Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Márcio Sebastião Costa

Otimização de posicionamento de nós roteadores em redes de comunicação sem fio, aplicadas em automação industrial

Rio de Janeiro

2011

Márcio Sebastião Costa

Otimização de posicionamento de nós roteadores em redes de comunicação sem fio, aplicadas em automação industrial

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luís Machado do Amaral

Rio de Janeiro

2011

CATALOGAÇÃO NA FONTE

UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC / B

C838 Costa, Márcio Sebastião.

Otimização de posicionamento de nós roteadores em redes de comunicação sem fio, aplicadas em automação industrial / Márcio Sebastião Costa. - 2011.

100 f.

Orientador: Jorge Luís Machado do Amaral.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Redes de informação sem fio – Teses. 2. Sistemas de comunicação sem fio – Teses. 3. Roteadores (Redes de computação) - Teses. 4. Automação industrial – Teses. 5. Engenharia Eletrônica. I. Amaral, Jorge Luís Machado do. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 004.715

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

_____ _____

Assinatura Data

Márcio Sebastião Costa

Otimização de posicionamento de nós roteadores em redes de comunicação sem fio, aplicadas em automação industrial

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes e Automação.

Aprovado em: 15 de julho de 2011.

Banca Examinadora:

_____

Professor Doutor Jorge Luís Machado do Amaral (Orientador)

Faculdade de Engenharia - UERJ

_____

Professor Doutor José Franco Machado do Amaral

Faculdade de Engenharia - UERJ

_____

Professora Doutora Karla Thereza Figueiredo Leite

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC- Rio

Rio de Janeiro

2011

DEDICATÓRIA

À minha mulher, aos meus filhos, aos meus pais e a toda a minha família, que sempre me motivaram nos momentos mais difíceis desta trajetória.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter me concedido realizar este sonho distante;

A minha querida Andreha, eterna companheira de todos os momentos;

Aos meus queridos pais, Ivette e Ronaldo, por não terem deixado faltar nada em minha vida;

Aos meus lindos filhos, que me dão todo motivo para continuar lutando.

Ao amigo e orientador professor Jorge Amaral, que me deu todo suporte desde o início nesta longa jornada. Sempre exigente, disciplinado e correto. Agradeço por todo aprendizado que tive e o empenho que fez, sem o qual não tería chegado a este ponto.

À Universidade do Estado do Rio de Janeiro, que me recebeu e acreditou que eu poderia;

Aos funcionários e professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica por todos os ensinamentos passados.

Ao professor Franco Amaral, que sempre esteve acompanhando e apoiando o meu trabalho.

Aos professores Biondi e Karla, pelos conselhos e ensinamentos.

A professora Luiza Mourelle, por ter me dado a oportunidade de ingressar no curso.

Ao amigo de mestrado Álvaro, companheiro inseparável de todas as disciplinas do curso, por todos os momentos passados;

A todos os colegas do mestrado, que tive a oportunidade de conhecer e conviver.

RESUMO

COSTA, Márcio S. *Otimização de posicionamento de nós roteadores em redes de comunicação sem fio aplicadas em automação industrial*. 2011. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

Este trabalho apresenta uma ferramenta para analisar o posicionamento dos nós em uma rede sem fio em ambiente industrial. A partir das informações sobre os pontos que o usuário deseja instrumentar, a ferramenta avalia a cobertura da rede formada, a presença de nós críticos, a presença de caminhos redundantes e a latência obtida e, se necessário, sugere o menor número de nós intermediários adicionais (roteadores) e suas coordenadas para garantir que a rede atenda aos requisitos de segurança, confiabilidade e eficiência necessários às aplicações a que forem submetidas.

Palavras-Chave: Rede sem fio; Posicionamento de roteadores; Automação industrial.

ABSTRACT

COSTA, Márcio S. *Optimizing placement of routers nodes in wireless network, applied in industrial automation*. 2011. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

This work describes the development of a tool for analyzing the positioning of nodes in wireless networks applied in industrial automation. Using the information gathered from the network, the tool is able to evaluate the coverage, the amount of potential critical nodes, the availability of alternative paths for all devices, and the latency. If it is necessary, it also suggests the smallest number of additional nodes (routers) and their locations to insure that the resulting network will reach safety's requirements, reliability and efficiency.

Keywords: Wireless network; Router placement; Industrial automation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Onda resultante efeito positivo (LIT-131 HART C. F., 2011) 25
Figura 2 - Onda resultante efeito negativo (LIT-131 HART C. F., 2011) 25
Figura 3 - Distância x Potência (LIT-131 HART C. F., 2011) 26
Figura 4 - Zona de Fresnel..... 27
Figura 5 - Camadas da Rede..... 29
Figura 6 - Topologias de rede..... 31
Figura 7 - Estrutura do *Superframe* 32
Figura 8 - Componentes típicos rede (Technical Data Sheet, HART Comm. Foundation, 2007) 40
Figura 9 - Fluxograma de um Algoritmo Genético 51
Figura10 - Contabilização de Roteadores..... 57
Figura 11 - Representação Utilizada 57
Figura 12 - Cenário Simplificado – Original..... 62
Figura 13 - Estudo de caso 1 – Cenário..... 63
Figura 14 - Estudo de caso 1 - Gráficos 63
Figura 15 - Estudo de caso 2 – Cenário..... 66
Figura 16 - Estudo de caso 2 - Gráficos 66
Figura 17 - Máx. Retransmissões X Max. Hops 67
Figura 18 - Retransmissões > 4 X Hops > 4..... 67
Figura 19 - Estudo de caso 3 – Cenário..... 69
Figura 20 - Estudo de caso 3 – Cenário..... 69
Figura 21 - Máx. Retransmissões X Max. Hops 70
Figura 22 - Máx. Retransmissões X Max. Hops 71
Figura 23 - Estudo de caso 4 – Cenário..... 73
Figura 24 - Estudo de caso 4 - Gráficos 73
Figura 25 - Tolerância a falha da rede..... 74
Figura 26 - Estudo de caso 5 – Cenário..... 76
Figura 27 - Estudo de caso 5 - Gráficos 76
Figura 28 - Tolerância a falha da rede..... 77
Figura 29 - Tolerância a falha da rede..... 78
Figura 30 - Cenário Completo – Original..... 80

Figura 31 - Estudo de caso 1 – Cenário 82
Figura 32 - Estudo de caso 1 - Gráficos 82
Figura 33 - Estudo de caso 2 – Cenário 85
Figura 34 - Estudo de caso 2 - Gráficos 85
Figura 35 - Máx. Retransmissões X Max. Hops 86
Figura 36 - Retransmissões > 4 X Hops > 4 86
Figura 37 - Estudo de caso 3 – Cenário 88
Figura 38 - Estudo de caso 3 - Gráficos 88
Figura 39 - Máx. Retransmissões X Max. Hops 89
Figura 40 - Máx. Retransmissões X Max. Hops 90
Figura 41 - Estudo de caso 4 – Cenário 91
Figura 42 - Estudo de caso 4 - Gráficos 91
Figura 43 - Tolerância a falha da rede 92
Figura 44 - Estudo de caso 5 – Cenário 94
Figura 45 - Estudo de caso 5 – Gráficos 94
Figura 46 - Tolerância a falha da rede (Estudo de caso 5) 95
Figura 47 - Tolerância a falha da rede (Estudo de caso 5) 96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - IEEE 802.15.4 29
Tabela 2 - Características ZigBee 36
Tabela 3 - Características Physical Link Layer 43
Tabela 4 - Semelhanças x Diferenças 49
Tabela 5 - Estudo de caso cenário simplificado 61
Tabela 6 - Cenário Simplificado – Parâmetros 62
Tabela 7 - Estudo de caso 1 - Quadro consolidado 63
Tabela 8 - Estudo de caso 2 - Quadro consolidado 66
Tabela 9 - Estudo de caso 3 - Quadro consolidado 69
Tabela 10 - Estudo de caso 4 - Quadro consolidado 73
Tabela 11 - Estudo de caso 5 - Quadro consolidado 76
Tabela 12 - Estudo de caso cenário completo 79
Tabela 13 - Cenário Completo – Parâmetros 80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BI	*Beacon Interval*
BO	*Beacon Order*
BPSK	*Binary Phase Shift Keying*
BSS	*Basic Service Set*
CAP	*Contention Access Period*
CBR	*Constant Bit Rate*
CCA	*Clear Channel Assessment*
CFP	*Contention Free Period*
CRC	*Cyclic Redundancy Check*
CSMA-CA	*Carrier sense Multiple Access with Collision Avoidance*
CTS	*Clear to Send*
DSSS	*Direct Sequence Spread Spectrum*
ED	*Energy Detection*
ESS	*Extended Service Set*
FCS	*Frame Check Sequence*
FFD	*Full-Function Device*
FH	*Frequency Hopping*
FHSS	*Frequency Hopping Spread Spectrum*
FTP	*File Transfer Protocol*
GTS	*Guaranteed Time Slot*
HMI	*Human-Machine Interface*
HTTP	*Hyper Text Transfer Protocol*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IFS	*Interframe Spacing*
IP	*Internet Protocol*
ISA	*International Society of Automation*
ISM	*Industrial, Scientific, and Medical*
LAN	*Local Area Network*
LQI	L*ink Quality Indication*
MAC	*Medium Access Control*
PAN	*Personal Area Network*

PHY	*Physical Layer*
QoS	*Quality of Service*
RF	*Radio-Frequency*
RFD	*Reduced Function Devices*
RFID	*Radio-Frequency IDentification*
RTS	*Request to Send*
RSSF	*Rede de Sensores Sem Fio*
SD	*Superframe Duration*
SO	*Superframe Order*
TDMA	*Time Division Multiple Access*
VPN	*Virtual Private Network*
WAN	*Wide Area Network*
WEP	*Wired Equivalent Privacy*
WLANs	*Wireless Local Area Network*
ZOD	*ZigBee Object Device*
ZC	ZigBee Coordinators
ZR	ZigBee Routers
ZED	ZigBee End Devices

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 14
1 **REDES DE SENSORES SEM FIO** 18
1.1 **Introdução** 18
1.2 **Elementos das Redes de Sensores** 19
1.3 **Características das Redes de Sensores** 20
1.4 **Métricas de desempenho** 20
1.4.1 Eficiência de energia e vida útil do sistema 20
1.4.2 Latência e precisão 21
1.4.3 Tolerância a falhas 21
1.4.4 Escalabilidade 22
1.4.5 Segurança em redes de sensores 22
1.4.6 Self Organizing em redes de sensores 23
1.5 **Enlaces de rádios** 24
1.6 **Padrões de Comunicação para Redes Sem Fio** ..... **Error! Bookmark not defined.**
1.6.1 Padrão de comunicação IEEE 802.15.4 28
1.7 **Zigbee** 34
1.8 **Wireless Hart** 37
1.8.1 Arquitetura ..... **Error! Bookmark not defined.**
1.8.2 Transferência de dados 41
1.8.3 Segurança 41
1.8.4 Redundância 42
1.8.5 Camada física (Physical Link Layer) 42
1.8.6 Camada Data-Link (Data-Link Layer) 43
1.8.7 Camada de rede (Network Layer) 44
2 **POSICIONAMENTO DE NÓS EM REDES SEM FIO** 45
2.1 **Descrição do problema de posicionamento de nós** 45
2.2 **Soluções encontradas sobre o problema** 46
2.3 **O problema de posicionamento de nós em redes de automação** 48
3 **POSICIONAMENTO VISTO COMO UM PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO** 50
3.1 **Técnica de otimização utilizada** 50

3.2 **Modelagem do problema** 51
3.2.1 Descrição da Representação (cromossomo) 57
3.2.2 Descrição da função de avaliação para o AG 58
4 **ESTUDOS DE CASOS** 61
4.1 **Simulação de Cenário Simplificado** 61
4.1.1 Estudo de caso 1 – Cenário Simplificado - Minimização roteadores 63
4.1.2 Estudo de caso 2 – Cenário Simplificado - Minimização roteadores, hops e retransmissões por dispositivo (pesos iguais) 65
4.1.3 Estudo de caso 3 – Cenário Simplificado - Minimização roteadores, hops e retransmissões por dispositivo (pesos diferentes) 68
4.1.4 Estudo de caso 4 – Cenário Simplificado - Minimização roteadores, hops, retransmissões e Índice de Tolerância a falha da rede (pesos iguais) 72
4.1.5 Estudo de caso 5 – Cenário Simplificado - Minimização roteadores, hops, retransmissões e Índice de Tolerância a falha da rede (pesos diferentes) 75
4.2 **Simulação de Cenário Completo** 79
4.2.1 Estudo de caso 1 – Cenário Completo - Minimização roteadores 81
4.2.2 Estudo de caso 2 – Cenário Completo - Minimização roteadores, hops, retransmissões por dispositivo (pesos iguais) 84
4.2.3 Estudo de caso 3 – Cenário Completo - Minimização roteadores, hops, retransmissões por dispositivo (pesos diferentes) 87
4.2.4 Estudo de caso 4 – Completo - Minimização roteadores, hops, retransmissões por dispositivo e Índice de Tolerância a falha da rede (pesos iguais) 90
4.2.5 Estudo de caso 5 – Cenário Completo - Minimização roteadores, hops, retransmissões e Índice de Tolerância a falha da rede (pesos diferentes) 93
5 **CONCLUSÃO** 97
REFERÊNCIAS 98

INTRODUÇÃO

O interesse na utilização de tecnologia de transmissão de dados sem fio em soluções para automação industrial tem crescido bastante nos últimos anos. Isto se deve às diversas vantagens trazidas por esse tipo de tecnologia que se adaptam bem aos sistemas de automação industrial. Podemos citar como algumas destas vantagens a facilidade e a rapidez de instalação, a economia em relação a projetos cabeados, a flexibilidade para alteração de instalações existentes, a integração de equipamentos móveis à rede, a possibilidade de posicionamento de sensores e atuadores em locais de difícil acesso, a não necessidade de infraestrutura para cabos e eletrodutos, dentre outras.

Entretanto, uma pesquisa realizada pela ControlGlobal (CONTROLGLOBAL, 2007) mostrou que o uso de redes sem fio em sistemas de automação ainda é muito pequeno (63,7% dos entrevistados possuem menos de 10 dispositivos sem fio em suas plantas); que os usuários têm receio de utilizá-las em aplicações de controle (apenas 24,6% estariam dispostos a usar dispositivos sem fio em aplicações de controle mesmo que o tempo de ciclo fosse maior que 2 segundos) e ainda que existe uma grande preocupação com a confiabilidade e segurança dos dados (66,4%). Os resultados apresentados mostram que a utilização de comunicação sem fio em ambientes industriais ainda gera inseguranças e dúvidas entre os usuários, pois, a maioria das aplicações nestes ambientes exige segurança, confiabilidade e eficiência. Isto significa dizer que uma rede sem fio deve garantir, mesmo na presença de interferências e condições adversas ao meio de transmissão, que as mensagens chegarão aos seus destinos, que os requisitos temporais de baixa latência e determinismo na troca de mensagens serão respeitados e, por fim, assegurar a privacidade de comunicação e a integridade dos dados transmitidos (SANTOS, 2007; ZHENG; MYUNG, 2006).

Estabelecer uma boa comunicação entre todos os nós da rede torna-se um grande desafio devido às complicações inerentes a esses ambientes industriais, repleto de obstáculos móveis e imóveis, como, por exemplo, tanques, vasos, tubulações, prédios, estruturas metálicas, guindastes, caminhões, etc. Além disso, existem interferências eletromagnéticas provenientes de outras redes sem fio para comunicação de dados, como WLAN ou Bluetooth, interferências de rádios de comunicação (walkie-talkie), interferências eletromagnéticas oriundas de equipamentos elétricos provenientes de motores, geradores,

transformadores e outros, e interferências causadas por reflexão do próprio sinal transmitido devido a obstáculos no caminho. (quebra de página?)

A potencialidade do emprego da solução de comunicação sem fio e o crescente interesse vindo do segmento industrial estão servindo como motivação para o surgimento de padrões específicos que tem o propósito de atender as necessidades de implantação de redes sem fio específicas para os ambientes industriais. Cabe destacar o surgimento de dois padrões importantes aplicados nesta área: WirelessHart (IEC/PAS 62591 *Fieldbus specifications – WirelessHART*, 2007) e o ISA-SP100.11a (ISA-100.11a-2009). São padrões que utilizam técnicas de espalhamento em freqüência para lidar com as interferências eletromagnéticas e aumentar a confiabilidade da transmissão, topologias em malha ou árvore, e técnicas de retransmissão de sinais em que uma mensagem é transmitida de um nó para outro com auxílio de outros nós intermediários, que funcionam como roteadores, até que a mensagem chegue ao seu destino. Isto faz com que a rede consiga ter um maior alcance e também apresente uma maior tolerância a falhas, pois se um nó intermediário apresentar uma falha ou não puder receber uma mensagem, esta pode ser redirecionada para outro nó (HOFFERT; KLUES; ORJIH, 2007).

Entretanto, uma rede em malha também exige um estudo cuidadoso do posicionamento dos nós que a compõem, isto porque se torna necessário verificar se os requisitos temporais vinculados a entrega de mensagens são obedecidos dentro de critérios pré-estabelecidos. Além disso, nesse tipo de solução, é fundamental garantir que todos os nós da rede tenham acesso ao nó central, assim como verificar a existência de nós críticos, cuja perda por falha possa acarretar em grande perda de conectividade e ou desempenho.

Uma das principais características dessas redes sem fio, senão a mais importante é o fato de poder utilizar dispositivos intermediários para retransmissão de pacotes. Esta funcionalidade tem uma série de vantagens, que estão relacionadas ao poder de escalabilidade da rede e a redundância da informação. Esses dispositivos intermediários, ou nós de retransmissão ou ainda nós roteadores, tem um papel fundamental no funcionamento da rede, e a definição das quantidades desses nós envolvidos, com suas coordenadas, são primordiais e ao mesmo tempo difíceis de serem definidas. A motivação deste trabalho é elaborar uma ferramenta que possa auxiliar o usuário no posicionamento desses nós roteadores nos ambientes a que eles se propõem, considerando determinados critérios e condições que potencializam a dificuldade de uma boa solução.

O objetivo deste trabalho é elaborar uma ferramenta para analisar o posicionamento dos nós de uma rede sem fio em malha e determinar uma proposta de solução a partir de um

determinado cenário, auxiliando o projetista da rede a encontrar as melhores configurações de posicionamento dos nós. A partir das informações dos pontos de medição do processo que o usuário deseja instrumentar, e que consequentemente, também são pontos de comunicação, a ferramenta avaliará a cobertura da rede formada, a presença de nós críticos, a presença de caminhos redundantes, a quantidade de saltos das mensagens, a tolerância a falhas por perda de nós e, sugerirá o menor número de nós roteadores intermediários adicionais se necessário) e suas coordenadas geográficas, de modo a garantir que a rede atenda aos critérios estabelecidos pelo projetista ou usuário da rede.

A procura das melhores configurações é vista como um problema de otimização, onde os parâmetros de entrada são os nós da rede com as respectivas coordenadas geográficas, formadas pelos nós de processo e pelos nós roteadores, e a função de custo a ser otimizada levará em conta critérios como a otimização da menor quantidade de nós roteadores intermediários necessários à rede, a minimização da quantidade de retransmissões de pacotes por nó, menor quantidade de saltos (hops) das mensagens até seus destinos finais, a maximização da quantidade de nós vizinhos por nó de forma a garantir caminhos alternativos para as mensagens, maximização da tolerância à falha da rede por perda de nós e a maximização de nós com conexões diretas com o nó central (gateway).

Além disso, algumas restrições são impostas pelo algoritmo para compor a otimização do problema, que são determinadas por penalidades impostas pelo algoritmo por descumprimento de condições com relação à cobertura da rede, a quantidade mínima de nós vizinhos, quantidade mínima de conexões diretas com o gateway, quantidade máxima de número de saltos (hops) por pacotes, quantidade de transmissões excedentes por nó e pela distância máxima ponto a ponto com visada direta, com intuito de garantir a potência mínima de transmissão.

Na maioria dos casos, as redes sem fio voltadas para atender aplicações industriais tornam-se complexas pelas exigências de um funcionamento perfeito, não que em outras situações as redes não tenham que funcionar corretamente, mas pelo próprio nível de criticidade inerente aos processos industriais, aliadas às distâncias envolvidas e aos obstáculos encontrados nesses ambientes, exigi-se que a rede tenha topologias mais elaboradas e robustas como malha ou árvore. Nessas topologias, a comunicação realiza múltiplos saltos para alcançar outros dispositivos da rede, passando por nós intermediários comumente chamados de nós roteadores que exercem funções de roteamento. Devido a este fator, os nós intermediários acabam exercendo um papel fundamental na arquitetura da rede, pois, sendo responsáveis pela concentração e distribuição das informações, influenciam

diretamente no funcionamento e desempenho da rede, podendo inserir atrasos consideráveis na transmissão das mensagens fim a fim. Por isso, os nós roteadores tornam-se pontos críticos de falhas, podendo interromper a comunicação de partes da rede que dependam dele caso ocorram problemas, ou até mesmo da rede toda dependendo da topologia e da posição desse nó. A ferramenta desenvolvida neste trabalho tem foco no posicionamento desses nós roteadores, devido a sua importância mencionada anteriormente e pela dificuldade inerente de solucionar estas questões de posicionamento sem o auxílio de uma ferramenta computacional. A ferramenta desenvolvida foi baseada no software Matlab, com *toolboxes* específicas para otimização através de Algoritmos Genéticos, que calculam as quantidades mínimas de nós roteadores adicionais em uma rede sem fio com as melhores coordenadas geográficas sob as métricas citadas anteriormente.

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, cujos conteúdos são descritos a seguir.

O capítulo 1 apresenta material de apoio em comunicação sem fio e discute alguns conceitos necessários à compreensão deste trabalho. São apresentados os principais tipos de redes de sensores sem fio e são mencionados alguns artigos relevantes. A pesquisa procurou demonstrar as potencialidades das redes sem fio e fornecer subsídios para o trabalho desenvolvido.

O capítulo 2 apresenta o problema de posicionamento dos nós em redes sem fio e discute algumas soluções encontradas.

O capítulo 3 descreve a solução proposta para o problema de posicionamento dos nós, descrevendo a modelagem utilizada.

No capítulo 4, são apresentados alguns estudos para avaliação de desempenho do algoritmo. Também é apresentado o estudo de caso, e comentários sobre os resultados obtidos.

A conclusão deste trabalho é apresentada no Capítulo 5 juntamente com uma relação de possíveis trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

COELLO, C.A.C.; LAMONT, G.B. Applications of Multi-objective Evolutionary Algortihms, World Scientific Books Publishing Co, Singapore, 2004.

CONTROLGLOBAL. [Acesso em 01 de fevereiro de 2010]. Disponível em: http://www.controlglobal.com/Media/MediaManager/CT0708_wirelessGraphs.pdf, 2007.

DAVIS, L., Handbook of Genetic Algorithms,VNR Comp. Library, 1990.

ERGEN, Sinem Coleri, "ZigBee. *ZigBee / IEEE 802.15.4 Summary*, Email: csinem@eecs.berkeley.edu, [acesso em 05/11/2009], disponível em http://staff.ustc.edu.cn/~ustcsse/papers/SR10.ZigBee.pdf, Setembro 2004.

FONTÃO, Ricardo Renan. *REDES WIRELESS - Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Redes de Computadores e Comunicação de Dados*, Departamento de Computação da Universidade Estadual de Londrina, 2008

HART COMMUNICATION FOUNDATION. [Acesso em 30 de março de 2011]. Disponível em: http://www.hartcomm.org/protocol/wihart/wireless_technology.html, 2010.

HOFFERT, J.; KLUES, K; ORJIH, O. Configuring the IEEE 802.15.4 MAC Layer for Single-sink Wireless Sensor Network Applications. Technical Report [Acesso em 12 de dezembro de 2009] .Disponível em: http://www.cs.wustl.edu/~joeh/802_15_4_Eval_Report.pdf. , 2007.

HOUCK C.; JOINES, J.; KAY, M.. A Genetic Algorithm for Function Optimization: A Matlab Implementation NCSU-IE TR 95-09, 1995.

HU, L.; EVANS, D. *Secure aggregation for wireless networks*. Workshop on Security and Assurance in Ad hoc Networks [acesso em 24/2/2010], disponível em http://www.cs.virginia.edu/~evans/pubs/wsaan-abstract.html, Janeiro 2003.

IEC/PAS 62591, *Industrial communication networks – Fieldbus specifications – WirelessHART communication network and communication profile,* International Electrotechnical Commission, Edition 1.0, 2009

IEEE 802.11. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPAN), 1999.

IEEE 802.15.4. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPAN), maio de 2003.

IEEE Standard 802.15.4-2006, IEEE STANDARD FOR INFORMATION TECHNOLOGY – *Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements – Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2006.

ISA-SP100.11a [Acesso em 01 de fevereiro de 2010]. Disponível em: http://tinyos.stanford.edu/ttx/2007/viewgraphs/standards-sp100.pdf, 2007.

LIM, A. *Self-configurable sensor networks*. Computer Science and Engineering, Auburn University [acesso em 04/3/2010], disponível em http://www.eng.auburn.edu/users/lim/sensit.html, 2003.

LOUREIRO, Antonio A. F.; NOGUEIRA, José M. S.; LINNYER, B. Ruiz; MINI, Raquel A. F.; NAKAMURA, Eduardo F.; FIGUEIREDO, Carlos M. S. *Redes de Sensores Sem Fio*, XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, 2003.

MICHALEWICZ, Z.. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlag, 1994.

MOLINA, G,; ALBA, E.; TALBI, E.G. "Optimal Sensor Network Layout Using Multi-Objective Metaheuristics"- Journal of Universal Computer Science, vol.14 , nº 15, pp. 2549-2565, 2008.

MUTHAIAH, S. N.; ROSENBERG, C. P.. Single Gateway Placement in Wireless Mesh Networks [Acesso em 26 de janeiro de 2010]. Disponível em http:// www.ece.uwaterloo.ca/ ~cath/iscn08.pdf, 2008.

PACHECO M. A. C.. Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações, Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1999.

CLICIA, Maria S. Castro; PEREIRA, Marluce R.; AMORIM, Cláudio L. *Tutorial sobre Redes de Sensores* [acesso em 10/2/2010]. Disponível em http://magnum.ime.uerj.br/cadernos/cadinf/vol14/3-clicia.pdf, 2003.

RAYMOND S. Wagner. *Standards-Based Wireless Sensor Networking Protocols for Spaceflight Applications*, NASA Johnson Space Center - 2101 NASA Parkway, Houston TX, rayniond.s.Wagner@.nasa.gov, 2010

RORIZ, Ricardo Barbosa; PEGORARO, Gabriel Medina; MATSUMOTO, Shou. *Antenas Inteligentes*, Universidade de Brasília / Departamento de Ciência da Computação, 2006.

SANTOS, S. T, Redes de Sensores Sem Fio em Monitoramento e Controle. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2007.

WANG, J.; XIE, B.; CAI, K.; AGRAWAL, D. P.. *Intelligent Gateways Placement for Reduced Data Latency in Wireless Sensor Networks*, IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, Pisa, pp. 1-9, 2007.

WHITAKER, R. M.; RAISANEN, L.; HURLEY, S.. *A Model for Conflict Resolution between Coverage and Cost in Cellular Wireless Networks*. In Proceedings of the Proceedings of the 37th Annual Hawaii international Conference on System Sciences (Hicss'04) - Track 9 - Volume 9 (January 05 - 08, 2004). HICSS. IEEE Computer Society, Washington, DC, 90287.1, 2004.

YOUSSEF, W.; YOUNIS, M.. *Intelligent Gateways Placement for Reduced Data Latency in Wireless Sensor Networks*, ICC' 07 International Conference on Communications, Glasgow, pp. 3805-3810, 2007.

ZHENG J.; MYUNG J. L. A Comprehensive Performance Study of IEEE 802.15.4, Sensor Network Operations, IEEE Press, Wiley InterScience, Chapter 4, pp. 218-237, 2006.

ZIGBEE ALLIANCE. ZigBee Specification version 1.0, dezembro de 2004. [Acesso em 04 de abril de 2011]. Disponível em http://www.zigbee.org/Home.aspx.