



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Thiêgo Maciel Nunes

**Otimização de Cobertura, Consumo de Energia, Roteamento e Agregação de
Dados em Rede de Sensores Sem fio utilizando Algoritmos Genéticos e Lógica
Fuzzy.**

DM – 10 / 2011

Belém, Pará
2011

Thiêgo Maciel Nunes

Otimização de Cobertura, Consumo de Energia, Roteamento e Agregação de Dados em Rede de Sensores Sem fio utilizando Algoritmos Genéticos e Lógica Fuzzy.

Dissertação de Mestrado apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Instituto de Tecnologia. Universidade Federal do Pará.
Área de concentração: Computação Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Coelho Cerqueira.
Co-orientador: Prof. Dr. Dionne Cavalcante Monteiro.

Belém, Pará
2011

**Otimização de Cobertura, Consumo de Energia, Roteamento e Agregação de
Dados em Rede de Sensores Sem fio utilizando Algoritmos Genéticos e Lógica
Fuzzy.**

Dissertação apresentada para
obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Elétrica. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica. Instituto Tecnologia.
Universidade Federal do Pará.

Data da aprovação: Belém-PA, 04-03-2011.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Eduardo Coelho Cerqueira
Faculdade de Computação – UFPA – Orientador

Prof. Dr. Dionne Cavalcante Monteiro
Faculdade de Computação – UFPA – Co-Orientador

Prof. Dr. Ádamo Lima de Santana
Faculdade de Engenharia de Computação – UFPA – Membro

Aos meus pais, Arivaldo e Nancy Nunes, aos meus irmãos Thiago e Tatiana Nunes e a minha afilhada Sofia.

AGRADECIMENTOS

Em especial aos meus pais, Arivaldo Nunes e Nancy Nunes, meu irmão, Thiago Nunes e minha irmã Tatiana Nunes, que foram as pessoas fundamentais em todo o apoio que recebi e sempre acreditaram em mim.

A Deus que sempre me deu forças para continuar trabalhando e evoluindo no desenvolvimento deste trabalho e na minha vida.

Aos meus queridos familiares, avó(ô)s, tios (as), primos (as) e amigos novos e antigos por ser tão dedicados. Sem a ajuda deles não teria obtido o sucesso almejado.

A todos os colegas do GERCOM que sempre estiveram no meu lado no desenvolvimento deste trabalho sempre incentivando e ajudando em meus momentos de dúvidas.

Aos meus orientadores (Antônio Abelém, Dionne Cavalcante e Eduardo Cerqueira) que aceitaram a árdua missão de orientar-me no desenvolvimento deste trabalho e por terem acreditado em mim.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Pará pelo apoio financeiro.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica PPGEE/UFPA e toda sua equipe, pela oportunidade e o suporte para o mestrado.

Por último, agradeço aquelas pessoas que ajudaram de alguma forma, seja direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

As Redes de Sensores Sem Fio possuem capacidades limitadas de processamento, armazenamento, comunicação (largura de banda) e fonte de energia, além de possuírem características e requisitos básicos de uma RSSF como: necessidade de se auto-organizar, comunicação com difusão de curto alcance e roteamento com múltiplos saltos. Neste trabalho é proposto uma ferramenta que otimize o posicionamento e os pacotes entregues através do uso de Algoritmo Genético (AG). Para solucionar o problema de roteamento que melhore o consumo de energia e maximize a agregação de dados é proposto a utilização de lógica *fuzzy* no protocolo de roteamento *Ad hoc On-demand Distance Vector* (AODV). Esta customização é intitulada *AODV – Fuzzy for Wireless Sensor Networks* (AODV-FWSN). Os resultados mostram que a solução proposta é eficiente e consegue prolongar a vida útil da RSSF e melhorar a taxa de entrega de dados quando comparado com soluções similares.

Palavras-chave: Redes de Sensores Sem Fio, Algoritmo Genético, Lógica Fuzzy, Roteamento, Consumo de energia.

ABSTRACT

The Wireless Sensor Networks (WSN) have limited capacities for processing, storage, communication (bandwidth) and power source, besides having features and basic requirements of a WSN such as: the need for self-organization, communication with diffusion of short-range and multihop routing. This work proposes a tool that optimizes the positioning and the packages delivered through the use of Genetic Algorithm (GA). To resolve the routing problem that improves power consumption and maximize data aggregation is proposed the use of fuzzy logic in the routing protocol Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV). This customization is entitled AODV - Fuzzy for Wireless Sensor Networks (AODV-FWSN). The results show that the proposed solution is efficient and can prolong the life of the WSN and improve the rate of data delivery when compared to similar solutions.

Keywords: Wireless Sensor Network, Genetic Algorithm, Fuzzy Logic, Routing, energy consumption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Topologia em Árvore.....	7
Figura 2 - Topologia Estrela.....	7
Figura 3 - Topologia em Malha.....	7
Figura 4 - Camadas do IEEE 802.15.4/ZigBee [17].....	8
Figura 5 - Arquitetura para o padrão IEEE 802.15.4 [20].....	9
Figura 6 - Estrutura do SuperFrame.....	13
Figura 7 - Estrutura do Superframe com GTSS.....	13
Figura 8 – <i>Binding</i>	17
Figura 9 - Esquema de um Algoritmo Genético.....	21
Figura 10 - Funções de pertinência para a variável temperatura.....	28
Figura 11 - Funções de Pertinência.....	29
Figura 12 - Sistema de Inferência <i>Fuzzy</i>	31
Figura 13 - Configuração do Indivíduo do AG.....	40
Figura 14 - Função de Energia.....	45
Figura 15 - Função de Grau de Adjacência.....	45
Figura 16 - Função de <i>Fuzzy Cost</i>	47
Figura 17 - Evolução dos Indivíduos no cenário 1 com o protocolo AODV.....	51
Figura 18 - Evolução dos Indivíduos no cenário 2 com o protocolo AODV.....	51
Figura 19 - Comparação entre Pacotes entregues e a função de Aptidão da RSSF no cenário 1 com o protocolo AODV.....	52
Figura 20 - Comparação entre Pacotes entregues e a função de Aptidão da RSSF no cenário 2 com o AODV.....	53
Figura 21 - Energia consumida em todos os nós na primeira geração no cenário 1.....	54
Figura 22 - Energia consumida em todos os nós na primeira geração no cenário 2.....	54
Figura 23 -Energia consumida em todos os nós na trigésima geração no cenário 1.....	55
Figura 24 - Energia consumida em todos os nós na trigésima geração no cenário 2.....	55
Figura 25 - Evolução dos Indivíduos na Topologia em Malha com 10 nós.....	57
Figura 26 - Evolução dos Indivíduos na Topologia em Malha com 30 nós.....	57
Figura 27 - Comparação entre Pacotes entregues e a função de Aptidão da RSSF na Topologia em malha com 10 nós.....	58
Figura 28 - Comparação entre Pacotes entregues e a função de Aptidão da RSSF na Topologia em malha com 30 nós.....	59
Figura 29 - Energia consumida em todos os nós na primeira geração no cenário 1.....	60
Figura 30 - Energia consumida em todos os nós na primeira geração no cenário 2.....	61
Figura 31 - Energia consumida em todos os nós na trigésima geração no cenário 1.....	61
Figura 32 - Energia consumida em todos os nós na trigésima geração no cenário 2.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros da Camada Física IEEE 802.15.4.....	10
Tabela 2 - Conjunto de Regras	46
Tabela 3 - Parâmetros de Simulação	49
Tabela 4 - Parâmetros do AG	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AODV	<i>Ad hoc On-demand Distance Vector</i>
AODV-FWSN	<i>AODV – Fuzzy for Wireless Sensor Networks</i>
APS	<i>Application Sub Layer</i>
APO's	<i>Application Objects</i>
AG	<i>Algoritmo Genético</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i>
CSMA-CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CAP	<i>Contention Access Period</i>
CFP	<i>Contention-Free Period</i>
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
DSSS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
ED	<i>Energy Detection</i>
FFD	<i>Full Function Device</i>
FC	<i>Fuzzy Cost</i>
GTS	<i>Guaranteed Time Slots</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
LR-WPAN	<i>Low-Rate Wireless Personal Area Network</i>
LLC	<i>Logical Link Control</i>
LQI	<i>Link Quality Indicator</i>

MAC	<i>Media Access Control</i>
NS-2	<i>Network Simulator 2</i>
O-QPSK	<i>Offset Quadrature Phase-Shift Keying</i>
PHY	<i>Physical</i>
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SAP	<i>Service Access Point</i>
SSP	<i>Security Service Provider</i>
EU	União Europeia
ZDO	<i>ZigBee Device Object</i>
ZDP	<i>Zigbee Device Profile</i>

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	2
1.2 OBJETIVO	3
1.3 ORGANIZAÇÃO.....	3
2 - REDES DE SENSORES SEM FIO – RSSF	5
2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 TOPOLOGIA DA REDE.....	6
2.3 ARQUITETURA PARA REDES DE SENSORES SEM FIO	7
2.3.1. <i>Arquitetura IEEE 802.15.4</i>	9
2.3.1.1 <i>Camada Física (PHY)</i>	10
2.3.1.2 <i>Camada MAC</i>	12
2.3.2. <i>ZIGBEE</i>	13
2.3.2.1. <i>Camada de Rede (NWK)</i>	14
2.3.2.2. <i>Camada de Aplicação</i>	14
2.3.1.3 <i>Camada de Security Service Provider</i>	15
2.4 MODOS DE OPERAÇÃO DA REDE	15
2.5 BINDING	16
2.6 APLICAÇÕES	17
3 - ASPECTOS TEÓRICOS.....	19
3.1 ALGORITMO GENÉTICO	19
3.1.1 POPULAÇÃO INICIAL.....	21
3.1.2 AVALIAÇÃO DA POPULAÇÃO.....	22
3.1.3 OPERADORES GENÉTICOS	22
3.1.3.1 <i>Seleção</i>	23
3.1.3.2 <i>Crossover</i>	24
3.1.3.3 <i>Mutação</i>	25
3.1.4 CRITÉRIO DE PARADA	25
3.2 LÓGICA <i>FUZZY</i>	26
3.1.2 CONJUNTO <i>FUZZY</i>	26
3.2.2 VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS	28
3.2.3 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA	29
3.2.4 SISTEMAS <i>FUZZY</i>	30
4 – TRABALHOS RELACIONADOS	33
4.1 PROBLEMAS EM RSSF	33
4.2 PROPOSTAS RELACIONADOS À RSSF	34
4.3 CONCLUSÕES E SOLUÇÃO PROPOSTA	36
5 – OTIMIZAÇÃO EM RSSF’S UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS E LÓGICA FUZZY.....	38
5.1 SOLUÇÃO PROPOSTA	38

5.2	ALGORITMO GENÉTICO PROPOSTO	38
5.2.1	INDIVÍDUO	39
5.2.2	FUNÇÃO DE APTIDÃO	40
5.2.3	OPERAÇÕES DE <i>CROSSOVER</i> E MUTAÇÃO	42
5.3	AODV-FWSN: AODV – <i>FUZZY FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS</i>	42
5.3.1	SISTEMA <i>FUZZY</i> DESENVOLVIDO	43
5.3.2	FUZZIFICAÇÃO	43
5.3.3	SISTEMA DE INFERÊNCIA	46
5.3.4	DEFUZZIFICAÇÃO	47
5.4	PRINCÍPIO DE COMUTAÇÃO EM RAJADAS E AGREGAÇÃO DE DADOS	48
6	- RESULTADOS	49
6.1	CENÁRIOS ADOTADOS	49
6.2	RESULTADOS DOS CENÁRIOS 1 E 2 UTILIZANDO O PROTOCOLO AODV	50
6.3	RESULTADOS DOS CENÁRIOS 1 E 2 UTILIZANDO O PROTOCOLO AODV - FWSN	56
7	- CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	63
7.1	CONCLUSÃO	63
7.2	CONTRIBUICOES	64
7.3	TRABALHOS FUTUROS	64
	REFERÊNCIA	66

1 - Introdução

A evolução das Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) se deu com o desenvolvimento de tecnologias fundamentais para esta área como microprocessadores, comunicação sem fio, e micro sistemas eletroeletrônicos [1], com isso as RSSFs podem monitorar e também controlar diversos tipos de ambientes.

As RSSFs são compostas por pequenos dispositivos chamados nós sensores, onde os principais componentes do nó sensor são a bateria, o processador, a memória, o transceptor (responsável pela comunicação sem fio) e a unidade de sensoriamento.

Os nós das RSSFs atuam de forma cooperativa, disseminando uma determinada informação entre os outros nós até que os dados coletados atinjam um ponto de saída e possam ser processados pela aplicação cliente. Este ponto de saída é denominado nó coordenador.

Há diversas aplicações para as RSSFs, sendo as principais relacionadas à indústria, predial [2], pecuária, agricultura e ao meio ambiente. Um exemplo de aplicação é em uma indústria, onde os sensores do tipo acelerômetro ficam monitorando a vibração de equipamentos eletromecânicos. Neste caso, variações na vibração do equipamento monitorado são remotamente supervisionados através de uma RSSF. Os nós com os sensores transmitem ao coordenador uma mensagem de alarme com os dados coletados. A partir destas informações, o supervisor consegue determinar o nível de vibração na máquina e o local do evento.

As redes de sensores sem fio diferem das redes tradicionais em muitos aspectos [1]: não apresentam infra-estrutura nem ponto de acesso, apresentam baixo consumo de energia, baixa capacidade de processamento e armazenamento, e isso infere diretamente nas características dos protocolos de roteamento.

A distribuição dos nós pode ser regular, onde os nós são estrategicamente distribuídos em uma grade, ou irregulares, neste caso os nós encontram-se distribuídos de maneira aleatória na área de monitoramento [3].

A coleta de dados em RSSFs pode ser periódica, quando realizada em intervalos regulares; contínua, no caso em que nós estão coletando os dados durante o tempo todo; e reativa, no caso em que os nós coletam dados apenas na ocorrência de um evento. Existe ainda a coleta em tempo real que ocorre quando os nós coletam o maior número possível de dados em um determinado intervalo de tempo [4].

As principais pesquisas relacionadas às RSSF são voltadas para otimizar a quantidade de energia, realizar sensoriamento com baixo processamento, devido as restrições de *hardware* [4] e tonar as RSSFs mais eficientes. Essas pesquisas buscam como objetivo prolongar o tempo de vida útil das RSSFs, minimizar o custo de manutenção da rede e aumentar a capacidade de comunicação e sensoriamento.

1.1 Motivação

Devido as RSSFs terem certas limitações [4], diversas linhas de pesquisas foram propostas visando otimizar o consumo de energia e a entrega dos pacotes. Outro problema importante em RSSF é o posicionamento dos nós sensores, caso os nós sensores sejam posicionados de forma aleatória isto poderá implicar em um alto consumo de energia e indisponibilidade da RSSF.

Os protocolos de roteamento de redes convencionais e *ad hoc* não se ajustam adequadamente às RSSFs [5], pois os nós sensores precisam de mecanismos de roteamento de forma que o desempenho do nó seja maximizado, tanto no processamento quanto no consumo de energia, com isso quanto menor o consumo de energia maior será o tempo de vida de um nó em uma rede isolada.

Para solucionar estes problemas citados, este trabalho propõe a otimização da distribuição de nós em uma RSSF através do uso de Algoritmo Genético (AG), sob a ótica do gerenciamento de RSSF. O AG tem como objetivos achar o melhor posicionamento dos nós sensores, controlando a densidade de nós e evitando problemas como perda de pacotes, limitação da vida útil e distribuição dos nós, e garantir a conectividade entre os nós sensores que foram ativados e estender o tempo de vida da rede. Também propõe uma extensão do protocolo *Ad hoc On-demand Distance Vector* (AODV) que utiliza as técnicas de agregação de dados ao longo da rede. Utilizando lógica *fuzzy* e envio das informações através de rajadas para aumentar a eficiência do consumo de energia dos sensores.

As RSSFs possuem restrições quanto a processamento e principalmente a energia disponível para o seu funcionamento, por essas restrições não foi utilizado AG e lógica *fuzzy* de grande complexidade, pois se fosse usado iria comprometer o funcionamento da RSSF gerando atrasos e perdas nas entregas dos pacotes e diminuir o seu tempo de vida útil.

Para o AG otimizar o posicionamento dos nós em conjunto com o AODV – *Fuzzy for Wireless Sensor Networks* (AODV-FWSN) é utilizado a ferramenta *Networks Simulator* (NS-2) na versão 2.33.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo propor o desenvolvimento de uma ferramenta que otimize o posicionamento dos nós sensores e diminua o consumo de energia e desenvolver uma extensão do protocolo de roteamento *Ad hoc On-demand Distance Vector* (AODV), afim de melhor adaptá-lo as RSSF e com isso garantir uma transmissão de dados mais eficaz e com menor consumo de energia, garantindo o prolongamento da vida útil da RSSF.

A lógica *fuzzy* é utilizada para customizar o protocolo AODV baseando-se nos princípios de agregação de dados ao longo da rede e envio das informações em rajadas, fazendo com que o protocolo de roteamento da rede maximize a agregação de dados e minimize o consumo de energia dos nós. Esta customização é intitulada AODV – *Fuzzy for Wireless Sensor Networks* (AODV-FWSN).

Além do AODV-FWSN é necessário um planejamento do posicionamento dos nós sensores que irá garantir cobertura da área a ser monitorada. Para isto será utilizado um AG que proporciona otimização multivariável do posicionamento dos nós da RSSF. Com estas duas técnicas objetiva-se ter uma RSSF que atue de forma a garantir a transmissão do sinal, qualidade na entrega dos pacotes e garantir maior vida útil a todos os nós sensores e a rede como um todo.

1.3 Organização

Esta dissertação está estruturada na seguinte forma: O Capítulo 2 aborda as principais questões referentes às RSSF, incluindo uma breve introdução, as arquiteturas para RSSFs e algumas aplicações em RSSFs

No Capítulo 3 é apresentado os aspectos teóricos sobre Algoritmo Genético como: população inicial, avaliação da população, operadores genéticos e critérios de parada, e também aborda os conceitos fundamentais da Lógica *Fuzzy* como: conjuntos *fuzzy*, variáveis linguísticas, funções de pertinência e sistemas *fuzzy*.

O Capítulo 4 discutindo quais os problemas inerentes em RSSFs, os trabalhos relacionados que propõem soluções para estes problemas e as conclusões que mostra a diferença entre os trabalhos relacionados com o trabalho proposto.

No Capítulo 5 apresenta o funcionamento da solução proposta para a otimização da cobertura, melhora na entrega dos pacotes e o consumo de energia; e detalha como a proposta resolve os problemas apontados, além da descrição do AG e do AODV-FWSN desenvolvidos.

O Capítulo 6 avalia o funcionamento da solução proposta para a otimização da cobertura, o consumo de energia e a agregação de dados de uma RSSF, além de apresentar o comportamento do protocolo proposto AODV-FWSN, comparado com o do protocolo AODV original. O Capítulo 7 encerra o trabalho com as contribuições, uma avaliação geral da proposta e sugestões de alternativas de trabalhos futuros.

2 - Redes de Sensores Sem Fio – RSSF

Com o avanço das pesquisas na área de microeletrônica houve a possibilidade do desenvolvimento de dispositivos cada vez menores, dotados de algum poder computacional. As Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) surgem a partir deste avanço tecnológico, atendendo a uma necessidade de monitorar fenômenos físicos provenientes de um determinado ambiente.

2.1 Introdução

Uma RSSF [1] [6] consiste de vários nós de sensores os quais rodam aplicações individuais e comunicam-se entre si usando enlaces sem fio. Um conjunto de nós sensores pode ser distribuído em um ambiente para monitorar valores físicos ou do ambiente tais como temperatura, pressão, som, vibração, poluição entre outros, e enviá-los a um nó coordenador ou a um usuário. As RSSF são compostas por sistemas embarcados minimalistas que possivelmente em um futuro próximo atinjam o valor de U\$ 1,00 (Um dólar), nos dias atuais o valor do chip CC2400 [7] da empresa *Texas Instruments*. por exemplo custa U\$ 9,00 (Nove dólares).

Originalmente o desenvolvimento de RSSF foi motivado para aplicações militares como monitoramento de campo de batalha. Porém este tipo de rede esta sendo usado em vários ambientes, devido seu pequeno tamanho, facilidade de comunicação e baixo custo.

A variedade de aplicações para este tipo rede é enorme e vários tipos de aplicações podem ser projetadas, tais como: militares [8], industrial [2], transporte [9], agricultura [10] e [11], médica [12], monitoramento de áreas de difícil acesso [13], e monitoramento de integridade estrutural [14] e [15].

Os nós de uma RSSF são dispositivos eletrônicos de baixo custo, baixa potência de transmissão e com múltiplas funcionalidades. Tipicamente, são equipados com um transmissor de rádio ou outro dispositivo de comunicações sem fios, um pequeno microcontrolador, uma fonte de energia (por exemplo, uma bateria), e alguns sensores

de monitoramento. Um nó sensor pode variar no tamanho desde o tamanho de uma caixa até a alguns centímetros. Também pode variar no preço desde centenas de dólares a alguns centavos, o seu valor irá depender do seu tamanho e sua complexidade. O tamanho e as limitações de preço resultam em limitações em recursos como energia, memória, velocidade computacional, e largura de banda.

Uma rede de sensor é uma sub-classe das redes ad-hoc, significando que cada nó sensor pode ter implementado um algoritmo de roteamento de múltiplos saltos, por essa razão uma rede de sensor pode ter uma grande variedade de comunicação.

2.2 Topologia da Rede

Podemos identificar dois tipos de dispositivos em uma rede IEEE 802.15.4:

- **Full Function Device (FFD)** - pode funcionar em qualquer topologia do padrão, desempenhando a função de coordenador da rede ou roteador e conseqüentemente ter acesso a todos os outros dispositivos dentro de seu alcance de transmissão. São dispositivos mais completos [16];
- **Reduced Function Device (RFD)**- dispositivo mais simples, com menos memória, utilizado nas extremidades da rede sem atribuições de reenvio de mensagem, ou seja não pode atuar como um coordenador de rede ou roteador. Pode comunicar-se apenas com um FFD [16].

Em RSSFs são definidas três tipos de topologia (Figura 1, Figura 2 e Figura 3), podendo cada uma coexistir dentro de uma mesma rede. Na topologia estrela cabe ao coordenador todo o controle da rede, assumindo um papel central e de comunicação direta com todos os dispositivos finais. Portanto, cabe ao coordenador iniciar e manter todos os nós da rede, além disso, quase toda a informação que circula pela na RSSF passa pelo nó coordenador ou é repassada pelo mesmo.

A topologia em árvore possui semelhanças com a topologia em malha, pois também são usados dispositivos roteadores. No entanto, nesta topologia efetua-se a distribuição de dados e mensagens de controle numa estrutura hierárquica, onde o coordenador assume o papel de nó raiz da rede.

Na topologia em malha os dispositivos do tipo FFD (coordenador e roteadores) podem se comunicar com outros dispositivos FFD. Isto permite, quando necessária, a

expansão física da rede, aumentando seu alcance. O Coordenador registra toda a entrada e saída de dispositivos, mas não assume um papel tão preponderante em termos de fluxo de informação como na topologia estrela.

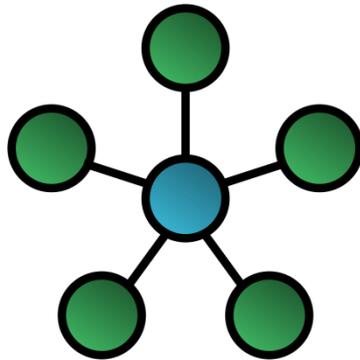


Figura 2 - Topologia Estrela

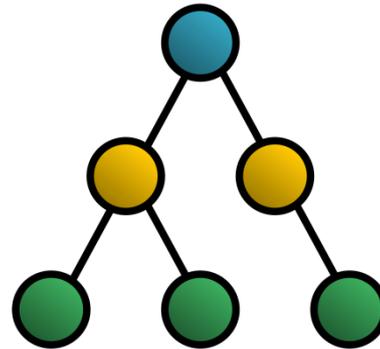


Figura 1 - Topologia em Árvore

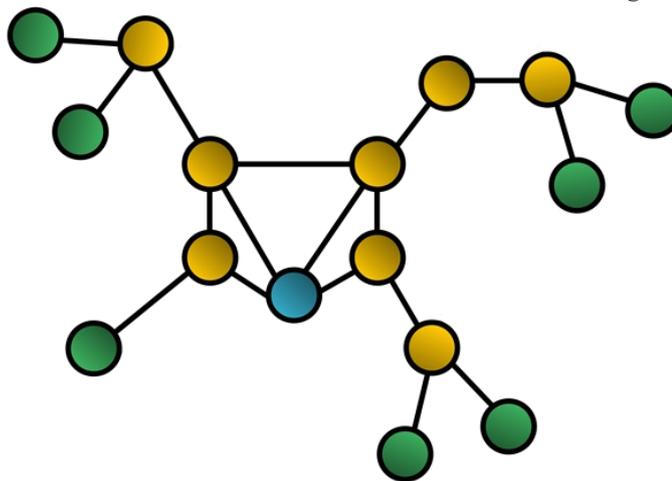


Figura 3 - Topologia em Malha



2.3 Arquitetura Para Redes de Sensores Sem Fio

As RSSFs têm características particulares e o uso direto de protocolos de comunicação de redes *ad hoc* não é viável, pois estes requerem muita memória e vários recursos. Com isso novas arquiteturas têm sido propostas para se adequar às necessidades e limitações das RSSFs.

A arquitetura do protocolo ZigBee/IEEE 802.15.4 [17] [18] surge como a mais padronizada e estável dentre as propostas. Esta arquitetura é composta por camadas, sendo que as camadas executam serviços específicos ao dispor da camada superior: a entidade de dados fornece dados para o serviço de transmissão e a entidade de gestão fornece informação para todos os outros serviços. Cada entidade de serviço expõe uma interface para a camada superior através do ponto de acesso ao serviço (PAS) e cada PAS suporta um número de primitivas de serviço para ativar a funcionalidade que se pretende solicitar.

A Arquitetura do ZigBee/IEEE 802.15.4 pode ser vista na Figura 4, sendo que o IEEE 802.15.4 define a camada física e enlace e o ZigBee define as camadas superiores. Posteriormente serão apresentadas as principais características de cada uma das camadas da pilha protocolar do ZigBee/IEEE 802.15.4.

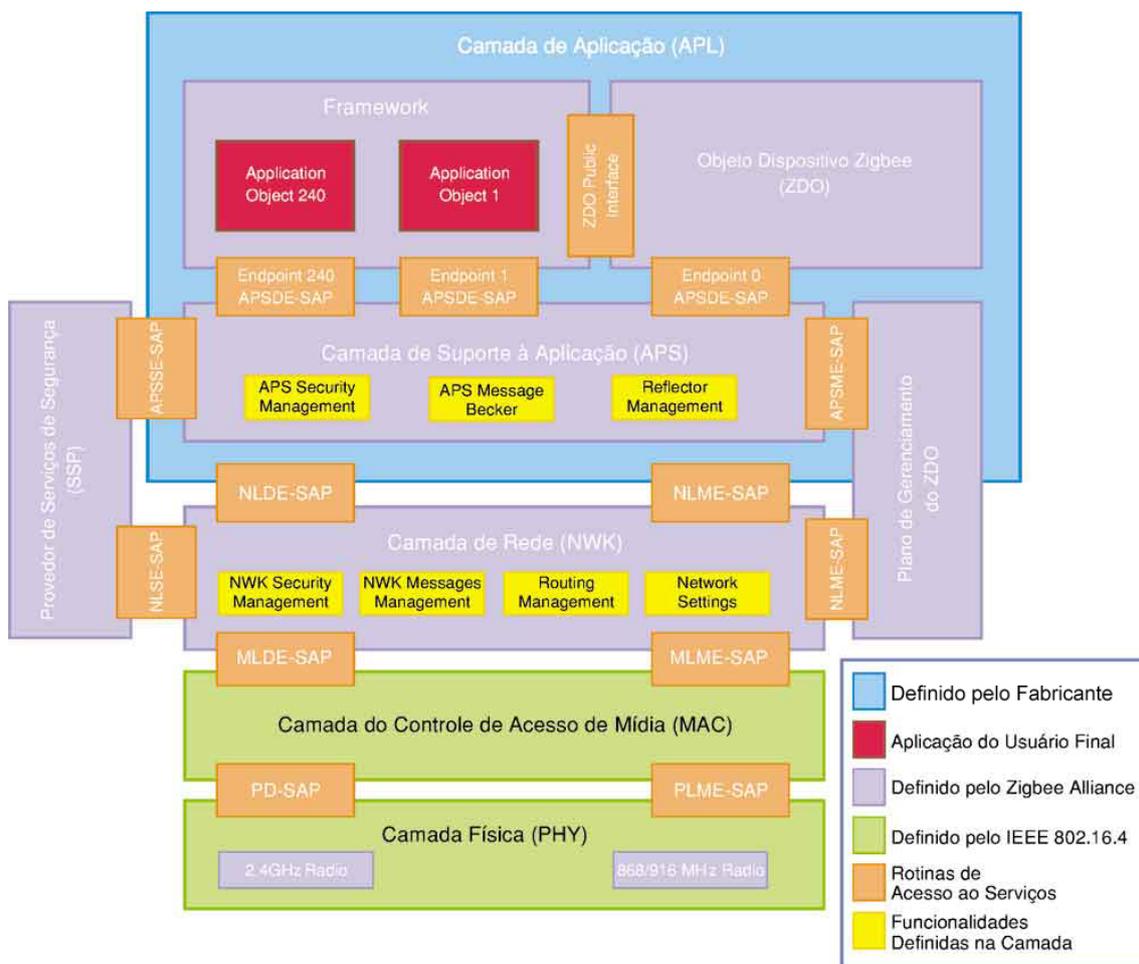


Figura 4 - Camadas do IEEE 802.15.4/ZigBee [17]

2.3.1. Arquitetura IEEE 802.15.4

O IEEE 802.15.4 é o padrão de fato para RSSF e diferencia-se dos demais devido seu foco ser definido para um conjunto de aplicações que antes não eram padronizadas. O padrão IEEE 802.15.4 define um protocolo e interconexão para dispositivos de comunicação de dados usando baixa taxa de transmissão de dados (até 250 kbps), baixa potência de transmissão, baixa complexidade e transmissões de rádio frequência de pequeno alcance (tipicamente de 10m até 100m) em uma rede sem fio. Os nós da rede podem ser fixos, portáteis ou móveis, tal rede tem exigências de consumo de energia muito limitadas [19]

O padrão IEEE 802.15.4 define as características para a camada física (PHY) e o Controle de Acesso ao Meio (MAC) das *Low-Rate Wireless Personal Area Network (LR-WPAN)*, tal arquitetura pode ser vista na Figura 5 [20].

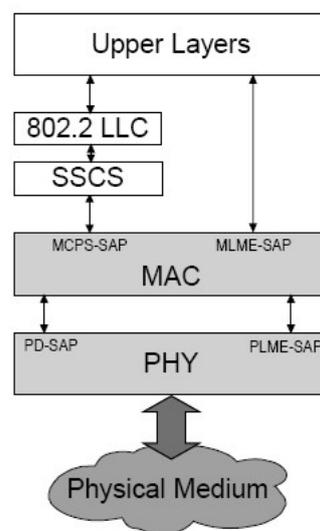


Figura 5 - Arquitetura para o padrão IEEE 802.15.4 [20]

A camada de enlace do IEEE 802.15.4 é de fácil implementação, mas exige baixo custo de operação partindo desde operações de curto alcance, baixo consumo de energia assim como transferência confiável e viável dos dados a serem transferidos, oferecendo suporte a topologia e ao mesmo tempo estabelecer segurança no sistema.

Semelhante a arquitetura dos outros padrões a camada de enlace é formada por duas subcamadas: a subcamada de MAC e a subcamada de Controle Lógico do Link

(LLC). O LLC é padronizada em 802.2 [21] e é comum entre os padrões 802 como a 802.3, 802.11 e 802.15.1, enquanto a subcamada MAC é específica para implementação na camada física. Basicamente a subcamada MAC fornece o elo entre a camada física e a camada de enlace [19].

O padrão IEEE 802.15.4 possui duas camadas: Física e MAC. A camada MAC foi projetada para permitir topologias múltiplas com baixa complexidade e a camada Física foi projetada para acomodar as necessidades de interfaces de baixo custo, permitindo níveis elevados de integração.

2.3.1.1 Camada Física (PHY)

A especificação da camada física descreve como os dispositivos IEEE 802.15.4 devem se comunicar através de um canal sem fio. Ela define as bandas ISM, que não requerem licenciamento, de 2.4 GHz e 868/915 MHz. A banda de frequência ISM 2.4 GHz é utilizada em todo o mundo, enquanto que as bandas ISM 868 MHz e ISM 915 MHz são utilizadas na Europa e América do Norte, respectivamente (Tabela 1).

Tabela 1 - Parâmetros da Camada Física IEEE 802.15.4.

Banda de Frequência	Cobertura	Modulação	Taxa de Transmissão (Kbps)	Número de Canais
868 MHz	Europa	BPSK	20	1
915MHz	ISM Américas	BPSK	20	10
2.4GHz	ISM Mundial	O-QPSK	20	16

Um total de 27 canais com três diferentes taxas de dados são alocadas pelo IEEE 802.15.4: 16 canais com uma taxa de dados de 250 Kbps em 2.4 GHz [22] [23] 10 canais com uma taxa de dados de 40 Kbps na banda de 915 MHz e 1 canal com uma taxa de dados de 20 Kbps na banda de 868 MHz. A modulação *Binary Phase Shift Keying* (BPSK) é utilizada na banda de 868/915 MHz e a modulação *Offset Quadrature Phase-Shift Keying* (O-QPSK) na banda de 2.4 GHz. Ambas as modulações oferecem uma taxa de erro (BER) muito baixa com relação a um baixo nível de sinal ruído (SNR).

Diferente do Bluetooth [23], o IEEE 802.15.4 não usa salto de frequências, mas é baseado em *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) [24].

O padrão IEEE 802.15.4 também especifica que a camada física é responsável por serviços como ativação e desativação do transmissor de rádio, *Energy Detection* (ED) no canal atual, *Link Quality Indicator* (LQI) de um pacote recebido, seleção de frequência de canal *Clear Channel Assessment* (CCA) para o *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA-CA) além da transmissão e recepção de dados através do meio físico segundo a modulação específica e a técnica de propagação. A seguir será apresentado mais detalhes sobre cada serviço fornecido pela camada física:

- **Ativação e Desativação do Transmissor de Rádio:** o transmissor de rádio tem três estados: transmitindo, recebendo ou sleeping. Após uma requisição da subcamada MAC, o transmissor de rádio irá para um desses três estados.
- **Energy Detection:** Corresponde a uma estimativa da potência do sinal recebido dentro da largura de banda do canal IEEE 802.15.4. Nenhuma tentativa é feita para identificar ou decifrar sinais no canal, é usado pela camada de rede como parte do algoritmo de seleção de canal.
- **Link Quality Indicator (LQI):** é uma caracterização da intensidade e/ou qualidade do pacote recebido. A medida pode ser implementada usando a medida ED, uma estimativa da relação sinal/ruído ou uma combinação desses métodos. O LQI é reportado como um inteiro de 8 bits. Os valores máximos e mínimos de LQI são associados com os valores de mais baixa e alta qualidade dos sinais IEEE 802.15.4 detectáveis pelo receptor, e os outros valores estariam uniformemente distribuídos entre esses dois limites.
- **Clear Channel Assessment (CCA):** é executado de acordo com a configuração de um dos métodos descritos a seguir: (i) Energia acima do nível: CCA reportará o estado do meio como ocupado após detectar um nível de energia acima do nível ED; (ii) 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 ED; (iii) 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 ED.

- **Seleção de Frequência do Canal:** o padrão define um total de 27 canais (de 0 a 26), eles são disponíveis através das três bandas de frequência (16 canais a banda de 2450 MHz, banda de 10 para 915 MHz, e banda de 1 para 868 MHz). A camada física deve ser capaz de modificar o canal quando solicitada por uma camada superior.

2.3.1.2 Camada MAC

A subcamada MAC trata de todo acesso ao canal de rádio. O padrão IEEE 802.15.4 define que a rede pode funcionar nos seguintes modos: *beacon-enabled* ou *non beacon enabled*. Em RSSFs que necessitam de sincronização ou que permitam uso de dispositivos de baixa latência é recomendado o uso do modo *beacon-enabled*, caso contrário é recomendado o uso modo *non beacon-enabled*.

A camada MAC é responsável pelas seguintes tarefas: geração e sincronização de *beacons*; suporte de associação e desassociação na RSSF, suporte opcional à segurança do dispositivo, gerenciamento de acesso ao canal via CSMA-CA [25], manutenção dos tempos reservados (*slots* GTS) e prover validação e reconhecimento de mensagem. Os *beacons* são pacotes de controle que delimitam quadros utilizados pelo coordenador para sincronizar com os demais dispositivos da rede.

No caso de uma rede *non beacon-enabled*, os nós podem comunicar-se a qualquer momento após uma fase de associação. O acesso ao canal e a contenção são gerenciados usando o mecanismo CSMA-CA. Cada vez que um dispositivo quiser transmitir um quadro de dados ou comandos MAC, ele espera por um período de tempo randômico. Se após a espera o canal estiver livre, o nó transmite seu dado. Se o canal estiver ocupado o nó aguarda outro período de tempo randômico antes de tentar acessar o canal novamente. Quadros de reconhecimento são enviados sem usar o mecanismo CSMA-CA.

Para o modo *beacon-enabled* o coordenador define o formato do *superframe*. O *superframe* é dividido em até 16 *slots* que são usados para os nós transmitirem seus pacotes. Os *beacons* são enviados pelo coordenador para delimitar os limites do *superframe* e para sincronização. O *Contention Access Period* (CAP) é um período entre dois *beacons* e durante este período os dispositivos competem entre eles usando o mecanismo *slotted* CSMA-CA. O *superframe* tem um período ativo e inativo e o

coordenador pode entrar em um modo de baixa potência durante o período inativo, a Figura 6 mostra a estrutura do *superframe* no padrão IEEE 802.15.4.

O mecanismo GTS (*Guaranteed Time Slots*) permite que um dispositivo acesse o meio sem contenção no período CFP (*Contention-Free Period*), para aplicações que necessitam garantia de largura de banda. O GTS sempre aparece no fim do *superframe* ativo que começa imediatamente após o CAP, como mostrado na Figura 7. O coordenador pode alocar até sete desses GTS e um GTS pode usar mais de um *slot* de tempo. Contudo, uma porção suficiente do CAP permanece no modo de acesso baseado em contenção para outros dispositivos na rede ou novos dispositivos que desejam juntar-se a rede. Para cada dispositivo transmitindo em GTS é assegurado que a sua transação é concluída antes do tempo do próximo GTS ou no fim do CFP [20].

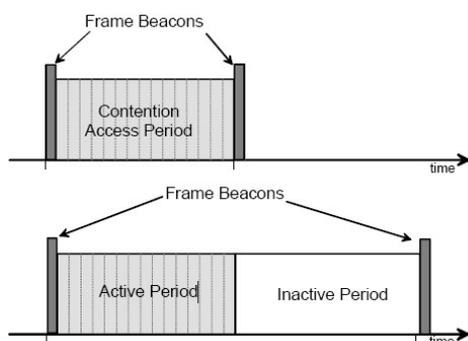


Figura 6 - Estrutura do SuperFrame

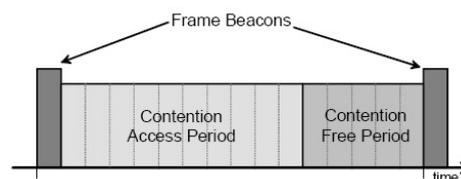


Figura 7 - Estrutura do Superframe com GTSS

2.3.2. ZIGBEE

A especificação ZigBee de responsabilidade da *ZigBee Alliance* define as camadas de rede, segurança e aplicação. A arquitetura do ZigBee foi desenvolvida em camadas. Cada camada executa serviços específicos para servir à camada acima: a entidade de dados provê dados para o serviço de transmissão e a entidade de gerência fornece informações para todos os outros serviços. Cada entidade de serviço expõe uma interface para a camada superior através do ponto de acesso (SAP) e cada SAP suporta um número de primitivas para ativar a funcionalidade solicitada.

2.3.2.1. Camada de Rede (NWK)

As responsabilidades da camada de rede incluem mecanismos usados para conexão e desconexão de dispositivos em uma rede, de aplicação de segurança aos quadros e roteamento para seus destinos. Além disso a camada de rede inclui a descoberta e manutenção de rotas entre dispositivos envolvidos na rede. A descoberta e armazenamento da informação da vizinhança também são feitos nesta camada. A camada NWK de um coordenador é responsável por iniciar uma nova rede sempre que apropriado e assinalar endereços para os novos dispositivos associados.

A camada de rede suporta as topologias em estrela, árvore e malha. Na topologia do tipo estrela, a rede é controlada por um único dispositivo coordenador. Nas topologias malha e estrela, o coordenador é responsável por inicializar a rede e pela escolha dos parâmetros chave de rede.

A função de gerenciamento da rede deve ser implementada pelo coordenador ZigBee, pelo roteador ou dispositivo lógico, conforme a configuração estabelecida via aplicação ou durante a instalação. Essa função será executada pelo coordenador ou pelo roteador e tem a habilidade para selecionar um canal que não está em uso, para a criação de uma nova RSSF. É possível formar uma RSSF sem que exista um dispositivo pré-designado como coordenador, onde o primeiro dispositivo de função completa (FFD) ativado assume esta função.

O processo de gerência de rede permite a especificação de uma lista de canais para o procedimento de buscas na rede. A norma é utilizar todos os canais na banda de operação selecionada. Além disso, a gerencia de rede é responsável pelos procedimentos de busca para determinar as redes na vizinhança e a identidade do seu dispositivo coordenador e roteador [26] [17].

2.3.2.2. Camada de Aplicação

A camada de aplicação é composta por três sub-camadas, a *Framework Application*, a *ZigBee Device Object (ZDO)* e a *Application Sub Layer (APS)*. A *Framework Application* apresenta um conjunto de *Application Objects (APO's)* capazes de mapearem os nós vizinhos e assim facilitar a interação entre eles.

O *ZigBee Device Object (ZDO)* é como um objeto de aplicação especial, que é residente em todos os nós da rede ZigBee. É sempre o *end point zero*, e os outros *end*

points são numerados de 1 a 240. Tem seu próprio perfil, conhecido como o perfil do dispositivo de ZigBee (ZDP), que tanto os outros *end points* quanto os outros nós do ZigBee podem alcançar. É o ZDP que contém os serviços para a descoberta do dispositivo. O ZDO é então responsável pela gerência do dispositivo total e também por chaves e políticas da segurança. As aplicações fazem chamadas ao ZDO a fim de descobrir outros dispositivos de ZigBee na rede e os serviços que oferecem e especificar ajustes da segurança e da rede.

A camada APS faz o roteamento das mensagens aos diferentes pontos de aplicação que funcionam no nó. Isto inclui manter as tabelas de *binding* (tabela que mantém as conexões compatíveis entre diferentes *end points*) [17].

2.3.1.3 Camada de *Security Service Provider*

A camada de *Security Service Provider* (SSP) fornece serviços de segurança estabelecendo e trocando chaves da segurança, e usando estas chaves para fixar as comunicações. Os serviços de segurança não são fixos em uma única camada, mas são usados pelas camadas do MAC, do NWK e do APS para fornecer a segurança em cada nível. A regra geral é que a camada responsável para gerar um frame dos dados é responsável por codificá-lo quando envia e autenticá-lo quando recebe. O ZDO é que dita as políticas e as configurações da segurança executadas pelos serviços de segurança [17].

2.4 Modos de Operação da Rede

O padrão IEEE 802.15.4 também define dois modos de operação, baseado ou não na estrutura de superframe [21]. Os modos de operação são utilizados para controlar a comunicação na rede.

No modo *beaconing*, os nós roteadores transmitem periodicamente sinalização (*beacons*) para confirmar sua presença aos outros nós da mesma rede, sendo que os nós restantes só necessitam estar ativos no momento da sinalização. Isto permite mantê-los no modo “*sleep*” entre as sinalizações, com evidente vantagem em termos de consumo energético (diminuem o seu *duty cycle* e, conseqüentemente, prolongam a autonomia da bateria a que possam estar ligados) [27].

O intervalo entre *beacons* podem variar entre os 15.36 ms e os 251.65s, para uma taxa de transmissão de 250kbit/s. No entanto, há que ter em conta que a operação com *duty cycle* reduzido (associada a intervalos prolongados entre *beacons*) requer uma temporização de elevada precisão.

No modo *non-beaconing* sucede que a maioria dos dispositivos mantém os seus receptores permanentemente ativos, sendo o consumo de energia mais significativo [27].

2.5 Binding

O protocolo ZigBee implementa o conceito de *binding* para facilitar a troca de mensagens entre os elementos da rede.

Esta funcionalidade permite ligar um nó a outro ou mais nós da rede utilizando uma tabela, a tabela de *binding*, na qual são guardadas informações como o *endpoint* o qual os nós se ligaram, o endereço de destino do nó ou do grupo em questão e o identificador do nó de destino na rede. A vantagem em usar estes dois identificadores é quando o nó de destino muda de identificador e é possível atualizar o identificador do nó sem perder a sua entrada na tabela de *binding*.

O *binding* de dois ou mais nós facilita em muito a quantidade de mensagens enviadas quando existem vários nós que estão ligados ao mesmo *endpoint*, pois assim o código necessário para o envio das mensagens diminui significativamente deixando a APS responsável pelo envio das mesmas.

Pode associar-se um nó a outros através do *binding*. No caso do interruptor superior da Figura 8, a associação é estabelecida por um conjunto de nós representando os dispositivos de iluminação que por sua vez estão associados a um nó que contém um interruptor que envia comandos de forma a ligar ou desligar as luzes. Para tal ser possível é necessário que os nós responsáveis pelos dispositivos de iluminação estejam na tabela de *binding* do interruptor. Comparativamente com o conjunto de três interruptores, o *binding* dos dispositivos de iluminação apenas apresenta a desvantagem de não poderem ser utilizadas as três lâmpadas de forma independente. [28].

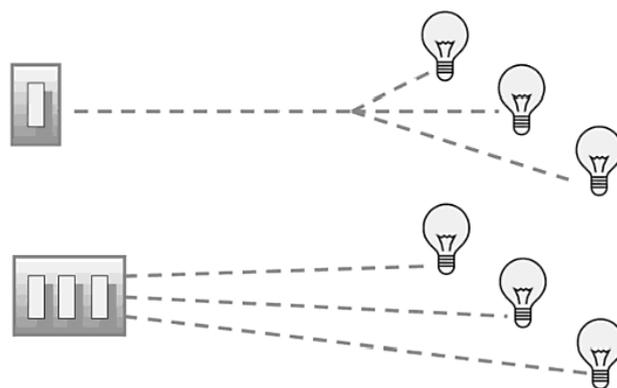


Figura 8 – Binding

2.6 Aplicações

As aplicações de uma RSSF são as mais diversas possíveis, no campo militar, na área médica, monitoramento ambiental, segurança, monitoramento de máquinas industriais, monitoramento de veículos, dentre outros. Alguns exemplos de aplicação são [29]:

- **Amazônia:** com sua grande biodiversidade faz-se necessário o monitoramento para avaliar os impactos ambientais e determinar ações que minimizem o avanço do desmatamento e a ocupação de madeireiros e pecuaristas que exploram a floresta de forma irracional e irresponsável.
- **Meio ambiente:** O Brasil tem de 10 a 20% de todas as espécies conhecidas do planeta, é um dos 15 países com maior diversidade de espécies, ocupa o primeiro lugar em espécies de mamíferos, peixes de água doce e alguns tipos de plantas, o segundo lugar de anfíbios, o terceiro lugar de pássaros, o quinto lugar de répteis, e é um dos cinco países com o maior número de espécies endêmicas. Além disso, a nossa flora ainda é bastante desconhecida. RSSFs podem ser aplicadas para ajudar a conhecer e monitorar o meio ambiente de regiões do país, principalmente do Pantanal e região Amazônica.
- **Agricultura:** No futuro, pode ser decisivo para a exportação de grãos e alimentos do país, ter a capacidade de rastrear a qualidade do produto agrícola desde a colheita no campo até a mesa do consumidor. Isso vai se tornar uma realidade quando, nos próximos anos, a União Européia (UE) implantar o

projeto de Segurança Alimentar, aprovado em 1999, ou monitorar e atuar em variáveis ambientais em uma fazenda, cidade, floresta, ou mesmo no oceano. Isso significa, que no futuro todo alimento vendido na UE deve ser rastreável, caso contrário não poderá ser comercializado.

- **Pecuária:** O desenvolvimento de métodos baseados em redes de sensores sem fio para a identificação da paternidade de animais gerados a partir de touros múltiplos possibilitará a agregação de enorme volume de informações aos programas de avaliação genética de bovinos de corte, com reflexos nas acurácias e aumento do número de touros testados e avaliados. Essa tecnologia tem a grande vantagem de não ser intrusiva e poder ajudar a resolver outros problemas fundamentais como identificação da capacidade de serviço real e de parâmetros andrológicos de touros em regime de monta natural, rastreabilidade, identificação das fêmeas em cio no regime de monta natural a campo, comportamento de touros e vacas em uma área confinada.
- **Áreas Industriais e Sistemas de Energia:** Monitoramento em indústrias petroquímicas, fábricas, refinarias e siderúrgicas de parâmetros como fluxos, pressão, temperatura, e nível, identificando problemas como vazamento e aquecimento. Monitoramento de linhas de distribuição de energia e sistemas de distribuição de gás e água, de parâmetros como fluxos, pressão, temperatura, e nível.
- **Automação Residencial:** Cenas de iluminação, irrigação inteligente, controle de acesso através da digital, acionamento automático de eletrodomésticos, controle de demanda de energia e água e sistema de supervisor local e à distância.

Muitas vezes, em ambientes onde a presença humana torna-se inviável, ou até mesmo quando a implantação de uma rede cabeada torna-se difícil, o uso das redes de sensores sem fio passa a ser um atrativo. Por outro lado, a diminuição de custos, também influencia significativamente o uso das RSSFs. Na indústria de aviação, por exemplo, o uso dessas redes possibilita a redução do peso do avião devido a não necessidade de cabeamento para interligar os nós sensores.

3 - Aspectos Teóricos

Este capítulo disserta sobre as ferramentas de inteligência utilizadas no desenvolvimento desta pesquisa. A seção 3.1 apresenta um breve histórico, características e o funcionamento dos Algoritmos Genéticos. Na seção 3.2 mostra a Teoria de Conjuntos *Fuzzy* e os Conceitos de Lógica *Fuzzy*.

3.1 Algoritmo Genético

Até meados do século XIX, alguns naturalistas acreditavam que cada espécie havia sido criada separadamente por um ser supremo ou através de geração espontânea. Alguns trabalhos como do naturalista Carolus Linnaeus sobre a classificação biológica de organismos despertou o interesse pela similaridade entre certas espécies, levando a acreditar na existência de certa relação entre elas, outros naturalista como Jean Baptiste Lamarck, sugeriu uma teoria evolucionária no uso e desuso de órgãos e o de Thomas Robert Malthus que propôs fatores ambientais tais como doenças e carência de alimentos, limitavam o crescimento de uma população.

Depois de mais de 20 anos de observações e experimentos, os naturalistas ingleses Charles Darwin e Alfred Russel Wallace apresentaram em 1858 suas teorias de evolução através de seleção natural. No ano seguinte, Charles Darwin publica o seu *On the Origin of Species by Means of Natural Selection* com a sua teoria completa, sustentada por muitas evidências colhidas durante suas viagens a bordo do *Beagle* [30].

A teoria da evolução e a computação nasceram praticamente na mesma época: Charles Babbage, um dos fundadores da computação moderna e amigo pessoal de Darwin desenvolveu sua máquina analítica em 1833. Ambos provavelmente estariam surpresos e orgulhosos com a ligação entre estas duas áreas.

Em 1900, o trabalho de Gregor Mendel, desenvolvido em 1865, sobre os princípios básicos de herança genética, foi redescoberto pelos cientistas e teve grande influência sobre os futuros trabalhos relacionados à evolução. A moderna teoria da evolução combina a genética e as idéias de Darwin e Wallace sobre a seleção natural,

criando o princípio básico de Genética Populacional: a variabilidade entre indivíduos em uma população de organismos que se reproduzem sexualmente é produzida pela mutação e pela recombinação genética.

Este princípio foi desenvolvido durante os anos 30 e 40, por biólogos e matemáticos de importantes centros de pesquisa. Nos anos 50 e 60, muitos biólogos começaram desenvolver simulações computacionais de sistemas genéticos. Entretanto, foi John Holland quem começou, seriamente, a desenvolver as primeiras pesquisas no tema. Holland foi gradualmente refinando suas idéias e em 1975 publicou o seu livro *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, hoje considerado a Bíblia de Algoritmos Genéticos [31]. Desde então, estes algoritmos vêm sendo aplicados com sucesso nos mais diversos problemas de otimização e aprendizado de máquina.

Nos AGs populações de indivíduos são criados e submetidos aos operadores genéticos: seleção, *crossover* e mutação [32]. Estes operadores utilizam o desempenho de cada indivíduo para solução do problema de avaliação e vão gerar um processo de evolução natural destes indivíduos, que eventualmente deverá gerar um indivíduo que caracterizará uma boa solução para o problema.

Os AGs são algoritmos de busca baseados nos mecanismos de seleção natural e genética. Eles combinam a sobrevivência entre os melhores com uma forma estruturada de troca de informação genética entre dois indivíduos para formar uma estrutura heurística de busca.

Conforme as gerações evoluem e os operadores genéticos atuam, realiza-se uma grande busca pelo espaço de soluções, com isso a competição entre os indivíduos é que vai determinar as soluções obtidas, porém só os melhores indivíduos prevalecerão e ainda pode acontecer de uma geração ser muito pior que a geração anterior. Os AGs não são um algoritmo de busca da solução ótima de um problema, e sim uma heurística que encontra boas soluções a cada execução, que é melhor exemplificado na Figura 9.

A codificação da informação em cromossomos é um ponto crucial dentro do AG, se a codificação for bem implementada, esta incluirá as particularidades do problema e permitirá que se evitem testes de viabilidade de cada uma das soluções geradas.

As informações devem ser codificadas nos cromossomos e a reprodução se encarregará de fazer com que a população evolua. A mutação cria diversidade, mudando

aleatoriamente genes dentro de indivíduos, e é aplicada de forma menos freqüente que o *crossover*.

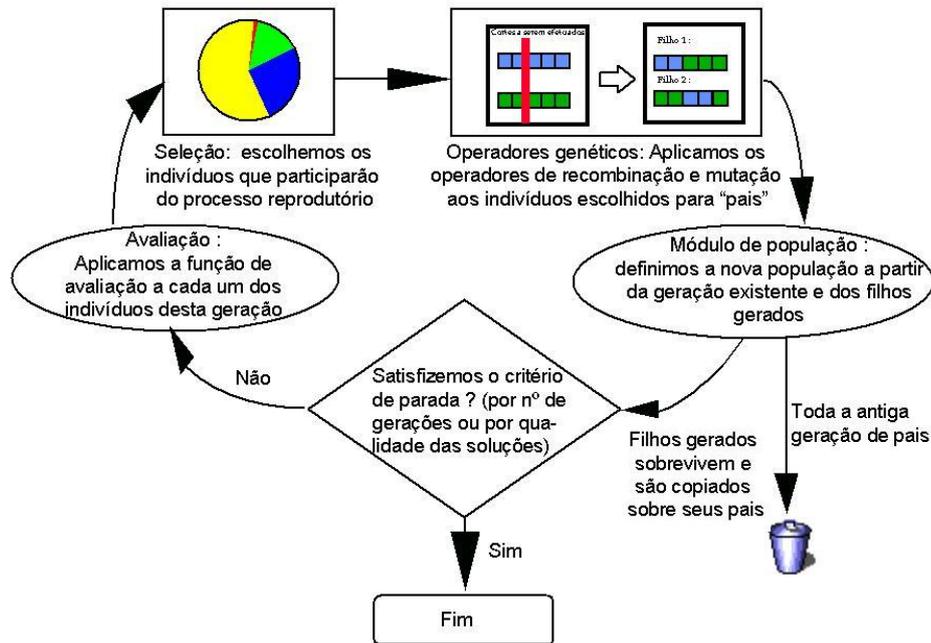


Figura 9 - Esquema de um Algoritmo Genético [33]

A mutação e o *crossover* são aplicados em indivíduos selecionados dentro da população. A seleção deve ser feita de tal forma que os indivíduos mais aptos sejam selecionados mais frequentemente do que aqueles menos aptos, de forma que as boas características daqueles passem a predominar dentro da nova população de soluções.

3.1.1 População Inicial

A população inicial é feita da forma mais simples possível, fazendo-se uma escolha independente para cada indivíduo da população inicial. A lei da probabilidade sugere que se tenha uma distribuição que cobre praticamente todo o espaço de soluções, mas isto não pode ser garantido, pois a população tem tamanho finito.

O tamanho da população é tratado como n indivíduos e cada um destes representa uma possível solução para o problema. Em problemas que possuem restrições, a população inicial não poderá gerar indivíduos inválidos nesta etapa.

Se uma população inicial pequena for gerada de forma aleatória, provavelmente algumas regras do espaço de busca não serão apresentadas, e como solução para este problema deve haver uma distribuição uniforme da população.

Além dessa solução, pode-se utilizar a inversão de bits, podendo a primeira metade da população ser gerada de forma aleatória e a segunda metade da população ser a troca de bits da primeira metade, e assim tem-se a garantia de que a cadeia de bits esteja dentro dos valores 0 e 1 [34].

3.1.2 Avaliação da População

A função de avaliação é a forma utilizada pelos AGs para determinar a qualidade de um indivíduo como solução do problema em questão. A função de avaliação, em muitos casos, é a única ligação com o problema real. Isto ocorre do fato que a função de avaliação só julga a qualidade da solução que está sendo apresentada por aquele indivíduo, sem armazenar qualquer tipo de informação sobre as técnicas de resolução do problema.

Com isso o AG pode ser usado para descobrir o máximo de toda e qualquer função de n variáveis sem nenhuma alteração das estruturas de dados e procedimento adotados, apenas alterando a função de avaliação [33].

A função de avaliação calcula um valor numérico que reflete quão bons são os parâmetros representados no cromossomo para resolução do problema. A função usa todos os valores armazenados no cromossomo e retorna um valor numérico. Como os AGs são técnicas de maximização, a função de avaliação deve ser tal que se o cromossomo $C1$ representa uma solução melhor do que o cromossomo $C2$, então a avaliação de $C1$ deve ser maior do que a avaliação de $C2$.

A função de avaliação pode conter todo o conhecimento que se possui do problema a ser resolvido, tanto suas restrições quanto seus objetivos de qualidade. A função de avaliação deve refletir os objetivos a serem alcançados na resolução de um problema e é derivada diretamente das condições impostas pelo problema.

3.1.3 Operadores Genéticos

O princípio dos operadores genéticos (seleção, *crossover* e mutação que serão melhores discutidos nas próximas seções) é transformar a população através de sucessivas gerações, estendendo a busca até chegar a um resultado satisfatório. Os operadores genéticos são necessários para que a população se diversifique e mantenha características de adaptação adquiridas pelas gerações anteriores.

A probabilidade de cruzamento é o parâmetro responsável pela recombinação de características dos pais durante a reprodução, permitindo que as próximas gerações herdem essas características.

É importante também, analisar de que maneira alguns operadores influem no comportamento dos AGs, para que se possa estabelecê-los conforme as necessidades do problema e dos recursos disponíveis.

3.1.3.1 Seleção

Este operador genético desempenha o papel da seleção natural na evolução, selecionando para sobreviver e reproduzir os organismos com melhor valor na função de adaptação [35].

Esta etapa consiste em selecionar os indivíduos que estão mais aptos, que vão gerar uma nova população após a aplicação de todos os operadores genéticos. Essa seleção em busca dos mais aptos pode ser feita por amostras diretas, aleatórias simples ou estocástica [33].

Para [32] a seleção de indivíduo baseia-se no princípio da sobrevivência dos melhores indivíduos, onde os cromossomos com mais alta probabilidade de sobrevivência são copiados de forma semi-randômica uma ou mais vezes para um novo conjunto que formará a próxima geração da população. Os indivíduos que foram definidos por baixa aptidão na fase anterior são descartados.

A idéia central do operador de seleção no AG é oferecer aos melhores indivíduos da população corrente, dando a estes indivíduos preferência para o processo de reprodução, permitindo a estes passar suas características para a próxima geração.

Esse método de seleção pode ser aplicado através de duas técnicas: roleta e torneio.

- **Roleta:** A técnica da roleta consiste em selecionar um indivíduo com uma certa probabilidade, baseada na proporção de sua adequabilidade em relação ao total da soma das adequabilidades dos indivíduos [34]. O indivíduo com mais chance de ser selecionado é aquele que tiver maior grau de adequabilidade;
- **Torneio:** A seleção por torneio, onde um grupo de “n” indivíduos são obtidos aleatoriamente da população, com reposição ou sem reposição, isto é, podendo ou não retornar a população para outro torneio. Esses indivíduos participam do

torneio, onde o indivíduo com melhor adequabilidade é escolhido para a reprodução, e o processo se repete até uma nova população ser gerada.

3.1.3.2 Crossover

Este operador genético consiste em misturar materiais genéticos de dois indivíduos conhecidos como pais, obtidos na fase de seleção, produzindo dois novos indivíduos, conhecidos como filhos que herdam as características genéticas de seus progenitores. Durante esta troca de material genético, há uma tendência de transmissão de características dominantes para as futuras gerações [34].

A fase de *crossover* é a característica principal que faz a distinção de algoritmos genéticos em relação a outras técnicas e sua idéia central é a propagação das características dos indivíduos mais aptos da população trocando segmentos de informações logo após a seleção esperando uma convergência para a situação de otimização desejada.

O processo de *crossover* faz rupturas no código genético, quanto maior esta ruptura menor será a semelhança entre pais e filhos, dificultando a convergência. A taxa de *crossover* define-se como a medida da possibilidade de aplicação dos operadores de cruzamento a um dado par de indivíduos. Quanto maior for a taxa de *crossover*, maior é a quantidade de indivíduos introduzidos na nova população de cruzamento [35].

Este operador pode ser implementado de três maneiras: cruzamento de um ponto, cruzamento de 2 ou mais pontos e cruzamento uniforme.

- **Crossover de um ponto:** É o operador mais comumente utilizado, pois o ponto de quebra na cadeia de bits do cromossomo é escolhido de forma aleatória. São escolhidos dois pais e a partir destes serão gerados dois filhos. Após o corte aleatório é realizado a troca de material cromossômica que gerará os novos indivíduos, no caso os filhos.
- **Crossover de dois ou mais pontos:** É bastante similar ao *crossover* de um ponto, porém o corte será feito em duas ou mais partes da cadeia de bits dos cromossomos pais. Os dois pontos de cortes são escolhidos aleatoriamente e o material genético será invertido entre eles na posição de ruptura. O *crossover* de dois ou mais pontos mantém juntos os genes que são codificados próximos uns dos outros.

- **Crossover uniforme:** é bastante diferente do *crossover* de um ou mais pontos, pois os genes dos filhos serão criados a partir de uma cópia do gene correspondente de um dos pais, escolhidos por uma função que será gerada aleatoriamente. Se houver na máscara de cruzamento valor 1, o gene copiado será do primeiro pai, se houver valor 0 será do segundo pai.

3.1.3.3 Mutação

A mutação pode ser tratada como o operador responsável pela introdução e manutenção da diversidade genética da população, alterando um ou mais componentes de uma estrutura escolhida fornecendo meios para introdução de novos elementos da população [34]. Além disso, esse operador genético é capaz de trazer de volta para a população os genes perdidos, durante o processo de seleção de modo que possam ser avaliados em um novo contexto pelo algoritmo.

A mutação trabalha alterando um ou mais componentes de uma estrutura escolhida, assegurando que a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do estado de busca nunca seja zero, além de contornar os mínimos globais prevenindo que uma dada posição fique estagnada em um valor.

O operador de mutação funciona invertendo o valor de um bit. Uma baixa taxa de mutação vai determinar a probabilidade em que uma mutação ocorrerá, além de possibilitar que se chegue em qualquer ponto de espaço de busca. A mutação pode ser feita de forma aleatória, onde o valor do gene que sofreu a mutação é substituído por um valor aleatório ou por incremento.

3.1.4 Critério de Parada

O critério de parada de um algoritmo genético é verificado através de um teste, e se a condição de parada for satisfatória é finalizada a execução do algoritmo. Caso não atinja o critério de parada estabelecido, a população retorna às fases do algoritmo para que se ache a melhor solução [35].

O critério de parada pode ser quando o AG atingir um dado número de gerações ou quando a função objetivo chegar a um determinado valor definido previamente. Outro critério poderá ser a convergência, ou seja, quando não ocorrer melhoramento

significativo no cromossomo de maior aptidão por um dado número de gerações, o processamento pára [34].

3.2 Lógica *Fuzzy*

A Teoria de Conjuntos *Fuzzy* e os Conceitos de Lógica *Fuzzy* podem ser utilizados para traduzir em termos matemáticos a informação imprecisa expressa por um conjunto de regras linguísticas. Se um operador humano for capaz de articular sua estratégia de ação como um conjunto de regras da forma *se ... então*, um algoritmo passível de ser implementado em computador pode ser construído. O resultado é um sistema de inferência baseado em regras, no qual a Teoria de Conjuntos *Fuzzy* e Lógica *Fuzzy* fornecem o ferramental matemático para se lidar com as tais regras linguísticas [36].

As primeiras aplicações situaram-se na área de Controle, mas, desde então, tem-se verificado uma utilização crescente de sistemas *fuzzy* em outros campos, como, por exemplo, classificação, previsão de séries, mineração de dados, planejamento e otimização [37]. O uso conjunto da lógica *fuzzy* tem propiciado a construção de sistemas híbridos, cuja capacidade de aprendizado tem ampliado o campo de aplicações.

A Teoria de Conjuntos *Fuzzy* foi concebida por [38] com o objetivo de fornecer um ferramental matemático para o tratamento de informações de caráter impreciso ou vago. A lógica *fuzzy*, baseada nessa teoria, foi inicialmente construída a partir dos conceitos já estabelecidos de lógica clássica; operadores foram definidos à semelhança dos tradicionalmente utilizados e outros foram introduzidos ao longo do tempo, muitas vezes por necessidades de caráter eminentemente prático.

3.1.2 Conjunto *Fuzzy*

Na teoria clássica dos conjuntos, o conceito de pertinência de um elemento a um conjunto fica bem definido. Dado um conjunto A em um universo X , os elementos deste universo simplesmente pertencem ou não pertencem àquele conjunto. Isto pode ser expresso pela função característica na equação (3.1):

$$f_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } x \in A \\ 0 & \text{se e somente se } x \notin A \end{cases} \quad (3.1)$$

[38] propôs uma caracterização mais ampla, generalizando a função característica de modo que ela pudesse assumir um número infinito de valores no intervalo $[0,1]$. Um conjunto *fuzzy* A em um universo X é definido por uma função de pertinência $\mu_A(x) : X \rightarrow [0,1]$, e representado por um conjunto de pares ordenados na equação (3.2)

$$A = \{\mu_A(x)/x\} \quad x \in X \quad (3.2)$$

onde $\mu_A(x)$ indica o quanto x é compatível com o conjunto A . Um determinado elemento pode pertencer a mais de um conjunto *fuzzy*, com diferentes graus de pertinência.

O conjunto suporte de um conjunto *fuzzy* A é o conjunto de elementos no universo X para os quais $\mu_A(x) > 0$. Um conjunto *fuzzy* cujo suporte é um único ponto x' com $\mu_A(x') = 1$ é chamado de conjunto unitário *fuzzy* ou *singleton*. Assim, um conjunto *fuzzy* também pode ser visto como o mapeamento do conjunto suporte no intervalo $[0,1]$, o que implica em expressar o conjunto *fuzzy* por sua função de pertinência.

Conjuntos *fuzzy* podem ser definidos em universos contínuos ou discretos. Se o universo X for discreto e finito, o conjunto *fuzzy* A é normalmente representado:

- Por um vetor contendo os graus de pertinência no conjunto A dos elementos correspondentes de X ;
- Por meio da seguinte notação (que não deve ser confundida com a soma algébrica):

$$\sum_{i=1}^n \mu_A(x)/x \quad (3.3)$$

Se o universo X for contínuo, emprega-se muitas vezes a seguinte notação (onde o símbolo de integral deve ser interpretado da mesma forma que o da soma no caso de um universo discreto):

$$\int_x \mu_A(x)/x \quad (3.4)$$

3.2.2 Variáveis Linguísticas

Uma variável linguística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos *fuzzy*. Por exemplo, a *temperatura* de um determinado processo pode ser uma variável linguística assumindo valores *baixa*, *média*, e *alta*. Estes valores são descritos por intermédio de conjuntos *fuzzy*, representados por funções de pertinência, conforme mostrado na Figura 10 a seguir:

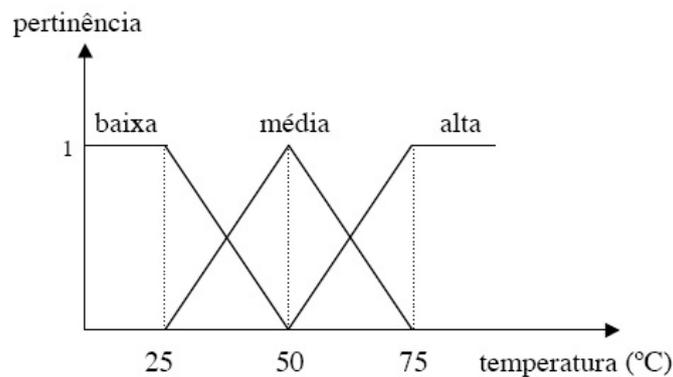


Figura 10 - Funções de pertinência para a variável temperatura

Generalizando, os valores de uma variável linguística podem ser sentenças em uma linguagem especificada, construídas a partir de termos primários (alto, baixo, pequeno, médio, grande, zero, por exemplo), de conectivos lógicos (negação não, conectivos e e ou), de modificadores (muito, pouco, levemente, extremamente) e de delimitadores (como parênteses).

A principal função das variáveis linguísticas é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Em essência, a utilização do tipo de descrição linguística empregada por seres humanos, e

não de variáveis quantificadas, permite o tratamento de sistemas que são muito complexos para serem analisados através de termos matemáticos convencionais.

3.2.3 Funções de Pertinência

As funções de pertinência podem ter diferentes formas, dependendo do conceito que se deseja representar e do contexto em que serão utilizadas. O contexto é relevante na definição de funções de pertinência e de sua distribuição ao longo de um dado universo.

Funções de pertinência podem ser definidas a partir da experiência e da perspectiva do usuário, mas é comum fazer-se uso de funções de pertinência padrão, como, por exemplo, as de forma triangular, trapezoidal e Gaussiana (Figura 11) [36]. Em aplicações práticas as formas escolhidas inicialmente podem sofrer ajustes em função dos resultados observados.

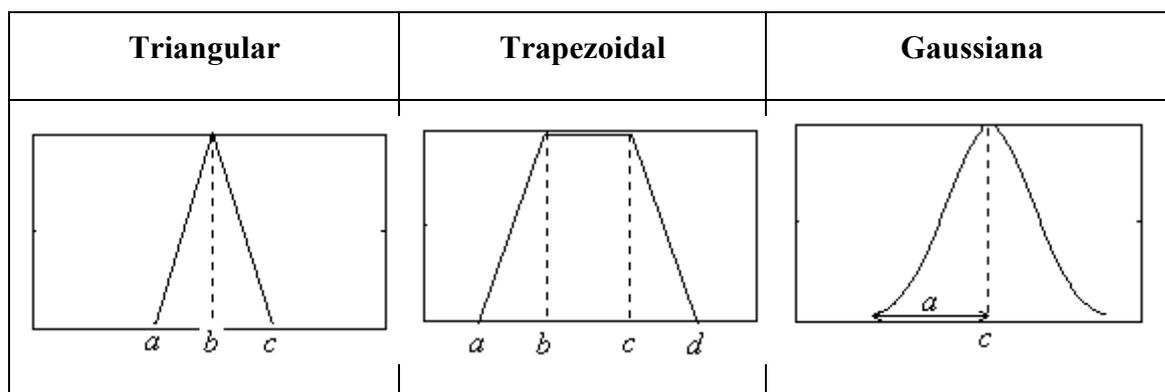


Figura 11 - Funções de Pertinência

Funções de pertinência contínuas podem ser definidas por intermédio de funções analíticas. Por exemplo, a seguinte função geral pode ser usada para definir as funções de pertinência associadas aos conjuntos *fuzzy* correspondentes aos termos *pequeno*, *médio* e *grande*:

$$\mu_A(x) = (1 + (a(x - c))b) - 1 \quad (3.5)$$

Funções de pertinência contínuas podem ser definidas por intermédio de funções analíticas. Por exemplo, a seguinte função geral pode ser usada para definir as funções de pertinência associadas aos conjuntos *fuzzy* correspondentes aos termos *pequeno*, *médio* e *grande*:

$$\mu_A(x) = (1 + (a(x - c))^b)^{-1} \quad (3.6)$$

A forma de $\mu_A(x)$ pode ser modificada através da manipulação dos três parâmetros a , b e c . Por exemplo:

$$\mu_{\text{pequeno}}(x) = (1 + 9x^2)^{-1} \quad (3.7)$$

$$\mu_{\text{médio}}(x) = (1 + 9(x - 0,5)^2)^{-1} \quad (3.8)$$

$$\mu_{\text{grande}}(x) = (1 + 9(x - 2)^2)^{-1} \quad (3.9)$$

Funções de pertinência descontínuas são compostas de segmentos contínuos lineares, resultando em formas triangulares ou trapezoidais. Funções de pertinência discretizadas consistem de conjuntos de valores discretos correspondendo a elementos discretos do universo.

3.2.4 Sistemas *Fuzzy*

Sistemas *fuzzy* são sistemas baseados em regras ou em conhecimento. A base consiste das chamadas regras *fuzzy Se-então*. A regra *fuzzy Se-então* é uma declaração na qual algumas palavras são representadas por uma função de pertinência.

Na arquitetura padrão de um Sistema *Fuzzy* apresentada na Figura 12 é possível observar os componentes que fazem parte deste sistema. A seguir é apresentado uma breve descrição sobre cada um dos componentes da arquitetura padrão de um sistema *fuzzy* [36].

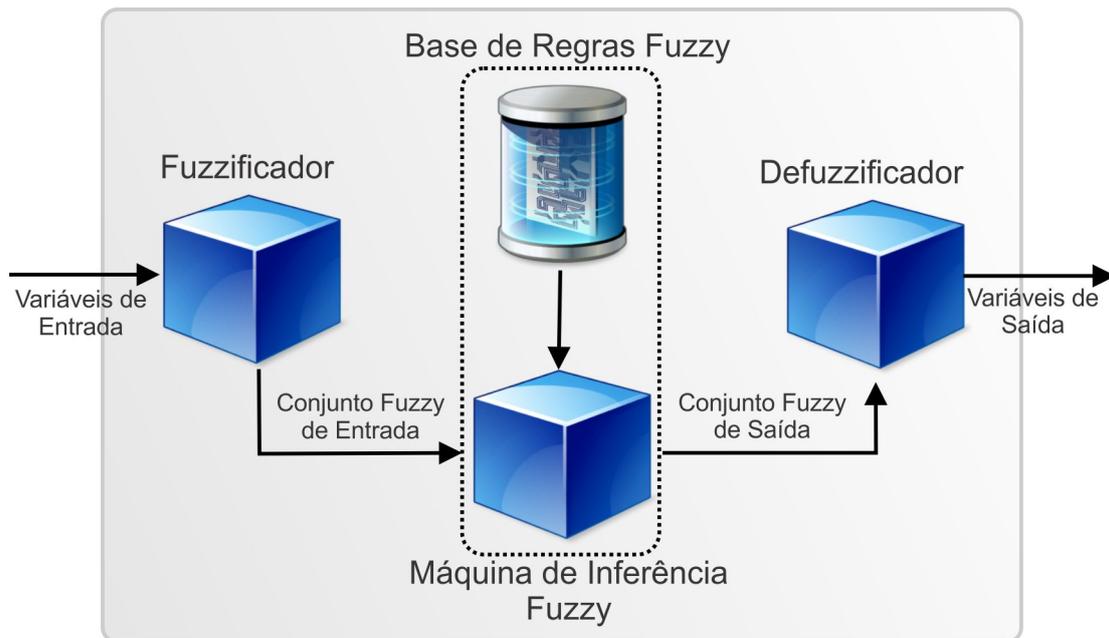


Figura 12 - Sistema de Inferência *Fuzzy*

No Fuzzificador: nesta etapa estão contidas as funções de pertinência das variáveis lingüísticas de entrada. É recebido um valor do universo de discurso e retornado os graus de pertinência aos respectivos conjuntos *fuzzy*. O tipo e a quantidade de funções de pertinência utilizados em um sistema dependem de alguns fatores tais como: precisão, estabilidade, facilidade de desenvolvimento, etc. Para colaborar com a construção das funções de pertinências para a descrição de uma determinada entrada é importante a atuação de um especialista na área do que poderá ser modelado.

Na máquina de inferência as regras são definidas e depois são examinadas paralelamente, é na máquina de inferência que são realizadas as operações com conjuntos *fuzzy* propriamente ditas. Para realizar estas operações existem métodos de inferência *fuzzy*, os dois mais importantes tipos de métodos de inferência *fuzzy* são o Método de Mandani [39] e o Método Takagi-Sugeno-Kang [40].

A base de regras *fuzzy* é composta por um conjunto de condições *Se* (usando conectivos “e”, “ou” ou “não”), uma conclusão *Então*, uma conclusão opcional *Senão* (regras condicionais básicas). Estas regras são aplicadas nas variáveis por intermédio de um processo denominado propagação. As regras podem ser fornecidas por especialistas, em forma de sentenças lingüísticas, e se constituem em um aspecto fundamental no desempenho de um sistema de inferência *fuzzy*.

O operador “ou” representa uma operação de união de dois conjuntos *fuzzy*, que pode ser representada pela função proposta por [38]: $\mu_{A \cup B} = \max [\mu_A(x_i), \mu_B(x_i)]$. Da mesma forma o operador “e” representa a interseção entre dois conjuntos *fuzzy*, que pode ser representada pela função proposta por [38]: $\mu_{A \cap B} = \min [\mu_A(x_i), \mu_B(x_i)]$.

O defuzzificador é o processo utilizado para converter o conjunto *fuzzy* de saída em um valor de saída do sistema. No processo de defuzzificação estão contidas as funções de pertinências das variáveis lingüísticas de saída. No defuzzificador é que acontece a etapa de relação funcional entre as regiões *fuzzy* e o valor esperado. Existem vários métodos de defuzzificação, dentre os mais conhecidos destacam-se: centróide, Média dos máximos, Critério Máximo, Método da altura, Barras verticais, etc.

Quanto aos métodos de inferência destacados, cada método tem suas vantagens. O método de Mamdani é considerado mais simples e intuitivo, sendo facilmente compreendido por um especialista humano. Os modelos lingüísticos *fuzzy* avançaram bastante e tem sido usados em larga escala para solucionar problemas em diversas áreas.

4 – Trabalhos Relacionados

Neste capítulo é apresentado inicialmente na seção 4.1 os principais problemas que este trabalho busca solucionar. Na seção 4.2 apresenta os principais trabalhos encontrados na literatura relacionados à proposta desta dissertação e na seção 4.3 é feita a conclusão do Capítulo 4.

4.1 Problemas em RSSF

Os nós sensores que compõem uma RSSF possuem capacidades limitadas de processamento, armazenamento, comunicação (largura de banda) e fonte de energia, além de possuírem características e requisitos básicos de uma RSSF como: necessidade de se auto-organizar, comunicação com difusão de curto alcance e roteamento com múltiplos saltos (*multihop*), esforço cooperativo de nós sensores, mudança freqüente de topologia devido à perda de energia e falha nos nós, limitação da energia, potência de transmissão, memória e poder computacional [29].

As RSSF possuem problemas provenientes das redes sem fio em geral. Estação exposta e estação escondida são apenas alguns dos problemas enfrentados por este tipo de rede e que influenciam bastante nos principais fatores de estudos, o consumo de energia e cobertura. O problema de consumo de energia é o maior problema enfrentado pelas redes de sensores sem fio [41]. O motivo de caracterizar a fonte de energia como um dos principais problemas origina da necessidade de monitorar ambientes de difícil acesso, que impossibilitam a substituição da fonte de energia, que ocasiona na necessidade de aumentar o tempo de vida da rede.

As RSSFs formam um novo paradigma, onde o ser humano passa a poder monitorar ambientes que uma rede de sensores cabeada não seria viável, além de ambientes hostis, para a presença de seres humanos [41]. Em [22] as RSSFs são definidas como o mecanismo que faltava para a interação do mundo virtual com o mundo físico.

Considerando a principal característica – necessidade de uso racional das fontes de energia, há a necessidade de desenvolver ferramentas que otimizem o posicionamento dos nós e protocolos de roteamento para que ambos contribuam na diminuição do consumo de energia, e assim, prolongar o tempo de vida da rede.

O monitoramento do desmatamento de grandes áreas florestais, por exemplo, requer esforços para detectar quando são usadas determinados tipos de máquinas para derrubada da floresta. Mas para isto não basta usar somente sensores adequados, mas também utilizar técnicas adequadas para que a tecnologia possa se adequar ao meio em que está inserida.

4.2 Propostas Relacionados à RSSF

Com o surgimento das redes de sensores sem fio, as suas características particulares e com suas aplicações em diversos ambientes, diversos trabalhos têm sido publicados contendo as mais diversas propostas para melhorar o desempenho deste tipo de rede.

Em [42] é apresentado uma metodologia de otimização multi-objetivo com AG para a auto-organização, projeto de rede de sensores sem fio adaptável e gerenciamento de energia, levando em consideração as necessidades específicas da aplicação, restrições de comunicação e as características de conservação de energia. Uma aplicação de agricultura de precisão de redes de sensores foi usada como um exemplo. Os autores utilizaram AG como ferramenta de otimização do sistema desenvolvido e uma função de aptidão adequada foi desenvolvida para incorporar muitos aspectos do desempenho da rede. As características de projeto otimizado do sistema de algoritmo genético inclui o status dos sensores (se é ativo ou inativo), rede de *cluster* com a escolha de *clusterheads* adequadas e escolha entre dois alcances de sinal para os nós sensores simples. Também é apresentado modelos de uma rede de sensores ótima construída pelo sistema de algoritmo genético afim de satisfazer todas as exigências de aplicações específicas, atender as restrições de conectividade existentes e incorporar características de conservação de energia

Foi utilizada uma RSSFs com diferentes modos de operação em uma implantação da rede e o AG decidiu quais nós sensores devem ser ativos, quais devem funcionar como *clusterheads* e se cada um dos restantes nós normais ativos devem ter alcance de sinal alto ou baixo. Durante a otimização, os parâmetros de conectividade de rede, conservação de energia, bem como os requisitos das aplicações foram levados em

conta para que uma RSSF ideal fosse concebida. A partir da evolução das características de rede durante o processo de otimização, pode-se notar que é preferível operar uma RSSF com um número relativamente elevado de nós sensores e conseguir um menor consumo de energia para fins de comunicação do que ter menos nós sensores ativos com um maior consumo de energia para fins de comunicação.

O algoritmo apresentou características sofisticadas na decisão dos nós sensores estarem ativos ou não, bem como a rotação de modos de funcionamento (*clusterhead* ou nó sensor normal com um alcance de sinal de alto ou baixo), o que levou à conservação de energia da bateria do nó sensor.

Em [43] foi proposto uma complexidade reduzida do algoritmo genético para otimização de redes de sensores *multi-hop*. O objetivo do sistema é gerar o número ideal de *sensor-clusters* com *clusterheads*. O algoritmo genético foi usado para criar adaptativamente vários componentes, tais como *clustermembers*, *clusterheads* e *nextcluster*. Esses componentes foram utilizados para avaliar a aptidão média do sistema com base na sequência dos links de comunicação para a base station.

Os Sensores que são colocados de forma aleatória e suas funções (sensoriamento nó, *clusterhead*, roteador ou nó inativo) são atribuídas com base nos resultados do AG. A abordagem do AG otimiza a rede para maximizar o uso da energia, juntamente com a conservação da bateria e com otimização de rotas. Pode-se demonstrar que a execução periódica de um algoritmo genético vai ajudar a conservar a energia total do sistema, com máxima operacionalidade. Os resultados apresentados mostram que ocorreu a diminuição do consumo de energia do nó sensor enquanto foi maximizada a cobertura e exposição dos nós sensores. O algoritmo também evita o excesso de otimização de um componente da aptidão individual à custa de outros componentes.

Em [44] foram propostos um modelo de otimização para a vida útil de uma RSSFs e também uma métrica de roteamento e balanceamento de energia chamado de EBRM, a escassez de roteamento baseado em métricas ETX foi resolvido com a ajuda do modelo de otimização.

Neste trabalho foi otimizada a confiabilidade e a vida útil das RSSFs. Os resultados gerados a partir de simulações no NS-2 mostraram que a métrica pode equilibrar a vida útil da rede inteira, equilibrando o consumo de energia na base da

comunicação confiável. Essa métrica é mais adequado para baixa confiabilidade e à restrição de energia aplicações de RSSFs.

[45] propõem uma extensão *fuzzy* para o protocolo *Ad-hoc On-demand Distance Vector Routing* (AODV) com considerações de energia. O caminho escolhido pelo protocolo de roteamento AODV convencional não é o caminho ideal, pois AODV seleciona o primeiro caminho que foi encontrado o que não é necessariamente o melhor. A otimização de roteamento afeta o desempenho da rede, especialmente quando a carga é elevada. O roteamento com maior número de saltos consome uma maior largura de banda, causa mais atraso e é mais propenso a desconexões. O *Fuzzy Energy-based Ad-hoc On-demand Distance Vector Routing* (FE-AODV) é uma técnica que monitora as rotas e tenta escolher a melhor rota a partir da largura de banda mínima e contagem de saltos de cada rota. O método de energia proposto pelo protocolo FE-AODV é avaliado e comparado ao método convencional usado pelo protocolo AODV. A partir da simulação, a proposta mostrou que o protocolo FE-AODV melhorou a funcionalidade e o desempenho do protocolo de roteamento AODV básico.

4.3 Conclusões e Solução Proposta

Algumas soluções propostas a fim de resolver o problema de cobertura e consumo de energia foram discutidas na seção 4.2 deste capítulo, destas soluções propostas nenhuma visa melhorar o planejamento da distribuição dos nós sensores, otimização do posicionamento dos nós em uma determina área, além de prover um roteamento que vise melhorar o consumo de energia e maximizar a agregação dos dados na rede simultaneamente.

Com isso, há necessidade de desenvolver uma ferramenta que otimize o posicionamento, os pacotes entregues e o consumo de energia dos nós através do uso de algoritmo genético (AG) e para solucionar o problema roteamento que melhore o consumo de energia e máxime a agregação de dados, é proposto, a customização do protocolo de roteamento *Ad hoc On-demand Distance Vector* (AODV) [46], afim de melhor adaptá-lo às RSSFs e, com isso, garantir uma transmissão de dados mais eficaz; garantindo o prolongamento da vida útil da RSSF.

A lógica *fuzzy* é utilizada para customizar o protocolo AODV, baseando-se nos princípios de agregação de dados ao longo da rede e envio das informações em rajadas, fazendo com que o algoritmo de roteamento da rede maximize a agregação de dados e

minimize o consumo de energia dos nós. Esta customização é intitulada AODV – *Fuzzy for Wireless Sensor Networks* (AODV-FWSN). Além do AODV-FWSN é necessário um planejamento do posicionamento dos nós sensores que irá garantir cobertura da área a ser monitorada. Para isto, foi utilizado um algoritmo genético que proporciona otimização multivariável do posicionamento dos nós da RSSF. Com estas duas técnicas, obtêm-se uma RSSF que atue de forma a garantir a transmissão do sinal e garantir maior vida útil a todos os nós sensores.

5 – Otimização em RSSF’s utilizando Algoritmos Genéticos e Lógica Fuzzy.

As propostas discutidas estão associadas a um ou mais aspectos considerados neste trabalho. Na seção 5.1 é apresentada a solução proposta, na seção 5.2 descreve o Algoritmo Genético para solução do problema de cobertura e na seção 5.3 apresenta o AODV – *Fuzzy for Wireless Sensor Networks* uma extensão proposta para o protocolo AODV. A seção 5.4 mostra os princípios de agregação de dados juntamente com os de comutação por rajada.

5.1 Solução Proposta

Neste contexto, este trabalho propõe a utilização de uma rede de sensores sem fio que poderá atuar por uma grande extensão de tempo, utilizando alimentação que não requeira manutenção e a otimização da sua área de cobertura, consumo de energia, roteamento e agregação de dados para uma entrega eficiente dos pacotes utilizando Algoritmos Genéticos e Lógica *Fuzzy*.

5.2 Algoritmo Genético Proposto

O Algoritmo Genético proposto neste trabalho atua em conjunto com o simulador *Network Simulator 2* (NS-2). A função do AG é otimizar o posicionamento dos nós sensores. O AG gera o arquivo cenário utilizado nas simulações com os dados das coordenadas dos nós.

Os resultados das simulações serão os parâmetros para que o AG evolua. Afim que seja realizada a otimização do posicionamento dos nós sensores. A otimização será em função dos pacotes entregues, da distância entre os nós e da energia dos nós, estes resultados serão obtidos após as simulações.

O tamanho da população inicial é essencial para o desempenho do AG, pois se este número for pequeno não haverá espaço para termos grande variação genética suficiente dentro da nossa população. Caso o tamanho da população seja grande demais, o AG demorará muito para encontrar a melhor solução.

5.2.1 Indivíduo

O AG utiliza codificação binária para a geração do posicionamento de cada coordenada (X, Y, Z) dos nós sensores, a definição do posicionamento é dada pela equação (5.1).

$$X_i = \frac{(X_{max} - X_{min}) \times Bin2Dec(X_{bin})}{2^{n-1}} \quad (5.1)$$

onde,

X_i : valor da coordenada X do i-ésimo nó.

X_{max} : valor máximo do eixo X.

X_{min} : valor mínimo do eixo X.

X_{bin} : representação binária do valor de coordenada no eixo X.

$Bin2Dec$: função para conversão de um número binário para decimal.

2^{n-1} : método excesso de 2 elevado a N – 1 para representação do número inteiro.

As equações para os eixos Y e Z são idênticas a equação acima, apenas alterando as variáveis que contém X para Y ou Z.

A precisão de posicionamento de cada coordenada foi considerada de no mínimo 0,5 metros. Cada indivíduo do AG é codificado em uma string binária de 7 bits, que resultará em uma precisão de 0,39 metros.

O tamanho do cromossomo é definido pela equação (5.2):

$$Tam_{crom} = 3 \times Num_{nós} \times Num_{bits} \quad (5.2)$$

onde,

$Num_{nós}$ é o número de nós total da RSSF e do indivíduo.

Num_{bits} são os números de bits para cada coordenada.

A estrutura do cromosso que o AG irá manipular pode ser melhor visualizada na Figura 13.

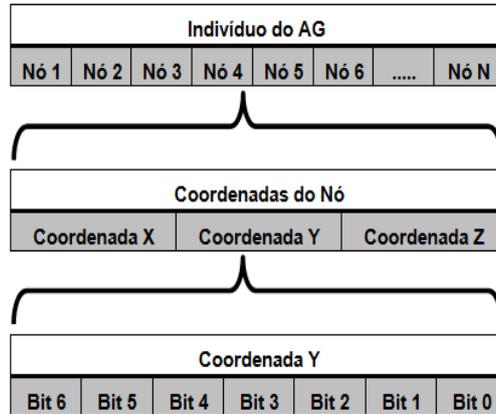


Figura 13 - Configuração do Indivíduo do AG

5.2.2 Função de Aptidão

Para este trabalho optou-se por utilizar três variáveis para o processo de otimização: pacotes entregues, distância entre os nós e energia de cada nó. A quantidade de pacotes entregues informa a confiabilidade que a rede possui no envio de pacotes entre diversas origens e o nó coordenador. Quanto maior o valor desta variável melhor será o desempenho da rede quanto à entrega de pacotes. Esta variável indica indiretamente o número de rotas possíveis, pois caso uma grande quantidade de pacotes não seja entregue o seu valor diminui.

Para determinar a distância entre todos os nós utiliza-se a equação da distância Euclidiana. A somatória da distância entre um nó i e todos os outros nós é calculada conforme as equações (5.3) e (5.4).

$$D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (5.3)$$

$$D_T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, i \neq j}^n D_{ij} \quad (5.4)$$

Para a equação (5.3) o i e j indicam o número do nó, D_{ij} representa a distância entre os nós i e j , x e y representam as coordenadas. A equação (5.4) é o somatório da distância total (D_T) entre todos os nós, ou seja, a soma da distância de um determinado nó para todos os outros nós. Considera-se que exista n nós presentes no cenário da rede de sensor sem fio. Esta variável indicará o quanto os nós estão próximos ou distantes. Caso os nós estejam muito próximos o valor de D_T será pequeno, caso contrário este valor será grande. A distância pode implicar na quantidade de pacotes entregues, pois quanto maior for D_T maior será a probabilidade de não existir rota disponível para entrega dos pacotes.

A energia de cada nó é um fator importante e bastante pesquisado por diversos trabalhos [44] e [47]. A topologia influencia fortemente este consumo de energia, principalmente em função do número de rotas disponíveis. Quanto maior este número de rotas, menor será o consumo de energia, pois outros nós poderão ser utilizados para entregar os pacotes e, conseqüentemente, ocorrerá o prolongamento da vida útil da RSSF.

As variáveis pacotes entregues (PE) e energia de cada nó (Ei) são coletadas a partir das simulações de cada cenário no NS-2, enquanto que a variável distância entre todos os nós (D_{ij}) é calculada a partir de dados do próprio cenário. Todas estas variáveis são usadas na definição da função de aptidão, conforme pode ser visto na equação (5.5):

$$f(PE, D_T, Ei) = \alpha \cdot \sum PE \cdot n + \beta \cdot D_T + \gamma \cdot Ei \quad (5.5)$$

onde $\sum PE \cdot n$ representa o somatório de todos os pacotes entregues na RSSF, n representa todos os nós da rede, D_T é a distância total entre todos os nós da rede e Ei representa a energia restante de cada nó. Obtêm-se os valores dos pacotes entregues, distância entre todos os nós e energia após realizarem-se simulações para cada cenário, os valores de α , β e γ devem ser escolhido de modo a ponderar os pacotes entregues, distância e energia de acordo com a necessidade de cada aplicação. As simulações e os valores serão discutidos mais adiante quando forem feitas as análises dos resultados.

O AG é uma meta-heurística para otimização, neste caso procurou-se obter o melhor posicionamento dos nós. Onde fosse obtido o cenário com o melhor número de pacotes entregue, melhor distribuição dos nós sensores e melhores nós com energia disponível, com o intuito de que este cenário possa monitorar ou atuar em toda área para garantir a conectividade entre todos os nós e estender o tempo de vida da RSSF.

5.2.3 Operações de *Crossover* e *Mutação*

O *crossover* utilizado será o de dois pontos, foi escolhido este *crossover* porque necessita tanto processamento o que poderia prejudicar o desempenho da RSSF, depois de selecionados dois pais dois pontos de cortes são selecionados. Cada indivíduo com n genes contem $n-1$ possíveis pontos de corte, e este ponto de corte é o ponto de separação. A mutação utilizada consiste em substituir, com certa probabilidade (taxa de mutação), o valor de um bit. A troca do *bit* acontece no teste de probabilidade e permite decidir, se o i -ésimo *bit* vale 1 e passa o teste de probabilidade, o novo valor conterà zero na i -ésima posição [34].

5.3 AODV-FWSN: AODV – *Fuzzy for Wireless Sensor Networks*

A extensão proposta para o protocolo AODV tem como objetivo prover um roteamento que maximize a agregação dos dados da rede e que prolongue a vida da mesma. Para isso, o protocolo proposto se baseia em três características principais:

- Sistema *Fuzzy*: gera-se um custo *fuzzy* para cada nó, onde este é utilizado como métrica para roteamento;
- Princípio de Comutação em Rajadas: cada nó envia periodicamente uma rajada com os dados para o coordenador;
- Agregação dos Dados: os dados oriundos de outros sensores são incorporados à rajada do sensor atual.

Determina-se o *fuzzy cost* (FC), para cada nó, baseado nos valores de energia e grau do nó. Sendo que este grau é o número de vizinhos diretos que o nó tem.

As informações de energia e grau do nó são incorporadas às mensagens REPLY do protocolo AODV [46]; sendo assim, o nó que requisitou a rota, recebe os FCs dos

caminhos até o nó destino. Para isso, cada nó que retransmite uma mensagem REPLY soma ao FC contido na mensagem, o seu próprio FC.

A partir desse FC será possível escolher rotas em que a chance de agregação dos dados seja maior, visto que serão escolhidos os nós com grande adjacência, e que este nó não seja mais utilizado quando a sua energia se tornar crítica.

Com isso aumenta-se a vida da rede como um todo, fazendo com que o número de transmissões dos nós diminua e, conseqüentemente, a energia dos sensores se prolongue. A seguir será mostrado o sistema *fuzzy* desenvolvido e posteriormente o esquema de agregação de dados proposto.

5.3.1 Sistema *Fuzzy* Desenvolvido

A idéia de conjuntos *fuzzy* é uma extensão do conceito tradicional de conjuntos (*crisp*), onde um elemento pertence totalmente ou não a certo conjunto. Os conjuntos *fuzzy*, ao contrário, são definidos a partir de funções de pertinência cujo alcance é limitado a um intervalo entre 0 e 1. Ou seja, um valor entre 0 e 1 expressa o grau de pertinência de um elemento do conjunto *fuzzy* baseado nas inferências utilizadas. Normalmente, o grau de pertinência de um valor “x” em relação a uma função é representado por $\mu(x)$ [37] [38].

A seguir são mostradas as características do sistema *fuzzy* utilizado na proposta deste trabalho: funções de pertinência, o modelo de inferência, conjunto de regras e estratégia de defuzzificação considerados para a implementação da proposta.

5.3.2 Fuzzificação

O processo de fuzzificação tem como entrada os valores de energia e grau do nó, sendo assim, são utilizadas duas funções de pertinência, as quais servem de entrada para o sistema *fuzzy*. O sistema *fuzzy* proposto utilizou dois tipos de funções de pertinência trapezoidais (para as funções de energia e grau do nó) e triangulares (para a função *fuzzy cost*).

Uma função triangular possui três parâmetros: a, b e m. Sendo “a” o primeiro e “b” o último ponto onde $\mu(x)$ é zero e “m” o ponto onde $\mu(x)$ possui valor 1. O grau de pertinência de uma função triangular é dado por [37]:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ (x - a)/(m - a) & \text{se } x \in [a, m] \\ (b - x)/(b - m) & \text{se } x \in [m, b] \\ 0 & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (5.6)$$

A função trapezoidal tem 4 parâmetros: a, b, m1 e m2. Sendo “a” o primeiro e “b” o último ponto onde $\mu(x)$ é zero, os parâmetros “m1” e “m2” representam o intervalo de pontos onde $\mu(x)$ possui valor 1. O grau de pertinência de uma função trapezoidal é determinado por [37]:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ (x - a)/(m - a) & \text{se } x \in [a, m1] \\ 1 & \text{se } x \in [m1, m2] \\ (b - x)/(b - m) & \text{se } x \in [m2, b] \\ 0 & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (5.7)$$

A função de pertinência utilizada para os valores de energia recebidos é mostrada na

Figura 14, possuindo três variáveis linguísticas, sendo definidas a partir de funções trapezoidais: alto, médio e baixo. Devido às restrições das RSSF quanto a processamento e principalmente a energia disponível para o seu funcionamento, devido essas restrições foi utilizado três funções com duas variáveis, pois se fosse usado uma quantidade maior de variáveis e funções o funcionamento da RSSF seria comprometido, gerando atrasos e perdas nas entregas dos pacotes e diminuir o seu tempo de vida útil.

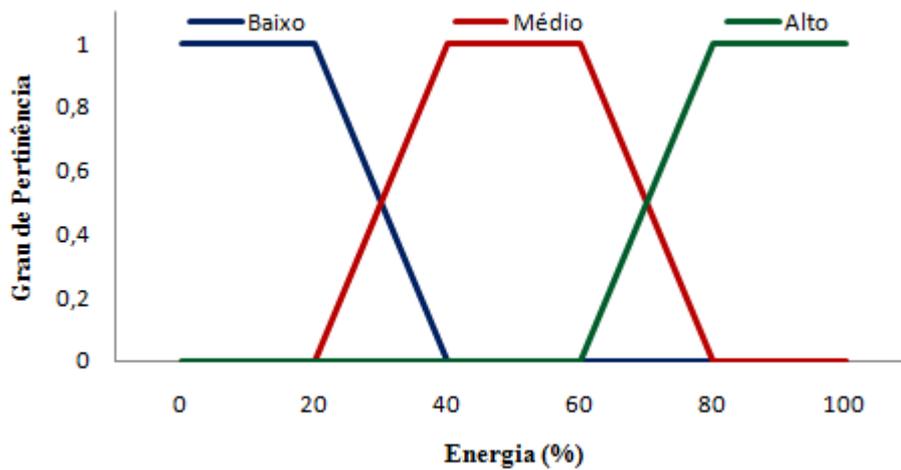


Figura 14 - Função de Energia

Os valores energia que servem como entrada para a função são expressos em porcentagem. Isto foi definido com o intuito de fazer com que a função proposta se torne genérica e mais abrangente, pois a energia inicial de cada sensor pode variar de acordo com seu modelo, o que poderia tornar o sistema proposto adequado somente para um certo modelo de sensor.

A função de pertinência utilizada para os valores de grau do nó é mostrada na Figura 15 - Função de Grau de Adjacência Figura 15, possuindo três variáveis linguísticas, sendo definidas a partir de três funções trapezoidais: alto, médio e baixo.

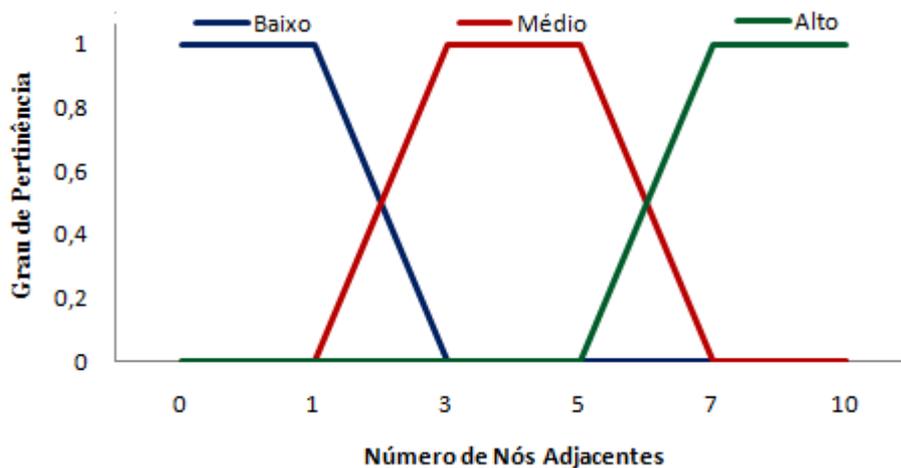


Figura 15 - Função de Grau de Adjacência

Os valores de grau do nó representam o número de nós vizinhos diretos (adjacentes) ao nó em questão. O grau de pertinência máximo para a função “Alto”

ocorre no intervalo de 7 a infinito, sendo o valor 10 usado somente para representação na função mostrada na Figura 15.

5.3.3 Sistema de Inferência

O sistema de inferência utiliza a função de pertinência de saída mostrada na Figura 16, onde são expressos os possíveis valores do FC e seus referentes graus de pertinência. O sistema de inferência utilizou o seguinte conjunto de regras, mostrado na Tabela 2, onde são expressas as possíveis variáveis linguísticas de saídas de acordo com as variáveis linguísticas de entrada vindas do processo de fuzzificação.

O sistema *fuzzy* proposto utilizou o modelo de inferência de Mamdani [48], ou seja, para todas as regras as quais o grau de pertinência, para função em questão, for maior que zero, estas irão contribuir para o cálculo de saída correspondente do sistema de inferência.

Tabela 2 - Conjunto de Regras

Regra	Energia	Operação	Grau	<i>Fuzzy Cost</i> (FC)
1	Alto	E	Alto	Alto
2	Alto	E	Médio	Médio
3	Médio	E	Alto	Alto
4	Médio	E	Médio	Médio
5	Baixo	Ou	Baixo	Baixo

Os graus de pertinência resultantes das regras vão, por sua vez, limitar os valores dos conjuntos *fuzzy* de saída gerados por estas regras de acordo com a variável em questão, ou seja, os valores resultantes das operações feitas nas regras irão caracterizar a variável linguística resultante.

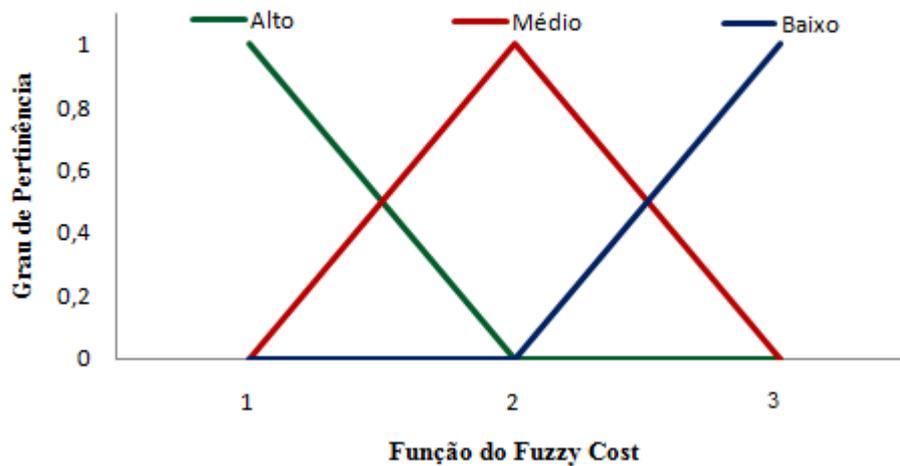


Figura 16 - Função de *Fuzzy Cost*

A máquina de inferência tem por objetivo transformar as variáveis linguísticas de entrada em outras variáveis linguísticas correspondentes a função de pertinência de saída, no caso a função FC. Estas variáveis por sua vez serão convertidas em um valor *crisp*, a partir do processo de defuzzificação.

5.3.4 Defuzzificação

No processo de defuzzificação do sistema *fuzzy* proposto utilizou-se como método de defuzzificação a Média Ponderada dos Máximos [37], pelo fato deste ser um método de baixo processamento e que atende o escopo da proposta. Este método produz um valor numérico considerando a média ponderada dos valores centrais ativados, sendo estes os pesos os graus de pertinência de cada variável linguística de saída.

A função de defuzzificação é definida por (4.7):

$$[(1 * \mu_A(x)) + (2 * \mu_M(x)) + (4 * \mu_B(x))] / (\mu_A(x) + \mu_M(x) + \mu_B(x)) \quad (4.8)$$

Onde $\mu_A(x)$ é o grau de pertinência referente à variável Alto, $\mu_M(x)$ é o grau de pertinência referente à variável Médio e $\mu_B(x)$ é o grau de pertinência referente à

variável Baixo. Os valores 1, 2 e 4 são os valores máximos das variáveis Alto, médio e Baixo, respectivamente (Figura 16).

5.4 Princípio de Comutação em Rajadas e Agregação de Dados

A extensão proposta tem como objetivo limitar o número de pacotes enviados pela rede, para isso então implementou-se um esquema de rajadas, ou seja, periodicamente o sensor envia, caso possua dados a serem enviados, uma rajada. Essa rajada é enviada em duas situações:

- Tempo de ajuste: quando o tempo de ajuste da rajada expira, esta é enviada, caso não esteja vazia. Na extensão proposta, o tempo de ajuste definido foi de um segundo, ou seja, a cada um segundo a rajada é enviada;
- Tamanho Máximo: quando a rajada atinge o tamanho máximo estipulado, esta é enviada antes do período definido, e o tempo de ajuste é reiniciado. Na extensão proposta, o tamanho máximo utilizado foi de 500 bytes, ou seja, quando o tamanho total da rajada é maior do que 500 bytes, esta é enviada.

O esquema descrito foi utilizado, pois como em uma rede de sensores todo o tráfego se direciona ao nó coordenador, as rajadas são sempre endereçadas ao mesmo. Sendo assim, os tráfegos podem ser fundidos na rede sem problemas.

A definição de um tamanho máximo para as rajadas tem como objetivo evitar que as rajadas fiquem com tamanho excessivo, proporcionando assim uma maior perda destas. Sendo este um problema crítico, pois quando a rajada é perdida, pode-se perder os dados de vários pacotes que foram incorporados às rajadas [22].

6 - Resultados

Este capítulo tem o objetivo de avaliar o funcionamento da solução proposta para a otimização da cobertura, o consumo de energia e a agregação de dados de uma RSSF, além de apresentar o comportamento do protocolo proposto AODV-FWSN, comparado com o do protocolo AODV original. A comparação se dá a partir de simulações.

6.1 Cenários Adotados

O primeiro cenário adotado constituiu em uma área plana e quadrada de 50 metros de lado, com uma RSSF composta por 10 nós e com a posição do nó coordenador (Nó 0) fixado no ponto $(x,y) = (25,25)$. O segundo cenário utilizado constituiu-se em uma área plana quadrada de lado igual a 300 metros, tendo uma RSSF com 30 nós, onde o coordenador (Nó 0) será fixado no ponto $(x,y) = (150,150)$.

A Tabela 3 contém os parâmetros utilizados na simulação. Os Cenários foram simulados com o módulo WPAN_ZBR para o *Network Simulator 2.33* (NS-2) desenvolvido no *Joint Lab of Samsung and the City University of New York* por Jianliang Zheng e Myung J. Lee [49].

Tabela 3 - Parâmetros de Simulação

Parâmetro	Valor
Número de nós Sensores	10 e 30
Topologia	Malha
Tamanho dos Pacotes	70 bytes
Energia para Transmissão	0,3 watts
Energia par recepção	0,2 watts
Energia Inicial do Nós	20 watts
Energia no Modo Sleep	0,000000144 Watts
Energia no Modo Idle	0,00072 Watts
Protocolo de Roteamento	AODV e AODV-FWSN

No primeiro cenário foram gerados cinco tráfegos Poisson nos nós sensores 2, 4, 6, 8 e 10 em direção ao nó coordenador (nó 0). No segundo cenário foram gerados 10

tráfegos Poisson nos nós sensores 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 e 20 para o nó coordenador (nó 0). Os tráfegos são iniciados quando $t=10$ segundos (cenário 1) e $t = 22$ segundos (cenário 2), tendo duração de 460 segundos em ambos. Os fluxos Poisson utilizados possuíram pacotes de 70 bytes de tamanho e taxa de 250 kbps.

Os parâmetros definidos para configuração do AG no primeiro cenário são mostrados na Tabela 4(a) e para o segundo cenário são mostrados na Tabela 4(b).

Tabela 4 - Parâmetros do AG

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Tamanho da População	120	Tamanho da População	120
Número de Gerações	30	Número de Gerações	30
Tamanho do Cromossomo	210	Tamanho do Cromossomo	630
Probabilidade de Crossover	0.1	Probabilidade de Crossover	0.1
Probabilidade de Mutação	0.01	Probabilidade de Mutação	0.01

(a)

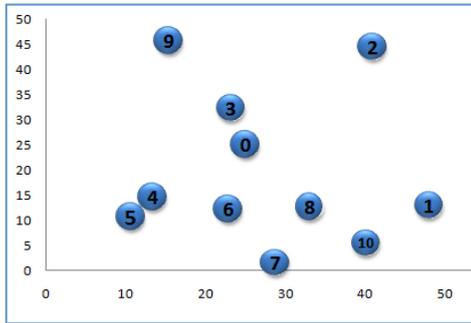
(b)

Os valores da Tabela 4 foram definidos após diversos testes e obtidos empiricamente, sendo utilizados os que geraram melhores resultados. Os valores dos pesos α , β e γ da equação 5.5 são 0.4, 0.2 e 0.4, respectivamente, os quais priorizam o número de pacotes entregues e a energia de cada nó; a primeira geração é gerada aleatoriamente.

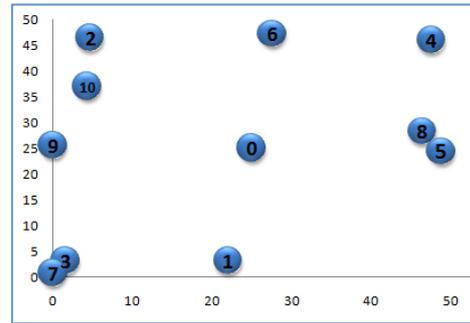
6.2 Resultados dos Cenários 1 e 2 utilizando o protocolo AODV

Os resultados do posicionamento dos nós são apresentados na Figura 17 e na Figura 18, sendo que na Figura 17 tem-se o primeiro cenário e na Figura 18 o segundo cenário. A Figura 17(a) e Figura 18(a) apresentam o posicionamento dos nós na primeira geração e observa-se que os nós não estão distribuídos e estão próximos uns dos outros, a Figura 17(b) e a Figura 18(b) mostra a evolução na décima geração havendo uma melhor distribuição dos nós pela área desejada, já na Figura 17(c) e na Figura 18(c) é possível observar o posicionamento dos nós na vigésima geração tendo nesta uma maior distribuição dos nós ao longo da área e na Figura 17(d) e na Figura 18(d) apresenta o posicionamento dos nós sensores na trigésima geração onde temos a melhor distribuição

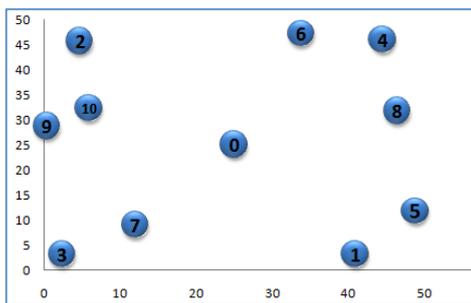
dos nós em relação às gerações anteriores. Para simulação deste primeiro cenário foi utilizado o protocolo de roteamento AODV.



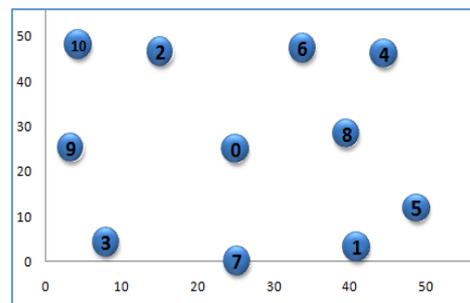
(a)



(b)

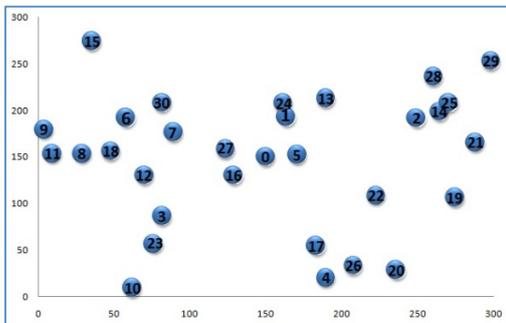


(c)

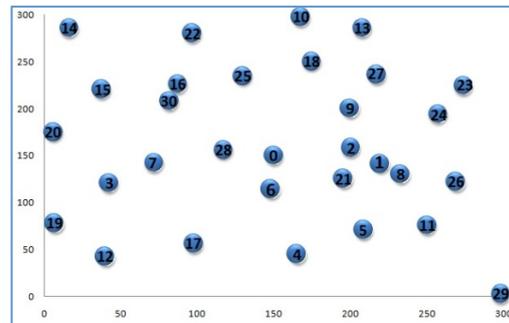


(d)

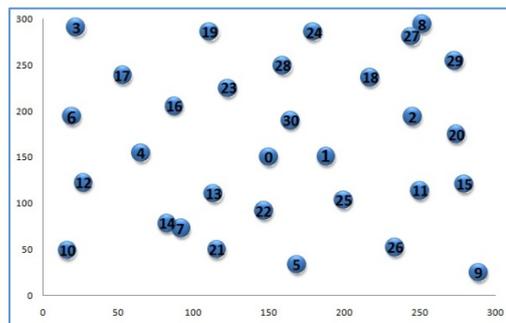
Figura 17 - Evolução dos Indivíduos no cenário 1 com o protocolo AODV



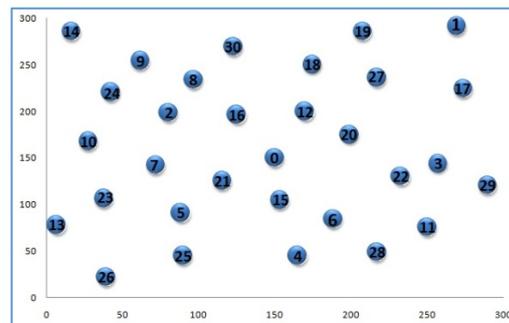
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 18 - Evolução dos Indivíduos no cenário 2 com o protocolo AODV

Como pode-se notar na Figura 17, houve uma evolução na distribuição dos nós. Na Figura 19 mostra a evolução da aptidão e o percentual de pacotes entregues de cada indivíduo para o cenário 1, nota-se que para função de aptidão do nós da RSSF houve uma evolução de mais de 20% , e para total de pacotes entregues aconteceu uma evolução de mais de 15%.

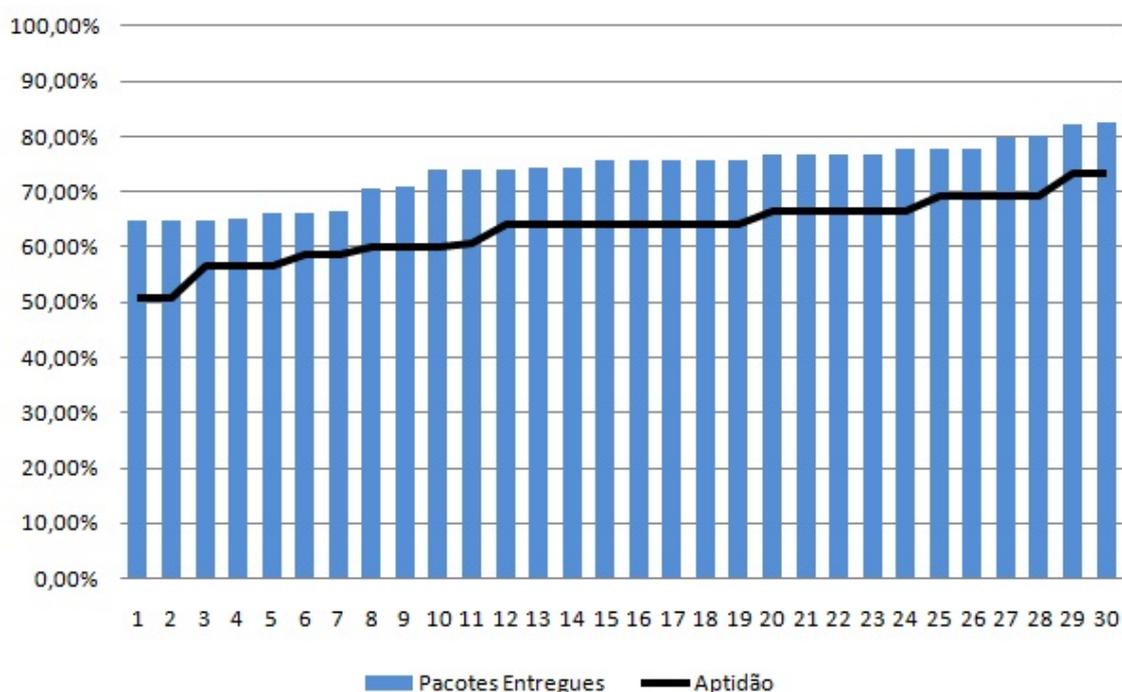


Figura 19 - Comparação entre Pacotes entregues e a função de Aptidão da RSSF no cenário 1 com o protocolo AODV

Para os indivíduos mostrados na Figura 17, o indivíduo 1 na Figura 17(a) está com o valor da função de aptidão de 50,86% e pacotes entregues de 64,75%, o indivíduo 10 na Figura 17(b) apresenta o valor de aptidão de 60,10% e de pacotes entregues de 70,76%, o indivíduo 20 na Figura 17(c) apresenta o valor de aptidão de 63,98% e de pacotes entregues 75,60% e o indivíduo 30 na Figura 17(d) apresenta o valor de aptidão de 73,24% e de pacotes entregues 82,37%. Com isso pode-se notar que houve uma evolução no posicionamento dos nós e na quantidade de pacotes que foram entregues.

A comparação dos valores de pacotes entregues e aptidão para o cenário 2 com o protocolo de roteamento AODV são apresentados na Figura 20. O indivíduo 1 na Figura 18(a) está com o valor da função de aptidão de 60,39% e pacotes entregues de 74,83%. O indivíduo 10 na Figura 18(b) apresenta o valor de aptidão de 69,65% e de pacotes entregues de 78,24%. O indivíduo 20 na Figura 18(c) apresenta o valor de aptidão de 75,57% e de pacotes entregues 81,35%. O indivíduo 30 na Figura 18(d) apresenta o valor de aptidão de 79,34% e de pacotes entregues 86,12%.

A Figura 20 apresenta para cada indivíduo a evolução da aptidão e o percentual de pacotes entregues para o cenário 2. Na função de aptidão dos nós da RSSF tiveram uma evolução de 18,85% e para o total de pacotes entregues mostra uma evolução de 11,29%.

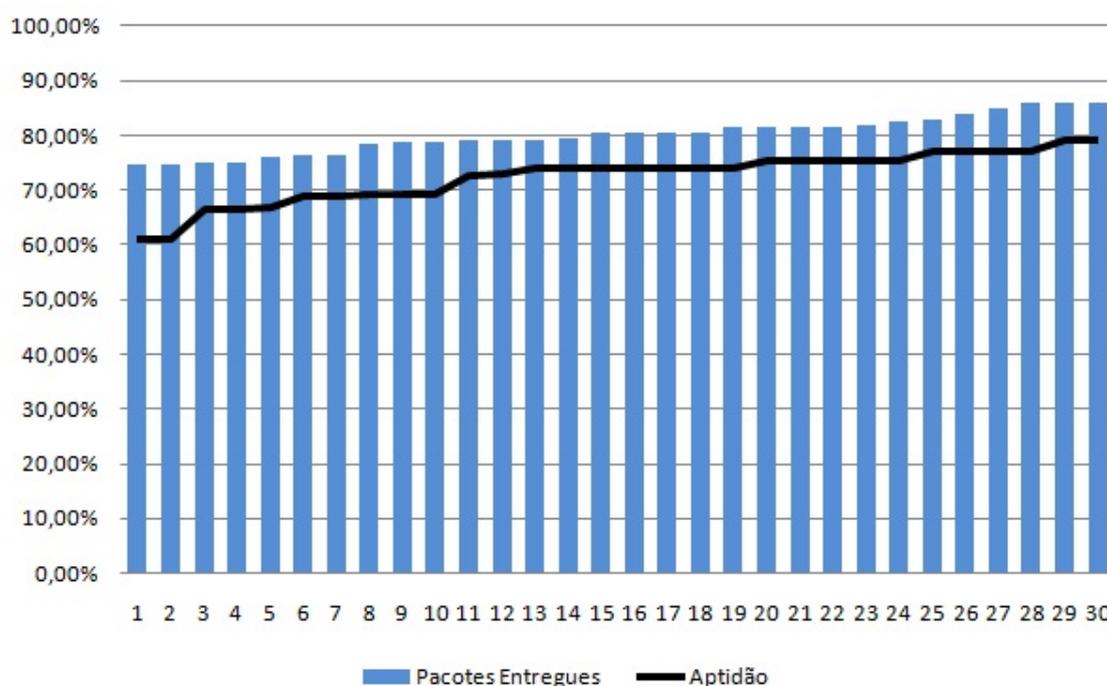


Figura 20 - Comparação entre Pacotes entregues e a função de Aptidão da RSSF no cenário 2 com o AODV

A **Error! Reference source not found.** e **Error! Reference source not found.** apresentam o consumo de energia dos nós em relação ao tempo de simulação na primeira geração do AG e na **Error! Reference source not found.** e **Error! Reference source not found.** apresenta o consumo de energia da trigésima geração do AG, em ambos cenários foi utilizado o protocolo de roteamento AODV. Comparando os gráficos é

possível notar que o AG conseguiu aumentar o tempo de vida útil da RSSF, pois nota-se que alguns nós esgotaram a sua energia na primeira geração, o que não aconteceu na trigésima e última geração.

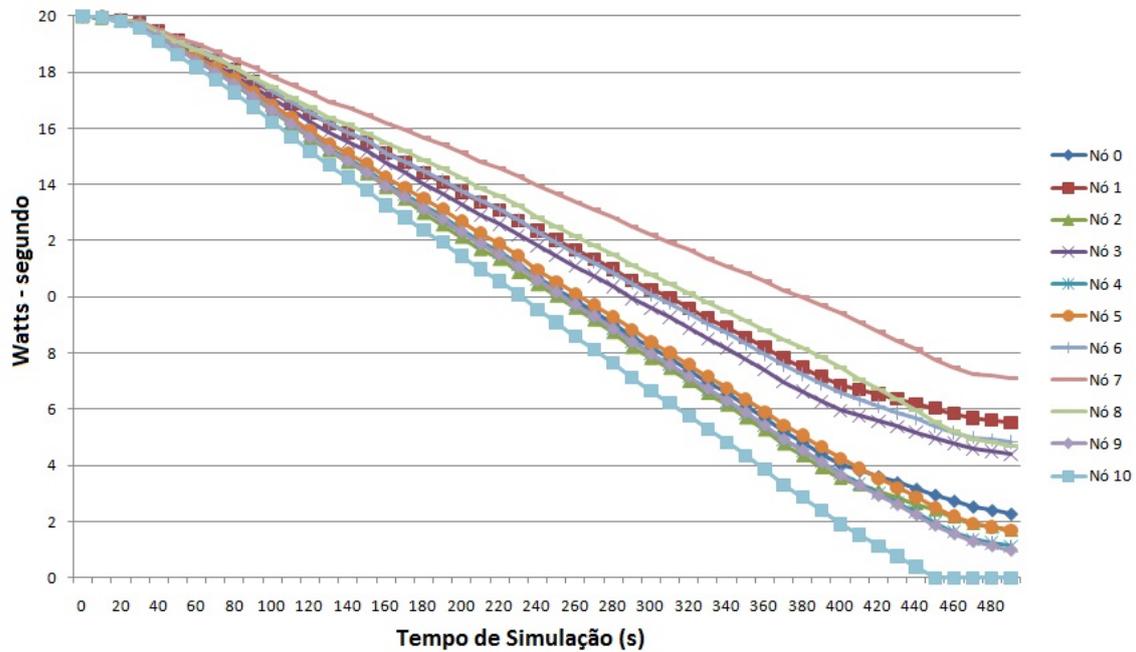


Figura 21 - Energia consumida em todos os nós na primeira geração no cenário 1

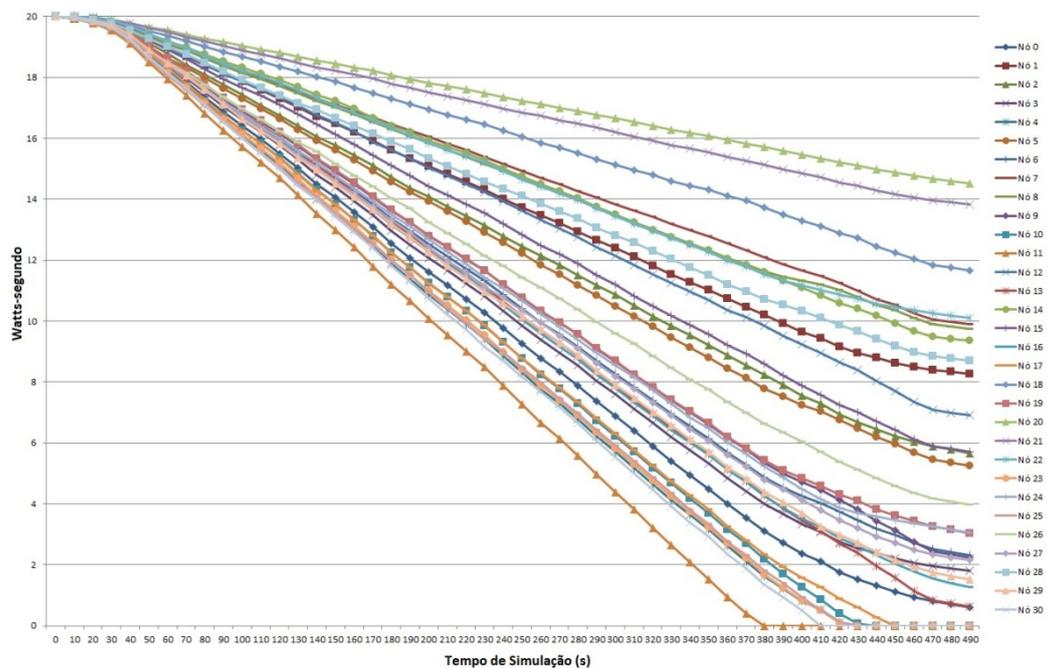


Figura 22 - Energia consumida em todos os nós na primeira geração no cenário 2

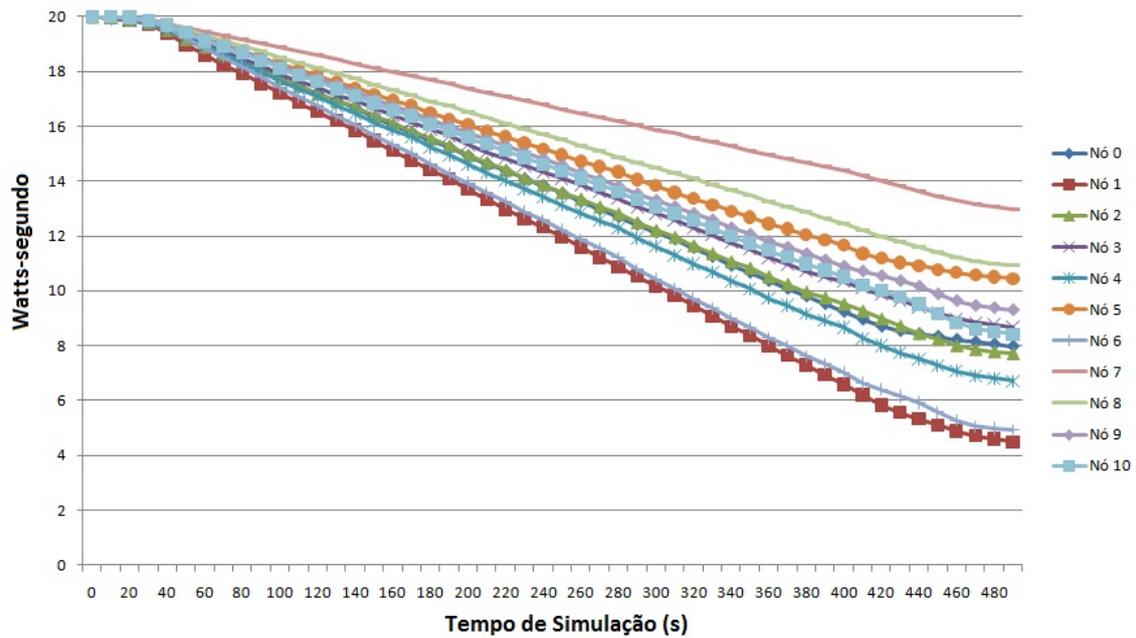


Figura 23 -Energia consumida em todos os nós na trigésima geração no cenário 1

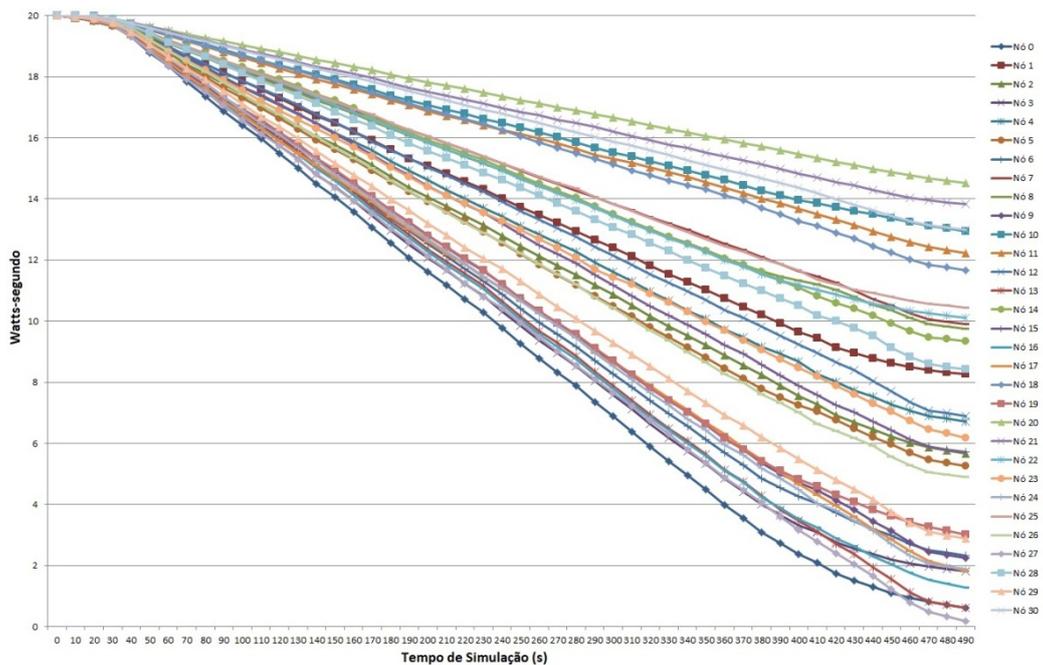


Figura 24 - Energia consumida em todos os nós na trigésima geração no cenário 2

Comparando os gráficos nas Figuras 21, 22, 23 e 24 é possível notar que o AG conseguiu aumentar o tempo de vida útil da RSSF, pois nota-se que alguns nós esgotaram a sua energia na primeira geração, o que não aconteceu na trigésima e última geração.

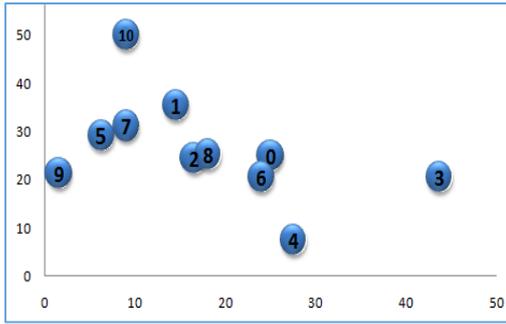
Os resultados de consumo de energia no cenário 1 apresentado na Figura 21 o nó 10 foi o primeiro a extinguir a energia, a Figura 23 apresenta o resulta após a otimização do AG com o mesmo tempo de simulação e mostra que a energia não terminou em nenhum nó.

Nos resultados de consumo de energia para o cenário 2 apresenta resultados próximos do cenário 1, onde na Figura 22 nota-se que o nó 21 foi o primeiro a ficar sem energia e logo depois outros nós tiveram sua energia extinta; após a otimização com o AG, os resultados mostram na Figura 24 que o primeiro nó fica sem energia já no final da simulação. Ou seja, com a utilização do AG percebe-se o aumento da vida útil, a melhora na entrega dos pacotes na RSSF e uma melhor distribuição dos nós sensores

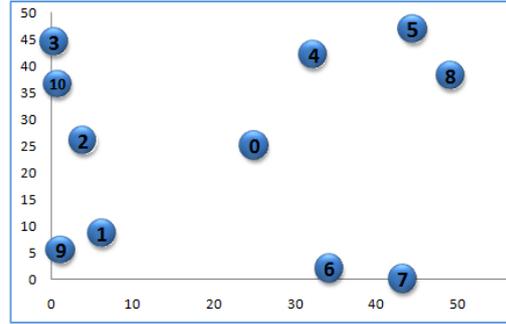
6.3 Resultados dos Cenários 1 e 2 utilizando o protocolo AODV - FWSN

Os resultados do posicionamento dos nós são apresentados na Figura 25 e na Figura 26, sendo que na Figura 25 tem-se o primeiro cenário com 10 nós sensores utilizando topologia em malha e na Figura 26 o segundo cenário com 30 nós sensores utilizando a mesma topologia.

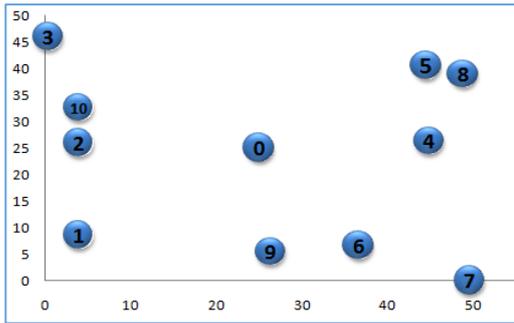
A Figura 25(a) e Figura 26(a) apresentam o posicionamento dos nós sensores na primeira geração, observa-se que os nós não estão distribuídos e estão próximos dos outros nós. Na Figura 25(b) e Figura 26(b) apresentam a evolução na décima geração havendo maior distribuição dos nós pela área desejada. Na Figura 25(c) e Figura 26(c) podemos visualizar o posicionamento dos nós na vigésima geração, tendo nesta uma melhor distribuição dos nós. Na Figura 25(d) e Figura 26(d) apresentam o posicionamento dos nós sensores na trigésima geração onde é possível observar a otimização dos nós sensores em relação às gerações anteriores.



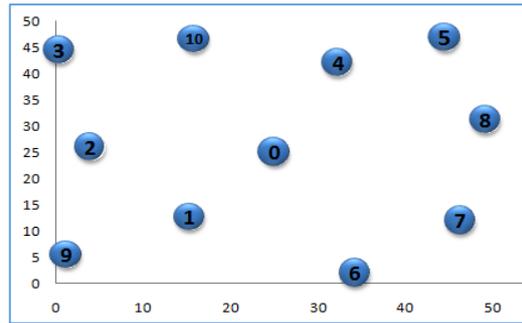
(a)



(b)

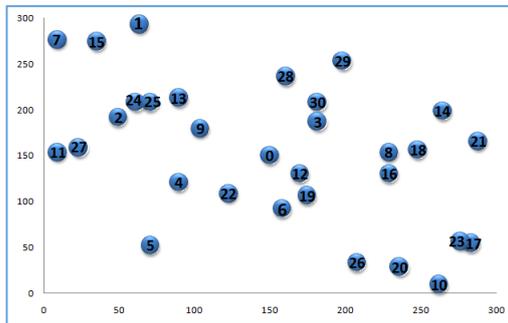


(c)

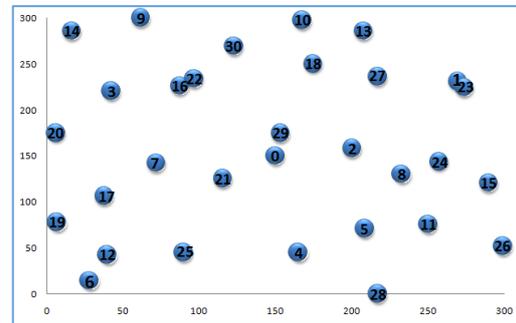


(d)

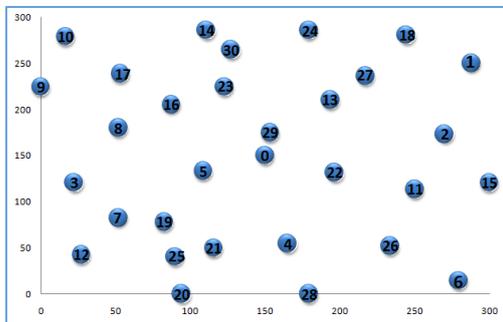
Figura 25 - Evolução dos Indivíduos na Topologia em Malha com 10 nós



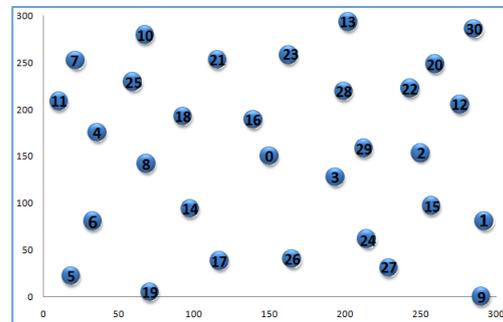
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 26 - Evolução dos Indivíduos na Topologia em Malha com 30 nós

A Figura 27 apresenta os valores de pacotes entregues e aptidão de todos os indivíduos do cenário 1. O indivíduo 1 na Figura 25(a) está com o valor da função de aptidão de 69,09% e pacotes entregues de 76,06%. O indivíduo 10 na Figura 25(b) apresenta o valor de aptidão de 77,08% e de pacotes entregues de 79,22%. O indivíduo 20 na Figura 25(c) apresenta o valor de aptidão de 79,68% e de pacotes entregues 88,91%. O indivíduo 30 na Figura 25(d) apresenta o valor de aptidão de 83,53% e de pacotes entregues 94,49%.

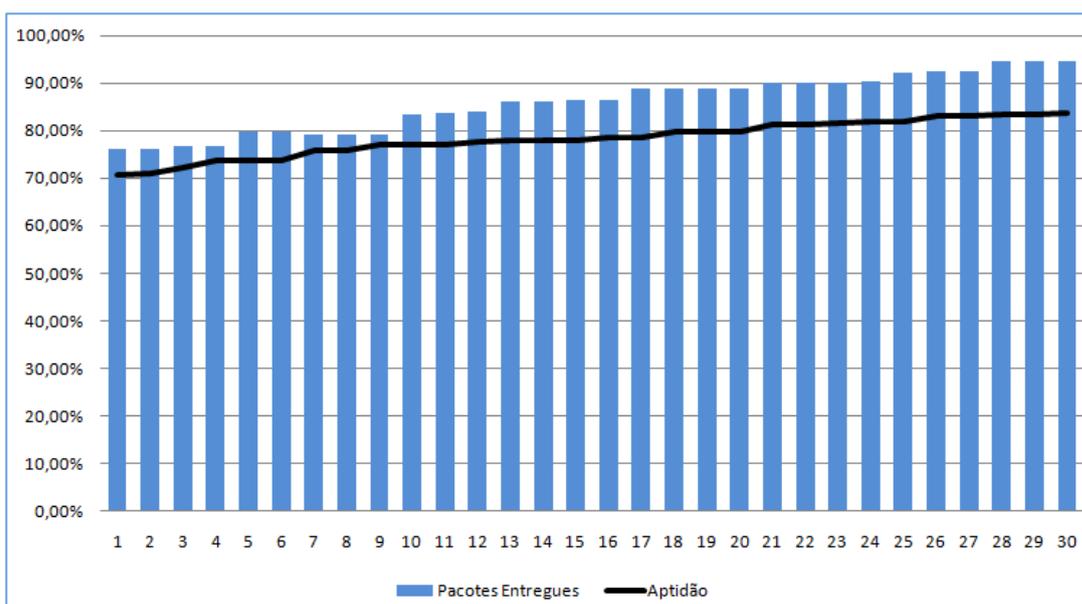


Figura 27 - Comparação entre Pacotes entregues e a função de Aptidão da RSSF na Topologia em malha com 10 nós

Na Figura 27 observa-se o gráfico com a aptidão da evolução de cada indivíduo e o percentual de pacotes entregues de cada indivíduo. Nota-se que para função de aptidão do nós sensores houve uma evolução de 15% e para total de pacotes entregues aconteceu uma evolução de quase de 20% chegando próximo dos 100% de pacotes entregues.

A comparação dos valores de pacotes entregues e aptidão para o cenário 2 são apresentados na Figura 28. O indivíduo 1 na Figura 26(a) está com o valor da função de aptidão de 76,59% e pacotes entregues de 87,29%. O indivíduo 10 na Figura 26(b) apresenta o valor de aptidão de 83,69% e de pacotes entregues de 89,74%. O indivíduo 20 na Figura 26(c) apresenta o valor de aptidão de 90% e de pacotes entregues 92,89%. O indivíduo 30 na Figura 26(d) apresenta o valor de aptidão de 94,29% e de pacotes entregues 95,87%.

A Figura 28 mostra o gráfico com a aptidão da evolução de cada indivíduo e apresenta o percentual de pacotes entregues de cada indivíduo para o cenário 2. Na função de aptidão dos nós sensores houve uma evolução de 17,7% e para o total de pacotes entregues mostra uma evolução de 8,52%, chegando próximo dos 100% de pacotes entregues.

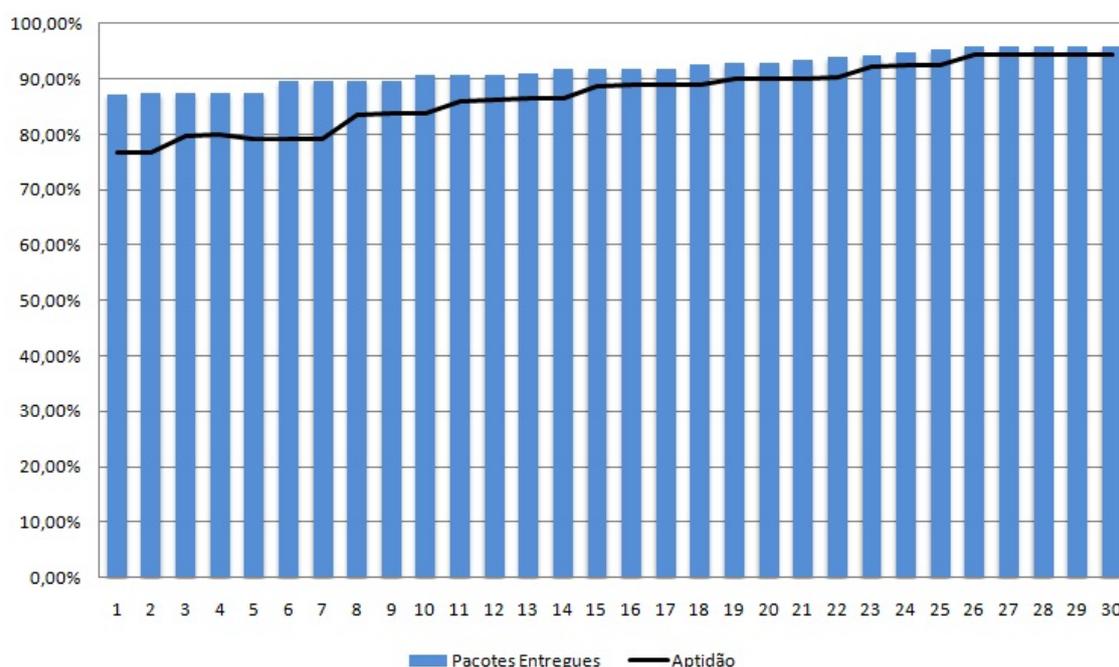


Figura 28 - Comparação entre Pacotes entregues e a função de Aptidão da RSSF na Topologia em malha com 30 nós

Para o reduzir o consumo de energia utilizou-se o custo *fuzzy*. Este custo é baseado nas informações de energia e grau de um determinado nó, estas informações foram usadas para se escolher rotas onde o nó em questão possua um bom nível de energia e que a chance de ocorrência de agregação de dados seja maior.

A Figura 29 e Figura 30 encontram-se os valores de consumo de energia referentes à utilização do protocolo AODV-FWSN para o cenário 1 e 2 respectivamente e ambas são na primeira geração do AG. A Figura 31 e Figura 32 apresentam o consumo de energia na trigésima geração.

Comparando as figuras de consumo de energia em ambos os cenários e utilizando tanto o protocolo AODV quanto o protocolo AODV-FWSN e a partir dos dados mostrados, percebe-se que o uso do protocolo AODV-FWSN consegue-se aumentar a vida útil da rede ao efetuar a agregação de dados que passam pelos sensores e realizar o roteamento baseado na energia restante dos nós junto com o grau de cada um dele, isto é baseado no custo *fuzzy* que proporciona ao protocolo a capacidade de distribuir melhor os tráfegos, entre os sensores que seriam mais adequados.

Estas características tornam o protocolo mais viável em cenários onde a utilização do roteamento com vários saltos é necessária, e é algo vital para aumentar a vida útil da RSSF, além de garantir eficiência na entrega das informações para o nó coordenador.

O cenário 1 pode haver um maior consumo de energia entre todos os nós, isso se deve porque os nós por estarem mais próximos do coordenador acabam necessitando de um critério eficiente para definição de rotas, visto que os nós envolvidos neste cenário pode alcançar o coordenador com apenas um salto, ou seja, são vizinhos diretos.

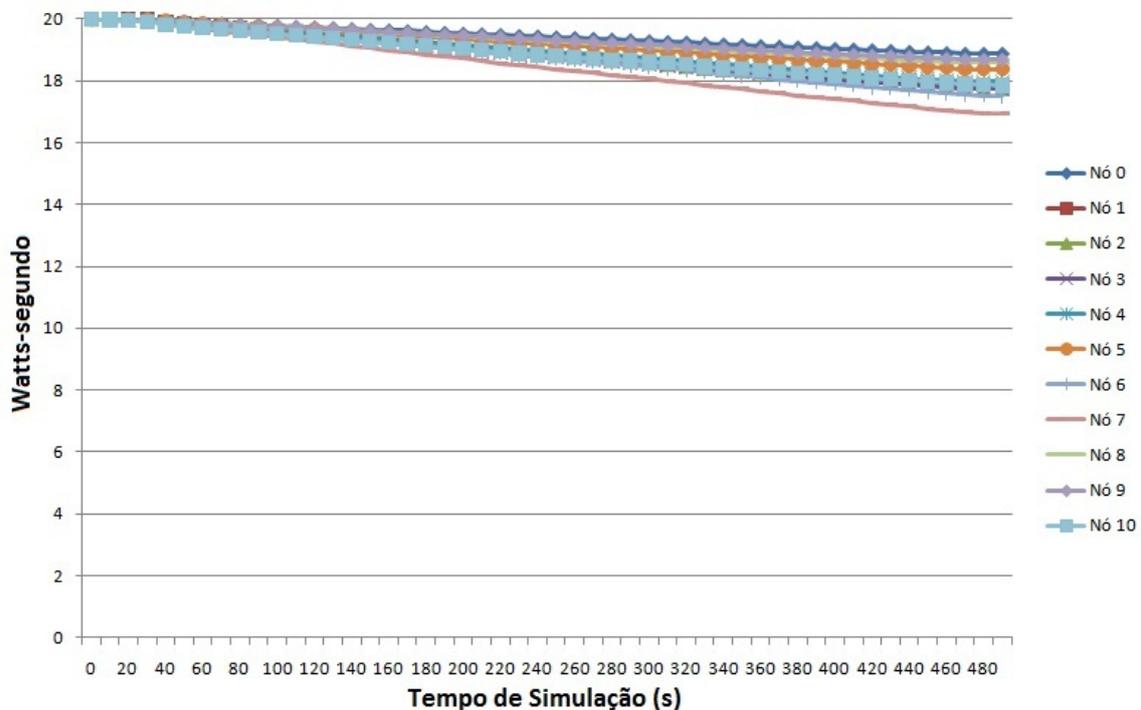


Figura 29 - Energia consumida em todos os nós na primeira geração no cenário 1

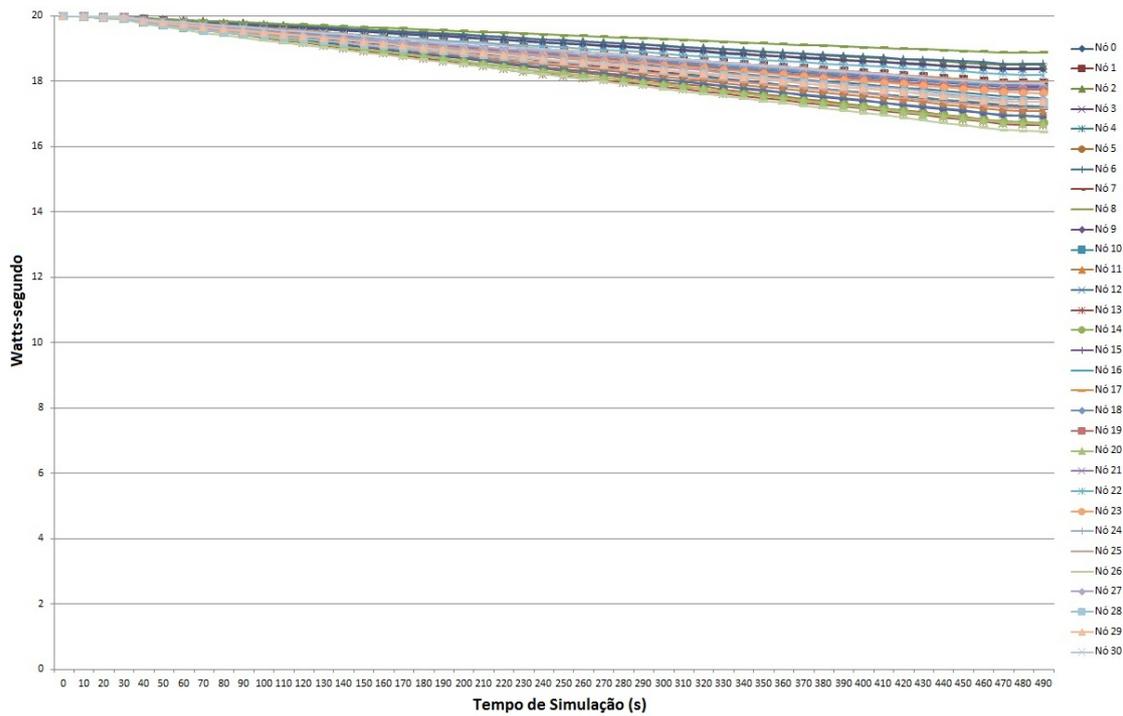


Figura 30 - Energia consumida em todos os nós na primeira geração no cenário 2

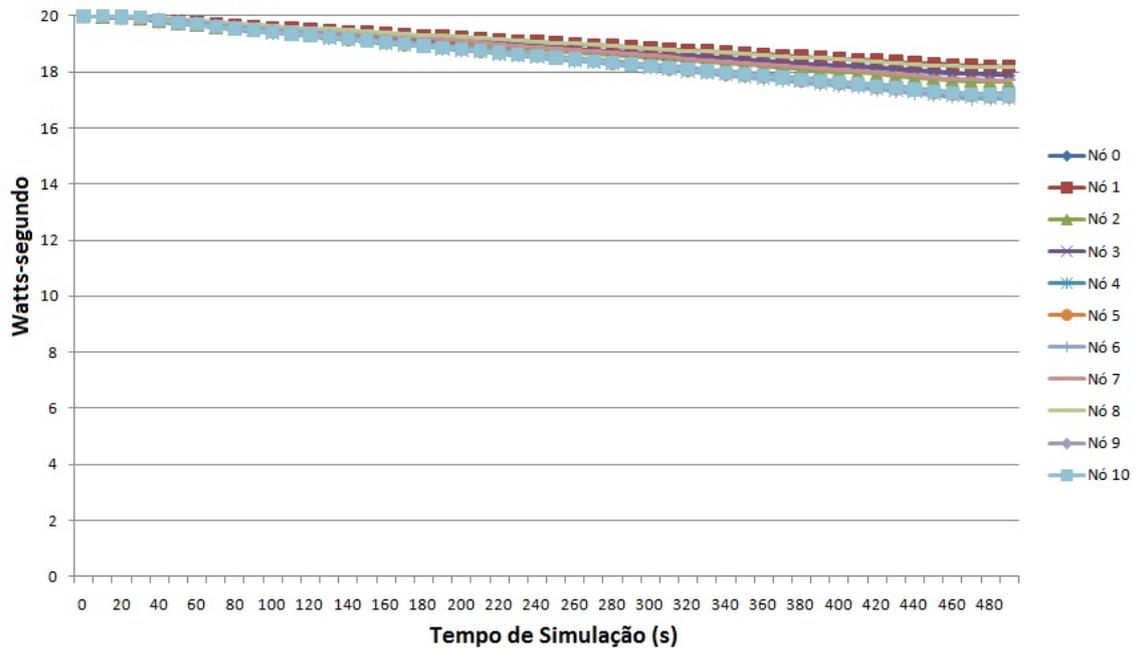


Figura 31 - Energia consumida em todos os nós na trigésima geração no cenário 1

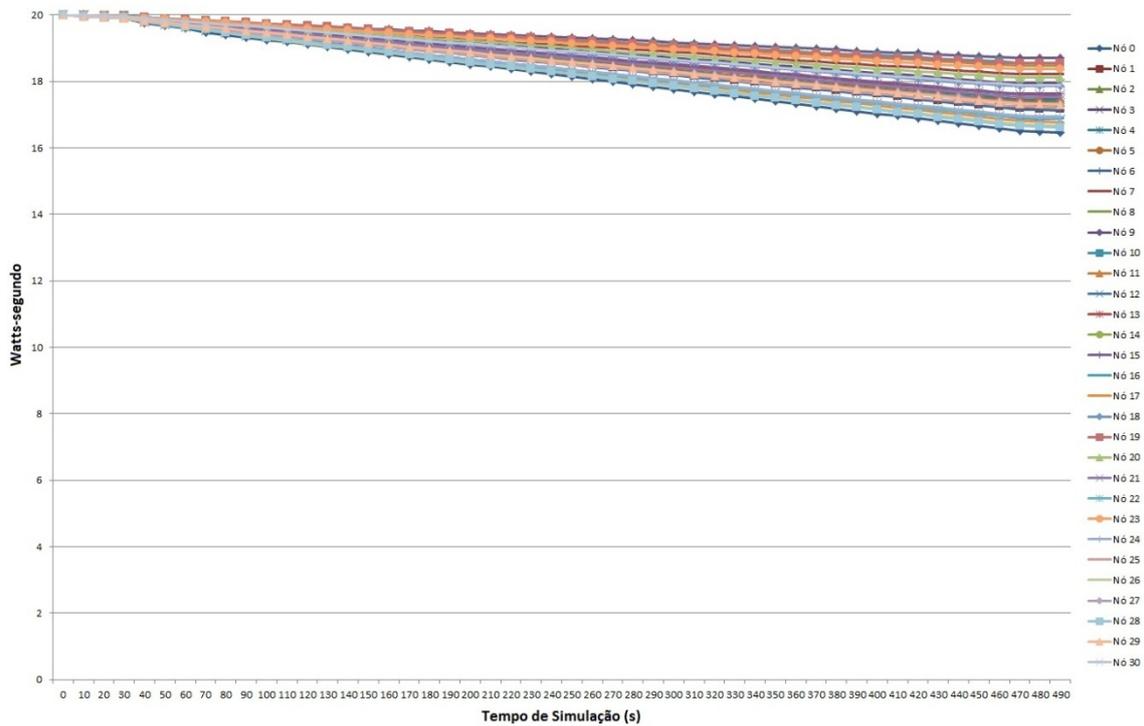


Figura 32 - Energia consumida em todos os nós na trigésima geração no cenário 2

Os resultados de consumo de energia no cenário 1 e 2 apresentados na Figura 29, 30, 31 e 32 mostra que com a utilização do protocolo AODV-FWSN a RSSF teve o aumentado o seu tempo de vida, devido ao roteamento realizado que maximiza a agregação dos dados da rede e o envio das informações em rajadas, equilibrando o consumo de energia de cada nó da RSSF e prolongando sua vida útil.

7 - Considerações Finais e Trabalhos Futuros

Este capítulo apresenta as conclusões gerais desta dissertação e trabalhos futuros. A Seção 7.1 apresenta as conclusões gerais do trabalho, a Seção 7.2 lista as principais contribuições da dissertação, e, por último, a Seção 7.3 apresenta os trabalhos futuros.

7.1 Conclusão

Neste trabalho foi apresentado um algoritmo genético para o problema de posicionamento para RSSF. Este algoritmo é executado em conjunto com o NS-2 onde de acordo com os pacotes entregues, distância entre os nós e energia, é gerado um novo posicionamento dos nós. Além do o protocolo AODV-FWSN, que visa aumentar a vida útil da RSSF através da utilização de envio dos dados por rajadas, agregação dos dados e roteamento baseado na utilização de um custo *fuzzy*.

Para alcançar estes resultados foram utilizados dois cenários, com 10 nós e com 30 nós, ambos com topologia em malha. Os resultados mostram que a ferramenta de otimização proposta juntamente com o AODV-FWSN correspondeu ao esperado, pois se melhorou os pacotes entregues, a otimização da distribuição dos nós e diminuíram o consumo de energia em cada geração do AG. Com a utilização destes dois cenários o AG mostrou ser escalável quanto ao número e a área de disposição dos nós.

O diferencial desta ferramenta de otimização é necessitar de informação reduzida para a geração do posicionamento próximo do ótimo, porém a solução ótima não é garantida. O algoritmo genético utilizado permite que sejam usadas novas variáveis na função de aptidão, fazendo com que esta possa ser utilizada sob condições completamente diferentes. Isto mostra que a ferramenta e a técnica utilizada são flexíveis o bastante, aumentando o seu universo de aplicação.

Esta dissertação apresentou também uma versão para o protocolo AODV voltado para redes de sensores, o protocolo AODV-FWSN, que visa aumentar a vida útil da rede através da utilização de envio dos dados por rajadas, fusão dos dados e roteamento baseado na utilização de um custo *fuzzy*. Os resultados mostraram que o protocolo AODV-FWSN consegue obter um desempenho superior ao do protocolo AODV.

7.2 Contribuicoes

A principal contribuição desta dissertação foi desenvolver uma ferramenta para gerenciar o melhor posicionamento dos nós sensores e uma extensão que traga as características específicas das RSSFs para o protocolo AODV, ambos com o objetivo de melhorar a entrega dos pacotes e diminuir o consumo de energia.

Desta forma, as principais contribuições deste trabalho de acordo com os objetivos definidos na introdução estão listadas a seguir:

- Otimização do posicionamento dos nós sensores utilizando algoritmo genético com função de avaliação multivariável;
- Diminuição do consumo de energia com o protocolo AODV-FWSN;
- Prolongamento da vida útil da RSSF com a ferramenta de otimização e com o AODV-FWSN;
- Implementação de Inteligência computacional (lógica *fuzzy*) no protocolo de roteamento AODV;
- Caracterização do protocolo AODV para RSSF;
- Melhora nos números de pacotes entregues.

7.3 Trabalhos Futuros

Apesar das técnicas e ferramentas utilizadas serem flexíveis, esta dissertação não finaliza as explorações que devem ser realizadas nos estudos aqui apresentados. Durante o desenvolvimento desta dissertação foram observados que os seguintes pontos precisam ser explorados com as mesmas ferramentas aqui apresentadas ou utilizando-se de novas para que os seguintes estudos possam ser realizados:

- Utilizar restrições de posicionamento dos nós para que locais de difícil acesso possam ser utilizados para posicionamento dos nós;
- Estender o uso da ferramenta para cenários em 3D;
- Realizar testbeds para que as técnicas aqui apresentadas tenham sua performance confirmada;

- Desenvolver algoritmo de preempção através de prioridades nas rajadas que contenham informação emergencial;
- Extrapolar as técnicas aqui vistas para rede de sensores sem fio multimídia.

Referência

- [1] I. A. W. S. Y. S. a. E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey," *Computer networks*, vol. 38, n. 4, pp. 393-422, 2002.
- [2] X. S. Z. W. a. Y. Sun, "Wireless sensor networks for industrial applications," *Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation*, vol. 4, p. 3636-3640, 2004.
- [3] L. B. R. L. H. C. L. F. V. a. et al, "Arquitetura de redes de sensores sem fio," em *Livro texto de mini-cursos do XXII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, Gramado, RS, ISBN 85-88442-81-7, 2004, p. 167-218.
- [4] A. A. F. L. J. M. S. N. L. B. R. R. A. M. E. F. N. a. C. M. S. Figueiredo, "Redes de Sensores Sem Fio," em *Livro texto de mini-cursos do XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores 2003*, Natal, RN, 2003, p. 179-226.
- [5] K. A. a. M. Younis, "A survey on routing protocols for wireless sensor network," *Ad Hoc Networks*, vol. 3, p. 325-349, 2005.
- [6] H. K. a. A. Willig, "Protocols and architectures for wireless sensor networks," em *John Wiley & Sons Inc*, 2005.
- [7] Chipcon AS, Mar 2006. [Online]. Available: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc2400.pdf>.
- [8] S. S. I. A. T. a. R. R. Brooks, "An overview, ser," em *Chapman and Hall - CRC Computer and Information Sciences*, 2005.
- [9] H. Z. G. d. S. J. C. K. H. J. L. C. d. V. a. M. Kara, "An intelligent wireless bus-station system dedicated to disabled, wheelchair and blind passengers," em *Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, 2009.
- [10] T. W. P. C. P. S. L. K. Y. G. C. C. P. V. D. S. a. G. B.-. Hurley, "Transforming agriculture through pervasive wireless sensor networks," em *IEEE Pervasive Computing*, 2007.
- [11] N. W. N. Z. a. M. Wang, "Wireless sensors in agriculture and food industry-Recent development and future perspective," *Computers and electronics in agriculture*, vol. 50, n. 1, pp. 1-14, 2007.
- [12] V. S. B.-r. C. K. L. T. R. F. F. J. a. M. Welsh, "Sensor networks for medical care," em *Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems*

(SenSys 05), New York, NY, USA, 2005.

- [13] G.-A. J. J. M. R. J. L. a. M. Welsh, "Monitoring volcanic eruptions with a wireless sensor network," em *Proceedings of the Second European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN 2005)*, 2005.
- [14] M. C. L. M. G. P. A. M. S. G. M. C. M. P. D. Z. a. P. Z. Zanon, "Monitoring heritage buildings with wireless sensor networks: The Torre Aquila deployment," em *Proceedings of the International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN) - SPOTS track. IEEE Computer Society*, 2009.
- [15] S. K. S. P. D. C. J. D. G. F. S. G. a. M. Turon, "Wireless sensor networks for structural health monitoring," em *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems. ACM*, 2006.
- [16] P. H. W. Q. a. R. Evans, "Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 MAC in Beacon-Enabled Tree-Topology Wireless Sensor Networks," em *Systems and Networks Communications (ICSNC), 2010 Fifth International Conference on* , 2010.
- [17] Z. Alliance, Dez 2010. [Online]. Available: <http://www.zigbee.org/> .
- [18] I. o. E. a. E. E. I. I. S. 8. –. 2003, "IEEE Standard for Information Technology – telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 15.4: Wireless 83 Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specificati," New York: IEEE Press, 2003.
- [19] J. Gutierrez, "On the use of IEEE 802.15. 4 to enable wireless sensor networks in building automation," em *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2004. PIMRC 2004. 15th IEEE International Symposium on*, 2004.
- [20] I. SPECIFICATION, "802.15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-RateWireless Personal Area Networks (LR-WPANs)," em *IEEE standard for Information Technology*, 2006.
- [21] I. S. 802.2, "Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements -Part 2: Logical Link Control," em *IEEE standard for Information Technology*, 1998.
- [22] A. Pinto, "Mecanismo de Agregação de Dados Empregando Técnicas Paramétricas em Redes de Sensores," em *Ph.D. dissertation, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO*, 2004.
- [23] L. R. J. N. a. A. Loureiro, "MANNA: a management architecture for wireless sensor networks," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 41, n. 2, pp. 116-125, 2003.
- [24] D. B. a. M. Pursley, "Analysis of Direct-Sequence Spread-Spectrum Multiple-Access Communication Over Rician Fading Channels," *Communications, IEEE Transactions on*, vol.

10, pp. 1566- 1577, Oct 1979.

- [25] G. H. M. S. a. A. Aitouche, "Optimal design of fault tolerant sensor networks," em *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Control Applications*, 2000.
- [26] F. C. S. D. L. U. M. a. F. Melodia, "Routing in ZigBee: Benefits from Exploiting the IEEE 802.15.4 Association Tree," em *Communications, 2007. ICC '07. IEEE International Conference on*, 2007.
- [27] S. S. a. K. MALARIC, "ZigBee wireless standard," em *48th International Symposium ELMAR focused on Multimedia Singnal Processing and Communications*, 2006.
- [28] Y.-F. L. H.-S. L. M.-S. W. a. C.-H. Peng, "A flexible binding mechanism for ZigBee sensors," em *Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), 2009 5th International Conference on* , 2010.
- [29] M. IYAS e I. MAHGOUB, "Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems," em *USA: CRC Press*, 2004.
- [30] C. R. Darwin, *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*, 1ª ed., J. Murray, Ed., London, 1859.
- [31] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, 1ª ed., Michigan: The MIT Press, 1992.
- [32] R. CONCILIO, "Contribuições à Solução de Problemas de Escalonamento pela Aplicação," Campinas - São Paulo, 2000.
- [33] R. Linden, *Algoritmos Genéticos: Uma importante ferramenta da Inteligência Computacional*, 1 ed., Brasport, 2006.
- [34] M. S. a. L. Patnaik, "Genetic algorithms: a survey," *Computer*, vol. 27, n. 6, pp. 17-26, Jun 1994.
- [35] J. C. H. BARCELLOS, "Algoritmos Genéticos Adaptativos: Um estudo Comparativo," São Paulo, 2000.
- [36] L.-X. Wang, *A course in fuzzy systems and control*, NJ: Prentice Hall, 1996.
- [37] H. A. a. K. C. Sarma, *Cost Optimization of Structures: Fuzzy Logic, Genetic Algorithms, and Parallel Computing*, Wiley, 2006.
- [38] L. Zadeh, "Fuzzy sets. Information and Control," *[S.I.]*, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [39] E. H. M. a. S. ASSILIAN, "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy," *Man-Machine Studies*, vol. 1, n. 7, pp. 1-13, 1975.

- [40] K. I. a. M. SUGENO, "A Model of Human Evaluation Process Using Fuzzy Measure," *Man-Machine Studies*, vol. 1, n. 22, p. 19–38, 1985.
- [41] I. TEIXEIRA, "Roteamento com Balanceamento de Consumo de Energia Para Redes de Sensores Sem Fio," Rio de Janeiro, 2005.
- [42] P. F. K. a. A. T. Theodore, "Adaptive design optimization of wireless sensor networks using genetic algorithms," *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, vol. 51, pp. 1031-1051, 2007.
- [43] R. K. L. H. a. H.-H. Che, "Self-Organization of Sensor Networks Using Genetic Algorithms," em *6ª IEEE International Conference on Communication.*, 2006.
- [44] J. Z. H. Z. a. J. Xu, "An energy balanced reliable routing metric in wsns," *Scientific Research Publishing - Wireless Sensor Network*, vol. 1, pp. 22-26, 2009.
- [45] M. T. H. A. a. A. Movaghar, "A Fuzzy Energy-based extension to AODV routing," em *Telecommunications, International Symposium on* , 2008.
- [46] C. E. P. E. M. R. a. S. R. Das, "Ad hoc on-demand distance vector," 2002.
- [47] W. D. S. S. I. R. K. a. W. Rummier, "Energy equivalence routing in wireless sensor networks," em *Microprocessors and Microsystems*, 2004.
- [48] D. A. a. L. Hall, "Mr. fis: Mamdani rule style fuzzy inference system," *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 5, p. 238–243, 1999.
- [49] J. a. M. J. LEE, "A Comprehensive Performance Study of IEEE 802.15.4," em *Sensor Network Operations*, *IEEE Press, Wiley Interscience*, 2006, p. 218–237.