



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ

JOSÉ VIGNO MOURA SOUSA

**MAC-OLSR: UMA PROPOSTA PARA MELHORIA DE
DESEMPENHO DO PROTOCOLO OLSR UTILIZANDO
MÚLTIPLAS MÉTRICAS EM REDES *MESH***

**FORTALEZA – CEARÁ
2009**

JOSÉ VIGNO MOURA SOUSA

MAC-OLSR: UMA PROPOSTA PARA MELHORIA DE DESEMPENHO DO
PROTOCOLO OLSR UTILIZANDO MÚLTIPLAS MÉTRICAS EM REDES *MESH*

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre Centro de Ciências e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Marcial Porto Fernández

Co-orientador: Prof. Dr. Jackson Sávio de Vasconcelos Silva

FORTALEZA – CEARÁ
2009

S725m Sousa, José Vigno Moura Sousa
MAC-OLSR: Uma proposta para melhoria de desempenho do protocolo OLSR utilizando múltiplas métricas em redes *Mesh* / José Vigno Moura Sousa. — Fortaleza, 2009.
65 p.
Orientador: Prof. Dr. Marcial Porto Fernández
Co-orientador: Prof. Dr. Jackson Sávio de Vasconcelos Silva
Dissertação (Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação) – Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciências e Tecnologia.
1. Redes *mesh*. 2. Roteamento. 3. Sistema de Apoio a Decisão. 4. Qualidade de Serviço. I. Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciências e Tecnologia.
CDD: 004.6

JOSÉ VIGNO MOURA SOUSA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ
COMO REQUISITO PARCIAL PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
ACADÊMICO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO.

Prof. Marcial Porto Fernández (Orientador)
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Prof. Jackson Sávio de Vasconcelos Silva
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Prof. Luís Henrique Maciel Kosmalski Costa
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Prof. Antônio Clécio Fontelles Thomaz
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

A minha querida mãe Elizabeth Rodrigues eterna inspiração para a vida e a meu pai, José Virgílio (*in memoriam*), a meu irmão José Vagno e a minha noiva Aglaíse Frota, eterna inspiração para o trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado saúde e oportunidade para iniciar e concluir este trabalho.

A minha família, pelo incentivo e compreensão durante o período do desenvolvimento deste trabalho.

A minha noiva Aglaise frota, por estar sempre ao meu lado nestes quase sete anos juntos.

As minhas tias e primos, pelo apoio moral no desenvolvimento deste trabalho.

A Dona Eloísa, pelo apoio.

Ao Prof. Marcial Porto Fernadez, pela orientação, dedicação e pelos ensinamentos, fundamentais para o resultado deste trabalho.

Ao Prof. Jackson Sávio pela dedicação e apoio, por ter contribuído com sua experiência, para a realização deste trabalho sem o qual não teria sido possível a realização deste trabalho.

Ao amigo Guilherme pela contribuição inicial deste trabalho.

Ao amigo Marco Antônio pela dedicação e apoio, por ter contribuído com sua experiência, para a realização deste trabalho.

Aos amigos Weverton Cordeiro e Waldir Aranha, pelo grande apoio e contribuição prestado na realização desta dissertação, sem o qual não teria sido possível a realização deste trabalho.

A UECE (Universidade Estadual do Ceará) e ao programa de Mestrado Acadêmico em Ciências da Computação (MACC) pelas instalações e pela excelência do ensino.

A FUNCAP (Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio Financeiro no início do trabalho.

RESUMO

As redes *mesh* são redes cooperativas e auto configuráveis, capazes de interconectar um conjunto de nós fixos e de rotear pacotes entre si através de múltiplos saltos. Estas redes foram concebidas com o objetivo de prover serviço de acesso à Internet em localidades com infra-estrutura de cabos precária e sem oferta de serviço de redes sem fio. Assim, as redes *mesh* propõem que os usuários colaborem entre si para possibilitar o encaminhamento de pacotes dos usuários remotos até o ponto de conexão com a Internet. As redes *mesh* ainda não foram padronizadas e muitos problemas encontram-se em aberto ou com solução ineficiente. Este trabalho tem como objetivo propor um novo mecanismo para melhorar o roteamento de pacotes em uma rede *mesh*. Esse mecanismo trata da utilização de métricas múltiplas no protocolo pró-ativo, *Optimized Link State Routing* (OLSR). Como o roteamento baseado em múltiplas métricas é um problema NP-completo, utilizam-se as técnicas para sistema de apoio a decisão e podagem com a intenção de melhorar a qualidade do roteamento. Esta dissertação propõe a utilização do sistema de apoio a decisão, MACBETH, em conjunto com o sistema de podagem, *pruning*, para melhorar o critério de escolha de rotas no protocolo OLSR, que foi chamado de MAC-OLSR. Para validar esta proposta foi desenvolvido um protótipo no *Network Simulator* (NS) testado em um cenário baseado em uma topologia real.

Palavras-chave: Redes *mesh*. Roteamento. Qualidade de serviço. Sistema de apoio a decisão. Sistema de poda.

ABSTRACT

Mesh networks are cooperative networks and self-configurable, capable of interconnecting a set of fixed nodes and route packets to each other through multiple hops. These networks were designed with the goal of providing service to Internet access in locations with poor infrastructure cable and service offering of wireless. Thus, the mesh is proposed that users work together to enable packet forwarding for remote users to the point of connection to the Internet. Mesh networks have not been standardized and many problems are open or inefficient solution. This mechanism is the use of multiple metrics in proactive protocol, Optimized Link State Routing (OLSR). As the routing based on multiple metrics is an NP-complete problem, we use the technical system for decision support and pruning with the intention of improving the quality of routing. This paper proposes the use of the decision support, MACBETH, together with the system, pruning to improve the criterion for choosing routes in OLSR protocol, which was named MAC-OLSR. To validate this proposal was developed a prototype in the Network Simulator (NS) tested in a scenario based on a real topology.

Keywords: Mesh networks. Quality of service. System decision support. Pruning system.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Padrões e características da família 802.11 [33].	19
Tabela 2.2 Comparativo Ad-Hoc x <i>mesh</i>	24
Tabela 4.1 Exemplo de Matriz de Decisão.....	34
Tabela 5.1 Escores do ETX.	44
Tabela 5.2 Escores do MD.	45
Tabela 5.3 Função do ETX.....	45
Tabela 5.4 Função do MD.	46
Tabela 5.5 Rotas possíveis	47
Tabela 6.1 Parâmetros relevantes	53
Tabela 6.2 Média e Intervalo de Confiança – Atraso.....	55
Tabela 6.3 Média e Intervalo Confiança – Vazão.	57
Tabela 6.4 Média e Intervalo de Confiança – Bloqueio.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 WMN híbrida.	15
Figura 2.1 Exemplo de rede infra-estruturada [48].	20
Figura 2.2 Estrutura de uma rede <i>mesh</i>	23
Figura 3.1 Rede Ad-Hoc.	25
Figura 3.2 Funcionamento do MPRs.	28
Figura 3.3 Processo do MMOLSR	32
Figura 5.1 Fluxograma do MAC-OLSR.	40
Figura 5.2 Árvore de definição das métricas.	41
Figura 5.3 Matriz de julgamento de preferência para a métrica ETX.	42
Figura 5.4 Matriz de julgamento de preferência para a métrica MD.	42
Figura 5.5 Tabela de escala de julgamento.	43
Figura 5.6 Termômetro de desempenho para a métrica ETX.	43
Figura 5.7 Termômetro de desempenho para a métrica MD.	44
Figura 5.8 Exemplo de uma pequena rede.	46
Figura 6.1 Cenário UFPA [38].	50
Figura 6.2 Pontos envolvidos nas chamadas VoIP e tráfegos FTP [38].	52
Figura 6.3 Atraso médio para cada fluxo VoIP.	54
Figura 6.4 Vazão média para cada fluxo VoIP.	56
Figura 6.5 Probabilidade de Bloqueio para cada fluxo VoIP.	56

LISTA DE ABREVIATURAS

ABR	-	<i>Associativity-Based Routing</i>
AHP	-	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANP	-	<i>Analytic Network Process</i>
AODV	-	<i>Ad-Hoc On-Demand Distance Vector</i>
AP	-	<i>Access Point</i>
BSA	-	<i>Basic Service Area</i>
BSS	-	<i>Basic Service Set</i>
CEDAR	-	<i>Core-Extraction Distributed Ad hoc Routing</i>
DS	-	<i>Distribution System</i>
DSDV	-	<i>Destination Sequenced Distance Vector</i>
DSR	-	<i>Dynamic Source Routing</i>
ETX	-	<i>Expected Transmission Count</i>
ESS	-	<i>Extended Service Set</i>
FSR	-	<i>Fisheye State Routing</i>
GSR	-	<i>Global State Routing</i>
IEEE	-	<i>Institute of Eletrical and Eletronic Engineers</i>
IP	-	<i>Internet Protocol</i>
LAN	-	<i>Local Area Network</i>
MAC	-	<i>Medium Access Control</i>
MACBETH	-	<i>Measuring Categorical Based Evaluation Technique</i>
MAC-Result	-	<i>Table Result of MACBETH Calculator</i>
MAN	-	<i>Metropolitan Area Network</i>
MANETS	-	<i>Mobile Ad-Hoc Networks</i>
MAP	-	<i>Mesh Acess Point</i>
MP	-	<i>Mesh Point</i>
MD	-	<i>Minimun Delay</i>
MDCM	-	<i>Multiple-Criteria Decision Method</i>
MESH	-	<i>Malha</i>
ML	-	<i>Minimun Loss</i>

M-MACBETH	-	<i>Macbeth Software</i>
MM-OLSR	-	<i>Multiple-Metric Optimized Link State Routing</i>
MPR	-	<i>Multipoint Relays</i>
NS	-	<i>Network Simulator</i>
OLSR	-	<i>Optimized link state routing protocol</i>
OWD	-	<i>One Way Delay</i>
QoS	-	<i>Quality Of Service</i>
RTP	-	<i>Real-Time Transport Protocol</i>
TC	-	<i>Topology Control</i>
TOPSIS	-	<i>Technique for Order Similarity to Ideal Solution</i>
TORA	-	<i>Temporally Ordered Routing Algorithm</i>
UDP	-	<i>User Datagram Protocol</i>
WAN	-	<i>Wide Area Network</i>
WDS	-	<i>Wireless Distribution System</i>
WEP	-	<i>Wired Equivalent Privacy</i>
WLAN	-	<i>Wireless Local Area Network</i>
WMN	-	<i>Wireless Mesh Network</i>
ZRP	-	<i>Zone Routing Protocol</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E MOTIVAÇÃO	15
1.2	OBJETIVO E METODOLOGIA	16
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2	REDE LOCAL SEM FIO	18
2.1	CLASSIFICAÇÃO DAS REDES SEM FIO	19
2.2	REDE AD-HOC	20
2.3	REDE MESH	22
2.4	COMPARATIVO AD-HOC X MESH	23
3	PROTOCOLO DE ROTEAMENTO	25
3.1	OLSR	27
3.2	MÉTRICAS	28
3.2.1	OLSR-ETX	29
3.2.2	OLSR-ML	30
3.2.3	OLSR-MD	31
3.2.4	MMOLSR	32
4	SISTEMA DE APOIO DE DECISÃO E PODA	34
4.1	AHP – ANALYTIC HIERARCH PROCESS	34
4.2	MACBETH	35
4.3	PRUNING	38
5	MAC-OLSR	39
5.1	MODELO PROPOSTO	40
5.2	M-MACBETH	41
5.3	MAC-RESULT	46
5.4	PODAGEM	48
6	AVALIAÇÃO DO MAC-OLSR E ANÁLISE DOS RESULTADOS	50
6.1	CENÁRIO	50
6.2	METODOLOGIA ADOTADA	51
6.3	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS	52
6.4	RESULTADOS	54

6.5	COMENTÁRIOS-----	57
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS-----	59
7.1	CONTRIBUIÇÕES E RESULTADOS ALCANÇADOS-----	59
7.2	TRABALHOS FUTUROS-----	60
	REFERÊNCIAS-----	62

1 INTRODUÇÃO

O IEEE 802.11 é o padrão de redes sem fio mais utilizado no mundo [43]. Um dos modos de operação deste padrão é o *Ad-Hoc*. Neste modo, há uma comunicação direta entre os dispositivos (i.e., nós) que podem ser móveis ou fixos, sem a necessidade de um concentrador. Além disso, os nós fixos podem ser integrados, formando uma rede em malha.

A rede em malha ou WMNs (*Wireless Mesh Networks*), também conhecidas como rede *mesh*, são redes cooperativas que têm um conjunto de nós fixos conectados entre si para rotear pacotes através de múltiplos saltos [43]. Estas redes também são auto configuráveis, pois têm a capacidade de procurar novas rotas, em caso de perda de um ou mais nós da rede [6].

Os equipamentos utilizados nas WMNs são de baixo custo, pois sua tecnologia já é bastante difundida no mercado, além disso, estes equipamentos apresentam facilidade de implantação e configuração. Sendo esta a principal vantagem para implantação das WMNs.

Por isso, proporcionam a construção desta infra-estrutura para locais de baixa renda levando o acesso à Internet a regiões com carência de infra-estrutura de telecomunicações [35]. As WMNs são uma alternativa viável para promover a inclusão digital em áreas carentes.

Outra forma de aplicação é a extensão da área de cobertura de universidades e empresas onde não é viável a rede cabeada por questões de custo e/ou obstáculos. Além disso, também pode ser utilizada em casos de desastres, porque outra vantagem desta infra-estrutura WMNs é permitir a construção de forma rápida e com poucos recursos para as comunicações entre os diversos setores de resgate [22].

Esta dissertação propõe um novo mecanismo para escolha de rotas em redes *mesh* utilizando múltiplas métricas, propiciando uma melhor qualidade dos enlaces para aplicações com qualidade de serviço (QoS). Neste capítulo, uma visão geral de cada um dos temas relacionados é apresentada. O foco da seção 1.1 é a caracterização do problema e a motivação para o desenvolvimento desta dissertação; na seção 1.2 são descritos os objetivos e a metodologia utilizada; e, finalmente, na seção 1.3, a estrutura da dissertação é definida.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E MOTIVAÇÃO

As redes *mesh* são redes cooperativas e auto configuráveis, que interconectam um conjunto de nós fixos capazes de rotear pacotes entre si através de múltiplos saltos. Têm a vantagem de serem redes de baixo custo, de fácil implantação e bastante tolerante a falhas [43].

Estas redes são classificadas em três grupos, com base na funcionalidade dos nós. Os grupos são rede infra-estruturada, cliente e híbrida. A rede infra-estruturada é formada por nós com função de roteadores, repetidores e *gateway*. Já a rede cliente é formada por nós com função de acesso a rede *mesh*. Por fim, a rede híbrida é formada por nós roteadores que também têm a função de clientes [43].

A Figura 1.1 apresenta uma WMN híbrida. Observa-se nesta figura que o modo de rede híbrida provê conexões com diferentes tipos de redes. Como esta rede tem uma abrangência e capacidade maior o modelo proposto nesta dissertação é baseado em WMN híbrida.

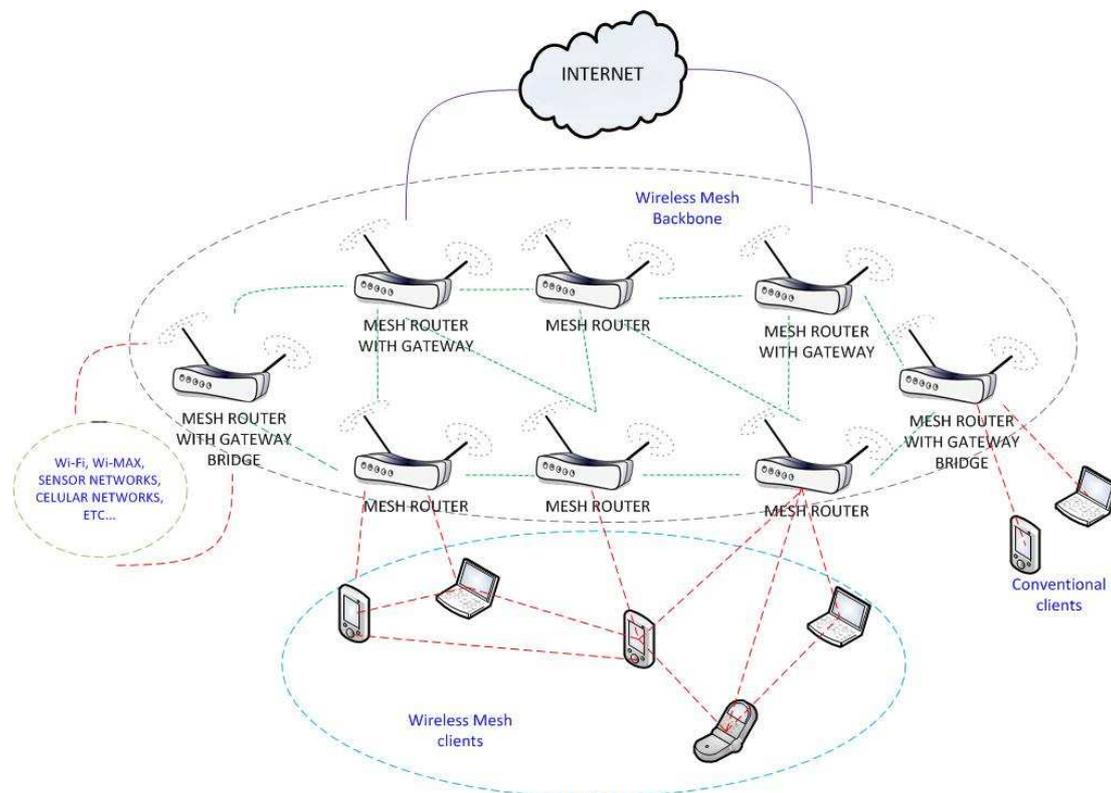


Figura 1.1 WMN híbrida.

Contudo, as redes *mesh* possuem problemas, como: escalabilidade [3][4], auto-organização, segurança [23] e integração com outras redes. Por exemplo, quando o tamanho

da rede aumenta (i.e., escalabilidade) ocorre uma degradação significativa do desempenho, também pode ocorrer que os protocolos de roteamento não encontrem uma rota confiável (i.e., auto-organização e segurança) e os protocolos de transporte podem perder as conexões. A perda de conexões ocorre porque os protocolos de transporte são dependentes de IP's, com isto ao mudar a localização de um equipamento faz-se necessário a mudança do IP. [22].

Neste contexto, muitos protocolos de roteamento têm proposto melhorias para solucionar os problemas existentes nas redes *mesh*. Contudo, a maioria das soluções propostas estão focados em aplicações específicas [35]. Ou, em abordagens para se desenvolver protocolos de roteamento, com o uso de heurísticas, simples métricas, múltiplas métricas e métricas multidimensionais [9][11][12][13][27][29][47].

Sendo assim, surge a necessidade da elaboração de uma abordagem para integrar e evoluir as soluções existentes para os desafios expostos. Por isso, esta dissertação propõe utilizar múltiplas métricas com o protocolo OLSR (*Optimized Link Stating Routing*), para garantir uma melhor seleção de rotas melhorando a qualidade dos enlaces.

Entretanto, trabalhar com múltiplas métricas é um problema complexo, porque qualquer combinação não trivial se transforma em um problema NP-completo [41]. Para resolver o problema NP-completo é utilizado o sistema MACBETH.

O MACBETH é um sistema de apoio a decisão, que auxilia na decisão da melhor rota utilizando mais de um critério para tomar esta decisão, exemplos de critérios utilizados são: custo, qualidade e múltiplas rotas [20].

1.2 OBJETIVO E METODOLOGIA

Esta dissertação tem por objetivo propor uma alteração no protocolo OLSR, denominado MAC-OLSR, para melhorar a escolha de rotas em uma rede *mesh* utilizando múltiplas métricas. O modelo aqui proposto tem o intuito de garantir uma melhor seleção de rotas proporcionando uma maior qualidade dos caminhos. Em virtude de trabalhar com múltiplas métricas qualquer combinação não trivial se transforma em um problema NP-completo [41]. Sendo assim, surge a necessidade de utilizar um sistema de apoio a decisão (p.ex., AHP e MACBETH) [20].

A metodologia utilizada nesta proposta é dividida em: capturar os dados, filtrar e organizar os dados, criar o modelo, aplicar em um estudo de caso e analisar os resultados com relação ao modelo original. Inicialmente os dados são capturados através de várias simulações

de uma rede *mesh* no *network simulator* [40]. Depois são realizados os filtros com base nos dados capturados e organizados para a construção do modelo proposto aqui. O MAC-OLSR utiliza o sistema de apoio a decisão, MACBETH. Com o modelo criado os testes são realizados no *network simulator* e comparados com o protocolo original.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além desse capítulo de Introdução, a dissertação está organizada nos capítulos descritos a seguir:

- Capítulo 2 – apresenta as redes sem fio, com uma explanação dos conceitos de redes infra-estruturada, Ad-Hoc e *mesh*.
- Capítulo 3 – detalha os protocolos de roteamento, dando ênfase no OLSR e suas métricas OLSR-ETX, OLSR-ML e OLSR-MD.
- Capítulo 4 – aborda sobre os sistemas de apoio a decisão AHP e MACBETH. Além disso, explana sobre o sistema de poda, PRUNING.
- Capítulo 5 – descreve o modelo MAC-OLSR proposto, com a utilização do M-MACBETH e PRUNING. Além de desenvolver o MAC-Result que é um módulo do modelo proposto.
- Capítulo 6 – realiza o estudo de caso através da inserção deste modelo no NS-2 e utiliza como dados de entrada o cenário da Universidade Federal do Pará (UFPA). Conclui-se fazendo a análise dos resultados obtidos.
- Capítulo 7 – finaliza a dissertação com as considerações finais, onde são evidenciadas as contribuições, os resultados alcançados, e os trabalhos futuros.

2 REDE LOCAL SEM FIO

A rede local sem fio utiliza ondas de rádio para interligar as estações de uma rede local. Com as redes locais sem fio, usuários podem acessar informações compartilhadas sem a necessidade de um cabo [48].

Em 1999, o IEEE publicou o padrão IEEE 802.11 [30][33], que é o responsável pela especificação das redes locais sem fio. Ele descreve o ambiente e o protocolo em todos seus aspectos, incluindo desde a parte física até um protocolo de segurança do nível de enlace de dados, chamado WEP (*Wired Equivalent Privacy*).

Este padrão é destinado à interligação de redes locais com alcance entre 100 e 300 metros. E trata-se de padrão implementado, geralmente, como extensão ou alternativa para as redes com cabeamento convencional (par metálico ou fibra óptica).

Atualmente, esse padrão está mais presente nas empresas, hotéis, fábricas e lugares públicos, como: aeroportos, universidades, hospitais e centros comerciais, oferecendo a possibilidade de acesso à rede com suporte à mobilidade.

A estrutura básica de uma rede 802.11 é o conjunto de serviço básico (*Basic Service Set – BSS*), o qual cada grupo de estações se comunica umas com as outras. Este tipo de comunicação acontece dentro de uma área de serviço básico (*Basic Service Area – BSA*), definida pelas características de propagação do meio sem fio. Por exemplo, quando uma estação se encontra dentro de uma área de serviço BSA, ela pode se comunicar com outras estações do BSS [1].

Com base no 802.11 foram definidos vários padrões, sendo o 802.11b e o 802.11g os mais utilizados atualmente. A

Tabela 2.1 apresenta os principais padrões e características da família 802.11.

Neste capítulo são discutidos os aspectos das redes locais sem fio com foco no padrão IEEE 802.11. A seção 2.1 apresenta a forma que as redes sem fio são classificadas. Já na seção 2.2 é detalhada a rede Ad-Hoc. Em seguida, a seção 2.3 descreve a rede *mesh*, detalhando o seu funcionamento. Finalmente, a seção 2.4 realiza um comparativo entre as redes Ad-Hoc e *mesh*, abordando as diferenças entre as principais características.

Tabela 2.1 Padrões e características da família 802.11 [33].

Padrão	Características
802.11a	Opera em: 5GHz; 54Mbps.
802.11b	Opera em: 2,4GHz; 11Mbps.
802.11d	<i>World Mode</i> (Europa 20dB, EUA/BRA 36dB)
802.11e	Suporte para aplicações que necessitam de Qualidade de Serviço (QoS)
802.11f	Recomendação para redes ponto a ponto sob protocolo IAP (<i>Inter Access Point</i>)
802.11g	Opera em: 2,4GHz; 54Mbps. Tem compatibilidade com o 802.11b
802.11h	Gerenciamento do espectro
802.11i	Avanços em segurança
802.11n	Opera em: 2,4GHz e 5,8GHz; Taxas de 65Mbps a 600Mbps. Tem compatibilidade com o 802.11a e 802.11g
802.11s	Redes mesh

2.1 CLASSIFICAÇÃO DAS REDES SEM FIO

As redes sem fio são classificadas em três tipos: infra-estruturada, Ad-Hoc e *mesh*. O foco desta dissertação são as redes *mesh*, que vai ser detalhada na seção 2.2. Já as redes infra-estruturadas são definidas nesta seção.

As redes infra-estruturadas são redes que possuem um concentrador central, isto é, os nós se conectam ao concentrador central para obter o acesso. O concentrador central tem a função de coordenar, associar, desassociar os nós conectados a ele. A comunicação entre

todos os nós são gerenciadas pelo concentrador central. A Figura 2.1 é um exemplo de uma típica rede infra-estruturada.

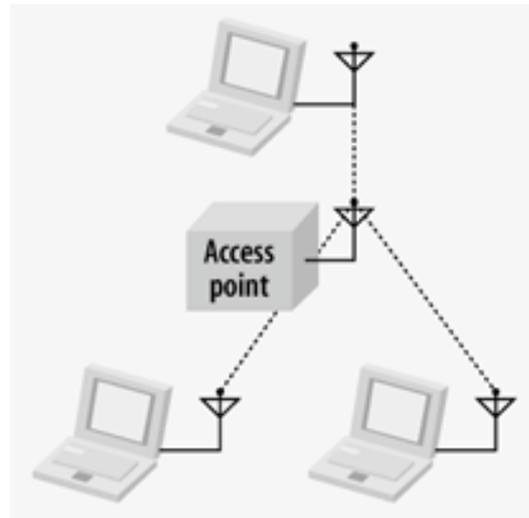


Figura 2.1 Exemplo de rede infra-estruturada [48].

2.2 REDE AD-HOC

As redes Ad-Hoc, também conhecidas como MANETS (*Mobile Ad-Hoc Networks*)[21], são redes sem infra-estrutura que não dependem de um concentrador central. Estas redes possuem um roteamento colaborativo, ou seja, possibilitam que os nós se comuniquem com nós mais distantes, através de múltiplos saltos pela colaboração dos nós intermediários.

Uma das grandes características das redes Ad-Hoc é a sua topologia, pois a rede tende a mudar dinamicamente devido à mobilidade dos nós, tendo como vantagem um baixo custo de implementação.

Contudo, uma rede Ad-Hoc pura não é capaz de prover acesso a internet, porque não tem um concentrador central e não possui um gateway de rede, por ser uma rede ponto a ponto. Estas redes não tem mecanismos para se comunicarem em uma rede complexa, isto significa que cada nó não possui suporte para implementar mecanismos de acesso e prioridade mecanismos, a fim de proporcionar qualidade de serviço.

Com o objetivo de prover estes mecanismos em uma rede Ad-Hoc foram desenvolvidos protocolos para o encaminhamento e roteamento de pacotes, permitindo que qualquer nó possa ser um *gateway* na rede e podendo também rotear pacotes para outros nós

da rede. Esta solução tem sido utilizada ultimamente para a implementação das redes *pré-mesh*.

Atualmente, existem duas abordagens para redes *mesh*. A primeira abordagem é baseada em protocolos de roteamento Ad-Hoc nível 3, chamado de soluções *pré-mesh*, e a segunda, através de encaminhamento de múltiplos saltos (nível 2), com um novo protocolo MAC (*Medium Access Control*)[19][2] [30].

A primeira abordagem é utilizada por diversos setores comerciais e universidades. Algumas empresas (p.ex., Motorola, Cisco e Meraki) já oferecem soluções *mesh* direcionadas aos mais variados campos de atividades, sejam acadêmicas, empresariais ou governamentais.

As universidades começaram a explorar este tipo de rede usando equipamentos 802.11b/g de baixo custo, com facilidade de implementação e manutenção [42]. Como exemplo, temos o projeto REMesh iniciado pela Universidade Federal Fluminense (UFF) [44]. Este projeto desenvolveu equipamentos protótipos que foram utilizados por outras instituições, como: a Universidade Federal do Pará (UFPA). A solução desta dissertação é baseada neste tipo de abordagem.

A principal desvantagem da solução *pré-mesh* é a não existência de um padrão, portanto cada empresa ou instituição implementa de forma diferente, fazendo que uma solução de uma determinada empresa ou instituição não funcione com a outra.

A segunda abordagem encontra-se em desenvolvimento (draft) [31][36][37]. O IEEE designou um grupo para trabalhar no padrão 802.11s, que está definido as funcionalidades de uma rede *mesh*. O padrão propõe novos mecanismos de seleção de caminhos na rede em malha, incorporando o encaminhamento em múltiplos saltos no nível 2 (camada MAC – *Medium Access Control*).

Este padrão é uma extensão aos serviços ESS (*Extended Service Set*) para uma rede *mesh*. O serviço ESS define que todo dispositivo baseado no IEEE 802.11 possui parcialmente ou totalmente suporte a funcionalidade *mesh*. Estes dispositivos são chamados de *Mesh Point* (MP) que possuem no mínimo as seguintes funcionalidades: descobertas de vizinhos; seleção de canal; e formar associação com os vizinhos.

O MP tem a habilidade de interconectar outros MPs ou MAPs (Mesh Access Point) via WDS (Wireless Distribution System), formando uma WMN (Wireless Mesh Network). O MAP é um MP específico, com função de ponto de acesso, provendo serviço para os clientes de uma rede *mesh*. Os MPs ou MAPs funcionam como bridge ou gateway da rede fazendo a

intercomunicação do meio cabeado com a WMN.

2.3 REDE MESH

As redes em malha ou *mesh* são redes sem fio auto-configuráveis, ou seja, através de troca de informações entre os nós a rede descobre suas rotas se configurando automaticamente, com esta característica pode-se prover múltiplos saltos encaminhando pacotes para longas distâncias. Os nós intermediários não só regeneram o sinal, como também tomam decisões de encaminhamento baseados no conhecimento desta rede. Este tipo de rede é utilizado onde não existe uma infra-estrutura física de rede ou o custo com a implementação de cabeamento é muito alto [37].

Normalmente, os nós *mesh* se utilizam da tecnologia IEEE 802.11 no modo Ad-Hoc para se interligarem e construírem a sua rede de malha entre si [30]. A diferença da rede *mesh* em relação a rede Ad-Hoc do padrão IEEE 802.11 é a topologia.

A rede *mesh* não costuma enfrentar problemas de mobilidade e restrição de energia, isto ocorre porque os principais nós da rede são fixo formando um *backhaul* (i.e., o *backbone* de uma rede *mesh*) [39]. Com esta topologia a rede se torna capaz de prover maior largura de banda, confiabilidade e redundância.

Este tipo de topologia em malha oferece maior robustez em relação a topologia das redes infra-estruturadas por prover múltiplos caminhos para cada destino, e a recuperação destes caminhos em caso de falha de um nó, por exemplo. Na Figura 2.2 temos uma estrutura de uma rede *mesh*.

Uma rede *mesh* se compõe de roteadores ou *gateways mesh* e de clientes *mesh* [5]. Os roteadores ou *gateways mesh* tem a função de rotear os pacotes, servindo como *bridges* entre as redes cabeadas, com diferentes tecnologias, como: *wimax* e *ethernet*.

Os *mesh routers* são os nós fixos do *backhaul* e possuem pouca mobilidade. Estes nós possuem a função de rotear e encaminhar pacotes para os demais *mesh routers* e interligar os clientes *mesh* na rede.

Um cliente *mesh* é um dispositivo que tem acesso sem fio para se interligar com diversos nós. Um exemplo, de cliente *mesh* são os *hosts* clientes (i.e., os usuários conectados a rede *mesh*). Nestes clientes não é necessário instalar uma aplicação para se conectar a rede,

porque o protocolo de roteamento está instalado no *mesh router*.

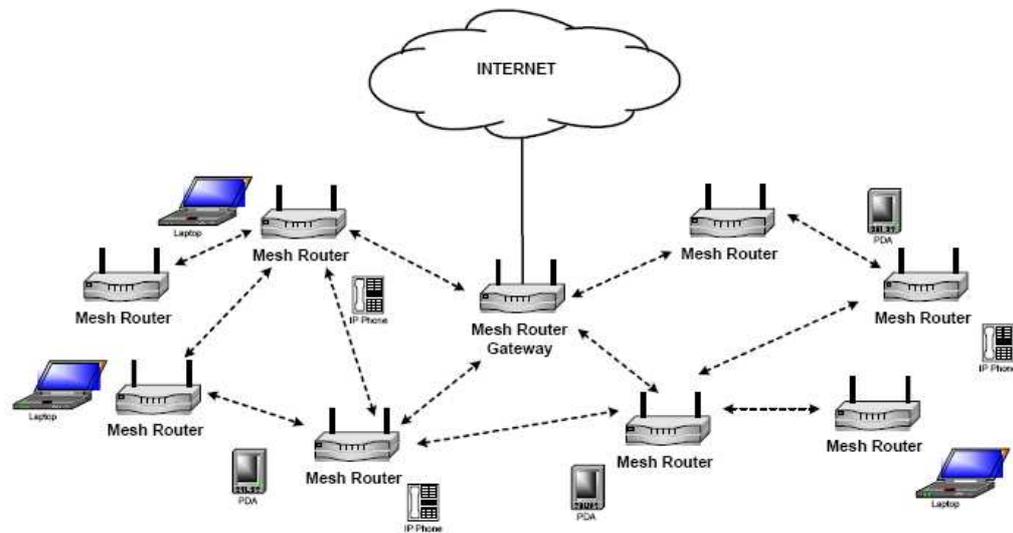


Figura 2.2 Estrutura de uma rede *mesh*

2.4 COMPARATIVO AD-HOC X MESH

Segundo Waldir [38], as redes Ad-Hoc não tem infra-estrutura e possuem topologia altamente dinâmica, já as redes *mesh* utilizam transmissão sem fio através de múltiplos saltos. Como já explicado, apesar das redes *mesh* terem origem com as redes Ad-Hoc, estas diferem-se na questão de mobilidade dos nós e topologia da rede.

A Tabela 2.2 mostra as diferenças entre redes Ad-Hoc e *mesh*. Observa-se que enquanto a rede ad-hoc muda sua topologia dinamicamente, ou seja, seus nós são móveis as redes *mesh* são relativamente estáticas, ou seja, os nós do *backbone* são fixos. Outra observação é que as redes *mesh* não têm problema de restrição de energia por seus nós serem fixos, diferentemente das redes Ad-Hoc que são móveis. Além disso, as redes foram desenvolvidas com objetivos distintos. A rede Ad-Hoc foi inicialmente desenhado para aplicações militares, enquanto a rede *mesh* teve o foco em aplicações militares e civis. Já com relação à implantação, a rede Ad-Hoc é fácil de implantar porque só precisa ter alguns nós clientes conectados para formar uma rede, sendo a retransmissão feita através dos próprios nós móveis, diferente da rede *mesh* que precisa de um planejamento para a montagem de um *backbone*, pois estes nós que compõem o *backbone* são fixos. Esta diferença de topologia influencia no roteamento, por isto que os protocolos utilizados devem ser de natureza distinta, conforme detalhado no 3.

Tabela 2.2 Comparativo Ad-Hoc x *mesh*.

Aspectos	Ad hoc	Mesh
Topologia	Altamente dinâmica	Relativamente estática
Mobilidade de nós de retransmissão	Média/Alta	Baixa
Restrição de energia	Alta	Baixa
Tipo de aplicação	Temporária	Semi-permanente/Permanente
Infra-estrutura	Inexistente	Parcial/Total
Retransmissão	Nós móveis	Nós fixos
Protocolos de roteamento	Reativo	Hierárquico/Pró-ativo
Implantação	Fácil	Requer planejamento
Origem do tráfego	Usuário	Sensores/usuários
Cenários de aplicação	Majoria Táticos	Táticos/Civis

3 PROTOCOLO DE ROTEAMENTO

Nós últimos anos as redes Ad-Hoc tem-se expandido. Apesar de seu objetivo inicial ser para utilização de aplicações militares, estas redes cresceram para aplicações comerciais. Com isto, motivou o desenvolvimento de soluções específicas e tornou-se uma grande área de pesquisa.

Uma rede Ad-Hoc sem fio é composta por uma coleção de dispositivos móveis (p.ex., terminais) com a habilidade de comunicarem-se entre si, não possuindo, no entanto, qualquer infra-estrutura fixa ou controle central. Na rede Ad-Hoc um host se comunica diretamente com outro host sem a necessidade de um concentrador central para fazer esta intermediação de troca de pacotes, contudo há problemas de comunicação.

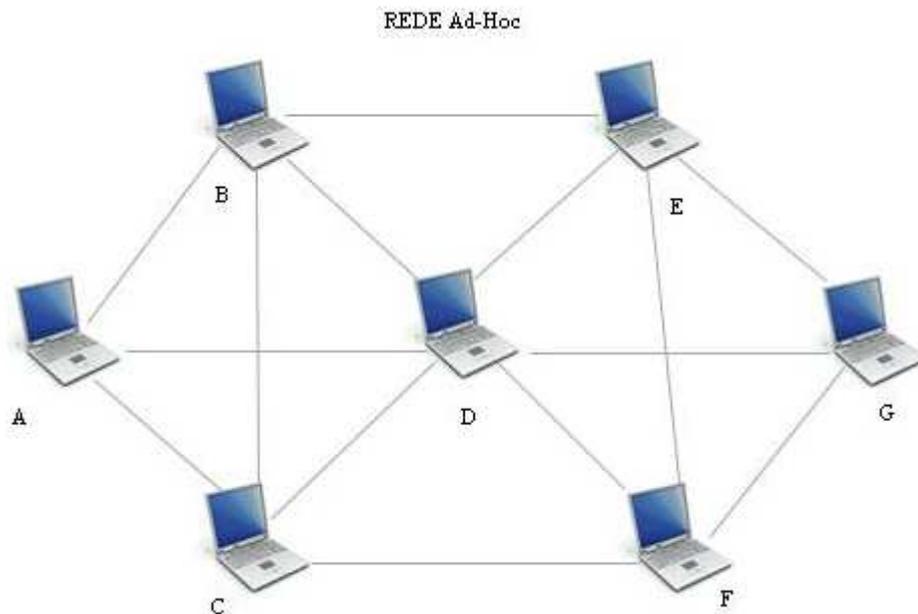


Figura 3.1 Rede Ad-Hoc.

Por exemplo, na Figura 3.1 o host A por limitação da potência do rádio não conseguir encontrar o host G mais distante, para estes dois equipamentos trocarem informações faz-se necessário a utilização de um protocolo de roteamento. O protocolo de roteamento faz com que um pacote de Host A seja encaminhado para o Host G mais distante utilizando, por exemplo, o Host D para transmitir o pacote (i.e., como roteador).

Vários protocolos desenvolvidos para rede cabeadas são adaptados as redes Ad-Hoc que possuem características intrínsecas, como: o meio sem fio; a taxa de erros elevada, por causa da interferência, ruídos e perturbações no canal; a mobilidade dos terminais; dentre outras.

Os protocolos de roteamento para redes Ad-Hoc são classificados em: pró-ativos, reativos ou híbridos.

Os protocolos pró-ativos são derivados dos protocolos de internet do tipo *distance-vector* e *link-state*. Os protocolos de internet deste tipo mantêm as tabelas que armazenam as informações de roteamento e a cada mudança na topologia da rede, disparam atualizações a fim de manter a consistência das rotas.

Uma mudança pode causar uma substancial sobrecarga, afetando a utilização de largura de banda bem como de energia dos nós. Entretanto, têm como vantagem ter armazenado a informação de todas as rotas e não precisa buscar esta informação, diminuindo, assim, o tempo de envio dos dados.

Como exemplo de protocolo de roteamento pró-ativo temos: DSDV (*Destination-Sequenced Distance Vector routing*) [50], OLSR (*Optimized Link State Routing*) [25], FSR (*Fisheye State Routing*) [53], GSR (*Global State Routing*) [54].

Os protocolos reativos possuem mecanismos para localizar as rotas, estes mecanismos são iniciados quando uma origem precisa se comunicar com um destino desconhecido. A descoberta de rota normalmente é feita através de *flooding*, isto é, o envio de um pacote broadcast na rede para descobrir as rotas. Estes protocolos geram menor *overhead* ao longo do tempo do que os pró-ativos, contudo apresentam um maior atraso na transmissão de um dado sempre que é necessário conhecer um novo caminho. Alguns exemplos de protocolo reativos são: DSR (*Dynamic Source Routing*) [50], AODV (*On-Demand Distance Vector*) [17], TORA (*Temporally Ordered Routing Algorithm*) [55], ABR (*Associativity-Based Routing*) [56].

Os protocolos híbridos são protocolos que combinam as melhores características dos protocolos pró-ativos e reativos. Os protocolos híbridos utilizam a metodologia de zona de roteamento, fazem parte da zona de um nó os que estão a certa distância dele ou dentro de uma determinada região geográfica. O nó utiliza o protocolo pró-ativo dentro da sua zona de roteamento e fora dela o reativo.

Os protocolos ZRP (*Zone Routing Protocol*) [51] e CEDAR (*Core Extraction Distributed Ad Hoc Routing*) [52] são exemplos que utilizam características dos protocolos pró-ativos e reativos, isto é, híbrido.

Este capítulo apresenta o protocolo de roteamento, OLSR, utilizado nesta dissertação, descrevendo importantes trabalhos relacionados encontrados na literatura. Na seção 3.1 trataremos do OLSR. Em seguida, na seção 3.2 apresenta-se uma visão geral das métricas de roteamento, com ênfase no detalhamento do OSLR-ETX, OSLR-ML e OSLR-MD.

3.1 OLSR

O OLSR é um protocolo de roteamento pró-ativo, sendo uma adaptação do algoritmo estado de enlace tradicional para redes móveis. Devido à sua natureza pró-ativa, este protocolo mantém sua tabela de rotas, trocando mensagens sobre a informação da topologia da rede com outros nós que fazem parte da rede [24][25].

No protocolo OLSR cada nó envia mensagens de “*HELLO*” periodicamente, com o endereço de destino sendo *broadcast*. O recebimento de tais mensagens permite aos vizinhos saber que nó está ativo e também contém informações sobre os nós que podem ser vistos pelo emissor, incluindo quais enlaces já foram verificados como sendo bidirecionais. Apenas enlaces bidirecionais são usados na construção de rotas. Com isto, cada nó faz uma listagem de seus vizinhos, permitindo que um nó conheça seus vizinhos de até dois saltos [24].

As rotas armazenadas por um nó podem ser anunciadas para os outros, isto é conhecido como: anúncios do estado de enlace.

Os anúncios do estado de enlace do OLSR são enviados dentro de mensagens chamadas *Topology Control (TC)*. Estas mensagens inicialmente eram enviadas em inundação para toda a rede, contudo, para evitar uma inundação de mensagens de controle na rede o protocolo OLSR utiliza os *Multipoint Relays (MPRs)*, a Figura 3.2 mostra o envio das mensagens por inundação normal e com MPRs. Os MPRs funcionam da seguinte forma: cada nó na rede seleciona nós – entre os seus vizinhos de 1 salto que possuem comunicação simétrica, isto é, comunicação bidirecional – para fazer parte do seu conjunto MPRs.

Os nós MPRs devem anunciar os enlaces entre eles e para os nós que o elegeram como MPRs, em suas mensagens de controle, com o intuito de informar sua alcançabilidade aos outros MPRs.

No protocolo OLSR, os vizinhos de um nó N que estão em seu conjunto de MPRs podem receber e processar as mensagens de difusão de controles enviadas pelo nó N, mas eles

não retransmitem estas mensagens [24]. Com isto, o overhead proveniente do tráfego de controle é reduzido se comparado com o mecanismo de inundação clássica, onde cada nó retransmite cada mensagem quando o mesmo as recebe.

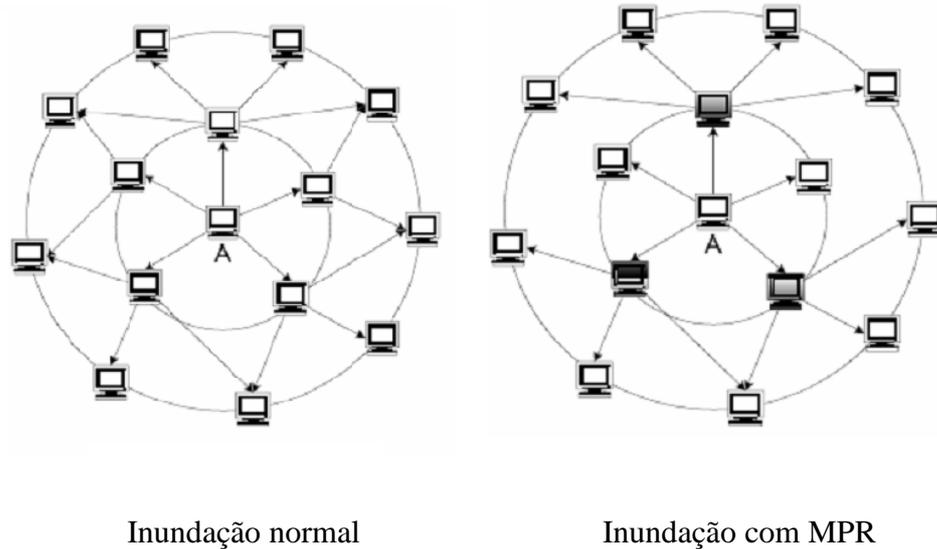


Figura 3.2 Funcionamento do MPRs.

Vale ressaltar que neste protocolo os cálculos para obtenção da melhor rota são feitos em termos de menor número de saltos. Esta forma de cálculo não é ideal para redes *mesh*, por não considerar enlaces que tenham características (p.ex., banda, atraso, etc.) ótimas para a construção das tabelas de roteamento [28].

Com o intuito de resolver este problema foram implementadas métricas no protocolo OLSR para melhorar a qualidade de serviço através da seleção das melhores rotas, levando em consideração as características citadas anteriormente.

3.2 MÉTRICAS

Uma métrica de roteamento é definida como uma forma de classificação de rotas dentro de uma rede, determinado por um critério de decisão para o melhor caminho entre nós. Esta tarefa é composta pela avaliação individual dos enlaces atribuindo-lhes pesos correspondentes e da definição de uma função do peso total do caminho.

As funções geralmente são definidas com o objetivo de representar uma das grandezas (p.ex., desempenho, latência, vazão ou perda de pacotes). Desta forma, o melhor caminho é aquele que minimiza ou maximiza a grandeza escolhida [30][31][49].

1.1.1 OLSR-ETX

O OLSR-ETX tem o objetivo de construir rotas com o menor número esperado de transmissões para um pacote ser entregue e receber a confirmação pelo destino final. No caso onde o mesmo valor é obtido para mais de uma rota, aquela constituída por um menor número de saltos será selecionada [28].

A métrica ETX chamado de *Expected Transmission Cout*, calcula o número esperado de transmissões, enviando pacotes através do enlace. O cálculo é realizado, a partir de análises probabilísticas de perdas de pacotes em ambos os sentidos do enlace

O método do OLSR-ETX inicia-se com o cálculo da probabilidade de uma transmissão não ocorrer com sucesso num dos sentidos, isto é, a probabilidade de perda de pacotes num dos sentidos, ida ou volta, sendo representado pelas variáveis P_i e P_v , respectivamente. Depois é definido a variável P_{tot} , que é a probabilidade de uma transmissão entre um nó A e B não ocorrer com sucesso (Equação 1).

$$P_{tot} = 1 - (1 - P_i) * (1 - P_v) \quad \text{Equação 1}$$

Para que uma transmissão em uma rede ad-hoc se estabeleça é necessário que ocorra o envio do pacote ACK. Conseqüentemente, enquanto não ocorrer o recebimento do pacote ACK o nó de origem reenvia este pacote. A variável $S(k)$ é a probabilidade da transmissão ocorrer com sucesso entre os nós A e B após K tentativas (Equação 2).

$$S(k) = P_{tot} * (1 - P_{tot}) \quad \text{Equação 2}$$

Finalmente, é calculado a métrica ETX, isto é, o número esperado de transmissões com sucesso entre os nós A e B (Equação 3).

$$ETX = \sum_{k=1}^{\infty} k * s(k) = 1 / (1 - P_{tot}) \quad \text{Equação 3}$$

Com o valor do ETX, este é aplicada no OLSR computando o número de seqüências dos pacotes de controle do OLSR gerados pelos vizinhos para detectar perdas. A partir desta computação é calculada a taxa de perdas de pacotes enviadas pelos nós vizinhos. Com este valor, que é a taxa de perda de pacotes em uma direção do enlace, conhecido como LQ (qualidade). Para a direção oposta é feito o mesmo calculo que é chamado de NLQ (qualidade do link vizinho) que corresponde a noção do nó vizinho a respeito da qualidade do link. O LQ e o NLQ são valores contíguos entre 0 e 1 que corresponde a probabilidade de 0% se nenhum pacote for enviado pelo enlace e 100% se todos os pacotes forem enviados. Mas para isto tem

que ocorrer um round-rip, isto é uma ida e volta dos pacotes que seria o $NLQ * LQ$, a probabilidade de sucesso no envio de um pacote do nó vizinho ao nó atual dado que o pacote enviado pelo nó atual ao nó vizinho foi recebido com sucesso. A fórmula abaixo representa uma round-rip

$$\text{Pretransmissão} = 1 - NLQ * LQ \quad \text{Equação 4}$$

Finalmente o número esperado de transmissões que um round-rip possa ocorrer com sucesso esta abaixo sendo o calculo do OLSR-ETX.

$$\text{OLSR-ETX} = 1 / (NLQ * LQ) \quad \text{Equação 5}$$

A principal vantagem desta métrica é o fato dos pacotes para obtenção de informação (i.e., *probe packets*) sobre os enlaces serem enviados via *broadcast*, o que resulta em menor *overhead* na obtenção de informação. E sua desvantagem reside no fato dos pacotes enviados para obtenção de informação são pequenos e enviados com uma taxa transmissão de dados mais baixa possível. Ou seja, estes pacotes não estão sofrendo com a mesma taxa de perda que os pacotes enviados com taxas de transmissão mais altas, pois de acordo com o tipo de pacote existe uma variação de banda, onde pacotes de tamanho pequeno utilizam pouca banda e pacotes grandes utilizam uma banda maior.. Desta forma, se tem uma visão errônea do estado da rede o que causa instabilidade e altas taxas de perdas [28].

1.1.2 OLSR-ML

A métrica OLSR-ML é baseada na ETX. Esta métrica visa escolher rotas com probabilidade mínima de perda de pacotes, ou seja, utiliza a probabilidade de transmissões de ida e retorno (i.e., *round-trip*) bem-sucedidas, sendo o oposto do ETX.

Outra diferença ocorre, quando a rota é composta por mais de um enlace. Neste caso, a probabilidade total é dada pelo produto das probabilidades dos enlaces que compõem a rota ao invés da soma do inverso destas probabilidades [26].

No cálculo do OLSR-ML, a métrica do ETX é interpretado como a probabilidade de que um *round-trip* ocorra com sucesso, diferentemente da proposta do OLSR-ETX, onde o valor de ETX reflete o número esperado de transmissões. Na equação 6 é apresentado o cálculo do OLSR-ML.

$$\text{OLSR-ML} = NLQ * LQ \quad \text{Equação 6}$$

Esta métrica tem como vantagem eliminar a escolha de rotas que sofrem com altas

taxas de perda, pois estas causavam instabilidade na rede e consideravam uma visão errônea da mesma.

Contudo, apresenta desvantagem porque alguns enlaces de baixa qualidade ainda podem ser considerados na escolha de uma dada rota, isto ocorre por conta de seu valor total considerar o produto dos valores de ETX dos enlaces que compõem tal rota. Isto é, a identidade da qualidade destes enlaces não é preservada podendo influenciar na qualidade total da rota [28].

1.1.3 OLSR-MD

O OLSR-MD é baseado na construção de rotas entre pares comunicantes. Para isto, realiza a seleção de MPRs, utilizando como critério o menor retardo de transmissão total. Ou seja, considera-se a menor soma dos retardos pertencentes a todos os enlaces envolvidos na rota [26].

As medidas de retardo de transmissão são obtidas de uma variação da técnica de estimativa de capacidade de enlace, conhecida como: *Ad-Hoc Probe* [24].

O algoritmo *AdHoc Probe* utiliza pares de pacotes para medir o atraso do enlace em um dos sentidos do mesmo (OWD - *One Way Delay*). A partir do cálculo do OWD mínimo é possível determinar o retardo de transmissão e a capacidade do enlace.

O protocolo OLSR-MD inclui a medida de retardo de enlace, calculada pelo *AdHoc Probe*. Assim, a seleção de MPRs e o cálculo da tabela de roteamento pode ser efetuada baseada no retardo de transmissão calculado para cada um dos nós vizinhos e obtidas a partir de mensagens HELLO e TC modificadas.

O OWD é calculado na equação 7. Onde δ é a constante de deslocamento entre o emissor e o receptor de uma rede Ad-Hoc. Para o i -ésimo par de pacotes de amostra o tempo de envio é estampado como $T_{send,i}$ e o tempo de recepção dos pacotes, no receptor, é estampado como $T_{recv1,i}$ para o primeiro pacote $T_{recv2,i}$ para o segundo pacote, respectivamente.

$$OWD = (T_{recv1,i} - T_{send,i} - \delta) - (T_{recv2,i} - T_{send,i} - \delta) \quad \text{Equação 7}$$

A principal vantagem do OLSR-MD é a integração com uma variante da técnica *Ad-*

Hoc Probe, pois com pacotes de controle de tamanhos fixos tem como se calcular efetivamente o atraso dos pacotes. Por outro lado, esta métrica considera enlaces que têm nós dentro de domínios de colisão, i.e., que são alcançados pelos nós mais próximos, com relação aos demais nós. Esta característica tende a degradar a comunicação entre os nós que utilizam esta rota [26].

1.1.4 MMOLSR

O protocolo MMOLSR foi desenvolvido por Waldir Aranha [38]. Este protocolo baseia-se na união de duas métricas do protocolo OLSR: ETX e MD. O objetivo foi aproveitar as vantagens das duas métricas (ETX e MD), para minimizar o atraso e aumentar a vazão, melhorando as comunicações multimídia em uma rede *mesh*. Contudo, ao utilizar estas duas métricas, em uma rede com várias rotas possíveis, gera-se um problema NP-completo. Para resolver este problema é utilizado o sistema de apoio a decisão AHP (*Analytic Hierachy Process*) [45].

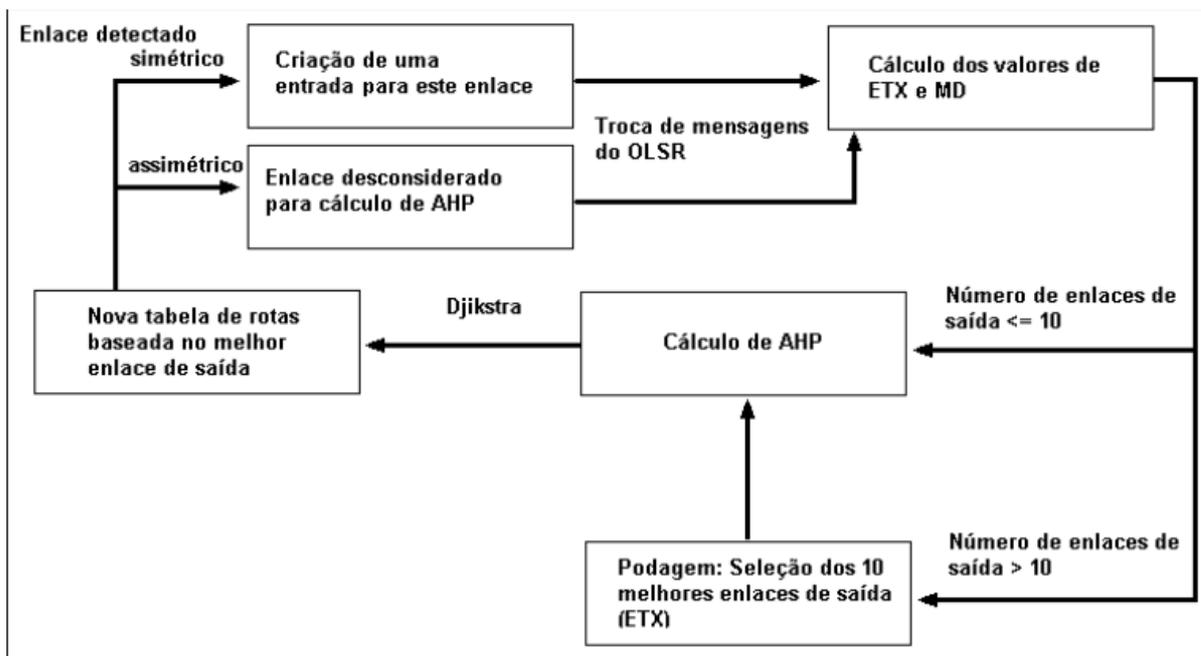


Figura 3.3 Processo do MMOLSR

A Figura 3.3 apresenta o processo do MMOLSR. Observa-se quando o enlace é simétrico, utiliza o cálculo dos valores de ETX e MD. Mas se ele for assimétrico são descartados os valores. Os próximos passos são o cálculo dos valores que são as qualidades dos links das rotas do ETX e MD e a criação da tabela de enlaces para o cálculo do AHP.

Caso a tabela tenha saída menor que 10 enlaces, estes são calculados diretamente no AHP, mas se a tabela tiver saída maior que 10 enlaces é feito um sistema de poda baseado na métrica ETX para seleção das 10 melhores. Com isto, é criada uma nova tabela de rotas baseada no cálculo do AHP. Se nesta tabela ocorrer empate então a decisão é feita através do algoritmo de Dijkstra [30][32], ou seja, a rota com o menor número de saltos.

4 SISTEMA DE APOIO DE DECISÃO E PODA

O sistema de apoio a decisão é um método de decisão multi-critérios (MDCM - *Multiple-Criteria Decision Method*). Este sistema é usado em situações onde se deseja ter a decisão para mais de um critério, como por exemplo: custo, qualidade, atendimento.

Nos sistemas de apoio a decisão, a maioria dos métodos trabalha com base em uma matriz de decisão. Dentre muitas ferramentas de decisão multi-critério que podem ser usadas em diversas situações estão: AHP (*Analytic Hierarch Process*), desenvolvido por Thomas L. Saaty em 1970; ANP (*Analytic Network Process*), desenvolvido por Saaty em 1996; MACBETH (*Measuring Categorical Based Evaluation Technique*), proposto por Banna e Costa & Vasnick em 1994 e o TOPSIS (*Technique for Order Similarity to Ideal Solution*), desenvolvido por Hwang & Yoon em 1981.

A Tabela 4.1 representa um exemplo de uma matriz de decisão utilizada em uma situação que se deseja analisar três alternativas de acordo com cinco critérios diferentes. Nesta matriz, os a_{ij} representam o desempenho da alternativa i de acordo com o critério j . Um MCDM é diferente do outro pela forma com que ele utiliza o a_{ij} .

	Critério 1	Critério 2	Critério 3	Critério 4	Critério 5
Alternativa 1	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}
Alternativa 2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	a_{25}
Alternativa 3	a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}	a_{35}

Tabela 4.1 Exemplo de Matriz de Decisão.

Este capítulo relata aspectos de sistema de apoio de decisão e poda. As seções 4.1 e 4.2 apresentam os sistemas de apoio a decisão AHP e MACBETH, respectivamente e, a seguir, o sistema de poda, *pruning*, é discutido na seção 4.3.

4.1 AHP – ANALYTIC HIERARCH PROCESS

O AHP é um sistema de apoio a decisão cujo desenvolvimento foi iniciado nos anos 70 pelo trabalho do professor Thomas L. Saaty. O intuito deste sistema é solucionar um conflito

militar no Oriente Médio. Na época o professor Thomas se utilizou da teoria dos jogos para a análise da situação, com isto conseguiu ocasionar o processo de paz [45].

O professor Thomas desejava quantificar os resultados, por isso começou a desenvolver o AHP. O AHP é baseado em conceitos de álgebra linear, pesquisa operacional e álgebra matemática. Nesta época, o próprio Thomas lançou um modelo computacional do AHP, desenvolvido pelo professor Ernest Forman, chamado de *Expert Choice*.

O AHP é executado em três fases, são elas: estruturação de modelo, realização de julgamentos e síntese dos resultados. Na fase de estruturação os dados são organizados em forma hierárquica, onde é obtido o modelo de decisão. Já na fase de realização de julgamentos é obtido o desempenho global de cada alternativa, através da ponderação do desempenho de cada alternativa com o seu critério. Por fim, a síntese dos resultados realiza o aceite ou reajuste dos valores, isto é, se o valor, após a aplicação da coerência dos julgamentos nas matrizes, estiver dentro do limiar estabelecido este vai ser aceito, caso contrário vai ser realizado o ajuste neste valor.

4.2 MACBETH

O MACBETH é um sistema de aproximação de multi-critérios. O desenvolvimento deste sistema foi iniciado nos anos 90 por C. A. Bana e Costa e J. Van Snick [16], estabelecendo-se como um dos principais métodos na área de análise a decisão.

As principais funções do método são: ajudar o decisor a ponderar; discutir e comunicar suas preferências e sistemas de valores; ser interativo (i.e., a medida que o problema vai sendo esclarecido e as preferências dos atores, que estão envolvidos no processo de tomada de decisão, são discutidas resultando em uma maior compreensão do problema) e, por fim, ser construtivo.

O MACBETH funciona baseado em informações cardinais sobre os critérios de avaliação, também chamados de pontos de vista fundamentais. Um critério é um aspecto que deve emergir na discussão com os atores no processo, ser considerado relevante por pelo menos um ator, possuir valores definidos e que possam ser compreendidos sem ambigüidade por todos os atores no processo. É importante que os critérios sejam independentes entre si, isto é, que mudanças nos níveis de um dos critérios não influenciem em algum dos outros.

Vale salientar, em alguns casos, quando um critério precise ser decomposto ou melhor especificado, ou seja necessário juntar em apenas um critério várias informações, um ponto de vista fundamental pode ser descrito em termos de um ou mais pontos de vista elementares, cuja a avaliação combinada resulta na avaliação do ponto de vista fundamental que o compõe. Por este motivo é comum que os critérios sejam representados como árvores de valor.

Após a definição dos critérios, devem ser definidos descritores de impacto para cada critério. Os descritores representam o desempenho ou a conseqüência da aplicação de possíveis ações sobre o critério. Ou seja, um descritor é um conjunto ordenado de acordo com as preferências dos atores que contém os valores possíveis assumidos pelo critério.

Os descritores podem ser tanto quantitativos, sendo representados por valores numéricos, quanto qualitativos, representados por intervalos ou classes às quais o critério pode pertencer. Um exemplo de descritor para um critério taxa de natalidade são os valores possíveis de serem assumidos pela própria taxa de natalidade, sendo este um descritor quantitativo. A definição dos descritores é uma fase importante, pois, dependendo das discussões sobre as preferências de um deles pode-se revelar valores que ainda estavam ocultos e esta discussão pode acabar gerando novos critérios.

Depois da definição dos descritores, é recomendado pela metodologia MACBETH que sejam explicitados valores de referência para os descritores, sendo estes valores de referência de um valor considerado neutro, isto é, não atrativo, mas também não é repulsivo e um valor considerado bom, isto é, que não deixa dúvidas sobre sua atratividade. A partir destes níveis, pode-se distinguir localmente no critério opções atrativas, que tem o seu valor no critério entre os valores de referência, opções repulsivas, que tem o valor abaixo do neutro e, por fim, as opções muito atrativas, que possuem o valor acima da referência de bom.

Além de fazer esta distinção local entre as opções e aumentar a compreensão sobre os problemas este níveis tem um papel muito importante na determinação dos pesos dos critérios. Apesar de importante, este passo não é obrigatório e, se for saltado, o MACBETH considera automaticamente o nível bom e o neutro como limite superior e inferior.

O passo seguinte na metodologia MACBETH é a descrição das ações por meio de impactos de cada uma delas em cada critério, isto é, o valor que o critério irá assumir depois de aplicada cada ação. Caso seja grande o grau de incerteza na determinação do impacto de uma ação sobre um critério, pode-se definir o impacto como estando entre dois níveis de critério. A partir desta descrição pode-se realizar a mais simples das análises de robustez, que

é a análise de dominância. Por exemplo, uma ação A domina uma ação B se o impacto de B não é mais atrativo que o de A para nenhum critério e A é mais atrativa que B em pelo menos um critério.

A seguir, se constrói uma escala cardinal entre os descritores de cada critério através de informações de preferência cardinal entre os níveis dos descritores, definidas pelos atores do processo. Esta informação é dada por meio de comparações entre a atratividade de cada nível do descritor, a partir de respostas de perguntas como: dado um nível N1 do descritor, o quanto mais atrativo é o N1 do que um nível menos atrativo que ele N2. Este tipo de comparações se faz entre cada um dos níveis do descritor do critério. A partir destas informações é criada uma escala pré-cardinal, que representa a magnitude dos julgamentos, e que pode ser alterada pelos atores para a melhor representação das diferenças de atratividade entre os níveis.

O software M-MACBETH utilizado para facilitar a estruturação e automatizar a avaliação do processo MACBETH, possui um mecanismo que procura inconsistências nestes julgamentos e sugere mudanças para que os julgamentos fiquem consistentes.

A última tarefa na fase de estruturação do problema é a aquisição de informação entre os critérios. Isto ocorre por meio de julgamentos de atividades da forma: existindo uma ação que é neutra em todos os critérios, o quanto uma mudança para o nível bom do critério C aumenta a atratividade geral da ação? A partir disto, se forma uma escala ordinal entre os critérios. Então a atratividade de cada critério é comparada com as dos outros da mesma forma que os níveis descritores. Deste processo, resulta uma escala de diferenças de atratividade entre os critérios que também pode ser alterada para melhor representar as diferenças entre eles. Esta escala define o peso de cada critério na avaliação global de uma ação. O M-MACBETH também procura inconsistências nestes julgamentos.

Na fase de avaliação, o MACBETH utiliza o modelo aditivo agregacional, levando em consideração os pesos dos critérios e a diferença de atratividade entre os critérios para gerar uma escala de atratividade geral entre as ações.

Por fim, o M-MACBETH permite aos envolvidos a realização de análises de sensibilidade e de robustez na avaliação, dentro da metodologia MACBETH.

4.3 PRUNING

A técnica *pruning* tem sido aplicada em diferentes aplicações principalmente para melhoria de QoS para aumentar o desempenho [43]. O objetivo desta técnica consiste em reduzir dados considerados ruins através de algoritmos de poda que realizam cálculos estatísticos.

Nesta dissertação foi aplicada a técnica *pruning* que utiliza a média dos elementos centrais desta população[43], conforme detalhamento abaixo.

O primeiro passo para aplicar esta técnica é determinar tanto a rede como o funcionamento das métricas utilizadas neste cenário. Depois, aplica-se a métrica nas rotas da rede. Logo em seguida é aplicada a teoria da probabilidade. E, por fim, faz o cálculo estatístico da mediana para populações pares (i.e., a média dos elementos centrais desta população), descartando as piores e as melhores rotas e utilizando somente as rotas centrais. Com isto, reduz sensivelmente a tabela de rotas possíveis.

5 MAC-OLSR

O MAC-OLSR é uma proposta para melhorar a qualidade de roteamento das redes *mesh*. A literatura citada anteriormente apresenta várias abordagens relacionadas a roteamento para redes *mesh* que têm sido propostas como a utilização de heurísticas, métricas singulares, compostas e mistas, métricas multidimensionais e métricas múltiplas [9][11][27][29].

Contudo, aquelas que mais se destacam como as métricas ETX, ML e MD que são utilizadas no protocolo OLSR, têm vantagens e desvantagens, conforme descrito na seção 3.2. Outro motivo que faz necessário utilizar as métricas para melhorar o roteamento são as aplicações que necessitam garantir os requisitos mínimos de QoS, por exemplo, aplicações multimídia que estão se tornando cada vez mais comuns neste tipo de rede.

Esta dissertação tem como objetivo combinar métricas múltiplas aplicando um sistema de apoio a decisão onde poderemos escolher um melhor caminho entre uma origem e um destino. Desta forma, o MAC-OLSR envolveu diversas etapas e estudos sobre os protocolos de roteamento e as métricas [38] que poderiam ser utilizadas junto a estes protocolos. O primeiro passo foi utilizar a técnica de *pruning* [43] para remover os *links* considerados de má qualidade. Depois, foi utilizado o protocolo de roteamento OLSR com o sistema de apoio a decisão MACBETH [20] e as métricas ETX e MD.

Para avaliar a proposta, foi utilizada ferramenta *Network Simulator* (NS), onde se buscou caracterizar ao máximo os equipamentos e o cenário da Universidade Federal do Pará (UFPA), desenvolvido por Waldir [38]. Neste trabalho também foram consideradas as especificações dos equipamentos, assim como, dois parâmetros relacionados ao modelo de propagação Sombreamento (*Shadowing*), o Expoente de Perda do Caminho (*Path Loss Exponent*) e o Desvio Padrão de Sombreamento (*Shadowing Deviation*), assim como Waldir [38].

O módulo para a ferramenta *Network Simulator* foi desenvolvido com base no mesmo módulo desenvolvido em Cordeiro [26] e Waldir [38]. As adaptações foram feitas para que o módulo fosse capaz de gerar e coletar informações referentes ao sistema de apoio a decisão MACBETH.

Este capítulo descreve o modelo proposto nesta dissertação, MAC-OLSR. A princípio, a seção 5.1 relata a metodologia para elaboração do modelo. Já a seção 5.2 descreve a geração da tabela e funções de escore pelo M-MACBETH neste modelo. Na seção 5.3 é definido e exemplificado o funcionamento do MAC-*Result*. Por fim, na seção 5.4 apresenta a técnica do sistema de poda.

5.1 MODELO PROPOSTO

O MAC-OLSR utiliza a técnica de Waldir [38] alterando o sistema de apoio a decisão para MACBETH que tem método matemático diferente para decidir sobre a melhor rota para um determinado destino. O objetivo é melhorar a qualidade dos *links* e comprovar o descrito por Bana [16] que afirma o melhor desempenho do MACBETH em relação ao AHP.

O modelo proposto é apresentado na Figura 5.1. O M-MACBETH é utilizado para gerar as tabelas de escores. No futuro, pretende-se incluir o MACBETH para fazer os cálculos em tempo real não sendo assim mais necessário esta entrada.

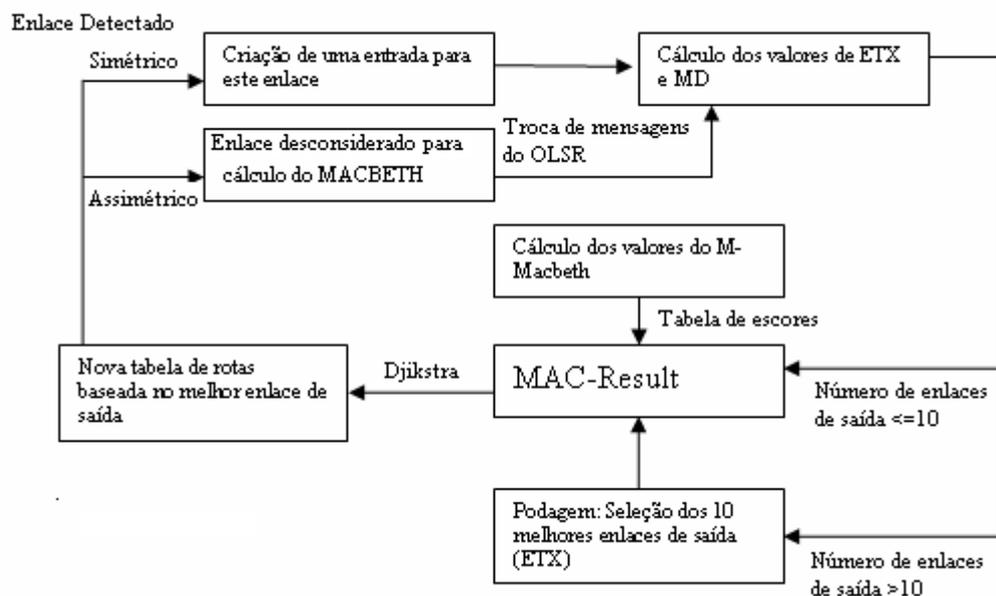


Figura 5.1 Fluxograma do MAC-OLSR.

O modelo M-MACBETH quando o enlace é simétrico, utiliza o cálculo dos valores de ETX e MD. Mas se ele for assimétrico são descartados os valores. O próximo passo é o cálculo das qualidades dos links das rotas do ETX e MD e a criação da tabela de enlaces para

o cálculo do M-MACBETH. As tabelas de escores geradas por M-MACBETH são uma das entradas para o MAC-Result. Além disso, o MAC-Result recebe como entrada os enlaces que tem rota menor ou igual a 10 nós. As demais rotas passam pelo sistema de podagem e depois também são entradas para o MAC-Result. Com base nestas entradas, o MAC-Result gera as melhores rotas. Com isto, é criada uma nova tabela de rotas, se nesta tabela ocorrer empate então a decisão é feita através do algoritmo de Dijkstra [30][32], ou seja, a rota com o menor número de saltos.

5.2 M-MACBETH

As rotas de entrada para cálculo do M-MACBETH são obtidas através do módulo de Cordeiro [26] no *Network Simulator*, onde são realizadas simulações do tráfego de uma rede *mesh* com o protocolo OLSR e as métricas ETX e MD, gerando a qualidade das rotas de todos os caminhos.

A primeira fase é a estruturação que tem como objetivo a identificação dos critérios para avaliação das ações. Os critérios considerados são ETX e MD, conforme apresentada na Figura 5.2. Optou-se inicialmente pela escolha destas métricas, porque uma métrica maximiza a vazão e outra minimiza o atraso, respectivamente, sendo o intuito deste estudo avaliar mais de um aspecto ao mesmo tempo. Sugerimos que em estudos futuros sejam avaliadas outras métricas.

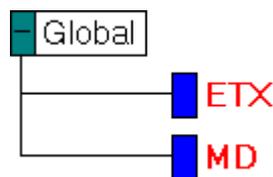


Figura 5.2 Árvore de definição das métricas.

O passo seguinte é definir os descritores dos níveis de impactos causados pela aplicação das ações. Neste cenário proposto os valores são separados em seis partes para cada uma das métricas utilizadas. O critério utilizado para divisão de partes foi a divisão dos valores da qualidade dos *links*. A Figura 5.3 e a Figura 5.4 mostram a matriz de julgamentos qualitativos efetuados para as métricas ETX e MD, respectivamente.

Os valores dos descritores são utilizados para o cálculo de pontuação. A pontuação da qualidade dos *links* para a seleção posterior de uma rota num dado critério, por exemplo:

ETX, é determinada através de uma função de valor. Esta função de valor é constituída pela aplicação do método MACBETH, que compara qualitativamente os níveis de desempenho dos descritores. A mesma função de valor ainda permite converter os desempenhos das qualidades dos *links* em pontuações, sendo 100 a pontuação do nível de referência “bom” e 0 a pontuação de “ruim”.

	1.388889	1.785714	2.222222	2.857143	4.761905	11.111111	100
1.388889	nula	fraca	moderada	forte	mt. forte	extrema	extrema
1.785714		nula	fraca	moderada	mt. forte	extrema	extrema
2.222222			nula	moderada	forte	extrema	extrema
2.857143				nula	moderada	extrema	extrema
4.761905					nula	extrema	extrema
11.111111						nula	extrema
100							nula

Figura 5.3 Matriz de julgamento de preferência para a métrica ETX.

	0.006221	0.011167	0.02404	0.106824	0.157804	0.644145	10
0.006221	nula	fraca	moderada	forte	mt. forte	extrema	extrema
0.011167		nula	moderada	forte	mt. forte	extrema	extrema
0.02404			nula	moderada	forte	extrema	extrema
0.106824				nula	moderada	moderada	extrema
0.157804					nula	moderada	extrema
0.644145						nula	extrema
10							nula

Figura 5.4 Matriz de julgamento de preferência para a métrica MD.

A matriz de julgamento de preferência é composta pelos valores dos descritores, que são os valores das amostras dos protocolos OLSR-ETX e OLSR-MD, juntamente com o grau de interatividade entre os descritores. O grau de interatividade é classificado em nulo, fraco, moderado, forte, muito forte e extremo. Como exemplo, utilizamos a Figura 5.3, quando mudamos o valor inicial 1.388889 para o valor 11.111111 temos um grau de interatividade extremo, isto ocorre, porque no ETX o valor 11.111111 tem qualidade pior do que o valor 1.388889.

A Figura 5.5 apresenta a tabela de escala de julgamento. Nesta foi considerada uma escala de 50% para cada uma das métricas.

	Escala atual
[ETX]	50
[MD]	50

Figura 5.5 Tabela de escala de julgamento.

Com base nas entradas de matriz e tabela de escala de julgamento, citadas anteriormente, o programa M-MACBETH faz o cálculo do termômetro de desempenho e da tabela de escores. As Figura 5.6 e Figura 5.7 mostram o termômetro de desempenho do ETX e MD, respectivamente.

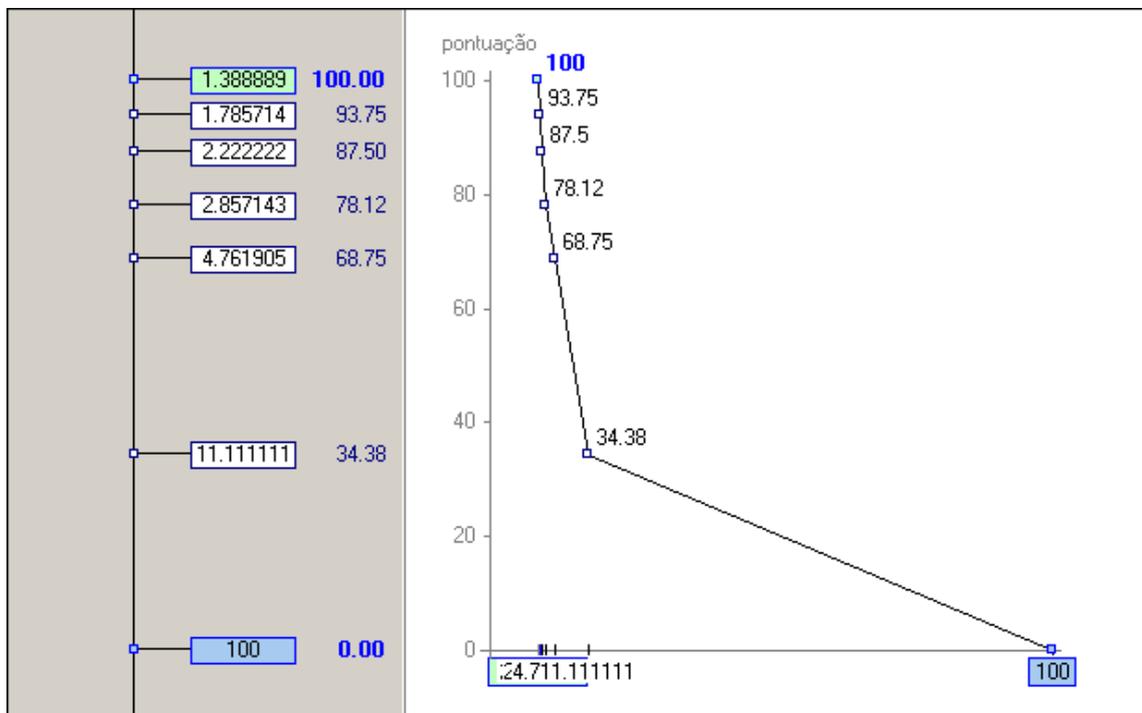


Figura 5.6 Termômetro de desempenho para a métrica ETX.

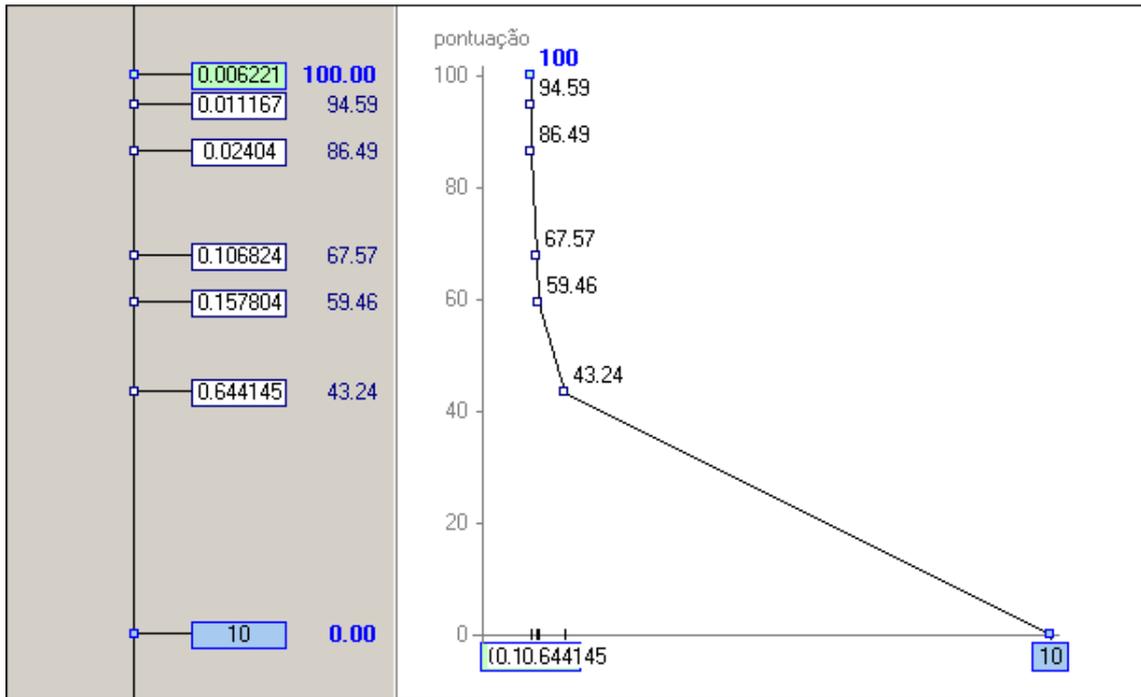


Figura 5.7 Termômetro de desempenho para a métrica MD.

As Tabela 5.1 e Tabela 5.2 apresentam as qualidades dos escores para os *links* respectivos, que são baseados no julgamento de preferência, e termômetro de desempenho do ETX e MD, respectivamente. Quanto maior for o escore melhor será a rota.

Qualidade dos <i>links</i>	Escores
1.388889	100
1.785714	93.75
2.222222	87.50
2.857143	78.12
4.761905	68.75
11.111111	34.38
100	0.00

Tabela 5.1 Escores do ETX.

Qualidade dos links	Escore
0.006221	100
0.011167	94.59
0.02404	86.49
0.106824	67.57
0.157804	59.46
0.644145	43.24
100	0.00

Tabela 5.2 Escores do MD.

A Tabela 5.3 e Tabela 5.4 representam a função definida para cada intervalo dos *links* ETX e MD, respectivamente, tendo como resultado o valor do escore para cada qualidade dos *links*. A função normalizada é criada com base na codificação do termômetro de desempenho (veja Figura 5.6 e Figura 5.7) e a variável é a métrica da rota.

Qualidade dos links	f (m_j) =
1.388889 – 1.785714	-0,0172* m _j + 0,233414
1.785714 – 2.222222	-0,03096* m _j + 0,257988
2.222222 – 2.857143	-0,03194* m _j + 0,260172
2.857143 – 4.761905	-0,01064* m _j + 0,199297
4.761905 – 11.111111	-0,0117* m _j + 0,204385
11.111111 –100	-0,00084* m _j + 0,083627

Tabela 5.3 Função do ETX.

Qualidade dos <i>links</i>	$f(m_j) =$
0.006221 – 0.011167	$-2,42357* m_j + 0,236635$
0.011167 – 0.02404	$-1,39408* m_j + 0,225139$
0.02404 – 0.106824	$-0,50637* m_j + 0,203798$
0.106824 – 0.157804	$-0,082226* m_j + 0,279462$
0.157804 – 0.644145	$-0,07135* m_j + 0,142998$
0.644145 – 100	$-0,01026* m_j + 0,102587$

Tabela 5.4 Função do MD.

5.3 MAC-RESULT

O *MAC-Result* realiza o cálculo para escolher as melhores rotas. Para ilustrar a abordagem adotada por MAC-OLSR, considere a rede na Figura 5.8. Esta figura mostra uma rede *mesh* composta de quatro nós e as arestas ilustram quais nós podem se comunicar. Estas arestas representam os enlaces e cada um destes tem um valor de ETX e MD associado ao mesmo. Por fim, assume-se a necessidade de se estabelecer uma comunicação entre os nós 1 e 4.

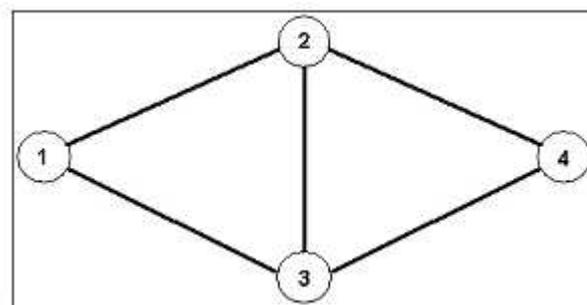


Figura 5.8 Exemplo de uma pequena rede.

Passo 1: Encontrar todas as possíveis rotas entre os nós 1 e 4. A Tabela 5.5 mostra cada uma destas rotas juntamente com seus valores totais de ETX e MD.

Rotas	A	B	C	D
Enlaces	124	134	1234	1324
ETX	2.19	2.25	3.23	5.14
MD	0.14	0.20	1.01	0.02

Tabela 5.5 Rotas possíveis

Passo 2: Computar os escores MACBETH para cada rota com o objetivo de determinar o quão bem cada rota é valorada para cada métrica quando comparada com as demais rotas. Este cálculo é feito utilizando as funções ETX e MD, definidas nas Tabela 5.3 e Tabela 5.4 da seção 5.2. Como o exemplo lida com métricas quantitativas a serem atribuídas escores ETX e MD, o cálculo é realizado com base nas seguintes variáveis e equações.

Variáveis:

- j é a rota
- i uma variável, onde $i = 0, \dots, 6$
- q_i é a qualidade do *links*, referente a tabela de escore
- m_j é o valor total da métrica para a rota
- e_i é o escore para cada qualidade do *links*, referente a tabela de escore

Equações:

- Se $q_i \leq m_j < q_{i+1}$ então $mscore_j = a * m_j + b$

Como exemplo, MSCORE do ETX é dada por:

$$mscore(ETX) = [0.1901856 \quad 0.188307 \quad 0.1649298 \quad 0.144247]$$

Como exemplo, MSCORE do MD é dada por:

$$mscore(MD) = [0.26795036 \quad 0.197257 \quad 0.0922244 \quad 0.128728]$$

Passo 3: Definição de pesos para o ETX e MD, sendo o somatório dos pesos igual a 1, isto é, $\sum peso = 1$.

Por exemplo:

- $peso(ETX) = 0.5$

- $peso(MD) = 0.5$

Passo 4: Computar para cada rota (j) o valor total da rota (t_{score}) através da soma ponderada da métrica do escore (m_{score}) ETX e MD. Com base na seguinte equação:

- $t_{score}_j = m_{score}(ETX)_j * peso(ETX) + m_{score}(MD) * peso(MD)$

Como resultado tem-se a seguinte TSCORE:

$$t_{score} = [0.22906798 \quad 0.192782 \quad 0.1285771 \quad 0.1364875]$$

Passo 5: Selecionar a rota com o maior valor total para ser utilizada na comunicação entre os nós 1 e 4. Portanto, a rota A, com o valor t_{score} igual 0.22906798, é a que apresenta os enlaces de melhor qualidade.

De fato, com esta técnica, resolve-se o problema da NP-completo relacionado com a utilização de métricas múltiplas para roteamento. Contudo, esta técnica possui problema quando temos uma rede extensa e o problema aumenta a complexidade quando os nós têm uma potência de transmissão elevada. Isto ocorre porque em uma rede extensa e com nós potência de transmissão elevada aumentam a quantidade de rotas possibilitando a utilização de vários caminhos.

Com o intuito de evitar estes problemas citados utilizamos a técnica de podagem que tem como objetivo podar os enlaces que não oferecem o nível de qualidade adequado. A utilização desta técnica é detalhada na seção 5.4.

5.4 PODAGEM

A podagem é uma técnica utilizada para melhorar o desempenho e Costa [27] utilizou a técnica para prover QoS em aplicações multimídia, selecionando somente os enlaces que possuíam melhor largura de banda.

Esta técnica consiste em eliminar enlaces que possuem valores iguais ou maiores que um valor estabelecido (i.e., limiar). A podagem utiliza métricas, como: ETX e MD, para eliminar os enlaces. Nesta dissertação definimos utilizar a métrica ETX, por ser uma métrica que minimiza o atraso.

O limiar é definido com base na média dos valores do ETX com enlaces considerados simétricos do protocolo OLSR. Para exemplificar vamos utilizar a técnica de podagem com as rotas da Tabela 5.5.

O primeiro passo é calcular a mediana, que em populações pares é obtida através da média dos elementos centrais desta população. Neste caso, os elementos centrais são as rotas 2.25 e 3.23 e a média destes elementos é 2.74.

O passo seguinte é eliminar da Tabela 5.5 as rotas que possuem valor maior ou igual a 2.74. Isto implica que as rotas C e D da Tabela 5.5 são eliminadas, ou seja, não são consideradas no cálculo do MACBETH. Por isso, a podagem reduz a complexidade dos cálculos do MACBETH.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MAC-OLSR

Neste capítulo são apresentados, primeiramente, o cenário utilizado no estudo de caso. Em seguida é mostrada a metodologia abordada nas simulações. Depois são apresentados os parâmetros para caracterizar o cenário. E, por fim, são obtidos os resultados pela implementação da proposta.

6.1 CENÁRIO

O cenário utilizado é o da Universidade Federal do Pará (UFPA), conforme mostrado na Figura 6.1. Este cenário é caracterizado por um alto índice pluviométrico e uma grande presença de vegetação, por ser típico da região amazônica. Os prédios estão situados entre as vegetações e ainda são distanciados por áreas de estacionamento.



Figura 6.1 Cenário UFPA [38].

Neste cenário foram mapeados 10 pontos, que foram escolhidos para avaliação dos protocolos de roteamento no *MAC-Result*. Os dados de entrada do M-MACBETH são coletados pela utilização deste cenário.

6.2 METODOLOGIA ADOTADA

A metodologia utilizada para o estudo de caso baseou-se na carga gradativa e concorrente de tráfegos, onde foram utilizados os protocolos de transporte TCP e UDP. O objetivo do MAC-OLSR é avaliar a qualidade de serviço (i.e., QoS) das aplicações multimídias, representado por simulações de ligações VOIP. Por isso, os resultados obtidos foram avaliados considerando apenas tráfego UDP.

Este estudo de caso é executado através de 10 (dez) simulações com diferentes sementes geradoras, com base no cenário descrito na seção 6.1. E o tempo total de cada simulação é de 50 (cinquenta) segundos.

No cenário foram simuladas seis chamadas VoIP concorrentemente com três tráfegos de FTP utilizando o modelo de Pareto [46] presente no NS com seus valores padrões. O tráfego de FTP é utilizado somente com o intuito de gerar uma carga na rede para que exista um tráfego concorrente com o VoIP.

A Figura 6.2 mostra os pontos onde as chamadas VoIP (linhas tracejadas) e os tráfegos FTP (linhas contínuas) foram configurados.

Na Figura 6.2, a primeira chamada VoIP iniciava-se com cinco segundos de simulação e as demais são iniciadas a cada 2 (dois) segundos. Sendo todas as chamadas finalizadas com 45 (quarenta e cinco) segundos.

As chamadas VoIP envolve os seguintes pontos: entre a Capacit e a Graduação Profissional está a primeira chamada; seguida pela Reitoria com a Capacit (segunda chamada); já a terceira chamada é entre a Reitoria e o CT; a quarta chamada é entre o DI e o CT; depois a quinta chamada que envolve o Secom e o Laboratório; e, por fim a sexta chamada do DI com o Secom.

Já no FTP o primeiro tráfego iniciava-se na sexta unidade de simulação e as demais são iniciadas a cada 2 unidades. Estes tráfegos são terminados na unidade de simulação 35

(trinta e cinco). Os pontos envolvidos são: DI → Laboratórios; Graduação Básico → CT; e SECOM → Graduação Profissional.

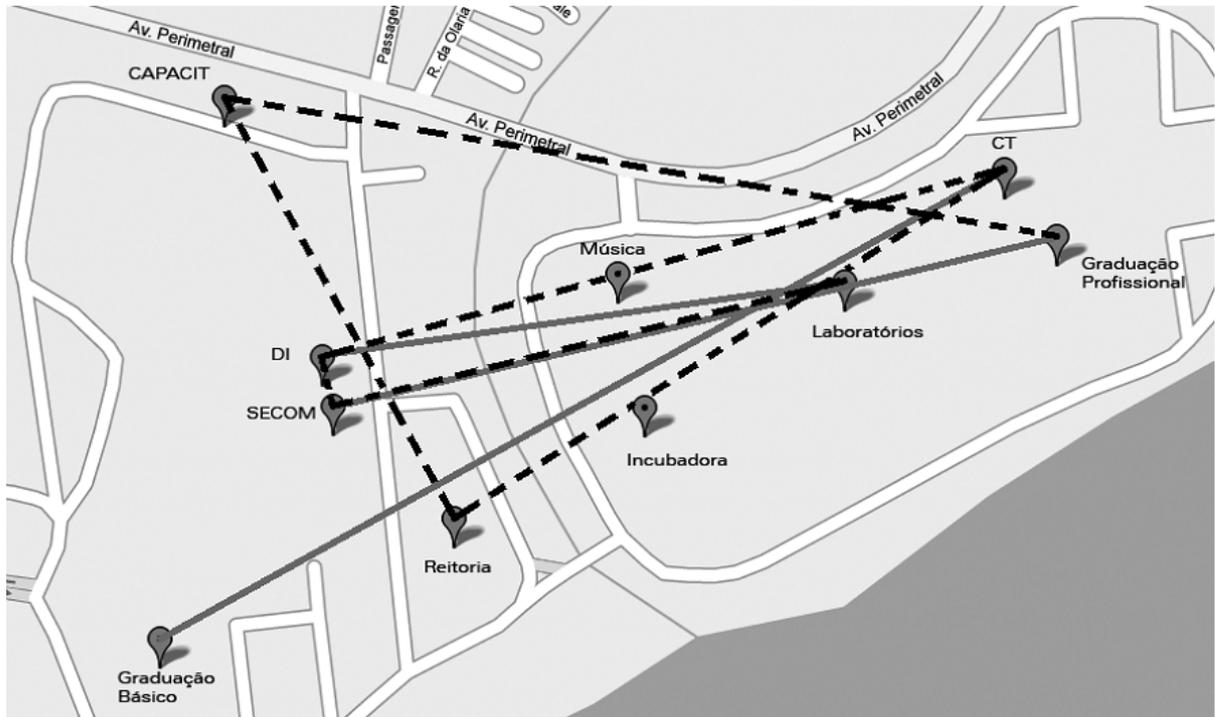


Figura 6.2 Pontos envolvidos nas chamadas VoIP e tráfegos FTP [38]

Com isso, têm-se as chamadas VoIP e tráfegos FTP iniciando a cada unidade de simulação de forma intercalada. Para a análise dos resultados foi considerado o intervalo de confiança com nível de confiança de 95%, calculado com base em Jain [34].

Por fim, é imperativo lembrar que para se representar uma chamada VoIP no NS deve-se ter dois fluxos associados à mesma, visto que se trata de uma aplicação bidirecional. Outro motivo para tal abordagem está relacionado ao fato das redes *mesh* serem redes de múltiplos saltos o que implica dizer que os fluxos podem estar trafegando por rotas diferentes.

6.3 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS

Vários parâmetros foram considerados nas simulações para caracterizar os tráfegos VoIP e FTP bem como o cenário descrito.

A simulação considera uma aplicação VoIP com taxa de 8 kb/s; com tamanho do pacote de 40 bytes, referente ao protocolo RTP, que é utilizado em aplicações de tempo real

para multimídia. Em aplicações multimídia *unicast* também é utilizado o protocolo UDP, que é um protocolo de entrega de pacotes sem confirmação de recebimento.

Já na simulação da aplicação FTP é considerado uma taxa de 200 kb/s; com tamanho do pacote de 210 bytes. As antenas utilizadas nesta simulação têm ganho de 18 dBi e são omnidirecionais.

A Tabela 6.1 mostra os parâmetros relevantes para simulação do MAC-OLSR.

Tabela 6.1 Parâmetros relevantes

PARÂMETROS	VALOR	DESCRIÇÃO
Frequência	2.422GHZ	Frequência no canal 3
Modelo de propagação	Sombreamento	Melhor característica do cenário
Antenas	Omnidirecionais (18dBi)	Permitindo maior alcance em todas as direções
<i>Carrier Sense Threshold</i>	-76 dBm (IEEE, 1999)	Pacotes recebidos acima deste limiar poderão ser interpretados
<i>Receiver sensitivity threshold</i>	-80 dBm (IEEE, 1999)	Pacotes recebidos acima deste limiar são recebidos
Desvio Padrão de Sombreamento (σ dB)	5.4dB	Ambientes <i>outdoor</i>
Aplicação VoIP	Taxa de 8 kb/s	Referentes a simulação do codec G.729
Aplicação VoIP	Tamanho do pacote: 40 bytes	RTP+UDP+ <i>Payload</i>
Aplicação FTP	Taxa de 200k Tamanho do pacote: 210 bytes, Duração da rajada e de inatividade: 500ms	Referente ao modelo de Pareto.

6.4 RESULTADOS

As métricas ETX, MD, MMOLSR são utilizadas para comparar com o modelo proposto nesta dissertação. Nesta seção temos a intenção de mostrar os resultados obtidos no MAC-OLSR e compará-lo com outras métricas para verificar se houve melhora na qualidade do serviço.

O MAC-OLSR é implementado no *network simulator*, seguindo a metodologia definida no 5 que é baseada nas tabelas de função (veja Tabela 5.3 e Tabela 5.4).

Em cada simulação foram consideradas as medidas de avaliação de desempenho: atraso, vazão e probabilidade de bloqueio (i.e., número de pacotes descartados pelo número de pacotes transmitidos).

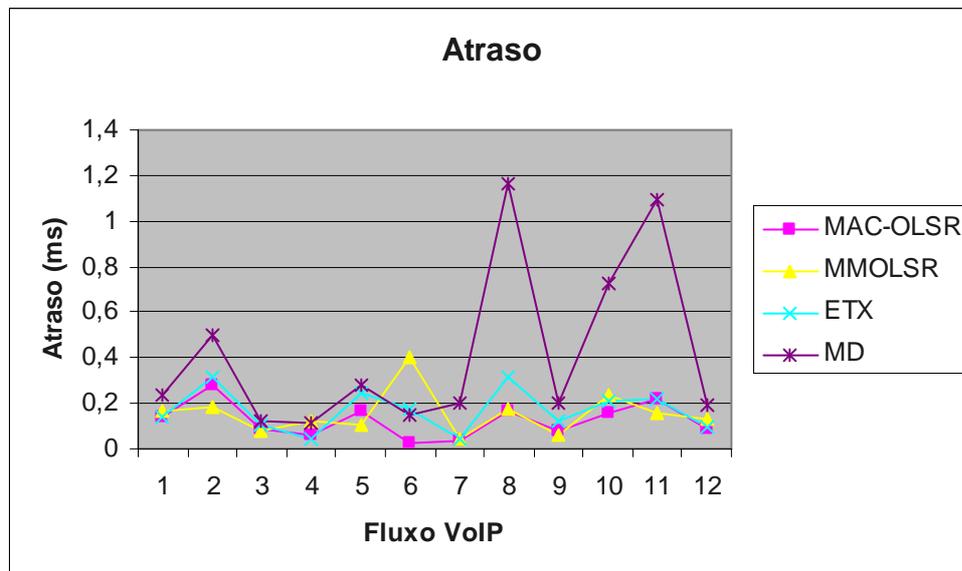


Figura 6.3 Atraso médio para cada fluxo VoIP.

Na Figura 6.3 tem-se o atraso gerado para cada um dos fluxos VoIP. Observa-se que o MAC-OLSR tem um desempenho tão bom quanto o MM-OLSR na maioria dos fluxos e em alguns casos supera MM-OLSR com atrasos inferiores. A média e o intervalo de confiança do atraso de cada mecanismo encontram-se na Tabela 6.2.

A melhora no atraso do MAC-OLSR, ocorrida nos fluxos 4, 6 e 10, é devido a utilização da matriz de julgamento, não existente no AHP que é a base do protocolo MMOLSR. A matriz de julgamento utilizada foi definida na seção 5.2, onde após a inserção dos dados brutos já divididos podemos julgar a preferência de cada intervalo de valor em relação aos outros intervalos, e o grau de interatividade dos intervalos é mostrado nas Figura

5.3 e Figura 5.4, com isto obtemos os escores (veja Tabela 5.1 e Tabela 5.2) e os termômetros de desempenho (veja Figura 5.6 e Figura 5.7) para a construção deste modelo.

Tabela 6.2 Média e Intervalo de Confiança – Atraso.

Fluxo VoIP	MAC-OLSR				MMOLSR			
	Média	Int Conf	Int Conf (-)	Int Conf (+)	Média	Int Conf	Int Conf (-)	Int Conf (+)
1	0,142151756	0,026611	-0,06576	0,118982	0,164968	0,022628	-0,12976	0,17502
2	0,279020998	0,017987	-0,2373	0,273274	0,179636	0,023177	-0,11952	0,165871
3	0,086787611	0,029489	-0,03268	0,091661	0,081075	0,028838	-0,03933	0,097008
4	0,060991694	0,029307	-0,0345	0,09311	0,125283	0,017035	-0,26426	0,298331
5	0,170522907	0,025624	-0,07948	0,13073	0,106605	0,025351	-0,08351	0,134208
6	0,027653361	0,031025	-0,01871	0,080763	0,402469	0,000399	-0,97945	0,980253
7	0,03555776	0,032945	-0,00425	0,070141	0,042058	0,032547	-0,007	0,072094
8	0,163507521	0,0253	-0,08428	0,134877	0,179265	0,020341	-0,17795	0,218627
9	0,074498498	0,025248	-0,08505	0,135551	0,063797	0,025608	-0,07972	0,130933
10	0,156261342	0,0256	-0,07983	0,13103	0,235395	0,0214	-0,15451	0,197306
11	0,218199945	0,027369	-0,05609	0,110825	0,161873	0,021628	-0,14973	0,192986
12	0,084572345	0,029514	-0,03244	0,09147	0,132778	0,02651	-0,0671	0,120124
Fluxo VoIP	ETX				MD			
	Média	Int Conf	Int Conf (-)	Int Conf (+)	Média	Int Conf	Int Conf (-)	Int Conf (+)
1	0,139428634	0,033272	-0,00208	0,068625	0,236893	0,016291	-0,28656	0,319141
2	0,313459984	0,021586	-0,15059	0,193766	0,501058	0,007499	-0,6278	0,642802
3	0,106540739	0,031528	-0,01463	0,077681	0,122206	0,027128	-0,05908	0,113337
4	0,04060204	0,037818	0,021053	0,054583	0,116784	0,023696	-0,11027	0,157658
5	0,240643579	0,025281	-0,08456	0,135119	0,282206	0,012411	-0,42006	0,444882
6	0,171207362	0,017249	-0,25807	0,292565	0,151787	0,020252	-0,17999	0,220496
7	0,044468809	0,036652	0,016205	0,057098	0,201608	0,017965	-0,23791	0,273836
8	0,316116525	0,020905	-0,16521	0,207021	1,167229	0,001973	-0,8987	0,902643
9	0,121707938	0,028448	-0,04353	0,10043	0,199595	0,02268	-0,12877	0,174128
10	0,208792753	0,024765	-0,09252	0,142053	0,722326	0,000197	-0,98988	0,990269
11	0,221235395	0,022825	-0,12604	0,171686	1,093882	0,000918	-0,95277	0,954608
12	0,100106546	0,029771	-0,02994	0,089487	0,196035	0,018377	-0,22676	0,263517

Na Figura 6.4 é mostrada a vazão média para cada fluxo VoIP. Em todos os fluxos a vazão do MAC-OLSR apresenta ganho em relação às métricas ETX e MD. A média e o intervalo de confiança da vazão de cada mecanismo são apresentados na Tabela 6.3.

Na Figura 6.5 e Tabela 6.4 observam-se o gráfico de probabilidade de bloqueio, isto é, o percentual da taxa de descarte para cada fluxo VoIP.

Neste caso observamos que o MAC-OLSR tem uma probabilidade de bloqueio maior do que o MM-OLSR nos fluxos 2, 7, 8 e 10. Já nos outros fluxos os dois modelos têm probabilidades aproximadamente iguais. Na Tabela 6.4 é mostrado o intervalo de confiança da probabilidade de bloqueio de cada mecanismo.

A escolha das preferências na matriz de julgamento do MAC-OLSR prioriza o atraso e vazão, em relação à probabilidade de bloqueio.

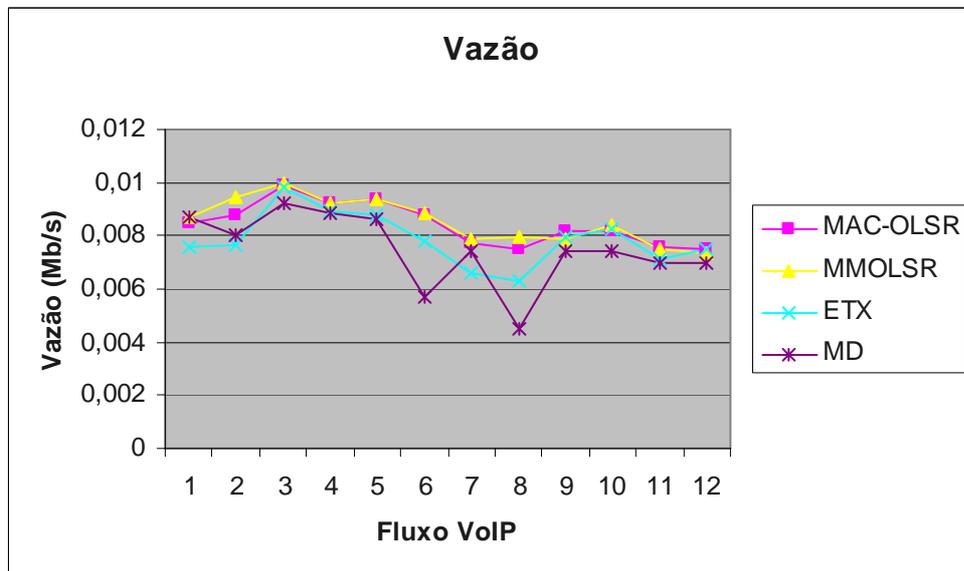


Figura 6.4 Vazão média para cada fluxo VoIP.

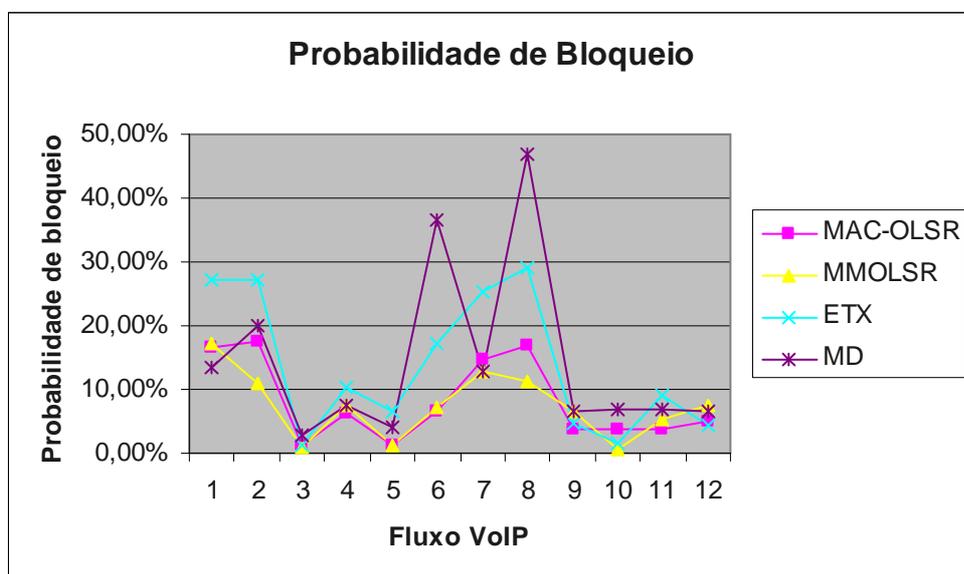


Figura 6.5 Probabilidade de Bloqueio para cada fluxo VoIP.

Tabela 6.3 Média e Intervalo Confiança – Vazão.

Fluxo VoIP	MAC-OLSR				MMOLSR			
	Média	Int Conf	Int Conf (-)	Int Conf (+)	Média	Int Conf	Int Conf (-)	Int Conf (+)
1	0,00848	0,051759	0,050696	0,052821	0,008732	0,050005	0,048441	0,051569
2	0,008762	0,050899	0,049613	0,052184	0,009425	0,053409	0,052679	0,05414
3	0,009895	0,05668	0,056342	0,057017	0,009954	0,05649	0,056137	0,056844
4	0,009192	0,053714	0,053033	0,054395	0,00924	0,051106	0,049878	0,052335
5	0,00938	0,056202	0,055823	0,05658	0,009399	0,056132	0,055747	0,056517
6	0,008807	0,05527	0,054797	0,055743	0,008832	0,052103	0,05112	0,053086
7	0,007722	0,051722	0,050651	0,052793	0,007854	0,05093	0,049653	0,052207
8	0,007464	0,053773	0,053101	0,054445	0,007962	0,0512	0,049997	0,052403
9	0,008147	0,055622	0,055187	0,056057	0,007901	0,054257	0,053656	0,054857
10	0,008152	0,056028	0,055633	0,056423	0,0084	0,058593	0,058382	0,058804
11	0,00761	0,055523	0,055078	0,055969	0,007524	0,05243	0,051517	0,053343
12	0,007517	0,055085	0,054591	0,05558	0,00732	0,053949	0,053304	0,054594
Fluxo VoIP	ETX				MD			
	Média	Int Conf	Int Conf (-)	Int Conf (+)	Média	Int Conf	Int Conf (-)	Int Conf (+)
1	0,007589	0,054202	0,053594	0,05481	0,00869	0,049186	0,04732	0,051052
2	0,007617	0,051872	0,050837	0,052908	0,008019	0,049839	0,048218	0,05146
3	0,009817	0,057025	0,056714	0,057335	0,009212	0,0537	0,053017	0,054383
4	0,008909	0,053765	0,053092	0,054438	0,00882	0,049766	0,04812	0,051413
5	0,008783	0,052391	0,051469	0,053312	0,008632	0,054488	0,053919	0,055057
6	0,007812	0,050521	0,049124	0,051918	0,005692	0,048138	0,045807	0,050468
7	0,006598	0,051179	0,049971	0,052388	0,007428	0,049908	0,048311	0,051505
8	0,006285	0,050546	0,049156	0,051935	0,004512	0,047447	0,044755	0,05014
9	0,007978	0,055579	0,05514	0,056019	0,007448	0,052877	0,052052	0,053702
10	0,008243	0,056927	0,05661	0,057245	0,007444	0,052655	0,051787	0,053523
11	0,007089	0,054161	0,053547	0,054774	0,006996	0,05026	0,048781	0,051739
12	0,007502	0,055158	0,054673	0,055644	0,006974	0,052936	0,052122	0,05375

6.5 COMENTÁRIOS

O objetivo principal deste trabalho é oferecer melhorias no roteamento com qualidade de serviço para redes *mesh* através da utilização de métricas múltiplas junto ao protocolo pró-ativo OLSR. E o modelo proposto teve um desempenho significativamente melhor que as métricas avaliadas (p.ex., ETX e MD) em todas as simulações realizadas, conforme mostrado nas figuras e tabelas da seção 6.4.

Além disso, o MAC-OLSR é indicado para comunicações multimídia e *web* – que é o principal tráfego de uma rede *mesh* – porque, através de sua matriz de julgamento, consegue melhorar o retardo e a vazão quando comparado as métricas e modelo estudados.

Tabela 6.4 Média e Intervalo de Confiança – Bloqueio.

Fluxo VoIP	MAC-OLSR				MMOLSR			
	Média	Int Conf	Int Conf (-)	Int Conf (+)	Média	Int Conf	Int Conf (-)	Int Conf (+)
1	0,165135	0,026571	-0,06629	0,119428	0,171029	0,022944	-0,12381	0,1697
2	0,174026	0,024177	-0,10207	0,15042	0,108192	0,029779	-0,02987	0,089425
3	0,012408	0,035037	0,008339	0,061734	0,008938	0,03509	0,008621	0,061558
4	0,063722	0,030492	-0,0233	0,084286	0,076025	0,024835	-0,09142	0,141092
5	0,011543	0,033628	0,000191	0,067064	0,011765	0,033643	0,000289	0,066998
6	0,065261	0,030965	-0,01922	0,081148	0,070704	0,025658	-0,07899	0,130303
7	0,145358	0,025741	-0,07779	0,12927	0,127738	0,024015	-0,10479	0,152821
8	0,168529	0,026574	-0,06625	0,119401	0,111764	0,023595	-0,11202	0,159214
9	0,035963	0,033534	-0,0004	0,067467	0,065555	0,02967	-0,03091	0,090254
10	0,036464	0,031977	-0,01116	0,075112	0,006245	0,040731	0,030737	0,050725
11	0,037286	0,032114	-0,01014	0,074365	0,0518	0,026163	-0,07182	0,124147
12	0,049145	0,03131	-0,01637	0,078987	0,076064	0,028518	-0,04277	0,099807
Fluxo VoIP	ETX				MD			
	Média	Int Conf	Int Conf (-)	Int Conf (+)	Média	Int Conf	Int Conf (-)	Int Conf (+)
1	0,272827	0,029917	-0,02856	0,088393	0,133167	0,021514	-0,1521	0,195127
2	0,270929	0,026035	-0,0736	0,125675	0,2005	0,022869	-0,1252	0,170942
3	0,012829	0,037935	0,021503	0,054366	0,029653	0,032095	-0,01027	0,074464
4	0,103155	0,030318	-0,02486	0,085497	0,073607	0,022382	-0,13452	0,179287
5	0,067037	0,026236	-0,07081	0,123286	0,041176	0,0324	-0,00804	0,072844
6	0,170588	0,023473	-0,11418	0,161128	0,366815	0,01782	-0,2419	0,277539
7	0,254172	0,023902	-0,1067	0,154509	0,12879	0,021495	-0,1525	0,195486
8	0,290599	0,023027	-0,12227	0,16832	0,468978	0,015793	-0,30209	0,333676
9	0,046317	0,030647	-0,02194	0,083235	0,065554	0,024231	-0,10118	0,149636
10	0,014107	0,036479	0,015431	0,057527	0,070162	0,02612	-0,07243	0,124664
11	0,091212	0,028999	-0,03764	0,095643	0,069374	0,020798	-0,16758	0,209173
12	0,043409	0,029731	-0,03033	0,089788	0,066723	0,023953	-0,10584	0,153745

Outro aspecto relevante desta dissertação é que o cálculo do *MAC-Result* é realizado somente uma única vez para cada topologia, ou seja, somente é necessário recalculá-lo quando há alguma alteração da topologia. Vale ressaltar que a alteração de topologia em uma rede *mesh* não é frequente. Conseqüentemente o tempo de processamento do *MACBETH* é irrelevante no cálculo, porque é processado independentemente e o *OLSR* usa somente a tabela de saída para decidir a rota.

Por fim, foram realizados estudos com diferentes pesos que priorizaram a métrica *ETX* em relação ao *MD*, sendo desconsiderados por apresentarem os resultados inferiores do que os obtidos com a divisão de pesos iguais para as métricas.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação apresenta uma proposta para melhorar o desempenho em redes *mesh*, através da utilização múltiplas métricas. Neste capítulo são apresentadas as considerações finais do trabalho. A seção 7.1 descreve as contribuições e os resultados alcançados. Já a seção 7.2 apresenta os trabalhos futuros que podem ser gerados a partir das questões e observações extraídas da pesquisa desenvolvida.

7.1 CONTRIBUIÇÕES E RESULTADOS ALCANÇADOS

A principal contribuição desta dissertação é o desenvolvimento do modelo que explora a escolha da melhor rota em redes *mesh*, denominado MAC-OLSR, com o intuito de prover um serviço melhor para redes *mesh*. Este modelo utiliza uma metodologia de sistema de apoio a decisão, MACBETH, e sistema de poda, *prunning*. Ele também desenvolve o MAC-Result que codifica os resultados do programa M- MACBETH.

A razão de ter sido utilizado o MACBETH é o trabalho escrito por Bana [16] que afirma: o MACBETH tem um desempenho superior ao AHP. Além disso, resolve a questão do roteamento baseado na combinação de métricas aditivas e/ou somativas que se torna um problema NP-completo. Outro motivo é o sistema MACBETH nunca ter sido utilizado em um cenário de redes, seja ela cabeada ou *mesh*, sendo diferente do AHP que em Alkahtani[12] [9] utilizou uma técnica para rede cabeada e Waldir[38] utilizou a mesma técnica em redes *mesh*.

Outra contribuição foi o estudo realizado sobre as principais métricas que podem ser utilizadas junto ao protocolo pró-ativo OLSR para provisão de roteamento com QoS. Dentre as métricas consideradas o ETX e o MD obtêm os melhores resultados no que concerne o desempenho para o cenário e equipamentos avaliados.

Em seguida é desenvolvido um novo módulo para o NS com base nas duas técnicas, MACBETH e podagem. E assim pôde-se avaliar o desempenho do MAC-OLSR. O primeiro passo é os dados coletados do ETX e MD da rede com cenário da Universidade Federal do

Pará (UFPA) ser aplicados ao programa M-MACBETH que gera duas saídas, chamadas de tabela de escores e termômetro de desempenho.

Depois, este trabalho utiliza a codificação do termômetro de desempenho, com as funções de escores normalizadas, e a escolha do julgamento de preferência dos dados coletados. Com isto, o cálculo do MAC-*Result* torna-se mais dinâmico.

Nesta abordagem há um ganho considerável em relação as métricas e modelo estudados. Este ganho é bastante evidente nos gráficos de atraso, onde determinados fluxo de VoIP tem um *delay* menor que as métricas e modelos estudados; já nos gráficos da vazão, os resultados são semelhantes ao modelo avaliado MMOLSR e melhor do as outras métricas; e, por fim, nos gráficos de probabilidade de bloqueio tem uma diminuição na taxa de descarte considerável se comparados com as métricas ETX e MD.

Esta dissertação tem como base o trabalho do Waldir [38] com uma nova abordagem como explicado anteriormente. Realizando uma comparação entre os dois, esta proposta muito boa, porém obtendo um desempenho muito bom quando comparado com as métricas ETX e MD e o modelo MMOLSR. Desta forma, a proposta deste trabalho oferece alternativas de escolha de enlaces baseadas em duas métricas diferentes que melhoram vazão, atraso e bloqueio.

7.2 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, o primeiro ponto importante é definir uma maior segmentação nos intervalos de resultado do M-MACBETH. Assim, será possível melhorar a escolha no roteamento.

Outro importante trabalho futuro é realizar o desenvolvimento de uma função única baseada nas Tabela 5.3 e Tabela 5.4 e implementá-la no *network simulator*. Com isto podemos ter uma única função para calcular os valores do ETX e MD de qualquer escore. Como é feito no trabalho do Waldir [38] (i.e., MM-OLSR) onde se implementa o AHP diretamente no protocolo.

Além disso, propõe-se a disponibilização do MAC-OLSR e os resultados das avaliações à comunidade científica através da criação de um site da *Web*. Este site, além de centralizar e divulgar os resultados das avaliações já realizadas deve permitir novas inserções

de resultados das avaliações de roteamento em rede *mesh* por outros desenvolvedores espalhados no mundo.

Vale ressaltar também aqui a necessidade de realizar novos estudos, definindo um módulo desta proposta para aplicação em uma rede *mesh* real e disponibilização na comunidade científica.

E, por fim, desenvolver a implementação deste modelo em outros tipos de redes, por exemplo, neurais, para se observar o desempenho.

REFERÊNCIAS

- [1] Acharya, A.; Misra, A.; Bansal, S. (2003). High-performance architectures for IP-based multihop 802.11 networks, *IEEE Wireless Communications* 10 (5) 22–28.
- [2] Adya, A.; Bahl, P.; Padhye, J.; Wolman, A.; Zhou, L. (2004). A multi-radio unification protocol for IEEE 802.11 wireless networks, in: *International Conferences on Broadband Networks (BroadNets)*.
- [3] Aguayo, D.; Bicket, J.; Biswas, S.; Judd, G.; Morris, R. (2004). Link-level measurements from an 802.11b Mesh network, in: *ACM Annual Conference of the Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM)*, pages 121–131. August.
- [4] Akan, O. B.; Akyildiz, I. F. (2004). ARC for real-time traffic: ARC: the analytical rate control scheme for real-time traffic in wireless networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking* 12 (4) 634–644.
- [5] Akyildiz, I. F.; Wang, X.; Wang, W. (2005). Wireless mesh networks: a survey. *Computer Networks and ISDN Systems*, 47(4):445–487. March.
- [6] Akyildiz, Ian F.; Wang, Xudong; Wang, Weilin. (2005). *Wireless Mesh Network: A Survey*, Georgia Institute of Technology, Atlanta. January.
- [7] Akyildiz, I. F.; Su, W. ; Sankarasubramaniam, Y.; Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey, *Computer Networks* 38 (4) 393–422.
- [8] Alamouti, S. M. (1998). A simple transmit diversity technique for wireless communications, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 16 (8) 1451–1458.
- [9] Alkahtani, A. M. S.; Woodward, M. E.; Al-Begain, K. (2006). Prioritised best effort routing with four quality of service metrics applying the concept of the analytic hierarchy process. *Computers and Operations Research*, 33(3):559–580. March.
- [10] Andersen, J. B. (2000). Array gain and capacity for known random channels with multiple element arrays at both ends, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 18 (11) 2172–2178.
- [11] Aslam, N.; Phillips, W.; Robertson, W. (2004). Composite metric for quality of service routing in OLSR. *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2:759–762. May.
- [12] Awajan, A.; Al-Begain K.; Thomas P. (2008). Quality of Service for Real Time Applications Using the Analytical Hierarchy Process. *Tenth International Conference on Computer Modeling and Simulation*. Mach.
- [13] Badis, H.; Munaretto, A.; Agha, K.; Pujolle, G. (2003). QoS for Ad-Hoc networking based on multiple metrics: bandwidth and delay. *Fifth IFIP International Conference on Mobile and Wireless Communications Networks*. October.
- [14] Bahl, P.; Chandra, R.; Dunagan, J. (2004). SSCH: slotted seeded channel hopping for capacity improvement in IEEE 802.11 Ad-Hoc wireless networks, in: *ACM Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM)*, pages 216–230.

- [15] Balakrishnan, H.; Padmanabhan, V. N.; Katz, R. H. (1999). Network asymmetry: the effects of asymmetry on TCP performance, *Mobile Networks and Applications* (4) 219–241.
- [16] Bana e Costa, C. A.; Vansnick, J. C. (2008). A critical analysis of the eigenvalue method used to derive priorities in AHP. *European Journal of Operational Research*, 2008, Europe, vol 187, number 3, pages 1422-1428.
- [17] Belding-Royer, E. M.; Melliar-Smith, P. M.; Moser, L. E. (2001). An analysis of the optimum node density for Ad-Hoc mobile networks, in: *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, vol. 3, pages 857–861. June.
- [18] Belding-Royer, E. M. (2003). Multi-level hierarchies for scalable Ad-Hoc routing, *ACM/Kluwer Wireless Networks* 9 (5) 461–478.
- [19] Beyer, D.; Waes, N. V.; Eklund, K. (2002). Tutorial: 802.16 MACLayer Mesh Extensions, *IEEE 802.16 Standard Group Discussions*. February.
- [20] Bona e Costa, CA; Vansnick, J. C.; DeCorte, J. M. (2003). MACBETH, Working Paper LSEOR 03.56, London School of Economics.
- [21] Bose et al., P. (1999). Routing with guaranteed delivery in Ad-Hoc wireless networks, in: *3rd ACM International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications*, pages. 48–55. August.
- [22] Bruno, R.; Conti, M.; Gregori, E. (2005). Mesh networks: commodity multihop Ad-Hoc networks. *IEEE Communications Magazine*, 43(3):123–131. March.
- [23] Buttyan, L.; Hubaux, J.-P. (2002). Report on a working session on security in wireless Ad-Hoc networks, *ACM Mobile Computing and Communications Review* 7 (1) 74–94.
- [24] Chen, L.; Sun, T.; Yang, G.; Sanadini, M.; Gerla, M. (2005) “AdHoc Probe: path capacity probing in wireless Ad-Hoc networks.” *IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*.
- [25] Clausen, T.; Jacquet, P. (2003). Optimized link state routing protocol (OLSR). *IETF RFC 3626*, Experimental. October.
- [26] Cordeiro, W.; Aguiar, E.; Moreira, W.; Abelem, A. (2007). Stanton, M. Providing quality of service for mesh networks using link delay measurements. In: *IEEE International Workshop on Wireless Mesh and Ad-Hoc Networks*, 1, Honolulu. Proceedings E.U.A: IEEE Press, pages 991-996. August.
- [27] Costa, L. H. M. K.; Fdida, S.; Duarte, O. C. M. B. (2002). Developing scalable protocols for three-metric QoS routing. *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, 39(6):713–727. August.
- [28] De Couto, D. S. J.; Aguayo, D.; Bicket, J.; Morris, R. (2003). A high-throughput path metric for multi-hop wireless routing. *9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pages 134–146. September.
- [29] Faccin, S.; Wijting, C.; Knecht, J.; Damle, A. (2006). Mesh WLAN networks: concept and system design. *IEEE Wireless Communications*, 13(2):10–17. April.
- [30] Gerk, L. F. (2007). Qualidade de Serviço em Redes sem Fio em Malha.
- [31] Gerk, L.F.; Passos, D.; Saade, D.C.M.; de Albuquerque, C. V. N. (2009). Wireless *mesh* communication infrastructure for supervising and controlling energy transmission systems.

- [32] Golden, B. (1976). Shortest-path algorithms: A comparison. *Journal of Operations Research*, pages 1164-1168.
- [33] IEEE Std 802.11-1999. (1999). Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=9543>.
- [34] Jain, R. (1991). *The Art of Computer Systems Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling*. USA: John Wiley & Sons, 720 p. April.
- [35] Jun, Jangeun; Sichitu, Mihail L. (2003). The Nominal capacity of Wireless Mesh Networks; *IEEE Communications Magazine*. October.
- [36] Kowalik, K. and Davis, M. (2006). Why are there so many routing protocols for wireless mesh networks?. *Irish Signal and Systems Conference*. June.
- [37] Lee, M.; Zheng, J.; Ko, Y.; Shrestha, D. (2006). Emerging standards for wireless mesh technology. *IEEE Wireless Communications*, 13(2):56–63. April.
- [38] Moreira Junior, Waldir Aranha. (2008). Utilização de métricas múltiplas ao protocolo pró-ativo optimized link state routing para redes em malha sem fio. Dissertação de Mestrado em Ciência da Computação da Universidade Federal do Pará (UFPA).
- [39] Nandiraju, N.; Nandiraju, D.; Santhanam, L.; He, B.; Wang, J.; Agrawal, D. P. (2007). Wireless mesh networks: current challenges and future directions of web-in-the-sky. *IEEE Wireless Communications*, 14(4):79–89. August.
- [40] NS (2007). *The Network Simulator Manual - The VINT Project*. URL: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [41] Passos, D.; Teixeira, D.; Muchaluat-Saade, D.C.; Magalhães, L.C.S.; Albuquerque, C. (2006). Mesh Network Performance Measurements. 5th International Information and Telecommunicatios Technologies Symposium, Cuiabá MT, Brasil.
- [42] Raffaele, Bruno; Marco, Contl; Enrico, Gregori. (2005). Mesh Networks: Commodity Multihop Ad-Hoc Networks; *IEEE Communications Magazine*. Mach.
- [43] Reed, R. (1993). Pruning Algorithms A Suvey. *IEEE Transactions On Neural Netowrks*. Vol 4, No. 5.
- [44] ReMesh – Grupo de pesquisas em redes Mesh. Disponível em < <http://Mesh.ic.uff.br/> >. Acesso: 05.fev.2007.
- [45] Salomon, V. A. P. (2006). Auxílio à decisão para adoção de políticas de compras. *Produto e produção journal*. Vol 6. Number 1.
- [46] Salgueiro, R. J. P. de Britto (2004). Uma Metodologia para Caracterização de Tráfego de Vídeo Baseada nos Momentos de Primeira e Segunda Ordem. PhD thesis, Universidade Federal de Pernambuco - Centro de Informática, Recife.
- [47] Wang, Z.; Crowcroft, J. (1996). Quality-of-service routing for supporting multimedia applications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 14(7):1228–1234. September.
- [48] Zanetti, Alberto René; Gonçalves, Leandro de Carvalho. “Redes Locais sem Fio”, On-line: <http://www.dc.ufscar.br/~carvalho/WLAN/>, Universidade Federal de São Carlos, Acessado em 21/09/2006.

- [49] Zhang, Y.; Luo, J.; Hu, H. (2007). *Wireless Mesh Networks: Architectures, Protocols and Standards*. 1st edition. USA: Auerbach Publications.
- [50] Redes Ad-Hoc – protocolos. Disponível em < http://www.gta.ufrj.br/grad/09_1/versao-final/adhoc/intro.html>. Acesso 09 set 2009.
- [51] Ribeiro de Oliveira, Etienne César. (2006). *Avaliação De Protocolos Para Redes De Sensores e Redes Ad Hoc Aplicados à Tv Digital Interativa e Cidades Digitais*. Dissertação de Mestrado em Ciência da Computação da Universidade Federal Fluminense (UFF).
- [52] Velloso, P.(2003). *Transmissão de voz em redes ad hoc*. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [53] Pei, G. and Gerla, M. and Chen, T.W.(2000). *Fisheye state routing in mobile ad hoc networks*. ICDCS Workshop on Wireless Networks and Mobile Computing. D71--D78.
- [54] T. Chen, M. Gerla (1998). *Global State Routing: A New Routing Scheme for Ad-hoc Wireless Networks* In Proceedings of IEEE ICC'98, Atlanta, pp. 171-175.
- [55] *Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA)*. (2001). Internet Draft. RFC 2026. Disponível em <<http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-tora-spec-04>>. Acesso 09 set 2009.
- [56] Toh, C.K. (1997). *Associativity-based routing for ad hoc mobile networks*. *Wireless Personal Communications journal*. Vol.4 Num.3. 103—139. Springer.