

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FRANCESCO TUBIELLO NETO

TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO DE ENERGIA PARA RSSF

Porto Alegre
2015

FRANCESCO TUBIELLO NETO

TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO DE ENERGIA PARA RSSF

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação da Faculdade em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

Área de concentração: Sinais, Sistemas e Tecnologia da Informação.

Linha de Pesquisa: Sistemas de Computação.

Orientadora: Profa. Dra. Letícia Maria Bolzani Poehls

Co-orientadora: Dra. Thais C. Webber dos Santos

Porto Alegre

2015



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO DE ENERGIA PARA RSSF

CANDIDATO: FRANCESCO TUBIELLO NETO

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.




DRA. LETÍCIA MARIA BOLZANI POEHLIS - ORIENTADORA



DRA. THAIS CHRISTINA WEBBER DOS SANTOS - CO-ORIENTADORA

BANCA EXAMINADORA



DR. CÉSAR AUGUSTO MISSIO MARCON - FACIN - FACULDADE DE INFORMÁTICA - PUCRS



DR. FABIAN LUIS VARGAS - PPGEE - FENG - PUCRS

PUCRS

Campus Central

Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 30 - Sala 103 - CEP: 90619-900

Telefone: (51) 3320.3540 - Fax: (51) 3320.3625

E-mail: engenharia.pg.eletrica@pucrs.br

www.pucrs.br/feng

AGRADECIMENTOS

À minha família, pela dedicação e pelo incentivo de todos os dias. Sem o apoio, o carinho e a paciência de todos vocês neste período do mestrado, o caminho até aqui teria sido mais difícil. Muito obrigado!

À minha mulher Jaqueline, pelo amor, amizade eterna e companheirismo de anos.

À Profa. Dra. Letícia Maria Bolzani Poehls, pela oportunidade de realizar este projeto de pesquisa em que muito aprendi, pelo apoio e orientação sábia, e pela compreensão e paciência nos momentos difíceis.

À Profa. Dra. Thais C. Webber dos Santos, pela paciência neste projeto de pesquisa, pelo apoio e orientação.

Aos professores e colaboradores da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica que, de alguma forma, puderam contribuir neste trabalho.

Ao Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, pelo suporte ao aluno e a qualidade de ensino indiscutível.

*"Everything should be
as simple as it is, but not simpler"*

Albert Einstein

RESUMO

Sistemas baseados em Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) são tradicionalmente utilizados para monitorar eventos em áreas onde o acesso é limitado. Uma RSSF é formada por um conjunto de dispositivos chamados de nodos sensores, os quais têm a missão de transportar os dados monitorados para um determinado destino e executar as tarefas programadas para cumprir com os objetivos do sistema proposto. Técnicas que visam minimizar o consumo de energia de RSSF ou até mesmo de apenas um nodo sensor vêm sendo objeto de várias pesquisas, uma vez que a energia representa um dos desafios relacionados ao uso de RSSF. A maximização da vida útil da rede pode ser obtida a partir de uma melhor gestão dos pacotes de dados ou até mesmo a partir da redução da potência de transmissão adotada, por exemplo. Note que essa maximização é limitada no momento em que se observa um aumento da taxa de erros em função da interferência que, por sua vez, afeta a transmissão dos pacotes de dados entre a origem e o destino, bem como em função do próprio atraso do processamento no nodo sensor. Neste contexto, o presente trabalho propõe uma técnica capaz de modificar individualmente o comportamento de cada nodo sensor a partir da análise dos pacotes de dados e da energia consumida por um determinado caminho de transmissão *Path Energy Control Technique* (PECT). Em mais detalhes, a técnica baseia-se no ajuste da potência de transmissão a partir da análise do *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) e de uma métrica de qualidade que será atribuída ao caminho que os dados trafegam na rede entre os nodos. Essa métrica é calculada a partir da eficiência da recepção dos pacotes, da perturbação no caminho dos dados e da frequência de envio dos pacotes de dados em função do número de nodos sensores da vizinhança. Convém mencionar que a PECT foi representada por um algoritmo a ser desenvolvido, e poderá ser implementada no nível de aplicação, o que, por sua vez, garante a portabilidade e o uso independente do hardware que está sendo utilizado para a RSSF. Além disso, a PECT é capaz de gerenciar a frequência de envio de dados e de suportar diferentes topologias de redes, incluindo as topologias de multipath. Finalmente, a técnica será validada através de simulações, e os resultados obtidos na avaliação da eficiência e da robustez da mesma, serão analisados e comparados com outras técnicas presentes na literatura.

Palavras-chave: RSSF. Consumo. RSSI. Nodo.

ABSTRACT

Wireless Sensors Network (WSN) based systems, are traditionally used to monitor events in places with limited human access. A WSN is formed by a group of devices called sensors node, each responsible for transporting monitored data to a certain destination and performing other programmed tasks in order to comply with further objectives of the proposed system. Since power consumption is one of the main challenges associated to the use of WSNs, techniques to minimize such energy consumption of a complete WSN or even in one sensor node, have been object of extended research. Maximizing the lifetime of the network can be obtained throughout better data package management or by reducing the adopted transmission power, for example. It is important to note that this optimization is limited by the process delay of the sensor node itself, as well as by interference causing an increased error rate, which itself affects the data packet transmission between source and destination. In this context, this work proposes a technique able to stimulate individually tailored behavioral changes regarding the data packets analysis and the consumption energy through certain transmission path in each sensor node. It called *Path Energy Control Technique* (PECT). In more details, the PECT is based on the adjustment of the power transmission from on the analysis of the *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) and a quality metric is assigned to paths, where the data packets flow between nodes. This metric is calculate from the efficiency in the data packet's reception, from the disturbance in the path, as well as the data packet sending frequency due the number of sensors nodes for the specific neighborhood. It should be mention the PECT technique will be represented by a algorithm to be development in this work which will be implemented at application level, guarantying portability, independent from the hardware used for the WSN. In addition, the PECT is able to manage the data transmission frequency and to support different network topologies, including multipath topologies. Finally, the PECT technique is validated through simulations and the results were obtained from the evaluation of the efficiency. The techniques' robustness is analyzed and compared with other techniques from literature.

Keywords: WSN. Consumption. RSSI. Node.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo aplicação militar no controle de movimentação de tropas	23
Figura 2 - Topologia estrela	28
Figura 3 - Topologia ponto a ponto	29
Figura 4 - Topologia em árvore	30
Figura 5 - Topologia mesh	30
Figura 6 - Rede full mesh	31
Figura 7 - Rede partial mesh.....	31
Figura 8 - Exemplo rede mesh.....	33
Figura 9 - Exemplo trivial de descoberta de rota	33
Figura 10 - Exemplo de rota reversa	34
Figura 11 - Tecnologia de redes sem fio	42
Figura 12 - Arquitetura IEEE 802.15.4	43
Figura 13 - Modo de transmissão DSSS.....	46
Figura 14 - Estrutura do super frame utilizado pelo padrão IEEE 802.15.4	49
Figura 15 - Algoritmo slotted CSMA/CA- IEEE 802.15.4.....	51
Figura 16 - Exemplo de composição de um nodo sensor	57
Figura 17 - Transmissão de pacote de dados	61
Figura 18 - Eficiência da rede.....	63
Figura 19 - Limite de tráfego pacotes dados (LTPD).....	64
Figura 20 - Área de eficiência	65
Figura 21 - Área de eficiência frequência < 1Pkt/s	66
Figura 22 - Área de eficiência frequência > 1Pkt/s	67
Figura 23 - Perturbação na Transmissão	70
Figura 24 - Ptx a 0 dBm	71
Figura 25 - Ptx a -5 dBm	71
Figura 26 - Ptx a -10 dBm	71
Figura 27 - Ptx a -15 dBm	71
Figura 28 - Ptx a -25 dBm	71
Figura 29 - Consumo na transmissão com 11 nodos	73
Figura 30 - Consumo na transmissão com 8 nodos	73
Figura 31 - Consumo na transmissão com 6 nodos	73
Figura 32 - Consumo na transmissão com 5 nodos	73
Figura 33 - Consumo na transmissão com 4 nodos	73

Figura 34 - Consumo na transmissão com 3 nodos	73
Figura 35 - Consumo de energia na transmissão	73
Figura 36 - Variação do consumo de energia	75
Figura 37 - Exemplo transmissão de pacotes de dados	77
Figura 38 - Fluxograma do algoritmo	83
Figura 39 - Fluxograma sugerido do nodo sensor	84
Figura 40 - Castalia nodo sensor com PECT.....	88
Figura 41 - Implementação da técnica.....	88
Figura 42 - Resultado do Castalia 1/2	89
Figura 43 - Lista de eventos do Castalia - Trace	89
Figura 44 - Diagrama do algoritmo de validação implementado	91
Figura 45 - Diagrama de blocos o conversor de potências.....	93
Figura 46 - Chamada do algoritmo no programa	94
Figura 47 - Área de eficiência	95
Figura 48 - Chamada do algoritmo $c/FPkt = 0,1$	96
Figura 49 - Área de eficiência	96
Figura 50 - Resultado conversor dBmtoW.....	97
Figura 51 - Consumo de energia.....	98
Figura 52 - Resultado da equação P_{tx0} no algoritmo.....	100
Figura 53 - Resultado do algoritmo	101
Figura 54 - Função gera RSSI	102
Figura 55 - Fluxograma de verificação da PECT	103
Figura 56 - Potência saída da PECT com 11 nodos sensores.....	103
Figura 57 - Potência saída da PECT com 6 nodos sensores.....	104
Figura 58 - Disposição dos nodos sensores	106
Figura 59 - Simulação com 11 nodos	107
Figura 60 - Simulação com 8 nodos	107
Figura 61 - Simulação com 6 nodos	107
Figura 62 - Simulação com 5 nodos	107
Figura 63 - Simulação com 4 nodos	107
Figura 64 - Simulação com 3 nodos	107
Figura 65 - setPower do arquivo omnetpp.ini	108
Figura 66 - Eficiência no recebimento dos pacotes de dados.....	110
Figura 67 - Consumo com 11 nodos.....	111
Figura 68 - Consumo com 8 nodos.....	111

Figura 69 - Consumo com 6 nodos.....	111
Figura 70 - Consumo com 5 nodos.....	111
Figura 71 - Consumo com 4 nodos.....	111
Figura 72 - Consumo com 3 nodos.....	111
Figura 73 - Consumo de energia na transmissão.....	114
Figura 74 - Consumo de energia na transmissão por nodo sensor	115
Figura 75 - Resultado de simulação 0dBm e FPkt = 1	117
Figura 76 - Resultado de simulação 0dBm e FPkt = 10.....	118
Figura 77 - TPSO Estudo de caso adotado	123
Figura 78 - Metodologia do ATPC.....	125
Figura 79 - Técnica de controle do I-TPC.....	126
Figura 80 - Arquivo Omnetpp.ini [General].....	139
Figura 81 - Típico desvanecimento temporal em wireless	140
Figura 82 - Omnetpp.ini ZigBeeMAC - GTSon - GTSoff	141
Figura 83 - Omnetpp.ini - noTemporal, oneNodeVaryPower, oneNodeVaryTxNum, oneNodeVaryRate	142
Figura 84 - Omnetpp.ini - setRate, setPower, allNodesVaryPower, ReTxNum	143
Figura 85 - Execução da simulação com as diretivas de simulação	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixas de frequência e taxa de transmissão de dados.....	44
Tabela 2 - Páginas das faixas de operação IEEE 802.15.4.....	45
Tabela 3 - Funcionalidades dos dispositivos FFD e RFD	47
Tabela 4 - Aplicações / Sistemas	52
Tabela 5 - Consumo de energia na transmissão	72
Tabela 6 - Potência de transmissão x potência de consumo.....	74
Tabela 7 - Distância - Path loss	49
Tabela 8 - Sinal excedente do receptor (visto do nodo 0)	80
Tabela 9 - Quantidade de pacotes recebidos com ACK.....	81
Tabela 10 - Quantidade de pacotes transmitidos	81
Tabela 11 - Sinal excedente do receptor (visto pelo nodo0)	82
Tabela 12 - Experimento com 5 nodos.....	86
Tabela 13 - Resultado teste da Eficiência FPkt > 1	95
Tabela 14 - Resultado teste da Eficiência FPkt = 0,1	96
Tabela 15 - Conversão dBm para mW CC2420.....	97
Tabela 16 - Resultado da equação QPth.....	99
Tabela 17 - Potência de transmissão versus sinal excedente 11 nodos	104
Tabela 18 - Potência de transmissão versus sinal excedente 6 nodos	104
Tabela 19 - Média de recebimento de pacotes de dados por frequência	108
Tabela 20 - Média de recebimento de pacotes de dados por Nodo	109
Tabela 21 - Consumo de energia na transmissão	111
Tabela 22 - Modelo de consumo do Mica2	113
Tabela 23 - Consumo médio de energia por nodo.....	114
Tabela 24 - Consumo de energia na transmissão + CPU + Eficiência.....	117
Tabela 25 - Consumo de energia na transmissão + PECT em Joules FPkt=1Pkt/s.....	121
Tabela 26 - Eficiência (%) - Desempenho sob condições severas	126

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACK	Acknowledgement
AODV	Ad-Hoc On Demand Distance Vector
ATPC	Adaptive Transmission Power Control for Wireless Sensor Networks
BER	Bit Error Rate
BI	Beacon Interval
BO	Beacon Order
BP	Backoff Period
BTR	Broadcast Transaction Record
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CAP	Contention Access Period
CCA	Clear Channel Assessment
CFP	Contention Free Period
CI	Circuito Integrado
Cons	Consumo
CPU	Unidade Central de Processamento
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CW	Contention Window
dBm	Decibel miliwatt
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
Ef	Eficiência
PECT	Path Energy Control Technique
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FFD	Full Function Device
FPkt	Frequência de Pacotes de dados
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
I-TPC	Interference-aware Transmission Power Control for WSN
LR-WPAN	Low-Rate Wireless Personal Area Network
LQI	Level Quality Indicator
LTPD	Limite de Trafego Pacotes de Dados
MAC	Media Access Control
mJ	Mili Joules

mW	Mili Watt
NB	Number of Backoff
NIB	Network Information Base
OSI	Open Systems Interconnection
PAN	Personal Area Network
PER	Packet Error Rate
PHY	Physical Layer
PRR	Packet Reception Rate
Ptb	Perturbação da Rede
Ptx	Potência de Transmissão
Qn	Quantidade de Nodos
QoS	Quality Of System
Qpth	Qualidade do Path
RF	Rádio Frequência
RFC	Request For Comments
RFD	Reduced Function Device
RSS	Received Signal Strength
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SD	Superframe Duration
TPSO	A Transmission Power Self-Optimization Technique for WSN
UDP	User Datagram Protocol
WIMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Network
WWAN	Wireless Wide Area Network
ZTC	ZigBee Trust Center

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO	19
1.2 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 REDES DE SENSORES SEM FIO	22
2.2 TOLERÂNCIA A FALHAS	24
2.3 COMUNICAÇÃO DE NODOS SENSORES	25
2.4 FLUXO DE DADOS	26
2.5 TOPOLOGIAS	28
2.6 ESCALABILIDADE	35
2.7 ARQUITETURA	35
2.8 ROTEAMENTO	36
2.9 PADRÃO IEEE 802.15	41
2.10 PADRÃO IEEE 802.15.4	43
2.10.1 Camada Física	44
2.10.2 Camada MAC	47
2.10.2.1 Tipo de Nodo Sensor	47
2.10.2.2 Características do MAC	47
2.10.3 Camada de Aplicação	52
2.10.4 Rotas no Padrão IEEE 802.15.4	53
2.10.5 Custo do Roteamento	54
2.10.6 Indicador de Qualidade do Link	55
2.11 NODO SENSOR	57
2.11.1 Unidade de Energia	58
2.11.2 Unidade de Comunicação	58
2.11.3 Unidade de Computação	59
2.11.4 Unidade de Sensoriamento	60
2.12 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	60
3 PROPOSTA	61
3.1 ESPECIFICAÇÃO	61
3.2 TRÁFEGO DA REDE	62
3.3 EFICIÊNCIA	62

3.4 PERTURBAÇÃO.....	70
3.5 CONSUMO DE ENERGIA	72
3.6 QUALIDADE DO CAMINHO.....	76
3.7 ENERGIA E OS PACOTES DE DADOS	78
3.7.1 Potência do Transmissor	78
3.7.2 Sensibilidade do Receptor	78
3.7.3 Path Loss	78
3.7.4 Perda do Sinal entre Nodos Sensores.....	79
3.7.5 Estudo da Transmissão dos Pacotes de Dados.....	80
3.7.6 Ajuste da Potência de Transmissão	82
3.8 O ALGORITMO	83
4 IMPLEMENTAÇÃO	86
4.1 IMPLEMENTAÇÃO DA PECT	86
4.2 RESULTADOS E RELATÓRIOS	88
4.3 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	90
5 VALIDAÇÃO	91
5.1 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO.....	91
5.1.1 Conversor de Potência	92
5.1.2 Cálculo da Potência de Saída.....	93
5.2 VERIFICAÇÃO DO ALGORITMO	93
5.2.1 Verificação da eficiência da técnica	94
5.2.2 Verificação do conversor de potência	97
5.2.3 Verificação da Equação Q_{Pth}	98
5.2.4 Verificação da Equação P_{tx0}.....	99
5.2.5 Validação do Algoritmo	100
5.3 VALIDAÇÃO DA PECT	102
5.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	104
6 AVALIAÇÃO	105
6.1 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO	105
6.2 ESTUDO DA CASO DA PECT	105
6.3 CÁLCULO DA POTÊNCIA COM A PECT	107
6.4 EFICIÊNCIA DA REDE PROPOSTA COM A PECT	108
6.5 CONSUMO DE ENERGIA COM A PECT	111
6.6 ANÁLISE DE DESEMPENHO PECT	116

6.6.1 Análise de Desempenho no LTPD	118
6.6.2 Análise de Desempenho do Consumo de Energia	119
6.7 ANÁLISE DA PECT COM OUTROS ALGORITMOS	123
6.7.1 Técnica TPSO	123
6.7.2 Técnica ATPC	124
6.7.3 Técnica I-TPC	125
6.8 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	127
7 CONCLUSÃO	128
REFERÊNCIAS	131
APÊNDICE A - SIMULADOR CASTALIA	138
APÊNDICE B - CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL DA SIMULAÇÃO	139
APÊNDICE C - SIMULAÇÃO NO CASTALIA	145

1 INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia na área de sensores, circuitos integrados (CIs) e de comunicação sem fio, tem possibilitado o estudo de fenômenos ambientais com maior qualidade. Circuitos leves e pequenos em tamanho podem instrumentar e enviar informações de um determinado evento monitorado, de forma a proteger, por exemplo, uma população de catástrofes naturais (HART; MARTINEZ, 2006).

Instrumentar sinais físico-químicos através de dispositivos é o conjunto de técnicas que possibilita a obtenção de informações sobre determinados alvos (objetos, áreas, fenômenos). Uma forma comum que permite a troca de informações de um ponto a outro se baseia no uso de ondas eletromagnéticas, mais conhecidas como ondas de rádio. Esta tecnologia do envio de dados sem o contato físico entre os nodos é considerada emergente, e recebe há alguns anos uma atenção especial pela comunidade científica devido à potencialidade da troca de informações, com alta eficiência energética, mesmo em condições hostis. Portanto, espera-se que uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF), do inglês *Wireless Sensor Network* (WSN), possibilite o monitoramento de um determinado fenômeno associado a um determinado ambiente (AKYILDIZ *et al.*, 2001). De fato, esta área tem atraído um volume de investimentos significativos, os quais têm apresentado uma grande aplicabilidade.

De acordo com BBC Research (2014), o mercado global de dispositivos de sensores sem fio atingiu perto de 1,2 bilhões de dólares em 2013. A expectativa deste mercado é que o mesmo cresça para 1,5 bilhões de dólares em 2014 e 4,3 bilhões de dólares até 2019, com a *Compound Annual Growth Rate* (CAGR), taxa anual de crescimento de 23,7% entre os anos de 2014 a 2019.

Dentro do escopo de RSSF, as entidades internacionais que estabelecem as definições dos padrões e normas são *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), *International Society of Automation* (ISA), *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) e *Internet Engineering Task Force* (IETF), além de associações que definiram protocolos como a *ZigBee Alliance*.

Em relação ao uso desse tipo de dispositivos, normalmente os mesmos são posicionados em áreas de difícil acesso ou inóspitas, tais como em regiões próximas ao mar para prevenção de tsunamis, em vulcões para medição sísmica, em florestas para prevenção de incêndios, em áreas industriais, etc. (HART; MARTINEZ, 2006; TILAK; ABU-GHAZALEH; HEINZELMAN, 2002). O protocolo IEEE 802.15.4 revolucionou as RSSF,

padronizando, de certa forma, o comportamento dos dispositivos nodos sensores para que a troca da informação tenha confiabilidade e baixo consumo de energia.

Uma RSSF é formada por um conjunto de nodos sensores, os quais se comunicam entre si através de um protocolo de comunicação. Em RSSF de baixa potência, o desafio para levar as informações ao destino final é maior que nas redes tradicionais (AL-KARAKI; KAMAL, 2004). Os protocolos de roteamento devem ser capazes de suportar a alta quantidade de nodos sensores na mesma rede. Além disso, devem prever a possibilidade de falha de nodos sensores ativos durante uma operação na rede, devido, por exemplo, à falta de energia, travamento do hardware, ou até por fatores ambientais. Um protocolo robusto não deve interromper a transmissão normal dos dados mesmo em condições severas (AKKAYA; YOUNIS, 2005; CHEN; VARSHNEY, 2004).

O nodo sensor é um sistema autônomo e tem a função de passar informações para uma rede com um objetivo predeterminado (HART; MARTINEZ, 2006). Os nodos sensores de uma RSSF possuem recursos limitados, tais como a capacidade de processamento, a quantidade disponível de memória e a reserva de energia. Sistemas desse tipo geralmente usam baterias como fonte principal de energia. A bateria é fator importante e determinante na vida útil do nodo sensor, tendo importante consideração em projetos desse tipo. Em áreas de difícil acesso, a substituição de baterias e a reativação de nodos sensores defeituosos são consideradas atividades difíceis e até mesmo impossíveis de serem realizadas (HART; MARTINEZ, 2006). Além disso, muitas vezes as informações devem percorrer caminhos através de vários nodos sensores até chegar ao destino final. Uma perda de um nodo em uma RSSF poderia enfraquecer a operação na rede e afetar o tempo de vida útil das baterias. Protocolos com roteamento eficientes baseados em energia têm sido objeto de várias pesquisas recentemente. O descobrimento de novos caminhos pode ser utilizado em uma rede para providenciar a melhor condição do envio dos dados. Além disso, cada nodo sensor poderá eleger um caminho preferencial e um caminho alternativo para caso de falhas (LOU; LIU; ZHANG, 2006). Portanto, restrição de energia, capacidade computacional limitada, baixa capacidade de memória, alcance do sistema de comunicação limitado e ainda a deterioração do sinal por interferências, introduzem desafios na pesquisa de protocolos mais eficazes para garantir a entrega da informação (WOO; TONG; CULLER, 2003; ZAMALLOA; KRISHNAMACHARI, 2007).

Existem alguns trabalhos que relacionam potência de transmissão e o consumo de energia da rede. O trabalho de Lavratti *et al.* (2011), por exemplo, modifica a potência do transmissor baseando-se em uma métrica de eficiência associada aos pacotes de dados.

O *Adaptative Transmission Power Control* (ATPC) (LIN S. *et al.*, 2006) é baseado em observações experimentais obtidas de forma empírica. É um algoritmo que, através da qualidade do *link*, modifica a potência do transmissor para atingir um ponto ótimo de consumo de energia.

Já o *Interference Aware Transmission Power Control* (I-TPC) (KIMY J. *at al.*, 2008) agrega ao algoritmo mecanismos para suportar interferências externas devido aos vários tipos de dispositivos transmitindo na frequência de 2.4 GHz.

Um aspecto importante em uma RSSF diz respeito ao consumo de energia e à quantidade de informações que a rede transporta. Em uma RSSF com alto fluxo de informações, as perdas em interferências e retransmissões de pacotes de dados passam a ter importância no consumo de energia.

Devido às circunstâncias das restrições de um nodo sensor, principalmente quanto à quantidade de energia para a propagação das informações, faz-se necessário propor técnicas capazes de prolongar a vida útil desses dispositivos. Nota-se que trabalhos relacionados têm os mesmos propósitos da técnica a ser apresentada, ou seja, também visam em reduzir o consumo de energia através do uso de parâmetros da RSSF.

Neste contexto, esta Dissertação de Mestrado propõe o desenvolvimento de uma técnica capaz de modificar o comportamento da transmissão dos pacotes de dados em cada nodo sensor de uma RSSF. A técnica receberá o nome de *Path Energy Control Technique* (PECT). A PECT baseia-se na modificação individual do nível da potência de transmissão (P_{tx}), de cada caminho nodos a nodo da RSSF, por meio da realimentação de valores resultantes da informação do sinal do receptor RSSI, recebido dos nodos sensores vizinhos.

Além disso, para garantir um baixo nível de perturbação (P_{tb}) e a alta eficiência (E_f) no envio dos dados entre os nodos sensores, será utilizada uma métrica de qualidade do caminho (Q_{pth}) de transmissão dos pacotes de dados entre a origem e o destino.

Assim, este trabalho prevê a implementação, validação e avaliação de um algoritmo. Em mais detalhes, a PECT utiliza diferentes potências de transmissão para cada ligação nodo a nodo de forma a garantir uma menor interferência na rede. Através do ajuste da frequência de envio dos pacotes de dados (FPkt), será possível melhorar o desempenho do fluxo de dados entre os nodos sensores da rede.

Espera-se, desta forma, diminuir o consumo de energia, evitando assim, retransmissões desnecessárias de pacotes de dados. Nota-se que a técnica proposta é capaz de gerenciar a frequência do envio de dados, em função da quantidade de nodos sensores vizinhos e de suportar diversas topologias de redes, incluindo as topologias *mesh*. O algoritmo

associado à técnica será implementado em nível de aplicação, o que, por sua vez, garante a portabilidade e o uso independente do hardware que está sendo utilizado na RSSF.

1.1 OBJETIVO

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver uma solução baseada em software para reduzir o consumo de energia de uma RSSF, independente da topologia de rede adotada, através de uma técnica que combina o controle da potência de transmissão com a qualidade do fluxo dos pacotes de dados. A validação e avaliação da PECT serão feitas através do uso de um simulador e de um algoritmo auxiliar implementados em nível de aplicação. O algoritmo da PECT utilizará como parâmetros de entrada variáveis da memória dos nodos, e a saída as potências de transmissão ajustadas para cada nodo da RSSF. Convém mencionar que na fase de avaliação da técnica será possível observar o espectro do consumo de energia dos nodos sensores, especificamente na fase da transmissão dos pacotes de dados com a variação da potência do transmissor.

Assim sendo, os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Um estudo das referências bibliográficas que relacionam recursos como a potência de transmissão, o consumo de energia e as diversas interferências na transmissão de dados em RSSF;
2. Estudo dos simuladores de RSSF a fim de definir o simulador que será utilizado como ferramenta para desenvolvimento, validação e avaliação deste trabalho;
3. Especificação da PECT e a representação como algoritmo;
4. A implementação de uma RSSF, utilizando o simulador definido;
5. Validação da técnica enviando pacotes de dados através da rede com topologia *many-to-one* e os ajustes necessários dos parâmetros dos nodos, potência, taxa de envio de pacotes, etc., para garantir a qualidade no envio de pacotes pelo *link*. A variação da potência, frequência de envio dos pacotes e da quantidade de nodos lavam ao conhecimento das potências relacionadas com as interferências e das possíveis retransmissões. E, por fim, a comparação dos resultados de forma a validar a técnica como um todo;
6. Implementação do algoritmo de otimização de energia da rede combinando a variação da potência do transmissor com a taxa de envio dos dados e o número de *links*;
7. Avaliação da PECT, discutindo os resultados obtidos.

1.2 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

Este trabalho está organizado em capítulos dispostos da forma como segue:

1. Capítulo 2: descreve brevemente a fundamentação teórica de RSSF, as topologias mais usadas, o padrão IEEE 802.15.4 e o nodo sensor;
2. Capítulo 3: apresenta detalhadamente a proposta da PECT, os parâmetros de entrada e saída, e a representação através do algoritmo. Mostra como a técnica visa minimizar a energia consumida nos caminhos da rede através de parâmetros dos nodos sensores em nível da aplicação do usuário;
3. Capítulo 4: o capítulo apresenta um passo a passo da implementação da PECT. Além disso, existe uma sucinta apresentação do simulador de redes utilizado e alguns resultados adotados para implementar o algoritmo;
4. Capítulo 5: o capítulo descreve em detalhes o processo de validação do algoritmo da PECT, o qual deve estar de acordo com a especificação apresentada no Capítulo 3. Em mais detalhes, o algoritmo foi programado em linguagem C como uma simples função computacional e foi inserido em um trecho de programa que representa uma das etapas de um nodo sensor ,base para a validação da técnica;
5. Capítulo 6: Apresenta a avaliação da PECT, os resultados esperados nos experimentos e uma discussão da técnica. O capítulo descreve a técnica para diminuir o consumo de energia, sob a perspectiva de desempenho e funcionalidade durante as principais etapas de simulação utilizando o simulador de redes. É apresentada uma análise dos métodos utilizados neste trabalho, o desempenho em função do tempo e a energia consumida;
6. Capítulo 7: Apresenta algumas considerações finais e a conclusão da técnica proposta nesta dissertação de mestrado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Ao longo deste capítulo, serão expostos fundamentos da literatura que viabilizam esta proposta. A distribuição foi escolhida de forma a abranger temas relacionados ao nodo sensor e consumo energia, e na sequência tratar de algumas técnicas mais eficientes de consumo de energia da rede, tão logo abordar, de uma forma mais específica, do protocolo IEEE 802.15.4, bem como os métodos utilizados para representar e classificar o mesmo.

De acordo com a distância e a taxa de transferência utilizada na tecnologia da comunicação sem fio, se pode apontar quatro grandes grupos (BONIFÁCIO, 2011):

1. WPAN - *Wireless Personal Area Network*: tecnologias sem fio de pequeno alcance (entre 10 e 100 metros) e baixa taxa de transmissão. É um padrão para redes que interligam dispositivos pessoais ou redes de sensores sem fio, definido pelo IEEE 802.15. Esta área compreende as redes sem fio que utilizam dispositivos como os PDAs, PCs ou periféricos, sendo o campo de tecnologias como o Bluetooth (responsabilidade do subgrupo IEEE 802.15.1) e redes de sensores sem fio (definido pelo IEEE 802.15);
2. WLAN - *Wireless Local Area Network*: tecnologias sem fio destinadas à interligação de redes locais, com alcance entre 100 e 300 metros. Trata-se de padrão implementado como extensão ou alternativa para as redes com cabeamento convencional (par metálico ou fibra óptica);
3. WMAN - *Wireless Metropolitan Area Network*: tecnologias que tratam dos acessos de banda larga para redes em áreas metropolitanas, com alcance em torno de 6 km;
4. WWAN - *Wireless Wide Area Network*: tecnologias voltadas para redes de longa distância em telecomunicações, atendendo aos serviços de voz e alguns serviços de dados.

2.1 REDES DE SENSORES SEM FIO

As RSSFs representam uma solução atrativa devido à rápida evolução de três tecnologias: microeletrônica, comunicação sem fio e micro sistemas eletromecânicos, do inglês *Micro Electro-Mechanical Systems* (MEMS).

Uma RSSF é um sistema formado por um conjunto de nodos sensores, os quais se comunicam entre si. Serve como uma ferramenta para sensoriamento de fenômenos, processamento e disseminação de dados coletados e informações processadas, para um ou mais observadores (HART; MARTINEZ, 2006). Consistem em nodos sensores distribuídos em uma determinada região de interesse, os quais realizam troca de informações.

O nodo sensor é um sistema autônomo e tem a função de passar informações para uma rede com um objetivo predeterminado (HART; MARTINEZ, 2006). Cada nodo da rede pode estar equipado com até mais de um tipo de sensor, tais como acústicos, sísmicos, infravermelho, de nível, de posição, de temperatura, etc. (TILAK; ABU-GHAZALEH; HEINZELMAN, 2002). O tempo de operação é calculado para um determinado período de vida de cada nodo sensor, dependendo da aplicação que o sistema está exposto. Por exemplo, um nodo sensor para monitorar atividade vulcânica deve durar anos, pois o local é inóspito, de difícil acesso e é muito difícil substituir as baterias próximo de um vulcão. Além disto, a substituição de baterias em nodos sensores sem fio não deve ser uma prática frequente, por se perder uma das principais vantagens característica das redes sem fio.

Uma RSSF é caracterizada da seguinte forma (TILAK; ABU-GHAZALEH; HEINZELMAN, 2002):

1. **Nodo Sensor:** é quem faz a análise do fenômeno que está sendo instrumentado. Possui internamente um processador, um circuito de rádio para comunicação, memória e bateria. Através da leitura (medida) do fenômeno, repassa a informação para o observador;
2. **Fenômeno:** é o objeto de estudo do observador, é o que está sendo instrumentado pela rede sensorial;
3. **Observador:** é o usuário final que precisa estudar e obter respostas sobre o fenômeno.

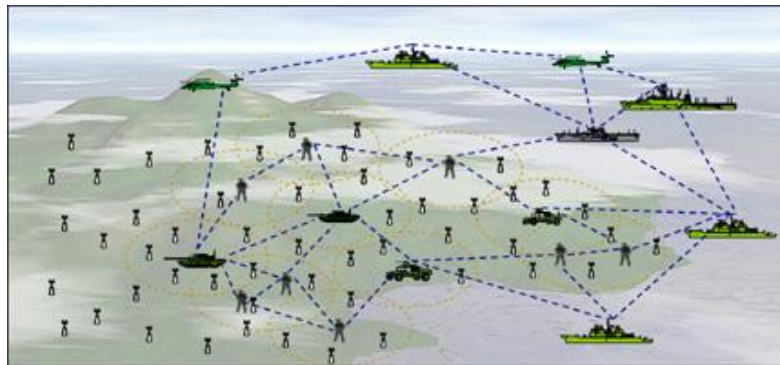
Alguns aspectos práticos e teóricos de RSSF com fins militares foram relatados por Winkler *et al.* (2008). Os autores comentam sobre as aplicações de redes sem fio, com ênfase

na segurança e monitoramento de áreas militares. O objetivo é explorar os requerimentos militares em uma determinada área e identificar novas pesquisas com fins de aprimorar o uso da técnica de RSSF para segurança militar.

Um exemplo de RSSF *ad hoc* aplicada para uso militar é tipicamente para monitorar o posicionamento e a comunicação de um grupo avançado em uma operação de ataque.

Através de nodos sensores, a rede transporta as informações entre os componentes do destacamento militar. Desta forma, é possível ser ágil e reorganizar as tropas de forma mais segura diante de um ataque iminente.

Figura 1 - Exemplo aplicação militar no controle de movimentação de tropas



Fonte: Electrical & Computer Engineering (2014).

Abaixo, estão descritas algumas áreas onde é possível utilizar RSSF para auxiliar no monitoramento de determinados eventos.

1. Militar: funções de monitoramento, rastreamento, segurança, controle e manutenção;
2. Industrial: funções de monitoramento de máquinas, áreas de difícil acesso;
3. Aviação: substituindo as redes com fio, como já são usadas hoje;
4. Ambiente: monitorando variáveis ambientais em prédios, florestas oceanos, etc.;
5. Tráfego: monitoramento de vias, estacionamentos, etc.;
6. Engenharia: monitoramento de estruturas;
7. Hospitalar: monitoramento de pacientes, prontuários, etc.;
8. Segurança pública: monitoramento em presídios, furtos, roubos, etc.

Entre as principais vantagens da utilização de uma RSSF sobre uma rede com cabos estão:

1. Fácil e rápida instalação da rede. O modo de integração dos dispositivos é simples e fácil, exigindo apenas a fixação dos sensores no processo, não sendo necessária nenhuma estrutura de cabos, caixas de junção e nem de serviços adicionais, tais como projeto de rotas de cabos, revisão de desenhos etc.;
2. Ausência de desgaste mecânico do meio de transmissão (meio físico é o ar);
3. Instalação em áreas de difícil passagem de cabos;
4. Baixo custo de instalação com redução considerável por eliminar o custo dos cabos e demais estruturas e serviços que seriam necessários para instalação de uma rede com fios. É importante salientar que as redes de sensores sem fio devem atender a requisitos restritivos, como a eficiência energética, escalabilidade, processamento de dados e a memória dos nodos. Devem garantir também a confiabilidade e segurança na transmissão dos pacotes de dados através dos *links* de rádio frequência, que estão sujeitos a interferências, instabilidades, ataques intencionais e a obstáculos físicos.

2.2 TOLERÂNCIA A FALHAS

Em uma rede de sensores sem fio, falhas são possíveis e aceitáveis e a rede deve corrigi-las de maneira automática e natural. Nodos sensores podem falhar por diversos motivos, como por exemplo, a falta de energia, falta de visibilidade para outro nodo sensor da rede, ou até mesmo pelo fato de dano físico.

Um sistema de tolerância de falhas possui a responsabilidade de manter as funcionalidades de uma rede de sensores sem fio permanentes, sem qualquer interrupção devido à falha de algum sensor (AKYILDIZ *et al.*, 2001).

A falha de um nodo sensor que faz parte da rota de um pacote de dados não deve impedir que a informação chegue ao seu destino (LOPES, 2006), visto que, a topologia da rede deve dar condições e caminhos alternativos para que os pacotes alcancem os seus destinos, seja por meio de retransmissões, ou apenas pela duplicação dos pacotes de dados na rede. Para garantir a disponibilidade de rotas alternativas para os pacotes de dados, os protocolos de roteamento necessitam de técnicas para traçar novas rotas em substituição àquelas interrompidas pela falha de um determinado nodo sensor.

2.3 COMUNICAÇÃO DE NODOS SENSORES

A primeira característica analisada é a forma como a comunicação entre os nodos sensores e um ponto de acesso é realizada. Os exemplos dos modelos de entrega de dados a seguir foram levantados para o melhor entendimento da tarefa de comunicação entre nodos sensores.

1. Comunicação contínua: neste tipo de rede, também chamada de rede de disseminação contínua, os nodos enviam mensagens em intervalos constantes de tempo ao ponto de acesso, obtendo as leituras atualizadas dos seus sensores. Enviando os dados periodicamente, é possível construir, por exemplo, um grafo do comportamento da rede, bem como acompanhar a evolução do fenômeno observado em tempo real. Aplicações de RSSF incluem estudos ambientais (SZEWCZYK *et al.*, 2004), sistemas de tráfego inteligente, monitoração de plantas industriais, construção do mapa de temperatura, etc. Nestas redes, os protocolos de roteamento tendem a utilizar abordagens proativas baseadas no vetor de distância, pois o fluxo de dados contínuo é beneficiado pela atualização constante das rotas;
2. Comunicação dirigida a eventos: o envio dos dados ao ponto de acesso é ocasional, ocorrendo somente quando um determinado evento é detectado, ou quando ocorre uma alteração importante no comportamento do fenômeno monitorado. Redes dirigidas a evento são utilizadas na localização de animais silvestres, detecção de intrusão, monitoramento de ambiente (PERKINS *et al.*, 1999), entre outros. Devido ao fluxo escasso de dados, estas redes tendem a empregar protocolos de roteamento reativos;
3. Comunicação iniciada pelo observador: os dados são enviados ao ponto de acesso somente quando explicitamente requisitados. Um exemplo é a rede descrita por Burrell, Brooke e Beckwith (2004), onde nodos sensores acoplados em enxadas e tesouras de poda coletam informações sobre a temperatura e umidade de uma vinícola durante todo o dia;
4. Comunicação híbrida: é a combinação dos modelos apresentados anteriormente. Redes híbridas são utilizadas para monitoramento de catástrofes. Nestas situações, nodos sensores possuem poucos dados a reportar em função do tempo de atuação, operando, assim, em um modelo dirigido a eventos. No entanto, na ocorrência de

um evento, o operador pode requisitar um fluxo contínuo de informações, para obter o máximo possível de dados sobre o evento.

Protocolos são desenvolvidos dentro destes modelos de comunicação, em sua maioria, com algumas diferenciações. Logo, existem soluções propostas na literatura, como por exemplo, o uso de protocolos adaptativos que alternam entre funções proativas e uma função reativa quando ocorre uma mudança significativa no tráfego da rede (FIGUEIREDO; NAKAMURA; LOUREIRO, 2004).

Os modelos de entrega de dados também são compostos por diversos tipos de fluxos, que também são divididos em categorias. A seguir, detalhamos os fluxos de dados encontrados em RSSF.

2.4 FLUXO DE DADOS

Normalmente, o interesse do observador é especificado nos termos do fenômeno, permitindo que seja alheio ao entendimento da infraestrutura e ao protocolo de comunicação utilizado na rede onde se encontra o nodo sensor.

O modelo de entrega dos dados se relaciona com os nodos sensores que se comunicam com o ponto de acesso. Na entrega de dados, utilizam-se fluxos de dados de diversos tipos para implementar a comunicação com o ponto de acesso. Abaixo, estão apresentados os fluxos de dados definidos por Tilak, Abu-Ghazaleh e Heinzelman (2002), adicionando-se o fluxo *Convergecast* (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000), que é frequentemente visto em redes de disseminação contínua de dados e se caracteriza por permitir que várias fontes de dados tenham um mesmo destino.

1. Inundação (*flooding*): é caracterizado pela comunicação de um nodo com seus vizinhos a um determinado número de saltos de distância *hops*. O emissor da mensagem a envia para todos os seus vizinhos, e os vizinhos do nodo as repassam para seus vizinhos e assim por diante. Esta comunicação é utilizada em redes sem fio devido às características do meio de comunicação, pois todos os nodos, ao alcance do rádio do emissor, escutam a transmissão. O ponto de acesso frequentemente utiliza a inundação de pacotes para alertar os nodos para que monitorem um novo tipo de evento (ITANAGONWIWAT; GOVIDAN; ESTRIN, 2000);

2. **Unicast:** faz a comunicação direta entre nodos, quando sensores alertam o ponto de acesso da ocorrência de um novo evento de interesse na área monitorada, também conhecido como comunicação ponto a ponto (ITANAGONWIWAT; GOVIDAN; ESTRIN, 2000);
3. **Multicast:** é usado para propagar dados a um conjunto limitado de nodos em situações onde o custo de enviar os dados a cada um dos destinatários é grande se for utilizada comunicação *unicast*. Este tipo de comunicação ocorre quando o ponto de acesso deseja alertar nodos em uma dada região sobre uma nova configuração, por exemplo, aumento da taxa de envio de dados;
4. **Convergecast (many-to-one):** o fluxo de dados se caracteriza por várias fontes de dados que possuem como destino um único nodo. Exemplo deste tipo de comunicações são redes hierárquicas, onde os nodos são divididos em grupos, e os nodos dos grupos enviam os seus dados ao líder de grupo (HEINZELMAN; CHANDRAKASAN; BALAKRISHNAN, 2000). Outro exemplo de tráfego *convergecast* são as redes de disseminação contínua, onde os nodos enviam os dados produzidos diretamente ao ponto de acesso utilizando caminhos de múltiplos saltos (BOUKERCHE; CHENG; LINUS, 2003; KARLOF; LI; POLASTRE, 2003; YE *et al.*, 2001).

Como as aplicações possuem modelos de entrega de dados e fluxos de dados bem definidos, é possível construir protocolos de roteamento que se aproveitam dessas características para economizar energia e diminuir o custo do estabelecimento de rotas. Protocolos de roteamento suportam somente um modelo de entrega de dados.

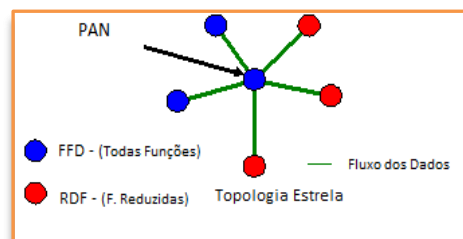
Outra otimização frequentemente utilizada é a criação de rotas somente entre os nodos sensores e o ponto de acesso, não existindo rotas de um sensor a outro sensor qualquer (FIGUEIREDO; NAKAMURA; LOUREIRO, 2004; BOUKERCHE; CHENG; LINUS, 2003; KARLOF; POLASTRE, 2003; YE *et al.*, 2001; MAIA; CAMARA; LOUREIRO, 2004; SIVALINGAM *et al.*, 2002; LINDSEY *et al.*, 2002).

2.5 TOPOLOGIAS

A topologia de uma rede é o padrão pelo qual o meio de rede está conectado a outros componentes de rede. Essencialmente, é a estrutura geográfica da rede, que pode ser descrita fisicamente. Conforme as diferentes funções dos dispositivos que compõem a rede, são permitidas uma variedade de formas de configuração. Quanto à necessidade e o tipo de aplicação, uma rede pode ser mais robusta, econômica, centralizadora ou distribuída. Além disto, algumas características determinam o tipo de topologia a ser empregada.

1. Estrela: topologia conhecida como *star* é uma forma de organização de rede que é suportada pelo padrão IEEE 802. O coordenador da rede é o nodo central da topologia. A rede nasce quando um nodo *Full Function Device* (FFD), ou seja, um nodo com todas as funções, se tornar ativo pela primeira vez e se declarar como o nodo coordenador da rede *Personal Area Network* (PAN). Os outros dispositivos ou nodos podem se juntar a rede de forma independente, formando uma estrela (KINNEY, 2003). Estes outros nodos podem ser também do tipo FFD, ou nodos de funções reduzidas *Reduced Function Device* (RFD);

Figura 2 - Topologia estrela

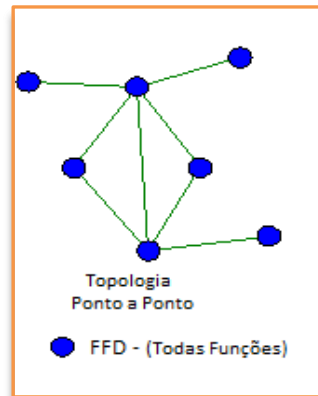


Fonte: Kinney (2003).

2. Ponto a Ponto *Peer-to-Peer*: nesta topologia encontra-se também um coordenador de rede PAN. Em contraste à topologia em estrela, qualquer nodo pode comunicar com outro nodo desde que esteja no alcance um do outro. São redes que podem formar padrões arbitrários de conexões. Isto serve como base para redes *ad-hoc* capazes de se auto gerenciarem e de se auto organizarem. Como o padrão não define uma camada de rede, o roteamento de dados não é uma tarefa suportada diretamente, mas pode ser adicionado como uma camada de suporte para comunicação com múltiplos saltos. Restrições topológicas poderão ser

adicionadas por se tratar de uma rede de sensores sem fios, a qual tem como característica uma acentuada limitação de energia (KINNEY, 2003);

Figura 3 - Topologia ponto a ponto

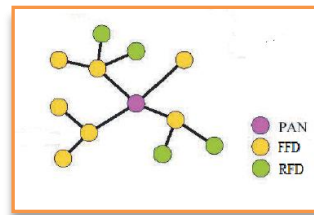


Fonte: Kinney (2003).

3. *Árvore, cluster-tree*: trata-se de um caso especial da rede ponto a ponto no qual a maioria dos dispositivos nodos são FFDs e RFDs, e podem se conectar entre si formando uma rede em árvore. Os nodos FFDs elegem um coordenador da rede, e o estabelecem como o coordenador de um aglomerado de nodos ou *clusters*, estipulando um identificador para esse *cluster*, através da escolha PAN. O dispositivo envia em *broadcast* um *beacon frame*¹, anunciando a própria existência na rede. Qualquer dispositivo nodo que tenha recebido o sinal de *beacon frame* pode requisitar a entrada na rede. Se o coordenador PAN permitir a entrada do novo nodo, ele será adicionado como um novo nodo filho na listagem de vizinhos. Os nodos adicionados se estabelecem e, assim, enviam *beacon frames* buscando novos candidatos a se unir na rede. O coordenador PAN pode determinar, a qualquer tempo, que um nodo assuma como um novo coordenador de um novo aglomerado, adjacente ao primeiro. A principal vantagem dessa estrutura em árvore é aumentar a área de cobertura, com a desvantagem em aumentar o atraso da mensagem (KINNEY, 2003). Entretanto, a desvantagem desta topologia é que, se um nodo FFD perder a comunicação, todos os nodos que dependem deste FFD perdem a via de comunicação com o coordenador;

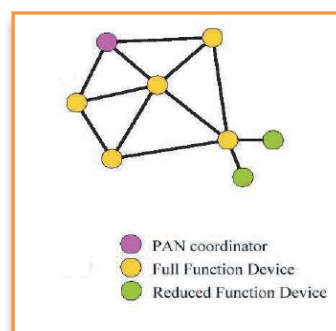
¹ *Beacon frame* é um pacote de informações transmitido periodicamente para anunciar a presença de um nodo em uma rede sem fio.

Figura 4 - Topologia em árvore



Fonte: Kinney (2003).

4. Rede em malha, *mesh*: é uma variação de protocolo ao padrão IEEE 802.11 para diretrizes de tráfego de dados além das redes a cabo ou infraestrutura sem fio *wireless*. Uma rede de infraestrutura é composta de ponto de acesso e clientes, os quais necessariamente devem utilizar o ponto de acesso para trafegarem na rede. Uma rede em malha é composta de vários nodos roteadores ou FFDs, que passam a se comportar como uma única e grande rede, possibilitando que o cliente conecte-se em qualquer um destes nodos. Os nodos têm a função de repetidores e cada qual está conectado a um ou mais outros nodos. Desta maneira, é possível transmitir mensagens de um nodo a outro, por diferentes caminhos. Na topologia em malha, o protocolo de roteamento faz uma análise das diversas possibilidades de rotas de fluxo de dados, por exemplo, com base numa tabela dinâmica, onde o equipamento seleciona qual a rota mais eficiente para seguir e chegar no nodo alvo, levando em conta a maior velocidade de transmissão, com menor perda de pacotes, ou o acesso mais rápido à Internet, além de outros fatores (GUTIERRES; CALLAWAY JUNIOR; BARRETT JUNIOR, 2004).

Figura 5 - Topologia *mesh*

Fonte: Kinney (2003).

Este procedimento é feito diversas vezes em intervalos de tempo determinados, sendo transparente ao usuário da rede, mesmo quando ocorre alteração de rota de acesso à porta de saída *gateway*, que são os nodos que possuem acesso direto à Internet, por exemplo. Salienta-se que quando o nodo usado para rotear dados deixa de funcionar, o sistema pode se rearranjar automaticamente, desviando o fluxo de dados do nodo defeituoso, sem que usuário perceba ou perca a conexão.

Além disso, o interessante nesta topologia, por exemplo, é a conexão com o nodo coordenador. Somente um dos nodos precisa estar conectado para que todos tenham acesso ao nodo coordenador. O sistema sempre sabe quais saltos serão necessários para que a requisição de um cliente, em qualquer ponto da rede, chegue da forma mais eficiente possível ao destino.

Algumas variações nas redes em malha possibilitam determinar as redes mais especificamente pela forma como os nodos se conectam. Topologia *Full-Mesh* é estabelecida quando se encontram rotas para todos os nodos de todos os nodos sensores da rede. Uma variação desta topologia ocorre quando nem todos os nodos da malha estão ligados entre si, portanto, se tem a topologia *Partial-Mesh*, que é mais difícil de ser construída por não haver uma regra de formação clara. Por exemplo, em topologias estrela se conectam todos os nodos a um nodo coordenador; em topologia *Full-Mesh* se conectam todos os nodos com todos os outros nodos.

A topologia *Partial-Mesh*, se for bem construída, pode obter alguns benefícios, como, por exemplo (LABIOD; AFIFI; DE SANTIS, 2007):

1. Redução do número de saltos *hops*;
2. Redução do número de rotas disponíveis;
3. Redução de falhas de rede.

Figura 6 - Rede Full Mesh

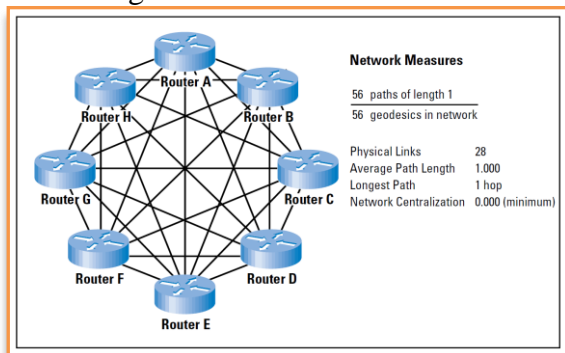
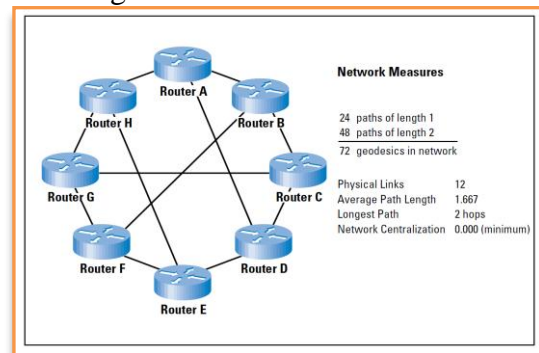


Figura 7 - Rede Partial Mesh



Fonte: Craig (2004).

Uma importante característica das redes sem fio em malha é a comunicação sem fio entre os nodos através de um ou mais saltos. Protocolos de roteamento eficientes fornecem os melhores caminhos através da rede em malha e respondem de forma eficaz as alterações na topologia da rede. Isto permite que os nodos sensores em topologia *mesh* possam se comunicar uns com os outros, mesmo que estes não estejam no seu alcance. No caminho entre a origem e o destino dos dados, os nodos intermediários encaminham os pacotes de dados para o próximo nodo. A rede normalmente possui um ponto de acesso onde os nodos sensores devem objetivar o envio dos dados. Para que dois nodos da rede possam realizar a comunicação entre si, é necessário que uma rota entre eles seja criada. O controle de acesso ao meio utilizado em redes *mesh* é o *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA), o mesmo utilizado por redes *WIFI* tradicionais, onde os dispositivos esperam um canal de transmissão de dados limpo, ou seja, sem outros nodos transmitindo para evitar colisões. Depois de cada transmissão, a rede entra em um modo onde os nodos só podem começar a transmitir em canais a ela destinados. Ao terminar a transmissão, o primeiro nodo com espaço alocado tem o direito de transmitir com mínimas probabilidades de colisão. Se não transmitir, o direito de transmissão passa ao nodo seguinte com espaço alocado. Desta forma quando for estabelecida a comunicação de dados entre dois nodos da rede, a troca de informações de um determinado protocolo firma um caminho para os dados, que é chamado de rota.

A forma como esta rota é criada depende do algoritmo de roteamento utilizado. Entre os algoritmos conhecidos encontram-se o *Ad-hoc, On-demand Distance Vector* (AODV), *Dynamic MANET On-demand* (Dymo) e o *Dynamic Source Routing* (DSR) (PERKINS; ROYER, 1999; IANCHAK, 2013; JOHNSON; MALTZ, 2001; RAGHUVANSHI; TIWARI; DYMO, 2010).

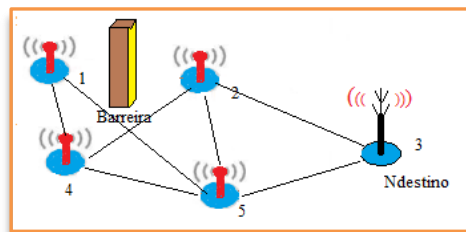
O protocolo AODV foi criado com o objetivo de ser um protocolo adaptativo aos cenários de alta mobilidade, de maneira a evitar desperdício de banda e minimizar o processamento nos nodos que atuam como roteadores na rede. São utilizadas tabelas de roteamento tradicionais, ou seja, é armazenado apenas o próximo salto para o nodo destino.

Em alguns protocolos como o AODV, por exemplo, apenas se cria uma rota quando um nodo pretende comunicar com outro. Por outro lado, existem outros protocolos que mantêm um conjunto de rotas, mesmo que estas nunca venham a ser utilizadas. No protocolo AODV, o importante é a tarefa de manutenção de rotas. Para realizar esta tarefa, periodicamente são enviados pacotes de dados sinalizadores chamados *hello* entre os nodos para verificar a manutenção ou a quebra da rota. Quando um desses pacotes é esperado por

algum nodo, mas não é recebido, este nodo detecta o erro de transmissão, como por exemplo, uma quebra de ligação entre dois nodos, e então, é enviado imediatamente um pacote sinalizador de erro *Route Error* (RERR) para o nodo de origem e para todos os demais nodos, para que sejam avisados de erro. Um nodo, ao receber este pacote, tem sua tabela interna atualizada, de forma a remover de suas rotas armazenadas todas as sub-rotas posteriores às ligações quebradas.

Portanto, quando uma rota criada se encontrar indisponível, por exemplo, um nodo intermediário desligado, ou o sinal bloqueado por um obstáculo, ou ainda mais drasticamente, o final da bateria de um nodo sensor, e neste caso, a rede é automaticamente recalculada e novas rotas são estabelecidas para garantir a funcionalidade do sistema (JOHNSON; MALTZ, 2001). Na Figura 8, é possível observar uma típica ocorrência de erro de um nodo sensor, isolado por haver uma barreira no sinal de conexão entre os sensores 1 e 2, impossibilitando a comunicação para um nodo destino.

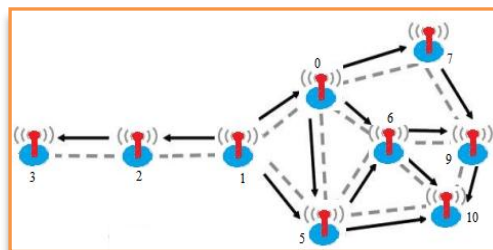
Figura 8 - Exemplo Rede *Mesh*



Fonte: O Autor.

A Figura 9 é um exemplo de comunicação entre nodos. No primeiro passo, o nodo 1 efetua um *broadcast*, usando o protocolo *User Datagram Protocol* (UDP), com um pedido para que seja efetuada uma descoberta de rota para o nodo 10.

Figura 9 - Exemplo trivial de descoberta de rota



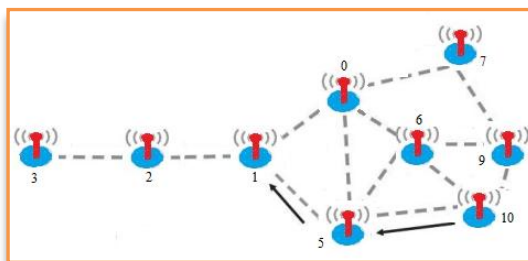
Fonte: O Autor.

O pedido *broadcast* resulta num conjunto de mensagens que chegam ao nodo10 através de diferentes rotas. A lista apresentada abaixo mostra que podem chegar ao nodo10 dez mensagens da mesma origem por caminhos diferente, cujas rotas foram:

1. 1-0-7-9-10;
2. 1-0-6-10;
3. 1-0-6-9-10;
4. 1-5-10;
5. 1-5-6-10;
6. 1-0-5-10;
7. 1-0-5-6-9-10;
8. 1-5-0-6-10;
9. 1-5-0-6-9-10;
10. 1-5-6-9-10.

A rota pela qual a mensagem percorreu e efetuou o menor número de saltos *hops*, é então selecionada para efetuar a comunicação entre o nodo1 e o nodo10, e, neste caso, é a rota 1-5-10. Esta escolha é realizada pelo nodo10 e é comunicada aos demais nodos participantes da rota através de uma mensagem de *unicast* enviada para o nodo1. Esta mensagem percorre a rota selecionada no sentido inverso da mensagem que deu origem, como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Exemplo de rota reversa



Fonte: O Autor.

No exemplo, foi visto que cada vez que um sensor necessitar realizar o descobrimento de uma nova rota, será enviada uma sequência de mensagens pela rede. Se o fato for multiplicado pela quantidade de sensores, então haverá uma inundação de dados na rede chamada *flooding*, que pode levar um bom tempo para ser dissipada.

2.6 ESCALABILIDADE

A escalabilidade é uma característica desejável em uma rede e indica a capacidade de manipular uma quantidade crescente de trabalho de forma uniforme, ou estar preparado para crescimento (BONDI, 2000). Se pode dizer que é capacidade de um sistema em suportar um aumento de carga total quando os recursos do hardware são requeridos.

Em uma RSSF a quantidade de nodos sensores pode variar das centenas e até chegar aos milhares. A escalabilidade representa um atributo importante para compor protocolos de redes de sensores sem fio para transmissão de dados e gerenciamento no consumo de energia elétrica.

Uma rede deve ser capaz de manter suas funcionalidades, independente da quantidade de nodos sensores presentes nesta rede. Além disso, os protocolos de roteamento podem ser escaláveis o suficiente para responder a eventos específicos do ambiente.

2.7 ARQUITETURA

A pilha de protocolos, de acordo com o modelo *Open Systems Interconnection* (OSI), é usada pelos nodos sensores em uma rede sem fio. Esta pilha de protocolos consiste de uma camada de aplicação, uma camada de transporte e de rede, uma camada de enlace, uma camada física, planos de gerenciamento de energia, gerenciamento de mobilidade e gerenciamento de tarefas (BONIFÁCIO, 2011).

Os planos de energia, mobilidade e tarefas monitoram a energia, movimentação e distribuição de tarefas entre os nodos sensores. Esses planos ajudam os nodos a coordenar as tarefas de sensoriamento e reduzir o consumo total de energia.

O plano de mobilidade detecta e registra movimentos dos nodos sensores, de modo que uma determinada rota de volta ao usuário seja sempre mantida. Assim, os nodos sensores podem manter em uma tabela quem são os nodos vizinhos. Além disso, conhecendo a vizinhança, o nodo sensor pode balancear o uso de energia e as tarefas executadas.

O plano de gerenciamento de tarefas ajusta e escalona as tarefas de sensoriamento de uma região especificada. O gerenciamento é necessário para que os nodos possam trabalhar em conjunto de uma forma eficiente quanto ao uso de energia, possam rotear os pacotes de dados dentro da rede e, por fim, possam compartilhar recursos entre os nodos.

2.8 ROTEAMENTO

Existem diversas definições para a palavra roteador. Algumas das definições foram retiradas dos padrões *Request For Comments* (RFC). Segundo o *Internet Security Glossary* RFC2828, roteador é um computador que trabalha como um gateway entre duas redes na terceira camada do modelo de referência OSI e que encaminha e direciona pacotes de dados entre redes.

O *Internet Users Glossary* RFC1983 define roteador como sendo um dispositivo que encaminha tráfego entre redes. A decisão de encaminhamento é baseada na informação da camada de rede e tabelas de roteamento. Outra definição é dada pelo *Glossary of Networking Terms* RFC1208. Segundo essa RFC, um roteador é um sistema responsável por tomar decisões sobre quais os caminhos disponíveis na rede e por onde o tráfego de dados deve seguir. Portanto, o roteador é um dispositivo ou nodo que tem a responsabilidade de repassar os pacotes de dados de uma rede para outra, através de determinados critérios e regras atribuídas pelo gerente da rede. Para tal, o roteador usa um protocolo chamado de protocolo de roteamento (AL-KARAKI; KAMAL, 2004), o qual especifica como os nodos sensores se comunicam entre si, disseminando as informações na rede, com o objetivo de determinar a escolha de um determinado caminho entre quaisquer dois nodos da rede, através de um algoritmo de pesquisa. Cada roteador tem, a priori, o conhecimento das redes ligadas diretamente a ele. O protocolo de roteamento divide estas informações com seus vizinhos, e assim, através de toda a rede. De forma geral, os roteadores ganham conhecimento da topologia da rede.

Os protocolos de roteamento em redes de sensores sem fio, como nas redes *ad-hoc*, podem ser classificados em proativos e reativos. Uma diferença entre protocolos de roteamento proativos para redes *ad-hoc* e os protocolos desenvolvidos para as RSSF, está no fato que os protocolos proativos não possuem rotas para todos os nodos da rede, pois tal abordagem permite um menor consumo de memória. Observa-se que, devido às limitações dos recursos e a grande quantidade de nodos empregados, evita-se utilizar protocolos de roteamento baseados em estado de enlace, uma vez que o custo e o tempo necessários para propagar o estado da rede a todos os nodos são proibitivos.

Protocolos reativos ou sob demanda possuem baixo *overhead* de roteamento e têm latência extra para descobrimento de rotas. Protocolos proativos têm a vantagem de possuir baixa latência, porém, em contrapartida, apresentam um alto *overhead* para manter as informações de roteamento, principalmente quando a topologia muda muito constantemente.

Como apresentado anteriormente, a técnica de *flooding* permite a comunicação entre os nodos independentemente de existir uma rota pré-configurada. O nodo designado como remetente envia um pacote a outro nodo e, no caso de *flooding*, o remetente envia pacotes para todos os vizinhos. Estes, por sua vez, fazem com que os dados se propaguem para os vizinhos e assim sucessivamente até encontrar o nodo final da rede ou o destino.

Para economizar recursos e aumentar o desempenho da rede, os protocolos de roteamento para RSSF, em geral, otimizam o funcionamento de acordo com as características de tráfego de cada aplicação.

Devido às características das RSSF de baixa potência, rotear pacotes de dados neste tipo de rede é muito mais desafiador quando comparado com as redes tradicionais sem fio, como as redes *ad hoc* (AKKAYA; YOUNIS, 2005; CHEN; VARSHNEY, 2004).

Primeiramente, para suportar as altas densidades de nodos sensores em uma determinada região, os protocolos de roteamento têm que ser capazes de suportar transmissão de dados através de longas distâncias, indiferente do tamanho da rede. Ainda se deve considerar que alguns nodos sensores podem falhar durante a operação de rede devido a falhas de hardware, falta de energia ou fatores ambientais, mas estes fatores não poderão interromper o funcionamento normal da rede. Ainda mais, como os nodos sensores têm recursos limitados em termos de fornecimento de energia, capacidade de processamento, capacidade de memória e largura de banda de transmissão disponível, o roteamento e a disseminação dos dados devem ser realizados com uma eficiente utilização dos recursos de rede.

De acordo com as diferenças já citadas entre as RSSF e as redes tradicionais sem fio, inúmeros protocolos de roteamento foram propostos para mitigar os desafios impostos pelas novas características das RSSF.

Desta forma, Al-Karaki e Kamal (2004) classificaram os protocolos de roteamento existentes de RSSF com duas diferentes perspectivas:

1. Estrutura de rede;
2. Protocolo de operação.

Sob o ponto de vista da estrutura de rede, os algoritmos de roteamento são classificados como:

1. Planos - *flat-based*;

2. Hierárquicos - *hierarchical-based*;
3. Geográficos - *location-based*.

Protocolos de roteamento plano foram projetados para redes com nodos homogêneos e com todos os nodos das redes com o mesmo processamento, e com a capacidade de envio dos dados de transmissão também homogênea.

Pelo fato da simples estrutura da arquitetura de rede plana, este grupo de protocolos de roteamento demonstra algumas vantagens como uma baixa perda de tempo na manutenção da topologia e a habilidade no descobrimento de múltiplas rotas. Como exemplo de protocolos com roteamento plano, encontram-se:

1. *Directed Diffusion* (DD) - (INTANAGONWIWAT; GOVINDAN; ESTRIN, 2000);
2. *Rumor Routing* (RR) - (BRAGINSKI; ESTRIN, 2002);
3. *Minimum Cost Forwarding Algorithm* (MCFA) - (YE *et al.*, 2001);
4. *Energy-Aware Routing* (EAR) - (SHAH; RABAEY, 2002).

Protocolos de roteamento hierárquicos foram originalmente propostos para melhorar a escalabilidade e a eficiência de energia através de nodos em aglomerados ou em *clusters*. Neste subconjunto de protocolos de roteamento, todos os nodos são agrupados como grupos *clusters* e um dos nodos, geralmente aquele que tem mais recursos, é delegado como líder do *cluster*. Cada líder do *cluster* é responsável por processar os pacotes de dados recebidos dos nodos de seu *cluster*, comunicando com outros líderes de *clusters*, ou com nodos em níveis inferiores, coordenando os nodos *cluster*.

Em contraste, todos os membros de um *cluster* devem instrumentar os sinais do ambiente, coletar as informações e repassar para os líderes de seu *cluster*, para as operações que se façam necessárias. Embora essa abordagem possa apresentar uma rede com alta escalabilidade, esta envolve operações em *clusters* e trocas de líderes (tarefa que é necessária para prever um rápido esgotamento de energia dos líderes), impõe uma forte sinalização com perda de tempo na rede *overhead*. Alguns protocolos de roteamento são classificados nesta categoria como:

1. *Threshold-Sensitive Energy-Efficient Sensor Network Protocol* (TEEN) - (MANJESHWAR; AGRAWAL, 2001);

2. *Adaptative Periodic Threshold-Sensitive Energy-Efficient Sensor Network Protocol* (APTEEN) - (MANJESHWAR; AGRAWAL, 2002);
3. *Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH) - (HEINZELMAN; KULIK; BALAKRISHNAN, 2000);
4. *Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems* (PEGASIS) - (LINDSEY; RAGHAVENDRA, 2002);
5. *Two Tier Data Dissemination* (TTDD) - (YE *et al.*, 2002).

Os protocolos de roteamento do grupo baseados em localização, ou geográficos, utilizam a posição exata do nodo sensor para tomar a decisão do roteamento (YU; GOVINDAN; ESTRIN, 2001; WANG; BULUT; SZYMANSKI, 2009). Como exemplo de protocolos com roteamento geográficos, encontram-se:

1. *Geographic and Energy-Aware Routing* (GEAR) - (YU; GOVINDAN; ESTRIN, 2001);
2. *Geographic Adaptative Fidelity* (GAF) - (XU; HEIDEMANN, 2001);
3. *Greedy Perimeter Stateless Routing* (GPSR) - (KARP; KUNG, 2000).

Sob o ponto de vista do modo de operação de rede, os algoritmos de roteamento são classificados como baseados em:

1. Negociação - *negotiation-based*;
2. Pergunta - *query-based*;
3. QoS - *QoS-based*;
4. Multi caminhos - *multipath-based*;
5. Coerência - *coherent-based* (AKKAYA; YOUNIS, 2005).

A ideia chave no projeto de protocolos de roteamento baseados em negociação é administrar a energia de forma eficiente para a comunicação, reduzindo a alta redundância da transmissão durante o processo de envio dos dados. Nestes protocolos, cada nodo sensor adiciona um alto nível de descrição aos dados coletados e realiza algumas negociações com os nodos vizinhos a fim de eliminar pacotes de dados duplicados. Como exemplo deste protocolo com roteamento baseados em negociação, encontra-se:

1. *Sensor Protocol for Information via Negotiation* (SPIN) - (HEINZELMAN; KULIK; BALAKRISHNAN, 1999).

Já os protocolos de roteamento baseados em pergunta, o nodo inferior da rede, por exemplo, o nodo folha de um ramo de uma árvore da rede, propaga a mensagem pergunta por toda a rede. Se algum nodo sentir a mensagem enviada correlacionada, o nodo envia os dados através do caminho reverso. Como exemplos deste protocolo de roteamento baseados em pergunta, encontram-se:

1. *Directed Diffusion* (DD) - (INTANAGONWIWAT; GOVINDAN; ESTRIN, 2000);
2. *Rumor Routing* (RR) - (BRAGINSKI; ESTRIN, 2002).

A terceira categoria de protocolos de roteamento são os baseados em QoS, os quais foram projetados a fim de atender à demanda de QoS para diferentes aplicações. O principal desta abordagem é estabelecer um compromisso *tradeoff* entre o consumo de energia e a qualidade do dado. Como exemplos deste protocolo com roteamento baseados em QoS, encontram-se:

1. *Sequence Assignment Routing* (SAR) - (SOHRABI *et al.*, 2000);
2. *Speed* (SPEED) - (TIAN *et al.*, 2003);
3. *Multipath Multi-SPEED* (MMSPEED) - (FELEMBAN; LEE; EKICI, 2006);
4. *Energy-Aware QoS Routing Protocol* (AKKAYA K. *et al.*, 2003);
5. *Delay-minimum Energy-Aware Routing Protocol* (DERP) - (HE, 2007).

A quarta categoria de protocolos de roteamento é baseada em múltiplos caminhos *multi path*. Em contraste às técnicas de roteamento de caminhos únicos *single path*, os protocolos de roteamento de múltiplos caminhos permitem que cada nodo de origem possa encontrar diversos caminhos para um nodo destino, de forma a aumentar o desempenho do fluxo de dados. Um limiar poderá ser estabelecido com a ideia de limitar o tamanho da dispersão dos dados e aumentar a eficiência do método.

Alguns dos protocolos desta categoria são como:

1. *Directed Diffusion* (DD) - (INTANAGONWIWAT; GOVINDAN; ESTRIN, 2000);
2. *Braided Multipath Routing* (BRM) - (GANESAN *et al.*, 2001);
3. *"N-to-1 Multipath Routing Protocol* (LOU, 2005).

Protocolos de roteamento, como o DD, SPIN e o SAR, utilizam agregação de dados, logo, também podem ser caracterizados como protocolos de roteamento baseado em agregação de dados. Uma vez que em RSSF todos os nodos fazem *flooding* de dados cooperativamente na rede, o último grupo de algoritmos de roteamento apresentado está dedicado para coerência de dados baseado em processamento. Nesta categoria, os pacotes de dados são enviados para um nodo concentrador, de forma ordenada, para a diminuição da redundância de dados.

2.9 PADRÃO IEEE 802.15

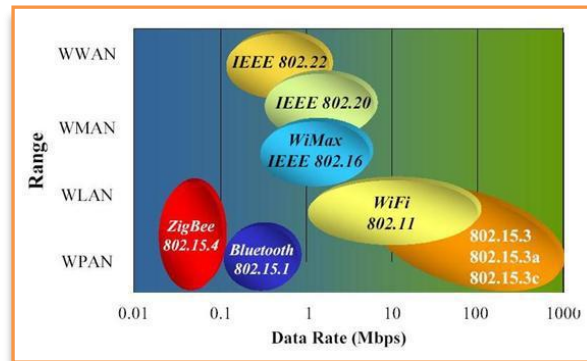
Uma *Wireless Personal Area Network* (WPAN) é uma rede sem fios cujos nodos constituintes possuem uma área de atuação determinada. O grupo de trabalho IEEE 802.15, responsável pela normalização de redes WPAN, define três classes para este tipo de rede (FIGUEIREDO; NAKAMURA; LOUREIRO, 2004):

1. Redes com alta taxa de transmissão IEEE 802.15.3, adequadas para aplicações que necessitem de uma elevada qualidade de serviço;
2. Redes com taxa de transmissão média IEEE 802.15.1/*Bluetooth*, desenvolvidas para substituírem os cabos em equipamentos eletrônicos comerciais como impressoras, telefones etc.;
3. Redes com baixa taxa de transmissão IEEE 802.15.4, denominadas *Low-Rate Wireless Personal Area Network* (LR-WPAN), desenvolvidas para aplicações com requisitos de qualidade de serviço menos exigentes e com recursos de memória e processamento limitados.

As redes LR-WPAN são usadas, por exemplo, em áreas como a medicina, a doméstica, tecnologia recente que permite a gestão de recursos residenciais, em infraestruturas de *smart grid*, em aplicações militares e na área da automação industrial.

Na Figura 11, é possível visualizar no gráfico a comparação entre o IEEE 802.15 e um conjunto de outras tecnologias de redes sem fios dentro de uma determinada faixa de alcance *range* e uma taxa de transmissão de dados *Data Rate* em megabit por segundo *Mbps*.

Figura 11 - Tecnologia de redes sem fio



Fonte: Labiod, Afifi e De Santis (2007).

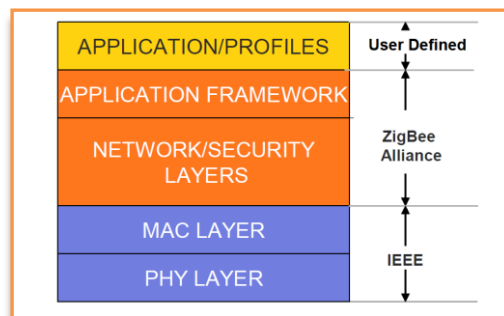
O IEEE 802.15.4 é uma norma que especifica a camada física e o controle de acesso com baixa taxa de fluxo de dados em uma rede sem fios LR-WPAN. Este padrão é mantido pelo grupo de trabalho IEEE 802.15, base para a especificação do ZigBee, Isa100.11a, Wireless HART e o MiWi. O padrão IEEE 802.15.4 oferece fundamentos em baixo nível nas camadas de rede sem fio WPAN, tendo como foco o baixo custo, a baixa velocidade da troca de informações dos nodos sensores devido às limitações do hardware, em contraste com outros padrões de tecnologias de redes sem fio. A ênfase a esse protocolo está numa comunicação de muito baixo custo e a proximidade entre os nodos sensores, com pouca ou quase nenhuma infraestrutura, explorando de forma a diminuir o consumo de energia de seus componentes. A estrutura básica de comunicação admite pontos de até 100m de distância com uma taxa não maior que 250kb/s.

Uma importante característica é uma adequação em tempo real pela garantia da reserva de faixas de tempo, evitando colisão de pacotes de dados, e o suporte integrado para comunicação segura. O nodo sensor inclui também funções gerenciais de consumo como a medida da qualidade da conexão e o próprio controle do consumo de energia.

2.10 PADRÃO IEEE 802.15.4

O IEEE criou o chamado grupo de tarefa 4, que foca em soluções para baixas taxas de transmissão de dados em conjunto com uma alta durabilidade de baterias que pode atingir duração de meses, e até anos. O padrão foi pensado para operar em faixas de frequências internacionais abertas sem licença, visto o potencial das aplicações emergentes, como por exemplo, na automação residencial, sensores sem fio, brinquedos interativos e controles remotos. O escopo deste grupo de tarefa é definir a camada física PHY e o controle de acesso à mídia MAC. Uma visão global da especificação pode ser encontrada em *Home networking with IEEE 802.15.4: a developing standard for low-rate wireless personal area networks* (CALLAWAY *et al.*, 2002). Uma divisão de responsabilidades da IEEE, da ZigBee Alliance e do usuário está apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Arquitetura IEEE 802.15.4



Fonte: Elahi e Gschwender (2010).

A definição da camada da rede é baseada no modelo OSI. Entretanto, somente as camadas inferiores são definidas como padrão, interagindo com as camadas superiores, possivelmente usando a subcamada *link* de controle lógico do IEEE 802.2, e acessando o MAC através de uma subcamada de convergência. As implementações podem ser repassadas para dispositivos externos ou ser puramente embarcadas em dispositivos com suas próprias funcionalidades (ELAHI; GSCHWENDER, 2002).

2.10.1 Camada Física

A camada física, ou PHY, é quem providencia o serviço de transmissão dos dados, bem como é a interface para a camada de gerenciamento físico do dispositivo de rede, a qual oferece o acesso a cada função do gerenciamento da camada e mantém a base de dados das informações na rede PAN.

Através do gerenciamento do PHY na rádio frequência do transceptor do sistema, é possível selecionar o canal de transmissão, a energia e as funções de gerenciamento de sinal. Existem três possibilidades de frequência de operação:

1. 868.0 - 868.6 MHz: Europa permite um canal de comunicação (de 2003 até 2006);
2. 902 - 928 MHz: América do norte, até 10 canais (em 2003), estendido para 30 canais (2006);
3. 2400 - 2483.5 MHz: uso em todo o mundo, até 16 canais (de 2003 até 2006).

A versão original do padrão especifica duas camadas físicas baseadas em técnicas de sequência direta de espalhamento espectral *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) (BARONTI *et al.*, 2006). A técnica do espalhamento espectral *spread spectrum* se caracteriza por ampla largura de banda e baixa potência de sinal e possui uma série de vantagens em relação ao seu antecessor, a banda estreita *narrow band* (FARIAS, 2014).

Diferentemente da transmissão em banda estreita, o espalhamento espectral utiliza uma faixa de frequência muito maior do que a necessária para carregar a informação, são menos susceptíveis a interferência e usam menos potência para transmitir um sinal do que a que seria necessária para transmitir o mesmo sinal na banda estreita.

A primeira camada operando na banda 868/915 MHz transfere dados a uma taxa de 20 e 40 kbit/s, e a outra em 2450 MHz, com taxas de transmissão de 250 kbits/s.

Tabela 1 - Faixas de frequência e taxa de transmissão de dados

PHY	Frequency Band	Channel Numbering	Spreading Parameters		Data Parameters		
			Chip Rate	Modulation	Bit Rate	Symbol Rate	Modulation
868/915MHz	868-870 MHz	0	300 kchip/s	BPSK	20 kb/s	20 kbaud	BPSK
	902-928 MHz	1 to 10	600 kchip/s	BPSK	40 kb/s	40 kbaud	BPSK
2,4 GHz	2,4-2,4835 GHz	11 to 26	2,0 Mchip/s	O-QPSK	250 kb/s	62,5 kbaud	16-ary Orthogonal

Fonte: Craig (2003).

Ainda no nível físico, é disponibilizado um conjunto de 27 canais de frequência. Cada canal é identificado por uma combinação de número de página e número de canal, apresentados na Tabela 2. Os canais distribuem-se pelas bandas de frequência de 868 MHz na Europa, 915 MHz na América do Norte e em alguns países asiáticos, e 2,4 GHz se encontra disponível globalmente.

Segundo o IEEE 802.15.4, um transceptor que opere na banda dos 2.4 GHz não necessita suportar frequências na banda dos 868 e 915 MHz, e, neste caso, só comunicará com dispositivos nodos que suportem frequências na banda dos 2,4 GHz.

Para um sistema de rádio que opere nas frequências de 868/915 MHz, a norma disponibiliza uma especificação de implementação obrigatória (página 0) e duas de implementação opcional (páginas 1 e 2), não sendo necessário, no caso da página 0, implementar a banda de frequência dos 2.4 GHz (CRAIG, 2003).

Tabela 2 - Páginas das faixas de operação IEEE 802.15.4

Página	Número do canal	Frequência	Taxa de transmissão (kb/s)	Modulação
0	0	868 MHz	20	BPSK
	1-10	915 MHz	40	BPSK
	11-26	2,4 GHz	250	O-QPSK
1	0	868 MHz	250	ASK
	1-10	915 MHz	250	ASK
	11-26	Reservado	-	-
2	0	868 MHz	100	O-QPSK
	1-10	915 MHz	250	O-QPSK
	11-26	Reservado	-	-
3-31	Reservado	Reservado	-	-

Fonte: IEEE 802.15.4 STD (2011).

Para aplicações de uma RSSF, é possível usar diversas frequências de operação simultaneamente. Desta forma, os muitos nodos da rede podem transmitir os dados para o destino sem causar interferências de transmissão uns aos outros. O cuidado com a distribuição dos canais de frequência aos nodos da rede contribui para um melhor ajuste da potência de transmissão dos nodos e de forma direta contribui com a economia de energia.

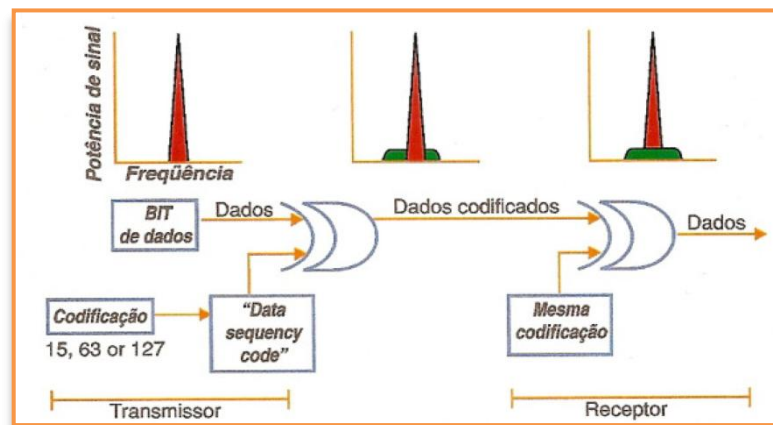
Na técnica de espalhamento do modo de transmissão DSSS, o sinal de informação é multiplicado por um sinal codificador com característica pseudorandômica, conhecido como *chip sequence* ou pseudoruído *noise* ou *PN-code* (ALBUQUERQUE, 2009). Assim, cada bit é representado por múltiplos *chips* utilizando-se o código de espalhamento.

O sinal codificador é um sinal binário gerado em uma frequência muito maior do que a taxa do sinal de informação.

É usado para modular a portadora de modo a expandir a largura da banda do sinal de rádio frequência transmitida. Esta modulação aumenta a banda de frequência ocupada pelo sinal, o que significa o espalhamento deste sinal na frequência. No receptor, o sinal de informação é recuperado através de um processo complementar, usando um gerador de código local similar e sincronizado com o código gerado na transmissão.

Além dessas características, a camada física é responsável por uma série de serviços, tais como a ativação e desativação do rádio, seleção da frequência do canal, transmissão e recepção dos dados, detecção de níveis de energia no canal, medição da qualidade do enlace LQI para os pacotes recebidos e verificação da ocupação do canal para o gerenciamento do acesso ao canal via CSMA-CA (HOWITT; GUTIERREZ, 2003). A métrica da detecção de energia do canal é usada pela camada de rede como parte do algoritmo de seleção de canal.

Figura 13 - Modo de Transmissão DSSS



Fonte: Albuquerque (2009).

Corresponde a uma estimativa da potência do sinal recebido dentro da largura de banda do canal IEEE 802.15.4. A métrica LQI é uma caracterização da intensidade e da qualidade dos pacotes recebidos. A métrica pode ser implementada usando detecção da energia do canal, uma estimativa da relação sinal-ruído ou uma combinação desses métodos.

A métrica LQI é apresentada como uma variável inteira de 8 bits. Os valores máximos e mínimos de LQI são associados aos valores de qualidade dos sinais IEEE 802.15.4 detectáveis pelo receptor.

A verificação de ocupação do canal *Clear Channel Assessment (CCA)* é executada de acordo com a configuração de um dos métodos descritos abaixo:

1. Energia acima do nível: CCA reportará o estado do meio como ocupado após detectar um nível de energia acima do nível de energia do canal;
2. Detecta somente a portadora: CCA reportará o estado do meio como ocupado após a detecção do sinal da portadora. Este sinal pode estar acima ou abaixo do nível de energia do canal;
3. Detecta portadora com energia acima do nível: CCA reportará o estado do meio como ocupado após a detecção da portadora com energia acima do nível de energia do canal.

2.10.2 Camada MAC

O *Medium Access Control* (MAC) ativa a transmissão dos pacotes de dados através do uso de um canal físico. O MAC oferece uma interface gerenciável capaz de controlar os acessos físicos de canal e de sinalização de rede.

2.10.2.1 Tipo de Nodo Sensor

O MAC é quem define o tipo de nodo, FFD ou RFD. Os dispositivos FFD são equipados com todo o conjunto de funções da camada de MAC, os quais tornam o nodo apto a ser o coordenador da rede, um roteador ou um dispositivo final de rede (SILVA, 2008). Quando a ação for de um coordenador da rede, o FFD envia *Beacons* para fornecer a sincronização, comunicação e os serviços de rede. Os RFD são dispositivos de coleta de dados e são equipados com sensores e atuadores como tradutores, chaves, lâmpadas etc. Eles interagem com os FFD e jamais com outro RFD.

Tabela 3 - Funcionalidades dos Dispositivos FFD e RFD

Dispositivo	Tipo de Dispositivo Físico (IEEE 802.15.4)	Função
Coordenador	FFD	Criação e formação de rede, atribui endereços. Existe 1 por rede.
Roteador	FFD	Permite que mais nodos se juntem a rede para aumentar o alcance. Efetua funções de controle e monitoramento. Tem existência opcional.
Dispositivo Final	RFD ou FFD	Efetua ações de controle ou monitoramento através de um dispositivo que esteja associado (sensor, controlador, atuador, etc.)

Fonte: Bonifácio (2011).

2.10.2.2 Características do MAC

A camada do MAC trata do acesso ao canal de rádio físico e é responsável por várias tarefas como a validação dos pacotes, o gerenciamento de acesso ao canal via CSMA-CA, o gerenciamento *Guaranteed Time Slot* (GTS), a validação dos frames, o reconhecimento da entrega de frames, e garante os períodos tempo dos *beacons* bem como manipula as associações e dissociações dos nodos da rede (IEEE Standard Part 15.4, LR-WPANs).

Os *beacons* são pacotes de controle que delimitam os quadros utilizados pelo coordenador para sincronizar com os demais dispositivos da rede (SILVA, 2008). Uma rede pode ser configurada com *beacon* habilitado ou desabilitado. No modo de operação com *beacon* desabilitado, o padrão IEEE 802.15.4 utiliza a técnica *unslotted* CSMA/CA, ou seja, acesso múltiplo com detecção de portadora sem janelas de tempo para controle de acesso ao meio. Em tal técnica, uma transmissão inicia com a espera por um tempo aleatório de períodos de *backoff* entre 0 e $(2^{\text{BE}} - 1)$, onde o expoente *Backoff Exponential* (BE) tem um valor entre *macMinBE* e *macMaxBE* que por padrão está entre 3 e 5, respectivamente (JANNIC TECHNOLOGY, 2008). Um período de *backoff* é o tempo necessário para transmitir 20 símbolos. Um símbolo equivale a 4 bits, se utilizar o modo de operação da camada física em 2.4 GHz (DENARDIN *et al.*, 2010).

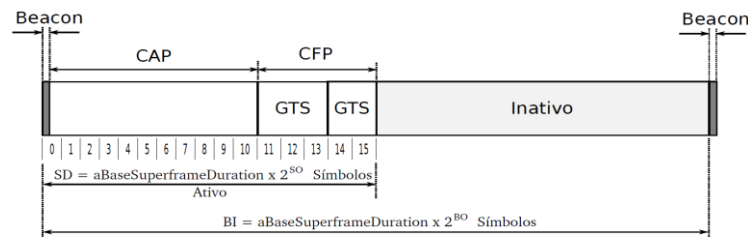
Uma vez que o tempo selecionado expira, o nodo verifica se o canal está disponível para transmissão CCA. Esse procedimento é executado no tempo de oito símbolos. Se o canal estiver ocupado, o nodo incrementa BE limitado até *macMaxBE* e repete o processo de espera. O limite de tentativas de acesso ao canal é determinado por *macMaxCSMABackoffs*; quatro tentativas é o padrão. Se, após as tentativas, o nodo não obtiver o acesso ao canal, é declarada uma falha de acesso ao canal. Se o canal estiver livre, executa-se então o procedimento de troca de recepção para transmissão e a transmissão do pacote de dados. O tempo de execução da troca de modo do rádio é de 12 símbolos.

Na transmissão de um pacote de dados, pode ser solicitada a confirmação de recebimento *acknowledgement* (ACK). O procedimento de acesso ao canal não é realizado para envio do ACK, ou seja, o nodo que recebeu o pacote simplesmente executa a troca de recepção para transmissão e envia imediatamente a confirmação do recebimento. Se ocorrer uma falha na recepção do ACK, o nodo que enviou o pacote tentará retransmitir, após a espera de um tempo conhecido por *macAckWaitDuration* 54 símbolos no modo 2,4 GHz. É declarada então uma falha de transmissão por colisão se o reconhecimento não for recebido

após um número de tentativas determinado por *macMaxFrameRetries*; três tentativas é o padrão.

Em uma rede com o modo *beacon* habilitado, o coordenador da rede transmite um *beacon* periodicamente, no qual os outros dispositivos o usam para sincronização e para determinação de quando estão liberados para transmissão e recepção das mensagens. A mensagem *beacon* é usada para definir uma estrutura chamada de *superframe* em que todos os nodos na rede são sincronizados (IEEE Standard Part 15.4, LR-WPANs).

Figura 14 - Estrutura do Super Frame utilizado pelo padrão IEEE 802.15.4



Fonte: IEEE 802.15.4 STD (2011).

A estrutura *superframe* é limitada pelos *beacons*. Nesta estrutura, existe um período ativo durante o qual a comunicação é processada e um período inativo opcional, que, durante o qual, os dispositivos podem desligar seus rádios transceptores para conservar energia. O período ativo é dividido em 16 períodos de tempo iguais chamado de *slots*.

Imediatamente após o *beacon*, vem o período de acesso de contenção *Contention Access Period* (CAP). Durante este período, os dispositivos devem se comunicar usando o mecanismo *slotted* do CSMA-CA. Esta técnica é similar ao *unslotted* CSMA-CA, exceto pelo fato de que os períodos de *backoff* são alinhados com os limites dos *slots* (ZHENG *et al.*, 2004). O CAP deve conter, pelo menos, oito períodos ativos, mas pode chegar a até 16. Seguindo o CAP, existe um opcional período livre de contenção *Contention Free Period* (CFP), que pode ter até sete períodos ativos. Em um CFP, o coordenador reserva períodos *Guaranteed Time Slot* (GTS) para um determinado dispositivo. Durante um GTS, um dispositivo tem acesso exclusivo ao canal e não executa CSMA-CA (SILVA, 2008).

A estrutura do *superframe* é definida pelos valores dos atributos *macBeaconOrder* (BO) e *macSuperframeOrder* (SO) (JANNIC TECHNOLOGY, 2006). O intervalo de tempo no qual o coordenador transmitirá seus quadros *beacon* é definido como *Beacon Interval* (BI) e se relaciona com o parâmetro *macBeaconOrder* (BO) da seguinte maneira:

$$BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{BO} \text{ Símbolo} \quad (1)$$

$$0 \leq BO \leq 14 \quad (2)$$

Onde: *aBaseSuperframeDuration* é igual a 960 símbolos.

Se $BO=15$, o *superframe* não existirá e o valor de SO é ignorado. O atributo do MAC SO define o comprimento da porção ativa do *superframe* (ZHENG; LEE, 2004). O intervalo de tempo relativo à parte ativa do *superframe*, o *Superframe Duration* (SD) se relaciona com o parâmetro SO da seguinte maneira:

$$SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{SO} \text{ Símbolos} \quad (3)$$

$$0 \leq SO \leq BO \leq 14 \quad (4)$$

Para valores iguais de SO e BO , a duração do *superframe* será igual à duração do *beacon* e, neste caso, não existirá a parte inativa do *superframe*. A porção ativa de cada *superframe* possui uma duração igual à $aBaseSlotDuration * 2^{SO}$, onde *aBaseSlotDuration* é igual a 60 símbolos.

Consoante a tais diretrizes, as redes que optarem por usar a estrutura *superframe* configurarão o atributo BO com um valor entre 0 e 14 e o *macSuperframeOrder* com um valor entre 0 e o valor de BO . Além disso, tais redes utilizam a técnica *slotted CSMA-CA* durante o período CAP para enviar seus quadros.

O algoritmo *slotted CSMA-CA* também é baseado em uma unidade de tempo chamada de *Backoff Period* (BP), que é igual à *aUnitBackoffPeriod* e é igual a 80 bits ou 0.32 ms de tempo. Este algoritmo depende principalmente de três variáveis:

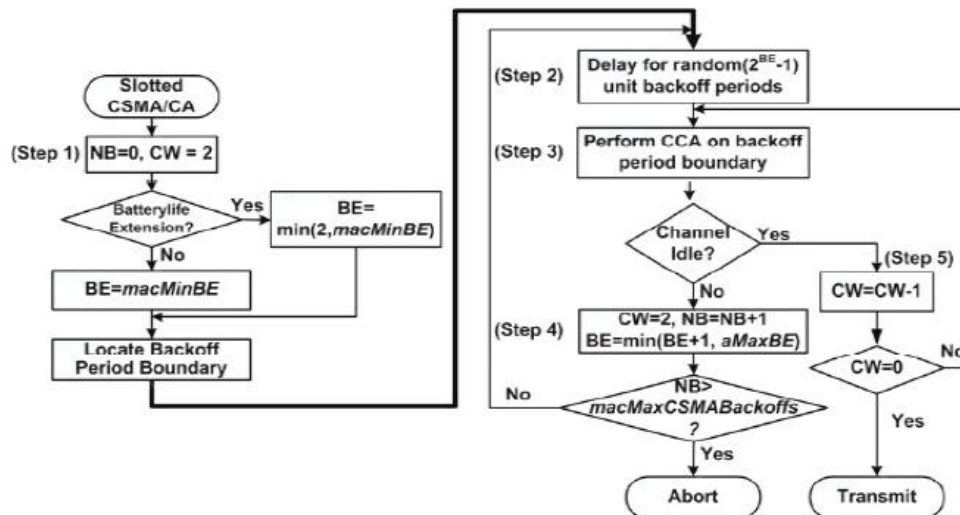
1. O *BE*, que permite a computação do atraso *Backoff*;
2. O *Contention Window* (CW), que representa o número de BPs durante o qual o canal deve ser sentido inativo antes de acessar o canal;
3. O *Number of Backoff* (NB), que representa o número de vezes que o algoritmo *CSMA-CA* foi requisitado enquanto tentava acessar o canal (KOUBAA *et al.*, 2006).

Inicialmente, o NB e o CW são inicializados com NB igual a zero e CW igual a 2. O BE é também inicializado com o valor de 2 ou BE assume o valor mínimo entre 2 e $macMinBE$, dependendo do valor da extensão de vida da bateria.

O $macMinBE$ é uma constante e tem valor padrão igual a 3. O algoritmo inicia também um contador de número randômico para a variável BP que, uniformemente, calcula o valor entre 0 e $2^{BE} - 1$. O contador deve iniciar no limite do BP para garantir sincronismo.

Quando o cronômetro expirar, o algoritmo executa a operação CCA aos limites BPs para avaliar a atividade do canal. Se o canal estiver ocupado, CW é reinicializado para CW_{ini} igual a 2, e os parâmetros NB e BE são incrementados. BE não deve exceder a $MaxBE$ valor padrão fixado em 5. Se o número máximo de *backoff* (NB) for igual a $macMaxCSMABackoffs$, o algoritmo informa uma falha para as camadas de cima. Caso contrário, volta para o passo 2, ou *step 2*, e a operação de *backoff* é reiniciada. O protocolo também permite um número de tentativas depois de cada fracasso que corresponde ao $aMaxFrameRetrie$, onde padrão é igual a 3.

Figura 15 - Algoritmo *slotted CSMA/CA*- IEEE 802.15.4



Fonte: Koubaa *et al.* (2006).

Uma vez que o canal estiver ocioso, CW é decrementado. A operação CCA é repetida se CW for diferente de 0. Se o canal é sentido novamente como inativo, o nodo tenta transmitir desde que o restante do BPs no atual CAP seja suficiente para transmitir o quadro e o reconhecimento subsequente. Caso contrário, o CCA e o quadro de transmissão são ambos diferidos para o próximo *superframe*. Isto é chamado de deferência de CCA. Mediante a isso, em redes com quadros de sinalização para sincronismo, o mecanismo *slotted CSMA-CA* deve

ser criteriosamente avaliado, uma vez que seu comportamento é afetado por seus parâmetros de inicialização. Tais parâmetros correspondem (CALLAWAY *et al.*, 2002):

1. O mínimo *backoff exponent* (*macMinBE*);
2. O máximo *backoff exponent* (*aMaxBE*);
3. O valor inicial do CW (CW_{ini});
4. O número de máximo de *backoffs* (*macMaxCSMABackoffs*).

Finalmente, o MAC oferece ligação também para serviços seguros (BARONTI *et al.*, 2006; IEEE 802.15.4 STD, 2011).

2.10.3 Camada de Aplicação

A tecnologia do IEEE 802.15.4 é usada para várias diferentes camadas regulamentadas. Desta maneira, a camada física e a camada do MAC já têm regras claras e definidas pelo padrão IEEE, deixando as camadas superiores do protocolo para serem programadas individualmente. Na Tabela 4, é possível observar a descrição de algumas aplicações já conhecidas.

Tabela 4 - Aplicações / Sistemas

Aplicação ou sistema	Descrição do IEEE 802.15.4 Aplicação ou sistema
Zigbee	Zigbee tem o suporte da Zigbee Alliance e fornece os níveis altos requeridos para um sistema com rádio de baixa potência de transmissão para controlar aplicações como, por exemplo, iluminar, aquecer, etc.
Wireless HART	Wireless HART é um padrão aberto para redes sem fio que foi desenvolvido pela HART <i>Communication Foundation</i> para o uso na banda 2,4 GHz ISM. O sistema usa o IEEE 802.15.4 para as camadas inferiores e fornece o tempo de sincronização, a auto-organização e a regeneração na arquitetura mesh.
RF4CE	RF4CE <i>Radio Frequency for Consumer Electronics</i> é uma fusão com Zigbee Alliance com o objetivo de atender controle de rádio de baixa potência para aplicações de áudio visual, principalmente para aplicações domésticas.

MIWI	O sistema MIWI bem como MIWI - P2P ambos foram projetados pela <i>Microchip Technology</i> . Foram criados para atender a baixa taxa de transmissão de dados e para pequenas distâncias, com o objetivo de atender aplicações industriais como, por exemplo, monitoramento e controle, automação residencial, controles remotos e leitura automática de medições.
ISA100.11a	Este padrão foi desenvolvido pelo Grupo ISA e é um padrão de rede sem fio com tecnologia aberta. Foi desenvolvido para sistemas de automação industrial sem fio incluindo processos de controle e aplicações relacionadas.
6LoWPAN	Este padrão foi criado para utilizar IPV6 com redes de sensores sem fio <i>Low-Power Wireless Personal Area Networks</i> . É um sistema que usa como base o padrão IEEE 802.15.4 porém com pacotes de dados do IPV6.

Fonte: O Autor, baseado em Hunn (2010).

2.10.4 Rotas no Padrão IEEE 802.15.4

O descobrimento de rota é um procedimento no qual os nodos de rede colaboram para encontrar e estabelecer rotas. O descobrimento de rota *unicast* sempre é realizado com relação a um determinado dispositivo nodo RFD ou FFD de origem a um destino em particular. O descobrimento de rota em *multicast* é realizado a partir de uma determinada origem de dados para um grupo de nodos utilizando múltiplos trajetos (ZIGBEE SPECIFICATION, 2008).

Descobrimento de rotas muitos para um ou *many-to-one* é usado pelo nodo de origem para estabelecer rotas entre os nodos RFD e FFD até atingir o nodo coordenador da rede dentro de um determinado raio. O nodo que inicia o descobrimento de rota *many-to-one* é designado como um coordenador e é referido como tal. O endereço de destino pode ser um endereço em broadcast, ou um endereço de uma determinada rede em particular, ou ainda, um endereço em *multicast*. Em um comando de requisição de rota, o endereço de destino é um endereço de rota de um determinado dispositivo nodo RFD ou FFD em particular, no qual, se o campo de opção *request route* não estiver o Bit de *multicast* ligado, a requisição é *unicast*. Portanto, para que o dispositivo nodo faça a requisição em múltiplos caminhos, o bit *multicast* deve estar ligado. No campo de endereçamento, o destino de uma requisição de rota de múltiplos caminhos este deve conter o ID do grupo.

Após o recebimento do frame com comando de requisição de rota, se o nodo não é um dispositivo final RFD, então, é testada a existência de capacidade de roteamento. Se o frame da solicitação de comando de requisição de rota não foi recebido por um caminho válido,

então o frame é descartado. Caso contrário, o dispositivo nodo deve verificar se o frame é para o destino designado.

Também existe a necessidade de ser verificado, se o destino do frame de comando é um dos nodos filhos, comparando o campo de endereço do destino do comando de rota requerida, com o endereço de cada dispositivo final RFD ou FFD, se houver. Se o FFD ou um RFD filho é o dispositivo nodo de solicitação de rota, então, um comando de *replay* será gerado para responder o entendimento para a rota. Quando uma resposta acontece com origem em um comando de requisição de rota, o dispositivo nodo cria um frame com o campo *frame type field* com o valor em hexadecimal de 0x01. O endereço de origem da rota de resposta deve ser definido como um endereço de rede de 16 Bits do nodo, criando uma rota de resposta, e o endereço do destino deve ser definido para calcular o próximo salto, considerando que o originador da requisição de rota é o nodo de destino.

O custo do *link* do dispositivo nodo FFD ou RFD do próximo salto deverá ser calculado e inserido no campo custo do caminho no frame do comando de resposta. A rota do frame do comando de resposta deve ser *unicast*, ou seja, ter um único caminho entre a origem e o destino. Se o dispositivo nodo FFD não for o dispositivo do destino, então, será calculado o valor do custo do caminho e adicionado ao valor gravado no frame, de forma que, ao chegar ao destino, todos os dispositivos nodos FFD e RFD tenham contribuído com o custo do caminho. Ao criar a entrada na tabela de descoberta de rotas, os campos são definidos para corresponderem aos valores da requisição do frame de comando. A única exceção é o campo *forward cost*, o qual é determinado usando o valor do remetente anterior do frame de comando para calcular o custo do *link*. O resultado final é uma tabela com o custo do caminho de cada nodo da rede.

2.10.5 Custo do Roteamento

O algoritmo de roteamento do protocolo IEEE 802.15.4 usa como métrica de avaliação para a organização da rede o custo do caminho dos dados *path cost*, comparando os valores de custo durante o descobrimento ou manutenção das rotas. De fato, para calcular a métrica de custo do caminho, o custo do *link* de cada nodo deve ser também conhecido. Por fim, o somatório dos custos dos *links* de cada nodo sensor que estão na rota entre a origem e o destino compõe o valor final que será o custo do caminho.

Mais formalmente, se definir um caminho *Path* (P) de comprimento (L) de um conjunto ordenados de dispositivos nodos $[d_1, d_2, \dots, d_L]$ e um *link* $[d_i, d_{i+1}]$ como um sub caminho de tamanho 2, então, o custo do caminho será:

$$C(P) = \sum_{i=1}^{L-1} C\{[d_i + d_{i+1}]\} \quad (5)$$

Onde cada um dos valores $C\{[d_i, d_{i+1}]\}$ se refere ao custo do *link*. O custo do *link* $C(L)$ para um *link* (L) é uma função com intervalos entre $[0 \dots 7]$ definida como (ZIGBEE SPECIFICATION, 2008):

$$C(L) = \begin{cases} 7, \\ \min(7, \text{round}(\frac{1}{p_L^4})) \end{cases} \quad (6)$$

Onde (p_L) é definido como a probabilidade de envio dos pacotes pelo *link*(L). Assim, os implementadores poderão reportar o valor de fixo de 7 para o custo do *link*, ou eles poderão reportar o valor que reflete a probabilidade (p_L) da recepção do sinal. Poderão também especificamente indicar um número de tentativas requeridas a obter o pacote de dados através do *link* a cada vez que o *link* for usado. O nodo que oferece as duas opções talvez seja forçado a informar um valor constante para o *link*, definindo o valor do atributo *nwkReportCostantCost* como verdadeiro. O *Network Information Base* (NIB) compreende de um conjunto de atributos do protocolo ZigBee para gerenciar a camada de rede.

Se o *nwkSymLink* atributo do NIB for um valor verdadeiro, então, o atributo *nwkReportCostantCost* deve ter um valor falso e a camada de rede deve calcular o valor do custo do roteamento da maneira como foi descrita.

A estimação ou medida de (p_L) é uma questão de implementação, e os programadores estão livres para desenvolver suas métricas. O método mais franco e disponível é a estimação baseada em uma média dos valores do LQI oferecido pelo padrão do IEEE 802.15.4.

Mesmo que outros métodos sejam usados, o custo inicial estimado deve ser baseado no valor do LQI. A função *table-driven* pode ser usada para mapear os valores de LQI para calcular custo do *link* $C(L)$.

É extremamente recomendado que programadores que implementem novos algoritmos para custo, que verifiquem e testem os resultados produzidos pelos algoritmos, antes de

fabricar novos hardware, pelo fato que custos calculados de forma inadequada podem dificultar o roteamento do algoritmo do ZigBee.

2.10.6 Indicador de Qualidade do *Link*

O valor indicador de qualidade do *link* LQI é usado pelo roteador para selecionar a melhor rota para o próximo salto *next hop*. O LQI é medido usando o RSSI ou a relação sinal ruído S/N ou ainda a taxa de erro do pacote PER e, por último, pode-se usar a combinação entre os métodos. Cada fabricante de módulos nodos, como o ZigBee, por exemplo, usa diferentes métodos para medir o LQI do sinal de entrada. A Texas Instruments usa a combinação do RSSI com o S/N como um valor de correlação para indicar a qualidade do sinal.

Para a Chipcon CC2420 *chiset* e para ATML Corporation, o PER é a medida da qualidade do sinal de entrada LQI. O PER é calculado pela seguinte equação, onde BER é a taxa de erro:

$$\text{PER} = 1 - (1 - \text{BER})^N \quad (7)$$

O PER e o RSSI são uma função da distância do nodo. Entretanto, o LQI é um valor estimado da qualidade do link. O LQI está representado por uma variável de 8 Bits, com 0 significando a qualidade mais baixa do sinal e 255 a qualidade mais alta do sinal de entrada.

A camada física calcula o LQI para cada pacote recebido e passa o resultado para a camada de MAC usando a primitiva *PD-Data.indication*. A camada MAC pode usar este resultado até para a seleção do canal.

Em uma rede de sensores sem fios, o *Received Signal Strength* (RSS) é convertido para indicação da qualidade do sinal recebido RSSI e é representado em decibéis dBm, onde P_R é apresentado em mW:

$$\text{RSSI} = 10\text{Log } P_R \text{ em dBm} \quad (8)$$

2.11 NODO SENSOR

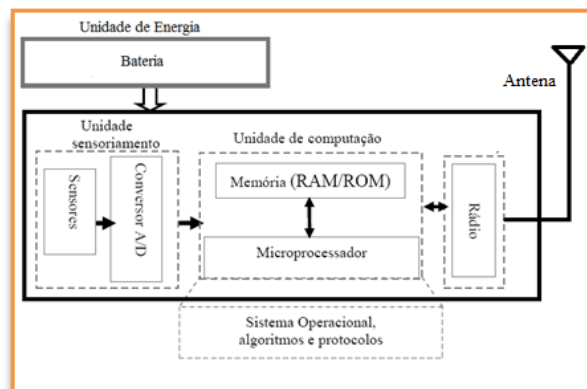
O nodo sensor é uma entidade da rede que tem como função a medição de um fenômeno para futuras análises. Internamente ao nodo sensor, encontra-se um processador, um circuito de rádio para estabelecer comunicação, uma memória de armazenamento e a fonte de energia, a qual normalmente é uma bateria.

Através de uma leitura medida de um determinado fenômeno, em uma região onde o sensor está posicionado, o nodo sensor coleta e repassa a informação, de forma a alcançar o destino programado. Para realizar a coleta das informações, como, por exemplo, a umidade, a temperatura e o movimento, um grande número de nodos sensores podem ser distribuídos em uma determinada área de interesse.

Os nodos sensores podem se comunicar, enviando e recebendo as informações diretamente entre a origem e o destino, ou mesmo através da propagação dos dados por outros nodos sensores na rede. Portanto, cada nodo sensor também pode agir como se fosse um roteador dentro da rede. Os principais componentes de um nodo sensor são:

1. Unidade de comunicação sem fio;
2. Unidade de energia;
3. A memória interna;
4. Unidade de computação;
5. Unidade de sensoriamento (WINKLER *et al.*, 2008).

Figura 16 - Exemplo de composição de um nodo sensor



Fonte: O Autor, baseado em Viera, Da Silva e Da Mata (2003).

2.11.1 Unidade de Energia

Em geral, baterias de energia finita são utilizadas como fontes de energia dos nodos sensores. Existem diferentes tecnologias de fabricação, referindo-se ao consumo de energia. A escolha da bateria a ser utilizada nos nodos sensores deve considerar algumas características como volume e peso, condições de temperatura e capacidade inicial de carga. Os tipos mais comuns de bateria dos nodos sensores são:

1. Linear simples;
2. Lítio NR;
3. Lítio *Coin Cell*.

Para RSSF, uma fonte de energia contínua e disponível no ambiente é de grande importância. É possível observar que células solares podem contribuir com 15 mW por centímetro quadrado (WINKLER *et al.*, 2008) se expostas diretamente ao sol, e com 0,15 mW em dias nublados. Este tipo de fonte de energia poderia contribuir para repor a carga das baterias e prolongar o tempo de vida útil do nodo sensor e de uma determinada RSSF. Para algumas aplicações, como em ambientes fechados, o uso de energia solar não pode ser aplicado por não gerar energia suficiente. Para conhecer a quantidade de energia da bateria, é possível, por exemplo, fazer uso de uma variável da memória do nodo sensor responsável por conter a informação da quantidade de energia da bateria. Esta informação é útil para futuros cálculos no gerenciamento da energia de um agrupamento de nodos sensores monitorando um determinado evento.

2.11.2 Unidade de Comunicação

A unidade de comunicação inclui todo o sistema de transmissão, recepção, o amplificador e a antena. Os dois tipos de comunicação mais utilizados nas arquiteturas de nodos sensores são (SILVA *et al.*, 2005):

1. Óptico laser: o transmissor utiliza um feixe de raios laser para enviar a informação. Pode ser dividida em ativa e passiva. Tem como principal vantagem o baixo consumo de energia e como desvantagem a necessidade de que os nodos estejam direcionados e alinhados;

2. Rádio Frequência (RF): baseado em ondas eletromagnéticas com frequência variando até dezenas de GHz. O tamanho da antena deve ser calculado de acordo com a frequência de operação, para aperfeiçoar a comunicação. O consumo de energia do transceptor é dependente da operação efetuada. Tipicamente, a transmissão de dados consome mais energia que a sua recepção. Nesta unidade, pode-se obter variáveis importantes para a equalização do consumo de energia. O PHY pode fornecer o nível da potência que se empregará para a transmissão dos dados, além do nível do sinal de recepção e da frequência do canal do transceptor.

Desta forma, a análise das variáveis fornecidas na unidade de comunicação pode ser utilizada no contexto deste trabalho, dentro da técnica a ser proposta. Pode-se calcular a potência necessária na rede, evitando desperdícios de energia, e contribuindo para uma menor interferência.

2.11.3 Unidade de Computação

A unidade de processamento pode ser definida como sendo a maneira pela qual os dados de entrada serão organizados, modificados, transformados ou agrupados de alguma forma, gerando, assim uma informação de saída. A CPU manipula um conjunto de instruções que faz com que o nodo sensor realize o processamento e produza o resultado desejado. A memória é um componente que tem por função armazenar internamente todas as informações que são manipuladas pelo nodo sensor através dos programas (conjunto de instruções). A capacidade do programa é uma característica que permite o processamento dos dados. A memória e o processador estão envolvidos diretamente no processamento realizado pelo nodo sensor. Quanto maior a frequência do processador, maior a energia necessária para realizar as tarefas. Algumas das características dos processadores utilizados em nodos sensores são:

1. Operar em baixas frequências;
2. Possuir um baixo consumo de energia;
3. Possuir baixa capacidade de armazenamento (WINKLER *et al.*, 2008).

A atividade do processador sem dúvida é uma das variáveis que podem ser usadas para medir o consumo de energia.

2.11.4 Unidade de Sensoriamento

Um sensor é um dispositivo que produz uma resposta mensurável para uma mudança na condição física (e.g., temperatura, pressão, campo magnético, estresse mecânico, presença ou ausência de movimento, áudio, vídeo, etc.).

Dispositivos sensores geralmente têm características físicas diferentes. Assim, variados modelos de nodos sensores, de complexidade variável, e podem ser construídos baseados nas necessidades das aplicações (WINKLER *et al.*, 2008).

2.12 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Tendo em vista os protocolos apresentados e suas generalidades, atributos de entrada e saída, limitações quanto a topologias, consumo de energia, fluxo de dados, características comportamentais e de desempenho, a ideia é apresentar uma técnica capaz de modificar individualmente o comportamento de cada nodo sensor a partir da análise dos pacotes de dados e da energia consumida por um determinado caminho de transmissão.

Baseada a partir da eficiência da recepção dos pacotes de dados, da perturbação no caminho dos dados e na frequência de envio dos pacotes pela rede, a técnica visa descobrir o desempenho na transmissão dos dados instrumentados em cada caminho da rede, ajustando a potência de transmissão de forma adequada. Além disso, poderá ser usada em conjunto com qualquer das técnicas de roteamento de dados, contribuindo na economia de energia e até na decisão da escolha de uma determinada rota.

3 PROPOSTA

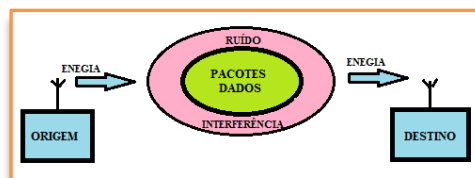
Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de uma técnica, que visa minimizar a energia consumida nos caminhos de uma RSSF através do uso de parâmetros obtidos a partir dos nodos sensores da rede em nível de aplicação. Baseada e implementada através de um algoritmo, a *Path Energy Control Technique* (PECT) pode enviar os pacotes de dados entre a origem e o destino utilizando uma potência de transmissão ideal, ou seja, uma potência de transmissão capaz de transportar os pacotes de dados entre a origem e o destino com o consumo de energia necessário, e ainda ter a diminuição da interferência entre os nodos de forma a aumentar a eficiência na recepção dos pacotes de dados.

3.1 ESPECIFICAÇÃO

Para o entendimento da técnica a ser proposta, faz-se necessário, em um primeiro momento, explorar a ideia da transmissão dos pacotes de dados no ambiente de rede.

A Figura 17 apresenta o ambiente hipotético da transmissão de um pacote de dados, mostrando a energia lançada através da antena do nodo origem, o pacote de dados em si navegando em meio a ruídos e interferências, e a resultante da energia que é recebida pelo nodo de destino.

Figura 17 - Transmissão de Pacote de Dados



Fonte: O Autor.

A especificação da técnica proposta nesta dissertação considera as seguintes premissas:

1. A implementação ocorre em nível de usuário, o que garante a portabilidade do mesmo;
2. O ajuste da potência de transmissão utiliza a variável RSSI do nodo sensor;
3. O cálculo energia para transportar os dados através das interferências da RSSF;

4. O ajuste individual da potência dos nodos da rede para transportar a informação ao próximo destino.

3.2 TRÁFEGO DA REDE

O tráfego de rede é uns dos fatores considerados importantes para este trabalho, e diz respeito a saturação do envio e da recepção de pacotes na rede. A saturação da rede ou de um determinado caminho da rede estabelece um limite na quantidade de pacotes enviados de um ponto a outro na rede, por um determinado tempo, que é definido por Limite de Tráfego dos Pacotes Dados (LTPD).

Quando o tráfego de dados atinge este limite, provoca desperdício de energia, causando a perda de pacotes de dados, e o processamento de pacotes de dados indesejável na CPU do nodo sensor.

A técnica proposta explora o estudo desse limite de tráfego de pacotes de dados de forma a não prejudicar o desempenho da rede, ajustando a frequência de envio dos pacotes de dados (FPkt) para usar a máxima frequência permitida, antes de iniciar a saturação na troca de informações. Para o ajuste da FPkt, é necessário conhecer a quantidade de nodos vizinhos da rede (Q_n), os quais transmitem pacotes de dados. Portanto, a quantidade de nodos sensores Q_n e a frequência de transmissão dos pacotes de dados FPkt definem o tráfego dos pacotes de dados.

A definição quantidade de nodos vizinhos de uma rede Q_n é função que reflete diretamente na eficiência de envio de pacotes de dados na rede. As limitações do processamento das informações no nodo sensor e a própria velocidade de transmissão da rede de 250kbps no protocolo IEEE 802.15.4 impõem um determinado limite máximo de pacotes de dados que um nodo poderá processar.

3.3 EFICIÊNCIA

Neste trabalho, a eficiência (E_f) é uma métrica da capacidade de um pacote de dado alcançar o destino. Na Figura 18, é possível observar a eficiência como uma das coordenadas do gráfico apresentado. O resultado da eficiência foi obtido medindo-se a quantidade de pacotes que o nodo mestre recebeu em função da quantidade de pacotes que efetivamente os nodos sensores deveriam ter transmitido.

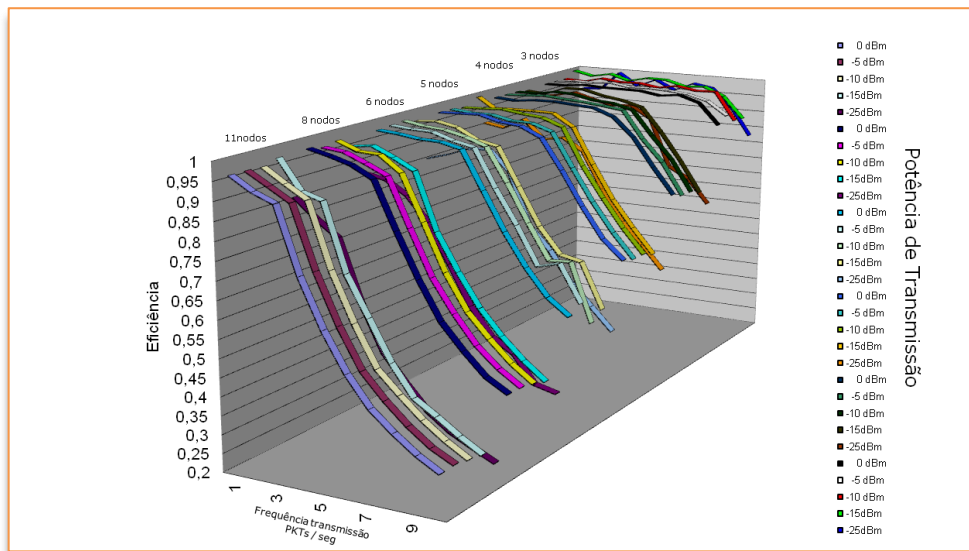
Portanto, se em uma rede tem cinco nodos transmitindo com uma frequência de cinco pacotes por segundo durante 50 s, por exemplo, a mesma rede tem um total 1250 pacotes transmitidos. Se o nodo mestre, que está recebendo os pacotes de dados, receber apenas 1000 pacotes, por exemplo, tem-se que:

$$Ef = \text{Pacotes Recebidos/Pacotes Transmitidos} \quad (9)$$

$$Ef = \frac{1000}{1250} = 0,80 \quad (10)$$

O valor de 0,80 mostra que 80% dos dados enviados alcançaram o destino e isto é definido como Eficiência (Ef).

Figura 18 - Eficiência da rede



Fonte: O Autor.

Para avaliar a métrica de eficiência, foi analisada a recepção dos pacotes de dados em um determinado período, variando os seguintes parâmetros:

1. A potência de transmissão;
2. A quantidade de nodos sensores transmitindo mensagens;
3. A frequência de transmissão.

Como resultado, é possível observar o limite de recepção dos pacotes que se aproxima a uma frequência de recepção de 30 Pkt/s. Nota-se que, com o aumento da quantidade de nodos sensores transmitindo, faz-se necessária a diminuição da frequência de envio dos pacotes de dados aos nodos sensores de forma a não saturar a recepção do nodo coordenador.

A Equação (11) exemplifica o limite de tráfego da rede.

$$\text{LTPD} = Q_n * \text{FPkt} \quad (11)$$

Onde:

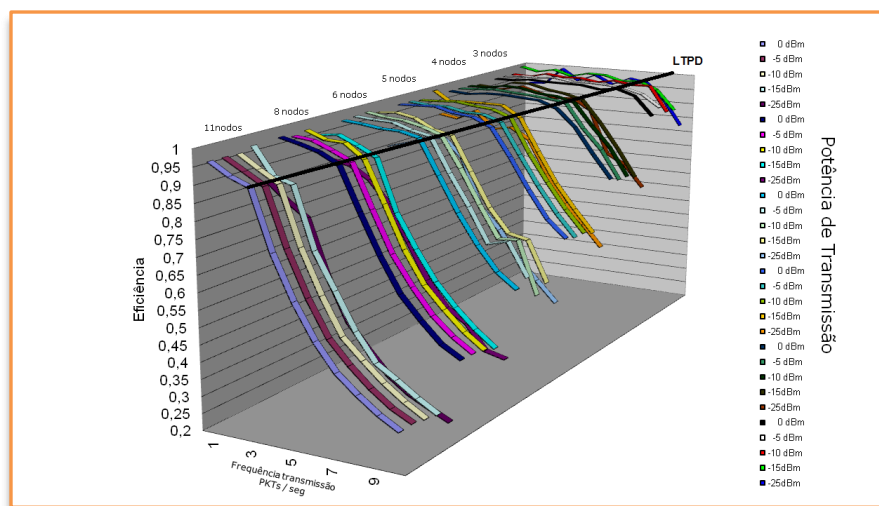
LTPD é o limite de tráfego dos pacotes de dados por segundo;

Q_n é o número de nodos sensores transmitindo;

FPkt é a frequência de envio das mensagens em pacotes por segundo (Pkt/s).

Na Figura 19, é possível observar o ponto de saturação no recebimento dos dados pelo nodo mestre, à medida que a frequência de transmissão dos pacotes de dados aumenta e, portanto, a diminuição da eficiência em função do aumento do tráfego de dados na rede. Em mais detalhes, é possível visualizar o ponto onde se inicia a perda acentuada de eficiência.

Figura 19 - Limite de tráfego pacotes dados (LTPD)



Fonte: O Autor.

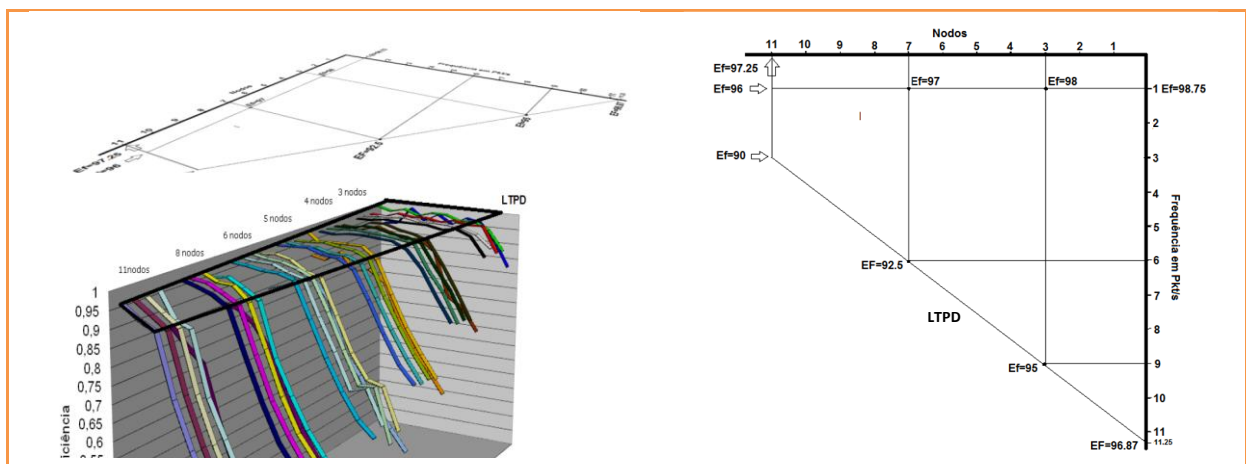
Note que o LTPD pode sofrer variações dependendo dos parâmetros que configuram os nodos sensores da rede. Assim, no experimento realizado, foi utilizada uma velocidade de transmissão de 250 kbps, e certamente se esta velocidade for alterada, o LTPD é diferente

daquele encontrado. Parâmetros como o tamanho da mensagem, ou o uso de técnicas como o GTS do protocolo IEEE 802.15.4, certamente modificam o LTPD. Convém mencionar que a ideia é demonstrar uma forma simplificada que visa encontrar a potência de transmissão adequada para cada nodo que, por sua vez, resulte no menor consumo de energia e de uma menor perda no envio dos pacotes de dados.

Outro aspecto importante observado nos experimentos foi a variação da potência. Nota-se que mesmo com potências diferentes a variação da eficiência não é alterada significativamente até o início do limite LTPD.

Considerando a economia de energia, quanto maior for E_f , menor será o desperdício, porque, de fato, todos os pacotes de dados transmitidos chegariam ao destino. Para calcular a E_f , foi usada uma área delimitada no gráfico da Figura 20, onde se encontra o plano que representa a eficiência com as diversas combinações dos parâmetros de entrada e não ultrapassando o limite LTPD. A Figura 20 representa a linearização da área de eficiência para fins de cálculo.

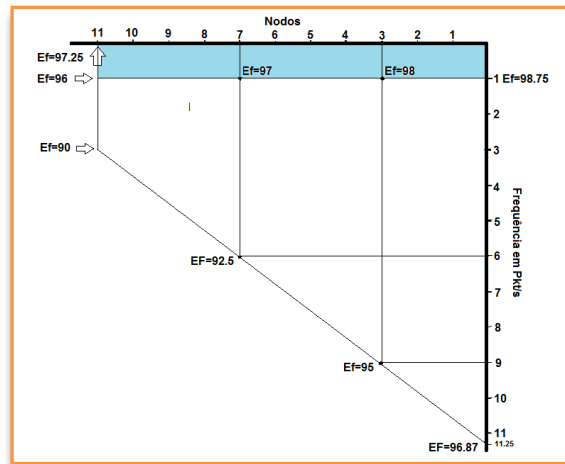
Figura 20 - Área de eficiência



Fonte: O Autor.

Em mais detalhes, é possível visualizar qual a relação entre o número de nodos e a frequência de transmissão na variação do percentual de eficiência. Nota-se que a área do plano da Figura 20 tem origem em uma superfície em curva, portanto, para calcular os pontos de E_f com maior exatidão dentro desta área, foi necessário linearizar o gráfico dividindo em duas áreas distintas. Para baixas frequências de envio, ou seja, FP_{pkt} menor que 1 Pkt/s, será representado por um retângulo, como mostra a Figura 21.

Figura 21 - Área de Eficiência Frequência < 1Pkt/s



Fonte: O Autor.

Na Figura 21, a variação frequência de 1 Pkt/s até 1 pacote de dados por infinitos segundos. Neste intervalo da frequência, a variação da eficiência está próxima de 1% em todo o eixo da quantidade de nodos Q_n e, portanto é possível calcular a E_f no ponto de zero frequência. Isto simplifica a equação de cálculo da E_f introduzindo pequenos erros que não comprometem o resultado final. A eficiência pode ser calculada conforme a Equação 12:

$$E_f = 100 - (\alpha * Q_n) \quad (12)$$

Onde :

E_f é a Eficiência dos pacotes de dados;

α é a taxa da perda de eficiência;

Q_n é a quantidade de nodos.

Assim, a taxa de perda de eficiência α , é dada pela Equação 13.

$$\alpha = \frac{E_{f_{Q_n=0}} - E_{f_{Q_n=11}}}{\Delta Q_n} \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{100 - 97,25}{11} \cong \frac{3}{11} \cong 0,25 \quad (14)$$

Portanto:

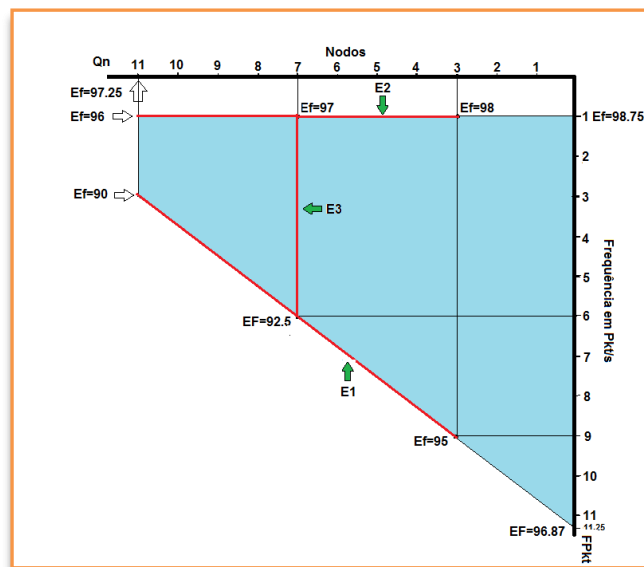
$$E_f = 100 - (0,25 * Q_n) \quad (15)$$

A Equação 15 não contém a variável da frequência de transmissão dos pacotes de dados por ter sido calculada sobre a linha do eixo da quantidade de nodos Q_n . De fato, para esta equação, cada nodo que participar da rede ocorre uma perda na eficiência 0,25%.

Define-se, então, quando a frequência de transmissão dos pacotes de dado for menor que 1 Pkt/s, o cálculo utilizado para a eficiência será como na Equação 15.

Se, no entanto, a frequência de envio dos pacotes de dados $FPkt$ for maior ou igual a 1 Pkt/s, a equação final é mais elaborada pelo fato de conter a variação de $FPkt$ no cálculo.

Figura 22 - Área de eficiência frequência > 1 Pkt/s



Fonte: O Autor.

O gráfico da Figura 22 mostra uma área delimitada em azul que representa a região onde a equação E3 poderá encontrar valores de eficiência. Os segmentos de retas que estão em vermelho, como E1 e E2, limitam o comprimento do segmento de reta da equação E3.

É possível observar, então, que com a variação do número de nodos, E3 tem parâmetros de entrada diferentes. Como o plano em azul está inclinado para facilitar o cálculo da eficiência, se dividirá equação em três etapas:

A Equação 16 calcula E1. A reta inicia no eixo que corta o nodo 11 na coordenada dos nodos e termina onde $FPkt$ tem o valor de 9 Pkt/s.

Para calcular da equação E1:

$$E1 = a * Q_n + b \quad (16)$$

Onde:

a é a taxa de variação de Q_n ;

b é o valor da eficiência quando Q_n é igual a 0.

$$a = \frac{Ef_{Q_n=3} - Ef_{Q_n=11}}{\Delta Q_n} \quad (17)$$

$$a = \frac{90 - 95}{8} = -0,625 \quad (18)$$

$$b = 96,87 \quad (19)$$

Portanto:

$$E1 = -0,625 * Q_n + 96,87 \quad (20)$$

No caso da equação E2 do gráfico da Figura 22, é a reta que inicia no eixo que corta o nodo11 na coordenada dos nodos e termina onde FPkt tem o valor de 1 Pkt/s.

A Equação 21 a seguir calcula E2:

$$E2 = a * Q_n + b \quad (21)$$

Onde:

a é a taxa de variação de Q_n ;

b é o valor da eficiência quando Q_n é igual a 0.

$$a = \frac{Ef_{Q_n=3} - Ef_{Q_n=11}}{\Delta Q_n} \quad (22)$$

$$a = \frac{96 - 98}{8} = -0,25 \quad (23)$$

$$b = 98,75 \quad (24)$$

Portanto:

$$E2 = -0,25 * Q_n + 98,75 \quad (25)$$

O cálculo da Equação 26 para E3 é um pouco diferente do anterior, ao invés de usar a quantidade de nodos, foi utilizada a frequência de envio dos pacotes de dados FPkt. Por fim, o resultado de E3 é a eficiência de recepção dos dados Ef para a FPkt maior que 1 Pkt/s.

Para cálculo da equação E3:

$$E3 = a * FPkt + b \quad (26)$$

Onde:

a é a taxa de variação de FPkt;

b é o valor de E2.

$$a = \frac{Ef_{FPkt=6} - Ef_{FPkt=1}}{\Delta FPkt} \quad (27)$$

$$a = \frac{92,5 - 97}{0,75 * Qn - 10,25} \quad (28)$$

$$b = E2 \quad (29)$$

Portanto:

$$E3 = -\frac{E1 - E2}{0,75 * Qn - 10,25} * (FPkt - 1) + E2 \quad (30)$$

$$Ef = -\frac{0,375 * Qn - 1,925}{0,75 * Qn - 11,25} * (FPkt - 1) - 0,25Qn + 98,75 \quad (31)$$

Na Equação 31, por exemplo, com a informação da quantidade de nodos envolvidos na vizinhança Qn e a frequência de transmissão dos pacotes de dados FPkt para calcular o resultado da Ef. Para o cálculo da qualidade do caminho QPth, a eficiência é parte da equação.

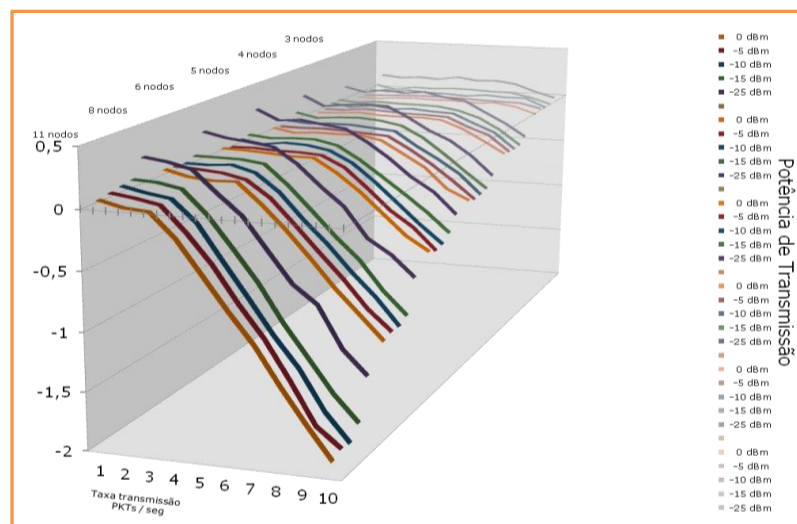
Pode-se, então, verificar que, quanto menor for a quantidade de pacotes transmitidos, menor é a energia consumida e menor será o desperdício porque todos os pacotes de dados transmitidos chegam ao destino.

3.4 PERTURBAÇÃO

Para a definição da perturbação, é necessário em um primeiro momento explorar a ideia dos pacotes de dados que são transmitidos para o destino final. Uma grande maioria dos pacotes é perdida por interferências de muitos tipos, tais como, colisões, potência de transmissão inadequada, entre outros. Este tipo de situação dificulta a transmissão entre origem e o destino. Desta forma, os nodos sensores da rede necessariamente precisam transmitir uma quantidade de pacotes de dados acima da ideal para que todas as mensagens cheguem corretamente ao destino.

Portanto, é possível definir que a perturbação da rede (Ptb) é quando a quantidade de pacotes transmitidos é maior que a quantidade real a ser transmitida entre a origem e o destino. Na Figura 23, é possível observar a perturbação dos pacotes de dados considerando o nodo transmissor. Para a análise da perturbação, foi utilizada a mesma base de dados do cálculo da eficiência.

Figura 23 - Perturbação na transmissão

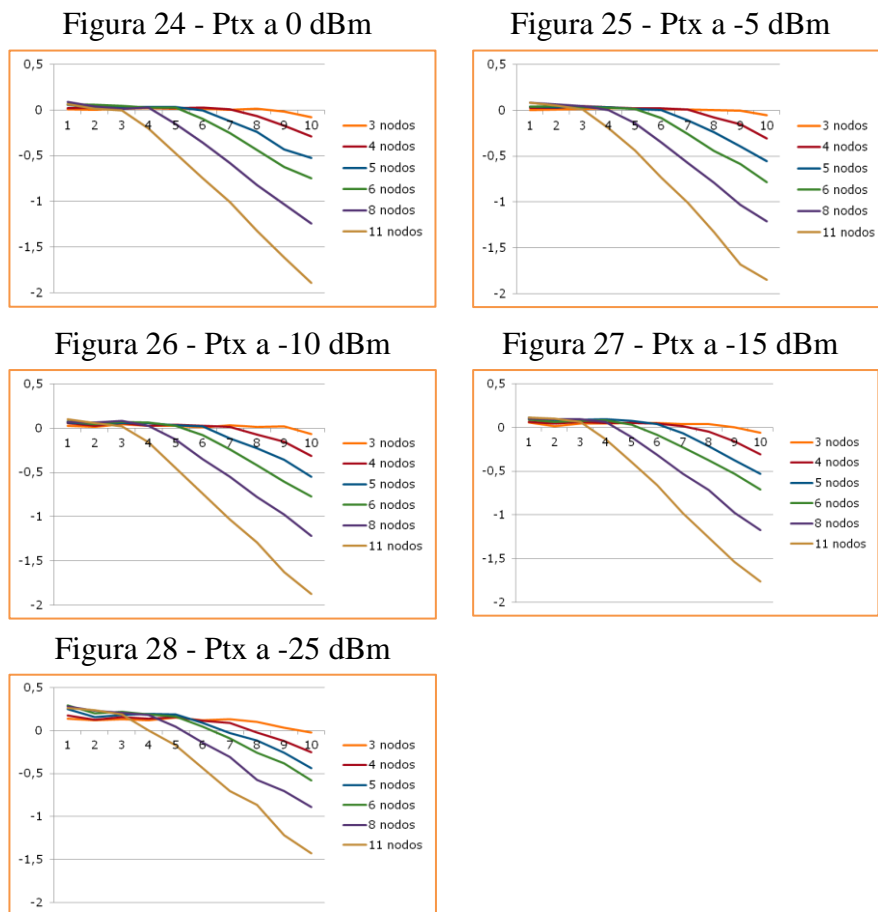


Fonte: O Autor.

No gráfico, é possível observar a perturbação da transmissão dos pacotes de dados. Quanto mais próximo de zero estiver esta métrica, melhor o desempenho na transmissão dos dados, ou seja, todos os pacotes foram transmitidos. Um valor negativo tem como significado que a rede atingiu o LTPD e, a partir deste ponto, não será mais possível enviar pacotes de dados para o nodo de destino.

Um valor positivo mostra perda de pacotes de dados por interferência e/ou por pouca potência, evitando que as informações alcancem o destino final. Curiosamente, o gráfico é semelhante ao apresentado na recepção dos pacotes, exibindo uma perda da transmissão do envio de pacotes de dados quando a rede atinge cerca de 30 pacotes por segundo LTPD.

Nas Figuras 24 a 28, é possível observar nos gráficos a perturbação na transmissão, mais detalhadamente, o ponto onde a rede atinge o limite de transmissão dos pacotes de dados.



Fonte: O Autor.

O eixo das ordenadas contém a informação da perturbação da transmissão como no gráfico anterior. Um valor positivo de 0,5, por exemplo, significa uma perturbação de 50% dos dados transmitidos. No eixo das abscissas, está a frequência de envio dos pacotes de dados. Analisando os gráficos por potência de transmissão, é possível observar que, na menor potência de -25dBm, apresenta um pequeno aumento na perturbação de transmissão dos pacotes de dados. Uma forma mais simplificada para calcular a perturbação da rede é usando o consumo de energia na transmissão dos pacotes de dados dos nodos sensores ao invés da

quantidade de pacotes transmitidos. É possível observar, então, as duas métricas na transmissão dos dados:

1. Eficiência: é o percentual de acertos na recepção dos pacotes;
2. Perturbação: é a dificuldade da transmissão dos pacotes de dados.

A ideia é calcular o quanto é necessário de potência de transmissão, para garantir que os dados sejam corretamente entregues no destino sem que haja a necessidade de retransmissões devido às interferências e ruídos.

3.5 CONSUMO DE ENERGIA

O consumo foi obtido com os dados usados para o cálculo da eficiência, ou seja, com os mesmos parâmetros utilizados para calcular a eficiência. A frequência de transmissão dos pacotes de dados FPkt está próxima ao LTPD, ou seja, aproximadamente 30Pkt/s e o tempo de simulação em 50 s. A Tabela 5 mostra o consumo de energia em joules na transmissão dos pacotes de dados.

Tabela 5 - Consumo de energia na transmissão

Potência (Qn)	0dBm	-5dBm	-10dBm	-15dBm	-25dBm
11	0,4261326	0,351371	0,2839251	0,267293	0,2743594
8	0,4199369	0,3335261	0,271223	0,255419	0,2589229
6	0,3921217	0,3139173	0,2514375	0,229916	0,2338307
5	0,3781713	0,3084656	0,2480082	0,228853	0,2156329
4	0,3575773	0,2891056	0,2299943	0,207329	0,1995277
3	0,334826	0,273251	0,221132	0,195629	0,180512

Fonte: O Autor.

Nas Figuras 29 a 34, é possível observar consumo de energia em joules em função da quantidade de nodos enviando pacotes de dados, por potência de transmissão e por frequência de envio dos pacotes de dados FPkt, ou *rate*.

É possível observar também, a variação de FPkt e o ponto onde atinge o LTPD. O consumo de energia além do LTPD não tem um aumento significativo, porém, vale lembrar que as medidas de consumo de energia são apenas do transmissor de cada nodo sensor. Como FPkt está próxima ao LTPD, então, pode-se afirmar que a quantidade de pacotes transmitidos

em toda a tabela deveria ser semelhante e, portanto, o consumo de energia deveria ser o mesmo desde que a potência de transmissão fosse a mesma.

Figura 29 - Consumo na transmissão com 11 nodos

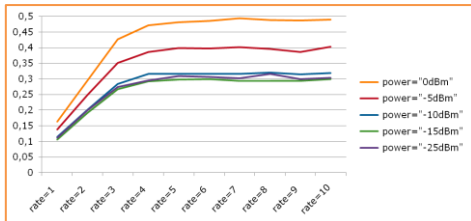


Figura 30 - Consumo na transmissão com 8 nodos

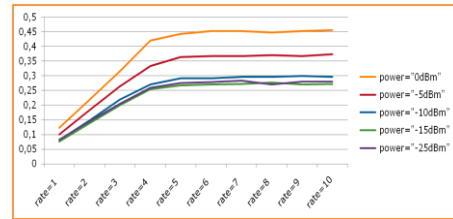


Figura 31 - Consumo na transmissão com 6 nodos

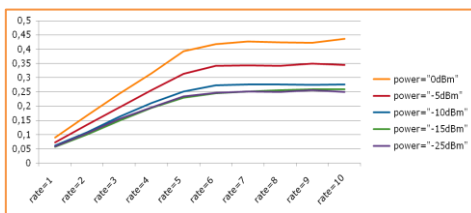


Figura 32 - Consumo na transmissão com 5 nodos

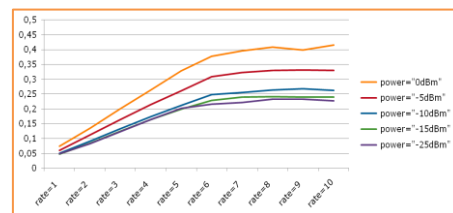


Figura 33 - Consumo na transmissão com 4 nodos

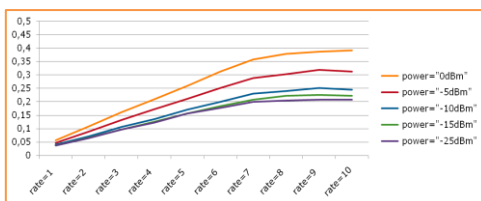
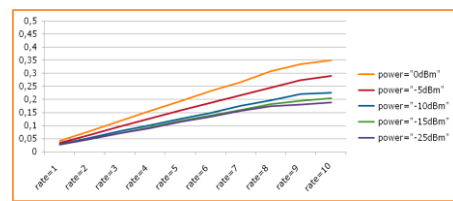


Figura 34 - Consumo na transmissão com 3 nodos

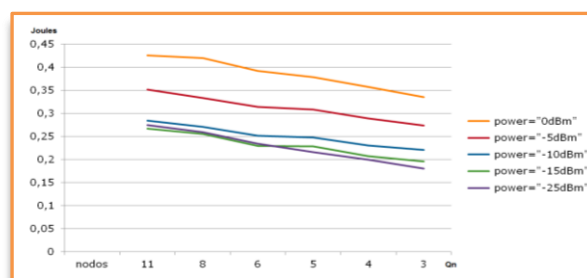


Fonte: O Autor.

Este fato ocorre porque, quanto menor a quantidade de nodos transmitindo pacotes de dados, menor a probabilidade de ocorrência de interferências e menor o consumo de energia.

Portanto, quanto maior o consumo de energia, maior é a perturbação e menor será a eficiência.

Figura 35 - Consumo de energia na transmissão



Fonte: O Autor.

O gráfico da Figura 35 mostra as variações de consumo em função da quantidade de nodos e da potência de transmissão dos pacotes de dados.

Nota-se a diminuição no consumo de energia quando o número de nodos envolvidos na transmissão também diminui, até mesmo em uma única potência.

Para equacionar a energia consumida, foi utilizada a potência consumida no transmissor e não a potência de transmissão. A Tabela 6 relaciona as potências de transmissão com as potências de consumo do transmissor.

Tabela 6 - Potência de transmissão X potência de consumo

T _x _dbm	0	-1	-3	-5	-7	-10	-15	-25
T _x mW	57.42	55.18	50.69	46.2	42.24	36.3	32.67	29.04

Fonte: O Autor.

Na primeira linha da tabela estão descritas as potências de saída do transmissor e na segunda linha a potência em mW consumida no transmissor para a transmissão dos pacotes de dados. Para calcular o consumo de energia do gráfico da Figura 36, tem-se:

$$\text{Cons}_{mJ} = \text{Ptb}_{en} + \text{Cons}_{min} \quad (32)$$

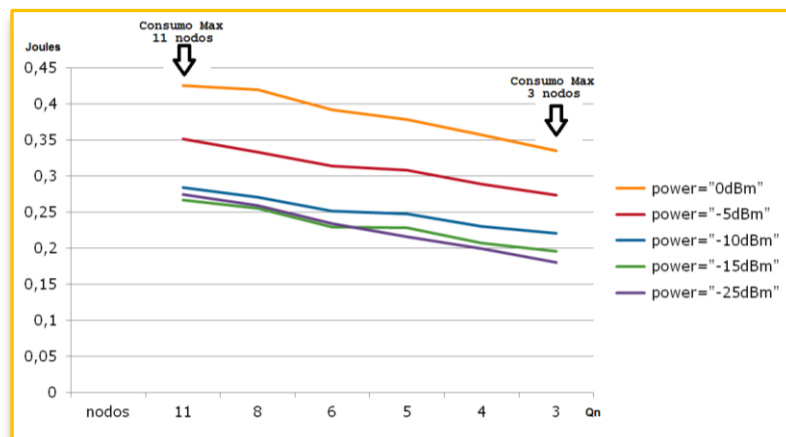
Onde:

Cons_{mJ} é o consumo em milijoules;

Ptb_{en} é a perturbação em milijoules;

Cons_{min} é o consumo inicial em milijoules.

Figura 36 - Variação do consumo de energia



Fonte: O Autor.

Então:

$$P_{tb_{en}} = \frac{Cons_{max(11nodos)} - Cons_{max(3nodos)}}{Qtd\ nodos} * Q_n \quad (33)$$

$$P_{tb_{en}} = \frac{426 - 334}{8} * Q_n = 11,5 * Q_n \quad (34)$$

Para cálculo do consumo mínimo de energia, deve-se inicialmente encontrar os pontos onde as retas do consumo de energia cruzam o eixo das ordenadas, ou seja, na quantidade de nodos igual a zero.

Para potências em 57,42 mW:

$$P_{to_{57,42}} = Cons_{max(3nodos)} - P_{tb_{en}(3nodos)} \quad (35)$$

$$P_{to_{57,42}} = 334 - (11,5 * 3) = 299,5 \sim 300\ mJ \quad (36)$$

Para potências em 29,04 mW:

$$P_{to_{29,04}} = Cons_{min(3nodos)} - P_{tb_{en}(3nodos)} \quad (37)$$

$$P_{to_{29,04}} = 180 - (11,5 * 3) = 145,5 \sim 146\ mJ \quad (38)$$

Cálculo do consumo mínimo $Cons_{min}$:

$$Cons_{min} = \frac{P_{to_{57,42}} - P_{to_{29,04}}}{Pot_{max(mW)} - Pot_{min(mW)}} * Pot_{mW} + P_{to_{min}} \quad (39)$$

$$P_{to_{min}} = P_{to_{29,04}} - \frac{P_{to_{57,42}} - P_{to_{29,04}}}{Pot_{max(mW)} - Pot_{min(mW)}} * Pot_{mW} \quad (40)$$

$$P_{to_{min}} = 146 - \frac{300 - 146}{57,42 - 29,04} * 29,04 = -11,6 \quad (41)$$

$$\text{Cons}_{\min} = 5,43 * \text{Pot}_{\text{mW}} - 11,6 \quad (42)$$

$$\text{Cons}_{\text{mJ}} = 11,5 * Q_n + 5,43 * \text{Pot}_{\text{mW}} - 11,6 \quad (43)$$

(Equação do Consumo de Energia em mJ)

3.6 QUALIDADE DO CAMINHO

A qualidade do caminho (QPth) é a métrica que define a qualidade dos dados que percorrem um determinado caminho da rede dentro da região delimitada até LTPD.

Pode-se dizer que a qualidade no caminho dos dados QPth entre um nodo sensor e outro é um cálculo da perturbação Ptb com a eficiência Ef. Além disso, QPth é a quantidade de energia a ser acrescentada na transmissão dos dados além da energia mínima necessária para que os pacotes de dados cheguem ao destino.

A qualidade no caminho dos dados QPth pode ser escrito conforme a Equação (44), como segue:

$$\text{QPth} = \frac{\text{Ptb}_{\text{en}}}{\text{Cons}_{\text{mJ}}} \quad (44)$$

Onde:

Cons_{mJ} é o consumo em milijoules;

Ptb_{en} é a perturbação em milijoules.

$$\text{QPth} = \frac{11,5 * Q_n}{11,5 * Q_n + 5,43 * \text{Pot}_{\text{mW}} - 11,6} \quad (45)$$

O QPth das equações acima foi calculado no LTPD e, portanto, para diferentes eficiências o valor do QPth deverá ser diferente. Quanto à qualidade no caminho dos dados QPth em uma determinada eficiência pode ser escrito conforme a Equação (46) da forma como segue:

$$\text{QPth} = \frac{\text{Ptb}_{\text{en}}}{\text{Cons}_{\text{mJ}}} * \frac{\text{Ef}_{\min}}{\text{Ef}} \quad (46)$$

Onde:

Cons_{mJ} é o consumo em milijoules;

$P_{tb_{en}}$ é a perturbação em milijoules;

$E_{f_{min}}$ é a eficiência mínima no LTPD;

E_f é a eficiência.

Para um Q_n com 11 nodos, a eficiência mínima no LTPD é igual a 90%.

Portanto:

$$QP_{th} = \frac{11,5 * Q_n}{11,5 * Q_n + 5,43 * Pot_{mW} - 11,6} * \frac{0,90}{E_f} \quad (47)$$

$$QP_{th} = \frac{10,3 * Q_n}{E_f(11,5 * Q_n + 5,43 * Pot_{mW} - 11,6)} \quad (48)$$

Com a eficiência, o cálculo da qualidade do caminho está completo. Quanto maior a eficiência, menor o QP_{th} , o que significa uma qualidade melhor no caminho dos dados.

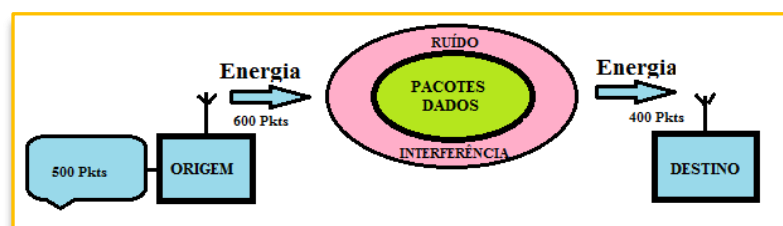
Portanto, QP_{th} é a parcela necessária que representa a interferência dos nodos sensores na transmissão dos pacotes de dados.

Por exemplo, se QP_{th} for 0,20, então, a potência de transmissão dos dados deve ser aumentada 20% além da potência mínima necessária para que os pacotes alcancem o destino.

3.7 ENERGIA E OS PACOTES DE DADOS

Neste subcapítulo, será apresentada a relação da quantidade de energia necessária para levar os pacotes de dados entre a origem e o destino. Na Figura 37, por exemplo, é possível observar uma quantidade de pacotes na origem, a energia para transmitir estes pacotes, as interferências e os ruídos e a chegada dos pacotes de dados em um número menor.

Figura 37 - Exemplo transmissão de pacotes de dados



Fonte: O Autor.

3.7.1 Potência do Transmissor

A potência do transmissor (P_{tx}) é um dos parâmetros que o nodo sensor ajusta para que os pacotes de dados alcancem destinos com maiores distâncias. Na potência de um sinal de rádio, a maior parte do mesmo é perdida no ar. Até quando transmitida de forma favorável, ou seja, no vácuo, sem obstáculos etc., uma onda de rádio perde parte de sua energia pelo fato de irradiar em diferentes direções, ou seja, fora do eixo do caminho entre a origem e o destino.

3.7.2 Sensibilidade do Receptor

A sensibilidade do receptor (P_{rx}) é a capacidade de detectar sinais de intensidade muito pequena. Quanto maior a sensibilidade de um receptor, menor a potência de sinal detectável em sua antena. É comum que a sensibilidade de um receptor seja expressa em dBm de intensidade de sinal. No caso de receptores de digitais, uma baixa sensibilidade aumenta a taxa de erros e torna os pacotes de dados não inteligíveis. Nos experimentos deste trabalho, foi utilizado o CC2420 da Texas Instruments, que define como parâmetro de sensibilidade do receptor a potência de -95 dBm.

3.7.3 Path Loss

A definição para *Path loss* (PL) é uma métrica que indica a resultante das perdas de potência no caminho dos dados. O cálculo do PL para uma determinada distância entre dois nodos é dado pela Equação (49) como segue (BOULIS, 2011):

$$PL_{(d)} = PL_{(d_0)} + 10 * \eta * \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\sigma} \quad (49)$$

Onde:

$PL_{(d)}$ é o *Path loss* da distância (d);

$PL_{(d_0)}$ é o *Path loss* de referência conhecido da distância $d(0)$;

η é o *Path loss* expoente;

X_{σ} é a variável gaussiana randômica de média zero com um desvio padrão(σ).

Usando a equação para cálculo do PL, pode-se então determinar a perda de sinal para cada nodo sensor em relação ao nodo 0 central. A Tabela 7 mostra a perda de sinal para cada nodo sensor na área determinada.

Tabela 7 - Distância - *Path loss*

Nodo	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11
Distância [cm]	75	16	100	65	90	75	100	100	75	65	45
PL	56	40	59	54	58	56	59	59	56	54	46

Fonte: O Autor.

Em outras palavras, o *Path loss* define a potência da perda do sinal no nodo que está recebendo os dados em uma RSSF.

Portanto:

$$PL \geq \text{RSSI} - \text{Prx} \quad (50)$$

Onde :

PL é o *Path loss* da distância (d);

RSSI é o sinal recebido do nodo que está transmitindo;

Prx é a sensibilidade do receptor.

3.7.4 Perda do Sinal entre Nodos Sensores

A potência do transmissor P_{tx} é a capacidade do circuito de rádio em produzir sinais elétricos com certa intensidade para serem transmitidos em uma antena.

Na Tabela 6, foi relacionado consumo de potência do transmissor, em mW, com as potências de saída enviada para a antena em dBm. Usando a Equação (50), podem-se calcular valores de perda de sinal para cada potência. Por exemplo, para um PL de 56 dBm, um Prx de -95 dBm e uma potência de transmissão de -25 dBm, tem-se:

$$P_{tx} - \text{Prx} - \text{PL} \geq 0 \quad (51)$$

Portanto:

$$-25 - (-95) - 56 = 14 \quad (52)$$

O resultado apresentado na Equação (52) mostra que o receptor recebeu um sinal do transmissor excedente em 14dBm na sensibilidade. O fato de existir esta potência, a maior de sinal na recepção, não necessariamente os dados estariam sendo bem recebidos. Poderia, por exemplo, um ruído de 15 dBm sobrepor o sinal excedente e, portanto, nada seria decodificado no receptor. De qualquer forma, com origem na Equação (51), pode-se construir uma tabela com diversas potências de transmissão relacionando o sinal excedente de recepção com os nodos sensores transmissores da RSSF.

Tabela 8 - Sinal excedente do receptor (visto do nodo 0)

Nodos Potência	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11
0dBm	-39	-55	-36	-41	-37	-39	-36	-36	-39	-41	-49
-5dBm	-34	-50	-31	-36	-32	-34	-31	-31	-34	-36	-44
-10dBm	-29	-45	-26	-31	-27	-29	-26	-26	-29	-31	-39
-15dBm	-24	-40	-21	-26	-22	-24	-21	-21	-24	-26	-34
-25dBm	-14	-30	-11	-16	-12	-14	-11	-11	-14	-16	-24

Fonte: O Autor.

A Tabela 8 apresenta, por exemplo, a relação entre a transmissão do nodo1 com a potência de 0 dBm para o nodo0. O receptor do nodo0 tem 39 dBm de sinal excedente antes de perder a comunicação com o nodo1, e assim por diante com todas as potências e as distâncias relacionadas para cada nodo.

O sinal recebido pelo receptor RSSI é dado em dBm e é a medida fornecida ao nodo sensor transmissor do último pacote entregue ao receptor. Se a mensagem saltar mais que um nodo, o RSSI fornecido é sempre do último nodo.

3.7.5 Estudo da Transmissão dos Pacotes de Dados

No estudo até agora apresentado, sabe-se o incremento da potência em função das retransmissões dos pacotes, ruídos, interferências, etc. Nesta próxima abordagem, foi efetuada uma análise da transmissão dos pacotes de dados nodo a nodo e com diversas potências de transmissão.

Para o estudo da transmissão dos pacotes individualmente em cada nodo sensor, foi utilizada uma frequência de envio de pacotes FPkt intermediária de forma a não alcançar o LTPD. Com o simulador programado para transmitir na frequência de 5 Pkt/s, e as potências de transmissão programadas para 0, -5, -10, -15 e -25 dBm, o resultado obtido através do MAC de cada nodo de origem da transmissão estão indicados na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9 - Quantidade de pacotes recebidos com ACK

Nodos Potência	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11
0 dBm	246	246	246	246	246	246	246	246	246	246	246
-5 dBm	246	246	245	246	246	245	246	245	246	246	246
-10 dBm	245	246	243	246	247	247	243	243	247	246	246
-15 dBm	245	246	241	245	238	243	242	237	243	246	246
-25 dBm	231	244	213	223	230	208	194	209	222	233	244

Fonte: O Autor.

É possível observar que até a potência de -10 dBm todos os nodos sensores mantêm um padrão na transmissão de pacotes de dados, os quais alcançam o receptor com variações de 3 em 246 pacotes e, portanto, 1,2% de variação na recepção. Em -15 dBm aparece uma pequena degradação no desempenho nos nodos sensores (3,5,7,8), que chegam aos 3,6% de pacotes faltantes no coordenador. A degradação realmente aumenta quando a transmissão é com a potência de -25 dBm, alcançando 21% de pacotes perdidos no coordenador.

Com os mesmos resultados da simulação anterior, a 5 Pkt/s de frequência e as potências de transmissão programadas para 0,-5,-10,-15 e -25 dBm, o resultado da quantidade de pacotes de dados transmitidos é visto no nodo0 e estão indicados na Tabela 10 a seguir:

Tabela 10 - Quantidade de pacotes transmitidos

Nodos Potência	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11
0dBm	247	247	247	247	248	247	249	247	247	247	247
-5 dBm	247	247	249	248	247	249	247	250	247	247	247
-10dBm	250	247	251	250	254	252	256	251	249	250	247
-15dBm	252	248	257	251	264	254	256	261	255	251	247
-25dBm	268	251	288	279	279	304	308	295	277	265	256

Fonte: O Autor.

É possível observar que a quantidade de pacotes transmitidos é maior que as recebidas. Além disso, existe uma tendência para uma maior dispersão com a diminuição da potência. Calculando a média dos pacotes de dados transmitidos, pode-se, então, apresentar novamente na tabela os limites toleráveis para perdas de pacotes. Neste caso, a média está em 255,78 pacotes, e é possível observar, mesmo tendo uma dispersão mais acentuada, segue a mesma formação da tabela anterior. Na Tabela 11, encontra-se o sinal excedente em função das potências e distâncias.

Mantendo a mesma formação vista nas tabelas anteriores, conclui-se que o sinal excedente ideal para que o nodo receptor não perca mais que 2 a 3% dos pacotes de dados é de cerca de 20 dBm.

Tabela 11 - Sinal excedente do receptor (visto pelo nodo0)

Distância	75	16	100	65	90	75	100	100	75	65	45
Potência	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
0 dBm	-39	-55	-36	-41	-37	-39	-36	-36	-39	-41	-49
-5 dBm	-34	-50	-31	-36	-32	-34	-31	-31	-34	-36	-44
-10 dBm	-29	-45	-26	-31	-27	-29	-26	-26	-29	-31	-39
-15 dBm	-24	-40	-21	-26	-22	-24	-21	-21	-24	-26	-34
-25 dBm	-14	-30	-11	-16	-12	-14	-11	-11	-14	-16	-24

Fonte: O Autor.

As condições da transmissão dos pacotes de dados dos nodos sensores foi usar uma frequência de envio de pacotes FPkt intermediária, de forma a não alcançar o limite LTPD e transmitir os pacotes individualmente.

3.7.6 Ajuste da Potência de Transmissão

Para ajustar a potência de transmissão de forma adequada é necessário calcular duas variáveis com métricas distintas: a potência para alcançar o próximo destino e a potência para vencer as perdas de qualidade de sinal por interferências e ruídos. O somatório destas duas potências forma a potência de transmissão do nodo sensor. A equação abaixo calcula a variação da potência transmitida pelo nodo sensor. Por exemplo, se o nodo sensor transmitiu os pacotes de dados com a potência de -15 dBm e o resultado da equação for 5 dBm, então, a potência deverá aumentar para -10 dBm.

$$P_{tx_0} = 20 * (1 + QP_{th}) + RSSI + Prx \quad (53)$$

Onde:

P_{tx_0} é o desvio em dBm da potência de transmissão;

QP_{th} é a qualidade no caminho dos dados;

$RSSI$ é o sinal recebido no receptor;

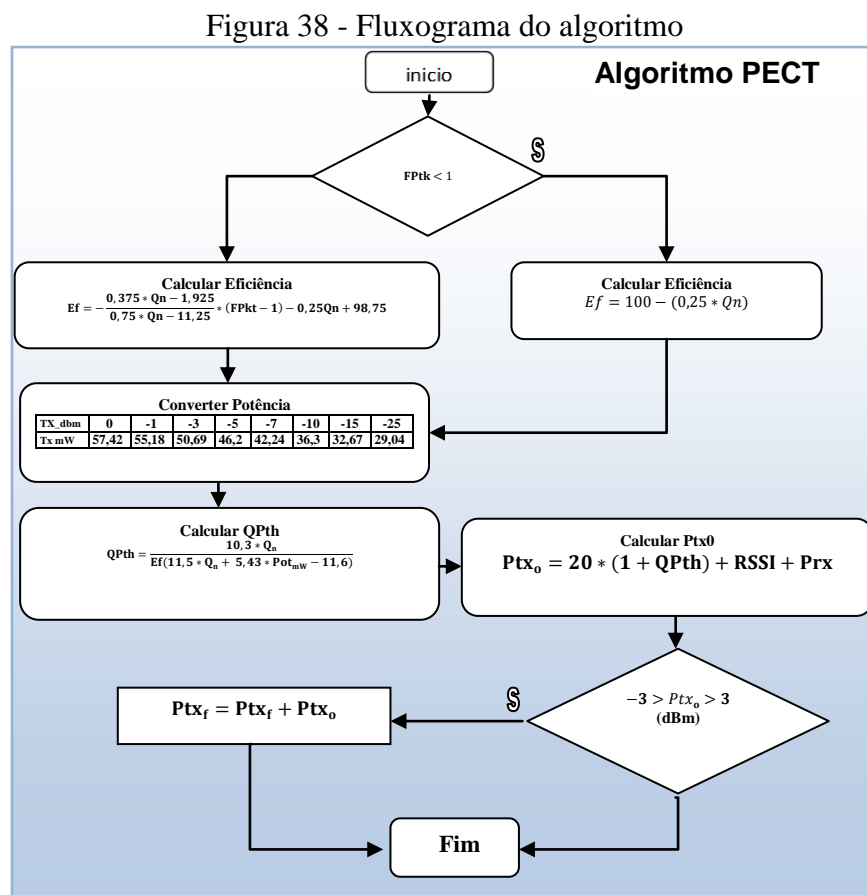
Prx é a sensibilidade do receptor.

A variável P_{tx_0} é a métrica cujo resultado apresenta o desvio da potência de transmissão em função do sinal do receptor e do RSSI. O valor do Prx está fixado em -95 dBm, como indicado no módulo CC2420. Quando o RSSI aumenta, é necessário maior potência de transmissão para que os dados alcancem o destino final. O mesmo ocorre com o

aumento do QPth, será necessário potência de transmissão maior para compensar as perdas da qualidade do caminho dos dados por interferência diversas.

3.8 O ALGORITMO

A Figura 38 mostra a representação da PECT através do algoritmo. O cálculo da eficiência, da qualidade do caminho QPth e o ajuste da potência do transmissor do nodo sensor em função das variáveis calculadas são as premissas do método apresentado. O algoritmo foi projetado para ser compatível com qualquer tipo de hardware e, portanto, para garantir a portabilidade, não apresenta um fluxograma para um nodo sensor em específico.



Fonte: O Autor.

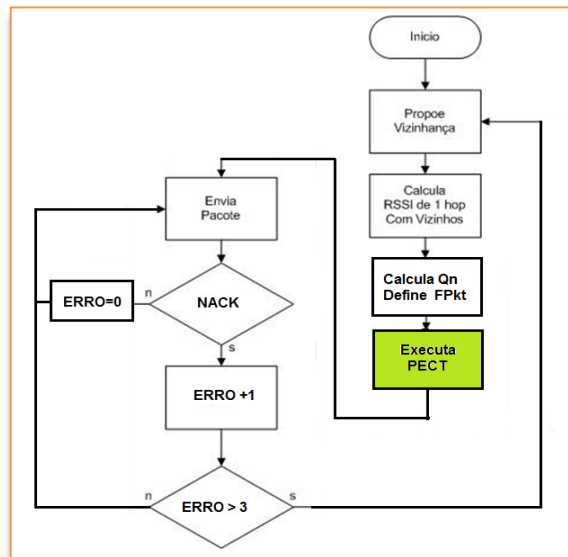
Para um melhor entendimento da técnica, foi apresentada uma sugestão de um algoritmo de um nodo sensor exemplo.

Neste algoritmo, cada nodo sensor conhece as informações do RSSI de cada *link* de conexão dos nodos sensores da vizinhança. Uma vez definida conexão dos nodos sensores da

vizinhança, Q_n será calculada a frequência de envio dos pacotes FPkt. As variáveis estão prontas para executar o algoritmo. A frequência de transmissão dos pacotes de dados FPkt será calculada externamente ao algoritmo de forma ao usuário ter maior liberdade na definição desta métrica.

O fluxograma apresentado na Figura 39 a seguir exemplifica a dinâmica de um algoritmo de um nodo sensor usando a PECT.

Figura 39 - Fluxograma sugerido do nodo sensor



Fonte: O Autor.

Nota-se que o algoritmo, inicialmente, reconhece os nodos sensores que podem ser vizinhos, e busca de cada um deles o valor RSSI. Normalmente, nos nodos sensores, os valores fornecidos do RSSI são apresentados em hexadecimal, podendo variar de 0x00h a 0xFFh. Por exemplo, se o nodo sensor enviar o valor de 0x50h, então, este deve ser convertido para -80 dBm. Nos simuladores, geralmente os valores já se encontram como potência de recepção em dBm, não sendo necessária uma conversão de valores. A frequência de envio de pacotes entre um nodo sensor e outro é fator limitante para a eficiência do envio dos pacotes pela rede. Portanto, uma das funções desta técnica é limitar a frequência de envio dos pacotes pelo *link*, para não degradar a eficiência dos pacotes para a rede.

Com a quantidade de *links* entre nodos sensores definidas e a taxa de transmissão de pacotes também definida, o algoritmo ajusta a potência de transmissão usando como parâmetro de entrada a resposta da métrica do RSSI de cada *link* dos nodos vizinhos e a PECT para calcular a potência de transmissão. Em caso da ocorrência de erro na transmissão de uma mensagem por mais de três tentativas consecutivas, o algoritmo reiniciará o processo com

uma nova vizinhança com o objetivo de diminuir o erro ou até mesmo eliminar possíveis rotas desativadas.

Espera-se que com os ajustes realizados a cada nodo sensor individualmente, seja possível, então, transmitir os pacotes de dados com economia de energia, mantendo uma boa eficiência no envio de pacotes de dados em função de uma menor perda de informações e retransmissões de dados.

4 IMPLEMENTAÇÃO

No contexto desta dissertação, a fase de implementação colocará em prática o funcionamento da PECT. Primeiramente, para realizar a implementação da técnica será elaborado um plano de como realizar as premissas desta técnica de forma satisfatória para que o desempenho final seja eficaz. Para tal, foi realizado um estudo de alguns simuladores de rede e de hardware e software possíveis de usar nos experimentos.

Experimentados alguns dos simuladores, a opção da escolha foi feita baseado na ideia da ferramenta ser simples de configurar e usar, e que os resultados do simulador tivessem as informações necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

A escolha em usar o simulador de rede Castalia, o qual é uma extensão do OMNet++, foi baseada no fato de ter exemplos semelhantes ao tipo de RSSF a ser implementada para técnica proposta. Além disso, o simulador Castalia oferece relatórios com os parâmetros necessários para realizar as avaliações necessárias.

4.1 IMPLEMENTAÇÃO DA PECT

Na fase implementação da PECT, inicialmente, foi realizado um estudo comportamental da rede. O entendimento da ideia de como transmitir os pacotes de dados no ambiente de rede foi muito importante.

Com os dados dos nodos sensores em planilhas, lado a lado, foi possível verificar a tendência relativa à interferência e a quantidade de nodos da rede. Quanto maior a quantidade de nodos, maior é a necessidade de aumentar a potência de transmissão para atingir um determinado destino dos pacotes de dados. A Tabela 12 é exemplo de planilha de trabalho com um experimento de 5 nodos sensores.

Tabela 12 - Experimento com 5 nodos

		nodo 0					nodo 1					nodo 2				
		0 dBm	-5 dBm	-10 dBm	-15 dBm	-25 dBm	0 dBm	-5 dBm	-10 dBm	-15 dBm	-25 dBm	0 dBm	-5 dBm	-10 dBm	-15 dBm	-25 dBm
Energia Consumida	cc2040	3,1582	3,1538	3,1470	3,1456	3,1486	0,8515	0,8715	0,8016	0,8141	0,7715	0,8851	0,8730	0,8184	0,8143	0,8373
	so no TX	0,0285	0,0229	0,0178	0,0160	0,0133	0,0644	0,0533	0,0423	0,0383	0,0400	0,0631	0,0503	0,0404	0,0364	0,0339
Por Radio:RX pkt breakdown																
	Falhou com interferência	53	64	66	77	167	37	39	42	67	194	33	54	44	49	170
	Falhou abaixo da Sensibilidade	0	1	11	17	113	2	3	12	19	131	1	1	15	15	69

	Fora do estado de RX	0	4	2	9	43	13	21	77	24	221	16	17	19	30	52
	Recebido apesar da interferência	32	40	36	54	126	22	28	19	33	91	17	23	25	38	135
	Recebido sem interferência	1186	1174	1168	1149	992	2214	2201	2123	2152	1636	2220	2213	2190	2190	1933
	total	1271	1283	1283	1306	1441	2288	2292	2273	2295	2273	2287	2308	2293	2322	2359
	Pacotes enviados	1270	1266	1256	1255	1170	253	259	259	259	305	248	244	247	246	257
Por MAC	Num. Beacons enviados	52	52	52	52	52										
	Num. Beacons Recebidos						52	51	51	52	47	51	51	52	52	51

Fonte: O Autor.

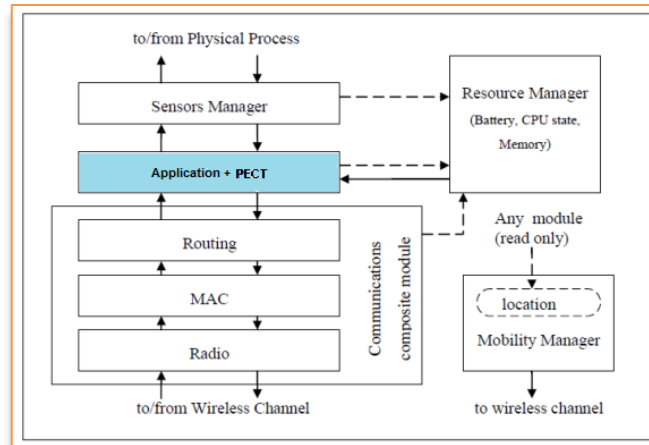
Para melhorar esta afirmação, surgiu a necessidade da realização de simulações com quantidade maior de nodos sensores. Modificaram-se, então, as configurações do simulador para criar um novo ambiente de rede com 12 nodos sensores. O novo arquivo pathloss10.txt contém as informações das potências necessárias para perda do sinal de cada um dos 12 nodos sensores, um em relação ao outro.

O resultado da nova simulação com 12 nodos sensores confirmou a afirmação do aumento da interferência em função da quantidade de nodos da rede. Além disso, os resultados das planilhas e dos gráficos gerados contribuíram na criação e no desenvolvimento do algoritmo da PECT.

A ideia inicial era inserir o algoritmo da técnica no código do simulador Castalia. Portanto, a cada simulação, os resultados apresentados já estariam com o consumo de energia reduzido através do algoritmo. A Figura 40 apresenta um diagrama esquemático interno do nodo sensor do simulador Castalia. Nele, está representado em cor azul onde estaria implementado o algoritmo.

O problema encontrado em realizar as simulações no Castalia usando o algoritmo da PECT foi a dificuldade na obtenção de resultados parciais como o QPth, Ef e a potência de cada nodo.

Figura 40 - Castalia nodo sensor com PECT

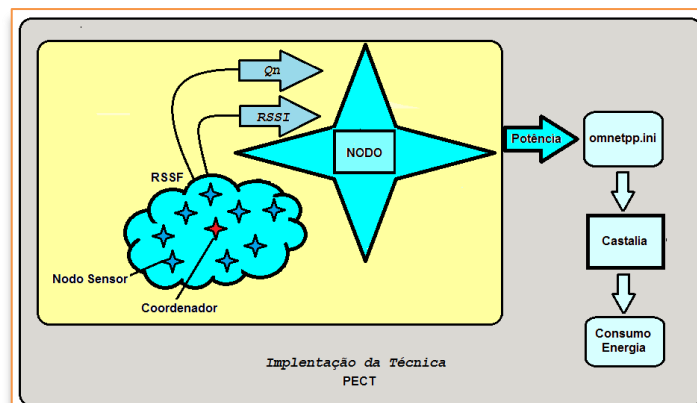


Fonte: O Autor, baseado em Boulis (2011).

O resultado final sempre era a energia e os pacotes de dados como parâmetros de análise. A solução foi, então, criar um programa capaz de simular a etapa de aplicação do nó sensor e obter os parâmetros de análise, como as potências de cada sensor da rede através do algoritmo. Na avaliação, será apresentado o programa de simulação do nó sensor com maiores detalhes. Este software foi desenvolvido como ferramenta auxiliar para a depuração da PECT.

A Figura 41 apresenta um esquemático da implementação da PECT de forma gráfica. A técnica representada através do algoritmo calcula as potências dos nós sensores usando como parâmetros de entrada o RSSI de cada nó sensor e mais a quantidade de nós da rede. Depois de ajustadas as potências de cada nó da rede, as informações das novas potências são adicionadas no arquivo de configuração omnetpp.ini do Castalia para a simulação e obtenção do consumo de energia.

Figura 41 - Implementação da técnica



Fonte: O Autor.

4.2 RESULTADOS E RELATÓRIOS

Neste subcapítulo, serão apresentados os relatórios, os quais municiaram os resultados da pesquisa em relação à troca de informações em uma RSSF. Após a execução do Castalia, dois arquivos são criados com as informações da simulação. O primeiro arquivo contém os resultados da simulação dos nodos sensores e o segundo uma lista de eventos que ocorreram durante a simulação por determinado período de tempo. O arquivo exemplo na Figura 42 faz parte de uma simulação que apresenta a potência de -15 dBm e a frequência de 5 Pkts/s.

Figura 42 - Resultado do Castalia 1/2

```

Castalia| label:General,rate=5,power="-15dBm"
Castalia| module:SN.wirelessChannel
Castalia| histogram name:Fade depth distribution
Castalia| histogram_min:-50 histogram_max:15
Castalia| histogram_values 1 6 16 62 111 323 693 1463 3071 4495 4302 1172 41 0
Castalia| module:SN.node[0].ResourceManager
Castalia| simple output name:Consumed Energy
Castalia| 0.0162712
Castalia| module:SN.node[0].Communication.Radio
Castalia| simple output name:RX pkt breakdown
Castalia| 91 Failed with interference
Castalia| 25 Failed, below sensitivity
Castalia| 7 Failed, non RX state
Castalia| 56 Received despite interference
Castalia| 1163 Received with NO interference
Castalia| simple output name:Txed pkts
Castalia| 1271 TX pkts
Castalia| module:SN.node[0].Communication.MAC
Castalia| simple output name:Number of beacons sent
Castalia| 52
Castalia| module:SN.node[0].Application
Castalia| index:1 simple output name:Packets received per node
Castalia| 247
Castalia| index:2 simple output name:Packets received per node
Castalia| 239
Castalia| index:3 simple output name:Packets received per node
Castalia| 244
Castalia| index:4 simple output name:Packets received per node
Castalia| 245
Castalia| index:5 simple output name:Packets received per node
Castalia| 239

```

Fonte: O Autor, baseado em Boulis (2011).

A Figura 43 apresenta uma lista de eventos em ordem cronológica, útil no estudo comportamental de um determinado nodo sensor.

Figura 43 - Lista de eventos do Castalia - Trace

```

0.027539895218 SN.node[0].Application Not sending packets
0.028115929769 SN.node[0].Communication.MAC Attempt transmission, description: ATTEMPT_TX timer
0.028145895217 SN.node[1].Communication.MAC Initiating new transmission of [PAN associate request], retries left: 9999
0.028145895217 SN.node[1].Communication.MAC Random backoff value: 4, in 0.00129391158 seconds
0.028145895217 SN.node[4].Communication.MAC Initiating new transmission of [PAN associate request], retries left: 9999
0.028145895217 SN.node[4].Communication.MAC Random backoff value: 15, in 0.004813701489 seconds
0.028145895217 SN.node[5].Communication.MAC Initiating new transmission of [PAN associate request], retries left: 9999
0.028145895217 SN.node[5].Communication.MAC Random backoff value: 16, in 0.005133181964 seconds
0.030237817747 SN.node[0].Communication.MAC Received association request from 1
0.030621840781 SN.node[0].Communication.MAC Attempt transmission, description: ATTEMPT_TX timer
0.030651817746 SN.node[1].Communication.MAC associated with PAN:0
0.030651817746 SN.node[1].Communication.MAC Attempt transmission, description: Associated with PAN
0.033599255551 SN.node[5].Communication.MAC Random backoff value: 62, in 0.019890459649 seconds
0.033757669866 SN.node[0].Communication.MAC Received association request from 4
0.0341416929 SN.node[0].Communication.MAC Attempt transmission, description: ATTEMPT_TX timer
0.034171669865 SN.node[4].Communication.MAC associated with PAN:0
0.034171669865 SN.node[4].Communication.MAC Attempt transmission, description: Associated with PAN
0.054288376323 SN.node[0].Communication.MAC Received association request from 5
0.054672399357 SN.node[0].Communication.MAC Attempt transmission, description: ATTEMPT_TX timer
0.054702376322 SN.node[5].Communication.MAC associated with PAN:0
0.054702376322 SN.node[5].Communication.MAC Attempt transmission, description: Associated with PAN
0.111214836824 SN.node[0].Communication.MAC Attempt transmission, description: ATTEMPT_TX timer
0.111244802272 SN.node[1].Communication.MAC Attempt transmission, description: CAP started
0.111244802272 SN.node[2].Communication.MAC Initiating new transmission of [PAN associate request], retries left: 9999
0.111244802272 SN.node[2].Communication.MAC Random backoff value: 7, in 0.002463365801 seconds
0.111244802272 SN.node[5].Communication.MAC Initiating new transmission of [PAN associate request], retries left: 9999
0.111244802272 SN.node[5].Communication.MAC Random backoff value: 23, in 0.007641199621 seconds
0.111244802272 SN.node[4].Communication.MAC Attempt transmission, description: CAP started
0.111244802272 SN.node[4].Communication.MAC Attempt transmission, description: CAP started
0.014506310538 SN.node[0].Communication.MAC Received association request from 2
0.014890333572 SN.node[0].Communication.MAC Attempt transmission, description: ATTEMPT_TX timer
0.014920310537 SN.node[2].Communication.MAC associated with PAN:0
0.014920310537 SN.node[2].Communication.MAC Attempt transmission, description: Associated with PAN
0.019683954118 SN.node[0].Communication.MAC Received association request from 3
0.020967971152 SN.node[0].Communication.MAC Attempt transmission, description: ATTEMPT_TX timer
0.02097954117 SN.node[3].Communication.MAC associated with PAN:0
0.02097954117 SN.node[3].Communication.MAC Attempt transmission, description: Associated with PAN
1.203544405754 SN.node[1].Application Sending packet #0
1.203544405754 SN.node[1].Communication.MAC Sending [App generic packet] of size 105 bytes to communication layer
1.203544405754 SN.node[1].Communication.MAC Packet buffered from network layer, buffer state: 1/32
1.203544405754 SN.node[1].Communication.MAC Attempt transmission, description: New packet from network layer
1.203544405754 SN.node[1].Communication.MAC Initiating new transmission of [802.15.4 MAC data packet], retries left: 2
1.203544405754 SN.node[1].Communication.MAC Random backoff value: 17, in 0.005523076679 seconds
1.206105687608 SN.node[5].Application Sending packet #0
1.206105687608 SN.node[5].Application Sending [App generic packet] of size 105 bytes to communication layer

```

Fonte: O Autor, baseado em Boulis (2011).

Nota-se que a lista das informações está subdividida em três colunas. Na primeira coluna, encontra-se o tempo incremental decorrido dos eventos em segundos. A segunda coluna apresenta o dispositivo e o módulo que está sendo utilizado naquele instante de tempo.

Na última coluna está a descrição dos eventos. Por exemplo, em 0,027539895218 segundos o módulo de aplicação usado pelo nodo0 informa que não está enviando pacotes de dados. Veja, por exemplo, o instante 1,014920310537 segundos a conexão do nodo2 ao nodo0. O arquivo apresentado contém todos os eventos simulados de uma RSSF. Vale salientar a importância desta lista para um desenvolvimento de qualquer que seja a técnica.

4.3 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O método utilizado como base de verificação para o algoritmo foi capaz de fornecer passo a passo as métricas como o QPth e a Ef durante a simulação. Se a implementação for feita diretamente no Castalia, obriga uma recompilação de todo o simulador a cada modificação que por ventura possa acontecer no código implementado. Isto demanda uma grande quantidade de tempo de desenvolvimento, e ainda a probabilidade de inserir erros no código do Castalia.

No aumento da quantidade de nodos sensores para a simulação, foi necessário recalcular para cada nodo o *Path loss* a partir da distância entre os nodos.

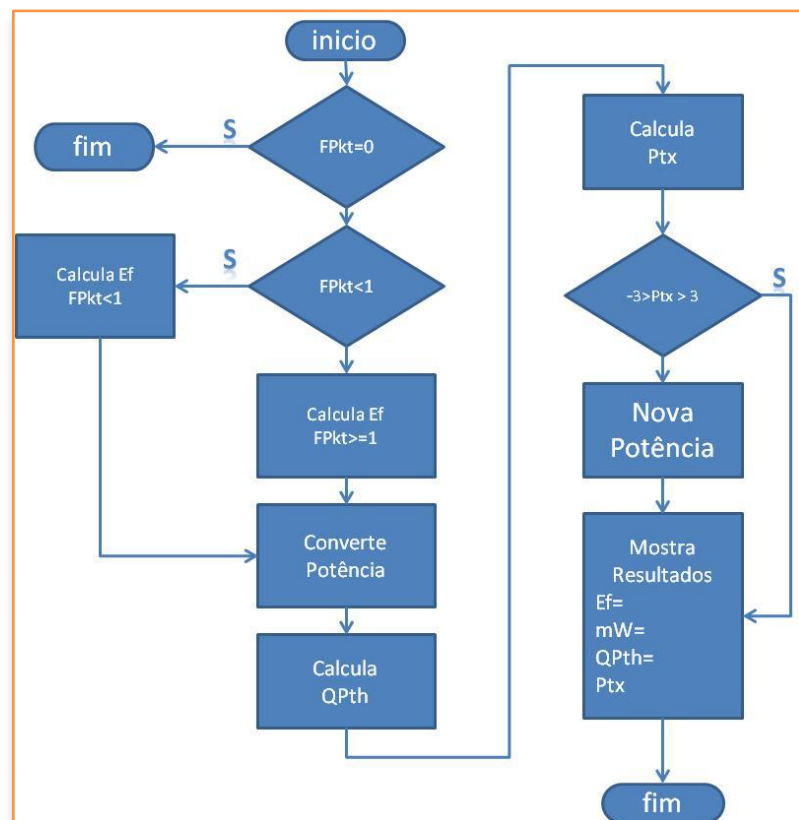
5 VALIDAÇÃO

Este capítulo descreve em detalhes o processo de validação da PECT. Em mais detalhes, o algoritmo implementado, descrito em linguagem C como uma simples função computacional, é inserido em um trecho de programa que representa uma das etapas de um nodo sensor.

5.1 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO

A Figura 44 mostra o diagrama de blocos do algoritmo da PECT.

Figura 44 - Diagrama do algoritmo de validação implementado



Fonte: O Autor.

Os parâmetros da entrada de dados foram inseridos de forma a simular situações com saídas previstas e então certificar que o algoritmo cumpre com os requisitos funcionais. O algoritmo foi escrito como um programa em linguagem C para garantir portabilidade entre os diversos tipos de nodos sensores existentes. A saída do programa é uma variável do tipo inteira cuja métrica é a nova potência do nodo para um determinado caminho. Os parâmetros

de entrada do algoritmo são métricas obtidas do próprio nodo sensor. As variáveis da entrada são:

1. Q_n : é a quantidade de nodos sensores na rede;
2. FP_k : é a frequência de transmissão dos pacotes de dados;
3. P_{tx} : é a potência de transmissão do nodo sensor em dBm;
4. RSSI: é o sinal recebido em dBm do nodo vizinho;
5. model: é o modelo do transceptor (CC2420).

Outra característica do algoritmo é quanto à robustez do código. Nota-se que no início do diagrama de blocos existem algumas verificações dos parâmetros de entrada, com o intuito de não calcular resultados inválidos. O algoritmo inicialmente verifica a frequência de envio dos pacotes de dados. Dependendo do teste, se a frequência for maior ou igual a 1 Pkt/s, ou se menor que 1 Pkt/s e diferente de zero, o algoritmo seleciona a equação adequada para cálculo da eficiência. Na etapa seguinte, o algoritmo transforma a potência transmitida em potência consumida no transmissor para calcular a qualidade do sinal no caminho QPth.

Este conversor depende de uma tabela de potências, em consequência aos diversos modelos de módulos transmissores, os quais possuem características próprias em função ao consumo e à potência de transmissão. Neste trabalho foi adotado um módulo da Texas Instruments CC2420.

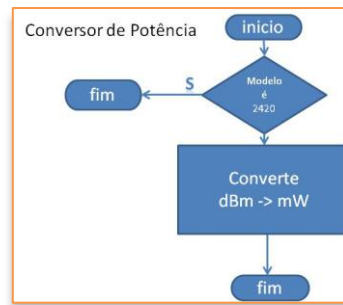
5.1.1 Conversor de Potência

O conversor de potência (dBm to mW), descrito na Figura , converte a potência transmitida em potência consumida, utilizando os parâmetros do módulo CC2420. Os parâmetros de entrada do conversor dB to mW são:

1. Model: é a seleção do modelo do tipo de módulo transmissor ;
2. P_{tx} : é a potência em dBm da saída do transmissor.

A saída do conversor é uma variável de dupla precisão e traz a potência consumida no módulo selecionado.

Figura 45 - Diagrama de blocos o conversor de potências



Fonte: O Autor.

A função foi escrita somente com módulo CC2420, usado no desenvolvimento deste trabalho. Caso o usuário tenha a necessidade de utilizar outros módulos, como por exemplo, o CC1000, os valores das potências que serão apresentados são diferentes e, portanto, o conversor dBm to mW deve ser atualizado.

5.1.2 Cálculo da Potência de Saída

Nas próximas etapas, o algoritmo calcula a qualidade do sinal no caminho dos dados QPth, o diferencial de potência P_{tx0} e a nova potência de saída que será ajustada no nodo sensor. As verificações incrementam ou decrementam a potência de entrada P_{tx} e transformam em potência de saída. Desta forma, cada pacote de dados transmitindo o algoritmo pode ajustar a potência de transmissão em função da variação P_{tx0} , desde que a diferença seja maior que $\pm 3\text{dBm}$.

5.2 VERIFICAÇÃO DO ALGORITMO

Para verificar os requisitos funcionais, foram acrescentadas no algoritmo algumas linha de código, as quais apresentam os resultados dos cálculos da eficiência E_f , da potência consumida em mW, da qualidade do caminho QPth, do diferencial de potência P_{tx0} , e da potência de saída P_{txf} , como apresentado na Figura 44. A ordem dos parâmetros de entrada e saída são como segue:

$$P_{txf} = \text{PECT}(Q_n, \text{FPkt}, P_{tx}, \text{Prx}, \text{RSSI}, \text{model}) \quad (54)$$

Onde:

Q_n é a quantidade de nodos sensores na rede;

FPkt é a frequência de transmissão dos pacotes de dados;
 Ptx é a potência de transmissão do nodo sensor em dBm;
 Prx é a sensibilidade do Receptor;
 RSSI é o sinal recebido em dBm do nodo vizinho;
 model é o modelo do tranceptor (CC2420).

A Figura 46 mostra um exemplo da chamada de execução do algoritmo com valores de entrada escolhidos, com o objetivo de avaliar o algoritmo.

Figura 46 - Chamada do algoritmo no programa

```

122  RSSI=Gera_RSSI (Ptx_nodo[N_nodo],N_nodo);
123  Ptx_nodo[N_nodo]=PECT (11,3,0,-95,60,2420);
124
  
```

Fonte: O Autor.

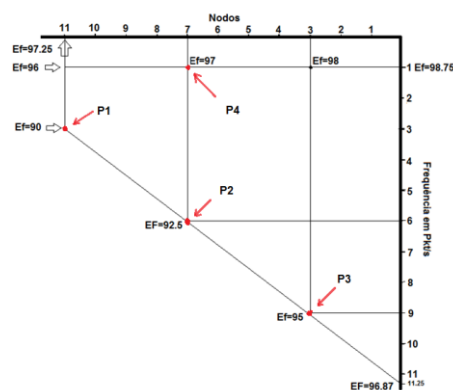
5.2.1 Verificação da eficiência da técnica

Com a frequência de envio de pacotes maior de 1 Pkt/s, o algoritmo usa a Equação 55 para cálculo de Ef, como segue :

$$Ef = - \frac{0,375 * Qn - 1,925}{0,75 * Qn - 11,25} * (FPkt - 1) - 0,25Qn + 98,75 \quad (55)$$

Para validar a Equação 55 para as frequências de envio de pacotes maiores que 1 Pkt/s, o cálculo da eficiência Ef para quatro pontos diferentes é realizado, conforme gráfico da Figura 47.

Figura 47 - Área de Eficiência



Fonte: O Autor.

Os pontos representam frequências de envio de pacotes e quantidade de nodos diferentes. Três dos pontos estão sobre a linha do LTPD e o quarto está na margem onde a frequência é 1 Pkt/s. Os resultados obtidos depois de executar o algoritmo estão descritos na Tabela 13. O ponto P4 está posicionado no gráfico fora da região LTPD do gráfico e foi escolhido de forma a mostrar que a equação utilizada para o cálculo da eficiência funciona conforme o esperado, ou seja, em toda a região do gráfico.

Tabela 13 - Resultado teste da eficiência FPkt > 1

	P1 (Qn=11 e FPkt=3)	P2 (Qn=7 e FPkt=6)	P3 (Qn=3 e FPkt=9)	P4 (Qn=7 e FPkt=1)
Calculado	Ef = 90	Ef = 92,5	Ef = 95	Ef = 97
Medido	Ef = 89,95	Ef = 92,45	Ef = 94,95	Ef = 97

Fonte: O Autor.

Observa-se que, analisando a Tabela 13, é possível concluir que o erro máximo obtido nos quatro pontos medidos é de 0,05% da eficiência, o que, por sua vez, mostra que a equação atende aos propósitos definidos. Na questão da eficiência, é necessário verificar o modelo para frequência de transmissão de pacotes de dados menor que 1 Pkt/s. Para essas frequências de envio, a Equação 56 é como segue:

$$Ef = 100 - (0.25 * Qn) \quad (56)$$

Considerando que no ponto (0,0), ou seja, frequência FPkt = 0 e Qn = 0, a eficiência é de 100%, pode ser calculada a Ef para frequências muito baixas como se todos os pontos estivessem na linha da frequência FPkt = 0. Para isso, a chamada do algoritmo é como está apresentada na Figura 48:

Figura 48 - Chamada do algoritmo c/ FPkt = 0,1

```

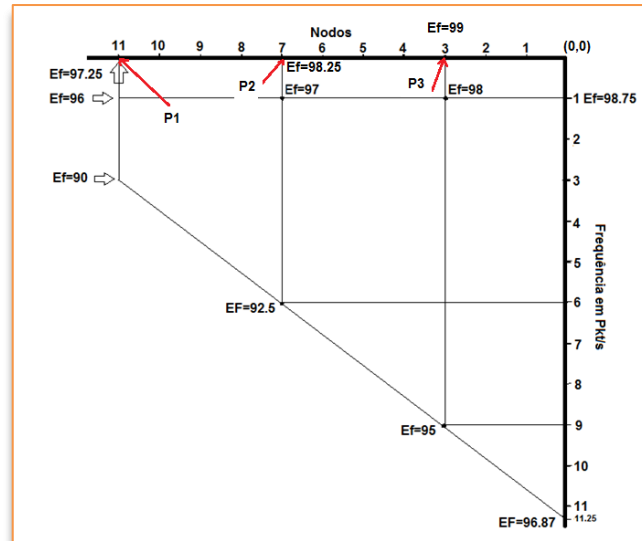
119 do {
120   for(N_nodo=1;N_nodo<=Qn;N_nodo++) {
121
122     RSSI=Gera_RSSI(Ptx_nodo[N_nodo],N_nodo);
123     Ptx_nodo[N_nodo]=PECT(11,0.1,0,-95,60,2420);
124

```

Fonte: O Autor.

Para certificar a equação apresentada para frequências menores que 1 Pkt/s, foi calculada a eficiência Ef para três pontos no gráfico da Figura 49. Três dos pontos estão sobre a linha da frequência de 0 Pkt/s.

Figura 49 - Área de eficiência



Fonte: O Autor.

Os resultados obtidos depois de rodar o algoritmo estão descrito na Tabela 14:

Tabela 14 - Resultado da eficiência FPkt = 0,1

	P1 (Qn=11 e FPkt=0,1)	P2 (Qn=7 e FPkt=0,1)	P3 (Qn=3 e FPkt=0,1)
Calculado	Ef = 97,25	Ef = 98,25	Ef = 99
Medido	Ef = 97,25	Ef = 98,25	Ef = 99

Fonte: O Autor.

Com a frequência de transição dos pacotes de dados abaixo de 1 Pkt/s, não existem erros nos pontos medidos.

5.2.2 Verificação do Conversor de Potência

Para verificar os requisitos funcionais do conversor de potência dBmtoW, é necessário acrescentar algumas linhas de código, as quais resultam em uma pequena tabela de comparação.

Como parâmetros de entrada, é utilizado um pequeno código do programa para ajustar as potências de 0 a -30 dBm, e o parâmetro *model* com o valor de 2420. Na saída do conversor, é necessário ter como resultado a potência em mW que representa o consumo do transmissor. A Tabela 15 apresenta os valores em dBm com a conversão para mW do módulo CC2420 e pode ser comparada com o resultado do conversor.

Tabela 15 - Conversão dBm para mW CC2420

Tx [dBm]	0	-1	-3	-5	-7	-10	-15	-25
Tx [mW]	57,42	55,18	50,69	46,2	42,24	36,3	32,67	29,04

Fonte: O Autor.

O resultado da Figura apresenta uma lista de 31 valores iniciando em 0 dBm e finalizando em -30 dBm e, em seguida, as respectivas potências convertidas. Os valores em dBm estão representados com o sinal invertido. Nota-se, por exemplo, que em algumas potências a conversão tem valores repetitivos. Esta característica foi propositalmente incluída no algoritmo para poder atender potências intermediárias às descritas no módulo CC2420.

Figura 50 - Resultado conversor dBmtoW

```

Pot dBm = 0 Pot mW= 57.4200
Pot dBm = 1 Pot mW= 55.1800
Pot dBm = 2 Pot mW= 50.6900
Pot dBm = 3 Pot mW= 50.6900
Pot dBm = 4 Pot mW= 46.2000
Pot dBm = 5 Pot mW= 46.2000
Pot dBm = 6 Pot mW= 42.2400
Pot dBm = 7 Pot mW= 42.2400
Pot dBm = 8 Pot mW= 42.2400
Pot dBm = 9 Pot mW= 36.6000
Pot dBm = 10 Pot mW= 36.6000
Pot dBm = 11 Pot mW= 36.6000
Pot dBm = 12 Pot mW= 36.6000
Pot dBm = 13 Pot mW= 32.6700
Pot dBm = 14 Pot mW= 32.6700
Pot dBm = 15 Pot mW= 32.6700
Pot dBm = 16 Pot mW= 32.6700
Pot dBm = 17 Pot mW= 32.6700
Pot dBm = 18 Pot mW= 32.6700
Pot dBm = 19 Pot mW= 32.6700
Pot dBm = 20 Pot mW= 29.0400
Pot dBm = 21 Pot mW= 29.0400
Pot dBm = 22 Pot mW= 29.0400
Pot dBm = 23 Pot mW= 29.0400
Pot dBm = 24 Pot mW= 29.0400
Pot dBm = 25 Pot mW= 29.0400
Pot dBm = 26 Pot mW= 29.0400
Pot dBm = 27 Pot mW= 29.0400
Pot dBm = 28 Pot mW= 29.0400
Pot dBm = 29 Pot mW= 29.0400
Pot dBm = 30 Pot mW= 29.0400

```

Fonte: O Autor.

Ao comparar os resultados apresentados neste relatório com a tabela de conversão, conclui-se que a função dBmtoW está de acordo com a especificação da PECT.

5.2.3 Verificação da Equação QPth

A qualidade do caminho QPth é a métrica que define a qualidade dos dados que percorrem um determinado caminho da rede dentro de uma determinada região. Além disso, QPth representa a quantidade de energia a ser acrescentada na transmissão dos dados, além da energia mínima necessária para que os pacotes de dados alcancem ao destino programado.

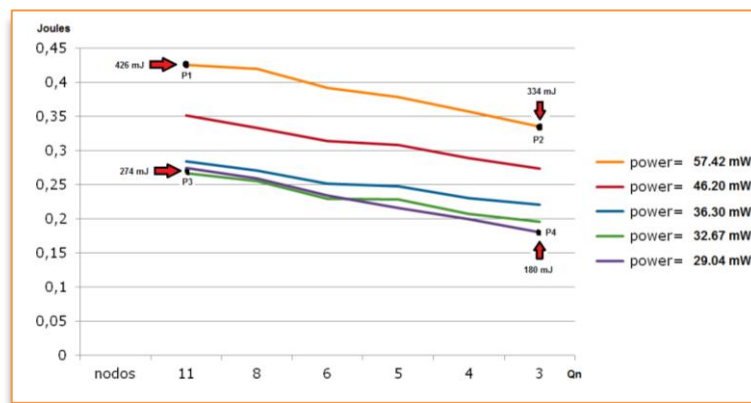
O cálculo QPth foi escrito no algoritmo da PECT a partir da Equação (48), como é mostrado na Equação (57) abaixo:

$$QPth = (10,3 * Qn) / ((Ef / 100) * ((11,5 * Qn) + (5,43 * P_{mW}) - 11,6)); \quad (57)$$

Para validar que a equação apresentada cumpra com o propósito do projeto, a qualidade do caminho QPth para quatro pontos no gráfico é calculada. A Figura 51 mostra o consumo de energia em um determinado tempo para diversas potências do transmissor. Usando a Equação (58) para cálculo do QPth:

$$QPth = \frac{11,5 * Q_n}{11,5 * Q_n + 5,43 * Pot_{mW} - 11,6} * \frac{Ef_{min}}{Ef} \tag{58}$$

Figura 51 - Consumo de energia



Fonte: O Autor.

Os resultados obtidos após a execução do algoritmo estão descrito na Tabela 16. A frequência de envio de pacotes de dados está na região LTPD.

Tabela 16 - Resultado da equação QPth

	P1 (Qn=11; 57,42mW) Cons = 426mJ	P2 (Qn=3; 57,42mW) Cons = 334mJ	P3 (Qn=11; 32,67mW) Cons = 274mJ	P4 (Qn=7; 29,04mW) Cons = 274mJ
Calculado	QPth = 0,267	QPth = 0,092	QPth = 0,417	QPth = 0,172
Medido	QPth = 0,2655	QPth = 0,0923	QPth = 0,4156	QPth = 0,1711

Fonte: O Autor.

Na análise do resultado com os valores dos pontos P1, P2, P3, P4, é possível observar pequenas diferenças no resultado de consumo de energia. A energia dos pontos que estão representados no gráfico foi retirada do relatório de consumo de energia do simulador e está descrita na Tabela 5 – Consumo de energia na transmissão. As verificações realizadas na equação demonstram que o erro de cálculo nos pontos medidos em relação ao gráfico é menor de 1%.

5.2.4 Verificação da Equação Ptx_0

O ajuste da potência de transmissão é calculado a partir de duas variáveis com métricas distintas: a potência para alcançar o próximo destino e a potência para vencer as perdas de qualidade de sinal. A soma dessas duas métricas forma a potência de transmissão do nodo sensor. A Equação (59) calcula o desvio em dBm da potência de transmissão.

$$Ptx_0 = 20 * (1 + QPth) + RSSI + Prx \quad (59)$$

Onde:

Ptx_0 é o desvio em dBm da potência de transmissão;

$QPth$ é a qualidade no caminho dos dados;

$RSSI$ é o sinal recebido no receptor;

Prx é a sensibilidade do receptor.

Para verificar o resultado da equação, os valores dos parâmetros na entrada serão como segue:

$QPth = 0,15$;

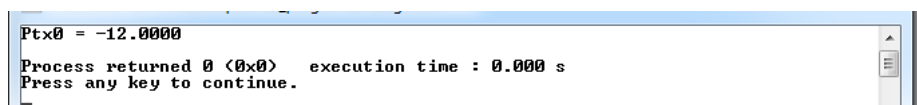
$RSSI = 60$;

$Prx = -95$.

Utilizando a Equação (59), então:

$$Ptx_0 = 20 * (1 + 0,15) + 60 + (-95) = -12 \quad (60)$$

Figura 52 - Resultado da equação Ptx_0 no algoritmo



```
Ptx0 = -12.0000
Process returned 0 (0x0)   execution time : 0.000 s
Press any key to continue.
```

Fonte: O Autor.

A verificação realizada na equação demonstra que não existem erros nos cálculos do programa.

5.2.5 Validação do Algoritmo

Para validar o algoritmo como um todo, foram utilizados valores conhecidos nas variáveis internas de tal forma que a saída do algoritmo seja previsível e conhecida também. Na lista abaixo, é possível observar os valores utilizados na validação do algoritmo.

$$Q_n = 11;$$

$$FPkt = 3;$$

$$E_f = 90;$$

$$Prx = -95 \text{ dBm};$$

$$Ptx = 0 \text{ dBm}.$$

Utilizando a Equação (58):

$$QPth = \frac{11,5 * 11}{426} * \frac{90}{90} = 0,296 \quad (61)$$

Então:

$$Ptx_o = 20 * (1 + 0,296) + 56 + (-95) = -13 \quad (62)$$

Onde:

$$QPth = 0,296;$$

$$RSSI = 56.$$

Como o resultado de Ptx_o está fora do intervalo de ± 3 dBm, o algoritmo faz a correção da potência de entrada Ptx conforme mostra a Equação (63) abaixo:

$$Ptx_f = Ptx_f + Ptx_o \quad (63)$$

Onde:

Ptx_f é o valor da potência de saída;

Ptx_o é o valor do diferencial de potência de saída.

O valor Ptx_f foi carregado no início do algoritmo com o valor da potência de 0 dBm. O resultado é como segue na Equação (64):

$$P_{txf} = 0 + (-13) = -13 \text{ dBm} \quad (64)$$

O valor de -13 dBm não é uma potência padrão do módulo CC2420. Portanto, o algoritmo ajusta a potência de saída para -15 dBm, valor compatível com o módulo CC2420 usado neste trabalho.

Figura 53 - Resultado do algoritmo

```

Ef = 89.950000
ml = 57.4200
QPth = 0.295200
Ptx0 = -13.096009
Ptxf = -15.000000
Ptxf = -15
Process returned 0 (0x0)   execution time : 0.000 s
Press any key to continue.

```

Fonte: O Autor.

As verificações realizadas no algoritmo demonstraram que os desvios nos pontos de medição são menores de 1%.

Como última análise, pode-se dizer que a potência inicial de 0 dBm é exagerada para o modelo em questão, sendo diminuída através da PECT para -15 dBm. A validação do algoritmo foi concluída e atende às especificações.

5.3 VALIDAÇÃO DA PECT

Para a validação da PECT como um todo, é necessário construir um programa para simular os resultados com domínio das variáveis que estão em questionamento e são requisitos do sistema, e, então, verificar se a técnica atende às especificações.

Para validar a técnica, será apresentado a seguir um algoritmo de validação, desenvolvido em linguagem C, que visa fornecer os resultados das potências de trabalho de cada nodo sensor da rede.

Inicialmente, as potências de transmissão dos nodos sensores foram ajustadas para 0 dBm da mesma forma como as variáveis do transmissor de um nodo sensor qualquer estão normalmente ajustada de fábrica. Também foi necessário construir um gerador de RSSI para simular a mesma situação como no simulador Castalia. Nota-se na Figura 54, o trecho do algoritmo que desempenha a tarefa de gerar RSSI a cada nodo sensor.

As potências estão definidas em dBm e representam a perda de sinal de cada nodo sensor em relação ao nodo0, da mesma forma como definido no simulador onde realizou-se o estudo para esta técnica.

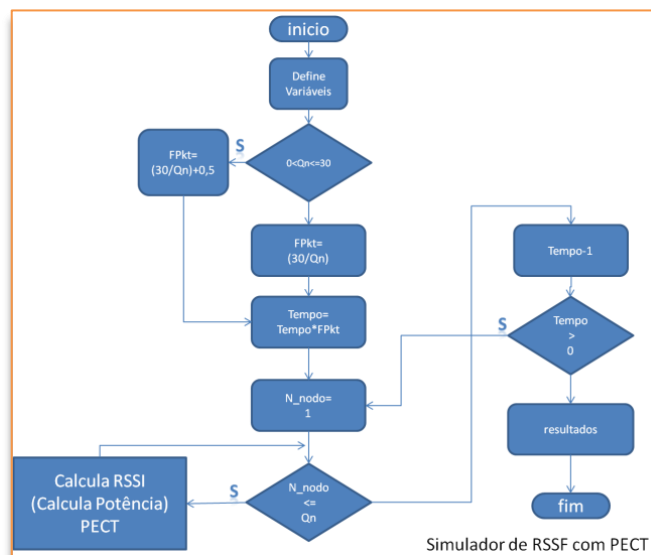
Figura 54 - Função gera RSSI

```
int Gera_RSSI(int Ptx,int N_nodo){
int nodo[20] = {0, -39, -55, -36, -41, -37, -39, -36, -36, -39, -41, -49};
int i, RSSI;
RSSI= 95 + nodo[N_nodo] - Ptx;
return(RSSI);
}
```

Fonte: O Autor.

O cálculo com as potências de transmissão, recepção e a da perda do sinal fornece o valor do RSSI necessário para o cálculo da potência adequada do nodo sensor. A Figura 55 apresenta o fluxograma do algoritmo para simular uma RSSF com a PECT aplicada. Inicialmente, o algoritmo define valores para as variáveis Q_n , as potências iniciais dos nodos sensores, etc.

Figura 55 - Fluxograma de verificação da PECT



Fonte: O Autor.

O algoritmo calcula a frequência de envio dos pacotes de dados e o tempo de execução. Com estas variáveis, pode-se executar o gerador de RSSI e o algoritmo. Por fim, como resultado, o programa de avaliação apresenta um relatório contendo as potências de transmissão de cada nodo sensor. Uma das facilidades deste programa está em alterar os parâmetros de entrada e de observar as mudanças nos resultados das potências enviadas ao

transmissor. Como primeira avaliação da técnica, foi usado $Q_n = 11$ e o tempo de execução de 50 s. Na Figura 56, é possível observar o resultado do experimento de 11 nodos transmitindo para o nodo0.

Figura 56 - Potência Saída da PECT com 11 Nodos Sensores

```

Potencia de saída do nodo sensor
nodo 1 = -10
nodo 2 = -25
nodo 3 = -10
nodo 4 = -15
nodo 5 = -10
nodo 6 = -10
nodo 7 = -10
nodo 8 = -10
nodo 9 = -10
nodo 10 = -15
nodo 11 = -25
Process returned 0 (0x0)   execution time : 0.015 s
Press any key to continue.

```

Fonte: O Autor.

As potências foram ajustadas através do algoritmo para diminuir o consumo de energia da rede. A Tabela 17 relaciona a potência de transmissão com a distância de cada nodo sensor ao nodo0. Os valores indicados na tabela especificam o excedente do sinal para perder *link* entre o nodo transmissor e o nodo0. Por exemplo, -14 dBm significa que a esta distância, e com esta potência, ainda restaram 14 dBm para perder o *link*.

Na realidade, para manter a eficiência desejada para a técnica no envio dos pacotes de dados, é necessário que a potência excedente ao *Path loss* seja pelo menos de $20 \text{ dBm} \pm 2$ quando o nodo transmitir individualmente, ou seja, sem a presença de interferências causadas na transmissão dos pacotes de dados dos nodos vizinhos. A Tabela 17 apresenta na cor azulada as potências de transmissão para que cada nodo individualmente enviassem os pacotes de dados ao destino.

Tabela 17 - Potência de transmissão versus sinal excedente 11 nodos

Distância	75	16	100	65	90	75	100	100	75	65	45
Potência	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
0 dBm	-39	-55	-36	-41	-37	-39	-36	-36	-39	-41	-49
-5 dBm	-34	-50	-31	-36	-32	-34	-31	-31	-34	-36	-44
-10 dBm	-29	-45	-26	-31	-27	-29	-26	-26	-29	-31	-39
-15 dBm	-24	-40	-21	-26	-22	-24	-21	-21	-24	-26	-34
-25 dBm	-14	-30	-11	-16	-12	-14	-11	-11	-14	-16	-24

Fonte: O Autor.

Portanto, quanto maior a quantidade de nodos, maior será a interferência, e a consequência disso é o aumento da potência na transmissão. Os resultados obtidos durante a primeira avaliação foram transcritos para a Tabela 17 na cor laranja e é possível observar o aumento da potência em alguns nodos em função da interferência.

Na avaliação seguinte, o Q_n foi 6 e o tempo de execução foi de 50 s. Então, existem seis nodos transmitindo para o nodo0. A Figura 57 mostra os resultados obtidos.

Figura 57 - Potência saída da PECT com 6 nodos sensores

```

Potencia de saída do nodo sensor
nodo 1 = -15
nodo 2 = -25
nodo 3 = -10
nodo 4 = -15
nodo 5 = -10
nodo 6 = -15
Process returned 0 (0x0)   execution time : 0.000 s
Press any key to continue.

```

Fonte: O Autor.

As potências foram ajustadas através do algoritmo e estão, em alguns casos, menores que a anterior. A Tabela 18 relaciona as potências de transmissão com a distância de cada nodo sensor em relação ao nodo0.

Tabela 18 - Potência de transmissão versus sinal excedente 6 nodos

Distância	75	16	100	65	90	75
Potência	cm	cm	cm	cm	cm	cm
0 dBm	-39	-55	-36	-41	-37	-39
-5 dBm	-34	-50	-31	-36	-32	-34
-10 dBm	-29	-45	-26	-31	-27	-29
-15 dBm	-24	-40	-21	-26	-22	-24
-25 dBm	-14	-30	-11	-16	-12	-14

Fonte: O Autor.

5.4 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Com base nos resultados descritos e analisados neste capítulo, é possível observar que o algoritmo atende às especificações da PECT. Em mais detalhes, o algoritmo é capaz de modificar a potência individualmente de cada nodo sensor em função da distância e ajustar o Q_{Pth} em função da interferência causada pela quantidade de nodos transmitindo simultaneamente. Nos resultados de verificação, os valores de erros com relação ao consumo de energia foram menores de 1%. Nas verificações realizadas com o simulador de nodo, foi possível observar os acréscimos da potência em função da interferência. Por fim, o simulador de nodos gerou uma lista com as potências de transmissão para cada nodo da rede, o que pode ser utilizado para demonstrar que a PECT atende às especificações, diminuindo as potências de transmissão de cada nodo da RSSF.

6 AVALIAÇÃO

Neste capítulo será descrita a etapa de avaliação da técnica proposta para minimizar o consumo de energia, sob a perspectiva de desempenho. Será apresentada uma análise dos métodos utilizados neste trabalho, o desempenho em função do tempo e da energia consumida. Não esquecendo o principal objetivo deste trabalho de pesquisa, que é desenvolver uma técnica e, através de um algoritmo portátil, identificar o equilíbrio da potência necessária na transmissão de pacotes de dados com o menor consumo de energia.

6.1 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

Para a avaliação do algoritmo da PECT, o simulador é capaz de apresentar os resultados de consumo de energia e da quantidade de pacotes enviados entre os nodos transmissores e o nodo de destino receptor. Inicialmente, a ideia consiste em inserir o algoritmo diretamente no simulador e verificar os resultados depois de um determinado tempo de execução. Porém, desta forma não é possível controlar a execução, nem mesmo elaborar os resultados obtidos para a realização de uma comparação. Portanto, a apresentação do método consiste em duas etapas:

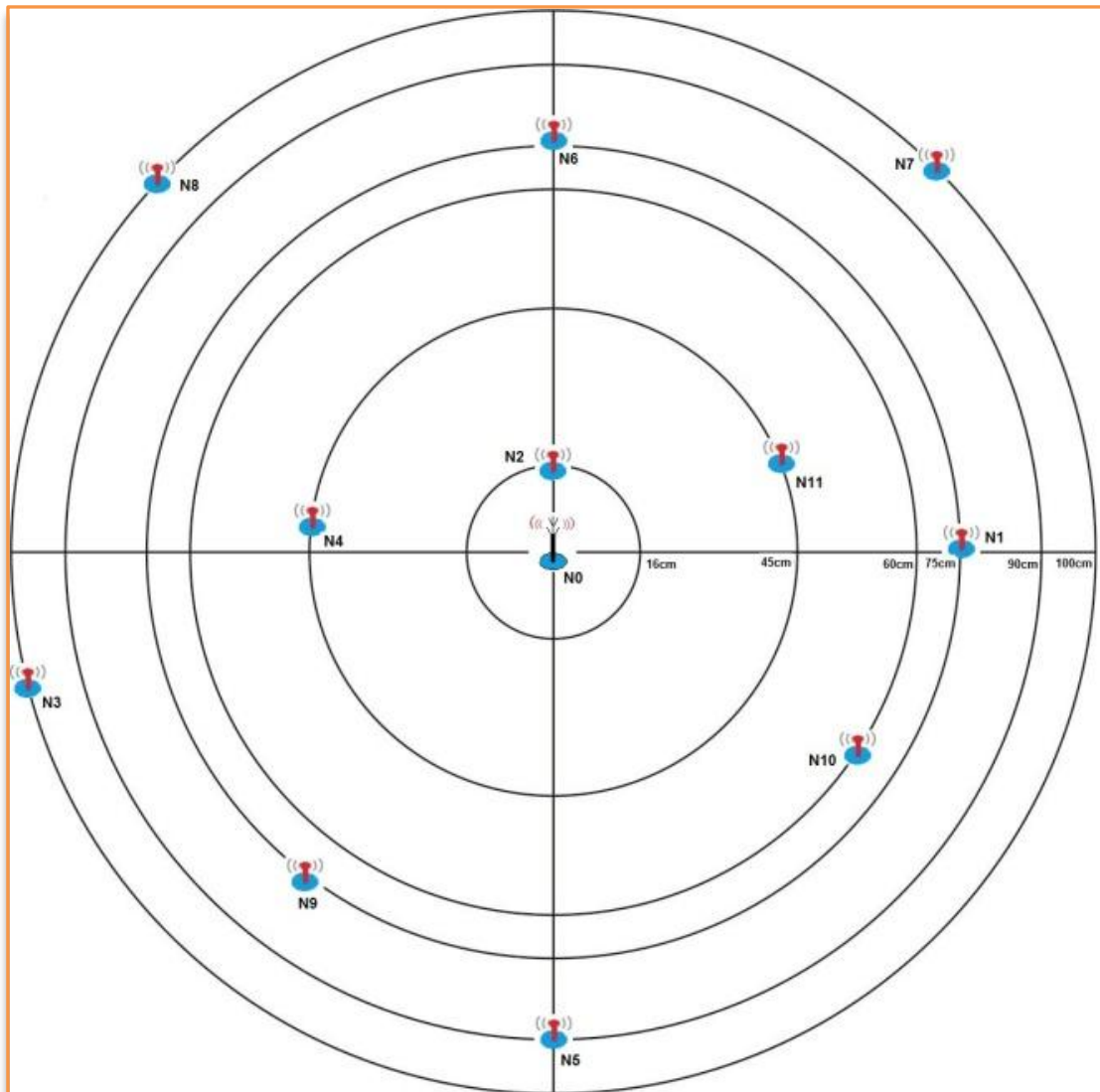
1. Inicialmente, são calculadas as potências de transmissão em função da quantidade de nodos sensores das redes e da frequência de envio de pacotes de dados, através do uso do mesmo programa em C da emulação de nodo;
2. Usando o simulador de redes Castalia, inserir as potências produzidas da etapa anterior e apresentar os resultados de consumo de energia e de desempenho da técnica proposta. Gráficos comparativos do método em relação a outras metodologias existentes podem também ser explorados.

6.2 ESTUDO DO CASO DA PECT

Para análise do desempenho da PECT, 1 RSSF foi criada com nodos sensores dispostos em uma área com o raio de 1 m. Todos os nodos sensores estão fixos, em topologia estrela tipo *many to one*. Esta topologia garante um melhor cenário para entendimento do comportamento do tráfego de dados, da interferência gerada pela potência desnecessária de

transmissão, bem como pela interferência gerada a partir das colisões de pacotes de dados. A Figura 58 exemplifica a disposição dos nodos sensores dentro da região determinada.

Figura 58 - Disposição dos nodos sensores



Fonte: O Autor.

Como pode ser visto, existe um nodo central chamado de nodo N0 e áreas demarcadas com distâncias predeterminadas entre os nodos sensores N1 a N11. Inicialmente, é realizado um estudo comportamental para cada nodo sensor no que tange à potência de transmissão, o sinal do receptor e os pacotes de dados transmitidos em um determinado período de tempo. Desta forma, pode ser definida a melhor potência de transmissão P_{tx} para cada distância, bem como a qualidade do caminho Q_{pth} devido às interferências da rede.

6.3 CÁLCULO DA POTÊNCIA COM A PECT

Para avaliar o algoritmo, inicialmente é necessário calcular a potência de transmissão de cada nodo sensor no ambiente de rede proposto, de forma a facilitar o entendimento do comportamento do tráfego de dados e da interferência gerada pela potência desnecessária de transmissão e pela interferência causada a partir das colisões dos pacotes de dados.

A potência produzida dos nodos sensores usando o algoritmo é calculada em função da distância entre os nodos e da quantidade de nodos da rede Q_n , e o resultado da potência é gerado para cada nodo individualmente.

As Figuras 59 a 64 mostram resultados das potências obtidos do emulador de nodos sensores utilizando como potência inicial de 0 dBm para cada nodo.

Figura 59 - Simulação com 11 nodos

```
Potencia de saida do nodo sensor
nodo 1 = -10
nodo 2 = -25
nodo 3 = -10
nodo 4 = -15
nodo 5 = -10
nodo 6 = -10
nodo 7 = -10
nodo 8 = -10
nodo 9 = -10
nodo 10 = -15
nodo 11 = -25
```

Figura 60 - Simulação com 8 nodos

```
Potencia de saida do nodo sensor
nodo 1 = -15
nodo 2 = -25
nodo 3 = -10
nodo 4 = -15
nodo 5 = -10
nodo 6 = -15
nodo 7 = -10
nodo 8 = -10
```

Figura 61 - Simulação com 6 nodos

```
Potencia de saida do nodo sensor
nodo 1 = -15
nodo 2 = -25
nodo 3 = -10
nodo 4 = -15
nodo 5 = -10
nodo 6 = -15
```

Figura 62 - Simulação com 5 nodos

```
Potencia de saida do nodo sensor
nodo 1 = -15
nodo 2 = -25
nodo 3 = -10
nodo 4 = -15
nodo 5 = -15
```

Figura 63 - Simulação com 4 nodos

```
Potencia de saida do nodo sensor
nodo 1 = -15
nodo 2 = -25
nodo 3 = -10
nodo 4 = -15
```

Figura 64 - Simulação com 3 nodos

```
Potencia de saida do nodo sensor
nodo 1 = -15
nodo 2 = -25
nodo 3 = -15
```

Fonte: O Autor.

Neste trabalho, a frequência de transmissão em conjunto com a quantidade de nodos sensores e a saturação do envio de pacotes de dados para o nodo0 foram apresentadas. Os resultados mostraram valores de potências utilizando as mesmas frequências de envio de pacotes de dados FPkt próximas da saturação do LTPD. Foi observado que, quanto maior Q_n , maior a necessidade de transmissão com potências mais elevadas. Portanto, com o aumento de Q_n , a interferência também é aumentada, e esse fato contribui diretamente no aumento da potência do transmissor de cada nodo sensor.

6.4 EFICIÊNCIA DA REDE PROPOSTA COM A PECT

A Figura 65 apresenta o conjunto de potências que foi usado para produzir as respostas de avaliação de consumo de energia para os 11 nodos sensores transmitindo os pacotes de dados a um nodo central de destino SN.node[0]. A configuração da potência do nodo0 foi de 0 dBm para não haver falta de potência para as respostas de retorno ACK.

Figura 65 - setPower do arquivo omnetpp.ini

```
[Config setPower]
SN.node[0].Communication.Radio.TxOutputPower = "0dBm"
SN.node[1].Communication.Radio.TxOutputPower = "-10dBm"
SN.node[2].Communication.Radio.TxOutputPower = "-25dBm"
SN.node[3].Communication.Radio.TxOutputPower = "-10dBm"
SN.node[4].Communication.Radio.TxOutputPower = "-15dBm"
SN.node[5].Communication.Radio.TxOutputPower = "-10dBm"
SN.node[6].Communication.Radio.TxOutputPower = "-10dBm"
SN.node[7].Communication.Radio.TxOutputPower = "-10dBm"
SN.node[8].Communication.Radio.TxOutputPower = "-10dBm"
SN.node[9].Communication.Radio.TxOutputPower = "-10dBm"
SN.node[10].Communication.Radio.TxOutputPower = "-15dBm"
SN.node[11].Communication.Radio.TxOutputPower = "-25dBm"
```

Fonte: O Autor.

Com as potências geradas pelo algoritmo, a quantidade de nodos presentes na rede é definida, pode ser executada a simulação. Para cada conjunto de potências obtido através do algoritmo, um novo arquivo de configuração do Castalia deve conter as informações referentes ao conjunto de dados para a simulação, de forma a apresentar os resultados de eficiência e consumo das potências informadas. A Tabela 19 mostra o resultado da média de recebimento de pacotes de dados da rede após a simulação com a configuração usando seis nodos sensores ser executada.

Tabela 19 - Média de recebimento de pacotes de dados por frequência

Potência Frequência	6 nodos					
	-25dBm	-15dBm	-10dBm	-5dBm	0dBm"	PECT
rate=1	42,833	48,667	49,167	49	48,833	48,167
rate=2	87,333	97,833	97,333	97,5	97,167	96,167
rate=3	134,333	145	145,333	146	144,5	142,667
rate=4	179,833	187,167	191	190,833	192,333	188,333
rate=5	211	231	233,5	235,5	237	232
rate=6	207,833	245,333	252	250,833	252,5	243,833
rate=7	220,667	249,333	257,167	259,5	257,667	254,167
rate=8	218,833	256	254,833	254,167	258,5	252,833
rate=9	218,333	251	256,667	260,667	258	251,833
rate=10	211,833	253,833	256,5	258,167	264,667	249,833

Fonte: O Autor.

Os resultados apresentados com seis nodos sensores foram obtidos após 50 s de execução no simulador. Na primeira coluna está descrito como *rate* as diversas frequências de envio dos pacotes de dados FPkt. Na linha superior da tabela, estão definidas as potências que os dados foram transmitidos e ainda o resultado com o uso da técnica. Com base nos resultados acima mostrados, é possível verificar que a eficiência de recebimento está acima dos 90% de pacotes de dados. No LTPD, o algoritmo acompanha o comportamento das diversas potências de transmissão, exceto em -25 dBm, em que o comportamento é diferenciado devido à perda maior de pacotes de dados e conseqüentemente da eficiência. A Tabela 20 mostra o desempenho no recebimento dos pacotes de dados da rede no LTPD. Na primeira coluna, está descrita a quantidade de nodos utilizados na simulação, e na linha superior da tabela, estão as potências utilizadas durante a transmissão e, por fim, os resultados obtidos a partir do uso da técnica.

Tabela 20 - Média de recebimento de pacotes de dados por nodo

	- 25dBm	- 15dBm	- 10dBm	-5dBm	0dBm	PECT
11 nodos	115,4	131,6	133,7	134,6	136	129,2
8 nodos	150,6	180,8	182	182,6	183,2	178,7
6 nodos	211	231	233,5	235,5	237	232
5 nodos	256,4	280,6	283,6	282,2	280,4	281,4
4 nodos	318,5	333,7	334	337	333,2	335
3 nodos	410,6	429,3	439,6	430,6	432	425

Fonte: O Autor.

Os resultados apresentados com 11 nodos sensores foram obtidos após 50 s de execução no simulador. Na primeira coluna, está descrita a quantidade de nodo enviando pacotes de dados Qn. Na linha superior da tabela, estão definidas as potências que os dados foram transmitidos. Com base nos resultados acima mostrados, é possível verificar uma eficiência de 86% dos pacotes recebidos, ou seja, 4% abaixo do mínimo esperado. Este resultado, comparado com a eficiência do mesmo nodo sensor com potência de transmissão em 0 dBm, atinge a eficiência em 90%. Esta característica deve-se à frequência de transmissão estar muito próxima do LTPD, ou seja, na margem do início da queda acentuada da perda de pacotes de dados da transmissão e recepção. Portanto, a quantidade de nodos sensores de uma rede é fator limitante no desempenho da entrega de pacotes de dados, por aumentar as interferências. Quanto maior o número de nodos maior a interferência.

Já nos resultados obtidos com seis nodos, é possível verificar que a média recebida de pacotes de dados por nodo é de 232 em 50 s. A eficiência com seis nodos é de 92,8% de

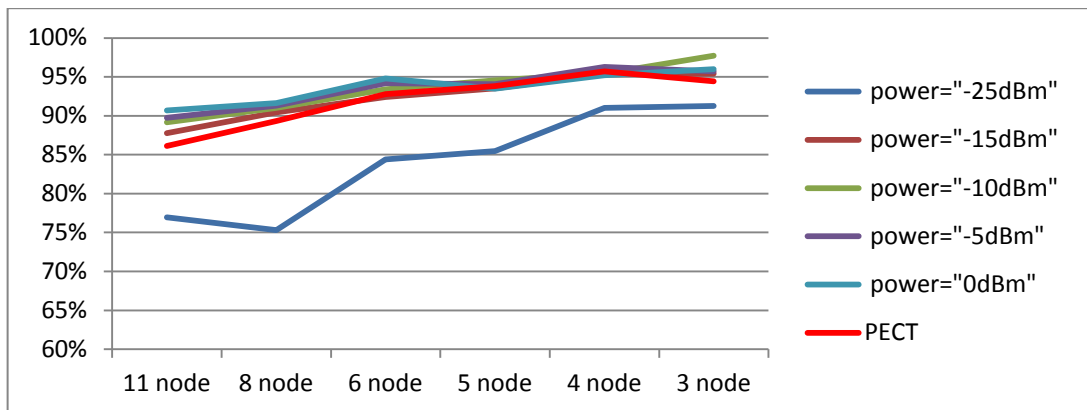
pacotes recebidos com a PECT e de 94,8% se o nodo transmitir com potência máxima de 0 dBm, e de 84,4% se o nodo transmitir com potência mínima -25 dBm.

De fato, quando a quantidade de nodos da RSSF na transmissão dos pacotes de dados diminui, a eficiência aumenta e o desempenho também aumenta.

Na análise do resultado do simulador com três nodos, o desempenho melhora e atinge os 94,4% de pacotes recebidos com a PECT, e de 96% se o nodo transmitir com a potência de 0 dBm, e de 91,2% se o nodo transmitir com potência -25 dBm. O aumento da eficiência era esperado através da diminuição da quantidade de nodos sensores transmitindo dados.

O gráfico da Figura 66 apresenta o comportamento no algoritmo em relação às potências de transmissão e da quantidade de nodos sensores no envio dos pacotes de dados.

Figura 66 - Eficiência no recebimento dos pacotes de dados



Fonte: O Autor.

No eixo das coordenadas, encontra-se a eficiência do recebimento dos pacotes de dados no nodo0 ou coordenador. O eixo das abscissas apresenta a quantidade de nodos sensores que estão transmitindo pacotes de dados. O gráfico mostra que a PECT acompanha a trajetória das potências de transmissão e, portanto, mostra um bom desempenho na transmissão e no recebimento dos pacotes de dados. A linha na cor azul do gráfico mostra a potência de -25 dBm. A eficiência nesta potência demonstra uma instabilidade não acompanhando as curvas das demais potências. Com -25 dBm de potência de transmissão, dependendo da distância, o sinal recebido é fraco, causando muitas perdas de pacotes de dados. Esta é a principal causa da instabilidade apresentada no gráfico.

Nesta condição de eficiência, os pacotes de dados representados no gráfico da

Figura foram calculados no LTPD e, portanto, com a característica da frequência de transmissão muito perto da saturação do envio de dados, estando na margem do início da queda acentuada de pacotes da transmissão e recepção de dados.

6.5 CONSUMO DE ENERGIA COM A PECT

A avaliação do consumo de energia é considerada a fase mais importantes neste trabalho. Nesta etapa, é possível observar o desempenho do método em função do consumo de energia. A análise dos dados deste subcapítulo indica se a técnica é eficiente ou não em termos de otimização de energia.

Na Tabela 21, é possível observar o consumo de energia, em joules, na transmissão dos pacotes de dados. Esse consumo foi obtido com os mesmos dados usados para o cálculo da eficiência. A frequência de transmissão dos pacotes de dados FPkt está próxima ao LTPD, nas imediações de 30 Pkt/s e o tempo de simulação em 50 s.

Tabela 21 - Consumo de energia na transmissão

Potência (Qn) Nodo	0dBm	-5dBm	-10dBm	-15dBm	-25dBm	PECT
11	0,4261326	0,351371	0,2839251	0,267293	0,2743594	0,273276
8	0,4199369	0,3335261	0,271223	0,255419	0,2589229	0,259379
6	0,3921217	0,3139173	0,2514375	0,229916	0,2338307	0,239485
5	0,3781713	0,3084656	0,2480082	0,228853	0,2156329	0,232422
4	0,3575773	0,2891056	0,2299943	0,207329	0,1995277	0,210515
3	0,334826	0,273251	0,221132	0,195629	0,180512	0,193686

Fonte: O Autor.

No eixo das coordenadas encontra-se a quantidade de nodos transmissores Qn. O eixo das abcissas contém a potência na transmissão dos pacotes de dados mais o uso do algoritmo. Nas colunas marcadas na cor amarela, observa-se o consumo mínimo desta simulação. Na coluna da potência de 0 dBm encontram-se os maiores consumos de energia.

Em uma análise direta do consumo de energia, o comportamento do algoritmo tem um consumo levemente superior ao mínimo consumo da rede. O motivo está associado ao fato de a técnica trabalhar com uma estimativa de interferência para calcular a potência necessária de transmissão dos pacotes de dados. De qualquer forma, a PECT garante cerca de 90% de eficiência para todos os nodos. A análise de consumo de energia, se for comparada com a

potência de 0 dBm, então, a PECT tem grande vantagem no desempenho sendo até 40% mais econômica em algumas situações.

As Figuras 67 a 72 mostram o comportamento do consumo de energia em função: quantidade de nodos sensores; potência de transmissão; frequência dos pacotes de dados; e a PECT.

Figura 67 - Consumo com 11 nodos

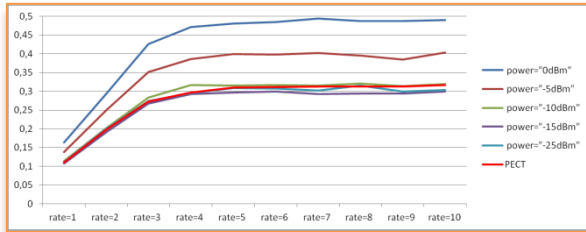


Figura 68 - Consumo com 8 nodos

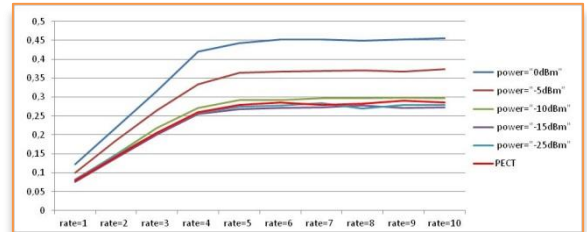


Figura 69 - Consumo com 6 nodos

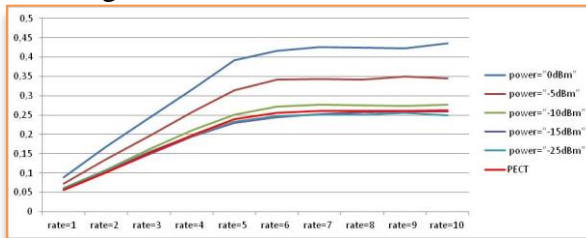


Figura 70 - Consumo com 5 nodos

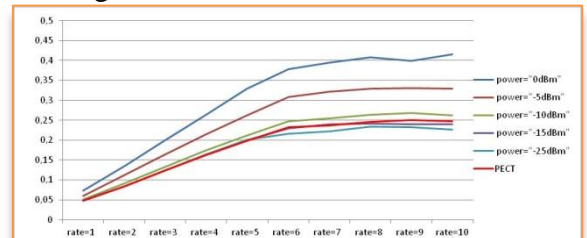
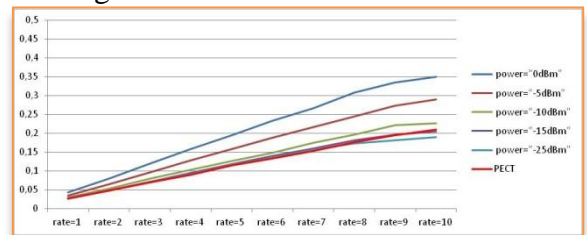


Figura 71 - Consumo com 4 nodos



Figura 72 - Consumo com 3 nodos



Fonte: O Autor.

A variação de FPkt, ou *rate*, é o ponto onde os pacotes de dados atingem o LTPD, mostram que o consumo de energia além deste limite, não tem a mesma razão de crescimento devido à saturação na transmissão e recepção dos pacotes de dados.

As métricas de avaliação de consumo de energia são obtidas com o somatório dos consumos no transmissor de cada nodo sensor. Vale lembrar que não foram somadas as métricas dos consumos do receptor, do instrumento sensor propriamente dito e mais a do microcontrolador e seus periféricos, que para o funcionamento do nodo sensor têm considerável participação no consumo da energia.

A Tabela 2 apresenta o resultado do modelo de potência para a plataforma de hardware Mica2 (SHNAYDER *et al.*, 2004). São apresentados os diferentes modos de

consumo de potência da CPU no nível de corrente, o consumo na transmissão e recepção entre outros.

Tabela 22 - Modelo de consumo do Mica2

Mode CPU	Current	Mode Radio	Current
Active	8,0 mA	Rx	7,0 mA
Idle	3,2	Tx (-20 dBm)	3,7 mA
ADC Noise Reduce	1,0	Tx (-19 dBm)	5,2 mA
Power-down	103 uA	Tx (-15 dBm)	5,4 mA
Power-save	110 uA	Tx (-8 dBm)	6,5 mA
Standby	216 uA	Tx (-5 dBm)	7,1 mA
Extended Standby	223 uA	Tx (0 dBm)	8,5 mA
Internal Oscillator	0,93 mA	Tx (4 dBm)	11,6 mA
LEDs	2,2 mA	Tx (6 dBm)	13,8 mA
Sensor board	0,7mA	Tx (8 dBm)	17,4 mA
EEprom Access		Tx (10 dBm)	21,5 mA
Read	6,2 mA		
Read Time	565 us		
Write	18,4 mA		
Write Time	12,9 ms		

Fonte: Shnayder *et al.* (2004).

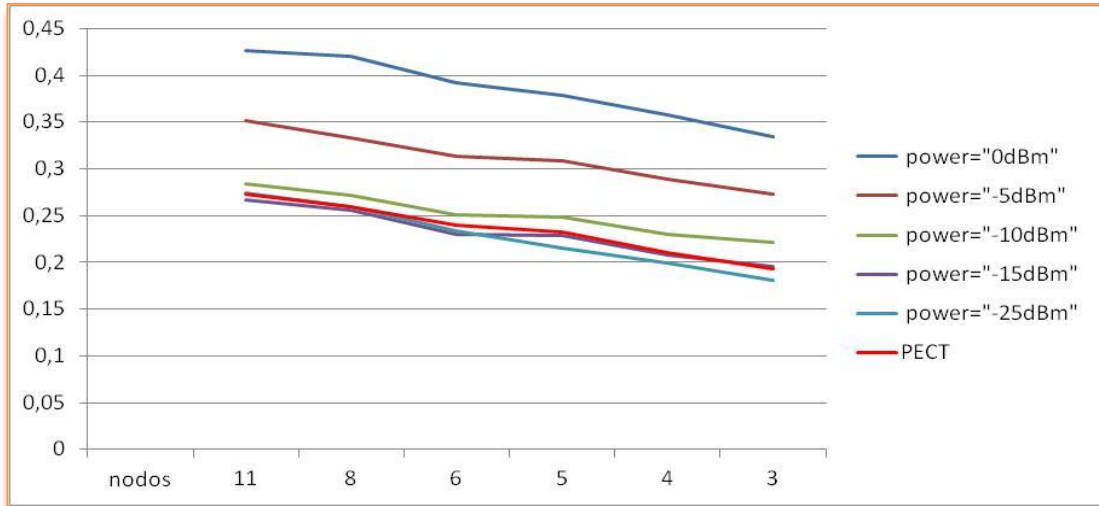
O exemplo do modelo acima apresenta o consumo de energia de periféricos, o consumo da CPU e do rádio transceptor. A tabela mostra as diversas potências de transmissão com a respectiva da corrente do transmissor que varia de 3,7 mA a 21,5 mA, alimentados com uma tensão de 3 Vcc utilizada no experimento. Assim, associado ao consumo de energia do transmissor no nodo, existe o consumo inerente ao do processador e dos periféricos, os quais estão ativos a cada momento na transmissão dos dados. Quando, em um determinado nodo sensor, a frequência de transmissão dos pacotes de dados ultrapassar o LTPD, o consumo de energia do transmissor atinge o limite da capacidade de envio de dados. Porém, se a frequência de transmissão de dados continuar aumentando além do LTPD, o consumo de energia da CPU e dos dispositivos periféricos serão aumentados por informações coletadas, processadas e não transmitidas. Portanto, a tentativa de transmissão de pacotes de dados depois do LTPD aumenta o consumo de energia.

No caso da PECT, a transmissão dos pacotes de dados foi feita com frequência de envio próximo ao limite LTPD.

Portanto, se a quantidade de pacotes transmitidos dos nodos para o coordenador for semelhante para qualquer quantidade de nodos, o consumo de energia deveria ser semelhante, desde que a potência de transmissão seja a mesma. De fato, quanto menor a quantidade de nodos transmitindo pacotes de dados, menor a probabilidade de ocorrência de interferências e menor o consumo de energia. Então, quanto maior o consumo de energia, maior é a perturbação e menor é a eficiência. O gráfico da Figura 73 mostra as variações de consumo

em função da quantidade de nodos e da potência de transmissão dos pacotes de dados. Nota-se, no gráfico, um decréscimo no consumo de energia na transmissão dos pacotes de dados quando a quantidade de nodos na transmissão diminui, até mesmo em uma única potência.

Figura 73 - Consumo de energia na transmissão



Fonte: O Autor.

Observa-se que o decréscimo da energia ocorre com a diminuição da quantidade de nodos, com a diminuição das interferências entre os nodos, o que contribui no aumento da eficiência e da economia de energia da RSSF.

A linha descrita na cor vermelha representa a PECT e mostra o comportamento do consumo de energia com uso da técnica, o qual inicia com o consumo em 0,273 joules quando o Q_n é 11 e se reduz para 0,193 joules quando Q_n também se reduz a três nodos.

Nota-se que a PECT segue o mesmo comportamento no gráfico das outras potências, com uma pequena oscilação no consumo entre Q_n igual a 5 e 6.

A Tabela 23 mostra o consumo médio de cada nodo sensor em milijoules. Na análise do consumo, nota-se que a PECT segue a mesma linha trajetória da potência de -15 dBm, com um consumo médio de 1,82% maior.

Tabela 23 - Consumo médio de energia por nodo

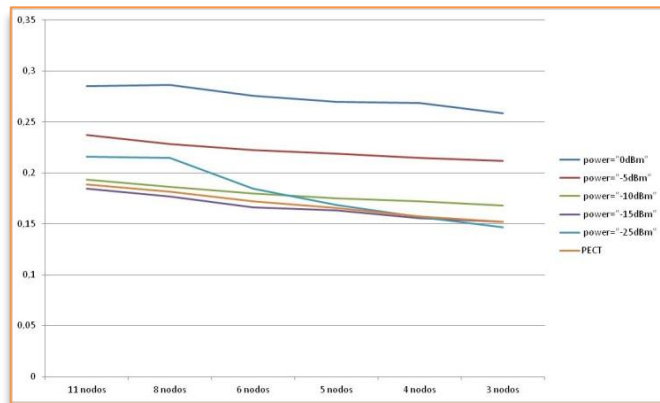
	0dBm	-5dBm	-10dBm	-15dBm	-25dBm	PECT
11 nodos	0,28484799	0,23725317	0,19301542	0,18459505	0,21603017	0,188727041
8 nodos	0,28645082	0,22828617	0,18627953	0,1765161	0,21487378	0,181510847
6 nodos	0,27575366	0,22216369	0,17947002	0,16588478	0,18470039	0,172043822
5 nodos	0,26973702	0,21861488	0,1749	0,16311661	0,16820039	0,165189765
4 nodos	0,26825004	0,21447003	0,17215142	0,1553024	0,15661515	0,157100746
3 nodos	0,2583534	0,21149442	0,16765112	0,15188599	0,14651936	0,151910588

Fonte: O Autor.

Com base nos resultados descritos e analisados, a simulação apresentou o maior consumo de energia por nodo com o $Q_n = 8$ e, neste caso, com o uso da PECT a técnica reduziu o consumo em 36,7%. Outra análise interessante é em função do consumo de energia por nodo de uma RSSF, quando comparado ao comportamento do consumo de energia da RSSF. O decréscimo do consumo de energia por nodo em função da quantidade de nodos Q_n se mostra menor em relação ao de decréscimo do consumo de energia da RSSF.

Em ultima análise, a divisão o consumo de energia de cada nodo sensor pela quantidade de pacotes de dados entregues ao nodo0, coordenador, valoriza o nodo sensor, o qual entrega uma maior quantidade de pacotes de dados e, por esta, razão nota-se as diferenças. A Figura 74 apresenta o decréscimo do consumo de energia por nodo.

Figura 74 - Consumo de energia na transmissão por nodo sensor



Fonte: O Autor.

Com base nos resultados analisados, a potência de transmissão da PECT está muito próxima de -15 dBm e, neste caso, nota-se que é o mínimo consumo de energia por nodo da RSSF.

Na potência de -25 dBm, quando Q_n é maior de oito nodos, tem-se uma elevação de consumo. A ocorrência reflete a perda de pacotes de dados do nodo sensor em função da quantidade de pacotes enviados ao nodo0. Neste caso, com menor potência de transmissão e com a interferência, os nodos sensores entregaram um número menor de pacotes de dados que em potências maiores como, por exemplo -15 dBm.

6.6 ANÁLISE DE DESEMPENHO PECT

A análise de desempenho é uma ferramenta que busca medir o desempenho da PECT, estabelecendo uma comparação entre o esperado e o apresentado.

Normalmente, um nodo sensor de um determinado fabricante, a potência de saída do transmissor não tem controle pré-estabelecido e vem fixada em 0 dBm. O que se busca neste trabalho de pesquisa é uma técnica que faça o controle da potência de nodos sensores de forma simples e tenha um bom desempenho, principalmente na economia de energia, e ainda que seja um algoritmo portátil para qualquer tipo de tecnologia de nodo sensor existente.

6.6.1 Análise de Desempenho no LTPD

Na transmissão ou recepção dos pacotes de dados, o desempenho no LTPD é um fator muito importante. A saturação da troca de dados provoca o desperdício de energia, causando perda de pacotes de dados e processamento de dados indesejável no nodo sensor.

Para analisar o desperdício de energia ultrapassando o LTPD, foi realizada uma simulação de cálculo utilizando os dados dos consumos apresentados na Tabela 22. A tensão da alimentação utilizada foi de 3,0 Vcc. Nota-se que o consumo da CPU está em 24 mW, ou seja, se for comparado ao consumo do transmissor em 0 dBm, nota-se equivale a 42% do consumo. Calculado o consumo de energia da CPU para 50 segundos então:

$$0,024\text{mW} * 50\text{s} = 1,2 \text{ joules} \quad (60)$$

Observa-se que a CPU não está todo o tempo ativa e, portanto, para avaliar o consumo de energia no desperdício de pacotes de dados, foi utilizado o percentual de 42% do consumo de energia em 0 dBm. O cálculo analisado exemplifica a participação da CPU no consumo de energia do nodo sensor. Como existe ainda a variação da quantidade de nodos, o desempenho no consumo de energia deve ser diferente e, portanto, foi usada uma média para calcular o consumo de energia da CPU. A Tabela 24 mostra uma comparação do consumo de energia em joules do transmissor e da CPU no LTPD.

Tabela 24 - Consumo de energia na transmissão + cpu + eficiência

Potência (Qn)Nodos	0dBm	CPU	EFICIÊNCIA LTPD
11	0,4261326	0,178976	90%
8	0,4199369	0,176373	92%
6	0,3921217	0,164691	93%
5	0,3781713	0,158832	93,5
4	0,3575773	0,150182	94%
3	0,334826	0,140627	95%

Fonte: O Autor.

Caso a frequência de transmissão dos pacotes de dados venha a ultrapassar o LTPD, a eficiência não se comporta como descrito na Tabela 24, portanto, não se garante que o consumo da CPU e periféricos seja mantido. Sabe-se que o consumo em 50 s da CPU é de 1,2 joules e com um cálculo simples verifica-se que a CPU está ativa 13% deste tempo.

Em ultima análise, se a frequência de envio de pacotes ultrapassar o limite LTPD, a eficiência diminui e o nodo sensor descarta uma grande quantidade de pacotes. Neste caso, o trabalho da CPU ativa é maior, o que contribui em um aumento no consumo final.

Para mostrar o aumento do consumo de energia depois do LPTD, foram montados dois experimentos no simulador.

Experimento 1: transmitir pacotes de dados durante 50 s, com 0 dBm de potência e uma frequência de envio de Pkt/s= 1.

Figura 75 - Resultado de simulação 0dBm e FPkt = 1

```

module:SN.node[1].ResourceManager (0dbm rate 1)
Castalia|         simple output name:Consumed Energy
Castalia|         0.0145491
Castalia|         simple output name:Packet breakdown
Castalia|         43 Success, first try
Castalia|         6 Success, not first try

```

Fonte: O Autor.

O resultado do simulador mostrado na Figura 75 é possível observar o consumo de energia para uma frequência de envio de 1 Pkt/s, que é de 0,0145491 joules. Para determinar o consumo por pacote na potência de 0 dBm e frequência de 1 Pkt/s, tem-se:

$$\text{Cons}_{\text{Pkt}} = \frac{\text{Energia Consumida}}{\text{Num Pacotes}} \quad (61)$$

$$\text{Cons}_{\text{pkt}} = \frac{0,0145491}{49} = 296,92 * 10^{-6} \text{ Joules/pacote} \quad (62)$$

Experimento 2: transmitir pacotes de dados durante 50 s, com 0 dBm de potência e uma frequência de envio de Pkt/s= 10.

Figura 76 - Resultado de simulação 0dBm e FPkt = 10

```

module:SN.node[1].ResourceManager (0dbm rate 10)
Castalia|          simple output name:Consumed Energy
Castalia|          0.0388223
Castalia|          simple output name:Packet breakdown
Castalia|          324 Failed, buffer overflow
Castalia|          8 Failed, busy channel

```

Fonte: O Autor.

No resultado da Figura 76 do simulador, é possível observar o consumo de energia para uma frequência de envio de 10 Pkt/s 0,0388223 joules.

O esperado seria um consumo de energia por pacote de dados semelhante, ou seja, na frequência de 1 Pkt/s, uma transmissão de 50 pacotes de dados, e na frequência de 10 Pkt/s, uma transmissão de 500 pacotes.

Este fato não se verifica e, então, é possível observar que na frequência de 1 Pkt/s o nodo transmitiu 49 pacotes, e com a frequência de 10 Pkt/s, o nodo transmitiu 134Pkts, com 10 Pkts com falhas de ACK, portanto, chegaram efetivamente 124 Pkts. Para cada pacote não entregue no destino e processado na CPU, houve consumo de energia e este deve ser somado ao resultado final do cálculo da energia. Para calcular o consumo de energia por pacote na potência 0 dBm e frequência de 10 Pkt/s, tem-se:

$$\text{Cons}_{\text{pkt}} \frac{0,0388223}{10 + 100 + 24} = 289,71 * 10^{-6} \text{ Joules/pacote} \quad (63)$$

Usando o resultado do simulador para a base de cálculo do consumo da CPU, foram aplicados os 42% da energia consumida na transmissão.

Inicialmente, foi calculada uma média entre os consumos para as frequências de 1 a 10 Pkts/s. Para calcular a média de pacotes, tem-se:

$$\text{Média} = \frac{\text{Cons}_{\text{Pkt}}(72) + \text{Cons}_{\text{Pkt}}(73)}{2} \quad (64)$$

$$\text{Média} = \frac{296,92 * 10^{-6} + 289,71 * 10^{-6}}{2} = 293,31 * 10^{-6} \text{ Joules/pacote} \quad (65)$$

Para encontrar o consumo da CPU, multiplica-se por 0,42:

$$293,31 * 10^{-6} * 0,42 = 123,19 * 10^{-6} \text{ Joules/pacote} \quad (66)$$

O valor de $123,19 * 10^{-6}$ joules/pacote é o consumo da CPU por pacote processado. Baseado na análise do nodo da simulação com a frequência de 10 Ptk/s, nota-se que 332 Pkts de dados falharam e consumiram tempo de CPU e 10 Pkts foram transmitidos e falharam no ACK. Para calcular o consumo, foram usados os Pkts que tiveram sucesso. Nesta condição, tem-se:

Cosumo no envio	$0,0388223 + 123,19 * 10^{-6} * 134 = 55,34 * 10^{-3};$
Consumo nas falhas	$123,19 * 10^{-6} * 332 = 40,89 * 10^{-3};$
Total	0,09639 Joules em 50s.

Para finalizar, neste caso que a frequência de envio dos pacotes de dados ultrapassou o LTPD, o consumo de energia do nodo foi aumentando em 42,4%.

6.6.2 Análise de Desempenho do Consumo de Energia

Baseado nos resultados já analisados, a PECT no LTPD atinge sempre consumo de energia muito próximo do mínimo indispensável para a transmissão dos pacotes de dados. De fato, o algoritmo calcula potências diferentes para cada nodo sensor baseado na distância usando o resultado do sinal RSSI, e uma métrica em função da interferência da RSSF que resulta na adição de potência para atingir uma determinada eficiência.

Em outras palavras, pode-se encontrar desempenho de algoritmos melhores ao da PECT, no entanto, o resultado da técnica sempre é bem próximo do melhor resultado. Isto foi previsto, e é causado por ser um simples algoritmo portátil para qualquer plataforma de nodo, com a modelagem da interferência baseada em um estudo comportamental de RSSF.

Em determinadas situações, a PECT tem vantagens no consumo de energia, principalmente quando a rede for mais disseminada. Para mostrar o comportamento da PECT em função do consumo de energia, foram elaborados dois experimentos para comparação: um no LTPD e outro transmitindo a uma frequência de 1 Pkt/s. Para cada RSSF dos experimentos a seguir, foi descrita a quantidade de nodos, o maior consumo de energia, o menor consumo, a PECT, a quantidade de energia economizada em relação à potência de 0 dBm e, por fim, a PECT em relação à menor potência .

No LTPD tem-se:

- 11 nodos;
 - Maior Consumo 0 dBm 0,4261326 joules;
 - Menor Consumo -15 dBm 0,267293 joules;
 - PECT..... 0,273276 joules;
 - Economia do 0 dBm..... 35%;
 - Perda em relação ao -15 dBm..... 3,7%;
- 8 nodos;
 - Maior Consumo 0 dBm 0,4199369 joules;
 - Menor Consumo -15 dBm 0,255419 joules;
 - PECT..... 0,259379 joules;
 - Economia do 0 dBm..... 38%;
 - Perda em relação ao -15 dBm..... 1,5%;
- 6 nodos;
 - Maior Consumo 0 dBm 0,3921217 joules;
 - Menor Consumo -15 dBm 0,229916 joules;
 - PECT..... 0,239485 joules;
 - Economia do 0 dBm..... 39%;
 - Perda em relação ao -15 dBm..... 3,9%;
- 5 nodos;
 - Maior Consumo 0 dBm 0,3781713 joules;
 - Menor Consumo -25 dBm 0,2156329 joules;
 - PECT..... 0,232422 joules;
 - Economia do 0 dBm..... 38,5%;
 - Perda em relação ao -25 dBm..... 7,2%;

- 4 nodos;
 - Maior Consumo 0 dBm 0,3575773 joules;
 - Menor Consumo -25 dBm 0,1995277 joules;
 - PECT..... 0,210515 joules;
 - Economia do 0 dBm..... 41%;
 - Perda em relação ao -25 dBm..... 5,2%;

- 3 nodos;
 - Maior Consumo 0 dBm 0,334826 joules;
 - Menor Consumo -25 dBm 0,180512 joules;
 - PECT..... 0,193686 joules;
 - Economia do 0 dBm..... 42%;
 - Perda em relação ao -25 dBm..... 6,7%.

Com base nos resultados analisados, é possível observar uma economia da PECT em relação ao 0 dBm de cerca de 40% e uma perda em relação ao mínimo consumo com uma variação que está entre 1,5% a 7,2%. A análise do consumo foi realizada em 50 segundos de simulação, considerando para desempenho os pacotes os quais realmente foram entregues no destino.

Tabela 25 - Consumo de energia na transmissão + PECT em joules FPkt=1Pkt/s

	0dBm	-5dBm	-10dBm	-15dBm	-25dBm	PECT
11 nodos	0,1636019	0,1380464	0,11458988	0,10674444	0,11161241	0,110094
8 nodos	0,1219625	0,1000427	0,08130701	0,07655529	0,08216324	0,079557
6 nodos	0,0892051	0,0724847	0,06124989	0,05685825	0,05907571	0,056661
5 nodos	0,0739241	0,0602301	0,0504353	0,04803428	0,04929987	0,047721
4 nodos	0,0571304	0,0475487	0,04003126	0,03703209	0,03739853	0,037082
3 nodos	0,0423333	0,0349131	0,02940707	0,02773866	0,02722802	0,02669

Fonte: O Autor.

A Tabela 25 apresenta o consumo de energia em 50 segundos de simulação e com a frequência de transmissão dos pacotes de dados em 1 Pkt/s. É possível constatar que a técnica é capaz de reduzir o consumo de energia em algumas RSSF.

Com FPkt = 1Pkt/s tem-se:

- 11 nodos;
 - Maior Consumo 0 dBm 0,1636019 joules;
 - Menor Consumo -15 dBm 0,10674444 joules;

- PECT..... 0,110094 joules;
- Economia do 0 dBm..... 32%;
- Perda em relação ao -15 dBm..... 3%;
- 8 nodos;
 - Maior Consumo 0 dBm 0,1219625 joules;
 - Menor Consumo -15 dBm 0,07655529 joules;
 - PECT..... 0,079557 joules;
 - Economia do 0 dBm..... 36%;
 - Perda em relação ao -15 dBm..... 1,7%;
- 6 nodos;
 - Maior Consumo 0 dBm 0,0892051 jJoules;
 - Menor Consumo PECT 0,056661 joules;
 - PECT..... 0,056661 joules;
 - Economia do 0 dBm..... 36%;
 - Ganho em relação ao -15 dBm..... 2,1%;
- 5 nodos;
 - Maior Consumo 0 dBm 0,0739241 joules;
 - Menor Consumo PECT 0,047721 joules;
 - PECT..... 0,047721 joules;
 - Economia do 0 dBm..... 35.5%;
 - Ganho em relação ao -15 dBm..... 0,6%;
- 4 nodos;
 - Maior Consumo 0 dBm 0,0571304 joules;
 - Menor Consumo -15 dBm 0,03703209 joules;
 - PECT..... 0,037082 joules;
 - Economia do 0 dBm..... 35%;
 - Perda em relação ao -15 dBm..... 0,1%;
- 3 nodos;
 - Maior Consumo 0 dBm 0,0423333 joules;
 - Menor Consumo PECT 0,02669 joules;
 - PECT..... 0,02669 joules;
 - Economia do 0 dBm..... 37%;
 - Ganho em relação ao -25 dBm..... 1,9%.

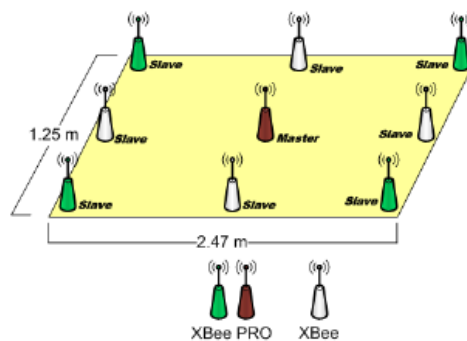
Com base na análise dos resultados das simulações, é possível observar uma economia de energia com uso da PECT de cerca de 36% em relação à potência de 0 dBm e, em alguns casos, a técnica ofereceu vantagens quando comparado ao menor consumo da RSSF, em outras palavras, a técnica garantiu o menor consumo da RSSF.

6.7 ANÁLISE DA PECT COM OUTROS ALGORITMOS

6.7.1 Técnica TPSO

A técnica TPSO de Lavratti *et al.* (2011) modifica a potência do transmissor a todo momento baseado em uma eficiência calculada com pacotes recebidos por um determinado nodo e por uma estimativa dos pacotes transmitidos. Para cada experimento da técnica, foi definido um conjunto de 50 sessões, composta de 10 mensagens cada, que são enviadas para cada nodo sensor. O tempo de sessão foi configurado em 10 segundos e o tempo de otimização em 0,5 segundos. Lavratti *et al.* (2011) colocaram os nodos sensores em uma câmara Anecoica dispostos em uma área 1,25m por 2,47m, como mostra a Figura 77.

Figura 77 - TPSO estudo de caso adotado



Fonte: Lavratti *et al.* (2011).

A ideia principal foi analisar o efeito da interferência EMI no consumo de energia dos nodos sensores e utilizar a técnica para controlar a potência de transmissão e reduzir o consumo de energia. Os resultados obtidos na presença da interferência foram bons e o TPSO chegou a reduzir o consumo de potência de 50 mW.s para 25 mW.s

Para fazer um confronto direto do consumo de energia da técnica TPSO e PECT, necessariamente se deve adaptar os experimentos para que os resultados sejam comparáveis.

Por exemplo, as métricas de avaliação de consumo de energia da PECT são obtidas com o somatório dos consumos no transmissor de cada nodo sensor em um simulador de redes. Não estão somados os consumos de energia do receptor, do sensor propriamente dito, do microcontrolador e seus periféricos. Na técnica TPSO os nodos sensores foram dispostos em uma área dentro de uma câmara anecoica e foi medido o consumo de energia da cada nodo.

De qualquer forma, a PECT tem vantagens. Uma perda da eficiência não tem como causa direta somente na potência de transmissão. A PECT controla a potência em função da distância e ajusta a taxa de erro com uma métrica de qualidade do caminho dos dados, não dependendo de resultados externos ao nodo para calcular uma nova potência de transmissão.

Isso torna a PECT uma técnica compatível em qualquer topologia de rede. De qualquer forma, a técnica apresentada obteve um ganho de 42% do consumo de energia na transmissão dos pacotes de dados e pode ser usada em qualquer topologia de rede.

6.7.2 Técnica ATPC

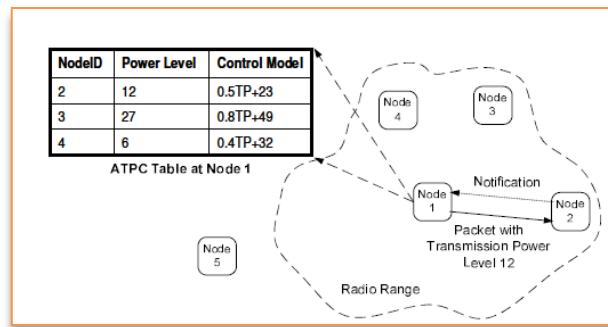
A ATPC é semelhante a PECT, ajusta a potência de transmissão usando RSSI e estima uma qualidade de *link* de dados através de experimentos. Os objetivos da ATPC são:

1. Fazer cada nodo sensor da rede encontrar a mínima potência de transmissão que poderá fornecer boa qualidade do *link* com a vizinhança;
2. Dinamicamente trocar o nível de potência de transmissão com o vizinho de maneira inteligente.

A ATPC (LIN *et al.*, 2006) pode manter uma boa qualidade do *link* entre um par de nodos sensores sem interromper o controle da transmissão.

Uma tabela mantém a vizinhança dos nodos sensores e uma realimentação em loop fechado para o controle da potência de transmissão para cada par de nodos. A tabela contém o próprio nível de potência de transmissão que o nodo usou para o vizinho e os parâmetros para um modelo preditivo linear de controle da potência de transmissão. A Figura 78 apresenta a ideia principal da ATPC.

Figura 78 - Metodologia da ATPC



Fonte: Lin *et al.* (2006).

A ATPC apresentou bons resultados na economia de energia, atingindo 53,6% do consumo máximo. Em uma análise mais direta, se pode dizer que a PECT seria menos econômico com 42% e ainda podendo variar este resultado conforme a quantidade de nodos sensores da RSSF. Numa análise mais criteriosa da técnica, é possível observar que a PECT tem vantagens como o ajuste da quantidade de dados através do *link*, ou seja, a frequência com que os dados são enviados ao destino, de forma a não saturar a capacidade de envio e de recepção dos pacotes de dados de cada nodo sensor individualmente.

A vantagem da técnica em limitar o fluxo de dados diminui a perda dos pacotes de dados, diminui a energia gasta na CPU, o que contribui na economia de energia, evitando o desperdício no consumo e retransmissões.

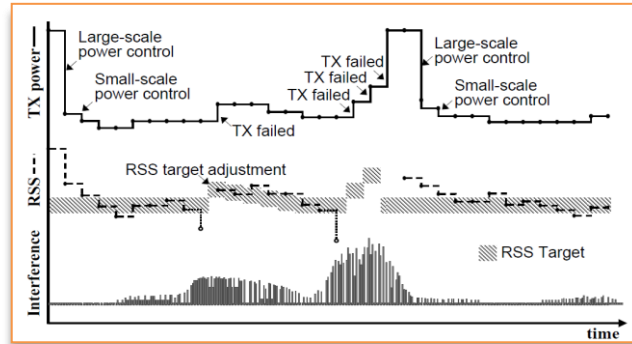
Outra grande vantagem que merece destaque, a PECT pode ser descrita como um simples algoritmo portátil para qualquer tipo de plataforma de hardware, não necessitado de enviar nem de receber informações de outros nodos com exceção do RSSI.

6.7.3 Técnica I-TPC

A I-TPC (KIMY *et al.*, 2008) consiste em dois procedimentos distintos: o primeiro ajusta a potência de transmissão dos nodos sensores em dois níveis de controle determinados, e o segundo é o ajuste objetivo da sensibilidade do receptor RSS.

Inicialmente, é estimado um RSS objetivo para satisfazer uma taxa de recepção de pacotes PRR determinada. Baseado neste RSS objetivo, cada nodo sensor tenta ajustar a potência do transmissor para deixar o valor do RSS dentro de um intervalo determinado usando os dois níveis de potências de transmissão do procedimento controle. A Figura 79 apresenta a técnica I-TPC.

Figura 79 - Técnica de controle do I-TPC



Fonte: Kimy *et al.* (2008).

O efeito na RSSF desta operação é o algoritmo buscando alcançar uma boa qualidade no *link* mesmo quando as variações de qualidade sejam pequenas. Quando uma interferência é detectada, o RSS objetivo e a potência do transmissor são incrementados rapidamente para manter uma boa relação sinal ruído. A Tabela 26 apresenta o desempenho sob condições de interferências.

Tabela 26 - Eficiência (%) - Desempenho sob condições severas

Distance	MAX	I-TPC	LOW
10 ft	96,93	91,22	82,17
30 ft	96,62	87,43	42,86
70 ft	93,40	82,12	41,14

Fonte: Kimy *et al.* (2008).

Desta forma, o algoritmo I-TPC proposto atinge uma boa taxa de recepção dos pacotes de dados de 98% e ainda sob severas condições de interferência pode economizar 11% de energia se comparado com a energia consumida na máxima potência.

Comparando com a PECT e analisando a relação sinal ruído da técnica I-TPC, é possível observar que a técnica está representada por um simples algoritmo com algumas equações e sendo apenas realimentada com o sinal RSSI, e, portanto, a relação sinal-ruído foi equacionada através de resultados experimentais em função da quantidade de nodos e da frequência de envio dos pacotes de dados FPkt. Esta relação é uma média que pode introduzir no cálculo pequenos erros em casos de interferência mais severa. Mesmo assim, a técnica apresenta vantagens como o ajuste da quantidade de dados através do *link*. Esta vantagem da PECT em limitar o fluxo de dados, diminui a perda de envio dos pacotes de dados, o que

contribui na economia de energia, evitando o desperdício no consumo de energia inerente a CPU e das retransmissões.

6.8 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Com o aumento da quantidade de nodos sensores em RSSF, a interferência entre os nodos também é aumentada, o que contribui diretamente no aumento da potência do transmissor de cada nodo sensor. A análise da eficiência da RSSF proposta foi feita inserindo manualmente no arquivo de configuração do simulador as potências de cada nodo da RSSF, variando as quantidades de nodos Q_n , a frequência de envio dos pacotes de dados FPkt e a potência de transmissão. O desempenho da eficiência da PECT está conforme a especificação, ou seja, com um recebimento de pacotes de dados acima dos 90%. No LTPD, o comportamento da técnica nas diversas potências de transmissão está conforme o esperado, com exceção da potência de -25 dBm em que a perda de pacotes de dados é maior.

Para avaliar do consumo de energia, foi observado o desempenho dos pacotes de dados em termos de economia, e se a técnica é eficiente em termos de otimização de energia.

A PECT obteve uma característica de consumo semelhante à trajetória da potência de -15 dBm, com um consumo médio de 1,82% maior. Se a análise for feita comparando com a potência de 0 dbm, a economia alcançada por usar a técnica atingiu 36,7% de consumo de energia por nodo. Este cálculo foi obtido com o $Q_n = 8$, onde a simulação apresentou o maior consumo de energia por nodo sensor.

O desempenho da PECT de consumo de energia além do LTPD, vale salientar, que o consumo de energia da CPU e seus periféricos passam a ter importância considerável. Para finalizar, uma frequência de envio além LTPD, o consumo de energia aumenta em 40% ou mais. A análise de desempenho do consumo de energia nos resultados apresentados nota-se uma economia com o uso da técnica em relação ao 0 dBm, que está em cerca de 40%.

Com relação a outras técnicas apresentadas, confrontar diretamente o consumo de energia da PECT, necessariamente, deve-se adaptar os experimentos para que os resultados numéricos sejam compatíveis.

De qualquer maneira, a ideia da técnica apresentada foi baseada em ser simples, ter economia da energia através da diminuição do desperdício, ser representada por um algoritmo portátil para qualquer tecnologia, não ter dependência de resultados de outros nodos, e que possa ser utilizada em qualquer topologia de rede.

7 CONCLUSÃO

A principal contribuição deste trabalho de pesquisa foi apresentar o desenvolvimento de uma técnica capaz de ajustar a potência de transmissão dos nodos sensores de uma RSSF através de um pequeno algoritmo em linguagem C. Em mais detalhes, a PECT ajusta a potência de transmissão a partir da análise do RSSI e de uma métrica de qualidade dos caminhos dos dados entre os nodos sensores da rede. Além disso, a técnica pode ser implementada no nível de aplicação, o que, por sua vez, garante portabilidade e uso, independente do hardware que está sendo utilizado na RSSF.

Neste trabalho, foi mostrado que a frequência de transmissão em conjunto com a quantidade de nodos sensores pode saturar o envio de pacotes de dados para o nodo receptor, e, portanto, é necessário calcular a frequência de transmissão dos dados em função da quantidade de nodos sensores da RSSF. A análise do desempenho de consumo de energia além do LTPD, o consumo da CPU e seus periféricos passam a ter importância considerável na maximização da energia em uma RSSF.

Durante a implantação, um dos fatores importante foi a determinação da ferramenta adequada para a avaliação e verificação da PECT. Para a verificação da técnica, um algoritmo auxiliar foi escrito em linguagem C, de forma a facilitar o trabalho de análise.

Quanto ao desempenho da PECT, a eficiência está dentro da especificação, ou seja, com um recebimento de pacotes de dados acima dos 90% até o LTPD. Quando a RSSF estiver no LTPD, o comportamento da PECT nas diversas potências de transmissão manteve a eficiência acima dos 90% mesmo nas potências menores. Durante os experimentos, foi constatado que uma grande maioria dos pacotes de dados é perdida por interferências de muitos tipos. Definiu-se a perturbação da rede P_{tb} . Esta métrica especifica a quantidade de pacotes transmitidos a maior quando comparada com a quantidade de pacotes que estavam na origem.

A qualidade no caminho dos dados Q_{Pth} entre um nodo e outro é um cálculo feito com perturbação P_{tb} e com a eficiência E_f . Esta métrica define a qualidade dos dados que percorrem um determinado caminho da rede dentro da região delimitada até o LTPD.

Além disso, Q_{Pth} define, também, a quantidade de energia necessária a ser acrescentada na transmissão dos pacotes de dados para ultrapassar a nível de energia das interferências e garantir que os pacotes de dados cheguem ao destino.

Em última análise, quanto maior a eficiência, menor o Q_{Pth} , o que significa uma qualidade melhor no caminho dos dados.

A determinação da quantidade de potência necessária para cada nodo da RSSF foi calculada utilizando a potência de transmissão necessária para ultrapassar o nível da interferência, a sensibilidade do receptor, a eficiência e o *path loss*. Para manter a eficiência no envio dos pacotes de dados acima dos 90%, foi necessário que a potência de transmissão do nodo seja de $20 \text{ dBm} \pm 2$ maior que o potência do *path loss* adicionado ao QPth.

Para avaliação do consumo de energia, é possível observar um bom desempenho da PECT. A análise do consumo de energia com o uso da PECT mostrou um comportamento seguindo a trajetória de consumo da potência de -15 dBm .

A análise realizada na potência de 0 dBm , com o maior consumo de energia por nodo na simulação, a economia alcançada com o uso da PECT alcançou 36,7%.

Além disso, uma análise como um todo do desempenho da PECT quanto ao consumo de energia, os resultados mostraram que com o uso da técnica se pode alcançar uma economia de energia de até 40%.

Comparando a PECT com outras tecnologias, os resultados apresentados são diferentes, porque os ambientes de avaliação das técnicas são diferentes. De qualquer forma, é possível comparar algumas vantagens e desvantagens da PECT em função das metodologias e procedimentos utilizados nas varias técnicas.

Finalmente, a PECT é capaz de garantir o envio de pacotes de dados em uma RSSF com uma eficiência de 90%. Com eficiência assegurada, a técnica pode melhor balancear melhor a troca de dados entre os nodos sensores da RSSF, garantindo um menor o consumo de energia por nodo.

Para trabalhos futuros, este tipo de tecnologia em RSSF recebe uma atenção especial pela comunidade científica devido à potencialidade da troca de informações mesmo em condições severas e com alta eficiência energética. Portanto, espera-se que uma RSSF possibilite ao usuário final o entendimento do fenômeno a ser analisado.

Durante o desenvolvimento desta técnica, um dos detalhes que não foi explorado foi a quantidade de nodos sensores que efetivamente participam da transmissão de dados.

Normalmente, em uma RSSF, muitos vizinhos poderiam não participar simultaneamente da transmissão de pacotes de dados, por não haver, por exemplo, um sincronismo na operação de transmissão dos dados. Esta probabilidade de transmissão dos pacotes de dados poderia melhorar o cálculo da quantidade Q_n e, portanto, o resultado da PECT poderia ser melhor.

Outro aspecto não explorado foi o uso da PECT com roteadores. A técnica poderia ser utilizada para calcular a energia das rotas de um roteador e, então, calcular rotas mais econômicas para o tráfego dos pacotes de dados.

REFERÊNCIAS

AKKAYA K.; YOUNIS M. F. An energy-aware QoS routing protocol for wireless sensor networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DISTRIBUTED COMPUTING SYSTEMS, 23rd., 2003, Providence. **Proceedings**. Providence: [s.n.], 2003. p. 710-715.

AKKAYA K.; YOUNIS M.F. A survey on routing protocols for wireless sensor networks. **Ad Hoc Networks Journal**, v. 3, p. 325-349, 2005.

AKYILDIZ, I. F.;SU, W.; SANKARASUBRAMANIAM,Y.; CAYIRCI, W.. Wireless sensor networks: a survey. **Broadband and Wireless Networking Laboratory**, Georgia, 2001.

ALBUQUERQUE, P. U. B.; ALEXANDRIA, A. R. **Redes industriais: aplicações em sistemas digitais de controle distribuído: protocolos industriais, aplicações SCADA**. 2. ed. São Paulo: Ensino Profissional, 2009.

AL-KARAKI, J. N.; KAMAL A. E.: Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. **IEEE Wireless Communication**, v. 11, p. 6-28, 2004.

BARONTI P.; PILLAI, P.; CHOOK, V. W. C.; CHESSA, S.; GOTTA, A.; HU, Y.F. Wireless sensor networks: a survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards Mobile and Satellite. **Communication Research Centre**, Pisa, dec. 2006.

BBC RESEARCH. IAS019B Report Overview **Wireless sensors: Technologies and global markets**, Wellesley, MA 02481 USA, Aug 2014.

BONDI, A. B. Characteristics of scalability and their impact on performance. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON SOFTWARE AND PERFORMANCE, 2nd., 2000, Ottawa. **Proceedings**. Ottawa: [s.n.], 2000. p. 195-203.

BONIFÁCIO, G. T. **Implementação de protocolo *mesh multi-hop* baseado em algoritmo de roteamento geográfico para redes de sensores sem fio**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências)— Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

BOUKERCHE, A.; CHENG, X.; LINUS, J. Energy-aware data-centric routing in micro sensor networks. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON MODELING ANALYSIS AND SIMULATION OF WIRELESS AND MOBILE SYSTEMS, 6th., 2003, New York. **Proceedings**. New York ACM Press, 2003. p. 42-49.

BOULIS, A. **Castalia: a simulator for wireless sensor networks and body area networks user's manual version 3.2**. Nicta March, 2011.

BRAGINSKY, D.; ESTRIN D. Rumor routing algorithm for sensor networks. In: ACM INTERNATIONAL WORKSHOP ON WIRELESS SENSOR NETWORKS AND APPLICATIONS, 1st., 2002, Atlanta. **Proceedings**. Atlanta: [s.n.], 2002. p. 22-31.

BURRELL, J.; BROOKE, T.; BECKWITH, R. Vineyard computing: sensor networks in agricultural production. **IEEE Pervasive Computing**, v. 3, n. 1, p. 38-45, Mar. 2004.

CALLAWAY, E. ; GORDAY, P. ; HESTER, L. ; GUTIERREZ, J.A. ; NAEVE, M. ; HEILE, B. ; BAHL, V. Home networking with IEEE 802.15.4: a developing standard for low-rate wireless personal area networks. **IEEE Communication Magazine**, v. 40, n. 8, p. 70-77, Aug. 2002.

CHEN, D.; VARSHNEY, P. K. QoS support in wireless sensor networks: a Survey. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS NETWORKS, 4th., 2004, Las Vegas. **Proceedings**. Las Vegas: [s.n.], 2004. p. 227-233.

CRAIG, W. C. Zigbee: wireless control that simply works program manager. **Wireless Communications ZMD America**, 2003.

DENARDIN W. G.; BARRIQUELLO C. H.; CAMPOS A.; PRADO R.N.; Impacto das camadas inferiores para o desenvolvimento de protocolos de roteamento para redes de sensores sem fio em grande escala. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 12., 2010, Bonito. **Anais**. Bonito: [s.n.], 2010. p.1506-1512.

ELAHI A.; GSCHWENDER A. **ZigBee wireless sensor and control network, book**. Boston: Pearson Education, 2010.

ELECTRICAL & COMPUTER ENGINEERING. **First-of-its-kind Ad Hoc/sensor network testbed**. Disponível em: <[HTTP://www.ece.vt.edu/news/fall05/sensornetwork.html](http://www.ece.vt.edu/news/fall05/sensornetwork.html)>. Acesso em: 01 dez. 2014.

FARIAS, P. C. B. **Redes básico**. Disponível em: <<http://www.juliobattisti.com.br/tutoriais/paulocfarias/redesbasico006.asp>>. Acesso em: 01 nov 2014.

FELEMBAN, E.; LEE, C. G.; EKICI, E. MMSPEED: multipath multi-speed protocol for QoS guarantee of reliability and timeliness in wireless sensor networks. **IEEE Transaction on Mobile Computing**, v. 5, p. 738-754, 2006.

FIGUEIREDO, C. M. S.; NAKAMURA, E. F.; LOUREIRO, A. A. F. Protocolo adaptativo híbrido para disseminação de dados em redes de sensores sem fio auto-organizáveis. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES, 22., 2004, Gramado. **Anais**. Gramado: [s.n.], 2004. p. 43-56.

GANESAN, D.; GOVINDAN, R.; SHENKER, S.; ESTRIN, D. Energy-efficient multipath routing in wireless sensor networks. **Mobile Computing and Communications Review**, v. 5, p. 11-25, 2001.

GUTIERREZ, J. A.; CALLAWAY JUNIOR, E. H.; BARRETT JUNIOR, R. L. Low-rate wireless sensors with IEEE 802.15.4. **Standards Information Network IEEE Press**, 2004.

HART, J. K.; MARTINEZ, K. **Environmental sensor networks: a revolution in the earth system science?** Southampton, 2006.

HE, L. Delay-minimum energy-aware routing protocol (derp) for wireless sensor networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFTWARE ENGINEERING, ARTIFICIAL INTELLIGENCE, NETWORKING, AND PARALLEL/DISTRIBUTED COMPUTING, 2007, Qingdao. **Proceedings**. Qingdao: [s.n.], 2007. v. 3, p. 155-160.

HEINZELMAN, W. R.; CHANDRAKASAN, A.; BALAKRISHNAN, H. Energy efficient communication protocol for wireless micro sensor networks. In: HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES, 33rd., 2000, Hawaii. **Proceedings**. Hawaii: [s.n.], 2000. Volume 8 page 8020.

HEINZELMAN, W. R.; KULIK, J.; BALAKRISHNAN H. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. In: ACM/IEEE ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE COMPUTING (MOBICOM 99), 5th., 1999, Seattle. **Proceedings**. Seattle: [s.n.], 1999. p. 174-185.

HOWITT, I.; GUTIERREZ, J. A. IEEE 802.15.4 Low rate: wireless personal area network coexistence issues. **Wireless Communications and Networking**, v. 3, p. 1481-1486, 2003.

HUNN, N. **Essentials of short-range wireless**. Cambridge University Press, 2010.

IANCHAK. **Dymo**. Disponível em: <[HTTP://www.ianchak.com/dymo/draft-ietf-manet-dymo-04.txt](http://www.ianchak.com/dymo/draft-ietf-manet-dymo-04.txt)>. DYMO. Acesso em: 01 out. 2013.

IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) LAN/MAN **Standards Committee IEEE Computer Society** Approved 16 June 2011 IEEE-SA Standards Board.

INTANAGONWIWAT, C.; GOVINDAN, R.; ESTRIN, D. Directed diffusion: a scalable and robust communication paradigm for sensor networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE COMPUTING AND NETWORKING, 6th., 2000, Boston, **Proceedings**. New York: ACM Press, 2000. p. 56-67.

JACOBSEN O.J.; RFC1208 *Internet Security Glossary*, Interop, Inc., Mountain View, CA 94040 USA, March 1991.

JENNIC TECHNOLOGY FOR A CHANGING WORLD. **Calculating 802.15.4 Data Rates**. 2006.

JOHNSON, D. B.; MALTZ, D. A. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In: PERKINS, C. E. (Ed.). **Ad Hoc Networking**. Reading MA; Addison-Wesley, 2001. p. 139-172.

KARLOF, C.; LI, Y.; POLASTRE J. (ARRIVE): algorithm for robust routing in volatile environments. **Technical Report UCB//CSD-03-1233**, Berkeley, Mar. 2003.

KARP, B.; KUNG, H. T. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE COMPUTING AND NETWORKING, 6th., 2000, Boston MA. **Proceedings**. New York: ACM Press, 2000. p. 243-254.

KIMY, J.; KWON, Y. **Interference-aware transmission power control for wireless sensor networks paper special section on emerging technologies for practical ubiquitous and sensor networks**. Konkuk, 2008.

KINNEY, P. ZigBee **Technology**: wireless control that simply works. Kinney Consulting LLC Chair of IEEE 802.15.4 Task Group Secretary of ZigBee BoD Chair of ZigBee Building Automation Profile WG, 2003.

KOUBAA, A.; ALVES, M.; NEFZI, B.; SONG, Y.; Improving the IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA MAC for time-critical events in wireless sensor networks. In: WORKSHOP OF REAL-TIME NETWORKS, (RTN 2006), Dresden. **Proceedings**. Dresden, Germany: [s.n.], 2006. p. 6.

LABIOD, H.; AFIFI, H.; DE SANTIS, C. **Wi-fi, bluetooth and wimax**. Springer, 2007.

LAVRATTI, F.; PINTO, A.R.; BOLZANI, L.; VARGAS, F.; MONTEZ, C.; HERNANDEZ, F.; GATTI, E.; SILVA, C. **A transmission power self-optimization technique for wireless sensor networks**, 2011.

LIN, S.; WENSI, W.; MATHEWSON, A.; O'FLYNN, B.; HAYES, M. **(ATPC) adaptive transmission power control for wireless sensor networks**. Minnesota: University of Minnesota, 2006.

LINDSEY, S.; RAGHAVENDRA, C. S. (PEGASIS) power efficient gathering in sensor information systems. In: IEEE AEROSPACE CONFERENCE, 3th., 2002, L.A. **Proceedings**. L.A.: [s.n.], 2002. p. 1125-1130.

LOPES, A. M. A. **Processamento adaptativo de consultas em redes de sensores sem fio**. 2006. 135 f. Dissertação (Mestrado em Informática aplicada)— Universidade de Fortaleza, Fortaleza, 2006.

LOU, W. An efficient n-to-1 multipath routing protocol in wireless sensor networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE AD-HOC AND SENSOR SYSTEM (MASS '05), 2nd., 2005, Washington. **Proceedings**. Washington: [s.n.], 2005. p. 672-680.

LOU, W.; LIU, W.; ZHANG Y. Performance optimization using multipath routing in mobile *ad hoc* and wireless sensor networks. **Combinator. Optimization in Communication Networks**, v. 2, p. 117-146, 2006.

MAIA, E. H. B.; CAMARA, D.; LOUREIRO A. A. F.: ICA: Um novo algoritmo de roteamento para redes de sensores. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES, 22., 2003, Gramado. **Anais**. Gramado: [s.n.], 2004. p. 147-160.

MANJESHWAR, A.; AGRAWAL, D. P. APTEEN: a hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks. In: INTERNATIONAL PARALLEL AND DISTRIBUTED PROCESSING SYMPOSIUM (IPDPS), 16th., 2002, Lauderdale. **Proceedings**. Lauderdale: [s.n.] 2002. p. 195-202.

MANJESHWAR, A.; AGRAWAL, D. P. TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks. In: INTERNATIONAL PARALLEL AND DISTRIBUTED PROCESSING SYMPOSIUM (IPDPS'01), 15th., 2001, San Francisco. **Proceedings**. San Francisco: [s.n.], 2001. p. 2009-2015.

MALKIN G.S.; RFC1983 *Internet Security Glossary*, Xylogics/Bay Networks, Burlington, MA 01803 USA, August 1996.

PERKINS, C. E.; ROYER, E. M. Ad hoc on-demand distance vector routing. In: IEEE WORKSHOP ON MOBILE COMPUTING SYSTEM AND APPLICATIONS, 2nd., 1999, New Orleans. **Proceedings**. New Orleans: [s.n.], 1999. p. 90-100.

RAGHUVANSHI, A. S.; TIWARI, S. DYMO as routing protocol for IEEE-802.15.4: enabled wireless sensor networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS COMMUNICATION AND SENSOR NETWORKS (WCSN), 6th., 2010, Allahabad. **Proceedings**. Allahabad: [s.n.], 2010. p. 1-6.

SHAH, R. C.; RABAEY, J. M. Energy aware routing for low energy *ad hoc* sensor networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS AND NETWORKS (WCNC 2002), 10th., 2002, Orlando. **Proceedings**. Orlando: [s.n.], 2002. p. 350-355.

SHIREY R. W.; RFC2828 *Internet Security Glossary*, GTE / BBN Technologies, Arlington, VA 22209-3801 USA may 2000.

SHNAYDER, V.; HEMPSTEAD, M.; CHEN, B.; ALLEN, G. W.; WELSH, M. Simulating the power consumption of largescale sensor network: applications division of engineering and applied sciences Harvard {shnayder,mhempste,brchen,werner,mdw}@eecs. **SenSys'04**, Baltimore, p. 3-5, Nov. 2004.

SILVA, F. A.; BRAGA, T. R. M.; RUIZ, L. B.; NOGUEIRA, J. M. S. **Tecnologia de nós sensores sem fio**. Minas Gerais: UFMG, 2005.

SILVA, I. M. Análise de desempenho de sistemas de comunicação sem fio para monitoramento de unidade de produção de poços petrolíferos terrestres. 2008. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)— Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

SIVALINGAM, K.; LINDSEY, S.; RAGHAVENDRA, C. S. Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics. **IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems**, Sep. 2002.

SOHRABI, K.; GAO, J.; AILAWADHI, V.; POTTIE, G. Protocols for self-organization of a wireless sensor network. **IEEE Person Communications**, v. 7, p. 16-27, 2000.

SZEWCZYK, R.; POLASTRE, J.; MAINWARING, A.; CULLER, D. Lessons from a sensor network expedition. In: EUROPEAN WORKSHOP ON SENSOR NETWORKS (EWSN), 1st., 2004, Berlin. **Proceedings**. Berlin: [s.n.], 2004. p. 307-322.

TIAN, H.; STANKOVIC, J.; LU, C.; ABDELZAHER, T. SPEED: a stateless protocol for real-time communication in sensor networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DISTRIBUTED COMPUTING SYSTEMS, 23rd., 2003, Providence. **Proceedings**. Providence: [s.n.], 2003. p. 46-55.

TILAK, S.; ABU-GHAZALEH, N. B.; HEINZELMAN, W. **A taxonomy of wireless micro-sensor network**. Binghamton: Binghamton University, 2002.

VIEIRA, M. A. M.; DA SILVA, J.; DA MATA, J. M. Survey on wireless sensor network devices. In: IEEE CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES AND FACTORY AUTOMATION, 2003, Lisboa. **Proceedings**. Lisboa: [s.n.], 2003. p. 537-544.

WANG, Z.; BULUT, E.; SZYMANSKI, B. K. Energy efficient collision aware multipath routing for wireless sensor networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS (ICC'09), 2009, Dresden. **Proceedings**. Dresden: [s.n.], 2009. p. 91-95.

WINKLER, M.; TUCHS, K.; HUGHES, K.; BARCLAY, G. Theoretical and practical aspects of military wireless sensor networks. **Journal of Telecommunication and Information Technologies**, v. 2, 2008.

WOO, A.; TONG, T.; CULLER, D. Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMBEDDED NETWORKED SENSOR SYSTEMS, 1st., 2003, Los Angeles. **Proceedings**. Los Angeles: [s.n.], 2003. p. 14-27.

XU, Y.; HEIDEMANN, J. Geography-informed energy conservation for *ad hoc* routing. In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE COMPUTING AND NETWORKING (MobiCom '01), 7th., 2001, Rome. **Proceedings**. Rome: [s.n.], 2001. p. 70-84.

YE, F. et al. A scalable solution to minimum cost forwarding in large sensor networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATIONS AND NETWORKS, 10th., 2001, Scottsdale. **Proceedings**. Scottsdale: [s.n.], 2001. p. 304-309.

YE, F.; LUO, H.; CHENG, J.; LU, S.; ZHANG, L. A two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks. In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE COMPUTING AND NETWORKING (MobiCom '02), 8th., 2002, Atlanta. **Proceedings**. Atlanta: [s.n.], 2002. p. 148-159.

YU, Y.; GOVINDAN, R.; ESTRIN D. Geographical and energy aware routing: a recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. **Technical Report UCLA/CSD-TR**, Citeseer, 2001.

ZAMALLOA, M. Z.; KRISHNAMACHARI, B. An analysis of unreliability and asymmetry in low-power wireless links. **ACM Transactions on Sensor Networks**, v. 3, 2007.

ZHENG, J.; LEE, M. J. **A comprehensive performance study of IEEE 802.15.4**. New York: [s.n.], 2004. p. 1-14.

ZIGBEE SPECIFICATION. **ZigBee Document 053474r17**. [s.l.]: ZigBee Alliance, 2008.

APÊNDICE A - SIMULADOR CASTALIA

Castalia é um simulador para redes de sensores sem fio WSN, *Body Area Network* (BAN) e, em geral, para redes de baixa potência de sistemas embarcados. Baseado na plataforma do OMNeT++, o Castalia pode ser usado por pesquisadores e desenvolvedores que gostariam de validar os algoritmos desenvolvidos e novos protocolos em um realístico canal de rede sem fio e modelo de rádio, com um procedimento de um nodo realístico especialmente no canal do rádio.

Este simulador também pode ser usado para avaliar diferentes características de plataformas para aplicações específicas altamente parametrizáveis, e pode também simular uma larga faixa de plataformas.

APÊNDICE B - CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL DA SIMULAÇÃO

Neste apêndice são apresentados, em detalhes, os ajustes dos parâmetros e das variáveis no simulador para avaliar a técnica apresentada.

O arquivo `omnetpp.ini`, é responsável por conter todas as informações do perfil das simulações. Nas figuras seguintes a seguir estão em detalhes as configurações das simulações para a avaliação da PECT.

Figura 80 - Arquivo Omnetpp.ini [General]

```
[General]
# =====
# Always include the main Castalia.ini file
# =====
include ../Parameters/Castalia.ini

sim-time-limit = 51s # 50 secs of data + 1 sec of MAC setup

SN.numNodes = 12

SN.wirelessChannel.pathLossMapFile = "../Parameters/WirelessChannel/BANmodels/pathLoss10.txt"
SN.wirelessChannel.temporalModelParametersFile = "../Parameters/WirelessChannel/BANmodels/TemporalModel.txt"

SN.node[*].Communication.Radio.RadioParametersFile = "../Parameters/Radio/BANRadx.txt"
SN.node[*].Communication.Radio.symbolsForRSSI = 16

SN.node[*].Communication.MAC.collectTraceInfo = true
SN.node[*].Application.collectTraceInfo = true

SN.node[*].ResourceManager.baselineNodePower = 0

SN.node[*].ApplicationName = "ThroughputTest"
SN.node[*].Application.startupDelay = 1 #wait for 1sec before starting sending packets
```

Fonte: O Autor, baseado em Boulis (2011).

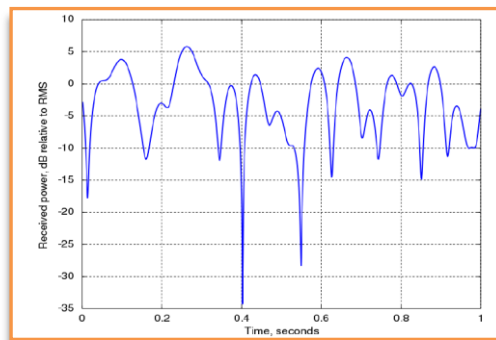
A Figura 80 apresenta parte do arquivo `omnetpp.ini` onde está descrito as generalidades da simulação. Nos marcadores apresentados abaixo, estão descritos as informações de cada parâmetro da simulação:

1. `include ../Parameters/Castalia.ini` Parâmetros de inicialização do Castalia. Esta linha deve estar sempre presente as todas as simulações;
2. `sim-time-limit = 51s` Parâmetro que define o tempo de simulação do experimento. Nota-se que tem 1 segundo mais, necessário para inicialização o MAC;
3. `SN.numNodes = 12` Parâmetro que define a quantidade de nodos que participarão da simulação;
4. `SN.wirelessChannel.pathLossMapFile="../Parameters/WirelessChannel/BANmodels/pathLoss10.txt"`. Este arquivo define o *pathloss* de cada nodo sensor, em outras palavras é a quantidade de sinal em dBm necessária para transmitir entre

um nodo e outro sem perder o sinal. Para maiores detalhes consultar Capítulo 4.1.1 do simulador Castalia (Boulis A., 2001);

5. `SN.wirelessChannel.temporalModelParametersFile = "../Parameters/ Wireless Channel /BANmodels/TemporalModel.txt"` Este arquivo define a variação temporal no canal de wireless.

Figura 81 - Típico desvanecimento temporal em wireless



Fonte: Boulis (2011).

6. `SN.node[*].Communication.Radio.RadioParametersFile="../Parameters/Radio/B ANRadx.txt"` Este arquivo contém as informações referentes ao canal de rádio. Para a simulação da técnica foi usado como arquivo base o CC2420. Como o trabalho foi desenvolvido com base na potência de transmissão, os parâmetros de consumo de energia do receptor e de consumo no chaveamento entre os estados do transmissor e receptor, foram alterados para não interferir na potência do transmissor. Portanto, os resultados de consumo são exclusivamente do transmissor de rádio dos nodos sensores;
7. `SN.node[*].Communication.Radio.symbolsForRSSI = 16` `SN.node[*]` o asterisco significa que este parâmetro vale para todos os nodos. O parâmetro especifica a quantidade de símbolos requerida pelo rádio para realizar o cálculo do RSSI;
8. `SN.node[*].Communication.MAC.collectTraceInfo = true` Este parâmetro habilita ou não a saída das informações do MAC em um arquivo de trace. Neste caso, como configurado como verdadeiro *true*, a saída está habilitada;
9. `SN.node[*].Application.collectTraceInfo = true` Este parâmetro habilita ou não a saída das informações da aplicação em um arquivo de trace. Neste caso, como foi configurado como verdadeiro *true*, a saída está habilitada;

10. SN.node[*].ResourceManager.baselineNodePower = 0 Este parâmetro especifica o consumo de potência do nodo, que está em zero para que o consumo medido na simulação deste trabalho seja apenas da transmissão;
11. SN.node[*].ApplicationName = ThroughputTest Este parâmetro especifica que todos os nodos enviarão seus pacotes de dados a um determinado nodo coordenador ou receptor da rede que normalmente é o nodo0;
12. SN.node[*].Application.startupDelay = 1 Este parâmetro especifica um tempo de 1 s de espera antes de iniciar o envio de pacotes de dados. Este tempo é necessário para a inicialização de todos os módulos do Castalia.

Figura 82 - Omnetpp.ini ZigBeeMAC - GTSon - GTSoff

```
[Config ZigBeeMAC]
SN.node[*].Communication.MACProtocolName = "Mac802154"
SN.node[0].Communication.MAC.isFFD = true
SN.node[0].Communication.MAC.isPANCoordinator = true
SN.node[*].Communication.MAC.phyDataRate = 250
SN.node[*].Communication.MAC.phyBitsPerSymbol = 4
SN.node[*].Communication.MAC.maxPacketTries = 4

[Config GTSon]
SN.node[*].Communication.MAC.requestGTS = 3

[Config GTSoff]
SN.node[*].Communication.MAC.requestGTS = 0
```

Fonte: O Autor, baseado em Boulis (2011).

A Figura 82 apresenta a segunda parte do arquivo omnetpp.ini onde estão descritos os rótulos da configuração do ZigBee e a configuração do GTS. Nos marcadores abaixo, estão as informações de cada parâmetro do trecho de arquivo acima:

1. SN.node[*].Communication.MACProtocolName = "Mac802154" Este parâmetro especifica o nome do protocolo que o MAC utiliza durante a simulação. Neste caso, o protocolo utilizado foi o IEEE802.15.4 para todos os nodos;
2. SN.node[0].Communication.MAC.isFFD = true Este parâmetro especifica que o nodo0 foi configurado como FFD para esta simulação. Portanto, o nodo0 tem todos os recursos do protocolo IEEE 802.15.4;
3. SN.node[0].Communication.MAC.isPANCoordinator= true Este parâmetro especifica que o nodo[0] foi configurado como o nodo coordenador da rede;

4. SN.node[*].Communication.MAC.phyDataRate = 250 Este parâmetro especifica que todos os nodos da rede foram configurados com uma taxa de troca de dados da rede de 250 kbps;
5. SN.node[*].Communication.MAC.phyBitsPerSymbol = 4 Este parâmetro especifica que todos os nodos da rede foram configurados com 4 bit por símbolos. Este parâmetro deve sempre ser configurado de acordo com *phyDataRate* para determinar o tempo correto de funcionamento no MAC;
6. SN.node[*].Communication.MAC.maxPacketTries = 4 Este parâmetro especifica para todos os nodos da rede um número de tentativas até a recepção dos pacotes de dados. Normalmente, por default, este parâmetro está configurado para no máximo 2 tentativas. No estudo da técnica um dos argumentos é descobrir as tentativas do nodo sensor e, portanto, este parâmetro foi aumentado para até 4 tentativas;
7. SN.node[*].Communication.MAC.requestGTS=0 Este parâmetro permite ao nodo sensor requerer um número específico de GTS, *slot* de dados com tempo garantido. Se o requerimento da transmissão for bem sucedido, os pacotes de dados são transmitido no *slot* de GTS atribuído pelo coordenador da rede. Estes *slot* são atribuídos de acordo com a necessidade. O default é 0, portanto, sem a garantia de *slot* de tempo.

Figura 83 - Omnetpp.ini - noTemporal, oneNodeVaryPower, oneNodeVaryTxNum, oneNodeVaryRate

```
[Config noTemporal]
SN.wirelessChannel.temporalModelParametersFile = ""

[Config oneNodeVaryPower]
SN.node[3].Communication.Radio.TxOutputPower = ${power="-5dBm","-10dBm","-15dBm","-20dBm"}

[Config oneNodeVaryTxNum]
SN.node[3].Communication.MAC.macMaxFrameRetries = ${retries=1,2,3}

[Config allNodesVaryRate]
#SN.node[*].Application.packet_rate = ${rate=20,40,60,80,100,120}
#SN.node[*].Application.packet_rate = ${rate=14,16,18,20,22,24,26,28,30}
SN.node[*].Application.packet_rate = ${rate=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}
```

Fonte: O Autor, baseado em Boulis (2011).

A Figura 83 apresenta a terceira parte do arquivo de configurações omnetpp.ini, onde estão descritas a configuração temporal, a manipulação da potência no nodo, a manipulação da quantidade de tentativas do envio de frames, e a manipulação da frequência de transmissão dos pacotes de dados. Nos marcadores abaixo, estão as informações de cada parâmetro do trecho do arquivo apresentado.

1. SN.wirelessChannel.temporalModelParametersFile = "" Este parâmetro especifica a não existência de um arquivo que defina a variação temporal no canal de wireless;
2. SN.node[3].Communication.Radio.TxOutputPower = \${power="-5dBm", "10dBm", "-15dBm", "-20dBm"} Este parâmetro é específico para o nodo3, e as verificações realizadas durante o desenvolvimento da técnica, houve a necessidade de simulação nodo a nodo, manipulando a potência de forma a entender as reações provocada na rede;
3. SN.node[3].Communication.MAC.macMaxFrameRetries = \${retries=1,2,3} Este parâmetro é específico para o nodo3. O parâmetro especifica o número máximo de tentativas antes do pacote ser considerado como pacote perdido. O default = 2 tentativas;
4. SN.node[*].Application.packet_rate = \${rate=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10} Este parâmetro é válido para todos os nodos sensores da rede. Especifica cada frequência de envio dos pacotes de dados de cada nodo sensor e para o destino que neste caso é o nodo0. Portanto, se o parâmetro for utilizado, para cada nova frequência será estabelecida uma nova simulação.

Figura 84 - Omnetpp.ini - setRate, setPower, allNodesVaryPower, ReTxNum

```
[Config setRate]
SN.node[*].Application.packet_rate = 25

[Config setPower]
SN.node[0].Communication.Radio.TxOutputPower = "0dBm"
SN.node[1].Communication.Radio.TxOutputPower = "-15dBm"
SN.node[2].Communication.Radio.TxOutputPower = "-25dBm"
SN.node[3].Communication.Radio.TxOutputPower = "-15dBm"
#SN.node[4].Communication.Radio.TxOutputPower = "-15dBm"
#SN.node[5].Communication.Radio.TxOutputPower = "-15dBm"
#SN.node[6].Communication.Radio.TxOutputPower = "-15dBm"
#SN.node[7].Communication.Radio.TxOutputPower = "-10dBm"
#SN.node[8].Communication.Radio.TxOutputPower = "-10dBm"
#SN.node[9].Communication.Radio.TxOutputPower = "-10dBm"
#SN.node[10].Communication.Radio.TxOutputPower = "-15dBm"
#SN.node[11].Communication.Radio.TxOutputPower = "-25dBm"

[Config allNodesVaryPower]
SN.node[*].Communication.Radio.TxOutputPower =
S{power="0dBm", "-5dBm", "-10dBm", "-15dBm", "-25dBm"}

[Config ReTxNum]
SN.node[*].Communication.MAC.maxPacketTries = 4
```

Fonte: O Autor, baseado em Boulis (2011).

A Figura 84 apresenta a quarta e última parte do arquivo omnetpp.ini, onde estão descritas as configurações da frequência de envio de pacotes de dados, a manipulação da potência a cada nodo sensor, tentativas do nodo sensor na transmissão do pacote de dados. Nos marcadores abaixo, estão descritas as informações de cada parâmetro do arquivo.

1. `SN.node[*].Application.packet_rate = 25` Este parâmetro é válido para todos os nodos sensores da rede e especifica a frequência de envio dos pacotes de dados em 25 Pkts/s de cada nodo sensor para um determinado destino que neste caso é o `nodo0`;
2. `SN.node[*].Communication.Radio.TxOutputPower=` Este parâmetro define a potência do transmissor para cada nodo sensor. No caso da Figura , se pode ver o parâmetro indicando diferentes potências para cada nodo. No rotulo seguinte, *allNodesVaryPower* a manipulação das várias potências produzirá uma nova simulação para cada potência;
3. `SN.node[*].Communication.MAC.maxPacketTries = ${pktTries=1,2,3,4}` Este parâmetro especifica para todos os nodos da rede o número de tentativas até a recepção dos pacotes de dados. Em caso de uso deste parâmetro, para cada tentativa de retransmissão do pacote de dados, o simulador faz uma nova lista de informações.

APÊNDICE C - SIMULAÇÃO NO CASTALIA

Neste apêndice, é apresentado como foram realizadas as simulações no Castalia. Inicialmente, foram definidos para o trabalho cinco nodos sensores transmitindo dados para um nodo coordenador chamado de nodo0. Para realizar a simulação dos cinco nodos sensores, alguns parâmetros do arquivo de configuração foram devidamente ajustados e inseridos. Nos parâmetros do rótulo *General* foi incluída a linha "SN.node[*].Application.collect TraceInfo = true".

A ideia foi rodar a simulação usando a forma mais padrão do simulador, ou seja, com os parâmetros mais comuns utilizado em RSSF. Na primeira simulação, cinco nodos transmitiram para um nodo coordenador em configuração estrela.

Para mostrar as diretrizes ou chaves utilizadas que manipulam os rótulos internos do arquivo de configuração, a Figura 85 exemplifica a linha de comando da execução do simulador. Notam-se os parâmetros dos rótulos selecionados que fazem parte simulação.

Figura 85 - Execução da simulação com as diretivas de simulação

```
Castalia -c ZigBeeMAC,[General]allNodesVaryPower,allNodesVaryRate
```

Fonte: O Autor.

Nesta simulação, foi utilizado o protocolo ZigBee em conjunto com o General, todas as potências e todas as frequências de envio dos pacotes de dados. Desta forma, o arquivo de saída contém um conjunto de informações para cada potência e para cada frequência de envio de pacotes de dados combinadas. Como a simulação são de cinco diferentes potências e 10 diferentes frequências, o arquivo de saída contém 50 conjuntos de informações para análise.

Portanto, a ferramenta possibilita facilmente criar ou modificar parâmetros para simulação. Basta adicionar um novo rótulo com novas atribuições e novos resultados são gerados. No manual do usuário do Castalia, o usuário pode ter acesso a todas as informações e parâmetros configuráveis deste simulador.