



José Mauricio Nava Auza

**Análise de Desempenho de Algoritmos
de Eficiência Energética em RSSF**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. José Roberto Boisson de Marca

Rio de Janeiro
Setembro de 2013



José Mauricio Nava Auza

**Análise de Desempenho de Algoritmos
de Eficiência Energética em RSSF**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Roberto Boisson de Marca

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações -PUC-Rio

Prof. Guilherme Dutra Gonzaga Jaime

UFRJ

Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Centro de Estudos em Telecomunicações -PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico- PUC-Rio

Rio de Janeiro, 3 de setembro de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

José Mauricio Nava Auza

Engenheiro em Telecomunicações graduado pela Universidade Católica Boliviana, La Paz-Bolivia em 2010

Ficha Catalográfica

Nava Auza, José Mauricio

Análise de Desempenho de Algoritmos de Eficiência Energética em RSSF / José Mauricio Nava Auza; orientador: José Roberto Boisson de Marca.-2013.

v., 94 f: il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Incluí referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica-Tese. 2. RSSF. 3. Teoria dos grafos. 4. Potência de transmissão. 5. Algoritmos de eficiência energética. 6. LQI. 7. RSSI. I. Boisson de Marca, José Roberto. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

A los 7 pilares que supieron sostenerme a lo largo de esta etapa, José, Daphne,
Valeria, Jaime, Sofia, Ignacio y Victoria.

Agradecimentos

Sem duvida alguma, no momento de escrever esta folha eu sinto uma enorme satisfação de ter concluído mais uma etapa na minha vida e quero aproveitar para agradecer a todos aqueles que me ajudaram a cumprir este objetivo, já que sem o apoio e a ajuda deles não teria conseguido chegar a este momento.

Quero começar agradecendo a Deus que me abençoou com esta oportunidade e me deu saúde e fortaleza para afrontar este desafio fora do meu país.

São muitas as pessoas que contribuíram nesta dissertação direta e indiretamente. Primeiramente quero agradecer aos meus tios Jaime e Sofia que me receberam na casa deles, na qual me senti muito cômodo ao longo deste período, pois fizeram me sentir em casa e em todo momento me apoiaram e acompanharam nas frustrações e alegrias que este projeto me trouxe. Quero agradecer aos meus pais, José e Daphne, eles que me ensinaram aquelas coisas das quais não se falam nos livros, eles são o meu maior exemplo de vida, obrigado por terem feito de mim um guerreiro. A minha irmã Valeria, por sempre se preocupar comigo; obrigado por fazer eu me sentir importante. A distancia não conseguiu nos separar e sempre senti vocês muito perto, obrigado por sempre ter a palavra exata. Aos meus primos Ignacio e Victoria, obrigado por estarem perto de mim. A minha avó, Tuquita, que sempre acredito em mim.

A todos os companheiros do CETUC pelo apoio ao longo deste tempo, especialmente a Cesar, Diego e Juliana. Ao Professor José Roberto Boisson de Marca por aceitar me orientar nesta dissertação, pela compreensão e por todos os conhecimentos compartilhados.

Não posso me esquecer daquelas pessoas que me apoiaram em momentos difíceis; Adriano Branco, muito obrigado por toda sua ajuda neste projeto, onde sem você nada disto teria sido possível. Aprendi muito contigo amigo. A Jennifer que me fez acreditar em mim quando nem eu mesmo acreditava; obrigado por todo o apoio e alegria que você trouxe para a minha vida. A Alberth, sem duvida alguma um dos melhores amigos que este processo me deixou, obrigado por todas as conversas e a ajuda dada.

Por ultimo quero agradecer a PUC-Rio e a agencia CAPES pelo apoio financeiro promovido e por acreditar em meu trabalho.

Resumo

Nava Auza, José Mauricio; Boisson de Marca, José Roberto. **Análise de Desempenho de Algoritmos de Eficiência Energética em RSSF**. Rio de Janeiro, 2013. 94p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As redes de sensores sem fio se constituem numa área que outorga grandes oportunidades para a oferta de uma série de aplicações inovadoras e com baixo custo. Os dispositivos destas redes são bastantes pequenos e sua fonte de alimentação são baterias. O tempo de vida destas é limitado, limitando assim o tempo da vida dos sensores e da rede como um todo. Por esta razão nos últimos anos o tema de eficiência energética tem atraído grande interesse de pesquisadores. O aumento do custo da energia e do consumo global da energia pelo setor de ICT (*Information and Communications Technologies*) têm crescido vertiginosamente devido ao aumento contínuo do número de clientes e da demanda por aplicações de maior complexidade. Por tudo isso têm sido desenvolvidos distintos métodos e técnicas para economizar energia nas RSSF. Neste trabalho se implementam dois algoritmos que levam em conta critérios para economizar os custos de energia da rede e através de experimentos de simulação se avalia os mesmos. Nos resultados pode se observar as vantagens de trabalhar com sistemas que visam a eficiência energética.

Palavras-chave

RSSF; teoria dos grafos; potência de transmissão; algoritmos de eficiência energética; LQI; RSSI.

Abstract

Nava Auza, José Mauricio; Boisson de Marca, José Roberto(Advisor). **Performance of Energy Efficient algorithms in WSN**. Rio de Janeiro, 2013. 94p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The WSNs (Wireless Sensor Networks) belong to an area that gives rise to great opportunities to spread innovative and low cost applications. These kinds of networks are composed of tiny devices with limited energy. The main source of power supply for WSNs are batteries, which are limited in cycle life, thus limiting the sensors lifetime and the network as a whole. Due to that fact, the energy efficiency network is becoming the main concern to be addressed by researchers. Rising energy prices and global energy consumption by the ICT (Information and Communications Technologies) sector have grown dramatically due to the continuous increase in customer number and the demand for more complex applications. For the reasons outlined above, different energy-saving techniques for WSNs have been developed. Two energy-saving algorithms for WSNs were implemented in this thesis, and they were tested by experimental evaluation using simulation. The results obtained from the simulations showed the advantages of working with systems aiming at energy efficiency.

Keywords

WSN; Graph Theory; Transmission Power; Energy efficient algorithms; LQI; RSSI.

Sumário

1	Introdução	15
1.1.	Motivação e objetivo	15
1.2.	Trabalhos Relacionados	17
1.3.	Contribuições	19
1.4.	Estrutura da dissertação	20
2	Aspectos Teóricos	21
2.1.	Redes de sensores sem fio	21
2.2	Teoria dos grafos	23
2.2.1	Grafo Planar	26
2.2.2	Grafo do disco unitário	27
2.3.	Controle de topologia	28
2.3.1	<i>Relative neighborhood graph</i>	30
2.3.2	<i>Minimum Spanning Tree</i>	31
2.4	Padrões e Tecnologias	32
2.4.1	IEEE 802.15	33
2.5	MicaZ	36
2.5.1	CC2420	37
3	Ferramentas de Simulação e Algoritmos	41
3.1	Características e comparações das ferramentas para simulação	41
3.2	Algoritmos Propostos	45
3.2.1	DTNBOR	46
3.2.2	DTRNG	54
3.2.3	Protocolo de encaminhamento	60
4	Análise de Resultados	64
4.1	Esquema de Simulação	64
4.1.2	Métricas	67

4.2 Cenário A	68
4.3 Cenário B	69
4.4 Cenário C	76
4.5 Cenário D	79
5 Conclusões	86
6 Referências Bibliográficas	88
Apêndice A	92

Lista de figuras

Figura 2.1: Arquitetura de uma rede de sensores	22
Figura 2.2: Estrutura de um nó sensor	23
Figura 2.3: Nomenclatura dos grafos	24
Figura 2.4: Tipos de grafos	24
Figura 2.5: Classificação dos grafos	25
Figura 2.6: Exemplos de grafo planar	26
Figura 2.7: Grafo planar de um cubo	27
Figura 2.8: Comportamento do grafo do disco unitário	27
Figura 2.9: Exemplos de estruturas geométricas	29
Figura 2.10: O RNG de um triângulo.	30
Figura 2.11: Conceito Lua	30
Figura 2.12: Exemplos de formação de ciclos	31
Figura 2.13: Exemplo de mais de um MST num grafo	32
Figura 2.14: Família de padrões do IEEE 802.11	33
Figura 2.15: Família de padrões 802.15	34
Figura 2.16: Topologias compatíveis com <i>Zigbee</i>	35
Figura 2.17: Aplicações do <i>Zigbee</i>	36
Figura 2.18: Aspecto físico do Micaz	37
Figura 2.19: Descrição de funcionamento de um Micaz	37
Figura 2.20: Quadro do 802.15.4	40
Figura 2.21: Uso dos dois bytes do FCS	40
Figura 3.1: Diagrama em blocos da metodologia de simulação	45
Figura 3.2: Diagrama de fluxo do algoritmo DTNBOR	47
Figura 3.3: Interpolação do Avrrora para níveis de potência. Fuente: AvrroraZ	48
Figura 3.4: Trama da Mensagem <i>Hello</i> e Resposta	49
Figura 3.5: Descrição dos temporizadores $T_{\text{Presposta}}$ e T_{resposta}	51
Figura 3.6: Diagrama de fluxo do algoritmo DTNBOR adequado a TinyOS	53
Figura 3.7: Exemplo da equação 5	55
Figura 3.8: Diagrama de fluxo do algoritmo DTRNG	56
Figura 3.9: Montagem da tabela de informações locais	57

Figura 3.10: Exemplo de escolha de potências para condição do DTRNG	58
Figura 3.11: Diagrama de fluxo do algoritmo DTRNG adequado a TinyOS	59
Figura 3.12: Descrição da fila implementada	61
Figura 3.13: Diagrama do protocolo de encaminhamento	63
Figura 4.1: Esquema de simulação	64
Figura 4.2: Esquema para obtenção de resultados com potências máximas	65
Figura 4.3: Esquema de simulação para sistema com potências variáveis	66
Figura 4.4 Esquema de simulação para sistema com potências variáveis	67
Figura 4.5: Grafo de comunicação da topologia A	68
Figura 4.6: Grafo de comunicação do protocolo de coleta de dados para a Topologia A	68
Figura 4.7: Grafo de comunicação do protocolo de coleta de dados com as potências da tabela criada por TinyDTRNG para a Topologia B	69
Figura 4.9: Grafo de comunicação do protocolo de coleta de dados para a Topologia B	70
Figura 4.10: Grafo de comunicação do protocolo de coleta de dados com as potências da tabela criada por TinyDTRNG para a Topologia B	71
Figura 4.11: Coleta de dados com potências máximas para a Topologia B	72
Figura 4.12: Coleta de dados com potências variáveis de TinyDTNBOR para a Topologia B	72
Figura 4.13: Coleta de dados com potências variáveis de TinyDTRNG para a Topologia B	73
Figura 4.14: Economia de energia na transmissão de TinyDTNBOR e TinyDTRNG respeito a Potências Máximas	74
Figura 4.15: Extrapolação dos resultados obtidos para um tempo igual a uma semana de funcionamento para a topologia B	75
Figura 4.16: Análise do comportamento da aplicação com TinyDTRNG	76
Figura 4.17: Grafo de comunicação da topologia C	77
Figura 4.18: Grafo de comunicação do protocolo de coleta de dados para a Topologia C	77
Figura 4.19: Coleta de dados com potências máximas e variáveis de para a Topologia C	78
Figura 4.20: Economia de energia na transmissão de DTNBOR com respeito a Potências Máximas	78
Figura 4.21: Extrapolação dos resultados obtidos para um tempo igual a uma semana de funcionamento para a topologia C	79

Figura 4.22: Curva de PRR para o nível 31 de potência	80
Figura 4.23: RSSI para o nível de Potência 31	80
Figura 4.24: LQI para o nível de Potência 31	81
Figura 4.25: Comportamento do LQI com respeito ao BER	81
Figura 4.26: Comparação de métricas respeito a distância para o nível de potência 27	82
Figura 4.27: Comparação de métricas em função da distância para o nível de potência 19	82
Figura 4.28: Grafo de comunicação da topologia D	83
Na Figura 4.29 é apresentada a topologia com as mudanças causadas pelo protocolo de encaminhamento.	83
Figura 4.29: Grafo de comunicação do protocolo de coleta de dados para a Topologia D	83
Figura 4.30: Coleta de dados com potências máximas e variáveis de para a Topologia D	84
Figura 4.31: Extrapolação dos resultados obtidos para um tempo igual a uma semana de funcionamento para a topologia C	85
Figura A.1: Comparação de métricas em função da distância para o nível de potência 31	92
Figura A.2: Comparação de métricas em função da distância para o nível de potência 23	92
Figura A.3: Comparação de métricas em função da distância para o nível de potência 15	93
Figura A.4: Comparação de métricas em função da distância para o nível de potência 11	93
Figura A.5: Comparação de métricas em função da distância para o nível de potência 7	93
Figura A.6: Comparação de métricas em função da distância para o nível de potência 3	94

Lista de tabelas

Tabela 2.1: Características do <i>Zigbee</i>	35
Tabela 2.2: Potências Variáveis do CC2420	38
Tabela 2.3: Características RSSI	39

Glossário de Acrônimos

AM	Active Message
CER	Chip Error Rate
CRC	Cyclic Redundancy Check
DTNBOR	Determine the minimum Transmission power to reach each Neighbor
DTRNG	Determine transmission power using Relative Neighborhood Graph
FCS	Frame Check Sequence
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LQI	Link Quality Indication
MST	Minimum Spanning Tree
PER	Packet Error Rate
PRR	Packet Received Rate
RNG	Relative Neighborhood Graph
RSSF	Redes de sensores sem fio
RSSI	Received Signal Strength Indication
TC	Topology Control
WSN	Wireless Sensor Network
WPAN	Wireless Personal Access Network