE Real- Time end Embedded Technology and Applications Symposium*, Austin, 2008.
- [5] Mauricio Hennig, Protocolo de Roteamento Para Redes de Sensores sem Fio Baseado em Políticas, 2013, Dissertação de Mestrado PUC-PR.
- [6] Andrew Tanenbaum, *Computer Networks*, 4th ed.: CAMPUS, 2003.
- [7] S., Raghavendra, C., and Sivalingam, K. M. Lindsey, "Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, pp. 924 - 935, 2002.
- [8] W. R., Chandrakasan, A., and Balakrishnan, H. Heinzelman, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," in *Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences*, Maui, 2000.
- [9] Akimitsu Kanzaki, Takahiro Hara, Shojiro Nishio Yasuhiro Nose, "Route Construction Based on Measured Characteristics of Radio Propagation in Wireless Sensor Networks," in *International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, 2009.
- [10] Takahiro Hara, Shojiro Nishio Akimitsu Kanzaki, "A Dynamic Route Construction Method Based on Measured Characteristics of Radio Propagation in Wireless Sensor Networks," in *International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, 2011.
- [11] K. Langendoen and N. Reijers, "Distributed localization in wireless sensor networks: a quantitative comparison," *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, Special issue: Wireless sensor networks*, pp. 499-518, Novembro 2003.
- [12] Dragos, Niculescu and Badri Nath, "Ad Hoc Positioning System (APS) Using AOA," in *IEEE INFOCOM*, 2003.

- [13] H.A.B.F. Oliveira, *Um algoritmo Recursivo de Localização para Redes de Sensores Sem Fio*. Belo Horizonte, Brasil: UFMG, 2005.
- [14] ChihChieh Han and Mani B. Strivastava Andreas Savvides, "Dynamic Fine-Grained Localization in AdHoc Networks of Sensors," in *ACM SIGMOBILE*, Roma, 2001.
- [15] M. D. Yacoub, *Foundations of Mobile Radio Engineering*, 1st ed.: CRC Press, 1993.
- [16] C. D WHITEHOUSE, The design of calamari: an ad-hoc localization system for sensor networks, 2002, Master Tesis - University Of California At Berkeley, Berkeley.
- [17] N. PATWARI et al., "Locating the nodes - cooperative localization in wireless sensor networks," *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 54-69, 2005.
- [18] Theodore S. RAPPAPORT, *Wireless Communications Principles and Practice*, 2nd ed.: Prentice Hall, 2002.
- [19] O. Bischoff, R. Laur, and S. Paul X. Wang, "Localization in Wireless Ad-hoc Sensor Networks using Multilateration with RSSI for Logistic Applications," *Procedia Chemistry*, vol. i, no. 1, pp. 461-464, Setembro 2009.
- [20] Philip L. Frana and Thomas J. Misa, "An interview with Edsger W. Dijkstra," *Magazine Communications of the ACM*, vol. 53, pp. 41-47, Agosto 2010.
- [21] www.scilab.org. [Online]. www.scilab.org
- [22] (2013, Julho) www.radiuino.cc. [Online]. www.radiuino.cc
- [23] www.python.org. [Online]. www.python.org
- [24] Rodrigo Marinho Passos, Gerenciamento Dinâmico de Energia em Redes De Sensores Sem Fio: Uma Abordagem Orientada à Aplicação, 2005, Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais.
- [25] Texas Instruments. [Online]. <http://www.ti.com/ww/br/>
- [26] R. K. JAIN, The art of computer systems performance analysis: Techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling, 1991.
- [27] Rafael Barbosa Moreira, Análise de Técnicas de Localização em Redes de Sensores sem Fio, 2007, Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas.
- [28] www.minitab.com. [Online]. www.minitab.com

- [29] F. Florio, F. De Rango, and S. Marano E. Cassano, "A performance comparison between ROC-RSSI and trilateration localization techniques for WPAN sensor networks in a real outdoor testbed," in *Wireless Telecommunications Symposium*, 2009, pp. 1-8.