



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/04.19.17.49-TDI

**PLANEJAMENTO DE REDES EM MALHA SEM FIO
COM ATENDIMENTO A PARÂMETROS DE
QUALIDADE DE SERVIÇO**

Marlon da Silva

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada,
orientada pelos Drs. Edson Luiz França Senne, e Nandamudi Lankalapalli
Vijaykumar, aprovada em 21 de fevereiro de 2011

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39HAD9H>>

INPE
São José dos Campos
2011

PUBLICADO POR :

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Vivéca Sant'Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/04.19.17.49-TDI

**PLANEJAMENTO DE REDES EM MALHA SEM FIO
COM ATENDIMENTO A PARÂMETROS DE
QUALIDADE DE SERVIÇO**

Marlon da Silva

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada,
orientada pelos Drs. Edson Luiz França Senne, e Nandamudi Lankalapalli
Vijaykumar, aprovada em 21 de fevereiro de 2011

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39HAD9H>>

INPE
São José dos Campos
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Silva, Marlon da.
Si38p Planejamento de redes em malha sem fio com atendimento a parâmetros de qualidade de serviço / Marlon da Silva. – São José dos Campos : INPE, 2011.
xxiv+57 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/04.19.17.49-TDI)

Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

Orientadores : Drs. Edson Luiz França Senne, e Nandamudi Lankalapalli Vijaykumar.

1. Programação matemática. 2. QoS . 3. Simulação Monte Carlo. 4. Redes mesh. I.Título.

CDU 004.722.2

Copyright © 2011 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2011 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

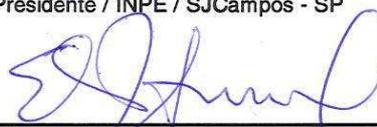
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Computação Aplicada

Dr. Solon Venâncio de Carvalho



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Edson Luiz França Senne



Orientador(a) / UNESP/GUARA / Guaratinguetá - SP

Dr. Nandamudi Lankalapalli Vijaykumar



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Carlos Renato Lisboa Francês



Convidado(a) / UFPA / Belém - PA

Dr. Diego Lisboa Cardoso



Convidado(a) / UFPA / Belém - PA



Aluno (a): Marlon da Silva

São José dos Campos, 21 de fevereiro de 2011

“Para quem é correto, as portas nunca se fecham”.

Muricy Ramalho

A meus pais Manoel e Maria José

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (CNPq) pela bolsa de mestrado (Processo nº 132847/2009-4) concedida ao longo deste curso.

Aos senhores membros da Banca Examinadora pelas relevantes contribuições dadas ao trabalho.

A todos os colegas do curso de Computação Aplicada pelo apoio, acolhimento e companhia ao longo destes dois anos.

A toda equipe do Laboratório de Planejamento de Redes em Alto Desempenho (LPRAD) da UFPA por todo auxílio concedido durante o período de estadia, em especial a Rosinei, Gerson, Carlos e Victor pelas contribuições significativas para esta dissertação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão ao auxílio na participação do projeto em conjunto com a UFPA.

Agradecimento aos meus orientadores, o Dr. Edson Luiz França Senne, pelos momentos de reflexão acadêmica, profissional e pessoal concedidos desde a graduação e o Dr. Nandamudi Lankalapalli Vijaykumar pelo apoio concedido desde os primeiros dias no INPE até hoje de forma solícita.

À banca examinadora, composta pelo Dr. Carlos Renato Lisboa Francês, Dr. Diego Lisboa Cardoso e o Dr. Solon Venâncio de Carvalho, pelas importantes contribuições dadas à este trabalho.

A toda a minha família, por serem os principais patrocinadores e que sempre estiveram ao meu lado, sobretudo nos momentos difíceis, em especial aos meus pais Manoel e Maria José e aos meus irmãos, irmãs e cunhado.

A todos os meus amigos e colegas que me acompanharam ao longo desta árdua caminhada, e que eu pude contar com eles em momentos tranquilos e conturbados, principalmente Luis, Dalila, Rudinei, Sóstenes, Leonardo, Talita, Marilyn, Fernando, Rogério, Érica e Claudia.

E, principalmente, a Deus, por conceder-me a vida e, junto com ela, a possibilidade de crescer e escrever a minha história, me constituindo e me tecendo como um homem.

RESUMO

Em uma rede em malha, em que são utilizados serviços de dados, áudio e vídeo, a utilização de parâmetros de QoS, para garantir a qualidade de serviços de rede, é imprescindível. Este trabalho propõe um algoritmo que, dados os conjuntos de pontos de teste (TPs) e de potenciais pontos de acesso (APs), elabora o planejamento de uma rede em malha de modo a atender a alguns parâmetros de QoS, como probabilidade de perda de pacotes e atraso médio de atendimento. O algoritmo proposto utiliza um modelo de Programação Matemática para determinar uma topologia adequada de rede em malha, e simulação Monte Carlo para verificar o atendimento aos parâmetros de QoS estabelecidos. Os resultados obtidos demonstram que o algoritmo proposto é capaz de encontrar uma solução satisfatória. O algoritmo também propõe soluções para a melhoria destes resultados.

WIRELESS MESH NETWORKS PLANNING FOR MEETING SOME QUALITY OF SERVICE PARAMETERS

ABSTRACT

In a Mesh Network, it is essential to make use of QoS parameters in order to achieve a good quality of service when transmitting data, audio and video. This dissertation proposes an algorithm that, given a set of test points (TPs) and potential access points (APs), enables a design to install a mesh network and at the same time satisfies some of the QoS parameters. Examples of QoS parameters include: probability of packet loss and mean delay in responding to a request. The proposed algorithm uses Mathematical Programming model to determine an adequate topology and Monte Carlo simulation to verify whether the QoS parameters are being satisfied. The results obtained show that the algorithm is able to find a satisfactory solution. The dissertation also proposes solutions to improve the results.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Uma rede em malha	8
Figura 2.2 – AP instalado no alto de um prédio da UFPA.....	8
Figura 2.3 – Principais fases em uma simulação (CHASE ET AL., 2006) ..	15
Figura 4.1 – Mapa de aplicação da rede (Fonte: Google Maps)	34
Figura 4.2 – Topologia resultante da formulação inicial do problema	36
Figura 4.3 – Taxas de atendimento em função à distância em MB/s Fonte: DÍAZ E DIAZ (2006)	37
Figura 4.4 – Topologia encontrada após a execução do algoritmo	39
Figura 4.5 – Topologia encontrada após a execução do algoritmo com bloqueio	41
Figura 4.7 – Solução final obtida pelo algoritmo para o cenário com bloqueios	43
Figura 4.8 – Disposição inicial dos TPs e dos candidatos a APs	45
Figura 4.9 – Solução inicial do problema de cobertura da rede.....	45
Figura 4.10 – Solução final do problema.....	47

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 – Variáveis de fluxo nos APs presentes no modelo	22
Tabela 3.2 – Outros parâmetros presentes no modelo.....	22
Tabela 3.3 – Valores iniciais para a simulação	27
Tabela 4.1 – Resultados encontrados com demanda total de até 2 Mb/s/cliente	39
Tabela 4.2 – Tempo computacional em cada iteração (em segundos).....	40
Tabela 4.3 – Resultados encontrados para o Cenário 1 com bloqueio	42
Tabela 4.4 – Tempo computacional em cada interação com bloqueio em segundos	42
Tabela 4.5 – Valores iniciais utilizados por Benyamina et al. (2009)	43
Tabela 4.6 – Valores da solução encontrados no modelo de Benyamina et al. (2009)	44
Tabela 4.7 – Resultados encontrados na execução do algoritmo	46
Tabela 4.8 – Tempo computacional levado na execução do Cenário 2 em segundos	47

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

PLC	Power Line Communications
AP	Access Point
TP	Test Point
QoS	Quality of Service
PDA	Personnal Digital Assistant
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network
LR-WPAN	Low-Rate Wireless Personal Area Network
AODV	Ad hoc On-demand Distance Vector Protocol
DSR	Dynamic Source Routing Protocol
OLSR	Optimized Link State Routing Protocol
IP	Internet Protocol
UFPA	Universidade Federal do Pará
kb/s	Kilobits por segundo
Mb/s	Megabits por segundo
ms	Milissegundo

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Conjunto de pontos candidatos a serem APs da rede
C	Conjunto de TPs
m	Quantidade de TPs
n	Quantidade de pontos candidatos
z_j	Inclusão do candidato a AP j na rede
g_j	Inclusão do candidato a AP j como <i>gateway</i> na rede
X	Matriz de distâncias entre TPs e APs
Y	Matriz de distâncias entre APs
x_{ij}	Enlace entre os APs i e j
y_{kj}	Atribuição do TP k ao AP j
b_{kj}	Estado do TP k no raio de cobertura do candidato a AP j ;
c_{ij}	Estado do AP i no raio de cobertura de j ;
f_{jl}	Fluxo entre os APs j e l
F_j	Fluxo entre a rede externa e o AP j
τ_i	Tráfego gerado pelo TP i
G	Número de <i>gateways</i>
v_j	Capacidade para o AP j
u_{jl}	Capacidade de tráfego do enlace entre os APs j e l
M	Capacidade de fluxo de um <i>gateway</i>
s_j	Custo de instalação de um AP j
S_j	Custo adicional de instalação de um <i>gateway</i> j
λ_{di}	Taxa de requisição de dados do TP i
λ_{ai}	Taxa de requisição de áudio do TP i
λ_{vi}	Taxa de requisição de vídeo do TP i
μ_j	Taxa de atendimento do AP j
q	Capacidade da fila de atendimento dos APs
w	Vetor que representa o estado em que se encontram os APs
k	Época atual da simulação
ψ	Tempo aleatório gerado durante a simulação
v	Número de saltos de um pacote
γ_d	Quantidade de requisições de dados dos clientes
$\gamma_{d,loss}$	Quantidade de requisições perdidas de dados
γ_a	Quantidade de requisições de áudio dos clientes
$\gamma_{a,loss}$	Quantidade de requisições perdidas de áudio
γ_v	Quantidade de requisições de vídeo dos clientes
$\gamma_{v,loss}$	Quantidade de requisições perdidas de vídeo
Θ	Somatória das taxas de atendimento dos APs ativos na rede
Λ	Somatória das taxas de demanda do sistema
N	Número de épocas
$\rho_{d,loss}$	Probabilidade de perda de pacotes de dados da rede
$\rho_{a,loss}$	Probabilidade de perda de pacotes de áudio da rede
$\rho_{v,loss}$	Probabilidade de perda de pacotes de vídeo da rede
D_d	Atraso médio de pacote de dados na rede
D_a	Atraso médio de pacote de áudio na rede

D_v Atraso médio de pacote de vídeo na rede

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 Redes <i>Mesh</i>.....	7
2.1.1 Planejamento de Redes <i>Mesh</i>.....	10
2.1.2 QoS em Redes <i>Mesh</i>.....	12
2.2 Simulação.....	14
2.2.1 Modelos matemáticos.....	15
2.2.2 Simulação Monte Carlo.....	16
3 MODELO PROPOSTO.....	19
3.1 Definição dos valores iniciais.....	19
3.1.1 Representação das coordenadas dos pontos em um mapa	19
3.1.2 Leitura das taxas de demanda e atendimento	20
3.2 Desenho da solução inicial.....	21
3.3 Simulação para verificação dos parâmetros de QoS	25
3.3.1 Definição dos valores iniciais	26
3.3.2 Escolha aleatória do evento	28
3.3.3 Extração dos parâmetros de QoS.....	30
3.4 Comparação entre os parâmetros obtidos e os desejados	31
4 RESULTADOS COMPUTACIONAIS	33
4.1 Cenário 1	33
4.2 Cenário 2	43
5 CONCLUSÕES	49
5.1 Contribuições do trabalho	49
5.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA.....	57

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico de equipamentos computacionais e a redução do preço de dispositivos portáteis, como laptops e celulares, proporcionaram um aumento significativo de utilização da Internet, trazendo como consequência melhorias como o aumento da velocidade de transmissão de dados e uma melhor viabilidade de utilização de serviços multimídia (áudio e vídeo) – inclusive em tempo real, como telefonia e televisão. Estes serviços requerem uma grande quantidade de dados e necessitam ser atendidos prontamente, para evitar possíveis atrasos durante a transmissão, o que poderia comprometer a qualidade do serviço oferecido e trazer eventuais transtornos para clientes e prestadoras de serviço.

Tal crescimento na acessibilidade da Internet se deu principalmente pelo grande crescimento da utilização de redes sem fio. Cada vez mais, o uso destas redes cresce em empresas, instituições de ensino e pesquisa e até por usuários domésticos, devido à facilidade oferecida pelos dispositivos portáteis em trafegar dados de uma forma mais cômoda.

Existem diversas tecnologias disponíveis no mercado de redes sem fio, sendo que a mais utilizada é a Wi-Fi (LEE ET AL., 2006), que é uma rede composta por um aparelho roteador e cobre uma área pequena, como uma residência ou um pequeno conjunto de salas comerciais, por exemplo. Outras tecnologias foram criadas para o atendimento de áreas mais extensas, como a rede WiMAX, a 3G (aplicada para celulares), a WDM (fibras óticas) e a PLC (energia elétrica) e que podem estar dispostas em diversos tipos de topologia de rede as redes em malha (ou redes *mesh*). A tecnologia WiMAX permite uma área de cobertura extensa, com conexão via rádio, a 3G oferece serviço por meio do serviço de telefonia móvel e as redes *mesh* interligam vários roteadores em uma mesma rede, sob o formato de uma malha. Estas tecnologias permitem a

utilização de um serviço de rede sem fio em qualquer lugar dentro de uma determinada área de cobertura.

Especificamente, as redes *mesh* possuem como principal característica a transmissão multissalto, em que a transmissão de dados é feita de um roteador para outros roteadores de forma a estender a área de cobertura da rede até alcançar os clientes desejados. Sua estrutura se assemelha à estrutura de uma rede *ad hoc*, onde todos os nós da rede se encontram em uma mesma hierarquia, não existindo um servidor que administre toda a rede, ou seja, não existindo prioridades de atendimento em relação aos nós.

Uma rede *mesh* é composta por nós que utilizam o serviço oferecido – os clientes – e por nós encarregados de fornecer ou retransmitir as informações para prover o atendimento aos clientes da rede – os *Access Points* (APs), também conhecidos como roteadores. Os roteadores possuem tecnologia para transmitir em múltiplos canais de radiotransmissão, são interligados a outros dispositivos semelhantes, organizados em uma topologia e são responsáveis por realizar a comunicação dos clientes à rede. Existe um tipo específico de AP que forma a conexão de uma rede externa com a rede *mesh*, fornecendo-a conexão com a Internet – os *gateways*.

A arquitetura de uma rede *mesh* permite oferecer acesso à Internet em localidades que não possuem uma infraestrutura necessária para alimentar diretamente todos os APs por uma rede cabeada, permitindo a utilização de serviços Web em lugares cuja instalação de aparelhos é de difícil acesso ou não há condições de se instalar um AP fixo. Exemplo disso são as instalações em regiões florestais, fazendas, serviços emergenciais e áreas bélicas.

Em uma rede em malha, a fim de satisfazer as necessidades de seus clientes, existe a necessidade de um bom planejamento para a montagem dos equipamentos que comporão a malha, pois uma instalação inadequada da rede

podará acarretar em gastos desnecessários ou uma estrutura incapaz atender de forma satisfatória um determinado cliente que usufrui dos serviços oferecidos pela rede.

Em um ambiente real, é difícil definir a quantidade e a localização dos usuários da rede devido à mobilidade deles. Assim, para o planejamento de redes *mesh* procura-se representar os clientes da forma mais próxima possível da realidade através de pontos de teste ou TPs (*Test Points*).

Alguns trabalhos foram desenvolvidos para planejamento de redes *mesh* capazes de atender aos clientes e alocar, da melhor maneira possível, os APs a serem utilizados na rede, tais como Sen e Raman (2007), Badia et al. (2008), Amaldi et al. (2008), Pries et al. (2008), Benyamina et al (2009) e Cabral e Mateus (2009). Eles desenvolveram alguns métodos para o planejamento de uma rede *mesh*, utilizando estratégias para encontrar uma solução satisfatória do problema.

Todavia, a estruturação da rede em malha pode não oferecer os serviços com uma qualidade satisfatória para quem a utiliza. É necessário que haja um controle que assegure que a rede, além de estar com a malha bem estruturada, ofereça também uma boa qualidade de atendimento aos seus clientes. Para isto, existem alguns parâmetros cujo objetivo é aferir se a rede apresenta um nível de desempenho desejado – os parâmetros de qualidade de serviço (QoS).

O objetivo dos parâmetros de QoS é avaliar de modo quantitativo se a entrega dos dados requeridos pelos clientes da rede está sendo feita em tempo hábil de modo que o serviço utilizado não apresente eventuais falhas ou que seja comprometido devido a uma chegada inadequada dos dados.

Os principais parâmetros de QoS são: taxa de transmissão, atraso, variação do atraso (*jitter*), perda de pacotes, dentre outros. A utilização de parâmetros de QoS influencia de modo decisivo no planejamento da rede, podendo indicar a necessidade da rede sofrer ajustes em sua topologia a fim de atender a esses parâmetros. Tais parâmetros podem ser aplicados de acordo com o tipo de informação utilizada na rede, pois, em cada aplicação, são exigidos critérios diferentes para a avaliação da qualidade.

Este trabalho foca no problema de encontrar uma topologia para redes *mesh* que atendam a todos os clientes dentro de parâmetros de qualidade de serviço previamente definidos, ao menor custo. Pretende-se determinar uma configuração da rede *mesh* com a menor quantidade de APs possível de tal maneira que todos os clientes da rede estejam cobertos e que os parâmetros de QoS em questão sejam satisfeitos. A cobertura de todos os clientes e o atendimento aos parâmetros de QoS são objetivos essenciais, ou seja, devem ser necessariamente alcançados, com o menor custo possível de instalação dos APs.

Para atender a estes objetivos, inicialmente é resolvido um problema de programação linear inteira mista para encontrar, dentre os pontos candidatos a APs, quais serão roteadores e quais serão os *gateways*, dadas as restrições de cobertura da rede. Em seguida, utilizando o algoritmo de simulação Monte Carlo, determina-se a taxa atual de perda de pacotes e o atraso médio. Caso os valores dos parâmetros de QoS fornecidos pelo algoritmo estejam fora dos níveis tolerados para a rede, a topologia deve ser alterada a partir da adição de restrições no modelo inicial, a fim de se obter uma nova solução para o problema.

O trabalho está estruturado da seguinte maneira: o Capítulo 2 enumera os principais trabalhos referentes aos assuntos de características, planejamento e medição dos parâmetros de QoS em uma rede *mesh*, além de fazer um breve

levantamento sobre o emprego de simulação Monte Carlo. No Capítulo 3, apresenta-se o algoritmo proposto para planejamento para redes *mesh*, combinando soluções do problema de cobertura de clientes com a aplicação da simulação Monte Carlo para avaliação dos parâmetros de qualidade de serviço da rede, até que seja encontrada uma topologia que atenda a esses parâmetros. Os resultados obtidos da aplicação do algoritmo em algumas localidades são apresentados no Capítulo 4. As conclusões e as propostas para trabalhos futuros são apresentados no Capítulo 5 e, em seguida, segue a lista das Referências Bibliográficas e da bibliografia sugerida para o aprofundamento nos estudos abordados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Redes *Mesh*

As redes *mesh* (AKYLDIZ ET AL., 2005), também conhecidas como redes em malha sem fio, são redes que possuem como principais componentes equipamentos conhecidos como pontos de acesso – também denominados APs – e equipamentos clientes. Os APs podem ser classificados como roteadores ou como *gateways*.

Os roteadores possuem várias interfaces de rede e se comunicam para manter a conectividade da rede. Estes equipamentos possuem uma potência de transmissão pequena e, em geral, utilizam a tecnologia multissalto, que transmite a informação desejada de AP a AP até chegar ao cliente desejado. Os *gateways* são APs alimentados diretamente por uma rede externa que proveem o acesso à Internet para a rede, permitindo também que as redes em malha possam ser integradas a outras redes sem fio. *Gateways* e roteadores compõem a estrutura principal para o funcionamento da rede – o *backbone*. Além disso, como afirmam Bisnik e Abouzeid (2006), os APs costumam ser montados em locais de alta visibilidade, como postes e antenas no alto de casas e demais edifícios.

Já os clientes são equipamentos que possuem apenas uma interface de rede e podem demandar acesso à Internet, além de também poder trabalhar como roteadores. Tipicamente, são microcomputadores, laptops, PDAs, celulares, dentre outros dispositivos.

A Figura 2.1 ilustra um exemplo de uma rede em malha sem fio, ilustrando os principais elementos que a compõem e a Figura 2.2 mostra um exemplo de um AP instalado sobre o teto de um prédio localizado na UFPA, onde o roteador fica dentro de uma caixa ao centro da antena que amplifica o sinal, para o aumento do raio de cobertura.

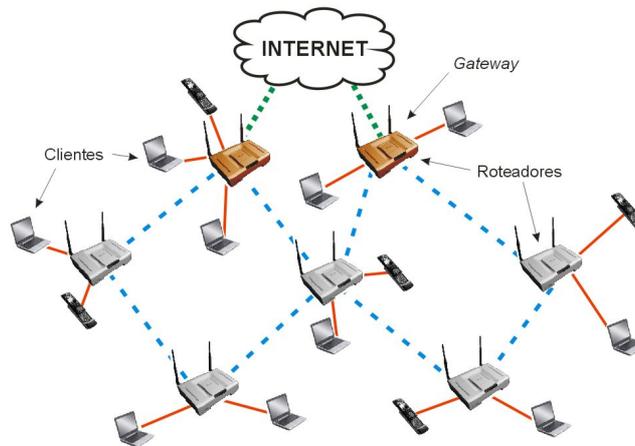


Figura 2.1 - Uma rede em malha



Figura 2.2 – AP instalado no alto de um prédio da UFPA

Redes sem fio estão sendo adotadas por diversos tipos de consumidores e vêm sendo instaladas em residências, edifícios, universidades, empresas, estabelecimentos comerciais e em meios de transporte. Lee et al. (2006) afirmam que as redes em malha sem fio conseguem lidar com aplicações que não tinham o suporte de outras tecnologias sem fio, pois possuem como principais vantagens a sua extensa cobertura, robustez, autoconfiguração, fácil manutenção e baixo custo.

A tecnologia em malha sem fio permite que redes possam ser constituídas em áreas cuja cobertura seja grande, onde é difícil a instalação de cabos condutores e em locais que se encontram em situação de emergência. Destacam-se três padrões adotados para redes em malha sem fio:

- O padrão IEEE 802.11, que abrange as redes WLAN (*Wireless Local Area Network*), também conhecidas como redes Wi-Fi;
- O padrão IEEE 802.15, que abrange as redes LR-WPAN (*Low-Rate Wireless Personal Area Network*), que engloba tecnologias de redes como ZigBee, UWB e Bluetooth;
- O padrão IEEE 802.16, que abrange as redes WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*), mais conhecidas como redes WiMAX.

Em Akyildiz et al. (2005), encontra-se um panorama geral das principais definições, características e aplicações de redes em malha sem fio. Cabral e Mateus (2009) mostram que as redes *mesh* são uma abordagem interessante na tecnologia de redes de computadores, pelo fato de possibilitarem a comunicação entre redes cabeadas com roteadores sem fio, a fim de atender simultaneamente clientes fixos e móveis.

Diaz e Diaz (2006) ilustra as características funcionais de uma rede sem fio. Os autores ilustram principalmente as principais dificuldades que podem ser encontradas em uma rede sem fio, tais como a capacidade de transmissão que se degrada em função da distância entre o roteador e o dispositivo, as interferências de canal, onde apenas três canais podem se sobrepor em uma região (canais 1, 6 e 11) e quais tipos de objetos podem causar problemas na transmissão sem fio, desde materiais de pouca espessura, como madeira,

plástico e materiais sintéticos, até materiais que causam uma maior degradação do sinal, como cerâmica e metal.

2.1.1 Planejamento de Redes *Mesh*

O planejamento de redes *mesh* tem como principal objetivo atender, da melhor maneira possível, todos os clientes. Para isto, no planejamento de redes *mesh* procura-se determinar o número e a localização de APs necessários para prover a cobertura desejada e quais destes APs deverão ser *gateways*.

Em Sen e Raman (2007), o planejamento de redes *mesh* é feito para um conjunto de vilas que devem ser equipadas com conectividade de rede a partir de um dado nó fixo. O objetivo do modelo proposto para resolver o problema é encontrar a topologia de menor custo que atenda às restrições de vazão, capacidade de *download/upload*, potência e interferência de cada nó da rede. No problema, são adotadas como variáveis a topologia de rede multissalto (*layout*), altura da antena – que afetam o custo do sistema – e o tipo de antena e suas orientações e a potência de transmissão no sistema – que afetam todo o desempenho da rede.

Em Badia et al. (2008), o planejamento parte de um grafo $G(N, E)$, em que N é o conjunto de roteadores e E suas respectivas ligações. O objetivo é pesquisar conjuntamente o roteamento e a atribuição na entrega de um pacote de dados de um nó da rede a outro nó específico, sujeito às condições de fluxo, compatibilidade e interferência que são encontradas na rede.

Em Amaldi et al. (2008), o planejamento de redes *mesh* é tratado de forma distinta de outras redes como celulares e Wi-Fi, pois estas são planejadas geograficamente, em que o posicionamento e as configurações dos APs dependem apenas das condições de conectividade local entre os clientes e o dispositivo de rede mais próximo. Dado um conjunto de pontos candidatos para

instalar os dispositivos (roteadores e *gateways*) e um conjunto de pontos de teste (clientes), os autores propõem um modelo de programação linear inteira, cujo objetivo é minimizar o custo total de instalação, otimizando a quantidade e o posicionamento dos roteadores e *gateways* e suas respectivas atribuições de canal, levando-se em conta ambos os requisitos de local e de conectividade multissalto.

Cabral (2008) define como meta para o planejamento de redes *mesh* determinar a quantidade de recursos necessários para atender à demanda estimada para os clientes. Algumas variáveis são adotadas para o planejamento, tais como: topologia da rede, mobilidade, modelo de tráfego, custo e capacidade. Os nós possuem valores para a capacidade de comunicação da rede e existem restrições de energia associadas aos clientes. A partir disso, foi elaborado um modelo de programação matemática, a fim de encontrar a topologia ótima para um conjunto fixo de clientes, roteadores e *gateways*. A função objetivo visa minimizar a soma de custos de instalação e dos custos de enlaces entre clientes e roteadores, com o intuito de atender às demandas dos clientes. As restrições procuram garantir que o modelo atenda primeiramente às demandas exigidas pelos clientes, de acordo com as limitações de roteadores, interfaces e enlaces disponíveis.

Cabral e Mateus (2009) elaboraram um planejamento da rede que consiste em atender à demanda dos clientes, visando o custo mínimo de instalação para compor o roteamento entre clientes e *gateways*. Para isto, utilizaram um modelo de programação matemática que privilegia a questão da minimização dos custos de instalação, de utilização dos APs e do enlace entre eles.

Em Benyamina et al. (2009), o planejamento de redes *mesh* é feito por meio de um grafo que representa uma malha que enumera quais são os APs que deverão atender aos clientes da rede, visando a possíveis falhas de um dos APs, a ponto de não comprometer o funcionamento do restante da rede. Para

isto, é proposto um problema de programação matemática inteira e biobjetiva, que visa garantir à rede a garantia de conectividade da rede, visando valores de *throughput* e perda de pacotes satisfatórios.

2.1.2 QoS em Redes Mesh

Abelém et al. (2007) definem que a qualidade de serviço (QoS) da rede é a capacidade da rede de oferecer garantias de serviço para tipos de tráfego, através de determinadas tecnologias disponíveis. Neste trabalho, são enumeradas as principais características de QoS em uma rede *mesh*, como métricas que são adotadas para medir quão boa está a rede, de acordo com critérios estabelecidos para atender determinadas demandas. As medidas de desempenho são aplicadas, principalmente, para atender demandas de pacotes multimídia (áudio e vídeo).

Hilário et al. (2007) e Saade et al. (2007) apresentam alguns protocolos de comunicação em redes *ad hoc*, onde não há a necessidade de um nó centralizador e todos os nós estão em um mesmo nível hierárquico, pois são importantes para o estabelecimento dos parâmetros de QoS na rede. Os principais protocolos apresentados são basicamente divididos em dois tipos: pró-ativos e reativos. Os reativos elaboram as rotas de roteamento de acordo com a demanda, como o AODV (*Ad hoc On-demand Distance Vector Protocol*), DSR (*Dynamic Source Routing Protocol*), e os pró-ativos possuem uma tabela com as rotas já definidas, independentemente se os roteadores estão ociosos ou não, como o OLSR (*Optimized Link State Routing Protocol*).

Aguiar et. al (2007) fazem uma comparação entre os protocolos OLSR e AODV em um cenário da região amazônica. Neste trabalho, destaca-se as diferenças entre ambos os protocolos Além disso, o protocolo sob demanda (AODV) apresentou melhores resultados frente ao protocolo pró-ativo OLSR, pois a

procura por uma demanda menor resultou em resultados mais eficientes do que o pré-determinação da rota que o pacote deverá seguir.

Em Abelém et al. (2007), outros tipos de protocolos são apresentados, como os híbridos e os adaptativos. Os híbridos reúnem as principais características dos protocolos pró-ativos e reativos, ideal para redes extensas que contenham uma grande quantidade de nós ociosos – isto de acordo com a quantidade de nós que a rede possuirá. Desta forma, os autores recomendam a utilização de protocolos híbridos para rede *mesh*, por ela permitir a combinação das principais vantagens de ambos os tipos de protocolo.

Gerk (2007) enumera as principais dificuldades de atingir os parâmetros de QoS em uma rede *mesh*. Tal complexidade é atribuída devido a fatores, tais como a competição entre o tráfego originado no AP e o encaminhado até ele, o decréscimo da banda efetiva por causa do aumento do número de saltos até o destino e a disputa pelo acesso ao meio de pacotes de um mesmo fluxo entre nós vizinhos. Com base nestas dificuldades, são propostas algumas técnicas para aprimorar a qualidade da rede de modo direto, ou seja, modificando algumas configurações diretamente na rede.

Silva e Albuquerque (2009) mostram a priorização de pacotes de áudio sobre uma rede *mesh*. O trabalho utiliza três importantes parâmetros para a avaliação da qualidade da rede: perda de pacote, atraso e taxa de atraso (*jitter*). Neste trabalho, as redes *mesh* são consideradas como redes IP comuns (padrão IEEE 802.11) e não oferecem garantia de QoS, por serem baseadas no modelo de melhor esforço (*best efforts*), ou seja, realiza o melhor esforço para transportar o pacote de dados o mais rápido possível, mas não oferece garantia em relação a atraso para a entrega do mesmo. Outro fator desfavorável é que redes IP costumam trafegar dados onde o atraso não influencia na qualidade da transmissão, como transferência de arquivos ou serviço de *e-mail*. Além disso, a transmissão de um pacote de dados entre dois

saltos (entre um roteador e um cliente ou entre dois roteadores) pode sofrer interferências devido à proximidade de outros dispositivos.

2.2 Simulação

Uma das técnicas utilizadas para verificar determinadas medidas de desempenho de um sistema é a simulação. Larson e Odoni (1981) definem simulação como procedimentos experimentais aplicados sobre um modelo matemático computacional por meio de estímulos externos ou demandas aplicadas sobre o sistema, fazendo com que o seu comportamento seja avaliado num certo período. A razão de utilizar uma simulação para a resolução de um problema surge a partir das principais vantagens que ela oferece, tais como:

- Apresenta uma solução para problemas matematicamente intratáveis;
- Fornecem dados mais detalhados do que outras técnicas para modelos matematicamente tratáveis;
- Oferece resultados com esforço computacional menor;
- Em alguns casos, sua aplicabilidade em situações reais torna-se mais viável.

Rubinstein e Kroese (2007) também apresentam algumas vantagens em utilizar simulação, como a vantagem de extrair informações referentes ao comportamento do sistema estudado e a possibilidade de analisar diversos cenários em questão, evitando a manipulação de componentes físicos e a maior facilidade do analista do sistema em verificar possíveis falhas e propor mudanças para obter melhorias. Além disso, os autores afirmam que simulação é eficiente em problemas que envolvem sistemas complexos de filas.

Chase et al. (2006) apresentam vários fatores envolvendo a importância da simulação durante o processo de produção e testes de um determinado

produto. Na Figura 2.3, são apresentadas as principais etapas de uma simulação, sendo que algumas descrevem seus principais fatores.

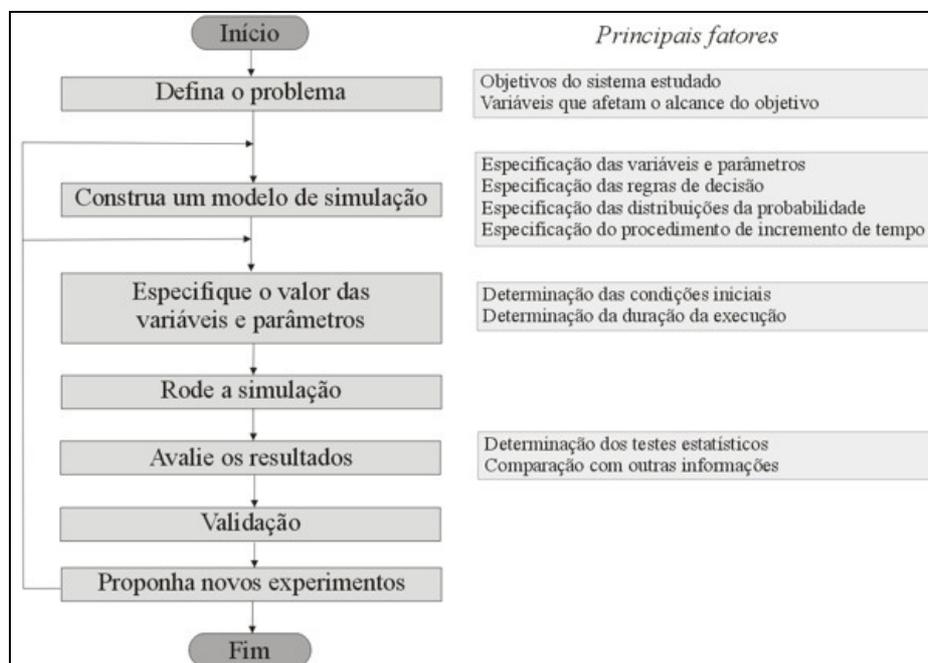


Figura 2.3 – Principais fases em uma simulação (CHASE ET AL., 2006)

Os autores também destacam a utilização de dois métodos distintos de incrementos de tempo durante uma simulação – fixo e variável. O incremento de tempo fixo é desejável quando os eventos de interesse ocorrem com regularidade ou quando o número de eventos é grande, sendo que vários podem ocorrer no mesmo período. O método de incremento de tempo variável ignora intervalos fixos que não ocorre evento algum e avança para o próximo ponto que ocorre um evento. Geralmente, leva menos tempo para ser executado no computador.

2.2.1 Modelos matemáticos

Rubinstein e Kroese (2007) relatam como deve ser constituído um modelo matemático para representar um ambiente real. Tais princípios norteiam a aplicação da simulação em ambientes reais. O primeiro passo é elaborar um

modelo que seja possível obter previsões em torno do comportamento do sistema. O modelo é uma representação de um cenário real e que, através dele, é possível fazer a tradução de uma situação real para um modelo matemático. No entanto, a modelagem precisa representar da forma mais próxima possível a realidade, desde que não seja matematicamente complexa.

Para isto, os autores sugerem alguns passos para a validação do modelo. Para ser validado, um modelo necessita que a sua formulação matemática não possua falhas, e que suas expressões matemáticas sejam consistentes. Outra forma de validação é verificar se a saída oferecida pelo modelo se comporta de forma plausível. Outro teste a ser realizado em um modelo é a comparação dos dados resultantes com dados históricos que reconstitui o passado para prever se o comportamento a ser apresentado no futuro não apresente uma solução totalmente fora do comportamento do sistema.

Como resposta, o modelo matemático que representa o sistema pode gerar duas formas distintas de solução – a analítica e a numérica. A solução analítica é obtida a partir de expressões matemáticas e a solução numérica é obtida por meio de métodos computacionais que encontram uma solução aproximada para o modelo. Os autores citam o uso da simulação computacional estocástica – comumente conhecida como simulação de Monte Carlo – como uma forma de se obter uma solução numérica, pois inclui alguns elementos aleatórios no modelo.

2.2.2 Simulação Monte Carlo

Andrieu et al. (2003) mostra como surgiu o método que originou à simulação Monte Carlo – o método Monte Carlo. Em meados da década de 1940, Stan Ulam e John von Neumann desenvolveram um algoritmo de simulação que avaliava o comportamento da difusão de nêutrons, durante o desenvolvimento das pesquisas da Segunda Guerra Mundial. Vários pesquisadores se

interessaram pelo método, por encontrar soluções satisfatórias em um tempo computacional razoavelmente curto, principalmente em problemas combinatórios difíceis. Os autores descrevem que a simulação Monte Carlo tornou-se importante nestas duas últimas décadas em áreas como a Estatística, Economia, Física e Ciência da Computação, em problemas analiticamente extensos.

A simulação Monte Carlo é vista por Mun (2006) como uma forma bem simples de prever, estimar e avaliar riscos, a partir do cálculo de vários cenários de um modelo através da escolha de valores aleatórios que obedecem a uma distribuição de probabilidade pré-definida. O autor ainda contempla a importância da utilização da simulação para prever com antecedência os possíveis riscos que um sistema pode sofrer com o tempo de uma forma mais eficiente do que outros métodos, pois a simulação Monte Carlo possibilita a utilização de parâmetros iniciais que direciona o comportamento do sistema.

Em Rubinstein e Kroese (2007), há um levantamento em torno da simulação Monte Carlo. Pela ocorrência de eventos que se comportam de acordo com distribuições probabilísticas, é possível extrair medidas em um modelo real cuja complexidade, em outras técnicas seja alta. Um exemplo é a aplicação de simulação em uma cadeia markoviana, onde são extraídos os valores das probabilidades-limite através de métodos iterativos. Através de demandas aleatórias que estimulam o funcionamento do sistema, o mesmo fornecerá um resultado com base na distribuição de probabilidade que melhor represente o seu funcionamento. A partir deste mecanismo, é possível extrair algumas medidas de desempenho que possam avaliar o comportamento do sistema a ser estudado.

Um exemplo deste tipo de aplicação é visto em Atkinson et al. (2008), onde os autores propuseram um algoritmo de simulação Monte Carlo aplicado a um sistema de atendimento emergencial, em que cada servidor pode se encontrar

em três situações – disponível, ocupado atendendo uma requisição primária ou secundária. A simulação Monte Carlo para este tipo de problema é recomendada para sistemas onde o número de servidores é grande e para a verificação do comportamento do sistema, por meio de medidas de desempenho, como probabilidade de perda de atendimento e *throughput*, que são extraídas a partir de chamadas pseudoaleatórias, dadas as taxas de chegada e de atendimento.

3 MODELO PROPOSTO

O algoritmo apresentado neste capítulo tem como principal objetivo encontrar uma topologia de rede *mesh* que atenda a parâmetros de QoS, como probabilidade de perda de pacotes, vazão ou *throughput*, atraso médio e taxa de atraso ou *jitter*. Estes parâmetros, quando estão dentro dos valores toleráveis, ilustram de forma quantitativa o quanto a rede proporciona aos usuários a possibilidade de receber com boa qualidade os diversos tipos de serviços oferecidos em redes de computadores, desde navegação em páginas da Web, até transmissões em tempo real em vídeo.

A busca por uma solução para planejar uma rede *mesh* com base para a extração dos parâmetros de QoS está dividida em algumas etapas, as quais estão descritas abaixo:

3.1 Definição dos valores iniciais

3.1.1 Representação das coordenadas dos pontos em um mapa

Inicialmente, têm-se no problema dois conjuntos espacialmente distribuídos em um plano – o conjunto $P = \{1, 2, \dots, n\}$ de locais pré-fixados onde poderão ser instalados os APs e o conjunto $C = \{1, 2, \dots, m\}$ de *Test Points* (pontos de teste ou TPs) afixados que irão se conectar à rede pelos roteadores, representando os clientes da rede, sendo n o número de lugares onde podem ser instalados os APs e m o número de pontos de teste.

Os pontos candidatos a APs são pré-definidos, principalmente pelo fato de que, em diversas localidades onde redes em malha podem ser instaladas, existem diversas restrições para se instalar os aparelhos, como matas, rios, pastos, terrenos de difícil acesso e propriedades cuja a viabilidade de se instalarem os aparelhos não seja possível. Os TPs também são previamente afixados.

Ambos os pontos adjacentes a estes conjuntos são representados espacialmente em um sistema de coordenadas cartesianas. Desta forma, APs e TPs serão representados no plano por meio de suas respectivas coordenadas (x, y) .

A partir das coordenadas de TPs e dos candidatos a AP, são constituídas duas matrizes de distâncias. Uma delas é a X , que contém as distâncias entre TPs e APs. A outra é a matriz Y , que armazena as distâncias entre todos os pontos candidatos a AP. Ambas as matrizes servem principalmente para mensurar quais TPs estão dentro do raio de cobertura dos APs e quais APs poderão se comunicar, dentro também de um determinado alcance.

3.1.2 Leitura das taxas de demanda e atendimento

Considera-se que cada TP demanda três tipos de informação – dados, áudio e vídeo. Cada tipo de informação vinda de um TP é representado por uma taxa de demanda, que são aproximadas por um processo de Poisson (BISNIK E ABOUZEID, 2006; LIU E LIAO, 2008). As três taxas se distinguem, pois as informações possuem prioridade em seu atendimento pelo AP. Neste caso, as informações de áudio e vídeo possuem prioridades no atendimento, pois um possível atraso em seus atendimentos produz um efeito mais prejudicial na qualidade de serviço.

As taxas de demanda, para um determinado TP $i \in C$, é representada como:

- λ_{di} a taxa de requisição de dados;
- λ_{ai} a taxa de requisição de áudio;
- λ_{vi} a taxa de requisição de vídeo.

Todos os APs possuem uma taxa de atendimento das demandas recebidas, cujo comportamento é modelado por distribuições exponenciais. Como

basicamente existe apenas uma memória de armazenamento ou *buffer*, sendo que a mesma poderá ser particionada, então existe apenas uma fila para atendimento. Neste modelo, para todo AP utilizado, haverá uma taxa de atendimento μ_j , com $j \in P$.

3.2 Desenho da solução inicial

A constituição de uma solução viável para o problema de planejamento da rede parte de uma topologia que cubra a todos os TPs da rede, de modo que a quantidade de APs utilizados seja a menor possível e que eles estejam dispostos em malha.

Para se encontrar uma solução que encontre o menor número possível de APs para a topologia inicial de rede, desde que cubra todos os clientes e que todos os APs estejam ligados em malha, é descrito um problema de Programação Matemática, baseado no que foi desenvolvido por Amaldi et al. (2008) e por Benyanima et al. (2009). Seu principal objetivo é encontrar uma topologia que cubra a todos os clientes, assegurando a conectividade entre os APs, de modo a assegurar que todos os APs estejam ligados a uma fonte externa de informações – a Internet, por exemplo. A partir dos conjuntos de candidatos a APs P e o de TPs da rede C , sejam as variáveis de decisão:

$$z_j = \begin{cases} 1, & \text{se o candidato a AP } j \text{ foi incluído na rede;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$g_j = \begin{cases} 1, & \text{se o candidato a AP } j \text{ for um } gateway; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o enlace entre os APs } i \text{ e } j \text{ está ativo;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$y_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{se o TP } k \text{ estiver atribuído ao AP } j; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Além destas variáveis, existem também as variáveis de fluxo da rede, das quais são garantidas a alimentação dos APs inclusos na rede, bem como a garantia de alimentação de seus respectivos TPs. Estas variáveis estão descritas conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Variáveis de fluxo nos APs presentes no modelo

Variável	Descrição
f_{jl}	Fluxo entre os APs j e l
F_j	Fluxo entre a rede externa e o AP j

Alguns parâmetros são utilizados de acordo com a cobertura dos APs e de seus respectivos TPs.

$$b_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{se o TP } k \text{ estiver dentro do raio de cobertura do candidato a AP } j; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o candidato a AP } i \text{ estiver na cobertura do candidato a AP } j; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Existem outras variáveis e parâmetros utilizados no modelo que são aplicadas no modelo para representar em dados quantitativos a capacidade de fluxo e tráfego de APs, além de custos de instalação e quantidade de *gateways* necessários. A Tabela 3.2 descreve os parâmetros e a finalidade dos mesmos.

Tabela 3.2 – Outros parâmetros presentes no modelo

Parâmetro	Descrição
τ_i	Tráfego gerado pelo TP i

G	Número de <i>gateways</i>
v_j	Capacidade para o AP j
u_{jl}	Capacidade de tráfego do enlace entre os APs j e l
M	Capacidade de fluxo de um <i>gateway</i>
s_j	Custo de instalação de um AP j
S_j	Custo adicional de instalação de um <i>gateway</i> j

Com base nestes elementos apresentados, modelo matemático que busca encontrar a topologia inicial da rede segue abaixo:

$$\text{Minimizar } \sum_{j=1}^n (s_j z_j + S_j g_j) \quad (3.1)$$

Sujeito à

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \in C \quad (3.2)$$

$$x_{ij} \leq z_j b_{ij} \quad \forall i \in C, \forall j \in P \quad (3.3)$$

$$\sum_{i=1}^m \tau_i x_{ij} + \sum_{l=1}^n (f_{lj} - f_{jl}) - F_j = 0 \quad \forall j \in P \quad (3.4)$$

$$f_{jl} \leq u_{jl} y_{jl} \quad \forall j, l \in P \quad (3.5)$$

$$\sum_{i=1}^m (\tau_i x_{ij}) \leq v_j \quad \forall j \in P \quad (3.6)$$

$$F_j \leq M g_j \quad \forall j \in P \quad (3.7)$$

$$\sum_{j=1}^n g_j \geq G \quad (3.8)$$

$$2y_{jl} \leq c_{jl}(z_j + z_l) \quad \forall j, l \in P \quad (3.9)$$

$$g_j \leq z_j \quad \forall j \in P \quad (3.10)$$

$$\sum_{j=1}^n (b_{ij} z_j) \leq 3 \quad \forall i \in C \quad (3.11)$$

$$x_{ij}, y_{jl}, z_j, g_j \in \{0, 1\} \quad \forall i \in C, j, l \in P \quad (3.12)$$

Neste modelo, a função objetivo (3.1) busca minimizar o custo de instalação total de APs, juntamente com o custo adicional de instalação de *gateways*. A garantia de que um AP ativo alimente a um TP está descrita na restrição (3.2). A restrição (3.3) é a garantia de que o AP que alimenta o TP x_{ij} esteja dentro de seu raio de cobertura. A condição (3.4) define o balanceamento de fluxo de todos os APs. A restrição (3.5) assegura que o fluxo trafegado entre os APs seja menor que a capacidade suportada entre os enlaces. As restrições (3.6) e (3.7) indicam, respectivamente, a capacidade de fluxo de um dado AP e a capacidade de fluxo de cada *gateway* presente na rede. A quantidade mínima de *gateways* requerida na rede é denotada na restrição (3.8). A restrição (3.9) assegura que haja um enlace entre dois nós ativos que estejam dentro de seus respectivos raios de cobertura. A inequação (3.10) assegura que um *gateway* deve ser um AP ativo na rede. A restrição (3.11) garante que existam, no máximo, a cobertura de três APs ativos em um TP da rede, já que três é a quantidade máxima de canais, em uma determinada área, para que não ocorra problemas de interferência (PROMMAK ET AL., 2002; DIAZ E DIAZ, 2006). A restrição (3.12) mostra que as variáveis x_{ij} , y_{jl} , z_j e g_j são binárias, quaisquer sejam os respectivos APs e TPs.

O modelo acima não considera a questão de bloqueio de comunicação entre APs e entre APs e TPs em situações que existam certos tipos de restrições para a comunicação entre dispositivos, principalmente ocasionados pela existência de outros objetos que absorvam o sinal ou que encontre interferência na comunicação entre os dispositivos ocasionada por outro tipo de comunicação entre aparelhos e que atravessa a trajetória do sinal.

Para estes casos, são acrescentadas no modelo as seguintes restrições que representam estes cenários em que existem restrições que impedem a comunicação entre dispositivos da rede:

$$b_{ij}x_{ij} \leq 0 \quad \forall i \in C, \forall j \in P \quad (3.13)$$

$$c_{jl}y_{jl} \leq 0 \quad j, l \in P \quad (3.14)$$

Dados os dispositivos $i \in C$ e $j, l \in P$, temos que a restrição (3.13) representa que o enlace entre o TP i e o AP j não possui comunicação, enquanto que a inequação (3.14) ilustra que há um bloqueio entre os APs j e l .

3.3 Simulação para verificação dos parâmetros de QoS

O planejamento da rede *mesh* necessitará que a topologia encontrada atenda aos parâmetros de QoS. Estes parâmetros definem a qualidade de serviço da rede, de acordo com requisitos exigidos para o seu bom funcionamento, a fim de que os TPs estejam satisfeitos com os seus serviços.

Os parâmetros de QoS estão atrelados com a qualidade de transmissão de dados de áudio e vídeo. Por terem maior sensibilidade a atraso e a sua variação, estas informações devem ser priorizadas na rede, pois possíveis atrasos poderão comprometer a qualidade do serviço de uma forma mais vertiginosa do que um atraso em um pacote de dados comuns.

A qualidade de serviço da rede é garantida a partir do momento em que há o trânsito de informações pela rede, o cliente que requisita um pacote de informações possa recebê-la sem que o pacote que é enviado a ele não seja perdido. Possíveis perdas de pacote são ocasionadas principalmente pela sobrecarga dos APs, ou seja, a fila de atendimento existente em um AP esteja cheia e, cada requisição que chega, ela não consiga comportar e, conseqüentemente, acaba descartando a informação requisitada.

Outro fator que pode comprometer a qualidade de serviço na rede é o atraso (ou *delay*) que uma informação pode sofrer quando trafega a partir do emissor até o cliente que fez a requisição. Atrasos tornam-se problema principalmente

quando serviços multimídia são utilizados na rede e, aplicações como telefonia e videoconferências, tenham pausas indesejáveis devido ao fato da informação transmitida sofrer um possível atraso ao chegar ao seu respectivo cliente.

Após a construção da topologia inicial e da definição dos parâmetros de QoS ideais, o próximo passo é a validação da solução a partir da avaliação de desempenho da rede. Para a extração das medidas de desempenho que servirão como referência para a obtenção final do planejamento da rede, então é aplicado o algoritmo de simulação Monte Carlo (ATKINSON ET AL., 2008). Alguns elementos serão utilizados para a avaliação dos parâmetros, além daqueles citados na Seção 3.1. Outros elementos são descritos abaixo.

Seja $\vec{w} = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ o vetor que representa o estado em que se encontram os n pontos candidatos a APs, onde w_j é igual a um número correspondente a quantidade de pacotes existentes nos buffers dos APs e que pertença ao conjunto $\{0, 1, \dots, q_j\}$, sendo q_j o número máximo de pacotes que podem ser armazenados na fila de atendimento do AP j . Cada w_j representa o estado de trabalho de cada roteador j , podendo encontrar-se disponível para atendimento ou, no momento em que chega uma requisição da rede, poderá estar ocupado no atendimento a outro TP, permitindo que a requisição entre na fila ou, caso a fila esteja cheia, então a requisição é perdida. Caso o AP j não fazer parte da topologia, o valor de w_j sempre será igual a 0, pois, no momento, ele será inutilizado.

Os passos adotados pela simulação Monte Carlo para a extração das medidas são descritas abaixo:

3.3.1 Definição dos valores iniciais

Inicialmente, são definidos alguns valores iniciais para as variáveis utilizadas na simulação. A partir delas, é que poderão ser extraídos os valores

necessários para a medição dos parâmetros de QoS da rede. A Tabela 3.3 detalha as variáveis, seus respectivos valores iniciais e a finalidade de sua utilização no modelo.

Tabela 3.3 – Valores iniciais para a simulação

Variável	Valor inicial	Finalidade
k	0	Ocorrência de um evento no sistema
\vec{w}	(0, 0, 0, ..., 0)	Vetor que representa a quantidade de pacotes contidos na fila de cada AP
$\psi^{(k)}$	0	Instante em que o k-ésimo evento ocorre no sistema
$Y_d^{(k)}$	0	Chamadas de dados que entraram no sistema até o instante k
$Y_{d,loss}^{(k)}$	0	Chamadas de dados perdidas no sistema até o instante k
$Y_a^{(k)}$	0	Chamadas de áudio que entraram no sistema até o instante k
$Y_{a,loss}^{(k)}$	0	Chamadas de áudio perdidas no sistema até o instante k
$Y_v^{(k)}$	0	Chamadas de vídeo que entraram no sistema até o instante k
$Y_{v,loss}^{(k)}$	0	Chamadas de vídeo perdidas no sistema até o instante k
$\Theta^{(k)}$	0	Total de serviços de todos os APs com fila no instante k
c_j	(0, 0, 0)	Capacidade da fila de dados do AP $j \in P$
Λ	$\sum_i \lambda_{di} + \lambda_{ai} + \lambda_{vi}$	Somatória de todas as taxas de demanda do sistema

3.3.2 Escolha aleatória do evento

O próximo passo a ser executado na simulação é a obtenção da variável aleatória $\omega \in [0, 1]$ na distribuição uniforme. Dependendo do valor atribuído a ω a cada instante, sendo comparados à razão entre a somatória de todas as taxas de demanda e a soma entre todas as taxas de demanda e as taxas de atendimento existentes (ver Atkinson et al., 2008) e as ações serão realizadas em um determinado período de tempo.

Se $\omega < \frac{\Lambda}{\Lambda + \Theta^{(k)}}$, então ocorre a entrada de uma requisição na rede e, desta forma, é incrementado um pacote, de acordo com o tipo de dados que entra na rede, onde:

- $\gamma_d^{(k+1)} = \gamma_d^{(k)} + 1$, se a requisição for dados,
- $\gamma_a^{(k+1)} = \gamma_a^{(k)} + 1$, se for áudio e
- $\gamma_v^{(k+1)} = \gamma_v^{(k)} + 1$, se for vídeo.

A cada passo de k , é gerado um número aleatório $\psi^{(k)}$, que representa o tempo que ocorre um evento naquela determinada época. Esta variável é incrementada com um número aleatório a cada execução de época, sendo como a linha do tempo dos eventos que ocorrem no sistema.

Além disto, é também escolhido aleatoriamente um cliente $\sigma \in C$, cuja probabilidade é igual a $\frac{\lambda_{d\sigma}}{\Lambda}$ para dados, $\frac{\lambda_{a\sigma}}{\Lambda}$ para áudio e $\frac{\lambda_{v\sigma}}{\Lambda}$ para vídeo.

Se $w_\sigma^{(k)} \leq c_\sigma$, então a requisição entra na fila e $w_\sigma^{(k+1)} = w_\sigma^{(k)} + 1$. O instante em que o pacote entrou na rede é dado como $\psi^{(k)}$.

Caso contrário, o pacote é perdido e os valores das variáveis, w_σ não se altera e os contadores de perda se alteram, sendo:

- $\gamma_{d,loss}^{(k+1)} = \gamma_{d,loss}^{(k)} + 1$, se a requisição for dados;
- $\gamma_{a,loss}^{(k+1)} = \gamma_{a,loss}^{(k)} + 1$, se for áudio;
- $\gamma_{v,loss}^{(k+1)} = \gamma_{v,loss}^{(k)} + 1$, se for vídeo.

Caso se $\omega > \frac{\Lambda}{\Lambda + \Theta^{(k)}}$, então é simulada aleatoriamente a variável $\delta \in P$, com

probabilidade $\frac{\theta_\delta^{(k)}}{\Theta^{(k)}}$, sendo que:

- $\theta_\delta^{(k)} = 0$ se $w_\delta^{(k)} = 0$;
- $\theta_\delta^{(k)} = \mu_i$, se $w_\delta^{(k)} > 0$.

Então, $w_\delta^{(k+1)} = w_\delta^{(k)} - 1$ e $w_\varphi^{(k+1)} = w_\varphi^{(k)} + 1$ para $\varphi \in P$ que é o AP consecutivo à rota, caso δ não seja um *gateway*. Caso δ seja um *gateway*, então o pacote é atendido e o atraso médio da requisição é dado como:

$$D_d^{(k)} = \frac{\psi_d^{(k)} - \psi_d^{(k_{ant})}}{\nu}, \quad (3.15)$$

$$D_a^{(k)} = \frac{\psi_a^{(k)} - \psi_a^{(k_{ant})}}{\nu} \quad (3.16)$$

$$D_v^{(k)} = \frac{\psi_v^{(k)} - \psi_v^{(k_{ant})}}{\nu} \quad (3.17)$$

sendo que ν é o número de saltos que o pacote necessitou trafegar até que pudesse ser atendido.

Ao término da execução do bloco condicional, se $w_j^{(k+1)} > 0$, para algum $j \in P$, então

$$\Theta^{(k+1)} = \sum_{i:w_i > 0} \mu_i \quad (3.18)$$

$$\psi^{(k+1)} = \psi^{(k)} + n^o \text{ aleatório} \quad (3.19)$$

e todo o procedimento é repetido dentro do intervalo de tempo Ψ .

Tal procedimento da simulação é repetido em N iterações.

3.3.3 Extração dos parâmetros de QoS

Terminada a simulação, a estimativa dos parâmetros de QoS é construída e, para o cálculo da probabilidade de perda de pacotes, estipulam-se os valores dos contadores γ , tais que:

$$\gamma_d = \gamma_d^{(k+1)} \quad (3.20)$$

$$\gamma_{d,loss} = \gamma_{d,loss}^{(k+1)} \quad (3.21)$$

$$\gamma_a = \gamma_a^{(k+1)} \quad (3.22)$$

$$\gamma_{a,loss} = \gamma_{a,loss}^{(k+1)} \quad (3.23)$$

$$\gamma_v = \gamma_v^{(k+1)} \quad (3.24)$$

$$\gamma_{v,loss} = \gamma_{v,loss}^{(k+1)} \quad (3.25)$$

A partir destas igualdades, é possível obter, desta maneira, as probabilidades de perda para cada tipo de dados, sendo:

$$\rho_{d,loss} = \frac{\gamma_{d,loss}}{\gamma_d} \quad (3.26)$$

$$\rho_{a,loss} = \frac{\gamma_{a,loss}}{\gamma_a} \quad (3.27)$$

$$\rho_{v,loss} = \frac{\gamma_{v,loss}}{\gamma_v} \quad (3.28)$$

O atraso médio da rede é dado através da somatória dos atrasos levados por cada pacote até ele ser atendido pela rede, cuja fórmula é dada como:

$$D_d = \frac{\sum_{k=1}^N D_d^{(k)}}{N} \quad (3.29)$$

$$D_a = \frac{\sum_{k=1}^N D_a^{(k)}}{N} \quad (3.30)$$

$$D_v = \frac{\sum_{k=1}^N D_v^{(k)}}{N} \quad (3.31)$$

3.4 Comparação entre os parâmetros obtidos e os desejados

Ao final da simulação, os valores obtidos de taxa de perda e de atraso médio da rede são comparados com os valores que são esperados. Uma vez que os valores encontrados para esses parâmetros são atingidos, a solução do modelo matemático de cobertura e fluxo para a rede é considerada satisfatória e o algoritmo termina a sua execução. Caso contrário, a topologia sofre alteração, de acordo com o parâmetro não atingido pela rede.

Quando a perda de pacotes está acima do desejado para a rede, é adicionada à rede mais um *gateway*, ou seja, na restrição (3.8), o valor de G será incrementado. Em seguida, é obtida uma nova solução, já com a alteração desta restrição e, em seguida, é executada novamente a simulação Monte Carlo.

Caso o problema seja o atraso, então será feita uma realocação do *gateway* na rede, ou seja, o ponto que, até então, era o *gateway*, poderá ser apenas um roteador. Para que isto ocorra, então é acrescentada no modelo a restrição

$$g_j^{(k+1)} \leq 0 \quad \forall j \in C : g_j^{(k)} = 1 \quad (3.32)$$

onde é imposto que tal AP não seja o *gateway* a ser utilizado.

A execução do algoritmo só termina quando, após a execução da simulação Monte Carlo, a rede atende aos parâmetros de QoS que são satisfatórios para a rede. Uma vez atingidos, a topologia que satisfaz os requisitos é fornecida, tanto a ligação entre APs quanto a atribuição aos TPs.

4 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

O algoritmo discutido no Capítulo 3 foi aplicado a alguns cenários, visando demonstrar a efetividade da abordagem proposta. Estes cenários são representados por mapas, onde estão previamente alocados os locais candidatos a AP e os locais de TPs. Os cenários são hipotéticos e levam em conta as condições de terreno encontradas em um residencial (Cenário 1), e uma localidade onde há uma maior liberdade para a instalação e utilização dos dispositivos empregados na rede (Cenário 2).

Em todos os casos, os APs utilizados são de mesmo modelo. A especificação utilizada é a IEEE 802.11s, com raio de cobertura omnidirecional de 100m e capacidade de armazenamento de *buffer* de 200 pacotes.

O algoritmo proposto foi implementado na linguagem C e utiliza a biblioteca de funções do CPLEX para encontrar as soluções dos modelos de Programação Matemática e, em seguida, retornar o resultado destes modelos para a execução da simulação Monte Carlo. O algoritmo realiza esse processo até a obtenção de uma solução que satisfaça aos requisitos exigidos de QoS para a rede.

4.1 Cenário 1

Neste cenário, o objetivo é planejar a rede em uma localidade residencial com área total de 400 × 400 m que dispõe de 25 pontos candidatos a APs e 80 clientes que serão os TPs da rede, com mobilidade desprezível. A Figura 4.1 exibe o mapa da localidade com os respectivos candidatos a APs e os TPs da rede.

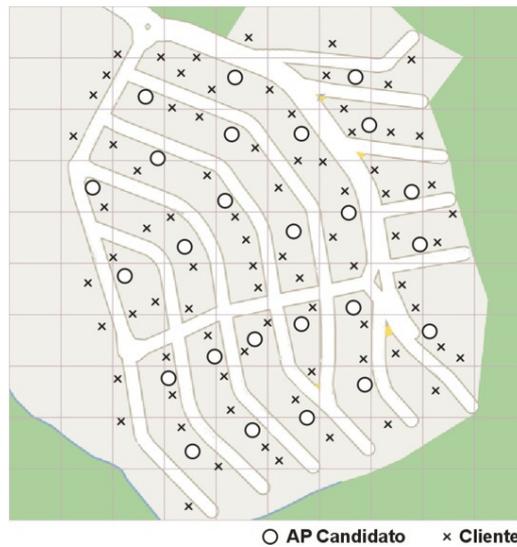


Figura 4.1 – Mapa de aplicação da rede (Fonte: Google Maps)

Para este cenário, supõe-se que:

- Cada AP tem capacidade v_j igual a 54 Mb/s,
- As capacidades dos fluxos u_{jl} para todo AP j e l da rede são de 54 Mb/s cada.
- Cada TP τ_i gera 2 Mb/s de demanda total (com todos os tipos de informações que trafegam na rede).
- A capacidade de fluxo M de um *gateway* é igual a 256 Mb/s.
- O custo de instalação s_j de um roteador j é igual a 100 e o custo adicional S_j de instalação de um *gateway* é igual a 800.
- A topologia necessita de um único *gateway*, no mínimo.
- Não há bloqueio na comunicação entre os dispositivos da rede.

Com estes dados, o modelo de Programação Matemática, para este exemplar do modelo, se dispõe inicialmente da seguinte maneira:

$$\text{Minimizar } \sum_{j=1}^{25} (100z_j + 800g_j) \quad (4.1)$$

Sujeito à

$$\sum_{j=1}^{25} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in C \quad (4.2)$$

$$x_{ij} \leq z_j b_{ij} \quad \forall i \in C, \forall j \in P \quad (4.3)$$

$$\sum_{i=1}^{80} 2x_{ij} + \sum_{l=1}^{25} (f_{lj} - f_{jl}) - F_j = 0 \quad \forall j \in P \quad (4.4)$$

$$f_{jl} \leq 54y_{jl} \quad \forall j, l \in P \quad (4.5)$$

$$\sum_{i=1}^{80} 2x_{ij} \leq 54 \quad \forall j \in P \quad (4.6)$$

$$F_j \leq 256g_j \quad \forall j \in P \quad (4.7)$$

$$\sum_{j=1}^{25} g_j \geq 1 \quad (4.8)$$

$$2y_{jl} \leq c_{jl}(z_j + z_l) \quad \forall j, l \in P \quad (4.9)$$

$$g_j \leq z_j \quad \forall j \in P \quad (4.10)$$

$$\sum_{l=1}^{25} (y_{jl} + y_{lj}) \leq 3 \quad \forall j \in P \quad (4.11)$$

$$x_{ij}, y_{jl}, z_j, g_j \in \{0, 1\} \quad \forall i \in C, j, l \in P \quad (4.12)$$

A Figura 4.2 ilustra a solução encontrada para a formulação inicial do problema acima, encontrando os valores de cada x_{ij} , y_{jl} , z_j e g_j que satisfaça à solução ótima para o problema da topologia de rede.

Nesta figura, os pontos em amarelo correspondem a roteadores e o ponto em vermelho, ao *gateway*. O traço em azul representa o enlace entre os APs e a área sobreada em amarelo e vermelho corresponde à área de cobertura dos APs sobre os TPs da rede.

Percebe-se, pelas áreas de cobertura dos roteadores e *gateway*, que todos os clientes estão cobertos pela rede, e que todos os APs estão sendo alimentados por outro AP, que por sua vez recebe a alimentação de dados, direta ou

indiretamente, a partir de um *gateway*. Esta exigência de funcionamento da rede é assegurada através dos valores encontrados para as variáveis de fluxo f_{ij} e F_j .

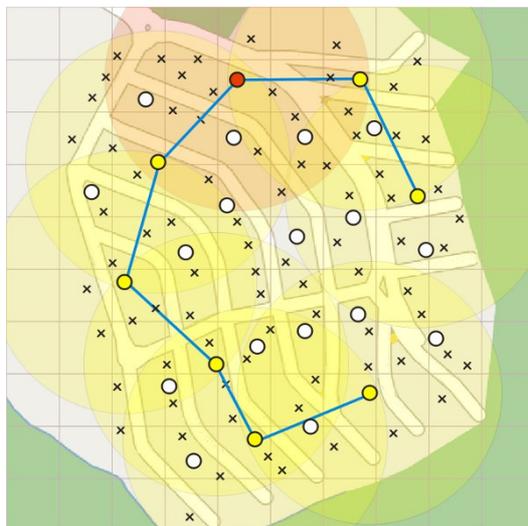


Figura 4.2 – Topologia resultante da formulação inicial do problema

Uma vez encontrada a topologia, com os respectivos APs utilizados e os enlaces entre APs e quais dentre eles alimentam cada TP da rede, então é executado o algoritmo de simulação Monte Carlo para a verificação dos parâmetros de QoS – perda de pacotes e atraso médio.

Para a simulação, são adotadas taxas aleatórias de demanda para cada TP $i \in C$ da rede, onde a taxa de dados λ_{di} varia entre 56 kb/s a 4 Mb/s, a taxa de áudio λ_{ai} até 128 kb/s, e a taxa de vídeo λ_{vi} entre 1.35 a 12 Mb/s (ver Souza et al., 2007). Para as taxas de atendimento μ_j , admite-se que todos os APs possuam 54 Mb/s. No entanto, para o cálculo de Θ , a taxa de atendimento a ser incrementada vai sendo reduzida de forma diretamente proporcional à distância entre os APs que estão conectados. A Figura 4.3 ilustra a variação das taxas de atendimento em função ao raio de cobertura do AP (DÍAZ E DÍAZ, 2006).

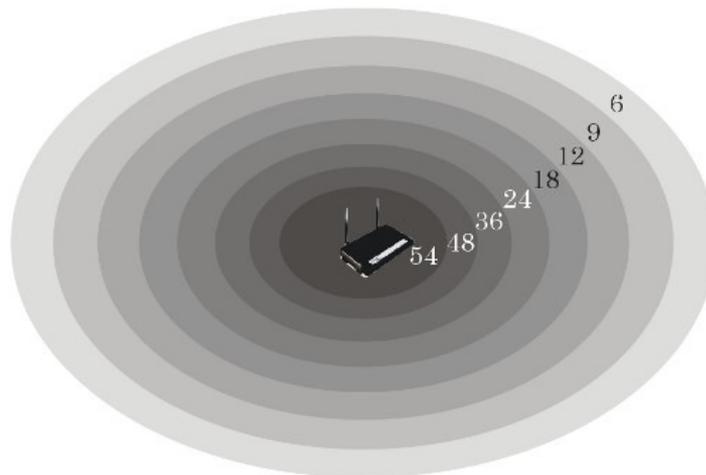


Figura 4.3 – Taxas de atendimento em função à distância em MB/s
 Fonte: DÍAZ E DIAZ (2006)

Este efeito ocorre devido à degradação do sinal provocado pelo aumento da distância entre um AP e outro dispositivo que faça algum tipo de comunicação com ele.

Dentre os 200 pacotes que um *buffer* suporta, 40 serão destinados para o armazenamento de pacotes de dados, 80 para os de áudio e 80 para os de vídeo. A janela de tempo da simulação é de 1000 s.

Como parâmetros de QoS, foram estipulados como valores toleráveis, conforme Wang e Zhuang (2009):

- para perda de pacotes, valores menores que 10% para vídeo, 10% para áudio e 10% para dados;
- para o atraso, 150 ms para vídeo e 150 ms para áudio. Neste caso, não haverá restrição de atraso para dados, pois considera-se que o atendimento na rede é prioritário para áudio e vídeo.

A simulação, a partir dos resultados fornecidos pelo modelo de Programação Matemática, extrai os parâmetros de QoS da rede, de acordo com os eventos probabilísticos que ocorrem ao longo da execução, ou seja, se a rede recebe

uma demanda de pacote ou se ela atende a um determinado requisito. Ao passo que o número de requisições aumenta, cada fila de armazenamento de pacotes (*buffers*) vai sendo preenchida e, conseqüentemente, ocorrem congestionamentos, o que provocam as perdas de pacotes da rede.

Já o atraso médio é influenciado basicamente por determinadas demoras para o atendimento dos pacotes trafegados na rede. Um destes fatores é a priorização destes pacotes, principalmente os dados multimídia. Neste cenário, dá-se a preferência pelos pacotes de áudio, vídeo e dados, respectivamente. Neste caso, o tempo dedicado a atendimento dos pacotes é subdividido para cada tipo de dados. Para este cenário, a distribuição do atendimento é de 15 % para os fluxos de áudio, 30 % para os fluxos de vídeo e 55% para os de dados.

Vale salientar que os pacotes de dados, neste cenário, não necessitam de uma avaliação do seu atraso médio, pois um atraso em suas entregas não comprometeria tanto o seu desempenho em comparação com os pacotes de áudio e vídeo.

Na Tabela 4.1, são ilustrados os resultados encontrados pelo algoritmo proposto. Nesta tabela utiliza-se a seguinte legenda para as colunas:

- Iteração: indica o número de vezes que o algoritmo foi executado e o resultado fornecido por ele;
- FO: Valor da função objetiva, que indica o custo total de instalação da rede;
- APs: Número de APs necessários para a rede;
- G: Número de *gateways* instalados;
- p_{loss} : valores encontrados para a probabilidade de perda de pacotes para dados (d), áudio (a) e vídeo(v);
- D: valores encontrados para o atraso médio para áudio (a) e vídeo (v).

Tabela 4.1 – Resultados encontrados com demanda total de até 2 Mb/s/cliente

Iteração	FO	APs	G	p_{loss}			D (ms)	
				d	a	v	a	v
1	1600	8	1	0.2754	0.2330	0.2286	64	72
2	2300	7	2	0.1637	0.1120	0.1084	90	98
3	3100	7	3	0.0631	0.0082	0.0042	106	111

Nota-se que foram necessárias 3 iterações para o algoritmo encontrar uma topologia da rede que atendesse aos parâmetros de QoS estabelecidos. A Figura 4.4 ilustra o resultado encontrado.

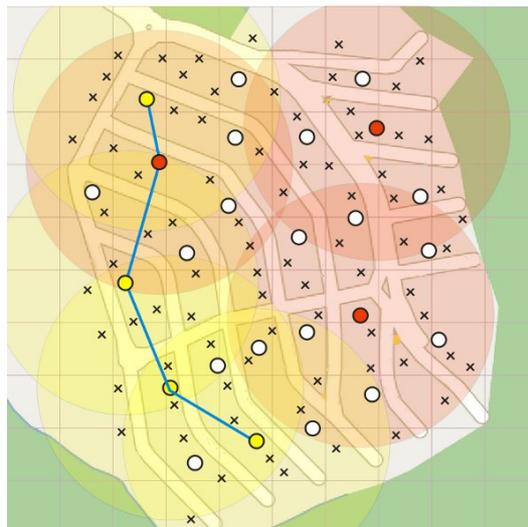


Figura 4.4 – Topologia encontrada após a execução do algoritmo

Deve-se observar nesta solução que, para atender aos parâmetros de QoS exigidos, dos 7 APs escolhidos para a topologia da rede, 3 deles devem ser *gateways*. Isto se deve às altas taxas de perda de pacotes encontradas nas primeiras iterações, o que forçou a utilização de vários *gateways*, provocando o aumento do custo da rede.

O tempo computacional levado para a obtenção da solução para cada modelo de Programação Matemática e da simulação Monte Carlo foram coletados para a verificação do desempenho do programa. O algoritmo foi executado em uma máquina com processador Dual Core, com 1,7 GHz em cada célula, memória RAM de 2 GB e sistema operacional Microsoft Windows Vista. A Tabela 4.2 ilustra os tempos obtidos, em cada iteração, para a solução dos modelos de Programação Matemática através da biblioteca de funções do CPLEX (PM) e simulação Monte Carlo (MCS).

Tabela 4.2 – Tempo computacional em cada iteração (em segundos)

Iteração	PM (CPLEX)	MCS
1	76.69	132
2	10.02	129
3	20.33	124

Um detalhe importante a ser observado é o tempo computacional levado para a resolução do modelo de Programação Matemática. Na primeira iteração, demorou um pouco mais de um minuto para que o CPLEX fornecesse a solução ótima para o modelo, enquanto que, na terceira iteração, o tempo decresceu para pouco mais de 20 segundos. Este fato ocorre devido ao esforço computacional ser reduzido após o acréscimo de um *gateway* nas restrições, o que implica no aumento do valor encontrado na função-objetivo e, conseqüentemente, em um menor esforço computacional para a obtenção da solução ótima do modelo de Programação Matemática.

Outro fator a ser observado é a redução do tempo computacional da simulação Monte Carlo. Apesar de ser em proporções bem menores frente à redução da redução do modelo de Programação Matemática, ainda sim há uma redução a ser considerada. Isso ocorre porque a simulação, nestes casos, visa atender mais pacotes, dado que o processamento de atendimento de um pacote na

simulação conter uma quantidade menor de instruções do que a chegada de um pacote no sistema.

Para considerar os efeitos de interferências e bloqueios de comunicação, foram adicionadas ao modelo as restrições (3.13) e (3.14). Neste caso, são escolhidos aleatoriamente 5% dos enlaces entre APs e 10% dos enlaces entre APs e TPs para que sofram algum tipo de interferência.

A Figura 4.5 ilustra o resultado encontrado para a solução inicial do problema, com a inclusão dos enlaces que sofrem bloqueio. Note a diferença com o resultado encontrado na Figura 4.2

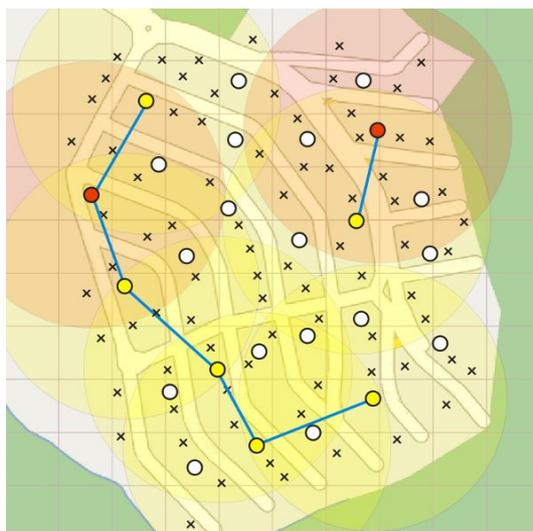


Figura 4.5 – Topologia encontrada após a execução do algoritmo com bloqueio

Em cada iteração do algoritmo, uma vez encontrada a solução para o modelo, a mesma passa pela verificação dos parâmetros de QoS, até que a rede atinja os valores ideais para a satisfação do serviço disponibilizado. Desta forma, as iterações para a verificação dos parâmetros de QoS foram realizadas para este cenário e os resultados são ilustrados conforme a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resultados encontrados para o Cenário 1 com bloqueio

Iteração	FO	APs	G	p _{loss}			D (ms)	
				d	a	v	a	v
1	2400	8	2	0.1212	0.0699	0.0654	147	152
2	3100	7	2	0.0671	0.0116	0.0076	142	148

Apesar da quantidade mínima de *gateways* ser igual a 1, o algoritmo encontrou uma topologia ótima de 2 *gateways*. Isto ocorreu devido às restrições do terreno que impediram de encontrar uma topologia que atendesse a todos os clientes com apenas um *gateway*.

Nesta primeira iteração, a perda de pacotes de dados e o atraso médio dos pacotes de vídeo proporcionaram alterações no modelo de Programação Matemática. Logo na segunda iteração, foram obtidos resultados aceitáveis para ambos os parâmetros que, até então, não estavam sendo satisfeitos pela rede.

O tempo computacional nesta situação tornou-se semelhante ao mesmo cenário sem os bloqueios, visto que a quantidade de variáveis se manteve, porém, cresceu a quantidade de restrições, fato que poderia ter contribuído para o aumento do tempo de processamento de cada iteração, descrito na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Tempo computacional em cada interação com bloqueio em segundos

Iteração	PM (CPLEX)	MCS
1	96.47	135
2	4.13	121

No entanto, a solução ótima para o modelo de Programação Matemática da primeira iteração foi encontrada em um tempo computacional bem menor, em comparação com os resultados obtidos com o modelo sem bloqueios

encontrados da Tabela 4.2. Isto pode ter ocorrido porque a obtenção do resultado com bloqueio – mesmo contendo um maior número de restrições – contasse com as restrições de bloqueio para encontrar uma solução de maneira mais eficiente. A Figura 4.7 exibe a topologia que atende às exigências dos parâmetros de QoS da rede.

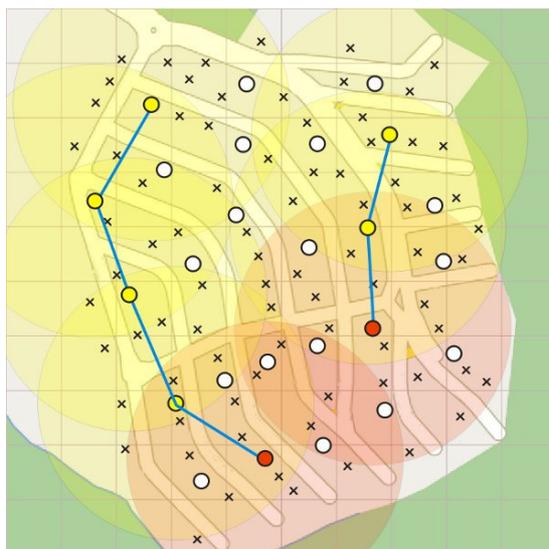


Figura 4.7 – Solução final obtida pelo algoritmo para o cenário com bloqueios

4.2 Cenário 2

Neste cenário, o algoritmo foi aplicado sobre um bairro, cujas dimensões são semelhantes ao cenário utilizado por Benyamina et al. (2009). Foi aplicada as configurações padronizadas para a rede sugeridas pelos autores. Neste caso, os valores adotados aos parâmetros são descritos na Tabela 4.5. Um fator importante a ser observado, é que os autores sugerem que sejam instalados, pelo menos, um *gateway* a cada 50 TPs da rede, o que determinará o valor inicial para G (vide tabela abaixo).

Tabela 4.5 – Valores iniciais utilizados por Benyamina et al. (2009)

Descrição	Variável	Valor inicial
Número de TPs	m	150

Número de candidatos a AP	n	49
Demanda inicial	τ_i	2 Mb/s
Capacidade de tráfego do enlace	u_{jl}	54 Mb/s
Capacidade de atendimento	v_j	54 Mb/s
Capacidade de tráfego de um <i>gateway</i>	M	128 Mb/s
Custo de instalação de um AP	s_j	200
Custo adicional de instalação de um <i>gateway</i>	S_j	1600
Número inicial de <i>gateways</i>	G	3

Os resultados obtidos do modelo, com base nos parâmetros da tabela acima, que representam a configuração padrão da rede, são ilustrados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Valores da solução encontrados no modelo de Benyamina et al. (2009)

Descrição	Valor encontrado
Função-objetivo	7400
Número de APs	13
Número de <i>gateways</i>	3

Para a verificação dos parâmetros de QoS, são estipulados como ideais para a rede uma probabilidade de perda de 3% para áudio, 2% para vídeo e 5% para dados. O atraso médio desejado para a rede não poderá ultrapassar os 100 ms para áudio e o 100 ms para vídeo. Diferentemente do cenário anterior, este cenário possui parâmetros mais exigentes, para mostrar uma melhor qualidade da rede.

Com os valores apresentados, então os pontos candidatos a APs são dispostos em uma grade 7×7 e os TPs são distribuídos aleatoriamente ao longo da área total. Desta maneira, será aplicado o problema em um residencial, cuja extensão territorial é de 600 × 600 m². A localização dos pontos candidatos a APs e dos TPs seguem na Figura 4.8.



Figura 4.8 – Disposição inicial dos TPs e dos candidatos a APs

Na Figura 4.9, é ilustrada a solução inicial encontrada para o problema, através do modelo matemático. Neste caso, de acordo com as configurações-padrão, a solução convergiu com a apresentada pelos autores, com a utilização de 13 APs, sendo que, dentre eles, 3 são *gateways*.

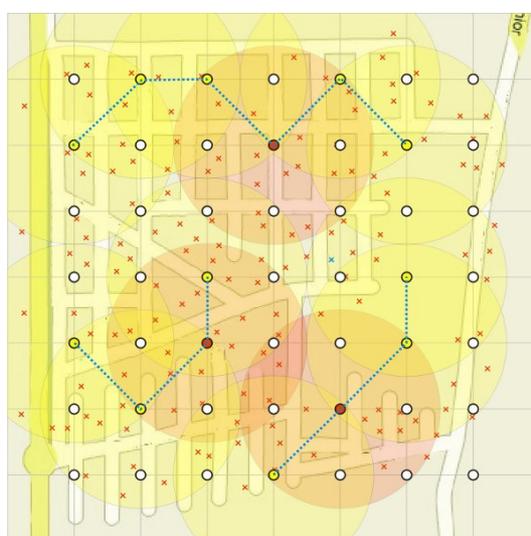


Figura 4.9 – Solução inicial do problema de cobertura da rede

Em seguida, são verificados os parâmetros de QoS para a validação da solução do modelo matemático. Na Tabela 4.7, se encontram os resultados

para a rede deste cenário, dado que, da demanda total de 2 Mb/s, 15% é utilizada para dados, 40% para áudio e 45% para vídeo. A taxa de atendimento dos APs utilizados é de 54 Mb/s.

Tabela 4.7 – Resultados encontrados na execução do algoritmo

Iteração	FO	APs	G	p_{loss}			D (ms)	
				d	a	v	a	v
1	7400	13	3	0.0759	0.0167	0.0162	81	79
2	9000	13	4	0.0069	0.0000	0.0002	19	65

Note que a primeira iteração confere com os resultados encontrados com os encontrados na Tabela 4.6, onde o custo, a quantidade de APs, e de *gateways* acabou sendo a mesma que o original. Porém, na simulação Monte Carlo, foi detectado que esta topologia, com os três tipos de informação trafegando pela rede, mostrou uma quantidade de perda de pacotes acima dos padrões desejados para a rede. Apesar de ter se mostrado baixa, com os valores próximos dos tolerados para áudio e vídeo (1%), porém, não chegou a atingir os valores ideais para a rede.

Com a adição de um *gateway* na rede (segunda iteração), a taxa de perda de pacotes diminuiu para quase 0% nos três tipos de informações, além da redução no atraso no tratamento das informações multimídia, principalmente nos pacotes de áudio. A topologia encontrada que atende aos parâmetros de qualidade de serviço para esta rede é mostrada na Figura 4.10.

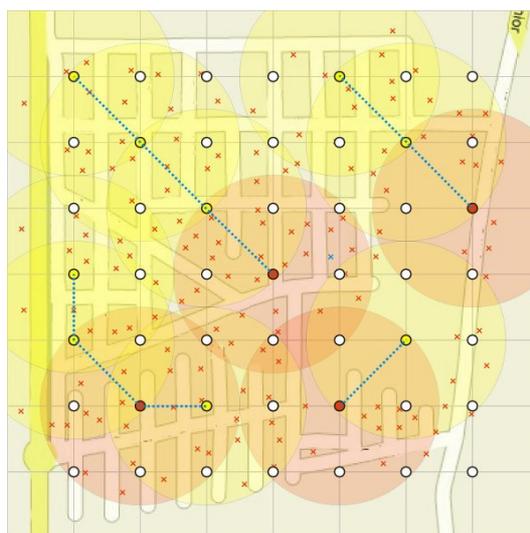


Figura 4.10 – Solução final do problema

Como observado na tabela, os resultados encontrados para a topologia inicial atendem em certo ponto os parâmetros de qualidade de serviço, onde o atraso médio e a perda de pacotes se encontram em patamares satisfatórios, mas, ainda sim, não são suficientes para o atendimento dos requisitos da qualidade de serviço oferecido pela rede. Apesar disso, mostrou-se necessária a adição de mais um *gateway* na topologia da rede, o que reduziu as perdas e os atrasos médios da rede, mesmo que isso tenha aumentado o seu custo de instalação.

O tempo computacional levado para a obtenção dos resultados deste cenário foi maior em relação ao Cenário 1, devido à maior quantidade de variáveis utilizadas neste modelo. Isto é notado nos resultados descritos na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Tempo computacional levado na execução do Cenário 2 em segundos

Iteração	PM (CPLEX)	MCS
1	6445.65	379
2	72.54	219

Neste caso, o tempo computacional já foi reduzido de forma vertiginosa já no acréscimo de um *gateway* dentre os mínimos tolerados para a rede. Este efeito se refletiu também na simulação Monte Carlo – diferentemente do que ocorreu no Cenário 1. Por ser uma instância maior de pontos e, conseqüentemente, um número maior de variáveis utilizadas no problema, o algoritmo demorou um tempo consideravelmente maior em relação ao outro exemplar do problema avaliado.

5 CONCLUSÕES

Esta dissertação abordou o problema de planejamento de redes em malha visando atender a parâmetros de qualidade de serviço. O algoritmo proposto resolve um modelo de Programação Matemática para obter uma topologia de rede que cobre todos os clientes e, em seguida, verifica parâmetros de QoS, tais como perda de pacotes e atraso, através de simulação Monte Carlo. No caso da topologia proposta não atender aos parâmetros de QoS desejados, novas restrições são incluídas no modelo e o processo é reiterado até que os parâmetros de QoS estimados estejam dentro de um valor desejado.

5.1 Contribuições do trabalho

A utilização de algoritmos de planejamento de redes *mesh* tem como vantagem a possibilidade de estudar o desempenho de uma rede em uma dada localidade, sem a necessidade de sua instalação real prévia. Este estudo pode ser feito de modo a assegurar uma minimização de custos, visando uma maior eficiência do serviço, pois a avaliação de parâmetros de QoS é fundamental para a verificação da eficiência da rede frente à satisfação das demandas dos clientes que a utilizam.

O algoritmo de planejamento proposto neste trabalho buscou equacionar três questões: a cobertura de todos os clientes, a conectividade entre os APs e a qualidade dos serviços oferecidos pela rede. Isto é necessário, pois, por um lado, todos os clientes de uma rede em malha devem estar na área de cobertura de modo a receberem o sinal da rede e, por outro lado, os pacotes requisitados pelos clientes devem ser atendidos sem perdas e em um tempo suficiente para que não haja atrasos que possam comprometer uma transmissão multimídia.

O modelo de Programação Matemática proporcionou uma forma de equacionar os requisitos da cobertura total dos TPs e da conectividade entre os APs,

assegurando que o sinal de uma rede externa alimentasse a todos os clientes *mesh*. Tais requisitos regem o principal objetivo do modelo, que é de apresentar uma topologia de menor custo.

A utilização da simulação Monte Carlo para avaliar o resultado de um modelo de Programação Matemática mostrou-se uma maneira interessante para obter os parâmetros de QoS da rede e, conseqüentemente, validar se o resultado do modelo pode ser utilizado em um cenário que se aproxima de uma situação real, já que a utilização de redes em malha sem fio em um cenário real possui diversos tipos de dificuldades, como interferências causadas por canal, por instalações contidas na área de cobertura e por fenômenos naturais.

O processo iterativo até a busca da solução que satisfaz a cobertura total da rede em malha para atender aos parâmetros de QoS mostrou-se pelos resultados obtidos em alguns cenários como uma alternativa para se obter uma rede que minimize os custos, mas que priorize a qualidade de atendimento a seus clientes.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, uma das possibilidades de estudo é a inclusão da avaliação dos parâmetros de QoS no modelo de Programação Matemática. Dependendo do objetivo do modelo – seja de minimizar a quantidade de APs ou minimizar a perda de pacotes, por exemplo – os parâmetros de QoS poderiam ser incluídos em algumas restrições ou até mesmo na função-objetivo.

Outra sugestão é combinar mais de uma tecnologia na mesma rede. Neste trabalho, foi adotado um único tipo de AP, baseado no padrão IEEE 802.11. Outros padrões de rede, como o IEEE 802.16 também possibilitam a arquitetura de rede em malha.

Uma ideia possível de ser desenvolvida em um trabalho futuro é utilizar outras estratégias para a formulação e para a verificação dos parâmetros de QoS. Uma possibilidade é desenvolver uma heurística ou aplicar uma já existente na literatura para encontrar um resultado satisfatório para o modelo de Programação Matemática, a fim de encontrar um bom resultado em menor tempo computacional, além de utilizar outros métodos para a verificação de parâmetros de QoS, tais como as equações empregadas na Teoria de Filas ou um outro método que vise encontrar as medidas de desempenho da rede.

Futuramente, também poderá ser trabalhada uma abordagem recente sobre avaliação de desempenho de uma rede, que é a qualidade de experiência (QoE – Quality of Experience), que fornece dados quantitativos em relação à satisfação do serviço recebido por cada cliente da rede, diferentemente dos parâmetros de QoS, que avaliam a rede ao todo. A partir dos parâmetros de QoE, possíveis problemas na transmissão podem ser identificados em uma forma mais precisa, além de fornecer mais parâmetros além dos utilizados pelo QoS. Esta abordagem poderá ser empregada no planejamento de rede e poderá, por exemplo, fornecer uma topologia que atenda a transmissão de vídeo para diversos pontos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABELÉM, A. J. G.; ALBUQUERQUE, C. V. N.; SAADE, D. C. M.; AGUIAR, E. S.; DUARTE, J. L.; FONSECA, J. E. M.; MAGALHÃES, L. C. S. Redes Mesh: mobilidade, qualidade de serviço e comunicação em grupo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS, 25, 2007, Belém. **Livro de Minicursos do SBRC 2007**. Belém, cap. 2, 2007.

AGUIAR, E.; BITTENCOURT, P.; MOREIRA, W.; ABELÉM, A. J. G. Estudo comparativo de protocolos de roteamento para redes Mesh na região Amazônica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES e SISTEMAS DISTRIBUÍDOS (SBRC 2007), 25, 2007, Belém, 2007. p. 1105-1110. Seção de Artigos curtos.

AKYILDIZ, I. F.; WANG, X.; WANG, W. Wireless mesh networks: a survey. **Computer Networks**, v. 47, p. 445-487, 2005.

AMALDI, E.; CAPONE, A.; CESANA, M.; FILIPPINI, I.; MALUCELLI, F. Optimization models and methods for planning wireless mesh networks. **Computer Networks**, v. 52, p. 2159-2171, 2008.

ANDRIEU, C.; FREITAS, N.; DOUCET, A.; JORDAN, M. I. An introduction to mcmc for machine learning. **Machine Learning**, v. 50 n.1-2, p. 5-43, 2003.

ATKINSON, J. B.; KOVALENKO, I. N.; KUZNETSOV, N.; MYKHALEVYCH, K. V. A hypercube queueing loss model with customer-dependent service rates. **European Journal of Operational Research**, v. 191, p. 223-239, 2008.

BADIA, L.; BOTTA, A.; LENZINI, L. A genetic approach to joint routing and link scheduling for wireless mesh networks. **Ad Hoc Networks**, v. 7, p. 654-664, 2009.

BENYAMINA, D.; HAFID, A.; GENDREAU, M. On the Design of Bi-connected Wireless Mesh Network Infrastructure with QoS Constraints. **IEEE GLOBECOM**, pp. 5307-5312, 2008.

BISNIK, N.; ABOUZEID, A. Delay and throughput in random access wireless mesh networks. IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS (ICC 2006), 2006, Stambul. **Proceedings...** Stambul: IEEE, v. 1, p. 403-408, June. 2006.

CABRAL, G. A. **Uma arquitetura para otimização de acesso à Internet em redes em malha sem fio**. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte, UFMG, 2008.

CABRAL, G. A.; MATEUS, G. R. Uma abordagem baseada em simulação para o planejamento de redes em malha sem fio. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL (SBPO) 41., 2009, Porto Seguro. **Anais...** Porto Seguro: UNIFACS, 2009.

CHASE, R. B.; AQUILANO, N. J.; JACOBS, F. R. **Administração da produção para a vantagem competitiva**. 10. Ed. [S.l.]: Bookman, 2006.

DÍAZ, L. E. N.; DÍAZ, J. A. P. A Model for designing WLAN's 802.11 for VoIP. In: ELECTRONICS, ROBOTICS AND AUTOMOTIVE MECHANICS CONFERENCE, 2006, Guernavaca. **Proceedings...** Guernavaca: IEEE, 2006.

HILARIO, L. E. N.; SILVA, R. H.; LEITE, J. C. B.; ALBUQUERQUE, C. V. N. QoS Mesh – qualidade de serviço em redes Mesh. In: CONFERÊNCIA LATINOAMERICANA DE INFORMÁTICA, 33., 2007, San José, Costa Rica. **Anales...** San José: IEEE, 2007.

LARSON, R. C.; ODONI, A. R. **Urban operations research**. New Jersey: Prentice Hall: Englewood Cliffs., 1981.

LEE, M. J.; ZHENG, J.; KO, Y. B.; SHRESTHA, D. M. Emerging standards for wireless mesh technology. **IEEE Wireless Communications**, v. 13, n.2, p. 56-63, 2006.

LIU, T.; LIAO, W. Location-dependent throughput and delay in wireless mesh networks. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 57, n. 2. p 1188-1198, 2008.

MOREIRA, W.; AGUIAR, E.; ABELÉM, A.; STANTON, M. Using multiple metrics with the optimized link state routing protocol for wireless mesh networks. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS (SBRC 2008), 26., 2008, Rio de Janeiro, Brasil. **Anais...** Rio de Janeiro: LNCC/UFF/UFRJ/UERG, 2008.

MUN, J. **Modeling risk**: applying Monte Carlo simulation, real options analysis, forecasting, and optimization techniques. New York: John Wiley & Sons, 2006.

PRIES, R.; STAEHLE, D.; STOYKOVA, M. On the usability of genetic algorithms for wireless mesh network planning and optimization. In: ACM international conference on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems, 13., 2008, University of Würzburg. **Proceedings...** New York: ACM, 2008.

PROMMAK, C.; KABARA, J.; TIPPER, D.; CHARNSRIPINYO, C. Next generation wireless LAN system design. In: MILITARY COMMUNICATIONS

CONFERENCE (MILCOM 2002), 2002, Anaheim, CA. **Proceedings...** New York: IEEE, 2002. v.1, p 473-477.

RUBINSTEIN, R. Y.; KROESE, D. P. **Simulation and the Monte Carlo method**. New York: John Wiley Inc., 2007.

SAADE, D. C. M.; ALBUQUERQUE, C. V. N.; MAGALHÃES, L. C. S.; PASSOS, D.; DUARTE, J.; VALLE, R. Redes em malha: solução de baixo custo para popularização do acesso à Internet no Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES (XXV SBRT), 25., 2007, Recife. **Anais...** Recife, 2007.

SEN, S.; RAMAN, B. Long distance wireless mesh network planning: problem formulation and solution. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WORLD WIDE WEB (WWW '07), 16., New York. **Proceedings...** New York, 2007.p. 893-902.

SILVA, C. R.; ALBUQUERQUE, C. V. N. Priorização de chamadas de voz em redes em malha sem fio. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES (XXVII SBRT), 27., 2007, Blumenau. **Anais...** Blumenau, 2007.

SOUZA, L. V.; CARVALHO, G. H. S.; CARDOSO, D. L.; CARVALHO, S. V.; FRANCÊS, C. R. L.; COSTA, J. C. W. A.; RIU, J. R. MDP-based Resource Allocation for Triple-Play Transmission on xDSL Systems. Broadband Access Communication Technologies II. **Proceedings of the SPIE**, Volume 6776, pp. 67760F, 2007.

WANG, P.; ZHUANG, W. A collision-free MAC scheme for multimedia wireless mesh backbone. **IEEE Transactions on Wireless Communications**. Vol. 8, pp. 3577 - 3589, 2009.

BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

AKYILDIZ, I. F.; WANG, X. A Survey on Wireless Mesh Networks. **IEEE Com. Mag.**, Sept. 2005, vol. 43, no. 9, pp. 23-30.

ATKINSON, J. B.; KOVALENKO, I. N.; KUZNETSOV, N.; MYKHALEVYCH, K. V. Heuristic methods for the analysis of a queueing system describing emergency medical service deployed along a highway. **Cybernetics and Systems Analysis**, vol. 42, no. 3, pp. 379-391, 2006.

BOLCH, G.; GREINER, S.; DE MEER, H.; TRIVEDI, K. S. **Queueing Networks and Markov Processes** - Modeling and Performance Evaluation with Computer Science Applications. 2^a ed. John Wiley and Sons, 2006.

CESAR, C. A. C.; CARVALHO, S. V. Análise de Desempenho de Redes Sem Fio em Malha. **Anais do X WorCAP**. INPE, São José dos Campos, 2010.

ÇINLAR, E. **Introduction to Stochastic Processes**. Prentice-Hall, 1975.

SILVA, M.; SENNE, E. L. F.; VIJAYKUMAR, N. L. Planejamento de Redes Mesh com aplicação do Modelo Hipercubo para Verificação de Parâmetros de QoS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2010, Bento Gonçalves. **Anais...** 2010. DVD. Disponível em: <http://www.sobrapo.org.br/sbpo2010/xliisbpo_pdf/72344.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2011.

SILVA, M.; SENNE, E. L. F.; VIJAYKUMAR, N. L. Planejamento de redes em malha com verificação de parâmetros de qualidade de serviço. In: WORKSHOP DOS CURSOS DE COMPUTAÇÃO APLICADA DO INPE, 10. (WORCAP), 2010, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2010. On-line. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/38B5CNP>>. Acesso em: 26 fev. 2011.