UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ARTES, CIÊNCIAS E HUMANIDADES

ANDRE LUIZ MACHADO DE OLIVEIRA

**Estudo de um Sistema de Telefonia Sem Infraestrutura
através de Modelagem e Simulação Baseada em Agentes**

SÃO PAULO

2012

ANDRE LUIZ MACHADO DE OLIVEIRA

**Estudo de um Sistema de Telefonia Sem Infraestrutura
através de Modelagem e Simulação Baseada em Agentes**

Dissertação apresentada à Escola de Artes,
Ciências e Humanidades da Universidade
de São Paulo para obtenção do título de
Mestre em Mestrado em Modelagem de
Sistemas Complexos.

Área de Concentração: Sistemas Complexos

Orientador: Professor Doutor
Camilo Rodrigues Neto

São Paulo

2012

ANDRE LUIZ MACHADO DE OLIVEIRA

**Estudo de um Sistema de Telefonia Sem Infraestrutura
através de Modelagem e Simulação Baseada em Agentes**

Esta versão da dissertação contém correções e alterações sugeridas pela Comissão Julgadora durante a defesa da versão original do trabalho, realizada em 14/9/2012.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Camilo Rodrigues Neto (orientador) – EACH – USP

Prof. Dr. Fernando Fagundes Ferreira – EACH – USP

Prof. Dr. Antonio Fernando Crepaldi – FEB – UNESP/Bauru

Dedicatória

A meu pai, minha mãe e minha irmã, por terem me dado os lápis com os quais desenho minha trilha, e não me deixam esquecer um só dia de nela caminhar.

À memória de minha avó, pequena grande mulher.

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Camilo Rodrigues Neto por me aceitar como seu aluno, por me orientar nos momentos de pouca clareza deste trabalho e por todo tempo e gentileza para se reunir comigo em horários não convencionais.

A todos os membros do programa de pós-graduação em Modelagem de Sistemas Complexos, em especial à Jussara Barbosa por sua paciência e carinho no tratamento de meus pedidos.

A todos aqueles que somaram comigo para que eu conseguisse chegar até aqui, em especial Genésio Pereira e Bernardo Marquez pela amizade e por me darem um teto em São Paulo.

Resumo

A evolução tecnológica das redes de telecomunicações sem fio permite que organizações de redes mais inteligentes sejam vislumbradas. É possível imaginar um sistema de telefonia formado por dispositivos móveis autônomos que não necessite de nenhuma infraestrutura pré-estabelecida para trocar informações com seus vizinhos, de acordo com o alcance do raio de transmissão. Assim, as informações poderiam ser repassadas de nó em nó, formando uma rede de múltiplos saltos. A ausência de uma entidade central também poderia melhorar a tolerância a falhas do sistema, principalmente por gerar uma redundância de caminhos possíveis entre os nós. Analisamos o desempenho desse sistema em diferentes cenários e a sensibilidade à variação de parâmetros como o raio de transmissão, interferências, a quantidade de nós e número de saltos máximo permitido (TTL), e testamos estratégias de comunicação com raio fixo, raio variável, número de vizinhos mínimo e etc., através de modelagem e simulação baseada em agentes. De maneira geral, a estratégia de transmissão com raio variável apresentou a melhor taxa de mensagens recebidas e a menor média de saltos até o destino, porém com maior nível de energia do sistema. A estratégia de raio fixo apresentou a menor energia total gasta pelo sistema para enviar as mensagens, porém, com uma taxa menor de mensagens recebidas. Além disso, avaliamos que as principais causas de perdas de pacotes estão associadas com o aumento da mobilidade, a redução do TTL e as interferências, sendo que cada uma contribui mais ou menos de acordo com o cenário estudado.

Palavras-Chave: *Sistemas Complexos; Redes Ad-Hoc; Modelagem Baseada em Agentes; Sistemas Distribuídos; Comunicação Cooperativa, Protocolos Sem Fio.*

Abstract

The technological development of Wireless Networks leads to more intelligent networks structures. One can imagine a mobile data system consisting of autonomous mobile devices that do not require any pre-established infrastructure to exchange information one with another, limited mainly by the transmission radius. Thus, data could be forwarded from node to node, forming a multihop network. The absence of a central entity could also improve fault tolerance by allowing redundant paths for nodes to communicate. We analyzed the performance of the system in different scenarios and system behavior regarding parameters variations such as transmission radius, interferences, the number of nodes and maximum allowed number of hops (TTL), and tested communication strategies with fixed radius, variable radius, minimum number of neighbors to transmit, etc., through modeling and simulation-based agents. In general, variable radius strategy had the best rate of incoming messages and the lowest average number of hops to the destination. However it presented the higher level of system energy. In one hand, fixed radius strategy presented the lowest total energy expended by the system to send messages, but, in the other hand, the rate of incoming messages was lower. Furthermore, we discovered the main causes of packet losses are associated with increased mobility, reducing the TTL and interference, each of which contributes more or less in accordance with the scenario.

Key Words: *Complex Systems; Mobile Ad-Hoc Networks; Agent-based Model; Wireless Communications; Distributed Systems; Cooperative Communication; Wireless Protocols.*

Lista de Figuras

Figura 1: Sistema de Comunicação Distribuído	5
Figura 2: Rede de Eventos Discretos.....	18
Figura 3: Tipos Comuns de Redes.....	22
Figura 4: Terminal Escondido.....	31
Figura 5: Terminal em Exposição.....	31
Figura 6: Ambiente de Simulação do Netlogo	68

Lista de Tabelas

Tabela 1: Valores de Energia	79
Tabela 2: Energia Total	79
Tabela 4: Comparação das Estratégias de Comunicação	132
Tabela 3: CTR	134

Lista de Gráficos

Gráfico 1: Mensagens Recebidas, Raio = 5	73
Gráfico 2: Mensagens Recebidas, Raio = 7	74
Gráfico 3: Mensagens Recebidas, Raio = 10	74
Gráfico 4: Mensagens Recebidas, Raio = 15	75
Gráfico 5: Total de Energia Gasta, Raio = 5.....	76
Gráfico 6: Total de Energia Gasta, Raio = 7.....	77
Gráfico 7: Total de Energia Gasta, Raio = 10.....	77
Gráfico 8: Total de Energia Gasta, Raio = 15.....	78
Gráfico 9: Média de Saltos até o destino, Raio = 5	81
Gráfico 10: Média de Saltos até o destino, Raio = 7	81
Gráfico 11: Média de Saltos até o destino, Raio = 10	82
Gráfico 12: Média de Saltos até o destino, Raio = 15	82
Gráfico 13: Histograma de Saltos, Raio = 5, Wnodes = 80	83
Gráfico 14: Histograma de Saltos, Raio = 7, Wnodes = 80	83
Gráfico 15: Histograma de Saltos, Raio = 10, Wnodes = 80	84
Gráfico 16: Histograma Acumulado de Saltos, Raio = 5, Wnodes = 80	85
Gráfico 17: Total de Energia Gasta, Raio = 7, fator = 3	86
Gráfico 18: Total de Energia Gasta, Raio = 10, fator = 3	86
Gráfico 19: Mensagens Recebidas, Perdas = 15	88
Gráfico 20: Mensagens Recebidas, Perdas = 30	88
Gráfico 21: Mensagens Recebidas, Perdas = 60	89
Gráfico 22: Mensagens Recebidas, Perdas = 95	89
Gráfico 23: Total de Energia, Perdas = 15	90
Gráfico 24: Total de Energia, Perdas = 30	91
Gráfico 25: Total de Energia, Perdas = 60	91

Gráfico 26: Total de Energia, Perdas = 95	92
Gráfico 27: Média de Saltos até o destino, Perdas = 15	93
Gráfico 28: Média de Saltos até o destino, Perdas = 60	94
Gráfico 29: CTR – número de nós isolados	95
Gráfico 30: CTR – número de nós conectados	96
Gráfico 31: Msg Recebidas, Estratégia = 3, Wnodes = 50	99
Gráfico 32: Msg Recebidas, Estratégia = 3, Wnodes = 140	99
Gráfico 33: Msg Recebidas, Estratégia = 5, Wnodes = 50	100
Gráfico 34: Msg Recebidas, Estratégia = 5, Wnodes = 140	101
Gráfico 35: Msg Recebidas, Estratégia = 7, Wnodes = 50	102
Gráfico 36: Msg Recebidas, Estratégia = 7, Wnodes = 140	102
Gráfico 37: Msg Recebidas, Estratégia = 10, Wnodes = 50	103
Gráfico 38: Msg Recebidas, Estratégia = 10, Wnodes = 140	104
Gráfico 39: Msg Recebidas - TTL = 8, Taxa de busca = 100	105
Gráfico 40: Msg Recebidas - TTL = 8, Taxa de busca = 100	105
Gráfico 41: Mensagens Recebidas	107
Gráfico 42: QoS.....	108
Gráfico 43: Mudanças de Caminho	109
Gráfico 44: Número médio de saltos	109
Gráfico 45: Total de Energia Gasta	110
Gráfico 46: Mensagens recebidas.....	112
Gráfico 47: Perdas de Mensagens no Sistema	113
Gráfico 48: Média de Saltos até destino.....	114
Gráfico 49: QoS Total.....	115
Gráfico 50: Energia Total	116
Gráfico 51: Mensagens Recebidas, Estratégia = 5, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100	118

Gráfico 52: Mensagens Recebidas, Estratégia = 7, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100	119
Gráfico 53: Mensagens Recebidas, Estratégia = 10, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100	120
Gráfico 54: Média de Saltos, Estratégia = 5, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100	122
Gráfico 55: Média de Saltos, Estratégia = 7, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100	123
Gráfico 56: Média de Saltos, Estratégia = 10, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100 ..	124
Gráfico 57: Path Change, Estratégia = 5, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100	125
Gráfico 58: Path Change, Estratégia = 7, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100	126
Gráfico 59: Path Change, Estratégia = 10, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100	127
Gráfico 60: Energia Total, Estratégia = 5, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100	128
Gráfico 61: Energia Total, Estratégia = 7, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100	129
Gráfico 62: Energia Total, Estratégia = 10, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100	130
Gráfico 63: Histograma de carga, raio fixo.	133
Gráfico 64: Histograma de carga, raio variável.	133

Lista de Siglas

AC - Autômatos Celulares

ACK - acknowledgement

AMA - Active Member Address

AODV – Ad Hoc On Demand Distance Vector

BTS - Estações de Base

CDMA - Code Division Multiple Access

CDMA2000 - Code Division Multiple Access

CTR – Critical Transmission Range

CTS - Clear to Send

DS – Dinâmicas de Sistemas

DSDV – Destination Sequenced Distance Vector

DSR – Dynamic Source Routing

FDMA - Frequency Division Multiple Access

FHS - Frequency Hopping Synchronization

FQMM - Flexible QoS Model for Manet

GPRS - Serviço de Rádio de Pacote Geral

GSR – Global State Routing

IETF - Internet Engineering Task Force

LMP - Link Management Protocol

LTE - Long Term Evolution

MANETs - Redes Móveis Ad-hoc

MBA - Modelagem Baseada em Agentes

MEBTP – Minimum Energy Broadcast Tree Problem

MFSP – Minimum Forwarding Set Problem

MIMO - Multiple-input Multiple-output

MSBA - Modelagem e Simulação Baseada em Agentes

OFDM - Orthogonal Frequency Multiple Access

OSI - Open Systems Interconnection

P2P - Peer-to-Peer

PMA - Passive Member Address

PSTN - Public Switched Telephony Network

QoS – Qualidade de Serviço

RTS - Request to Send

SCA - Sistemas Complexos Adaptativos

SED – Simulação de Eventos Discretos

TDMA - Time Division Multiple Access

TO – Técnicas de Otimização

TTL - Time To live

WSN - Redes de Sensores Sem Fio

ZMCGN - Distribuição Gaussiana Complexa com Média Nula

Sumário

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS	1
1.2 SISTEMA DE COMUNICAÇÃO DISTRIBUÍDO	3
1.3 OBJETIVOS DESTE ESTUDO	7
2 MODELAGEM DE SISTEMAS COMPLEXOS	10
2.1 SISTEMAS COMPLEXOS	10
2.2 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS COMPLEXOS	11
2.3 ENGENHARIA DE SISTEMAS COMPLEXOS	13
2.4 SISTEMA COMPLEXO DE TELEFONIA AD HOC	14
2.5 O PROCESSO DE MODELAGEM E DE SIMULAÇÃO	16
2.5.1 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO (TO)	17
2.5.2 SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS (SED)	17
2.5.3 DINÂMICAS DE SISTEMAS (DS)	18
2.6 MODELAGEM E SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES (MBA)	19
2.6.1 ORIGEM DA MBA	19
2.6.2 CARACTERÍSTICAS DAS MBA	22
2.6.3 COMO MODELAR	23
2.6.4 PROBLEMAS COMUNS E VALIDAÇÃO	25
3.1 MECANISMOS DE ACESSO AO MEIO	29
3.1.1 Problema do Hidden Terminal	30

3.1.2 Problema do Exposed Terminal	31
3.2 MODELOS DE CONSUMOS DE ENERGIA.....	32
3.2.1 PERDAS DE TRANSMISSÃO	32
3.2.1.1 PERDAS BÁSICAS	32
3.2.1.2 RUÍDO.....	32
3.2.1.3 DESVANECIMENTO (FADING).....	33
3.2.2 POTÊNCIA CONSUMIDA NOS APARELHOS.....	33
3.3 COMUNICAÇÃO POR MULTISALTOS	34
3.3.1 BROADCAST STORM PROBLEM.....	35
3.3.2 MINIMUM FORWARDING SET PROBLEM (MFSP).....	36
3.4 DENSIDADE DOS NÓS E CAPACIDADE DA REDE	36
3.4.1 DISTRIBUIÇÃO DOS NÓS E MOBILIDADE	38
3.5 CONECTIVIDADE DA REDE E RAIO DE TRANSMISSÃO	39
3.5.1 CRITICAL TRANSMISSION RANGE (CTR)	40
3.5.2 MINIMUM ENERGY BROADCAST TREE PROBLEM (MEBTP)	41
3.6 QUALIDADE DE SERVIÇO (QoS)	41
3.7 PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO	44
3.7.1 DYNAMIC SOURCE ROUTING (DSR)	45
3.7.2 GLOBAL STATE ROUTING (GSR).....	46
3.7.3 DESTINATION SEQUENCED DISTANCE VECTOR (DSDV).....	47
3.7.4 AD HOC ON DEMAND DISTANCE VECTOR (AODV).....	48
3.8 FUNCIONAMENTO DOS SISTEMAS SIMILARES	49
3.8.1 BLUETOOTH (IEEE 802.15.1).....	49

4 PROPOSTA DE ESTUDOS COM MODELAGEM.....	55
4.1 ELABORAÇÃO DOS MODELOS	55
4.1.1 Modelo de mobilidade;	55
4.2 ESTUDOS E TESTES	61
4.3 VARIÁVEIS E PARÂMETROS DE MEDIDA.....	64
5 DESENVOLVIMENTO DAS SIMULAÇÕES.....	66
5.1 MODELAGEM DOS AGENTES.....	69
5.2 SIMULAÇÕES	70
5.3 Simulação 1: Envio de mensagens com nós parados	72
5.4 SIMULAÇÃO 2: INTERFERÊNCIA.....	87
5.5 SIMULAÇÃO 3: CRITICAL TRANSMISSION PATH.....	94
5.6 SIMULAÇÃO 4: MEBTP	97
5.7 SIMULAÇÃO 5: CENÁRIO REALÍSTICO COM MOBILIDADE.....	106
5.8 SIMULAÇÃO 6: CENÁRIO REALÍSTICO COM RAIO FIXO.....	111
5.9 SIMULAÇÃO 7: CENÁRIO REALÍSTICO COM RAIO VARIÁVEL.....	116
5.10 SIMULAÇÃO 8: COMPARAÇÃO DOS ESQUEMAS DE COMUNICAÇÃO.....	131
6 CONCLUSÕES	134
7 BIBLIOGRAFIA	139

1 INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica das redes de telecomunicações sem fio permite que organizações de redes mais inteligentes sejam vislumbradas. A arquitetura *Peer-to-Peer* (P2P) e as Redes de Sensores Sem Fio (WSN) alavancaram novos paradigmas de descentralização, autonomia e interconectividade entre dispositivos cada vez mais heterogêneos [3, 4, 6, 7]. Esses sistemas compostos por múltiplos agentes autônomos são capazes de monitorar, agir e até mesmo prever situações através do seu trabalho em conjunto [5, 13].

Além disso, a modelagem e a simulação de sistemas cada vez mais complexos possibilitam que algoritmos e protocolos levem em consideração não só o sistema em si, mas também o ambiente dinâmico em que serão desenvolvidos [16, 17]. Isso abre um novo espaço para a evolução das redes de telecomunicações que exigiria protocolos de comunicação indo além daqueles desenvolvidos através de considerações majoritariamente analíticas.

Essa primeira aproximação foi substancialmente útil no desenvolvimento da maioria dos protocolos utilizados nas quatro primeiras camadas do modelo OSI, mas parece ser insuficiente para redes altamente dinâmicas e heterogêneas [1, 2, 3]. Novas ferramentas de modelagem e métodos holísticos de simulação devem ser considerados. Nesse sentido, as modelagens baseadas em agentes surgem como importantes candidatas.

1.1 TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS

A tendência tecnológica atual está cada vez mais clara: primeiramente houve o desenvolvimento das redes celulares, seguido da aparição de redes de dados (internet e *World Wide Web*) e em seguida as redes de dados sem fio.

Atualmente, presencia-se a convergência dessas duas últimas redes, formando o que chamamos de redes celulares de dados como as redes *GPRS*, *CDMA2000*, *LTE*, *Wifi*. Essas redes possuem arquiteturas altamente centralizadas. No caso do sistema celular, a entidade central é formada pela interconexão das estações de base (BTS), e, no caso da tecnologia de dados *Wifi* a conectividade com a internet depende de um ponto de acesso central.

Redes desse tipo são mais fáceis de serem projetadas e controladas, porém apresentam alguns problemas inerentes à centralização das transações tais como: altos custos de projeto, limite de quantidade de usuários, pouca robustez a ataques [44], além de não garantirem a privacidade das informações e de criarem dependência tecnológica.

Além disso, a internet está cada vez mais móvel e cada vez mais acessível pelos vários dispositivos: computadores, notebooks, celulares, tablets, televisores, futuramente as máquinas de lavar, os aparelhos de som, as geladeiras [5], etc.. Chega-se a cogitar uma “internet das coisas (*Internet of things*)” em que bilhões de dispositivos estarão interconectados e poderão trabalhar juntos para prover novos serviços e aplicações mais inteligentes [22].

Equipamentos de rede sem fio tiveram um grande avanço nas últimas décadas: cada nova geração de dispositivos sem fio trouxe consigo vantagens em termos de confiabilidade do enlace de comunicação, de taxas de transferência de dados, de autonomia da bateria, de miniaturização e de conectividade [10, 13].

Recentemente, as redes *Wimax* e as redes de sensores surgiram com novas possibilidades de comunicação, em que fontes emissoras de informação se repousam sobre outros nós de uma rede para repassarem suas informações até o destino final [32]. Segundo o livro “*Cooperative Communication in Wireless Networks*” [45], a próxima geração das redes de comunicação sem fio deverá ir além do paradigma de ponto a ponto, como é o caso das redes *ad-hoc* e do ponto-para-

multiponto, como no caso das redes celulares. As próximas redes serão baseadas em relações bem mais complexas: os dispositivos do sistema deverão cooperar uns com os outros de modo a aumentar o desempenho não somente de suas próprias comunicações, mas também da rede como um todo [8, 18, 20].

A promessa das comunicações cooperativas também abre espaço para mudanças no nível econômico. A partir do momento em que for possível manter “links” de comunicação entre dois nós (ainda que por intermédio de outros nós) sem a presença de uma infraestrutura pré-estabelecida ou de uma entidade central, como poderiam as operadoras de telecomunicações realizar a cobrança pela ligação efetuada? Desde 2006 um grupo formado por empresas como a Siemens e Microsoft abriu espaço para o diálogo sobre essas questões [9]. Ao mesmo tempo em que isso parece ser uma vantagem enorme para o consumidor final, existiria também a desvantagem de não haver nenhuma entidade responsável pelo mantimento da qualidade, disponibilidade, seguridade ou conformidade da rede. Isto é, quando eu tentar realizar uma chamada e ela não acontecer, quem seria o responsável?

Algumas áreas de aplicações para redes desse tipo são mostradas abaixo:

- a) Redes domésticas: interconectividade entre equipamentos da casa [22];
- b) Redes P2P móveis: compartilhamento distribuído de dados [10];
- c) Redes interveiculares: comunicação para a organização e previsão de acidentes [12];
- d) Redes *ad-hoc* móveis: comunicação móvel em nível local [44].

1.2 SISTEMA DE COMUNICAÇÃO DISTRIBUÍDO

Pode-se imaginar um sistema formado por dispositivos móveis autônomos que não necessitem de nenhuma infraestrutura pré-estabelecida para trocar informações com seus vizinhos de acordo com o alcance do seu rádio, e que seus vizinhos sejam capazes de repassar essas informações para seus outros vizinhos, assim por diante. Neste pressuposto, as trocas de mensagens entre os nós podem

acontecer de maneira direta ou por meio de múltiplos saltos, dependente da distância entre a fonte e o destinatário e a estratégia do dispositivo.

É interessante notar que o canal sem fio é do tipo *broadcast* por natureza, ou seja, ainda que um dispositivo vise uma transmissão direcionada a um único destinatário (*unicast*), o sinal é naturalmente escutado por todos os nós pertencentes a certa região do espaço. Inicialmente, perceberam-se tão somente as dificuldades advindas dessa característica, como o aparecimento de interferência em canais usados pelos nós próximos [14]. No entanto, atualmente, o fato de que vários nós são capazes de ouvir e de receber uma mesma transmissão de uma dada fonte, está sendo levado em conta como uma maneira de minimizar os principais problemas enfrentados pelos enlaces de telecomunicações, tal que o *multipathing* e as *perdas de rayleigh* (desvanecimento) [32, 36].

A vantagem de se trabalhar com uma tecnologia assim é que pode-se reduzir as potências de transmissão dos sinais para comunicarmos somente com os nós mais próximos. Isso também induz o aparecimento do que é conhecido na literatura como diversidade espacial, também chamado MIMO (*multiple-input multiple-output*), e pode reduzir esses efeitos indesejados durante a transmissão, como as perdas de potência e as interferências entre símbolos e entre canais. A primeira estratégia adotada na indústria foi a utilização de mais de uma antena em um mesmo dispositivo. Porém, com a miniaturização dos aparelhos, fica difícil distanciar as antenas de um espaço maior que alguns comprimentos de onda. Levando essa ideia ao extremo, surge a pergunta: e se em vez de várias antenas, tivermos na realidade vários nós geograficamente distribuídos repassando as mesmas informações? A figura 1 ilustra um sistema desse tipo.

O nó A deseja enviar uma informação para o nó D. Quando ele faz o broadcast, seus vizinhos imediatos B e C recebem o pacote e repassam para D. Mesmo se houver um erro entre o link C e D, o dispositivo D receberá as informações provindas de A por meio de B. Pode-se ainda pensar em um sistema

que faça a gestão da qualidade desses enlaces e avise A quando um caminho não estiver mais disponível, para que, possivelmente, ele encontre outra rota.

Figura 1: Sistema de Comunicação Distribuído

Sabe-se que o modelo de perdas básicas de potência é inversamente proporcional no mínimo ao quadrado da distância de um enlace entre dois nós comunicantes [13]. Assim ao enviarmos um sinal diretamente do ponto A ao ponto B, as perdas do sinal poderiam ser aproximadas pela equação 1:

$$P_{r1} \propto \frac{P_t}{AB^2}$$

Equação 1

Se imaginarmos que, em vez disso, essa transmissão passasse por um nó intermediário C que está na metade do caminho, concluímos que, em termos globais, haveria um ganho de:

$$\frac{P_{r2}}{P_{r1}} = 8 \quad ,$$

já que a potência para transmitir de A para C e logo em seguida de C para B é de:

$$P_{r2} \propto 2 * \frac{P_t}{\left(\frac{AB}{2}\right)^2}$$

Equação 2

A desvantagem desse sistema é que o nó C, que não tinha nenhuma relação com a transmissão entre A e B, também foi solicitado e gastou, não apenas tempo de processamento, mas também energia para repassar as informações. Em termos globais, percebe-se claramente um ganho, porém, se analisarmos somente esse cenário de única transmissão, o balanço individual da potência gasta com a transmissão de dados ficaria:

$$\begin{cases} A \sim \frac{P_t}{8} \\ B \sim 0 \\ A \sim \frac{P_t}{8} \end{cases}$$

É importante notarmos que não consideramos no balanço energético o consumo de energia durante a recepção das informações e nem para o seu processamento, já que são de ordens de grandeza muito inferiores aos gastos para se transmitir [13].

Se levarmos em conta que C gastou energia para repassar um sinal de A para B e não teve nenhum benefício para si, talvez um sistema assim nem valesse a pena. Porém, se pensarmos dessa vez que C também utilizou de um nó intermediário para repassar um sinal ao seu destinatário quando lhe foi conveniente, neste caso teríamos vantagens nos resultados médios do sistema como um todo, além de vantagens para os nós individualmente.

Além disso, esse esquema de comunicação apresenta a óbvia vantagem de não precisar de uma rede central para se comunicar, ao menos até certo limite de área dado no máximo pela conectividade da rede. Esse é o limite máximo, pois, claramente, se não há conectividade entre um nó A e um conjunto de nós formando uma rede N, não pode haver comunicação entre eles. Contudo, outros fatores de

qualidade de serviço como o atraso máximo de uma transmissão no caso de uma aplicação em tempo real, pode fazer com que esse limite seja bem menor que o tamanho da rede. Também é possível estender essa conectividade para além da região geográfica. Para isso, faz-se necessária a presença de alguma passarela (*gateway*) que interligaria essa rede com a internet ou a rede PSTN (*Public Switched Telephony Network*), por exemplo.

Outra vantagem de não se ter uma entidade central é o aumento da tolerância a falhas da rede e da quantidade de usuários máximos suportados por ela, já que as transações podem passar por vários traçados diferentes e podem escolher caminhos alternativos de acordo com a disponibilidade dos recursos [26].

Por fim, tecnologias descentralizadas permitem maior acessibilidade aos meios de comunicação, com custos apenas energéticos. Sendo assim, o modelo em que as operadoras de multimídia (conceito que abarca as operadoras de telefonia, de dados e de vídeo) cobram de seus clientes de acordo com as ligações efetuadas, o tipo de conteúdo e/ou a velocidade com que o acesso é feito [23], o que é controlável nos meios centralizados de comunicação, poderia deixar de existir. Transcendendo esse paradigma, os usuários poderiam realizar trocas de dados, de voz ou de vídeo a custos apenas energético. Então, haveria uma democratização das telecomunicações, viabilizando maior acessibilidade sem cobrar dos usuários por isso. Portanto, um sistema de telefonia com essas características provocaria o aumento do poder do homem em relação à tecnologia, paradoxalmente aos sistemas centralizados atuais.

1.3 OBJETIVOS DESTE ESTUDO

A grande questão desse trabalho é: como desenvolver esses esquemas cooperativos de comunicação que são capazes de agir sem a presença de uma entidade central?

Devido à dinâmica da topologia, o design de algoritmos e de protocolos para essas redes é uma questão delicada, principalmente quando procura-se estabelecer uma rota que interligue dois dispositivos passando por outros nós intermediários, todos com possível movimentação. Mais do que isso, definir quais são os critérios de escolha e como eles podem ser medidos de maneira local já é por si só um grande desafio.

Essa dificuldade pode ser exemplificada da seguinte maneira: em um dado momento, o melhor caminho para passar uma mensagem de um nó A até um nó D é através dos nós B e C, formando o caminho A-B-C-D. Porém, digamos que, durante a transação, o nó C se desloque de maneira que ele fique inacessível temporariamente por B e por D. A pergunta seria: como o sistema pode se adaptar a essa mudança de maneira transparente aos usuários? Como determinar quando é mais interessante escolher outro nó intermediário e quando é mais interessante aumentar a potência para fazer ABD diretamente? Quais são as variáveis mensuráveis mais adequadas para definirmos isso?

Além disso, é importante conhecer os limites dessa tecnologia para que esse sistema possa ser implantado: seria ela capaz de melhorar o desempenho da rede? A qual custo? Melhor ainda: existiriam condições em que esses esquemas de comunicação melhorem o desempenho da rede? Quais são os limites para isto em termos de conectividade, autonomia energética e qualidade de serviço? O que já existe na literatura e quais são as tecnologias disponíveis que se aproximam de nosso sistema?

Essas questões serão abordadas nas próximas seções. A seção 2 faz uma abordagem dos sistemas complexos e avalia como nosso sistema pode se beneficiar dessa teoria. Este capítulo também trata das técnicas de modelagem de sistemas complexos e busca responder à pergunta: por que a modelagem por agentes é vantajosa neste caso? A seção 3 faz uma revisão bibliográfica trazendo

em questão os problemas que redes de tal tipo enfrentam e algumas possíveis diretrizes para se encontrar as soluções. A seção 4 define exatamente o que será estudado durante esta dissertação de mestrado e traz uma primeira definição do modelo de agentes que pretende-se desenvolver. Por fim, as seções 5 a 7 contêm a modelagem e simulação baseada em agentes, bem como as análises desse sistema.

2 MODELAGEM DE SISTEMAS COMPLEXOS

Esta sessão destina-se a definir o que são sistemas complexos, identificar quais são suas principais características e avaliar como nosso sistema pode beneficiar-se dessa teoria e de suas metodologias.

2.1 SISTEMAS COMPLEXOS

A ciência da complexidade está na fronteira comum entre física, biologia e ciências sociais [21]. Assim, várias definições surgiram ao longo do tempo, cada uma com graus de abstração mais ou menos ajustados às suas áreas de aplicação. Vários cientistas concordam que, da célula biológica às redes de telecomunicações, passando pelos mais diversos sistemas sociais e econômicos, todos esses sistemas considerados complexos apresentam propriedades muito parecidas que surgem a partir da interação de um alto número de componentes e através de uma rede formada entre eles.

O pesquisador *Yaneer Bar-Yam* da *New England Complex Systems Institute* conceitua sistemas complexos como "sistemas em que o número de possibilidades distintas e combinações que devem ser consideradas, antecipadas ou tratadas é substancialmente maior do que aquilo que a razão pode nomear ou enumerar" [20]. Já a autora *Melanie Mitchel* em seu livro "*Complexity: a guided tour*" define o campo da complexidade como uma área interdisciplinar de pesquisa que visa explicar como grandes sistemas compostos por um alto número de pequenas entidades relativamente simples organizam-se em um todo coletivo, mesmo sem a existência de nenhum controle central, e, além disso, criam padrões, trocam e utilizam informações do meio e de outros agentes e, em alguns casos, são capazes de não só reagirem a impulsos, mas a aprender e evoluir com eles [38].

Várias outras definições são encontradas na literatura [39, 46]. Na maioria delas, os termos mais comuns que aparecem são: interação, heterogeneidade, evolução e organização.

2.2 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS COMPLEXOS

Saber delimitar quando um sistema deve ser considerado como complexo é importante para que ele possa ser analisado adequadamente e, apesar de todas as definições, ainda é mais fácil reconhecer os sistemas complexos de acordo com suas características e seu comportamento.

Segundo *Scott Page*, podem existir contextos em que certo sistema deverá ser compreendido como complexo e em outros não [39]. É possível pensar em um sistema de uma sociedade em que as pessoas podem se comunicar umas com as outras restritas a certas regras e procura-se saber quantas pessoas são suscetíveis a receber uma informação gerada por um indivíduo. Segundo Scott, em termos de interação, quando todos os indivíduos estiverem ligados uns com os outros ou quando todos estiverem totalmente desconectados, não se tratará de um sistema complexo, já que, a resposta para nossa pergunta torna-se trivial: no primeiro caso, todos receberão essa informação e, no segundo caso, ninguém ficará sabendo de nada. Para todos os casos intermediários, em que apenas alguns indivíduos estarão conectados a outros, o sistema passa a ser do tipo complexo e a resposta passaria a depender de alguns fatores, como a maneira em que o sistema esteja interconectado. Dessa maneira, os sistemas complexos apresentam alguns princípios de organização únicos associados à sua estruturação (topologia).

Somados a essa propriedade, há fundamentalmente três outras características que podem aumentar a complexidade de um sistema [20]. São elas:

- a) seu grau de abertura, ou seja, se o sistema pode sofrer influência de elementos externos e de que maneira;

- b) a interdependência dos seus fatores de influência, que pode gerar não linearidades no seu comportamento e;
- c) a existência de várias escalas do sistema, como indivíduos formando sociedades, computadores formando redes e células formando sistemas.

É preciso também saber distinguir complexo de complicado na hora de se fazer uma análise. Ao nível etimológico das duas palavras, enquanto o oposto de complicado é simples, o contrário de complexo é independente. Isso significa que o segredo para decifrar se estamos diante de um sistema complexo está na avaliação da interdependência entre suas partes constituintes: quando não houver dependência alguma, o sistema não será complexo e não precisará ser estudado como tal [20, 21]. Outros elementos comportamentais e estruturais que caracterizam os sistemas complexos são [23, 38, 39]:

- a) Auto-organização: o sistema é capaz de se auto organizar formando padrões;
- b) Adaptação: o sistema é capaz de se adaptar ao contexto em que se insere;
- c) Heterogeneidade dos agentes: os agentes nem sempre apresentam o mesmo comportamento ou as mesmas características;
- d) autonomia: os agentes do sistema são autônomos, ou seja, não são regidos por um comando central;
- e) mudanças de fase: o sistema pode apresentar histerese, memória ou não linearidades, de modo que as respostas às entradas do sistema nem sempre são diretamente observáveis nas saídas, ou ainda, mudanças no comportamento em uma escala inferior podem demorar em ser observadas em uma escala superior;
- f) emergência de comportamentos: o comportamento em uma escala do sistema pode não refletir o comportamento em outra.

2.3 ENGENHARIA DE SISTEMAS COMPLEXOS

Sistemas complexos não podem ser analisados através das tradicionais técnicas e metodologias científicas que se baseiam (a) no princípio da superposição, (b) na invariância ao longo do tempo e espaço, (c) no entendimento do sistema como fechado ou livre de influências externas, (d) na causalidade linear e (e) na representação matemática do sistema através de valores médios e desvio padrão [20]. Essas análises reducionistas foram muito importantes no desenvolvimento de vários sistemas, porém, podem levar a conclusões parciais e equivocadas sobre ele.

A simplificação de sistemas complexos na engenharia já levou ao abandono e a erros de projeto consideráveis. Dentre os problemas mais recorrentes, pode-se destacar as imprevisibilidades na integração de subsistemas, as dificuldade em lidar concorrentemente com todos os requisitos funcionais e não funcionais do projeto (muitas vezes interdependentes) e os erros de funcionamento devido às excessivas simplificações das interações do sistema com o seu ambiente externo. O artigo [19] apresenta uma lista contendo vários projetos de engenharia que falharam devido a pelo menos uma dessas causas. Como exemplo, citamos o projeto do controle de tráfego aéreo FAA *Advanced Automation System* (custo aproximado de quatro bilhões de dólares), cujos protocolos de comunicação simplistas não foram capazes de lidar com o ambiente dinâmico dos voos. De acordo com esse cenário, surge então a necessidade de novas abordagens que evitem as simplificações e tornem praticáveis os projetos de sistemas cada vez mais complexos.

Do ponto de vista da engenharia, também é importante estabelecer quão útil a consideração de um sistema como complexo pode ser, uma vez que o valor real de um sistema está na sua capacidade em alcançar o seu fim, independente da maneira com que isso é elaborado e operado. Assim, a fim de conhecermos a pertinência dessa abordagem e elucidar melhor como nosso problema pode se

beneficiar da abordagem de sistemas complexos, buscamos responder na próxima seção às seguintes perguntas:

- a) Como é o ambiente em que nossas redes móveis se encontram?
- b) Qual é o grau de heterogeneidade dos componentes do nosso sistema?
- c) Quais são as vantagens de se ter um sistema adaptável aos recursos disponíveis?
- d) De que maneira nosso sistema é orquestrado?

2.4 SISTEMA COMPLEXO DE TELEFONIA AD HOC

Algumas características intrínsecas do nosso sistema de telefonia exigem que ele seja analisado como sistemas complexos:

- a) o dinamismo dos dispositivos: estes podem estar parados, em movimento lento, como no bolso de alguém que está caminhando, ou em movimento mais rápido, como dentro de um carro em movimento ou dentro de um metrô;
- b) a heterogeneidade que eles podem apresentar, pois alguns nós podem ter mais ou menos reservas energéticas, apresentar maior ou menor velocidade de processamento e de armazenamento de informações, movimentar-se de forma particular ou estar presente em um ambiente diferente;
- c) a necessidade de se adaptar aos recursos disponíveis em termos de banda e de raio de transmissão (energia) para melhor realizar seus serviços;
- d) a autonomia dos dispositivos que podem optar por repassar ou não um pacote de informação recebido; e a ausência de um controle central para orquestrar as trocas.

Tudo isso faz com que as ferramentas e metodologias analíticas tradicionais se tornem obsoletas para responder a questões de projeto desse sistema.

Além disso, em termos de arquitetura, percebe-se que esse sistema poderá apresentar propriedades muito mais orgânicas que aquelas encontradas atualmente,

como a capacidade de autoproteção e preservação, diagnóstico automático, devido à adaptação dinâmica, etc., o que realçaria substancialmente sua tolerância a falhas e robustez da rede como consequência [16, 23].

A auto-organização é uma propriedade fundamental para a estabilidade dinâmica desta rede, ainda que ela permaneça em estados de instabilidade temporários em algum de seus subníveis.

Ademais, como todos os nós são suscetíveis de se movimentarem, a composição dessa rede é necessariamente variante no tempo e no espaço.

Serviços inteligentes dependerão da habilidade em se formar clusters e de se compartilhar diferentes recursos, havendo ainda a possibilidade de se realizar fusões de informações trocada e captadas por entidades diferentes.

Informações sobre os limites desse sistema como condições para a estabilidade, conectividade, garantias de qualidade de serviço mínima e máxima, são fatores condicionais para que o desenvolvimento desse sistema valha a pena, e também podem possibilitar a melhor compreensão e a proposição de novos algoritmos e protocolos.

A escalabilidade também exige uma abordagem multidisciplinar para guiar os projetos desde o desenho, passando pela operação até a manutenção dessas novas redes.

Além disso, para um sistema desse tipo, é necessário equilibrar e ponderar fatores individuais muitas vezes inter-relacionados na análise da comunicação entre os dispositivos móveis: cada nó poderá apresentar uma mobilidade específica, poderá estar presente em um lugar com maior ou menor densidade de vizinhos suscetíveis à comunicação.

Por fim, cada nó somente será capaz de conhecer uma amostra da rede muito inferior ao seu tamanho total e deverá saber se está cooperando com o todo a partir disso. Ele deve ainda buscar maximizar sua função utilidade de acordo com

seus vizinhos, o que abre espaço para o surgimento de um esquema de reciprocidade indireta com a rede ou o dilema do prisioneiro. Assim, se ninguém coopera, meus pacotes de informações serão repassados. Ao mesmo tempo, se todos os nós cooperam menos eu, minhas reservas de energia e de processamento serão pouco afetadas, ainda que isso seja pior para o grupo.

É preciso saber balancear tudo isso, e as ferramentas de sistemas complexos parecem ser uma alternativa interessante para tratar de todas essas questões concorrentemente.

2.5 O PROCESSO DE MODELAGEM E DE SIMULAÇÃO

Modelagem e simulação são métodos de análise complementares à dedução e à indução e são principalmente aplicados quando experimentos com o sistema real são caros ou impraticáveis. A modelagem consiste em mapear um problema do mundo real em um modelo abstrato que o caracterize. Uma vez que tem-se o modelo de um sistema, pode-se analisá-lo, tirar conclusões sobre ele e em seguida aplicá-las no mundo real novamente.

Os modelos de simulação se diferem dos modelos analíticos nos seguintes pontos: enquanto os modelos analíticos são constituídos por equações e parâmetros que descrevem matematicamente a interação e o comportamento de um sistema, os modelos de simulação são criados a partir de regras que definem os estado que certo sistema assumirá, dado o seu estado atual (modelos *markovianos*) e/ou os seus estados passados.

A grande vantagem da simulação em relação aos modelos analíticos vem do fato de que pode ser mais fácil determinar os possíveis estados de um sistema do que as equações que regem matematicamente seu comportamento global, principalmente quando o sistema possui certa complexidade. Por outro lado, os modelos analíticos podem apresentar resultados mais precisos e em tempos mais hábeis: uma vez determinados, os modelos analíticos geralmente são capazes de

melhor prever o comportamento dos sistemas em tempo real, além de terem mais créditos em relação às simulações [30].

As principais técnicas de modelagem e simulação atualmente utilizadas são brevemente explicadas abaixo. Cada uma delas foi desenvolvida a fim de abordar um tipo de problema específico e trazem elementos úteis para a nossa simulação.

2.5.1 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO (TO)

Utilizada para encontrar a melhor solução dado um problema específico. Esta técnica é interessante quando não existe uma solução simples e diretamente calculável para um problema conhecido. Ela é principalmente utilizada para fornecer a solução da melhor alocação de recursos disponíveis em um sistema, ou seja, ela calcula a resposta ótima de quais as quantidades adequadas, por quanto tempo e em qual sequência um recurso deve ser atribuído para as várias partes de um sistema. Para isso, é necessário definir uma função-objetivo, bem como as restrições inerentes ao sistema e, muitas vezes, uma tolerância para a resposta, já que em alguns casos a solução ideal só pode ser aproximada.

Os resultados podem ser calculados tanto em nível global como local, de maneira centralizada ou descentralizada. Existem várias técnicas de otimização, sendo que as de maior destaque atualmente são a programação linear, os algoritmos genéticos e a simulação de Monte Carlo.

2.5.2 SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS (SED)

A SED é utilizada na análise do efeito das incertezas dentro dos sistemas. Nas SED, tanto as entidades quanto os processos do sistema são modelados. No caso, as entidades são objetos passivos controlados pelas informações que fluem no sistema. Assim, somente os fluxogramas (processos) são responsáveis por conter as regras do sistema e tomar todas as decisões.

A maioria dos simuladores de rede é do tipo evento discretos. Neles, os sistemas são simulados através de heurísticas: pode-se definir a taxa de chegada de pacotes, a taxa de serviço, a capacidade de armazenamento em cada processo e como os processos estão interconectados, por exemplo. As Cadeias de *Markov*, as Teorias de Filas e de Redes são exemplos desta técnica. A figura 2 ilustra uma Rede de Eventos Discretos. Os pacotes chegam ao roteador A a uma probabilidade dada pela taxa de Poisson e são servidos a uma probabilidade dada pela taxa exponencial. Ao serem servidos, eles seguem para o roteador B ou para o roteador C.

Figura 2: Rede de Eventos Discretos

2.5.3 DINÂMICAS DE SISTEMAS (DS)

A DS é útil na compreensão das interconexões existentes dentro do sistema. Na DS, o sistema que é modelado, não as suas entidades. Portanto, é necessário conhecer os seus requisitos previamente. Os modelos são baseados em estoques, fluxogramas entre os estoques e informações que são os valores dos fluxos. Esta aproximação consiste na descrição do sistema como um processo de interação entre estoques, com presença de retroalimentação. O sistema é descrito em termos de diagramas de blocos e é modelado através de equações diferenciais e variáveis de estado. Esta aproximação não permite com que as informações presentes no

estoque sejam individualizadas. As respostas podem ser divididas em transitórias e de regime estacionário. A DS é muito utilizada no estudo de estabilidade dos sistemas.

A seguir, faz-se uma introdução da técnica de modelagem e simulação de sistemas mais promissora para o nosso trabalho: a Modelagem Baseada em Agentes. Mostramos também que a combinação desta técnica com outras apresentadas acima permite realizarmos uma simulação mais completa do sistema, que se beneficia das vantagens de cada um dos modelos.

2.6 MODELAGEM E SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES (MBA)

A MSBA tem sua origem científica pautada no paradigma de que os sistemas podem se organizar de baixo para cima (*bottom-up*), mesmo sem a imposição de regras em nível macroscópico (*top-down*). Isso significa que padrões em nível de sistema surgem de micro regras em nível de seus componentes. Mais que isso: muitas vezes o sistema apresenta comportamentos que vão além da simples análise linear dos comportamentos de suas partes. Diz-se que o todo está além da soma das partes (teoria da complexidade). A seguir, as principais técnicas científicas que influenciaram no surgimento da MSBA são abordadas.

2.6.1 ORIGEM DA MBA

A Modelagem e Simulação Baseada em Agentes tem suas raízes nos Sistemas Complexos Adaptativos (SCA), cujas principais características e propriedades são [11, 15, 25]:

- a) Formação de grupos entre agentes (clusters);
- b) Não-linearidade das respostas;
- c) Fluxos e trocas de informações dentro e fora do sistema;
- d) Diversidade dos agentes;
- e) Agentes podem ser reconhecidos e classificados;

- f) Agentes possuem visão própria e possivelmente diferente do mundo;
- g) Sistemas e subsistemas são composições de unidades mais simples.

Outra importante ferramenta de análise muito influente nas MSBAs são os Autômatos Celulares (AC). Um AC é formado por uma grelha tipicamente de duas dimensões contendo células que podem estar em um número finito de estados, variável no tempo. O estado futuro de uma célula é função tanto do seu estado atual quanto do estado das suas células vizinhas, de acordo com regras pré-estabelecidas. Neste sentido, esse modelo é considerado determinístico.

É interessante observar a partir desse modelo que padrões estáveis em nível de sistema (global) surgem, ainda que todas as regras sejam estabelecidas em um nível celular (local). Ressaltamos ainda que esse padrão é sensivelmente determinado pelas condições iniciais do sistema: dois sistemas com as mesmas regras internas que possuam distribuições de estados de células diferentes, inicialmente, poderão formar padrões globais totalmente diferentes. *A priori*, isto deve ser levado em conta durante o desenho do nosso sistema: qual influência as condições iniciais tem e como elas alteram a estabilidade do sistema?

Na modelagem baseada em agentes, as trocas de informação e a formação de grupos podem ser compreendidas através da análise de redes dinâmica. Esta metodologia busca explicar a evolução das redes, que são as unidades de um sistema conectadas, tanto no seu crescimento, quanto na maneira pela qual os nós se conectam e no processo de interação entre suas unidades. Recentemente, alguns estudos mostraram que as redes do mundo real se formam de uma maneira peculiar [65]. Deu-se a esse padrão de formação o nome de *small-world* ou *scale-free*.

As ferramentas de mecânica estatística são muito úteis para descrever tais redes dinâmicas. Nesta abordagem, as redes são representadas por grafos. Uma breve introdução sobre este assunto é feita a seguir.

Um grafo é um par de conjuntos $G = \{P, E\}$, em que P é um conjunto formado por N vértices e E é um conjunto de n arestas que conecta dois elementos de P .

Os Grafos são formados por um número N de vértices conectados por n arestas escolhidas de alguma maneira a partir das $N(N - 1)/2$ possibilidades. Conforme $N \rightarrow \infty$, muitas propriedades dos grafos podem ser determinadas usando argumentos probabilísticos. Isso implica que todos os grafos possuirão ao menos uma propriedade. Chamamos essa propriedade de Q .

Normalmente, os grafos são construídos de maneira progressiva, começando com um determinado número de vértices e criando as interconexões sequencialmente. Assim, conforme enunciado por *Erdős* e *Rényi*, algumas propriedades importantes dos grafos surgem repentinamente. A probabilidade que um grafo com N vértices e $p = p(N)$ tenha a propriedade Q satisfaz as condições da equação 3:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P_{N,p}(Q) = \begin{cases} 0 & \text{if } \frac{p(N)}{p_c(N)} \rightarrow 0 \\ 1 & \text{if } \frac{p(N)}{p_c(N)} \rightarrow \infty \end{cases}$$

Equação 3

Sabe-se que o número de vizinhos de um dado vértice pode aumentar com o aumento do tamanho do sistema, assim, na teoria dos grafos aleatórios, a probabilidade de um nó se conectar a outro, geralmente é dado como uma função de N .

Três conectividades de rede são muito estudadas: redes regulares, redes “*small-world*” e redes aleatórias [65]. Veja na figura 3.

Figura 3: Tipos Comuns de Redes

A primeira pista de que as redes reais não manifestavam propriedades totalmente aleatórias veio através do estudo da Word Wild Web. Durante esse estudo, percebeu-se que a probabilidade de que uma página Web tenha exatamente k links, isto é, que ela tenha grau k , não seguia uma distribuição de Poisson aleatória, mas sim uma distribuição conhecida como Lei de Potência [65].

O estudo das redes dinâmicas deve ser levado em consideração na modelagem do movimento dos nós do nosso sistema. Estudos mostram que os homens não se aglomeram aleatoriamente [66]. Além disso, muitas vezes existem grupos de pessoas que estão próximas separadas por uma longa distância de outro grupo. Tudo isso pode influir na análise dos algoritmos para o sistema que será tratado nesta dissertação.

Por fim, os modelos de sistemas físicos, como o modelo de *Ising*, também contribuíram para os avanços da modelagem por agentes, principalmente no entendimento da influência dos vizinhos no comportamento de um agente.

2.6.2 CARACTERÍSTICAS DAS MBA

A modelagem e simulação baseadas em agentes (MSBA) surgiu como uma ferramenta de análise de sistemas em que há um alto grau de interdependência,

heterogeneidade e complexidade de suas partes, o que torna complicado a sua modelagem somente com as técnicas tradicionais.

A grande vantagem das modelagens baseadas em agentes é que as trocas entre os elementos estudados passam a ser apenas uma parte do sistema juntamente com outras entidades do ambiente que também podem ser modelados e simulados. Por exemplo, para o nosso sistema cooperativo, tanto a rede formada pelos aparelhos móveis, quanto o ambiente onde eles se encontram e as pessoas que participam das transações podem ser modeladas conjuntamente. Dessa maneira, as MSBA permitem que as redes móveis evoluam em meio às interações humanas, ou seja, a MBA é uma ferramenta capaz não só de modelar parâmetros de baixo nível das redes de telecomunicações, mas também conceitos mais abstratos como agrupamentos sociais, regras de circulação e topologia do ambiente.

Os agentes são componentes autônomos e autocontidos, com vontade própria e capacidade de interagir com seu ambiente e entre si. Essa interação pode acontecer de duas maneiras: (a) por meio de reações diretas a estímulos; (b) e/ou por adaptações mais complexas e inteligentes, em que os agentes aprendem com o meio e com outros agentes. Assim, além de possuir algumas regras de comportamento e utilizá-las em diferentes intensidades de acordo com os estímulos, os agentes também podem alterá-las/adaptá-las de acordo com o contexto.

As decisões de um agente são tomadas individualmente ou coletivamente. Cada agente pode ter um grau de influência e uma visão do meio diferentes. Neste sentido, os agentes são muitas vezes componentes heterogêneos [45].

2.6.3 COMO MODELAR

Existem vários níveis de abstração na modelagem de um problema. No nível mais baixo, os objetos são modelados de acordo com suas características físicas reais (distâncias, mobilidade, propagação). Esses modelos são geralmente mais difíceis de serem trabalhados [34, 48]. Ao mesmo tempo, alguns sistemas (ou

subsistemas) exigem essa aproximação realística. Algumas redes de comunicação, por exemplo, precisam levar em consideração os tempos de atraso na propagação, a sobrecarga de trabalho de cada nó e a sua capacidade real de processamento e armazenamento para que sua simulação forneça resultados úteis para o design [30]. Hardware de Computador e Sistemas de Controle e Automação também se encontram nesse mesmo nível de abstração. Por outro lado, alguns subsistemas podem ser modelados mais abstratamente, utilizando-se médias e junção de variáveis no lugar de trajetórias específicas e posições precisas no espaço. Saber os parâmetros que podem ser desconsiderados ou agregados e com qual nível de abstração as propriedades de um objeto deve ser analisado, afeta enormemente a verossimilhança e a consistência da simulação, ao mesmo tempo em que facilita ou dificulta a criação do modelo. Esse é o primeiro *trade-off* de uma modelagem.

Uma grande vantagem da modelagem baseada em agentes é que começamos o modelo através da perspectiva do agente. O problema é que, como no nosso caso, nós gostaríamos de responder como os agentes devem se comportar para que o comportamento do sistema esteja de acordo com alguns requisitos (qualidade de serviço, autonomia, área de alcance, etc.). Devido às interdependências e às não linearidades internas ao sistema, não é trivial prever como o comportamento dos agentes modifica o sistema como um todo.

Algumas situações como essa fazem com que a combinação da modelagem baseada em agentes com alguma das técnicas tradicionais apresentadas seja interessante. Por exemplo, a DS pode ser útil para identificarmos relações de causa e efeito dentro do sistema, bem como as principais variáveis globais de influência no todo. A SED integra incertezas estocásticas e oferece uma excelente abordagem em termos de processos passo-a-passo que acontecem no sistema. As TOs também podem ser utilizadas para se chegar em um comportamento sistêmico próximo do

ótimo, através de regras e restrições individuais. Tudo isso pode ser integrado na modelagem baseada em agentes [48, 49, 50].

Assim, essa modelagem deve ser entendida como uma importante extensão para as técnicas comuns de modelagem e simulação e deve ser utilizada em conjunto para simular partes críticas de um sistema.

A lista a seguir foi elaborada para servir de guia na definição de quando um sistema deve ser modelado através da combinação de agentes com outras técnicas [34, 48].

- a) A representação por agentes é natural ao nosso sistema?
- b) As decisões e comportamentos podem ser definidos discretamente?
- c) É importante que os agentes adaptem e alterem seus comportamentos?
- d) É importante que os agentes aprendam e apresentem um comportamento dinâmico?
- e) O relacionamento entre os agentes é dinâmico (se forma e se dissolve)?
- f) É importante que os agentes se organizem em grupos (*clusters*)?
- g) A localização dos agentes influi no seu comportamento e nas suas interações?
- h) O comportamento no passado tem pouca influência no comportamento futuro?

2.6.4 PROBLEMAS COMUNS E VALIDAÇÃO

Nesta sessão, é feita uma breve investigação sobre as principais dificuldades encontradas no desenho de sistemas móveis cooperativos baseados em modelagem e simulação. Principalmente, nos fatores que reduzem a credibilidade dos resultados simulados.

As simulações são muito utilizadas na análise do desempenho de sistemas anteriormente ao seu desenvolvimento e também para conhecermos respostas e

alternativas possíveis dada uma alta gama de condições. Claramente, para que uma simulação seja eficiente, ela precisa permitir uma avaliação teórica que reflita substancialmente o sistema real em questão. Assim, toda simulação deve ser seguida de uma fase de validação.

Três dos softwares de simulação de redes de telecomunicações mais utilizados, OPNET, Network Simulator (ns-2) e *Global Mobile Information Systems Simulation Library* (GloMoSim), foram comparados a partir da implementação de um protocolo simples de comunicação cooperativa conhecido como *flooding* (inundação) [48]. De acordo com este protocolo, as informações produzidas em um nó são transmitidas através de toda a rede, chegando a todos os nós conectados. Após as análises, percebeu-se que as três ferramentas apresentaram resultados diferentes. Isto, obviamente, invalidaria a simulação de pelo menos duas dessas ferramentas, no melhor caso.

Essa situação agrava-se mais com os resultados dos experimentos realizados por *Kwan-Wu Chin* e sua equipe [10]. Através da implantação experimental de uma pequena rede de comunicação cooperativa por múltiplos saltos, os autores tiveram conclusões muito diferentes daquelas encontradas teoricamente a partir das simulações: as transmissões com mais de um salto não são nada confiáveis e, conseqüentemente, os protocolos nunca escolhem os vizinhos mais próximos para iniciar a comunicação, transmitindo sempre na maior potência possível para aumentar o raio de alcance. Os protocolos utilizados tinham sido validados por simulação, mas não apresentaram o mesmo desempenho em um cenário real.

Para evitar que resultados inverossímeis como estes sejam encontrados e aumentar a credibilidade das simulações em sistemas de telecomunicações, alguns cuidados são necessários [30, 48]:

- a) Validação Estatística: integrar fontes de valores aleatórios e realizar uma quantidade de simulações adequada;

- b) Uso de Modelos de Rádio e Transmissão apropriados: os modelos de transmissão de dois raios e de sombras proporcionam um ambiente mais realístico na simulação que pode alterar sobremaneira os resultados encontrados;
- c) Tráfego de Dados realístico: é necessário basear o tráfego de dados de acordo com a aplicação/serviço a ser implantado (telefonia, vídeo *on-demand*, troca de arquivos, etc.). Na realidade, um protocolo A pode apresentar um desempenho melhor que um protocolo B quando a taxa de bits é de 50Mbps mas pode ser inferior a taxas de 500Mbps ou 5 Mbps, por exemplo;
- d) Análise da sensibilidade do modelo: é preciso identificar qual é a significância dos fatores escolhidos para o modelo a ser simulado. ;

Além disso, modelos de mobilidade dos nós pouco realísticos também podem levar a conclusões prematuras em relação ao desempenho do sistema [48].

3 PRINCÍPIOS DE TELECOMUNICAÇÃO

O desenho e o desenvolvimento de sistemas complexos ainda é um desafio para a engenharia [23, 25]. A complexidade de redes com alto dinamismo e em larga escala está orientando a criação de novos paradigmas tecnológicos: o modelo das telecomunicações caminha para uma condição em que os dispositivos já não necessitam tanto da supervisão humana e podem operar com maior autonomia e transparência.

Assim como fez Shannon em sua Teoria Matemática das Comunicações, novas direções de pesquisa procuram estabelecer quais são os novos limites teóricos da capacidade dos links para redes assim [26, 27, 28]. Além disso, a natureza distribuída e adaptativa desses sistemas abre espaço para contribuições da biologia e da física no desenho de protocolos de comunicação mais complexos e que sejam capazes de manter um alto grau de confiabilidade, de autossuficiência e um tempo de resposta adequado.

Sistemas móveis (dinâmicos), que não possuem infraestrutura pré-estabelecida e que necessitam da cooperação de outros nós para realizarem a comunicação são referenciados na literatura por termos diferentes. Pode-se destacar: sistemas de comunicação colaborativa ou de comunicação cooperativa, sistemas sem infraestrutura, redes *mesh* móveis, redes de múltiplos saltos sem fio, redes móveis *ad-hoc* (MANETs), entre outros.

Vários protocolos e algoritmos já estão desenvolvidos para redes desse tipo. Com efeito, um grupo de estudo viabilizado pelo IETF (*Internet Engineering Task Force*) é responsável por promover o amadurecimento dessa tecnologia. Este grupo está sendo responsável pela criação de um novo padrão conhecido como 802.11s (MANET), que não chega a colocar totalmente em cheque os paradigmas dos sistemas centralizadores - e caros - já existentes, mas que serve como um passo inicial pelo menos para a coexistência das duas redes [44].

Este capítulo destina-se a fazer uma análise generalista dos princípios de telecomunicações inerentes às redes sem fio, sem infraestrutura e que funcionam de modo colaborativo, bem como realizar um estudo teórico dos principais problemas encontrados nessas redes, identificar o estado da arte dos protocolos e algoritmos desenvolvidos para tratá-los e fazer uma análise das tecnologias existentes que mais se assemelham em natureza com a rede que pretende-se simular.

Isto será útil para podermos elucidar requisitos e restrições de um esquema de comunicação móvel sem nenhuma entidade central e sem infraestrutura pré-estabelecida capaz de (a) efetuar chamadas em tempo real; (b) realizar conferências entre os usuários e (c) fazer buscas de conteúdo multimídia na rede e realizar transações desses dados entre os usuários, adaptando-se à topologia dinâmica da rede.

Uma breve análise dos princípios de telecomunicação envolvidos com o desenvolvimento de sistema móveis distribuídos é realizada. Estes conceitos são necessários durante a criação do modelo a ser simulado e orientam as análises dos protocolos.

3.1 MECANISMOS DE ACESSO AO MEIO

Alguns mecanismos de acesso ao meio apresentam mais vantagens para sistemas distribuídos que outros [32]. A seguir, apontamos as principais dificuldades e limitações na utilização desses mecanismos em redes descentralizadas e dinâmicas. Nosso intuito é orientar na escolha dos protocolos de acesso ao meio, bem como analisar os principais problemas neste nível:

- a) *Time Division Multiple Access (TDMA)* – não há uma entidade coordenando as trocas e sincronizando os dispositivos como no caso das redes celulares. No entanto, é possível que exista um preâmbulo antes dos pacotes transmitidos que faça com que o relógio dos dispositivos na mesma área de transmissão se sincronize temporariamente; Este preâmbulo aumenta o

tempo em que um dispositivo acessa o meio e assim, os gastos com a transmissão e a ocupação da rede.

- b) *Frequency Division Multiple Access (FDMA)* – Não necessita de sincronização temporal, porém torna-se ineficiente em redes muito densas, pois a quantidade de canais é limitada. A solução tradicional para isso é a utilização de um mecanismo híbrido que combina divisão no tempo e na frequência conhecido por FTDMA;
- c) *Code Division Multiple Access (CDMA)* – A maior dificuldade é em manter os acordos de salto de frequência e dos códigos de chip devido à mobilidade e o não sincronismo dos relógios dos nós;
- d) *Orthogonal Frequency Multiple Access (OFDM)* – A limitação também está em manter os acordos de quais frequências utilizarem, bem como a sincronização dos nós comunicantes. Esta tecnologia permite com que a banda seja alocada de forma mais eficiente, de acordo com a necessidade de algum nó – subfrequências são alocadas de acordo com a largura de banda requisitada por um nó. Com efeito, como não há uma entidade central, é necessário que os protocolos lidem com entidades “gulosas” para que os recursos não sejam consumidos com somente poucos nós [52], mas sejam igualmente distribuídos entre todos. Fazer isso de maneira distribuída é uma questão interessante de pesquisa.

3.1.1 Problema do Hidden Terminal

O problema do terminal escondido ou “*hidden terminal problem*” é um problema inerente aos mecanismos de acesso ao meio e acontece quando um rádio A quer transmitir alguma informação para B ao mesmo tempo em que outro rádio C. Quando o raio de transmissão de A não for suficientemente grande para englobar o

nó C, este último não escuta a transmissão de A e continuará enviando seu pacote, gerando assim uma colisão. A figura 4 ilustra esse problema.

Figura 4: Terminal Escondido

O artigo [53] analisa esse problema. A principal solução adotada para minimizar esse problema consiste no envio de pequenos pacotes do tipo RTS (*request to send*) para o nó de destino, que deve responder com um CTS (*Clear to Send*) se ele recebe o RTS adequadamente. Só assim, o pacote de dados será transmitido. Assim, quando o nó B enviar a mensagem CTS para o nó A, o nó C também receberá este pacote e não enviará ao mesmo tempo. Algumas melhoras como a inclusão do tamanho do dado a ser transmitido no pacote RTS pode ser realizadas, dessa maneira, os nós que receberem a mensagem de CTS poderão estimar o tempo que eles devem esperar para que o canal esteja livre novamente.

3.1.2 Problema do Exposed Terminal

O problema do terminal em exposição acontece quando há duas comunicações diferentes que são vizinhas e acontecem ao mesmo tempo. Digamos que B quer se comunicar com A e C quer se comunicar com D. Quando B transmite para A, C também escuta essa transmissão e deixa de transmitir desnecessariamente. Veja a figura 5:

Figura 5: Terminal em Exposição

Este problema também pode ser resolvido através da troca de pacotes RTS e CTS [54]. No caso, quando B enviar um RTS para A, este sinal também será escutado por C. Caso C não escute a resposta CTS de A, ele saberá que o canal está livre e não atrasará a sua transmissão para D.

É importante ressaltar que colisões ainda podem acontecer entre pacotes RTS, porém, devido ao pequeno tamanho que eles tem, estas colisões não são tão significativas quando as colisões de dados [54].

3.2 MODELOS DE CONSUMOS DE ENERGIA

3.2.1 PERDAS DE TRANSMISSÃO

Os modelos atuais classificam as perdas de transmissão dos sistemas móveis em dois grupos: perdas básicas de potências e efeitos de desvanecimento (*fading*) [13].

3.2.1.1 PERDAS BÁSICAS

As perdas básicas são modeladas através da equação 4:

$$P_r = k * \frac{P_t}{r^\alpha}$$

Equação 4

Em que α assume valores acima de 2, dependendo dos fatores do ambiente em questão.

Além das perdas básicas, os modelos de transmissão também podem considerar a presença de ruídos e as perdas devido ao fenômeno de desvanecimento *fading*.

3.2.1.2 RUÍDO

Os ruídos presentes no ambiente podem ser modelados em termos de uma distribuição gaussiana complexa com média nula (ZMCGN) [45]. Esta variável

aleatória representa as alterações dos sinais transmitidos devido aos ruídos presentes no ambiente.

3.2.1.3 DESVANECIMENTO (FADING)

A presença de reflexões e de sombras no ambiente pode fazer com que vários sinais emitidos cheguem a um receptor com amplitudes, diferenças de fases e atrasos diferentes. Esses múltiplos caminhos podem gerar interferências construtivas ou destrutivas no receptor e devem ser levados em conta no modelo da potência recebida, juntamente com as perdas básicas e os ruídos gaussianos. O desvanecimento pode ser de dois tipos, rápido e lento.

Um modelo apontado na literatura para o desvanecimento é o de uma variável aleatória com distribuição do tipo log-normal e desvio padrão variando de acordo com a distância logarítmica usada no modelo de perdas básicas [55]. Outros modelos consideram essa variável aleatória como sendo gaussiana com média nula [67].

Em ambientes urbanos com muitas reflexões e onde não há predominância de um caminho direto em relação aos outros, o modelo de distribuição mais apropriado é do tipo *Rayleigh* [55], que é a composição de duas variáveis aleatórias não correlacionadas com média zero. Nos sistemas em que há uma linha de visão predominante, o modelo estocástico de Rice é mais coerente [56].

3.2.2 POTÊNCIA CONSUMIDA NOS APARELHOS

Em sistemas de telecomunicação, os modelos de consumo energético devem ser os mais realísticos possíveis. Estes sistemas são tão sensíveis à potência que simulações mostraram grandes diferenças no desempenho de protocolos pelo simples fato de estes considerarem ou não a potência consumida em modo de espera (*idle*) durante sua modelagem. O consumo energético dos dispositivos móveis pode ser modelado como a soma das seguintes potências:

$$P_{tot} = P_{transmissão} + P_{recepção} + P_{processamento} + P_{espera}$$

O modelo matemático de cada elemento dessa equação é mostrado em [4].

É notável que Potência de transmissão é da ordem de 1000 a 10000 vezes maior que a Potência de processamento e inúmeras vezes maiores que a potência de recepção e de espera [4].

Como a potência de transmissão representa a maior porcentagem do consumo total de um aparelho móvel, sua redução é imprescindível para uma melhora significativa da autonomia desses dispositivos.

3.3 COMUNICAÇÃO POR MULTISALTOS

A comunicação por múltiplos saltos possibilita a redução da potência de transmissão entre os nós, o que gera uma série de vantagens em nível de potência de transmissão e sobre os fenômenos de desvanecimento do sinal, já que permite menores perdas e menores atrasos dos sinais transmitidos. A redução de potência durante a transmissão também pode significar a diminuição das interferências entre símbolos e entre canais, o que deve melhorar a relação sinal ruído (SNR) e reduzir, consequentemente, a quantidade de reemissões devido a perdas e interferências [57].

Supondo que o nó A precise enviar um pacote de informações para o nó C, neste caso, existem duas maneiras de se fazê-lo:

- a) o nó A pode passar essa informação diretamente para o nó C;
- b) o nó A pode passar essa informação para o nó intermediário B que repassará o pacote para o nó C.

Observamos através do modelo de perdas de transmissão, que transmitir através de vários caminhos mais curtos é muito vantajoso em termos energéticos [4, 13].

Outras vantagens em se usar um esquema de múltiplos saltos na comunicação é a possibilidade de (a) se realizar agregação de informações durante o processo de transmissão, ou ainda (b) obter informações de pacotes transitando na rede que sejam úteis a vários nós, como pacotes com rotas para algum nó, informações de serviços da rede, indisponibilidade de algum, estado da topologia, etc..

Os múltiplos saltos também permitem que trocas de pacotes aconteçam por vários caminhos alternativos. Por sua vez, isso contribui para o aumento da robustez do sistema. Assim, quando uma rota não estiver disponível, basta que o nó escolha outro caminho para continuar sua transmissão. Apesar dessa vantagem, os algoritmos para controle e organização de várias rotas não são triviais (alto número de possibilidades e de estados da rede). Além disso, muitas vezes não basta ter um caminho que conecte um nó A a outro nó B. É preciso que o nó atinja seu alvo dentro de limites impostos pela qualidade de serviço requerida, o que pode dificultar ainda mais o estabelecimento da melhor rota.

3.3.1 BROADCAST STORM PROBLEM

A tempestade de *broadcast* tempestade acontece quando um nó sem fio pretende realizar um *flooding* dentro da rede. Como a propagação eletromagnética é omnidirecional, muitas transmissões acabam sendo redundantes. Com as repetições dos pacotes entre vizinhos essa redundância fica maior ainda. Além disso, como os nós estão geralmente próximos uns dos outros, várias colisões podem acontecer. Assim, é preciso que haja um mecanismo de contenção, para que as retransmissões não aconteçam infinitamente.

Algumas soluções para esse problema foram propostas na literatura. Elas são baseadas no controle de pacotes já recebidos, na espera de um tempo aleatório antes de retransmitir um pacote, na escolha aleatória entre transmitir ou se calar, etc.. O controle de pacotes permite que pacotes já recebidos e passados para frente

não sejam repassados novamente. Acrescentar um tempo aleatório antes de cada transmissão permite dar um tempo para os vizinhos de um nó receber o pacote de outras origens ao mesmo tempo em que aumenta o tempo para que toda rede seja abordada. Já a escolha aleatória entre transmitir ou não reduz por si só a quantidade de nós repetidores, mas pode deixar buracos em que a informação não foi passada. O artigo [58] apresenta outros mecanismos para se reduzir esse problema tais como formação de grupos ou a consideração da distância quando informações sobre a localização dos nós são acessíveis.

3.3.2 MINIMUM FORWARDING SET PROBLEM (MFSP)

O MFSP é definido da seguinte maneira: Dado certo nó A , encontramos os conjuntos de nós P_i formados por todos os seus vizinhos até o limite de i saltos de distância, sendo $i = 1, 2, 3, \dots, n$. O problema do conjunto mínimo destina-se a encontrar o menor subconjunto M_i capaz de fazer com que todo nó em P_i fique dentro da região de cobertura formada pelos nós de M_i .

Esse problema em sua forma geral é do tipo *NP-complete* (não há solução analítica), porém sua complexidade ainda não foi encontrada em contextos práticos de redes móveis *ad-hoc*. Recentemente, os autores [59] apresentam em seu artigo um algoritmo polinomial capaz de resolver esse problema para redes sem fio com modelo de transmissão em disco.

Outras variações para problemas semelhantes são conhecidas como *Minimum Broadcast Set Problem* e *Minimum Connected Dominating Set*.

3.4 DENSIDADE DOS NÓS E CAPACIDADE DA REDE

A densidade dos nós é definida como a quantidade de nós em relação à área em que eles se encontram. Ao mesmo tempo em que o aumento da densidade de nós proporciona vantagens na relação sinal por ruído por diminuir a distância de transmissão, pode-se ter uma deterioração na capacidade da rede [27].

Um estudo teórico concluiu que, aumentando a densidade da rede (quantidade de nós em certa área) por um fator K , reduzimos em média a distância de comunicação por um fator inversamente proporcional à raiz quadrada de K [13].

De maneira análoga, o modelo de *Gupta Kumar* [28] nos fornece uma equação de como a capacidade de uma rede se comporta de acordo com a quantidade de nós. Neste caso, a capacidade também é reduzida por um fator inversamente proporcional à raiz quadrada do número de nós totais.

A capacidade da rede é medida em bits-metro, que é o avanço em um metro de 1 bit indo em direção ao destinatário.

Assim, conforme N tende para o infinito, a capacidade da rede cai para zero. É importante ressaltar que os autores consideraram uma rede de N nós com localização arbitrária e fixa dentro de uma região de área unitária, em que cada nó pode transmitir a “ W ” bits por segundo.

Portanto, parece ser mais interessante projetar redes a múltiplos saltos sem fio com alguns poucos dispositivos para que sua taxa de transferência não decaia tanto com o aumento do número de usuários. Uma maneira de se contornar isso é fazer com que os nós só se comuniquem com os vizinhos mais próximos. Assim, a capacidade da rede não estará limitada à quantidade de nós totais, mas à quantidade de vizinhos [28]. Outro caso parecido é aquele em que há a formação de aglomerados de nós (*cluster*). Assim, pode-se eleger poucos nós do grupo para trocar informações com outros aglomerados. É claro que isto poderia gerar perdas em termos de qualidade de serviço ou gargalos devido à concentração das informações. Simulações de sistemas assim podem nos fornecer melhores respostas quanto a essas limitações.

3.4.1 DISTRIBUIÇÃO DOS NÓS E MOBILIDADE

Em um modelo mais simplista, poderíamos dizer que os nós estão distribuídos uniformemente em uma região. Esta situação é fácil de ser modelada, porém, não representa muito bem a realidade.

Na realidade, o que vai determinar como os nós serão distribuídos é dado pelos modelos de mobilidade. Alguns experimentos mostraram que simulações de protocolos de comunicação não apresentaram consistência com experimentos reais devido, entre outras coisas, à exagerada simplificação dos modelos de mobilidade [48]. Assim, um bom modelo de mobilidade tem papel fundamental na simulação de redes móveis. O livro [14] apresenta uma revisão de várias estratégias de mobilidade desenvolvidas e as classifica em 7 grupos de acordo com suas características [15]:

- a) individual;
- b) em grupo;
- c) auto regressiva;
- d) *flocking*;
- e) orientada a jogos virtuais;
- f) não recorrentes;
- g) em comunidade e variante no tempo;

Para nosso sistema, o modelo que mais se aproxima ao ambiente que gostaríamos de simular deve abarcar situações de alta mobilidade durante alguns períodos, seguido por estados semi-estáticos. Isso porque se pretende, inicialmente, modelar duas situações diferentes: a pessoa que vai trabalhar ou estudar e se desloca de sua residência até o local apropriado e a pessoa quando está em casa, no trabalho ou na escola. É preciso ressaltar que as pessoas parecem passar a maior parte do seu tempo em locais onde os nós serão quase sempre os mesmo, como em casa, no trabalho e na escola, por exemplo, e uma menor parte do tempo

em lugares com a presença semi-aleatória de outros nós, como em festas, *happy hours*, eventos, etc.. Isso deve ser considerado durante a escolha do nosso modelo de mobilidade.

3.5 CONECTIVIDADE DA REDE E RAIOS DE TRANSMISSÃO

Raios de transmissão adaptáveis apresentam vantagens energéticas por permitirem a utilização somente de uma potência mínima suficiente para atingir um nó com o qual quero comunicar. Não obstante, alguns problemas de topologia também aparecem quando um nó que envia um pacote e requer a confirmação do recebimento se o raio de transmissão do destinatário for menor do que o raio de transmissão da fonte [27, 28]. Além disso, se a rede não apresentar o mesmo raio de transmissão, possivelmente os enlaces formados em uma direção não serão válidos na outra direção, ou seja, os enlaces não serão bidirecionais.

Esse problema pode ser solucionado através de protocolos que transmitem a raios crescentes até que uma informação atinja o seu alvo vizinho. No caso do pacote de confirmação, poderíamos impor que eles sejam sempre enviados com a potência máxima de transmissão permitida. Além disso, após as primeiras trocas de pacotes, poderíamos utilizar uma espécie de inferência Bayesiana para tentar transmitir com o menor raio em relação à probabilidade de alcance (problema de otimização). Analisar as vantagens e desvantagens dessas duas aproximações não é uma tarefa trivial, mas pode ser mais facilmente estudada através de simulações.

Estas dificuldades trazem à tona outras questões de projeto. Imagina-se que um sistema seja desenvolvido permitindo apenas um nível de potência para todos os nós. Sendo assim, qual é o raio de transmissão comum ideal para essa dada rede? Esta questão é interessante, principalmente pelo fato de que um raio de transmissão muito grande acarretaria perdas de energia, aumento das interferências entre os vizinhos e, conseqüentemente, a diminuição da capacidade da rede: um nó só pode transmitir em certa frequência se ninguém da rede próxima está enviando na mesma

frequência. Ao mesmo tempo, se escolhermos um raio de transmissão muito pequeno, isso poderia levar a uma rede com baixa conectividade: poucos nós estão no raio de alcance um do outro [29].

Alguns autores apontam que o problema do raio de transmissão e da conectividade deve ser gerido na camada de roteamento, pois só ela é capaz de saber se um nó está conectado suficientemente ou não. Portanto, há uma interdependência entre o roteamento e o controle da potência de transmissão [26].

O problema da menor quantidade de nós ativos em uma rede para garantir o funcionamento não apenas de um ou poucos usuários, mas de toda a rede foi estudado analiticamente [60]. Porém, este estudo ficou limitado a redes muito pequenas, pouco úteis na prática. Extensões podem ser exploradas através de modelagem e simulação para redes maiores.

3.5.1 CRITICAL TRANSMISSION RANGE (CTR)

O problema do raio de transmissão crítico pode ser descrito da seguinte maneira: assumimos que n nós estão localizados em uma região R . Qual é o menor valor do raio de transmissão idêntico para todos os nós tal que todos os nós estejam conectados na rede [29]?

Este problema é facilmente resolvido quando a posição dos nós é conhecida, porém este não é o cenário do nosso sistema. Além disso, uma aproximação estatística pode ser adotada. A pergunta então passa a ser: dada uma distribuição de nós, qual é o raio mínimo que apresenta a maior probabilidade de que todos os nós estejam conectados? As teorias apresentadas na literatura para lidar com esse problema são: *Continuum percolation*, *occupancy theory*, *geometric random graphs*. Este problema também pode ser abordado através de simulação dado um modelo de rede.

3.5.2 MINIMUM ENERGY BROADCAST TREE PROBLEM (MEBTP)

O MEBTP é assim definido: dada uma rede comunicação sem fio com raios de transmissão ajustáveis, qual é o menor raio de transmissão que permite que uma fonte A envie um pacote de informações para todos os nós da rede, de acordo com o modelo de perdas.

Através de análises por grafos, foi demonstrado que o MEBTP é um problema do tipo *NP-complete* [63]. Pode-se aproximar de uma solução ótima para esse problema através de modelagens e simulações baseadas em agentes.

3.6 QUALIDADE DE SERVIÇO (QoS)

Um serviço com qualidade é conseguido quando seus pacotes são entregues em tempo real, com cadência e perdas limitadas, de acordo com as exigências da aplicação. Existem várias maneiras de se atingir isso em uma rede. As soluções vão desde o aumento da largura de banda, que também aumenta a capacidade de se transmitir bits (ainda que isso não seja suficiente para flutuações de tráfegos), até a priorização de pacotes e predição do comportamento das aplicações (alocação eficiente dos recursos disponíveis).

As principais medidas para a qualidade de serviço são:

- a) O atraso (*delay*): tempo que um pacote leva para chegar de um ponto a outro da rede;
- b) A taxa de perdas: quantidade de pacotes que são enviados e não são recebidos pelo destinatário;
- c) Taxa de erros dos nós: quantidades de falhas que podem ocorrer com os nós e impossibilitam o recebimento de um pacote;
- d) Taxa de erros dos links: quantidade de falhas nos *links* como problemas de interferência e perdas de transmissão que impossibilitem o recebimento de um pacote.

Quando algum dispositivo entra ou sai das zonas de alcance de outros nós, é preciso que todos os aparelhos que dele dependam fiquem cientes. Pacotes que avisam o que está acontecendo na rede são denominados pacotes administrativos. Eles têm o papel de estabelecer, controlar, notificar e informar os nós sobre o estado da rede. Os outros tipos de pacotes que circulam na rede são denominados pacotes aplicativos, que são a real razão de ser das redes. Normalmente, definem-se quatro classes distintas para os pacotes aplicativos (classes do padrão UMTS):

- a) Conversacional (voz);
- b) *Streaming* (vídeo e áudio);
- c) Interativa (Web);
- d) *Background* (*download* de arquivos, etc.).

Estas classificações são importantes, pois a qualidade de serviço está diretamente relacionada à aplicação final e à capacidade de se separar seus pacotes.

Existem principalmente três modelos de QoS utilizados na internet: *IntServ*, *RSVP* e *DiffServ*. Essas técnicas são pautadas na premissa de que os pacotes aplicativos podem ser diferenciados. Assim, uma vez que a classificação é feita, pode-se marcá-los para que nós intermediários possam priorizar seu roteamento de alguma maneira seguindo uma hierarquia. Outra maneira de se atingir qualidade de serviço é através da reserva de banda para diferentes classes de pacotes. A diferenciação também permite que, em casos de congestões, pacotes menos prioritários sejam eliminados primeiramente [43].

O alto dinamismo das redes de comunicação cooperativo limita a utilização da maioria dos protocolos de roteamento utilizados atualmente na internet [44], pois verificamos que quanto maior o dinamismo de uma rede, maior é a quantidade de pacotes administrativos trocados.

Apesar de funcionais, os modelos *IntServ* e *RSVP* utilizados na internet não seriam suficientes no contexto de redes dinâmicas, principalmente porque para esses protocolos a quantidade de informações de estado crescem proporcionalmente com o número de trocas entre os nós. Além disso, a sinalização destes protocolos é feita em pacotes próprios, gerando concorrência com os pacotes aplicativos. Sendo assim, seria preciso determinar qual é a frequência mínima que esses pacotes devem ser trocados na rede a fim de informar corretamente os nós e qual é a frequência máxima para que isso não ocupe muita banda disponível. O *Diffserv* é o modelo que estaria mais orientado às redes móveis, porém ainda seria preciso adaptá-lo ao funcionamento descentralizado e através de múltiplos saltos [31].

Outra dificuldade que encontramos nestas redes está ligada às escolhas e manutenção dos caminhos de comunicação entre dois nós. Imagina-se a situação em que um dispositivo precisa entregar e receber pacotes de voz em tempo real para um nó que se encontra a 5 saltos de distância. Uma vez que os dois nós estabelecem por quais rotas é possível passar, quais critérios eles devem seguir para decidir qual é a melhor? O que deve ser feito para garantir que o desligamento de um dos nós intermediários não afete a comunicação como um todo? Como priorizar trocas e reservar banda suficiente para que os pacotes sejam entregues dentro dos limites de tempo?

A busca por respostas a essas e a outras perguntas se tornou um área de intensa pesquisa recentemente [43]. Outros problemas como a integridade, confidencialidade, autenticidade e disponibilidade dos pacotes também tem sido muito discutidos na literatura, mas só serão abordados de maneira indireta.

Estudos sobre o desempenho dos protocolos de roteamento com QoS começaram a aparecer a partir do final da década de 1990 [42]. No entanto, as dificuldades matemáticas das análises mesmo a partir de simulações, a falta de

modelos realísticos para a mobilidade e as simplificações dos modelos de tráfego da rede fazem com que esta área ainda esteja carente de pesquisas [43].

O primeiro modelo de QoS orientado totalmente a redes móveis cooperativas foi proposto por *Xiao* em 2000 e ficou conhecido como *Flexible QoS Model for Manet* (FQMM). Ele faz uma combinação entre *IntServ* por permitir a marcação de um campo de prioridade em cada pacote com o *DiffServ*, pois os pacotes podem pertencer a classes diferentes. Neste modelo, como no *DiffServ*, três tipos de nós são definidos: ingresso, egresso e interno. Os nós de ingresso são os produtores da informação que será transmitida, os nós egressantes são os destinatários finais e os nós internos são aqueles intermediários que servirão de relé para os pacotes. Diferentemente do *DiffServ*, o tipo de nó não está associado à sua posição física, pois isso não faz sentido em redes dinâmicas.

Outros modelos de QoS para redes móveis podem ser encontrados em [43].

3.7 PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO

Serão apresentados alguns protocolos de roteamento para redes móveis descentralizadas e sem infraestrutura. Todos eles tem como objetivo principal encontrar e manter um caminho de comunicação entre uma fonte e um destinatário. Para isso, eles implantam os seguintes serviços:

- a) Descoberta da Rota: construção de um caminho entre fonte e destinatário através dos nós vizinhos;
- b) Manutenção da Rota: atualização da topologia da rede, permitindo entrada e saída de novos dispositivos durante uma comunicação;
- c) Escolha da Rota: decidir qual é a melhor rota dentre todas as rotas possíveis.

A seguir, explicamos o funcionamento de alguns esquemas de comunicação encontrados na literatura. Mais tarde, o desempenho de alguns protocolos será analisado com nosso modelo de agentes.

3.7.1 DYNAMIC SOURCE ROUTING (DSR)

- Descoberta de uma Rota:

Quando um nó não possui nenhuma rota para certo destino, ele envia uma mensagem *route_request* em broadcast. À medida que os nós vizinhos recebem essa mensagem, eles a retransmitem com seu identificador acrescentado no cabeçalho. Para evitar loops e minimizar a tempestade de broadcast, os nós ignoram pacotes que já contenham seus *IDs* ou pacotes que já tenham passado por eles. Isso é feito até que o pacote chegue a seu destinatário ou passe por um nó que conheça uma rota até ele. Dessa maneira, o pacote pode ser retransmitido de volta com essas informações sobre a rota. Isto pode ser feito de duas maneiras: através da mesma rota por onde o pacote passou (assume-se que o enlace é bidirecional e as informações são enviadas através de um *request_reply*), ou a partir de um novo pacote *route_request* com destino ao nó que enviou o primeiro datagrama [32, 35].

Este protocolo assume que cada nó possui memória suficiente para armazenar as rotas de seu interesse, pois as informações são passadas pela rede através do cabeçalho do pacote, e ficam estocadas em cada nó. Além disso, este esquema de roteamento não necessita de trocas periódicas de informações sobre a topologia (reativo).

Mais inteligência pode ser adicionada neste esquema de comunicação: cada nó intermediário pode inferir informações sobre a topologia da rede a partir dos pacotes por eles recebidos; além disso, os pacotes também podem ser combinados para que outras informações sejam extraídas. Assim, é possível que os nós fiquem o tempo todo processando pacotes que por eles passam a fim de atualizarem suas bases de dados.

- Manutenção de uma Rota:

Durante a transmissão, cada nó é responsável por confirmar que o pacote foi bem recebido. Isso pode ser feito em baixo nível pela camada de enlace ou através de um *acknowledgement* (ACK) específico ao DSR. Se um erro de transmissão é detectado, outro nó deve ser escolhido para passar o pacote. Para isso, um pacote de erro geralmente é retornado à fonte das mensagens que enviará outro *route_request* e criará outra rota.

A confirmação dos pacotes recebidos pode gerar uma tempestade de broadcast se todos os nós tentarem responder ao mesmo tempo [58]. A prevenção desse congestionamento é feita através da adição de um atraso variável aleatoriamente calculado por cada nó antes de sua transmissão.

Dependendo do tamanho da rede é preciso definir um número máximo de saltos que um pacote pode fazer - seu Time To Live (TTL) - pois em cada transmissão, acrescentam-se alguns bits no cabeçalho. Para uma rede muito extensa o tamanho do dado pode acabar ocupando substancialmente a banda disponível.

3.7.2 GLOBAL STATE ROUTING (GSR)

O GSR foi pensado para que a camada de enlace trabalhe em seu ponto ótimo, chegando à sua máxima taxa de transferência sem perder o domínio da quantidade de pacotes de controle. No GSR, cada nó envia periodicamente uma tabela atualizada contendo sua visão da topologia da rede para seus vizinhos mais próximos. Diferentemente do *Link State*, protocolo no qual ele se baseia, o GSR não inunda a rede toda [33]. Sendo assim, cada dispositivo mantém uma lista dos seus vizinhos mais próximos (salto = 1), uma tabela contendo sua visão da topologia da rede, uma tabela que aponta para o próximo nó de acordo com o destino e uma tabela da distância até ele. Isso significa que o tamanho dos pacotes contendo essa

tabela pode ser muito significativo, o que é uma desvantagem. Uma alternativa para isso é o uso do protocolo *Fisheye* [32]. Uma entrada da tabela é atualizada toda vez que o dispositivo recebe um pacote contendo uma sequência maior. Uma vez que as informações da rede estiverem disponíveis, usa-se algum algoritmo de cálculo do menor caminho para computar a menor distância até o destino. Apesar de reduzir a quantidade de troca de pacotes de controle, a topologia da rede pode demorar alguns intervalos de atualizações para ser mantida. Em redes que apresentem uma maior mobilidade, isso pode significar que a organização física dos nós muda mais rapidamente do que a informação disponível nas tabelas, gerando muitas perdas de pacote. Alguns indicadores de desempenho mostraram por simulações que este esquema de comunicação apresenta uma acurácia menor do que o protocolo *Link State*, largamente utilizado nas redes cabeadas, porém não consome tanta banda por restringir as trocas em nível local. Além disso, a mobilidade dos nós tem um impacto negativo, bem como o uso de potências de transmissão muito altas, pois isto aumenta a quantidade de vizinhos visualizada por cada nó.

3.7.3 DESTINATION SEQUENCED DISTANCE VECTOR (DSDV)

O DSDV é um protocolo que utiliza o algoritmo *Bellman-Ford*. Ele foi baseado no protocolo de roteamento *Distance Vector*, em que cada roteador é responsável por manter e informar seus vizinhos sobre a distância até cada destino possível. As principais diferenças entre os dois, é que o primeiro necessita acrescentar um número de sequência para todas as atualizações de rota recebidas, a fim de garantir que as atualizações sejam feitas na ordem correta, evitando loops e inconsistências. Além disso, o DSDV evita flutuações da rede atrasando o envio de rotas aparentemente inconsistentes [37].

Cada nó envia periodicamente sua tabela de roteamento contendo a distância e o maior número conhecido de sequência para cada destinatário para todos os nós. A mensagem também contém um número para o pacote transmitido, incrementado a

cada atualização. Os nós que recebem esse pacote comparam suas informações com as informações de suas tabelas e a atualizam sempre que o número do pacote transmitido for maior que aquele armazenado em sua memória ou que o número seja igual, porém contendo caminhos menos longos até os destinatários.

Quando o nó percebe uma falha de algum dispositivo, ele atualiza a distância até esse nó para infinito e envia o pacote de atualização. Esse pacote irá trafegar pela rede avisando os outros nós da indisponibilidade desse dispositivo.

Existe um critério de priorização do envio de pacotes sobre novos destinatários encontrados, falhas de nós e rotas reparadas na rede em detrimento dos pacotes de atualizações com novas rotas.

Outra característica desse protocolo é que os nós podem atrasar o envio de pacotes baseado no histórico do tempo entre um pacote com informações de uma rota recebida e a melhor rota encontrada através de outro pacote com o mesmo número identificador.

3.7.4 AD HOC ON DEMAND DISTANCE VECTOR (AODV)

O AODV é baseado do DSDV, porém somente cria as rotas sob demanda [33]. Toda vez que um nó deseja enviar um pacote para outro nó e não conhece a rota, o processo é inicializado. O nó de origem envia um *route_request* em broadcast pela rede. Quando um dispositivo recebe esse pacote, ele grava em sua tabela de quem ele recebeu o pacote primeiro, criando assim uma rota reversa até a origem. Todos os outros pacotes com a mesma origem e o mesmo destino após este primeiro são ignorados. Sempre que o pacote chega até o seu destino final ou até um nó intermediário que já sabe o caminho restante, um *route_reply* é enviado de volta através do caminho que o *route_request* criou. Dessa vez, enquanto este pacote passa pelos nós, o reverso do caminho reverso é armazenado, ou seja, a rota direta é então criada. O AODV também usa um número de controle do pacote para facilitar as atualizações de rota.

Para saber se as rotas ainda estão disponíveis, os nós periodicamente difundem mensagens para monitorar a conectividade local com os vizinhos. Quando um nó detecta uma falha de comunicação com outro dispositivo, ele envia um *route_reply* pela rede colocando a distância até esse dispositivo como infinita. Isso faz com que as tabelas dos outros nós seja atualizada e força o reenvio de um *route_request* quando alguém quiser se comunicar com ele.

3.8 FUNCIONAMENTO DOS SISTEMAS SIMILARES

Enquanto o padrão IEEE 802.11s não estiver finalizado, a tecnologia existente que mais se assemelha ao sistema que se pretende estudar é o Bluetooth (IEEE 802.15.1). É feito um breve estudo desta arquitetura aprofundando mais em suas regras de estruturação da topologia e seus aspectos em termos de descoberta de dispositivos e de delay, afim de avaliarmos as diferenças dessas tecnologias em relação aos requisitos do nosso sistema de telefonia.

3.8.1 BLUETOOTH (IEEE 802.15.1)

O padrão Bluetooth foi concebido para que dispositivos pessoais troquem informações quando estiverem próximos. Ele não é adequado quando se pretende montar uma rede para possibilitar acesso remoto como no caso do padrão 802.11 (*wifi*).

A arquitetura das redes Bluetooth segue o formato de estrela, em que um único nó assume o papel de mestre e pode se comunicar com até sete nós diferentes, denominados escravos. A comunicação se dá sempre no sentido mestre-escravo ou escravo-mestre. Essas formações são conhecidas como *piconets*.

O papel de escravo e de mestre é flexível, podendo ser trocado durante a existência da rede. A união de mais de uma *piconet* é denominada *scatternet*. Neste sentido, um nó pode pertencer a mais de uma *piconet*, desde que ele não seja

mestre nas duas. Para que haja comunicação de um nó em duas *piconets* diferentes, é necessário que ele se comunique com as duas separadamente.

A comunicação entre escravos, um deles pode passar pacotes de informação para o outro através do mestre da rede, essa é a primeira maneira, ou um escravo pode formar sua própria *piconet* para poder se comunicar diretamente com outros escravos. Sendo assim, os escravos podem fazer o papel de pontes entre duas *piconets*.

Seguindo as regras acima, pode-se chegar à conclusão de que o tamanho máximo das *scatternets* é de 36 nós de acordo com o teorema de *Salonidis et al.* (2001).

Existem 79 canais de frequências disponíveis que podem ser utilizados. A extensão das frequências disponíveis vai de 2.400GHz até 2.4835GHz e a largura de banda para cada canal é de 1MHz, começando em 2.402GHz e indo até 2.480GHz (2MHz e 3.5MHz são deixados antes do primeiro e depois do último canal como banda de guarda). A comunicação entre os dispositivos é feita através do espalhamento espectral por saltos de frequência (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) e acontecem 1600 vezes por segundo de acordo com um padrão individual a cada dispositivo. Esse esquema de comunicação é interessante para reduzir a probabilidade de colisões de pacotes.

Existem três classes de dispositivos *bluetooth*. A mais tradicional (classe 3) apresenta potência de transmissão nominal é de 1mW, o que permite um alcance entre 10cm e 10m (outdoor). Existe também as categorias 2 e 1 que podem emitir em até 2.5mW e 100mW respectivamente, aumentando o alcance para até 100m. A tabela abaixo faz uma comparação entre a potência nominal de transmissão e o raio de alcance possível de diversas tecnologias sem fio.

Os dispositivos Bluetooth classe 1 requerem a existência de um sistema de controle de potência que otimize a energia gasta nas transmissões. O objetivo é

reduzir as interferências indesejadas em nós vizinhos ao mesmo tempo em que mantém uma relação sinal ruído aceitável entre os nós comunicantes. Isso é implantado através do protocolo LMP (*Link Management Protocol*).

Em termos de taxa de transferência, o padrão Bluetooth provê a atribuição de 1, 3 ou 5 slots de tempo de 625us para cada pacote. Cada slot permite uma taxa máxima de 172kbps, sendo 721kbps ou até três canais de voz o limite superior que se transmitir.

A pilha de camadas da arquitetura *bluetooth* é definida da seguinte maneira. A camada física RF é responsável por trabalhar na frequência de 2.4GHz, emitir de acordo com a potência necessária e realizar o espalhamento espectral. A camada de enlace abarca o controle de fluxo e o tamanho e tempo de cada pacote para o enlace. O mestre controla a largura de banda utilizada por cada enlace e que é atribuída a cada escravo, gerando uma flexibilidade nos tipos de enlaces possíveis. Ademais, o controle de autenticação, criptografia, distribuição justa entre escravos e controle de potência é feito na camada de gestão do enlace (link manager). Toda multiplexação, segmentação e reagrupamento de pacotes grandes é feito na camada de enlace lógica (*logical link layer*).

Uma característica interessante dessa arquitetura é que os dados de áudio são enviados diretamente da aplicação para a camada de banda base, de modo a suportar as exigências de tempo real desses pacotes. Nestas configurações, o procedimento de formação e de comunicação entre os participantes das *piconets* acontece da seguinte maneira:

- a) Cada nó possui um identificador global (ID Global) composto por 48bits. O dispositivo que inicializa uma comunicação será o mestre desta *piconet* até que haja uma transferência dessa responsabilidade. Para a inicialização da comunicação entre os dispositivos, é necessária a troca de dois parâmetros: o

padrão dos saltos de frequência do nó e o seu *clock* (para o cálculo do *clock* offset entre os dois nós que possuem relógios próprios não sincronizados).

- b) O padrão de saltos é inferido pelo ID Global inerente a cada nó. Assim, o mestre envia seu ID Global e o seu *clock* offset para os nós que serão escravos a partir do pacote FHS (*Frequency Hopping Synchronization*).
- c) Os nós escravos sincronizam seu relógio interno com o relógio do mestre para que o salto de frequências funcione.
- d) Quando um dispositivo entra em uma *piconet*, ele recebe um endereço de 3 bits chamado AMA (*Active Member Address*). O mestre da *piconet* pode colocar um escravo no estado "estacionado" (PARK), dar-lhe um endereço de 8bits denominado PMA (*Passive Member Address*) e atribuir seu AMA a outro escravo. Essa técnica faz com que a quantidade de nós comunicáveis dentro de uma mesma *piconet* aumente para até 264 (256 passivos e 8 ativos).

Os dispositivos podem assumir os seguintes estados:

- a) ativo: participação como transmissor ou receptor na *piconet*;
- b) *sniff*: monitora a *piconet* a uma taxa reduzida a fim de diminuir o consumo de energia;
- c) *hold*: apenas o temporizador do dispositivo permanece ativo quando não há necessidade de trocar nenhum dado;
- d) *park*: dispositivo permanece sincronizado, mas não pode trocar pacotes.

A conexão de baixo nível (físico) entre os dispositivos se dá da seguinte maneira. Os dispositivos fazem periodicamente um *scan* sequencial de alguns canais acordados para o início das conexões. O mestre faz uma solicitação de conexão para os nós vizinhos que se tornarão escravos. Os nós analisam o pacote e envia uma resposta. O mestre então envia informações como seu ID e seu atraso de relógio para os nós

vizinhos que respondem com mais um pacote. Feito isso, o mestre estabelece uma conexão com os escravos.

Devido à natureza assíncrona do *bluetooth*, há um *delai* teórico de conexão da ordem de 700ms. Em um cenário ideal, esse tempo é da ordem de 1 segundo, seguindo uma distribuição uniforme entre as mensagens iniciais passadas. Na prática, esse tempo pode levar alguns segundos.

Esse atraso de conexão impede que o *bluetooth* seja utilizado em contextos em que os dispositivos precisem de estabelecer conexões rapidamente. Pelo mesmo motivo, essa tecnologia também não é orientada a ambientes móveis: dispositivos com velocidade relativa de 36 km/h nunca conseguiriam se conectar.

A formação das *scatternets* se dá da maneira descrita a seguir. Inicialmente os nós trocam informações entre si através do mesmo processo de estabelecimento de conexão. Os nós que apresentarem os maiores endereços atribuídos pelo mestre são designados líderes e farão a comunicação com os mestres de outras *piconets* para formar essa aglomeração.

Todas as outras informações como os serviços providos pelos nós e pra quem as mensagens serão destinadas são geridas por outros protocolos uma vez que a comunicação foi estabelecida. Os protocolos de estabelecimento das *scatternets* mais comuns são: *Bluetree*, *Tree Scatternet*, *Bluenet* e *Loop Scatternet*.

Suas vantagens são que essa tecnologia já está implantada em vários dispositivos, ela permite comunicação através de múltiplos saltos e seus protocolos são orientados à auto-organização dos dispositivos comunicantes. As desvantagens são o baixo alcance de suas transmissões principalmente em ambientes fechados e o tempo significativo para a formação das redes, o que impossibilitaria aplicações em ambientes cuja topologia variasse muito, além da baixa capacidade do enlace, o que dificultaria as várias trocas necessárias para o estabelecimento de uma rede segundo a densidade de nós presentes. Por fim, vale ressaltar que essa tecnologia

não foi concebida para esse propósito, diferentemente das *Mobile Adhoc Networks*, as MANETS, que serão estudadas com nosso modelo baseado em agentes.

4 PROPOSTA DE ESTUDOS COM MODELAGEM

A proposta desta dissertação de mestrado é realizar a modelagem e simulação baseada em agentes de um sistema de comunicação sem fio e com funcionamento baseado em transmissões via múltiplos saltos. Este sistema deve ser capaz de fornecer um serviço de troca de pacotes de dados entre agentes pertencentes a uma rede. Isso deve acontecer de maneira totalmente descentralizada e sem a necessidade de nenhuma estrutura pré-estabelecida. Algumas aplicações como a notificação de presença (status), conferências telefônicas (naturais em redes múltiplos saltos), trocas e envios de arquivos, compartilhamento de *stream* de áudio e vídeos e jogos colaborativos também são funções desejáveis para este contexto, mas não serão abordadas no âmbito este trabalho.

Nosso trabalho consistirá em elaborar modelos, algoritmos e protocolos de comunicação, testá-los e propor modificações, a fim de orientarmos o desenho, a parametrização e o desenvolvimento de um sistema como este na prática.

4.1 ELABORAÇÃO DOS MODELOS

A elaboração dos modelos foi realizada como segue.

4.1.1 Modelo de mobilidade;

Existem dois modelos de mobilidade usados nas simulações:

- a) Modelo de movimentação intensa: deslocamento de um ponto até outro em taxas gradualmente altas;
- b) Modelo estático ou com pouco movimento: em que os movimentos dos nós acontecem em taxas relativamente baixas, i.e., nulas;

Cada um desses modelos serve para descrever um conjunto de situações da vida real. Por exemplo, o primeiro modelo poderia ser usado para descrever o deslocamento de uma pessoa saindo de sua casa e chegando ao trabalho. Já o segundo modelo, pode representar o tempo em que a pessoa está parada em casa ou no trabalho, por exemplo. O nosso modelo de mobilidade é implantado na prática como passos dados em direções aleatórias segundo uma probabilidade qualquer. Os valores dos passos são definidos de acordo com o raio de transmissão.

Apesar de não serem muito realísticos, esses modelos devem nos fornecer informações suficientes para a análise do nosso sistema: qualitativamente, espera-se que o modelo em que todos os nós estão em movimentação intensa forneça valores de parâmetros mais robustos para o sistema ao passo que apresente piores desempenhos do que qualquer outro modelo de movimentação realístico.

- Modelo de perdas de transmissão;

O modelo de perdas de transmissão deverá ser o mais realístico possível, levando em consideração as perdas básicas, os ruídos e interferências entre símbolos e canais, os efeitos do desvanecimento e os tempos de espera dos rádios, conforme mostramos no terceiro capítulo. Para fins deste trabalho, todas essas perdas de transmissão foram agregadas em uma variável denominada interferência. Esta interferência é representada pela probabilidade de que a mensagem transmitida não chegue até alguns dos vizinhos que se encontram dentro do raio de transmissão utilizado. Assim, o desempenho do sistema pode ser testado para diversos graus de perdas de pacote (interferência).

- Modelo de acesso ao meio

O modelo de acesso ao meio que consideramos é do tipo CDMA com saltos de frequência a partir de uma quantidade pré-definida de canais. Cada nó fará o salto de frequência de acordo com o seu número de identificação tal qual acontece no padrão Bluetooth. A alocação de banda conforme a demanda - como acontece no padrão OFDM - não é tão importante para esse sistema de telefonia, já que os nós

geralmente fazem apenas uma ligação com outro nó a cada instante, caracterizando bandas relativamente constantes. Ou seja, os agentes necessitam de uma mesma quantidade de banda independentemente. Esquemas de alocação customizada de recursos seriam mais útil em sistemas que permitissem outros tipos de fluxos de dados, o que não acontece nesta primeira abordagem. Cabe lembrar que não é escopo deste trabalho estudar as conferências em que um número variado de nós envia mensagens entre si. Os erros provenientes do acesso ao meio também são agregados probabilisticamente através da interferência durante a transmissão da mensagem de um nó para seus vizinhos.

- Modelo do protocolo de roteamento

Para testarmos nosso modelo, é utilizado o protocolo de inundação da rede conhecido como *flooding*. Esta primeira aproximação pode ser utilizada para calibrar nosso modelo para as outras simulações realizadas. Esta estratégia é evocada a cada nova necessidade de descoberta de rota entre dois nós. Em seguida, outros protocolos capazes de utilizarem mais informações presentes na rede são testados. Nosso intuito é de aperfeiçoar a relação entre a quantidade de mensagens recebidas e a energia gasta durante as transmissões com o menor impacto possível na quantidade de mensagens perdidas e no número de saltos médios para que uma mensagem chegue a seu destino. Optamos por utilizar um protocolo de comunicação baseado no OLSR, por este ser de natureza mais adequada para sistemas móveis, já que as rotas são descobertas segundo a demanda. Este protocolo é capaz de encontrar e de manter uma rota de comunicação entre dois nós quaisquer, além de evitar o problema conhecido na literatura como tempestade de pacotes “*broadcast storm problem*”, como apresentado no capítulo 3. Comparações com outras ferramentas de simulação podem ser feitas na tentativa de validar nossos modelos, ainda que, como mostramos anteriormente, nenhum dos simuladores existentes apresenta muita coerência uns com os outros quanto ao

desempenho dos protocolos que eles simulam [48]. Além disso, testamos esquemas de comunicação baseados em transmissões com raio fixo para todos os nós e com raio variável para cada um. O protocolo que permite a presença de raios diferentes entre os agentes funciona de acordo com diferentes estratégias para a escolha, notadamente o número de vizinhos conhecidos por cada nó.

Nosso protocolo de comunicação é baseado em informações da rede que são encapsuladas nas mensagens durante trocas entre o nós. A mensagem trocada contém os seguintes parâmetros:

- a) Tipo: mensagens do tipo 1 são mensagens enviadas para se descobrir uma rota entre dois nós (origem e destino); mensagens do tipo 2 são mensagens enviadas quando já se conhece e tenta-se passar por uma rota determinada.
- b) Identificador da mensagem: o identificador é o “id” das mensagens. Junto com a informação da origem e do destino, serve para evitar o “*broadcast storm problem*”.
- c) Origem: este campo contém o número identificador do nó originário da ligação;
- d) Destinatário: este campo contém o número identificador do nó destinatário da ligação;
- e) Caminho: o caminho é um vetor contendo o identificador do nó de origem e de destino da mensagem, bem como todos os identificadores dos nós intermediários por onde a mensagem passou primeiramente até chegar ao destinatário. Por exemplo, se o nó A quer enviar uma mensagem para o nó B, seu caminho será [A C D E F B], se a mensagem tiver passado sequencialmente pelos nós C, D, E e F até atingir B. Além disso, esse caminho deve ser o primeiro caminho encontrado (caminho mais rápido). As rotas alternativas, ainda que eficazes, são eliminadas por não serem as mais eficientes.
- f) Ttl: o ttl (“time to live”) é um parâmetro que restringe a quantidade de saltos da origem até o destinatário. Após esse número, todas as mensagens são

ignoradas pelos nós. Por exemplo, para um ttl de valor cinco, somente é permitido que uma mensagem dê 5 saltos contados a partir da origem até o destino, ou seja, considerando o exemplo anterior, supondo um caminho para se chegar de A até B valendo [A C D E F G B], ainda que, em tese, a mensagem chegue até B no sexto salto, ela será descartada por G, quando este receber a mensagem de G e perceber que ainda não é o destinatário.

- g) Potência de transmissão: pode-se incorporar possíveis valores para a potência de transmissão da mensagem (supondo 1 para 1dB, 2 para 2dB, 3 para 3dB) afim de podermos enviar um ACK (*acknowledgment*) durante uma certa transmissão quando um vizinhos receber uma mensagem. Este parâmetro é necessário para simulações em que o raio de transmissão seja variável e permite estimar o valor da potência que uma resposta deverá ser enviada para que chegue até a origem.

Supondo uma ligação de A para B, nosso protocolo funcionaria da seguinte maneira. Inicialmente, A, um nó aleatoriamente escolhido, cria uma mensagem no seguinte formato:

tipo	msg-id	origem	destino	caminho	ttl	pt
1	1	A	B	[A]	8	2

Ao repassar a mensagem para seus vizinhos, estes atualizam o campo “caminho” da mensagem, verificam se são os destinatários finais da mensagem e a retransmitem caso não sejam.

Quando um vizinho recebe duas vezes a mesma mensagem (conjunto identificador - “*msg-id*” - origem e destinatário), esta mensagem é descartada. Além disso, a mensagem também é excluída quando o número de saltos atinge o valor máximo permitido. No caso em que o nó que recebe a mensagem seja o destinatário final, este atualiza o valor do caminho com o seu identificador, processa a

informação recebida e responde o pacote buscando refazer a rota reversa presente no campo “caminho”. A mensagem conterà, por exemplo, as seguintes informações em seus campos:

tipo	msg-id	origem	destino	caminho	ttl	pt
2	1	A	B	[A C P D E F J B]	8	2

Quando B for responder a mensagem, se o próximo nó presente no caminho ainda estiver disponível (nó J), este recebe a mensagem e a repassa até o novo destino do pacote (nó que originou a ligação), no caso A. Caso contrário, o nó B repassa para todos os seus vizinhos. Estes buscam, por sua vez, reencontrar o caminho estabelecido (C, P, D, E, F ou J). Sempre que isto seja possível, somente o próximo nó constante no campo caminho receberá a mensagem. Quando não, é feita uma inundação para todos os vizinhos. Este processo se repete até que a ligação se termina.

– Modelo de ligações telefônicas

A quantidade de ligações telefônicas que são realizadas ao mesmo tempo segue uma lei conhecida com distribuição de *Erlang B* ou distribuição de *Erlang B* estendido. Essa distribuição é usada para estimar o número de linhas necessárias para sistemas de telefonia do tipo PSTN. A versão estendida se difere no sentido de que ela também leva em consideração as chamadas refeitas imediatamente após uma chamada mal sucedida ou interrompida. Portanto, a atividade telefônica dos usuários poderá ser determinada a partir dessa lei. Isso nos fornecerá uma noção de quantas ligações o nosso sistema deve suportar de acordo com o número de usuários.

Para este estudo, o modelo de ligações telefônicas será bastante simples: inicialmente, um nó decide efetuar uma ligação para outro nó enviando um pacote. Começa-se assim uma ligação entre eles. O nó que recebeu o primeiro pacote

reenvia uma resposta para o nó originário e assim sucessivamente durante toda simulação.

- Modelo de QoS

O modelo de QoS do nosso sistema é um modelo simplificado baseado no *Flexible QoS Model for Manet* [31]. No nosso modelo, existem dois tipos de pacote: pacotes aplicativos e pacotes para descoberta de nós vizinhos. Os primeiros tipos de pacotes contêm todas as informações possíveis para que: (a) se crie uma rota entre dois nós, (b) utilize essa rota durante uma transmissão contínua e (c) reencontre a rota em caso de perda. O segundo tipo de pacote serve para se criar uma tabela contendo o identificador de cada nó presente em raios de transmissão possíveis, definidos pelo sistema. Essa informação será utilizada durante as transmissões e na escolha do raio de transmissão de acordo com as estratégias definidas.

A qualidade do protocolo testado é mensurada através da:

- a) quantidade de vezes que uma rota é perdida (tempo até a redescoberta da rota), e,
- b) número de saltos para que uma mensagem chegue até o destinatário.

4.2 ESTUDOS E TESTES

Os seguintes testes serão realizados a partir do modelo do sistema implantado:

- a) testar o número de saltos máximos ótimo para o sistema de acordo com algumas densidades dos nós e raios de transmissão. Consideramos como o número de saltos ótimo a quantidade de saltos que aumenta o número de ligações completadas, uma vez que a rota tenha sido estabelecida, em relação à energia gasta para transmitir esses pacotes. Essa medida serve para nos fornecer uma noção da eficiência energética em se utilizar certa quantidade de saltos. Outros critérios de qualidade são acrescentados a fim

de prover um limite superior aos saltos, já que eles devem aumentar a latência do recebimento;

- b) testar o desempenho do sistema em diversas configurações de cenários e quantidade de usuários e configurações em termos de ligações totais completadas, ligações começadas e perdidas e ligações que não puderam ser efetuadas. É interessante analisar quais são as causas mais recorrentes da perda de ligações que foram começadas (deslocamento, colisões, número de saltos, etc.). Os resultados deste teste poderão ser comparados com as conclusões obtidas através dos trabalhos de Gupta & Kumar [28];
- c) testar qual é o menor raio de transmissão fixo que aperfeiçoe a quantidade de ligações totais completadas e reduz ao mesmo tempo a quantidade de ligações perdidas e de ligações que não puderam ser efetuadas. Comparando os resultados obtidos com os modelos de consumo energético dos rádios móveis, será possível saber qual é a autonomia média do sistema em termos de energia. Isso poderá ser mapeado na capacidade real das baterias atuais para concluirmos se elas suportariam um sistema deste tipo e por quanto tempo;
- d) testar qual é o menor raio de transmissão fixo para que todos os nós do sistema estejam conectados, dada uma distribuição de nós. Este problema é conhecido na literatura como *Critical Transmission Range* (seção 3) e é usado para estimarmos os valores adequados de raio de transmissão para aumentarmos a probabilidade de que uma mensagem alcance o seu destinatário seja ele qual for, de acordo com a quantidade de nós presentes no sistema;
- e) testar o menor raio de transmissão variável para cada nó que permita com que todos os nós possam enviar mensagem para todos os outros nós com uma probabilidade alta. Este estudo é baseado no problema conhecido na literatura como *Minimum Energy Broadcast Tree Problem* (seção 3) e é usado para nos fornecer informações sobre as melhores estratégias de raio variável

em relação ao número médio de vizinhos para maximizar a probabilidade de que uma mensagem alcance o seu destinatário. Será feita uma análise das vantagens e desvantagens de se utilizar raios variáveis futuramente;

- f) testar a influência dos erros de transmissão e de acesso ao meio, indisponibilidade de algum nó ou mesmo a possibilidade de que algum nó repasse mensagens somente com certa probabilidade (reduzindo a quantidade de retransmissões). Esse cenário é modelado através do uso de uma probabilidade para que o nó receba uma mensagem transmitida. A esta probabilidade combinada deu-se o nome de interferência. Espera-se com este teste verificar o desempenho do sistema (qualidade de serviço e energia total gasta) em condições adversas de interferência, bem como o impacto que isso tem na quantidade de mensagens totais recebidas e na perda de pacotes;
- g) testar o desempenho do sistema para alguns cenários de telefonia realísticos em que se tenha tanto mobilidade dos nós, interferência no canal de transmissão e várias mensagens trocadas entre os mesmos dois nós. Este teste é importante para se avaliar a robustez do protocolo de comunicação em se descobrir uma rota entre dois nós e, em seguida, manter uma via de comunicação entre eles de maneira adaptativa à variabilidade do sistema. Vários esquemas são possíveis, sendo que a qualidade de serviço (quantidade de perdas de comunicação e de saltos médios necessários) e a energia total perdida no sistema são os melhores critérios para a avaliação e comparação dos desempenhos;
- h) testar variações de todos os parâmetros ao mesmo tempo e as suas influências entre si. Pode-se testar a variação de alguns parâmetros ao mesmo tempo para obtermos *insights* sobre como isso afeta o desempenho do nosso sistema como um todo. A partir disso, novos algoritmos poderão ser elaborados e testados no nosso simulador, sempre com o intuito de melhorar os tempos de respostas, a durabilidade das baterias, a capacidade da rede e a quantidade de mensagens recebidas pelo destinatário.

Todos os testes serão repetidos suficientemente para se evitar a presença de erros estatísticos nos resultados obtidos. Além disso, para nosso estudo consideramos que nenhum nó é capaz de conhecer a sua localização geográfica, nem a localização de seus vizinhos. Sendo assim, esta informação não é utilizada em nenhum esquema de comunicação. Estabelece-se esta restrição como premissa para o funcionamento desse sistema, já que na prática, apesar de muito úteis, dispositivos do tipo GPS possuem baixo desempenho em contextos fortemente possíveis para nosso sistema, tais como ambientes fechados.

O problema conhecido na literatura como *Minimum Forwarding Set Problem*, que diz respeito à menor quantidade de nós que faz com que todos os outros nós fiquem acessíveis dentro de uma região de cobertura, não será abordado neste trabalho por fornecer informações que são indiretamente abarcadas na resolução dos problemas de *Minimum Energy Broadcast Tree* e de *Critical Transmission Range*.

4.3 VARIÁVEIS E PARÂMETROS DE MEDIDA

As variáveis e parâmetros de medida do nosso sistema seguem algumas orientações da IETF [44] e são apresentadas a seguir:

a) Efetividade:

- Ausência/Presença de *loops* nas rotas encontradas, (capacidade de se encontrar rotas alternativas);
- fração do tráfego que chega ao destinatário;
- fração do tráfego perdida durante ligação;
- fração do tráfego que não gera ligação - nós isolados.

b) Eficiência:

- latência e tempo para criação de uma rota (dado através do número de saltos necessários para se chegar de A até B);

- porcentagem de pacotes que chegam fora da ordem;
- energia total consumida para cada ligação de múltiplos saltos em relação à energia consumida por um link direto (raio cobrindo todo o território);
- distribuição da carga entre os nós disponíveis (número de vezes que um nó é solicitado em relação à energia com a qual ele transmite);
- sobrecarga de pacotes administrativos (número de mensagens repassadas que não carregam dados aplicativos);
- outras considerações energéticas como autonomia da rede e dos nós (quantidade de energia total gasta pelo sistema nas retransmissões, de acordo com a potência de transmissão).

c) Sistema

- Densidade de nós;
- tamanho da rede;
- conectividade da rede (quantidade de nós isolados);
- ligações totais completadas,
- ligações totais começadas e perdidas
- ligações que não puderam ser efetuadas
- quantidade de pacotes administrativos em relação aos pacotes aplicativos em cada nó (quantidade de energia gasta com pacotes não úteis em relação à energia gasta com pacotes úteis ao sistema)
- taxa de transmissão média de pacotes por segundo (para nosso teste, esta taxa é de 100%).

5 DESENVOLVIMENTO DAS SIMULAÇÕES

As modelagens deste sistema foram realizadas através do aplicativo *Netlogo*. Esta ferramenta possui uma interface gráfica para facilitar o desenvolvimento de scripts para a modelagem de sistemas de agentes e a realização das simulações.

No nosso modelo os agentes possuem duas missões: (a) transmitir uma mensagem para um agente aleatoriamente escolhido e (b) repassar as mensagens de outros agentes até que elas alcancem o nó destinatário. Assim, este modelo está baseado na ideia de recebe-repassa a mensagem se eu não for o destinatário. Para reduzir a sensibilidade ao efeito da tempestade de *broadcast*, parâmetros para a identificação da mensagem, bem como do nó transmissor e do nó receptor são enviados em cada pacote transmitido. Além disso, todas as mensagens tem um tempo de vida (*time to live*), que é o número de saltos máximo que elas podem dar antes de serem excluídas por algum nó.

Primeiramente todos os nós transmitem com o mesmo raio, que pode ser definido graficamente pelo usuário. Em seguida, elaboramos estratégias de descobertas de nós vizinhos e definição do menor raio necessário para manter a conectividade da rede e aperfeiçoar a quantidade de mensagens recebidas, ocupando o menor número de canais disponíveis e gastar o mínimo de energia na transmissão. Definimos as seguintes variáveis para o estudo:

- a) Raio de Transmissão: raio com o qual uma mensagem é transmitida. Por exemplo, um raio de 3 significa que todos os nós que estiverem a 3 unidades de distância do nó transmissor receberão a mensagem. A potência de transmissão é diretamente proporcional ao raio.
- b) Densidade média de vizinhos: número médio de agentes dentro do raio de transmissão de cada nó. É feita a média do número de vizinhos de cada nó, de acordo com o raio de transmissão.

- c) Interferência: probabilidade de que um nó vai receber (ou repassar) uma mensagem, quando ele estiver dentro do raio de transmissão. A interferência é dada em porcentagem. Assim, quando optarmos por um ambiente com uma interferência de 50%, significa que cada vizinho tem uma probabilidade de 50% de receber a mensagem.
- d) Estratégia: quantidade mínima de vizinhos que quero alcançar ao enviar uma mensagem. Sendo assim, deve-se escolher um raio de transmissão suficientemente grande para se atingir esse número mínimo de vizinhos. Por exemplo, em uma estratégia de 5, um nó transmissor busca transmitir com um raio suficiente grande para atingir no mínimo 5 vizinhos diferentes.
- e) Mobilidade: velocidade com que um nó se movimenta. Esta mobilidade é fixada como uma porcentagem do raio de transmissão. Isso é feito, pois, só há mudanças significativas da topologia da rede, quando a mobilidade dos nós acontece na ordem de grandeza dos raios ou maiores. Assim, uma mobilidade de 0.5 significa que, a cada iteração, cada nó se deslocará de 0.5 vezes o valor do raio de transmissão para alguma direção e sentido aleatórios.
- f) Taxa de busca de nós: porcentagem com a qual um nó testa quantos vizinhos possui de acordo com as potências de transmissão definidas (raios de transmissão permitidos). Assim, para uma taxa de busca de 40%, em cada iteração, cada nó terá 40% de chance de enviar mensagens com raios de transmissão crescentes para se descobrir a quantidade de vizinhos que ele alcança com cada valor de raio.
- g) Fator de energia: o fator de energia nos informa a intensidade das perdas de transmissão. Sabe-se que a potência de transmissão decai no mínimo com o quadrado desse fator. Assim, quanto maior o fator de energia, maiores serão as perdas, portanto, maior deve ser a potência de transmissão para que uma mesma mensagem alcance a mesma área. Um raio de transmissão maior exige uma energia/potência de transmissão maior.

Contrastando com essas variáveis, durante as simulações medimos: (a) quantidade de mensagens totais enviadas, (b) a quantidade total de mensagens recebidas pelos seus destinatários, (c) quantidade de saltos médios para que uma mensagem alcance o seu destino, (d) histograma do número de saltos para que uma mensagem alcance o seu destino, (e) energia total gasta nas transmissões, de acordo com o raio transmitido e o fator de energia, (f) quantidade de mensagens perdidas e, conseqüentemente, a quantidade de vezes que uma mesma mensagem deve ser retransmitida e (e) histograma dos nós para cada raio de transmissão quando este for variável. A figura 6 mostra o ambiente gráfico de simulação do *Netlogo*.

Figura 6: Ambiente de Simulação do Netlogo

5.1 MODELAGEM DOS AGENTES

Os agentes, também denominados como nós do sistema, apresentam os seguintes atributos:

- a) *id*: identificador único do nó na rede;
- b) *msg-to-send?*: Controla o envio de uma nova mensagem criada pelo agente;
- c) *msg-to-fw?*: Controla a retransmissão de uma mensagem recebida pelo agente;
- d) *msg-received?*: Indica o recebimento de uma nova mensagem;
- e) *msg-to-respond?*: Indica que uma mensagem recebida foi processada e pode ser respondida (somente quando o agente é o destinatário da mensagem);
- f) *remained-energy*: Energia disponível para envio de mensagens;
- g) *step*: Valor do passo durante a movimento definido como função do raio de transmissão;
- h) *radius*: Raio com o qual as mensagens são transmitidas. Este raio representa a potência de transmissão necessária para se alcançar certa área;
- i) *in-buffer*: *Buffer* de entrada contendo todas as mensagens recebidas que devem ser repassadas;
- j) *out-buffer*: *Buffer* de saída das mensagens criadas por esse nó que ainda não foram enviadas;
- k) *rcv-buffer*: *Buffer* de entrada contendo todas as mensagens recebidas;
- l) *msg-id-table-ib*: Controla os *ids* das mensagens recebidas de acordo com o par origem destino;
- m) *msg-id-table-ob*: Controla o id das mensagens criadas pelo agente para cada destino;
- n) *mean-nb-number*: Número médio de vizinhos para cada raio.

Além disso, os agentes são capazes de interagir uns com os outros durante as seguintes ações:

- a) Criação de uma mensagem;
- b) Envio, repasse e recebimento de uma mensagem;
- c) Descoberta de quem são os nós vizinhos de acordo com o raio de transmissão da mensagem;
- d) E são capazes de interagir com o ambiente da seguinte maneira através da movimentação e através das perdas de mensagens causadas pela Interferência no envio.

5.2 SIMULAÇÕES

Basicamente, foram realizados dois tipos distintos de simulação. No primeiro tipo, são enviadas 1000 mensagens de origens aleatórias para destinos aleatórios. O objetivo é contabilizar o número de rotas descobertas de acordo com o valor máximo de saltos (ttl) com relação a diferentes cenários: densidade média de vizinhos, raios de transmissão e interferência. Estas simulações acontecem da seguinte maneira:

- a) Distribuem-se os agentes no ambiente de maneira uniforme;
- b) Escolhe-se um agente qualquer para criar uma nova mensagem;
- c) Escolhe-se outro agente para ser o destino da mensagem;
- d) Envia-se a mensagem para os nós vizinhos, dentro de um raio definido. Isto é feito recursivamente até que o destinatário seja alcançado, um nó já tenha recebido a mensagem em questão, ou a mensagem atinja o número de saltos máximo definido.
- e) Durante os saltos, cria-se uma rota entre a origem e o destino. Este caminho é codificado na mensagem.
- f) 1000 mensagens de nós distintos são enviadas para destinatários distintos.

O fato das mensagens que já foram recebidas pelos nós não serem repassadas garante que a rota apresentando o menor número de saltos entre dois nós seja sempre escolhida, além de corrigir o problema da tempestade de pacotes.

A primeira abordagem foi utilizada para elucidar informações importantes para o segundo tipo de simulação, dito realístico (várias trocas entre os mesmos nós, presença de mobilidade e interferência). Neste contexto, são enviadas 1000 mensagens da mesma origem para o mesmo destino, tal qual uma ligação telefônica em que há um fluxo contínuo de dados entre as duas partes comunicantes. Várias estratégias de comunicação são testadas, utilizando-se informações obtidas através da rede. Assim, sempre que uma mensagem alcança seu destino, este a processa e envia uma resposta de volta ao nó de origem.

- a) Distribuem-se os agentes no ambiente de maneira uniforme;
- b) Escolhe-se um agente qualquer para criar uma nova mensagem;
- c) Escolhe-se outro agente para ser o destino da mensagem;
- d) A mensagem é repassada recursivamente até que o destinatário seja alcançado, um nó já tenha recebido a mensagem em questão, ou a mensagem atinja o número de saltos máximo definido;
- e) Durante os saltos, cria-se uma rota entre a origem e o destino. Este caminho é codificado na mensagem.
- f) O nó de destino da mensagem a responde, buscando refazer o caminho codificado na mensagem. Durante este procedimento, sempre que o próximo nó indicado pela rota não for identificado, a mensagem é reenviada para todos os vizinhos mais próximos. Neste caso, cada vizinho altera a rota com o seu id e busca reencontrar o caminho anteriormente construído, destinando a mensagem para quem seria o próximo nó. Caso isto também não seja possível, ele novamente a reenvia para todos os seus vizinhos. Isso permite manter a integridade das rotas, fazendo com que elas sejam reencontradas dinamicamente.

g) 1000 mensagens são enviadas do mesmo nó para o mesmo destinatário.

Todas as simulações são repetidas 30 vezes para minimizar os erros estatísticos provenientes da simulação.

As simulações são realizadas em um ambiente do Netlogo nas seguintes dimensões: $x \rightarrow -20$ a 20 , $y \rightarrow -20$ a 20 . Além disso, os nós são distribuídos aleatoriamente por todo o ambiente.

5.3 Simulação 1: Envio de mensagens com nós parados

As características fundamentais desta primeira simulação são que os nós não se movimentam, os raios são iguais para todos os agentes e todas as transmissões são do tipo inundações de pacotes - flooding. Nos testes, variamos a quantidade de nós presentes no ambiente, bem como o raio de transmissão geral e o fator de energia.

A combinação entre a quantidade de nós e o raio de transmissão altera a conectividade da rede, assim que a quantidade de nós isolados. Esta conectividade é estudada através da variável densidade média de nós vizinhos, que é o número médio de nós presentes em determinado raio para cada agente do sistema. Além disso, esta simulação é do primeiro tipo, ou seja, são enviadas 1000 mensagens de origens aleatórias para destinos aleatórios.

- a) Os parâmetros da simulação variam como mostrado abaixo:
- b) Densidade de nós: 10 30 50 70 90 110 130 150;
- c) Raio de transmissão: 5 7 10 15;
- d) Número máximo de saltos: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 12 15;
- e) Fator de energia: 2 3;

Os gráficos mostram o desempenho do sistema de acordo com valores do número médio de nós vizinhos, classificados como se segue:

- a) $\rho_1 = 0.4$ nós vizinhos em média;
- b) $\rho_2 = 1.5$ nós vizinhos em média;
- c) $\rho_3 = 2.5$ nós vizinhos em média;
- d) $\rho_4 = 3.5$ nós vizinhos em média;
- e) $\rho_5 = 4.2$ nós vizinhos em média;
- f) $\rho_6 = 5.1$ nós vizinhos em média;
- g) $\rho_7 = 6.1$ nós vizinhos em média;
- h) $\rho_8 = 7.0$ nós vizinhos em média;

Os resultados da simulação são apresentados a seguir:

Gráfico 1: Mensagens Recebidas, Raio = 5

Gráfico 2: Mensagens Recebidas, Raio = 7

Gráfico 3: Mensagens Recebidas, Raio = 10

Gráfico 4: Mensagens Recebidas, Raio = 15

Os gráficos de 1 a 4 nos mostram que o funcionamento desse sistema é bastante sensível ao número de nós disponíveis. Ainda assim, gráfico 3 demonstra que, mesmo com uma quantidade baixa de nós, usando-se um raio de transmissão e um número máximo de saltos adequados, pode-se obter taxas de mensagens recebidas superiores a 90%.

Os gráficos também mostram que existe um limite para o número de mensagens recebidas quando o sistema apresenta uma baixa conectividade, se o raio for pequeno. Isto também pode ser observado no gráfico 3: em um sistema com 30 nós, mesmo com um número máximo de saltos alto, da ordem de 15 saltos, somente ~40% das mensagens enviadas foram recebidas.

Por outro lado, o gráfico 4 nos leva a crer que, mesmo com uma densidade baixa de nós, quando o raio for grande o suficiente, o sistema consegue uma taxa de mensagens recebidas interessante, acima de 80%.

Por outro lado, sabe-se que, quanto maior o raio de alcance, maior será a energia necessária para se transmitir as mensagens, e maior será a interferência

entre canais, o que reduziria a quantidade de nós capazes de transmitir ao mesmo tempo. Isto indica que transmissões com raios variados podem ser pertinentes, por reduzir a quantidade de nós isolados sem incorrer no aumento da interferência entre os agentes.

Pode-se ainda aumentar a taxa de mensagens recebidas de acordo com estratégias para definir uma potência de transmissão suficiente para transmitir a mensagem para um número de vizinhos definido. Esta abordagem será tratada nas simulações subsequentes.

Os gráficos de 5 a 8 nos fornecem uma noção da quantidade de energia gasta no nosso sistema, de acordo com o raio de transmissão. Este parâmetro é calculado através da acumulação da energia necessária para uma transmissão sempre que um nó envia/repassa uma mensagem.

Gráfico 5: Total de Energia Gasta, Raio = 5

Gráfico 6: Total de Energia Gasta, Raio = 7

Gráfico 7: Total de Energia Gasta, Raio = 10

Gráfico 8: Total de Energia Gasta, Raio = 15

Observamos que a energia requerida pelo sistema aumenta de acordo com a quantidade de nós e o número máximo de saltos. Além disso, quanto maior a densidade de nós no ambiente, maior é a taxa com que essa energia cresce.

Verifica-se também que a partir de aproximadamente 10 saltos máximos, a taxa com que esta energia varia tende a se reduzir, indicando que existe um limite superior para a energia total consumida. Sabe-se que esse limite se deve ao fato de que os nós se saturam em relação aos pacotes transmitidos, isto é, existe um momento em que a maioria dos nós presentes recebem o pacote e param de retransmitir ou o *time to live* é alcançado.

Observamos também que quanto maior o raio de transmissão, maior é a energia total gasta no sistema. Isso indica que é interessante realizarmos as transmissões com o menor raio possível, desde que o desempenho em termos de mensagens recebidas não seja prejudicado.

A energia total acumulada para esta comunicação com múltiplos saltos pode ser comparada com a energia total gasta em um sistema teórico cujo raio de transmissão fosse grande suficiente para que todas as transmissões se realizem em apenas um salto (comunicação direta).

A tabela 1 mostra os valores encontrados no caso em que todos os pacotes são recebidos em apenas um salto, isto, quando os raios são grandes o suficiente para cobrirem todos os nós:

Tabela 1: Valores de Energia

Raio de alcance	Número de Msg	Energia Total (fator 2)	Energia Total (fator 3)
15	1000	225000	337500
20	1000	400000	8000000
25	1000	625000	15625000
30	1000	900000	27000000
35	1000	1225000	42875000

Como nosso cenário de testes possui dimensões da ordem de 40x40 unidades², e levando em consideração uma transmissão omnidirecional circular, seria razoável considerarmos os valores totais de energia calculados para um raio de 25 unidades, diâmetro de 50, para maior.

A tabela 2 apresenta valores da energia total para algumas densidades de nós, nos casos em que aproximadamente 100% das mensagens enviadas foram recebidas:

Tabela 2: Energia Total

Raio	Densidade	Máximo de saltos (ttl)	Energia Total aprox. (fator 2)	Energia Total aprox. (fator 3)
5	ρ_7	12	600000	600000
7	ρ_4	7	450000	600000
10	ρ_6	4	500000	500000

Observamos que, em alguns cenários, o sistema de múltiplos saltos realmente apresenta vantagens energéticas em relação à comunicação direta teórica, principalmente para fatores de energia mais elevados (fator 3). Verificamos reduções da ordem de 90% da energia total consumida nestes cenários.

Existem mais dois outros pontos a serem considerados: uma transmissão direta entre nós não é praticável, pois reduziria bastante as taxas de transferência de pacotes, ao permitir que somente um nó envie mensagem por vez. Além disso, este esquema de comunicação conhecido como inundação de pacotes é o pior esquema possível em termos de energia. Esperamos encontrar reduções maiores ao refazer estas comparações com protocolos mais inteligentes implantados em simulações subsequentes.

Os gráficos de 9 a 12 mostram a média de saltos para que uma mensagem chegue até o destino final. Os gráficos de 13 a 15 apresentam o histograma das mensagens recebidas nos casos em que o número máximo de saltos permitidos é de 15, para alguns cenários.

Gráfico 9: Média de Saltos até o destino, Raio = 5

Gráfico 10: Média de Saltos até o destino, Raio = 7

Gráfico 11: Média de Saltos até o destino, Raio = 10

Gráfico 12: Média de Saltos até o destino, Raio = 15

Gráfico 13: Histograma de Saltos, Raio = 5, Wnodes = 80

Gráfico 14: Histograma de Saltos, Raio = 7, Wnodes = 80

Gráfico 15: Histograma de Saltos, Raio = 10, Wnodes = 80

Através destes gráficos percebe-se que existe um limite superior do número máximo de saltos. Isto é bastante vantajoso visto que quanto menor o número de saltos, menor a quantidade de energia total requerida pelo sistema e maior é a taxa de mensagens distintas possível. Além disso, estes gráficos indicam que a maioria dos pacotes que chegam estão concentrados nos valores de saltos da ordem de 8, com exceção da simulação realizada para o raio de 5 unidades.

O gráfico 16 apresenta o histograma cumulativo para esta simulação. Observamos que, mesmo para o menor raio (raio = 5), cerca de 520 das mensagens de um total de 650 chegam ao destino final com um número de saltos máximo de 10, ou seja: cerca de 80% do número máximo que chegaria, quando com 15 saltos.

Gráfico 16: Histograma Acumulado de Saltos, Raio = 5, Wnodes = 80

Os gráficos 17 e 18 mostram as energias totais consumidas no sistema com fator de energia valendo 3 para os raios de 7 e de 10.

Gráfico 17: Total de Energia Gasta, Raio = 7, fator = 3

Gráfico 18: Total de Energia Gasta, Raio = 10, fator = 3

5.4 SIMULAÇÃO 2: INTERFERÊNCIA

A característica fundamental desta simulação é a adição de interferências ao modelo, fazendo com que nem todas as mensagens enviadas por um nó sejam recebidas por todos seus vizinhos.

Esta interferência pode ser usada como medida para se determinar uma probabilidade de reenvio, capaz de reduzir o número de mensagens retransmitidas, sem prejudicar o desempenho do sistema.

Para esta simulação usamos raios de transmissão fixos para todos os nós no valor de 7 unidades. Os outros parâmetros são variados como mostrado a seguir:

- a) Número máximo de saltos: 8 10 12;
- b) Interferência máxima: 15% 30% 60% 95%;
- c) Número de nós: 30 70 100 120 150;

Os gráficos mostram o desempenho do sistema de acordo com valores do número médio de nós vizinhos, agrupados da seguinte maneira:

- a) $\rho_1 = 2$ nós vizinhos em média;
- b) $\rho_2 = 6$ nós vizinhos em média;
- c) $\rho_3 = 9$ nós vizinhos em média;
- d) $\rho_4 = 10$ nós vizinhos em média;
- e) $\rho_5 = 13$ nós vizinhos em média;

Esta simulação também é realizada como do primeiro tipo, ou seja, 1000 mensagens são enviadas de origens aleatórias para destinos aleatórios.

Os gráficos 19 a 22 indicam a quantidade de mensagens recebidas em relação à probabilidade de que uma transmissão tenha sofrido interferência.

Gráfico 19: Mensagens Recebidas, Perdas = 15

Gráfico 20: Mensagens Recebidas, Perdas = 30

Gráfico 21: Mensagens Recebidas, Perdas = 60

Gráfico 22: Mensagens Recebidas, Perdas = 95

Os gráficos indicam que ambientes com densidades de vizinhos muito baixas (da ordem de 1 a 2 vizinhos) são bastante sensíveis às perdas de mensagem por interferências. Já ambientes com densidades de nós mais altas, apresentam baixa sensibilidade a taxas de perda de até 30%.

De maneira geral, quanto maior a quantidade média de vizinhos, menor é a sensibilidade à interferência. No caso em que o número de vizinhos é da ordem de 7, o sistema não apresentou queda no desempenho para interferências com probabilidade de 60%.

Os gráficos 23 a 26 indicam a quantidade de energia total necessária para se transmitir as mensagens da origem até o destino. Intuitivamente, espera-se que quanto maior a taxa de interferência, menor seja a energia total requerida, pois menos agentes receberiam e repassariam as mensagens.

Gráfico 23: Total de Energia, Perdas = 15

Gráfico 24: Total de Energia, Perdas = 30

Gráfico 25: Total de Energia, Perdas = 60

Gráfico 26: Total de Energia, Perdas = 95

Comparando-se os gráficos, observamos que só se verifica ganhos de energia para probabilidades de interferências acima de 60%, o que também representa perdas de pacotes muito altas, como expressado nos gráficos anteriores.

Toma-se como exemplo o caso em que o número de vizinhos seja da ordem de 10 (p4). Para um número máximo de saltos valendo 10 com probabilidade de perda de 15%, tem-se uma energia relativa de aproximadamente 80 unidades. Se pegarmos este mesmo cenário para uma probabilidade perda de 60%, a energia continua sendo da mesma ordem, somente pouco abaixo de 80 unidades. Além disso, para valores distintos de ttl (número máximo de saltos), as curvas de energia são praticamente constantes.

No entanto, quando comparamos duas curvas para número de nós diferentes, existe uma grande diferença na energia consumida pelos dois sistemas. Isto indica que as curvas de energia são bem mais sensíveis à quantidade de nós presentes no

ambiente do que à probabilidade de interferência (desde que estas não sejam extremamente altas) e o número máximo de saltos permitido.

Ademais, probabilidades de interferência abaixo de 30% não alteram tanto o número médio de saltos para que uma mensagem chegue até o seu destino final. Já interferências da ordem de 60%, aumentaram em média uma ordem do número de saltos como pode-se observar nos gráficos 27 e 28.

Gráfico 27: Média de Saltos até o destino, Perdas = 15

Gráfico 28: Média de Saltos até o destino, Perdas = 60

Conclui-se desta análise que o sistema é robusto para interferências com probabilidade da ordem de até 30%, ainda que isto não seja suficiente para incorrer em um ganho expressivo em termos de energia total gasta.

5.5 SIMULAÇÃO 3: CRITICAL TRANSMISSION PATH

A terceira simulação é realizada a fim de obtermos informações sobre a conectividade da rede para vários valores de potência de transmissão (raios). Esta simulação trata do problema conhecido na literatura como “Critical Transmission Range (CTR)”.

Este problema consiste em encontrar o menor raio fixo para um dado sistema, de modo que todos os seus elementos estejam conectados. Realizamos esta simulação com o intuito de conhecermos em média qual deve ser o menor raio estimado para algumas densidades de nós possíveis. Isto pode ser usado como limite inferior do raio para que, em média, todos os nós estejam conectados, independente da densidade do sistema.

A simulação é realizada da seguinte maneira:

- Distribuem-se os nós aleatoriamente no ambiente;
- Os raios de transmissão (potência de transmissão) são incrementados até um valor máximo;
- Para cada raio, conta-se a quantidade de nós isolados.

No caso deste estudo, variamos o raio de 1 a 16 unidades. Os gráficos 29 e 30 apresentam os resultados encontrados de acordo com as diversas densidades de nós.

Gráfico 29: CTR – número de nós isolados

Gráfico 30: CTR – número de nós conectados

A partir dos gráficos, observamos que para o pior cenário estudado - número de nós igual a 30, um raio com valor de oito unidades é, em média, suficiente para que todos os nós estejam conectados.

Além disso, pode-se notar que, mesmo para ambientes com alta densidade de nós – número de nós igual a 150 - é necessário um raio da ordem de cinco unidades para que todos os nós estejam conectados.

Para as futuras simulações, será utilizado um raio com valor de sete unidades, por este ser o um valor estaticamente suficiente para que a grande maioria dos nós esteja conectada, independente do número de nós presentes no ambiente: 90% de nós conectados para o pior caso.

5.6 SIMULAÇÃO 4: MEBTP

A fim de estudarmos estratégias de comunicação com raios de transmissão variável, será feito um estudo do problema conhecido na literatura como “Minimum Energy Broadcast Tree Problem”. Este problema consiste em se encontrar o menor raio de transmissão para cada nó que permita com que todos os nós possam enviar mensagens para todos os outros nós.

Apresentamos aqui uma abordagem estatística baseada em simulação para a resolução deste problema. Esta análise é suficiente para fornecer informações úteis para a definição de esquemas de comunicação. Dessa maneira, uma taxa de mensagens recebidas da ordem de 100% indica que, estatisticamente, há uma alta probabilidade de que todos os nós sejam capazes de enviar mensagens entre si.

Nesta simulação, os nós são posicionados no ambiente e ficam parados durante as transmissões. A simulação acontece da seguinte maneira:

- a) Descobre-se a quantidade de vizinhos para cada nó de acordo com valores definidos de raio;
- b) Cada nó escolhe o raio de transmissão baseando-se na quantidade de vizinhos, de acordo com uma estratégia escolhida no início do programa.
- c) 1000 mensagens de origens aleatórias são enviadas para destinos aleatórios.
- d) A quantidade de vizinhos para cada raio de transmissão possível é encontrada no início da rodada.

Os parâmetros utilizados nesta simulação são variados como se segue:

- a) Número de nós: 50 e 140;
- b) Número máximo de saltos: 6 8 10 12;
- c) Estratégias: 3 5 7 10;
- d) Taxa de busca de vizinhos: 100;
- e) Valores de raios possíveis: 5 7 10 15.

Entende-se por estratégia: a escolha do menor raio de transmissão capaz de garantir que uma quantidade mínima de nós vizinhos receba a mensagem transmitida. Sendo assim, uma estratégia de “3” significa que o nó escolherá enviar a mensagem com o menor raio possível para cobrir uma área que contenha pelo menos “3” vizinhos. No nosso caso, existe um limite superior para esse raio.

As curvas são desenhadas para densidades de nós diferentes, classificadas da seguinte maneira:

- a) $\rho_3 = 50$ nós distribuídos uniformemente;
- b) $\rho_2 = 80$ nós distribuídos uniformemente;
- c) $\rho_1 = 110$ nós distribuídos uniformemente;

Devido à possibilidade de se variar os raios de transmissão, a densidade de nós vizinhos também é variada dinamicamente, dependendo da estratégia de transmissão escolhida. Esta é a razão pela qual o conceito de densidade média de vizinhos não é utilizada.

Alguns autores postulam que transmissões com raios variados dificultaria o recebimento de mensagens de confirmação do recebimento (*acknowledgement* - ACK). Ao mesmo tempo, transmissões com raios variados pode significar o aumento da taxa de mensagens recebidas com o gasto energético mais racional e a menor interferência entre canais possíveis.

Buscamos contornar este dilema através do uso de raios com valores previamente definidos e fazendo com que a potência transmitida seja codificada em um campo da mensagem. Isso permite que, logo que uma mensagem seja recebida, esta possa ser confirmada utilizando-se o mesmo raio (potência) com o qual ela foi transmitida.

Os gráficos 31 a 38 apresentam os resultados encontrados.

Gráfico 31: Msg Recebidas, Estratégia = 3, Wnodes = 50

Gráfico 32: Msg Recebidas, Estratégia = 3, Wnodes = 140

Nestes cenários, a quantidade de mensagens recebidas somente se aproxima de 100% para números muito grandes de ttl, na ordem de 12 saltos, ou seja, há um aumento do número de saltos necessários para se transmitir mensagens no sistema. A vantagem é que a maioria das mensagens é enviada com raios de transmissão mais baixos (5 e 7).

Gráfico 33: Msg Recebidas, Estratégia = 5, Wnodes = 50

Gráfico 34: Msg Recebidas, Estratégia = 5, Wnodes = 140

Nestes cenários, observamos que a quantidade de mensagens recebidas se aproxima de 100% para números pequenos ttl. Tem-se uma taxa de 99,4% de mensagens recebidas para seis saltos máximos, no caso em que a densidade de nós é baixa (50 nós), por exemplo.

Mesmo para densidade de nós mais altas (140 nós), há uma taxa de mensagens recebidas da ordem de 95% para ttl de até oito saltos. Uma possível desvantagem é que a maioria das mensagens é enviada com raios de transmissão da ordem de 7 e 10 unidades, mais altos que na estratégia apresentada anteriormente.

Gráfico 35: Msg Recebidas, Estratégia = 7, Wnodes = 50

Gráfico 36: Msg Recebidas, Estratégia = 7, Wnodes = 140

Nestes cenários, a quantidade de mensagens recebidas se aproxima de 100% para números pequenos ttl, para densidades baixas ou alas de nós. A desvantagem é que há um aumento da quantidade de nós a transmitir com raios de 15 unidades.

Gráfico 37: Msg Recebidas, Estratégia = 10, Wnodes = 50

Gráfico 38: Msg Recebidas, Estratégia = 10, Wnodes = 140

Nestes cenários, a quantidade de mensagens recebidas se aproxima de 100% para números pequenos ttl, para densidades baixas ou alas de nós. A desvantagem é que há um aumento significativo da quantidade de nós a transmitir com raios de 15 unidades.

Dentre todas as estratégias estudadas, a estratégia 5, que envia a mensagem em um raio suficientemente grande para que pelo menos 5 vizinhos distintos a recebam, demonstra ser a mais adequada para esse sistema, pois é a estratégia que permite os menores valores de raio e ttl e ainda mantém uma qualidade em termos de mensagens recebidas da ordem de 99% de mensagens recebidas.

Os gráficos 39 e 40 apresentam o desempenho do sistema em termos de mensagens recebidas de acordo com a estratégia escolhida, para um número máximo de saltos permitidos.

Gráfico 39: Msg Recebidas - TTL = 8, Taxa de busca = 100

Gráfico 40: Msg Recebidas - TTL = 8, Taxa de busca = 100

A partir dos gráficos 39 e 40, pode-se observar que há um salto expressivo na quantidade média de mensagens recebidas quando a estratégia passa de 3 para 5 – no gráfico 37, há um salto de 84% para aproximadamente 100% para $TTL = 8$, $p2$.

Quando a estratégia passa de 5 para 7, também verificamos que há aumento na quantidade de mensagens recebidas, porém este aumento cresce com uma taxa bastante reduzida – a quantidade de mensagens recebidas passa de um valor acima de 99% para praticamente 100%, no caso em que $TTL = 8$ e $p1$.

Além disso, conforme mencionado anteriormente, essa troca de estratégias incrementa quantidade de transmissões com raios maiores (raios da ordem de 10 e 15 unidades), o que causa um aumento na interferência entre canais e na energia gasta como um todo.

5.7 SIMULAÇÃO 5: CENÁRIO REALÍSTICO COM MOBILIDADE

Esta simulação está enquadrada no segundo tipo de simulações, em que são enviadas 1000 mensagens da mesma origem para o mesmo destino, tal qual acontece em uma ligação telefônica por pacotes.

Nesta simulação, os nós apresentam certa movimentação, o que afeta a manutenibilidade das rotas encontradas através da primeira mensagem, exigindo que o sistema se adapte para encontrar novos caminhos entre dois nós. O raio de transmissão é fixo para todos os nós.

Os parâmetros da simulação variam como mostrado abaixo:

- a) densidade de nós : 80;
- b) raio de transmissão: 7;
- c) número máximo de saltos: 8, 10 e 12;
- d) fator de energia: 2;
- e) mobilidade: 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.1, 1.2, 1.3 e 1.5.

A mobilidade é proporcional ao raio de transmissão e possui direção aleatória. Sendo assim, uma mobilidade de 0.5 para um raio de 7 unidades, significa que o nó moverá 3.5 unidades de raio para alguma direção aleatoriamente escolhida.

Os gráficos mostram o desempenho do sistema de acordo com os possíveis valores de mobilidade.

O gráfico 41 mostra o desempenho do sistema em termos da porcentagem das mensagens recebidas para valores de ttl e de mobilidade distintos.

Gráfico 41: Mensagens Recebidas

De maneira geral, as taxas de mensagens recebidas encontradas estão acima de 88% para qualquer valor de mobilidade, sendo que maiores mobilidades também apresentam desempenhos relativamente maiores. Maiores valores para salto máximo permitido – ttl - também apresentam maiores taxas de mensagens recebidas. Ainda assim, mesmo com 12 saltos, nenhum cenário indicou uma média da ordem de 100% para o número de mensagens recebidas.

Isso nos leva a duas conclusões: para o esquema de comunicação testado, a mobilidade não é necessariamente prejudicial em relação ao número de mensagens totais recebidas – os gráficos mostraram justamente o contrário.

De qualquer maneira, o desempenho do sistema como um todo é inferior em relação ao sistema quando os nós estão parados, fazendo com que seja necessário um número máximo de saltos maior para obtermos taxas equivalentes.

Definimos uma variável composta pela quantidade de vezes que uma rota é perdida multiplicada pelo número de saltos médios para que uma mensagem atinja o seu destino como forma de medir a qualidade do esquema de comunicação (qualidade de serviço, ou QoS), Estas informações são mostradas no gráfico 42.

Gráfico 42: QoS

Os gráfico 43 e 44 mostram as perdas de mensagens devido às mudanças no caminho e o número de saltos em média para que uma mensagem chegue até o seu destinatário.

Gráfico 43: Mudanças de Caminho

Gráfico 44: Número médio de saltos

De maneira geral, os gráficos demonstram que a qualidade da comunicação piora conforme a mobilidade entre os nós aumenta. Isso acontece tanto devido ao aumento de perdas de mensagens quanto devido ao aumento do número de saltos médios quando comparado com o sistema sem mobilidade apresentado anteriormente. Além disso, a perda de mensagens e o ttl médio crescem com o aumento do número de saltos máximo permitido.

Sendo assim, por um lado sabe-se que a quantidade de mensagens recebidas aumenta com o aumento do número de saltos máximos permitidos. Por outro lado, as perdas de pacotes e o ttl médio também aumentam. Isso nos leva a crer que a energia necessária para o funcionamento do sistema deve aumentar (número de transmissões maiores) para garantir esse fenômeno. Isso pode ser verificado no gráfico 45.

Gráfico 45: Total de Energia Gasta

O gráfico 45 explica o aumento da quantidade de mensagens recebidas quando o sistema apresenta taxas maiores de mobilidade.

Na verdade, o que acontece é que uma maior quantidade de nós acaba recebendo a mesma mensagem, aumentando a probabilidade de que o nó destinatário também receba essa mensagem. Este efeito é observado devido à limitação espacial do ambiente (sistema fechado): os nós estão destinados a se movimentarem em um espaço físico confinado.

De qualquer maneira, para os propósitos do nosso estudo, esta aproximação é suficiente. Pode-se imaginar um sistema desse tipo funcionando dentro de uma cidade, de um estádio de futebol ou um evento qualquer. Nestes casos, a grande maioria dos agentes se movimenta dentro da mesma região geográfica, ou, quando isso não é possível, talvez ele estivesse simplesmente desconectado da rede.

5.8 SIMULAÇÃO 6: CENÁRIO REALÍSTICO COM RAIOS FIXOS

Esta simulação é realizada com o intuito de analisar alguns cenários da simulação anterior, porém, acrescentando erros no recebimento de pacotes devido a perdas e interferências na transmissão. Conforme discutido anteriormente, a esses erros de transmissão foi dado o nome de interferência. Este parâmetro é caracterizado como a probabilidade de que as mensagens enviadas não cheguem a todos os destinatários que se encontram dentro do raio de alcance da transmissão.

Para essa simulação, o número de nós, a potência de transmissão (raio), o número máximo de saltos permitidos e o fator de energia são constantes. Os outros parâmetros usados na análise são variados conforme segue:

- a) Número de nós: 100;
- b) Número máximo de saltos: 10;
- c) Raio de transmissão: 7;
- d) Fator de energia: 2;
- e) Mobilidade: 0.3, 0.5, 0.7 e 1.0;

f) Interferência: 5, 10, 15, 20, 30 e 50.

Esta simulação é do segundo tipo. Sendo assim, 1000 mensagens são enviadas de um mesmo nó de origem e respondidas pelo nó de destino.

Os gráficos 46 a 50 apresentam o desempenho do sistema quanto ao número de mensagens recebidas totais, perdas de mensagens no sistema, número médio de saltos até o destino final, qualidade de serviço total e energia total necessária, respectivamente.

Gráfico 46: Mensagens recebidas

De maneira geral, observamos que o sistema apresenta baixas perdas de pacotes para interferências de até 20%, comparado com o mesmo cenário de mobilidade sem interferência.

A partir desse valor, o desempenho do sistema cai significativamente. Notamos uma taxa de 90% de mensagens recebidas com interferências da ordem

de 30%, para aproximadamente 65%, quando a interferência é da ordem de 50%, ou seja, verifica-se que o número de mensagens recebidas decresce não linearmente a partir de uma interferência da ordem de 30%.

Além disso, em termos de mensagens recebidas, a interferência afeta igualmente o sistema, independente do grau de mobilidade dos nós. Isto é indicado pela proximidade entre as curvas de mobilidade.

Gráfico 47: Perdas de Mensagens no Sistema

Quanto à perda de pacotes, esta apresenta uma redução crescente para todos os graus de mobilidade testados, em detrimento do número de mensagens totais recebidas.

De qualquer maneira, como o desempenho do sistema não é muito afetado para interferências da ordem de 30%, pode-se conseguir ganhos de até 25% na perda de pacotes, segundo o grau de mobilidade dos agentes.

Conclui-se novamente que um protocolo capaz de decidir entre repassar uma mensagem ou excluí-la pode ser interessante para nosso sistema, desde que o nível de ruído e as interferências entre os canais não sejam muito altos. Observamos

também que sistemas com mobilidades mais altas apresentam decaimento mais acentuado em termos de perdas.

Gráfico 48: Média de Saltos até destino

Gráfico 49: QoS Total

A média de saltos também decai não linearmente conforme aumenta-se a interferência, independente do grau de mobilidade. Mais uma vez, isso acontece em detrimento da quantidade de mensagens totais recebidas pelos destinatários. Esse comportamento indica que mensagens com menor número de saltos tendem a ser recebidas mais facilmente do que mensagens com números de saltos maiores.

Gráfico 50: Energia Total

Em termos de energia total, verificamos que o sistema apresenta ganhos de aproximadamente 10% (redução de 3,5 para 3 unidades de energia) com perdas de até 30%. Isso também pode ser vantajoso, desde que essas perdas não prejudiquem o número de mensagens totais recebidas.

5.9 SIMULAÇÃO 7: CENÁRIO REALÍSTICO COM RAIOS VARIÁVEL

Por último, realizamos a simulação de alguns cenários semelhantes aos da Simulação 5, com diversos valores de mobilidade dos nós e de perdas na transmissão, para o mesmo valor de saltos máximos permitidos - 10, porém com raios variando de acordo com o número de vizinhos de cada nó. Isso nos permite comparar essas diferentes estratégias entre si.

Assim sendo, para essa simulação, o número de nós e o número máximo de saltos permitidos são fixos. Estes e outros parâmetros usados na análise são indicados a seguir:

- a) número de nós: 100;
- b) número máximo de saltos (ttl): 10;
- c) raios de transmissão: 5 7 10 15;
- d) fator de energia: 2;
- e) mobilidade: 0.5 0.7 1.0;
- f) interferência: 0 5 20 50 70;.
- g) estratégias: 5 7 10;
- h) taxa de busca vizinhos: 40 100;

Uma desvantagem do esquema de simulação com raio variável em relação à estratégia de comunicação com raio fixo é que os nós ocupam o canal de transmissão e gastam energia para descobrir quem são seus vizinhos. A fim de compensar este efeito no sistema, introduzimos também a “taxa de busca vizinhos”, que é a probabilidade de se realizar uma nova busca de vizinhos.

Na prática, os nós vizinhos podem ser descobertos principalmente através do próprio funcionamento do sistema. Neste caso, sempre que um nó recebe uma mensagem, ele atualiza sua base de dados com o id do agente transmissor. Pode-se, assim, utilizar um tempo a partir do qual os nós que não enviam mensagens sejam excluídos como vizinho.

Neste sentido, o raio de transmissão codificado na mensagem, além de servir para que eu reconheça a distancia do nó transmissor, também pode dar uma estimativa do valor de time-out para que o nó seja retirado da base de dados. Isto é, quanto mais distante um nó estiver, menor é o tempo para que ele seja desconsiderado como vizinho.

Por outro lado, uma baixa taxa de busca dos vizinhos pode acarretar em duas consequências distintas: caso o nó esteja utilizando um raio maior para transmitir suas mensagens e o número de vizinhos aumente, este continuará gastando mais energia desnecessariamente. De maneira análoga, a situação em que um nó

transmite com um raio pequeno e o número de vizinhos reduz também pode afetar o desempenho do sistema em termos de mensagens recebidas. Esta análise é feita a partir desta simulação.

Os gráficos 51 a 53 apresentam a quantidade de mensagens recebidas para os cenários estudados de acordo com os níveis de interferência, para as estratégias de comunicação estudada.

Gráfico 51: Mensagens Recebidas, Estratégia = 5, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100

Gráfico 52: Mensagens Recebidas, Estratégia = 7, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100

Gráfico 53: Mensagens Recebidas, Estratégia = 10, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100

Em todos os gráficos notamos que a taxa de busca de nós vizinhos não afeta significativamente a quantidade de mensagens recebidas no sistema. Além disso, a proximidade entre as curvas, indica que o grau de mobilidade também não influencia muito este sistema, ainda que haja um leve descolamento das curvas conforme a estratégia do número de nós cresce.

Notamos também que a interferência tem maior influência quanto menor for a estratégia de potência de transmissão, ainda que ela apresente uma desvantagem

em termos da redução da taxa de pacotes transferidos e aumente a energia total do sistema, como foi apresentado anteriormente.

A estratégia 7 é uma alternativa que apresenta um comportamento intermediário entre as estratégias 3 e 10, tal que mais alto desempenho em relação ao número de mensagens recebidas e elevada robustez às perdas de transmissão.

Os mesmos estudos da qualidade de serviço apresentada para as simulações anteriores também foram realizados para este contexto. Estas análises levam em consideração o número médio de saltos para que uma mensagem chegue até o seu destino e o número de perdas de mensagens no sistema.

Os gráficos 54 a 56 mostram o desempenho do sistema em relação ao número médio de saltos e os gráficos 57 a 59 para o número de perdas de mensagem.

Gráfico 54: Média de Saltos, Estratégia = 5, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100

Gráfico 55: Média de Saltos, Estratégia = 7, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100

Gráfico 56: Média de Saltos, Estratégia = 10, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100

Observamos que, para a estratégia 5, o número de saltos médios permanece semelhante para as diversas taxas de busca, apresentando uma acentuada redução a partir de 50% de interferência, o que também é acompanhado pela redução do número de mensagens totais recebidas.

A estratégia 7 apresenta um comportamento diferenciado: inicialmente, há um aumento do número médio de saltos para interferências de até aproximadamente 50%. Logo em seguida, este número começa a decair, acompanhado pela queda do número de mensagens totais recebidas. Este comportamento explica de certo modo a robustez desta estratégia em relação à interferência. Neste sentido, há um

pequeno aumento do número de saltos médios que permite manter o número de mensagens recebidas num patamar elevado. Em seguida, quando o sistema atinge sua capacidade, há uma queda desta média, acompanhada pela redução da taxa de mensagens recebidas.

Por fim, a estratégia 10 não atinge esta capacidade limite de saltos para os casos estudados, o que explica seu alto desempenho ainda para altos valores de interferência.

De maneira geral, ainda que tenham ocorrido variações na média do número de saltos para que uma mensagem chegue até seu destino, os valores não se alteram muito, ficando estabelecidos entre 4 e 5 saltos em todos os casos.

Gráfico 57: Path Change, Estratégia = 5, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100

Gráfico 58: Path Change, Estratégia = 7, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100

Gráfico 59: Path Change, Estratégia = 10, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100

Os gráficos mostram que as perdas de caminho não são influenciadas pelas taxas de busca de vizinhos, mas sim pela estratégia e pela mobilidade em alguns casos.

Para a estratégia 5, os valores das perdas de caminho decrescem com o aumento da interferência de maneira uniforme para diferentes taxas de mobilidade, principalmente para interferências a partir de 50%.

Notamos que a estratégia 7 apresenta diferenças nas perdas de pacotes de acordo com a mobilidade, sendo que, quanto maior a mobilidade, maiores são as perdas. Ainda assim, seu comportamento é semelhante para diferentes taxas de buscas de vizinhos.

Já para a estratégia 10, verificamos que as perdas de pacote são bem mais acentuadas para mobilidades maiores, o que demonstra uma fraqueza desta estratégia, isto é, ela não é robusta a diferentes taxas de mobilidade.

Os gráficos 60 a 62 apresentam as energia totais consumidas no sistema para os diferentes casos estudados.

Gráfico 60: Energia Total, Estratégia = 5, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100

Gráfico 61: Energia Total, Estratégia = 7, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100

Gráfico 62: Energia Total, Estratégia = 10, Taxa de Busca = 10, 40, 70 e 100

De maneira geral, as curvas da energia total são bastante influenciadas pela taxa de busca de mensagens, pouco influenciadas pela estratégia e pouco influenciadas pela mobilidade.

Assim, uma taxa de busca de vizinhos mais baixa é interessante para o sistema já que isso não provoca perda de desempenho tanto em termos de mensagens totais recebidas quanto em termos de qualidade de serviço.

A partir desta simulação, verificamos que a estratégia 7 é uma alternativa intermediária que apresenta vantagens presentes nas alternativas 3 e 10, tais que mais baixa energia consumida e elevada robustez às perdas de transmissão e

também mitiga desvantagens das suas concorrentes, como o menor desempenho em relação a mensagens recebidas, como na estratégia 3, e a alta energia e consumo de canal da estratégia 10.

Ainda no contexto da estratégia 7, uma taxa de busca de raios mais baixa pode ser suficiente para manter baixos níveis de energia do sistema, sem incorrer em perdas de desempenho.

5.10 SIMULAÇÃO 8: COMPARAÇÃO DOS ESQUEMAS DE COMUNICAÇÃO

A tabela 4 faz uma comparação dos principais esquemas de comunicação apresentados neste trabalho. As simulações utilizadas são do segundo tipo, em que 1000 mensagens são trocadas (enviadas e respondidas) dois nós. Para efeitos de comparação, foram usados os seguintes parâmetros:

- a) Quantidade de nós média: 100;
- b) Número de saltos máximos: 10
- c) Raio de alcance quando fixo: 7;
- d) Possíveis raios variáveis: 5, 7, 10, 15;
- e) Valor máximo de interferência: até 30%;
- f) Mobilidade: 50% do raio;
- g) Fator de energia: 2
- h) Taxa de busca quando raio variável: 70%

Tabela 3: Comparação das Estratégias de Comunicação

Estratégia	Msg recebidas	Energia total x[10⁵]	Perdas de pacotes x [10⁴]	Saltos médios	Distribuição de carga
Raio fixo = 7	90%	3	3,8	5,3	Boa
Raio Variável, Estratégia 5 (70%)	90%	226,8	4,5	4,7	Boa
Raio Variável, Estratégia 5 (10%)	90%	35,2	4,5	4,7	Boa
Raio Variável, Estratégia 7 (70%)	98%	228,5	5,5	4,6	Boa
Raio Variável, Estratégia 7 (10%)	98%	37	5,5	4,5	Boa
Direto	100%	6,2	0	1	Conforme mensagem

A tabela indica que somente os casos com raios variados utilizando a estratégia 7 apresenta taxas de recebimento de mensagem da ordem de 100%, necessários no contexto da telefonia. No entanto, a energia gasta com a obtenção dos vizinhos afeta sobremaneira a energia total consumida pelo sistema. Sendo assim, é importante investir em algoritmos que permitam ao sistema inferir quem são seus vizinhos a partir das mensagens aplicativos, como foi mostrado anteriormente. Nesse caso, este sistema também apresentaria vantagens em relação à transmissão direta, tal qual a estratégia de raio fixo.

Além disso, este esquema de comunicação também apresentou pior desempenho em termos de pacotes perdidos e de saltos médios, o que poderia afetar a capacidade da rede em termos de mensagens diferentes trocadas.

Outro critério interessante para a definição dos esquemas de comunicação está associado à distribuição da carga entre os nós. Foi feita a comparação entre dois esquemas de comunicação diferentes, o primeiro para raio fixo e o segundo

para raio variável, ambos para densidades de 100 nós, mobilidade média da ordem de 50% do raio e taxas de interferência de 20%.

O histograma da distribuição da carga para os dois casos é mostrada nos gráficos 61 e 62:

Gráfico 63: Histograma de carga, raio fixo.

Gráfico 64: Histograma de carga, raio variável.

Notamos que a carga é bem distribuída para os dois casos, sendo que os dois nós envolvidos na comunicação são os que apresentam menor gasto energético.

6 CONCLUSÕES

Após a realização das simulações, pode-se tirar algumas conclusões a respeito do funcionamento desse sistema de telefonia formado por dispositivos móveis autônomos que não necessite de nenhuma infraestrutura pré-estabelecida para trocar informações com seus vizinhos, de acordo com o alcance do raio.

A simulação que lida com o problema do Critical Transmission path serviu para definirmos as estratégias de raios possíveis para uma transmissão com múltiplos raios. Esses raios são aqueles que apresentam uma alta probabilidade de fazer com que todos os nós estejam conectados de acordo com a densidade de nós no ambiente. A tabela abaixo resume os resultados encontrados. A partir desses valores, definiu-se que, um sistema de raios variáveis deve possibilitar transmissões com raios de 3, 5, 7 e 10 unidades. A tabela a seguir apresenta os resultados de maneira concisa.

Tabela 4: CTR

Quantidade de nós	Densidade média de vizinhos	Menor raio em média
30	1.5	8
50	2.5	7
70	3.5	6
90	4.2	5
110	5.1	5
150	6.1	5

Como vimos, existem vantagens e desvantagens em se usar raios variados dentro uma mesma rede. A principal vantagem sendo a possibilidade de se reduzir as interferências entre canais e gastar menos energia quando a quantidade de vizinhos e o time to live forem altos o bastante. As principais desvantagens estão associadas ao aumento de pacotes não aplicativos para se descobrir os vizinhos e

ao envio da indicação de recepção. Por exemplo, se o raio A recebe uma mensagem de B transmitida com raio de 10 unidades mas a responde com raio somente de 3 unidades, o recebimento deste pacote nunca será acusado. Resolve-se esses problemas utilizando potências de transmissão discretas e definidas e codificando-as na própria mensagem.

A simulação do problema MEBTP nos auxiliou a compreender o comportamento de estratégias distintas para o sistema. Assim sendo, estratégias com baixo número de vizinhos: exige um ttl maior para manter uma taxa alta de mensagens recebidas, porém permite o uso de potências de transmissão menores. Estratégias com números relativamente altos de vizinhos aumenta a quantidade de nós transmitindo com potências menores, ao passo que reduz o ttl exigido para se manter taxas de mensagens recebidas adequadas. As estratégias 5 e 7 são intermediárias e apresentam vantagens dos dois mundos.

Quanto à taxa de busca de vizinhos, é importante notar que os raios podem ser testados de maneira crescente até se atingir o número de vizinhos definidos pela estratégia. Isso permite que os raios sejam testados de maneira ótima, priorizando os menores raios até que se encontre um valor suficiente de vizinhos.

Sabe-se que uma taxa de busca de raios muito alta, pode significar o funcionamento do sistema com o uso mais racionalizado da energia e do canal, ao passo que isso, por sua vez, incrementaria a energia total devido ao aumento do número de pacotes na rede. Como foi analisado, o ideal seria inferir a informação do número de vizinhos através das mensagens aplicativos naturalmente passadas na rede e somente fazer uma atualização completa da base de dados de vizinhos em períodos mais longos.

Na prática, o período de atualização deve depender da mobilidade em relação ao raio de transmissão: quanto mais baixa a mobilidade em relação ao raio, menores são as chances de mudança da topologia da rede.

Estas estratégias podem ser suficientes para mitigar essa desvantagem. Também é importante destacar que, quando um nó conhece os seus vizinhos para alguns valores de potência de transmissão, ele é capaz de saber se algum nó do campo “caminho” é seu vizinho, podendo enviar a informação diretamente para ele, uma vez que rota estiver sido estabelecida.

Mostramos na simulação 5 que a mobilidade é prejudicial em relação ao número de mensagens totais recebidas, bem como ao consumo de energia e à necessidade da criação de novas rotas, ou seja, a mobilidade reduz a qualidade do serviço. Quanto ao número de mensagens, pode-se corrigir esse problema utilizando um número maior de saltos máximos permitidos,

Através das simulações, ficou demonstrado que as causas mais prováveis para perdas de pacotes estão associadas ao aumento da mobilidade, à exclusão das mensagens ao se atingir o número máximo de saltos e à interferência. Na realidade, para valores de “time to live” a partir de 8 e com interferências abaixo do nível de 30%, a principal causa é a mobilidade. Ao passo que para valores de interferência maiores que 50% e para baixos valores de ttl, estes passam a ser os principais fatores, respectivamente.

Foi mostrado que, na prática, o nível de interferência aumenta quanto maior for o raio de transmissão (interferência entre canais), com o aumento da quantidade de mensagens enviadas (interferência entre símbolos) e segundo o uso de diferentes estratégias de acesso ao meio. Ainda assim, a partir das simulações, verificamos que o sistema apresenta robustez para níveis de interferência que chegaram até na ordem de 30 a 40% segundo o cenário. Sendo assim, conclui-se que um protocolo capaz de limitar o número de mensagens repassadas pode ser benéfico para o sistema em termos de energia sem que isso reduza a quantidade total de mensagens recebidas.

Pode-se elaborar um algoritmo que leve em consideração a informação do raio de transmissão com que a mensagem foi recebida para calcular essa probabilidade de reenvio do pacote. Assim, para raios maiores, aumenta-se também a probabilidade de retransmissão. Isso permitiria que uma mesma mensagem tivesse maior probabilidade de ser passada em uma área maior.

De maneira geral, a estratégia de raio fixo apresentou os melhores resultados em todos os critérios, com exceção da taxa de mensagens recebidas. A estratégia de transmissão com raio variável apresentou a melhor taxa de mensagens recebidas e a menor média de saltos até o destino, porém com maior nível de energia do sistema.

É preciso testar estes dois protocolos na prática para estimar como essa redução de mensagens recebidas afetaria a qualidade das ligações. De qualquer modo, caso o sistema a ser implantado seja apenas de trocas de mensagens (e não de telefonia), o protocolo baseado no raio fixo seria o candidato mais forte.

Neste sentido, pode-se imaginar um protocolo híbrido de telefonia, em que as primeiras mensagens responsáveis pelo estabelecimento da sessão de ligação entre os dois nós e os pacotes de voz podem ser transmitidos baseados no esquema de comunicação com raios variados. Tudo isso, desde que os nós não consigam inferir muito bem quem são seus vizinhos através somente dos pacotes aplicativos.

De qualquer jeito, é preciso testar a capacidade da rede em termos de números de pacotes máximos possíveis de serem transmitidos (*throughput* da rede) para esses dois protocolos mais promissores, o que não foi inserido no escopo das nossas simulações.

Ainda através das simulações, percebe-se que a estratégia de não repassar todas as mensagens e de usar raios menores com ttl não muito altos pode ser uma interessante opção para se aumentar a quantidade de dados transmitidos na rede por reduzir interferências entre canais.

Futuramente estes esquemas podem ser implantados para serem testado na prática, quem sabe em um trabalho de doutorado.

Recentemente um grupo liderado pelo professor australiano Paul Gardner-Stephen da universidade *Flinders d'Adelaide* lançou um projeto livre ainda inacabado denominado “*serva*” cuja ideia de funcionamento se assemelha ao nosso sistema proposto [68]. No caso, este sistema utiliza a camada de acesso definida pelo protocolo 802.11 para transmitir suas mensagens. Isso permite que a troca de mensagens ocorra somente entre dispositivos muito próximos (distâncias de até 30 metros). É interessante notar que, junto com o lançamento desse projeto, se iniciou uma discussão sobre a liberação de canais que permitam alcances mais altos das comunicações.

Na realidade, raios de transmissão da ordem de 2 km em um ambiente normal de cidade faria com que a proporção da mobilidade em relação ao raio seja relativamente pequena, permitindo topologias de rede menos dinâmicas. Neste caso, nosso modelo se assemelharia mais às simulações realizadas para baixas mobilidades, o que apresentou algumas vantagens quanto à qualidade de serviço. Só assim as redes poderão realmente trabalhar em sua capacidade máxima e com os maiores benefícios para seus usuários.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] F. BAKER, An outsider's view of MANET, Internet Engineering Task Force document, mar. 2002.
- [2] C. ELLIOTT and B. HEILE, Self-Organizing, Self-Healing Wireless Networks, Proc. 2000 IEEE Int'l Conf. on Personal Wireless Comm., p. 355-362, 2000.
- [3] E. A. BREWER et al., A network architecture for heterogeneous mobile computing, IEEE Personal Communications, v. 5, p. 8 -24, out. 1998.
- [4] I. F. AKYILDIZ et al., A Survey on Sensor Networks, IEEE Communications Magazine, p. 102-114, ago. 2002.
- [5] J. ZHAO, Mobile Ad Hoc Networking: an Essential Technology for Pervasive Computing, International Conference on Info-tech and Info-net, v. 3, p. 316-321, 2001.
- [6] M. GERLA, C. LINDEMANN, P2P Manets: New Research Issues, Dagstuhl Seminar Proceedings 05152, 2005. Disponível em: http://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2005/213/pdf/Workshop_Report_05152.pdf, Acesso em: 10 jun. 2012, 16:05:44.
- [7] A. DURAN, C. SHEN, Mobile Ad hoc P2P File Sharing, WCNC, IEEE Communication Society, v. 1, p. 114-119, mar. 2004.
- [8] R. BELAVIC et al., Agent-based Social Networking for Mobile User, International Journal of Intelligent Information and Database Systems, v. 4, p. 599-628, 2010.
- [9] W. KELLERER et al., Mobile Peer-to-Peer, Dagstuhl P2P Seminar, 2006. Disponível em: <http://www.peer-to-peer.info/seminar/teamwork/Teams/mobile-peer-to-peer/dagstuhl-06131-mobile-p2p-team.pdf>, Acesso em: 10 jun. 2012, 16:25:17.
- [10] KW CHIN, The behavior of MANET routing protocols in realistic environments, Asia-Pacific Conference on Communication, p. 906-910, 2005.
- [11] M. NIAZI, A. HUSSAIN, A Novel Agent-Based Simulation Framework for Sensing Complex Adaptive Environments, IEEE Sensor Journal, v.11, n. 2, p. 404-412, 2010.
- [12] T. WILLKE et al., A Survey of Inter-Vehicle Communication Protocols and Their Applications, IEEE Communications Surveys & Tutorials, v. 11, n. 2, 2009.
- [13] F. ZHAO, L. GUIBAS, Wireless Sensor Networks: an information processing approach, USA: Elsevier, 2004, 376 p.
- [14] R. ROY, Handbook of Mobile Ad Hoc Networks for Mobility Models, USA: Springer,

2010, 1168 p.

- [15] E. NIEWIADOMSKA, Simulation-based design of self-organising and cooperative networks, *Int. J. of Space-Based and Situated Computing*, v.1, n.1, p.68 – 75, 2011.
- [16] S. SHEARD, A. MOSTASHARI, Principles of Complex Systems for Systems Engineering, *Systems Engineering*, vol. 12, n. 4, p. 295-311, 2009.
- [17] M. NIAZI, A. HUSSAIN, Agent-Based Tools for Modeling and Simulation of Self-Organization in Peer-to-Peer, Ad Hoc, and Other Complex Networks, *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 3, p. 166-173, 2009.
- [18] S. VASSILARES, G. YOVANOF, Wireless Innovations as Enablers for Complex & Dynamic Artificial Systems, *Springer Science and Business Media*, v. 53, n. 3, p. 365-393, 2010.
- [19] Y. BAR-YAM, When Systems Engineering Fails – Toward Complex Systems Engineering, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, v. 2, n. 2, p. 2021-2028, 2003.
- [20] Y. BAR-YAM, Unifying Principles in Complex Systems, New England Complex System Institute, 2003. Disponível em: <<http://necsi.edu/projects/yaneer/complexsystems.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2012, 09:38:40.
- [21] R. F. SERVICE, COMPLEX SYSTEMS: Exploring the Systems of Life, *Science* 2, v. 284, n. 5411, p. 80-83. 1999.
- [22] H. ZHUGE, The Future Interconnection Environment, *IEEE Computer Society*, v. 38, n. 4, p. 27-33, 2005.
- [23] J. DEROSA et al., A Research Agenda for the Engineering of Complex Systems, *SysCon 2008 - IEEE International Systems Conference*, p. 1 - 8, 2008.
- [24] A. SIKORA, E. NIEWIADOMSKA, MobASim: a Software Platform for Mobile Ad Hoc Networks Modeling and Simulation, *IEEE International Conference on Wireless & Mobile Computing, Networking & Communication*, p. 625 - 630, 2008.
- [25] B. E. WHITE, Complex Adaptive Systems Engineering (CASE), *IEEE SysCon 2009 — 3rd Annual IEEE International Systems Conference*, p. 70 - 75, 2009.
- [26] M. FRODIGH, et al, Wireless Ad Hoc Networking: The Art of Networking without a Network, *Ericsson Review*, n. 4, 2000.
- [27] A. AGARWAL and P. R. KUMAR, Capacity Bounds for Ad Hoc and Hybrid Wireless Networks, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, v. 34, july 2004.
- [28] P. Gupta and P. R. Kumar, The Capacity of Wireless Networks, *IEEE Trans. on Information Theory*, v. 46, n. 2, p. 388-404, mar. 2000.

- [29] C. BETTSTETTER, On the Minimum Node Degree and Connectivity of a Wireless Multihop Network, Proc. MobiHoc, p. 80-91, 2002.
- [30] D. CAVIN et al.; On the accuracy of MANET simulators, Proc. ACM Workshop on Princ. Mobile Computing (POMC'02), p. 38-43, 2002.
- [31] H. XIAO et al., A Flexible Quality of Service model for Mobile ad-hoc Networks, IEEE VTC-2000 spring, v. 1, n. 1, p. 445 – 449, 2000.
- [32] R. C. DORF, The Handbook of Ad Hoc Wireless Networks, CRC Press LLC, 2003, 624 p.
- [33] L. M. FEENEY, A Taxonomy for Routing Protocols in Mobile Ad Hoc Networks, Swedish Institute of Computer Science Technical Report T99/07, out. 1999.
- [34] N. SCHIERITZ and P. M. MILLING, Modeling the Forest or Modeling the Trees: A Comparison of System Dynamics and Agent-Based Simulation, 2003. Disponível em: <http://www.systemdynamics.org/conferences/2003/proceed/PAPERS/140.pdf>.
<
Acesso em: 11 jul. 2012, 11:25:32.
- [35] M. JOHNSON, Dynamic Source Routing in ad hoc wireless networks, Mobile Computing, Ed. Imielinski/Koth, p. 153-181, 1996.
- [36] P. E. MCKENNEY and P. E. BAUSBACHER, Physical- and Link-Layer Modeling of Packet Radio Network Performance, IEEE J. on Selected Areas in Comm., v. 9, p. 59-64, 1991.
- [37] E. M. ROYER and C. K. TOH, A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks, IEEE Personal Communications, p. 46-55, abr. 1999.
- [38] M. MITCHELL, Complexity A Guided Tour, USA: Oxford University Press, 2009, 368 p.
- [39] J. MILLER, S. PAGE, Complex Adaptive Systems, USA: Princeton studies in complexity, 2007, 284 p.
- [40] M. Barbeau, E. Kranakis, Principles of Ad Hoc Networking, USA: John Wiley & Sons, 2007, 274 p.
- [41] D. KOTZ et al., Experimental evaluation of wireless simulation assumptions, Dartmouth Computer Science Technical Report TR2004-507, p. 78 – 82, 2004.
- [42] Y. CHEN et al., An on-demand, link-state, multi-path QoS routing in a wireless mobile ad-hoc network, Computer Communications 27 (2004) 27–40, 2004. Disponível em: <<http://people.cs.nctu.edu.tw/~yctseng/papers.pub/mobile37-comcom.pdf>>. Acesso em: 11 jul. 2012, 11:40:55.

- [43] R. ASOKAN, A Review of Quality of Service (QoS) Routing Protocols for Mobile Ad hoc Networks, IEEE International Conference on Wireless Communication and Sensor Computing, p. 1 - 6, 2010.
- [44] RFC 2501 Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations, Mobile Ad Hoc Networking Working Group of the Internet Engineering Task Force, 1999.
- [45] A. NOSRATINIA, Cooperative Communication in Wireless Networks, IEEE Communications Magazine, v. 42, n. 10, p. 74 – 80, out. 2004.
- [46] M. NEWMAN, Complex Systems: a survey, Center for the Study of Complex Systems, University of Michigan, 2011. Disponível em: < <http://arxiv.org/pdf/1112.1440.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2012, 18:05:12.
- [47] M.J. PRIETULA, K.M. CARLEY, L. GASSER, Simulating Organizations: Computational Models of Institutions and Groups. USA: MIT Press, 1998, 270 p.
- [48] T. ANDEL, A. YASINAC, On the Credibility of Manet Simulations, Journal Computer, v. 39, n. 7, p. 48 - 54, 2006.
- [49] M. E. KUHL, N. M. STEIGER et al., Tutorial on Agent-Based Modeling and Simulation, Proc. 2005 Winter Simulation Conference, p. 151 – 162, 2005.
- [50] A. BORSHCHEV e A. FILIPPOV, From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools. Disponível em: < http://www.systemdynamics.org/conferences/2004/SDS_2004/PAPERS/381BORSH.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2012, 19:16:24
- [51] S. XU, Does the IEEE 802.11 MAC Protocol Work Well in Multihop Wireless Ad Hoc Networks, IEEE Communications Magazine, v. 39, n. 6, p. 130 - 137, 2001.
- [52] F. KARGL et al., Advanced Detection of Selfish or Malicious Nodes in Ad hoc Networks, Proceedings of the First European conference on Security in Ad-hoc and Sensor Networks, p. 153 – 165, 2004.
- [53] C. FULLMER, J.J. GARCIA, Solutions to hidden terminal problems in wireless networks, SIGCOMM '97 Proceedings of the ACM SIGCOMM '97 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer, v. 27, n. 4, p. 39 – 49, out. 1997.
- [54] BHARGHAVAN et al., MACAW: A Media Access Protocol fo Wireless LAN's, In the Proc. ACM SIGCOMM Conference (SIGCOMM '94), p. 212-225, 1993.
- [55] B. SKLAR , Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Part I: Characterization. IEEE Communications Magazine, v. 35, n. 7, p. 90–100, 1997.
- [56] M.A RICHARDS, Rice Distribution for RCS, Georgia Institute of Technology, 2006. Disponível em: < <http://users.ece.gatech.edu/mrichard/Rice%20power%20pdf.pdf>>.

Acesso em: 22 jul. 2012, 10:03:48.

- [57] A. NOSRATINIA, T. E. Hunter, Cooperative Communication in Wireless Networks, Communications Magazine, v. 42, n. 10, p. 74 - 80, 2004.
- [58] S. Ni, Y. TSENG, Y. CHEN, and Jang-Ping Sheu , The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network, Mobicom '99, p. 151 – 162, 1999.
- [59] S. NARAYANAPPA, P. VJTCHOVSK, A Polynomial Time Solution to Minimum Forwarding Set Problem in Wireless Networks under Unit Disk Coverage Model, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, v. 20, n. 7, p. 913 – 924, jul 2009.
- [60] Y. ZHANG, Wireless Quality-of-Service, USA: Taylor & Francis, 2008, 376 p.
- [61] R. J. WILSON, Introduction to Graph Theory, USA: Prentice Hall, 2007, 600 p.
- [62] M. SANCHEZ et al., Determination of Critical Transmission Range ind Ad Hoc Networks. Disponível em: < <http://nile.cise.ufl.edu/ee499/critical-power-range-haas.pdf>>. Acesso em: 23 jul. 2012, 08:15:56.
- [63] W. LIANG, Constructing minimum-energy broadcast trees in wireless ad hoc networks, MobiHoc'02 Proceedings of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & Computing, p. 112 – 122, 2002.
- [64] P. MOHAPATRA et al., Qos in Mobile Ad Hoc Networks, Wireless Communications, v. 10, n. 3, 2003.
- [65] R. ALBERT, A. BARABÁSI, Statistical Mechanics of Complex Networks, Rev. Mod. Phys., v. 74, p. 47–97, 2001.
- [66] B. FOROUZAN, Data Communication and Networking, Tata McGraw-Hill Education, 2004, 504 p.
- [67] M. BAYSAN, K. SARAC et al., On Selecting Minimum Forwarding Set, Dept. of Manage., Univ. of Toronto, Toronto.
- [68] The serval Project. Disponível em: <[http:// www.servalproject.org/](http://www.servalproject.org/)>. Acesso em: 10 jun. 2012, 16:50:42.