



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/03.11.14.56-TDI

**NOVO MODELO DE MINIMIZAÇÃO DE TEMPOS DE
TRANSMISSÃO FIM A FIM EM REDES SEM FIO EM
MALHA**

Marlon da Silva

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, orientada pelos Drs. Nandamudi Lankalapalli Vijaykumar, e Edson Luiz França Senne, aprovada em 30 de março de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3J5ERC5>>

INPE
São José dos Campos
2015

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

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

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

Membros:

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

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
(CPT)

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

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação
(SID)

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/03.11.14.56-TDI

**NOVO MODELO DE MINIMIZAÇÃO DE TEMPOS DE
TRANSMISSÃO FIM A FIM EM REDES SEM FIO EM
MALHA**

Marlon da Silva

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, orientada pelos Drs. Nandamudi Lankalapalli Vijaykumar, e Edson Luiz França Senne, aprovada em 30 de março de 2015.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3J5ERC5>>

INPE
São José dos Campos
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Silva, Marlon da.

Si38n Novo modelo de minimização de tempos de transmissão fim a fim em redes sem fio em malha / Marlon da Silva. – São José dos Campos : INPE, 2015.

xxiv + 94 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/03.11.14.56-TDI)

Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015.

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

1. Redes sem fio em malha. 2. Otimização cross-layer. 3. Métodos heurísticos. 4. Simulação. 5. Programação matemática. I.Título.

CDU 004.71:004.03

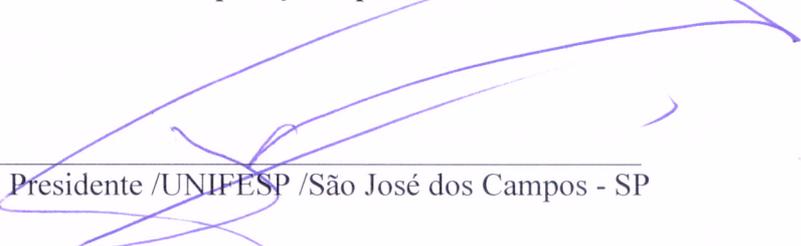


Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

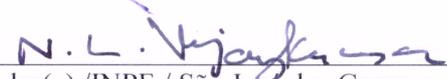
Aprovado pela Banca Examinadora em
cumprimento a requisito exigido para a
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Computação Aplicada.

Dr. Horacio Hideki Yanasse



Presidente /UNIFESP /São José dos Campos - SP

Dr. Nandamudi Lankalapalli
Vijaykumar



Orientador(a) /INPE / São José dos Campos- SP

Dr. Edson Luiz França Senne



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

Dr. Solon Venâncio de Carvalho



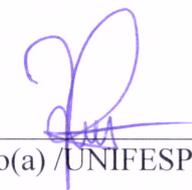
Membro da Banca(a) /INPE/ São José dos Campos- SP

Dr. Antônio Augusto Chaves



Convidado(a) /UNIFESP/São José dos Campos-SP

Dr. Valério Rosset



Convidado(a) /UNIFESP/São José dos Campos-SP

Este trabalho foi aprovado por:

- maioria simples.
- unanimidade.

Título: "Novo modelo de minimização de tempos de transmissão fim a fim em Redes Sem Fio em Malha."

Aluno (a): Marlon da Silva



São José dos Campos, 30 de Março de 2015.

Quem vence sem risco, triunfa sem glória.

AUGUSTO CURY

A Deus e a todos os meus.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos, primeiramente, a Deus, por conceder tamanha graça para poder realizar este sonho, outrora considerado inalcançável. A Nossa Senhora, pelo apoio maternal nas horas mais difíceis dessa trajetória.

A minha família, sobretudo, a meus pais, Manoel e Bárbara, pelo afeto, apoio e amor depositado, desde a minha concepção, até os dias de hoje. A meus irmãos e familiares, por compartilhar comigo momentos de alegria e de dor.

A meus amigos e colegas de Pindamonhangaba, que estão comigo desde a minha adolescência, aos meus amigos de Guaratinguetá, que me acompanham desde os tempos de Graduação, aos meus amigos de São José dos Campos, que me acompanharam nesta jornada e que estiveram do meu lado em momentos especiais da minha vida, e aos meus amigos de Belém, pela estadia, acolhimento, companheirismo, e, em especial, ao Carlos Natalino, pela valiosa ajuda para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus professores, que me convenceram, pelos seus exemplos, para qual profissão eu deveria seguir, em especial, ao Prof. Marcos Antonio Pereira, pela orientação e indicação para que eu pudesse realizar o sonho de estudar nesta instituição. Ao Prof. Cormac J. Sreenan, pelas contribuições decisivas para o crescimento desta tese.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Edson Luiz França Senne e Prof. Dr. Nandamudi Lankalapalli Vijaykumar, pelos ensinamentos, instruções, chamadas de atenção e sermões, necessários para que eu crescesse como profissional e, principalmente, como ser humano. Aos membros da Banca Examinadora, pela presença e contribuições, das quais são de grade relevância para o aprimoramento deste trabalho.

À E.E. Dr. Alfredo Pujol, de Pindamonhangaba, por ser o meu alicerce na minha trajetória, tanto como estudante, quanto professor. À UNESP de Guaratinguetá, pelo acolhimento e pelas oportunidades oferecidas para iniciar a realização do sonho de ser docente universitário. E ao INPE, pela oportunidade dada a mim, para eu poder completar a minha formação acadêmica com qualidade.

RESUMO

A transmissão de pacotes em redes sem fio em malha (do inglês, *Wireless Mesh Networks* – WMNs) depende de diversos fatores, como o controle de potência, a atribuição de canais, o controle de fluxo e a largura de banda, que podem ser obtidos a partir das diferentes camadas da rede. Para obter uma boa qualidade de serviço (do inglês, *Quality of Service* – QoS) oferecida aos usuários, os valores atribuídos a estes fatores devem satisfazer, conjuntamente, uma métrica específica para o tipo de transmissão desejado. Neste trabalho, considera-se que a rede deve transmitir principalmente pacotes de dados multimídia (áudio e vídeo). Como este tipo de transmissão requer que os pacotes sejam entregues rapidamente aos usuários, neste trabalho considera-se a métrica WCETT (*Weighted Cumulative Expected Transmission Time*). O objetivo deste trabalho é apresentar um novo modelo de otimização que minimize o WCETT total de uma WMN, o qual corresponde à soma dos tempos de transmissão esperados para todos os enlaces da rede. Trata-se de um modelo de Programação Não-Linear e para sua solução propõe-se uma heurística híbrida, que decompõe o modelo em dois subproblemas: (i) a maximização da capacidade dos enlaces da rede e (ii) a minimização do WCETT total. O primeiro subproblema é resolvido por metaheurísticas. Dadas as capacidades dos enlaces, o segundo subproblema torna-se um modelo de Programação Linear Inteira Mista, que é resolvido por um otimizador. Os resultados obtidos são validados por meio de um algoritmo de simulação específico para redes sem fio.

NEW MODEL FOR MINIMIZING END-TO-END TRANSMISSION TIMES IN WIRELESS MESH NETWORKS

ABSTRACT

The transmission of packets in wireless mesh networks (WMN) depends on several factors, such as power control, channel assignment, flow control and bandwidth, which can be obtained from the different layers of the network. For a good quality of service (QoS) offered to users, the values assigned to these factors must jointly satisfy, a specific metric for the desired type of transmission. This work considers that the network transmits mainly multimedia data packets (audio and video). Since this type of transmission requires that packets be delivered quickly to users, this work considers the WCETT (Weighted Cumulative Expected Transmission Time) metric. Thus, the objective of this work is to propose a new optimization model that minimizes the total WCETT for a WMN, which corresponds to the sum of expected transmission times for all links of the network. This is a non-linear programming model and for its solution a hybrid heuristic model is proposed that decomposes the model into two sub-problems: (i) the maximization of the capacity of network links and (ii) the minimization of the total WCETT. The first sub-problem is solved by metaheuristics. Given the link capacities, the second sub-problem becomes a Mixed Integer Linear Programming model, which is solved by an optimizer. The results are validated by means of a simulation algorithm specific for wireless networks.

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 1.1 Exemplo de <i>gateways</i> , roteadores, clientes e enlaces em uma WMN | 3 |
| 1.2 Exemplo de canais em uma WMN | 4 |
| 1.3 Exemplo de sessões em uma WMN | 4 |
| 2.1 Exemplo de uma rede sem fio em malha | 11 |
| 2.2 Esquematização das camadas de rede nos modelos OSI e TCP/IP | 14 |
| 2.3 Exemplos de ambientes onde se medem o (a) SNR, o (b) SIR e o (c) SINR. | 18 |
| 2.4 Diagrama do modelo utilizado por Liao e Elhakeem (2012) | 20 |
| 3.1 Esquematização de um fluxo de dados em uma WMN | 30 |
| 3.2 Principais elementos de uma rede sem fio em malha no formato de grafo | 33 |
| 3.3 Exemplo de extração dos valores relacionados às potências e aos coeficientes em um cenário de interferência | 37 |
| 4.1 Fluxograma para o algoritmo da heurística híbrida. | 40 |
| 5.1 Etapas do algoritmo de simulação | 50 |
| 6.1 WMN aplicada em Pindamonhangaba (Fonte: Google Maps) | 57 |
| 6.2 Capacidades médias de transmissão dos enlaces | 60 |
| 6.3 Representação dos ETTs obtidos pelas diferentes estratégias da heurística híbrida | 61 |
| 6.4 Evolução do WCETT total em função do tamanho do pacote | 62 |
| 6.5 Variação do WCETT total em função dos ETXs | 64 |
| 6.6 Variação do WCETT total em função do coeficiente de reatividade | 64 |
| 6.7 Variação do WCETT total em função do coeficiente de ruído | 65 |
| 6.8 Variação do WCETT total em função do nível máximo de potência dos APs | 66 |
| 6.9 Variação do WCETT total em função do aumento da grade | 68 |
| 6.10 Variação do ETT médio em função do aumento da grade | 68 |
| 6.11 Evolução dos valores do ETT médio em função do aumento da dimensão da grade | 69 |
| 6.12 Evolução dos valores do WCETT total em função do aumento de sessões | 70 |
| 6.13 Evolução da função-objetivo em cada um dos modelos propostos | 72 |

6.14 Evolução do tempo computacional para cada um dos modelos propostos 73

LISTA DE TABELAS

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| 2.1 Elementos utilizados no SA | 26 |
| 2.2 Elementos utilizados no VNS | 28 |
| 3.1 Conjuntos do modelo proposto | 32 |
| 3.2 Subconjuntos de enlaces do modelo | 33 |
| 3.3 Variáveis utilizadas no modelo | 33 |
| 3.4 Parâmetros utilizados no modelo matemático | 34 |
| 4.1 Elementos utilizados no algoritmo SA | 43 |
| 4.2 Elementos utilizados no algoritmo VNS | 45 |
| 5.1 Parâmetros utilizados no modelo de simulação | 50 |
| 6.1 Dados de infraestrutura da configuração padrão | 58 |
| 6.2 Valores utilizados para os demais parâmetros do modelo | 58 |
| 6.3 Valores para os parâmetros das meta-heurísticas | 58 |
| 6.4 Resultados obtidos para a configuração padrão – Subproblema 1 | 59 |
| 6.5 Resultados obtidos para a configuração padrão – Subproblema 2 | 60 |
| 6.6 Resultados obtidos com variação do tamanho do pacote | 62 |
| 6.7 Resultados obtidos com variação dos ETXs | 63 |
| 6.8 Resultados obtidos com variação do coeficiente de reatividade | 63 |
| 6.9 Resultados obtidos com variação do coeficiente de ruído | 65 |
| 6.10 Resultados obtidos com variação do nível máximo de potência dos APs | 66 |
| 6.11 Resultados obtidos a partir de diferentes dimensões da grade | 67 |
| 6.12 Resultados obtidos ao alterar a quantidade de sessões na rede | 69 |
| 6.13 Valores dos parâmetros de simulação | 71 |
| 6.14 Resultados obtidos pela simulação | 71 |
| 6.15 Tempo computacional por amostragem entre os modelos propostos | 72 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------|---|
| AODV | – Ad hoc On-demand Distance Vector |
| AP | – Access Point |
| ETT | – Expected Transmission Time |
| ETX | – Expected Transmission Count |
| IEEE | – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos |
| IP | – Internet Protocol |
| LGNS | – Linearly-Guided Nonlinear Search |
| LLC | – Logical Link Control |
| MAC | – Media Access Control |
| MCR | – Multi-Channel Routing Metric |
| MIC | – Metric of Interference and Channel switching |
| MIMO | – Multiple-Input Multiple-Output |
| MR-LQSR | – Multi-Radio Link Quality Source Routing |
| MTM | – Medium Time Metric |
| NS-3 | – Network Simulator 3 |
| OLSR | – Optimized Link State Routing |
| OSI | – Open System Interconnection |
| QoS | – Quality of Service |
| SA | – Simulated Annealing |
| SIR | – Signal-to-Interference Ratio |
| SINR | – Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio |
| SNR | – Signal-to-Noise Ratio |
| SPR | – Successful Packet Rate |
| TCP | – Transmission Control Protocol |
| TDD-CDMA | – Time-Division Duplex Code-Division Multiple Access |
| UDP | – User Datagram Protocol |
| VNS | – Variable Neighborhood Search |
| WCETT | – Weighted Cumulative Expected Transmission Time |
| WMN | – Wireless Mesh Network |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|---------------|---|
| N | – Conjunto de APs da rede |
| L | – Conjunto de enlaces |
| S | – Conjunto de sessões |
| C | – Conjunto de sessões |
| M | – Conjunto de enlaces que compõem um caminho |
| S | – Quantidade de sessões |
| N | – Quantidade de APs |
| L | – Quantidade de enlaces |
| C | – Quantidade de canais |
| X_i | – Soma dos ETTs que utilizam o canal i |
| RS | – SINR |
| P_s | – Nível de sinal do enlace |
| P_r | – Ruído existente no ambiente |
| P_i | – Interferência provocada por outros dispositivos |
| s_0 | – Solução inicial |
| s' | – Solução vizinha |
| s'' | – Solução após busca local |
| s_{opt} | – Solução final |
| T_0 | – Temperatura inicial |
| SA_{max} | – Máximo de iterações do SA |
| α | – Taxa de resfriamento |
| ϵ | – Temperatura mínima tolerável |
| R | – Número de estruturas de vizinhança |
| L^i | – Enlaces que utilizam o canal $i \in C$ |
| L_k | – Enlaces que pertencem a um caminho para a sessão $k \in S$ |
| L_{kn}^s | – Enlaces em que $n \in N$ é o AP emissor da sessão $k \in S$ |
| L_{kn}^r | – Enlaces em que $n \in N$ é o AP receptor da sessão $k \in S$ |
| τ_{ij}^k | – ETT do enlace j , que utiliza o canal i e a sessão k |
| f_{ij}^k | – Fluxo de dados no enlace j , que utiliza o canal i e a sessão k |
| p_j | – Potência de enlace j |
| κ_j | – Capacidade de transmissão do enlace j |
| z_{ni} | – Indicador se o canal i será utilizado pelo AP n |
| t | – Valor máximo da soma de ETTs de um canal |
| χ_{ij}^k | – ETX do enlace j , que utiliza o canal i e a sessão k |
| I | – Quantidade máxima de interfaces de rede nos APs |
| β | – Coeficiente de reatividade da rede |
| λ_k | – Taxa de dados para a sessão k |
| P_n | – Potência máxima do AP n |
| G_{mn} | – Matriz de coeficientes de interferência entre os APs m e n |
| σ | – Coeficiente de ruído |

| | | |
|----------------|---|---|
| W | – | Frequência da largura de banda |
| d_{mn} | – | Distância entre os APs m e n |
| η | – | Expoente de degradação de sinal |
| \mathbf{p}_0 | – | Conjunto de potências iniciais |
| \mathbf{p} | – | Solução corrente para as potências |
| \mathbf{p}' | – | Solução vizinha à corrente |
| \mathbf{p}_f | – | Solução final |
| T_0 | – | Temperatura inicial |
| T | – | Temperatura corrente |
| iT | – | Número de iterações para o VNS |
| max | – | Máximo de iterações do VNS |
| T | – | Tempo total de transmissão de dados na simulação |
| V | – | Intervalo de tempo entre a entrega de dois pacotes consecutivos |
| B_t | – | Número de bytes transmitidos |
| B_r | – | Número de bytes recebidos |
| T_0 | – | Tempo do primeiro pacote recebido |
| T_f | – | Tempo do último pacote recebido |
| q_{loss} | – | Probabilidade de perda |
| τ_O | – | ETT para o protocolo pró-ativo |
| τ_A | – | ETT para o protocolo reativo |

SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Motivação | 1 |
| 1.2 Objetivos do Trabalho | 5 |
| 1.3 Contribuições do Trabalho | 7 |
| 1.4 Metodologia | 8 |
| 1.5 Estrutura do trabalho | 9 |
| 2 TRABALHOS RELACIONADOS | 11 |
| 2.1 Arquitetura em camadas | 12 |
| 2.2 Modelos <i>cross-layer</i> para redes sem fio em malha | 15 |
| 2.3 Métricas específicas para redes sem fio em malha | 20 |
| 2.4 Capacidade de transmissão em redes sem fio | 23 |
| 2.5 Heurísticas para a maximização da capacidade de transmissão dos enlaces | 25 |
| 2.5.1 O algoritmo <i>Simulated Annealing</i> | 25 |
| 2.5.2 O algoritmo <i>Variable Neighborhood Search</i> | 26 |
| 3 MODELO DE OTIMIZAÇÃO CROSS-LAYER APLICADO A REDES SEM FIO EM MALHA | 29 |
| 3.1 Estudos preliminares | 29 |
| 3.2 Componentes do modelo proposto | 32 |
| 3.3 A formulação do modelo de otimização proposto | 34 |
| 4 HEURÍSTICA HÍBRIDA PROPOSTA | 39 |
| 4.1 Maximização da capacidade dos enlaces | 39 |
| 4.1.1 Capacidade de enlaces utilizando <i>Simulated Annealing</i> | 41 |
| 4.1.2 Capacidade de enlaces utilizando <i>Variable Neighborhood Search</i> | 43 |
| 4.2 Minimização dos WCETTs | 45 |
| 5 MODELO DE SIMULAÇÃO PROPOSTO | 49 |
| 5.1 Configuração da rede a ser simulada | 50 |
| 5.2 Criação e instalação dos APs | 51 |
| 5.3 Instalação de pilhas de protocolo | 52 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.4 | Instalação das aplicações | 53 |
| 5.5 | Execução e extração das métricas | 53 |
| 6 | RESULTADOS COMPUTACIONAIS | 57 |
| 6.1 | Cenário utilizado | 57 |
| 6.2 | Parâmetros dos algoritmos | 58 |
| 6.3 | Resultados obtidos para a configuração padrão | 59 |
| 6.3.1 | Subproblema de maximização da capacidade de transmissão dos enlaces | 59 |
| 6.3.2 | Subproblema de minimização do WCETT total | 60 |
| 6.4 | Resultados obtidos para cenários diferentes da configuração padrão | 61 |
| 6.4.1 | Alteração do tamanho do pacote | 61 |
| 6.4.2 | Alteração do valor estimado para os ETXs | 62 |
| 6.4.3 | Alteração do coeficiente de reatividade da rede | 63 |
| 6.4.4 | Alteração do coeficiente de ruído da rede | 64 |
| 6.4.5 | Alteração do nível máximo de potência dos APs | 65 |
| 6.5 | Resultados com a alteração da topologia da rede | 66 |
| 6.5.1 | Resultados com a alteração da quantidade de sessões | 68 |
| 6.6 | Simulação com o <i>Network Simulator 3</i> | 70 |
| 7 | CONCLUSÕES | 75 |
| 7.1 | Conclusões do trabalho | 75 |
| 7.2 | Sugestões de trabalhos futuros | 79 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 81 |
| | IMPLEMENTAÇÃO DA EXTRAÇÃO DO WCETT NO NS-3 | 89 |
| A.1 | Configuração da rede | 89 |
| A.2 | Criação dos APs | 91 |
| A.3 | Instalação de pilhas de protocolo | 91 |
| A.4 | Instalação das aplicações | 92 |
| A.5 | Execução e extração das métricas | 93 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O uso de redes sem fio tem crescido nos últimos anos, devido ao aumento ao acesso a dispositivos móveis, tais como *laptops*, *tablets* e telefones celulares. Nestes novos dispositivos móveis é comum a utilização de aplicações multimídia (áudio e vídeo). Estas aplicações estão bastante difundidas, tanto em redes sociais, como no campo científico-profissional, como no ensino à distância, em videoconferências e até em operações remotas de telemedicina. Assim, com o aumento cada vez maior de usuários aos serviços disponíveis pelas redes sem fio e da melhoria da tecnologia dessas redes, aumentou-se também o tráfego de pacotes de dados multimídia.

Particularmente em relação a aplicações multimídia, a demora na transmissão e entrega dos pacotes pode comprometer a qualidade do serviço entregue aos usuários, uma vez que para estas aplicações, áudio e vídeo devem ser entregues simultaneamente. Desta forma, para que seja possível planejar uma boa infraestrutura para uma rede sem fio, é importante medir o tempo de transmissão dos pacotes desde sua origem até os dispositivos clientes. Normalmente, algumas métricas de tempo, tais como o atraso médio e a variação do atraso (*jitter*), são utilizadas para isto e servem como parâmetros da qualidade de serviço (QoS – *Quality of Service*) da rede.

A comunicação em uma rede, desde a origem do dado até seu destino na aplicação do usuário, depende de diversos protocolos que trabalham de forma interdependente e trocam informações entre si. Para facilitar a compreensão e o tratamento deste processo de comunicação, a arquitetura de uma rede é composta por camadas, que são representações abstratas destes protocolos. Assim, a qualidade de serviço de uma rede depende de diversas configurações das camadas da rede como, por exemplo, a potência necessária para o envio de dados entre dispositivos, o canal a ser utilizado em uma transmissão ou a quantidade de dados que pode ser enviada em cada enlace da rede.

O aumento do número de possíveis usuários remete também a um outro problema: a necessidade de expansão da área de cobertura da rede sem fio, que deve ser feita levando-se em consideração a garantia da qualidade de serviço a todos os usuários e os custos de instalação e manutenção dos dispositivos de transmissão da rede.

Uma alternativa econômica para a expansão da área de cobertura de uma rede sem fio é a rede sem fio em malha (*Wireless Mesh Network – WMN*) (AKYILDIZ et al., 2005). Numa rede sem fio tradicional, todos os dispositivos de transmissão, conhecidos como pontos de acesso (*Access Points – APs*), são conectados diretamente a uma fonte de dados externa, como a Internet, por exemplo. Isso implica na existência de cabos conectando fisicamente os APs às fontes de dados externas. Em alguns locais, como na Região Amazônica, por exemplo, a instalação desses cabos pode ser difícil e onerosa.

Numa WMN, existem dois tipos de APs, os *gateways* e os roteadores, e apenas os *gateways* são conectados diretamente a uma fonte de dados externa. Os APs roteadores retransmitem os dados recebidos para outros APs ou para os dispositivos clientes que utilizam o serviço da rede. Como o número de *gateways* pode ser pequeno em relação ao número total de APs, a instalação de uma WMN torna-se mais fácil e menos onerosa.

O planejamento de uma WMN, no entanto, é mais complexo do que para uma rede sem fio tradicional. Para se medir os níveis de qualidade de serviço de transmissões multimídia em uma WMN, por exemplo, a avaliação de métricas de tempo tradicionais, como atraso médio e *jitter*, pode não ser satisfatória, pois não consideram conexões entre APs. A conexão entre APs numa WMN é conhecida como salto (*hop*) e um pacote pode percorrer vários saltos até chegar ao cliente de destino. Assim, para medir a qualidade de serviço, é importante avaliar toda a rota utilizada para a entrega dos dados. No entanto, o roteamento dos pacotes em uma WMN depende das condições de congestionamento das conexões entre APs, o que é difícil de ser previsto.

Desta forma, algumas métricas de tempo têm sido propostas exclusivamente para WMNs. A métrica ETT (*Expected Transmission Time*) (DRAVES et al., 2004) tem sido utilizada para estimar o tempo de transmissão em cada salto. Entretanto, como comentado anteriormente, numa WMN deve-se levar em conta todos os saltos utilizados no roteamento dos dados. Além disso, numa WMN este roteamento é dinâmico, pois alguns saltos podem ser substituídos por outros devido a problemas de congestionamento nas conexões entre APs. Assim, a estimativa do tempo de transmissão para todo o trajeto deve levar em conta possíveis alterações de rota. Uma das métricas propostas para calcular o tempo de transmissão de todo um trajeto levando em conta possíveis alterações de rotas é o WCETT (*Weighted Cumulative Expected Transmission Time*) (BAHL et al., 2004).

Para melhor entendimento do cálculo do WCETT, ilustram-se a seguir os principais elementos de uma WMN.

- *gateways*: São APs que recebem diretamente os dados vindos de uma fonte externa e os fornecem ao restante da rede;
- *roteadores*: São APs que recebem o sinal vindo de um outro AP da WMN e o transmitem para outro AP ou para os seus respectivos clientes;
- *clientes*: São os dispositivos consumidores da rede, que demandam os dados aos seus respectivos APs;
- *enlaces ou saltos*: São as conexões sem fio entre dois APs. Os enlaces permitem que haja a comunicação e, conseqüentemente, o tráfego de dados entre APs. Em um enlace, um dos APs transmite o sinal (AP emissor) e o outro AP recebe o sinal (AP receptor). A potência utilizada pelo AP emissor é conhecida como potência do enlace. A Figura 1.1 ilustra os dispositivos e os enlaces de uma WMN.

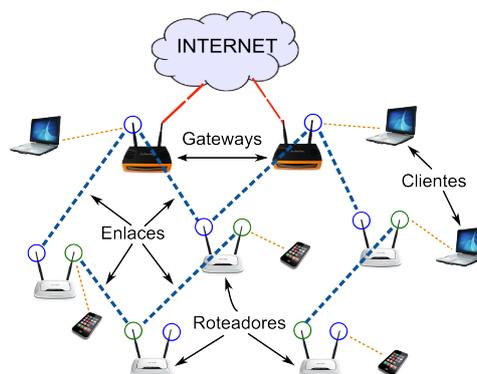


Figura 1.1 - Exemplo de *gateways*, roteadores, clientes e enlaces em uma WMN

- *canais*: São as vias de acesso utilizadas pelos sinais, dentro de um espectro de frequência. O uso de diferentes canais permite que não haja interferência entre o sinal recebido por um AP e o sinal transmitido por esse AP. Para que haja um enlace, os APs envolvidos devem utilizar o mesmo canal. Na Figura 1.2, os dados são recebidos pelo canal 1 e são retransmitidos pelo canal 2.
- *sessões*: São conjuntos de enlaces que compõem o caminho percorrido por uma transmissão, desde um *gateway* até o roteador destinatário dos

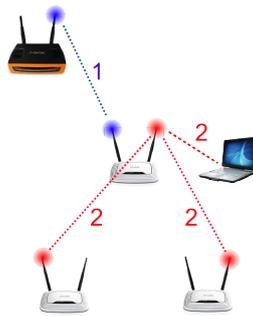


Figura 1.2 - Exemplo de canais em uma WMN

dados. A Figura 1.3 ilustra as sessões A e B na rede, em que os dados percorrem um caminho desde o *gateway* até os roteadores em que seus respectivos clientes estão conectados.

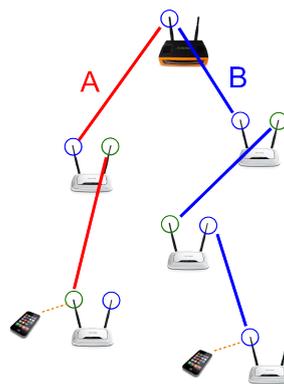


Figura 1.3 - Exemplo de sessões em uma WMN

O cálculo do WCETT é complexo, pois envolve informações de diferentes camadas de rede, como a capacidade de transmissão de cada enlace que conecta dois APs, a potência consumida em cada enlace, os canais utilizados em cada AP e o fluxo dos dados que trafegam em cada enlace. Cada uma dessas informações pode ser obtida a partir do problema tratado na respectiva camada da rede. Entretanto, como as camadas de rede são interdependentes, para obter o WCETT é necessário que todos esses problemas sejam considerados simultaneamente. Os modelos de otimização que consideram simultaneamente problemas de diferentes camadas de rede são conhecidos na literatura como modelos *cross-layer*.

Os modelos *cross-layer* têm sido muito utilizados no planejamento de redes sem fio. Na maioria dos trabalhos, os modelos de otimização *cross-layer* são utilizados para maximizar a vazão da rede (*throughput*) (YUAN et al., 2006; TANG et al., 2009; YAZDANPANAHI et al., 2011). Para WMNs, no entanto, não basta maximizar a vazão da rede. O planejamento de WMNs envolve problemas específicos, que não se aplicam às redes sem fio tradicionais como, por exemplo, garantir a conectividade entre os APs que compõem a malha. Isso significa assegurar que todo cliente da rede esteja conectado a um *gateway*, seja diretamente ou por meio de saltos entre os roteadores. Outra característica das WMNs, também não abordada na maioria dos trabalhos que utilizam modelos de otimização *cross-layer*, refere-se ao roteamento dinâmico dos pacotes, como comentado anteriormente.

1.2 Objetivos do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo principal propor um modelo *cross-layer* para minimização do WCETT total em uma WMN. Para tanto, o modelo proposto deverá encontrar uma configuração da rede composta pelas variáveis:

- nível de potência por enlace;
- capacidade de transmissão de cada enlace;
- canais a serem utilizados em cada AP;
- fluxo de dados de cada combinação de enlace, canal e sessão;
- ETT de cada combinação de enlace, canal e sessão,

estabelecendo os valores adequados para essas variáveis, de modo a minimizar a soma do WCETT de cada sessão. O modelo conta com restrições oriundas de problemas tratados em diferentes camadas da rede. As restrições do modelo proposto estão agrupadas de acordo com as camadas de rede às quais se referem. Na literatura, estes grupos de restrições são considerados, por si só, como problemas de otimização. Neste trabalho, são considerados como componentes do modelo proposto. Assim, existem os seguintes grupos de restrições:

- *Controle de potência*. Problema tratado na camada física, que consiste em limitar a potência que cada enlace pode consumir do AP emissor;

- *Largura de banda*. Problema tratado nas camadas de transporte e de enlace, que consiste em limitar a capacidade dos enlaces de acordo com os níveis de potência, levando em consideração a presença de sinais que podem causar interferência ou de elementos que provocam ruído sobre o sinal emitido;
- *Atribuição de canais*. Trata-se de um problema NP-difícil (RANIWALA et al., 2004), tratado nas camadas física e de enlace, que consiste em estabelecer os canais nos quais cada AP deverá operar para a comunicação com os outros APs;
- *Controle de fluxo*. Problema tratado na camada de rede, que consiste em assegurar o tráfego de dados entre os APs, de acordo com a disponibilidade e a capacidade de cada enlace.

No modelo proposto, o WCETT de cada sessão é obtido em função dos ETTs da rede, os quais são obtidos a partir das capacidades dos enlaces. Portanto, a solução do modelo consiste em um conjunto de ETTs que levam ao menor valor possível do WCETT total.

Com este modelo, pretende-se garantir que a rede possa ser configurada de uma forma a favorecer uma entrega mais rápida de dados aos clientes, sobretudo aos clientes que encontram-se mais distantes dos *gateways*. A entrega rápida de dados aos clientes, como comentado anteriormente, pode ser crucial para a utilização de aplicações multimídia por parte dos clientes.

Ao utilizar o WCETT como métrica de qualidade de serviço o modelo considera dois modos distintos de entrega de dados em uma WMN: a entrega em rotas pré-definidas e a entrega de dados sob demanda em rotas definidas dinamicamente. A utilização de rotas mais favoráveis para o tráfego de dados contribui para uma entrega de dados eficiente na WMN.

Todavia, o modelo proposto é um modelo de Programação Não-Linear. Apesar do modelo usar uma linearização do cálculo do WCETT, o modelo inclui dois conjuntos de restrições não-lineares: (i) a equação da capacidade dos enlaces é logarítmica e (ii) o cálculo dos ETTs é uma equação racional. Assim, o trabalho tem também como objetivo propor uma heurística híbrida para resolver eficientemente este modelo.

1.3 Contribuições do Trabalho

Esta tese vem contribuir para o aprimoramento da transmissão de dados multimídia em redes sem fio em malha, propondo uma solução para um problema que afeta diretamente na qualidade de serviço, que é o tempo de entrega dos pacotes. Quanto menor o tempo de entrega dos pacotes ao destino, mais eficiente será o serviço multimídia oferecido. Como o WCETT considera características específicas de uma WMN, esta métrica torna-se indicada para servir de parâmetro de QoS. Além disso, o modelo proposto nesta tese também traz como contribuições:

- A obtenção de métricas de roteamento, como o ETT e o WCETT, como restrições de um modelo *cross-layer* de otimização. Métricas específicas para WMNs ainda não haviam sido consideradas dentro de modelos que consideram medidas de desempenho das camadas de rede;
- A inclusão de modelos físicos em um modelo de Programação Matemática para a obtenção dos WCETTs de cada sessão. Embora o subproblema de maximização da capacidade de enlaces já tivesse sido utilizado por [Yuan et al. \(2006\)](#), para o modelo proposto nesta tese, considera-se o espectro de frequência para o cálculo da capacidade de transmissão dos enlaces. A estimativa das capacidades de transmissão dos enlaces é importante para se obter os ETTs e, conseqüentemente, o WCETT total;
- O uso de meta-heurísticas para resolver um modelo não-linear de degradação de sinal. Empregam-se meta-heurísticas para um modelo de otimização contínua a fim de encontrar uma bom conjunto de capacidades de enlaces, devido ao fato deste subproblema ser NP-difícil ([YUAN et al., 2006](#));
- A formulação de equações para resolver o problema de atribuição de canais como restrições do modelo de Programação Matemática, a partir dos requisitos listados por [Raniwala et al. \(2004\)](#). Diferentemente do que foi proposto por [Tang et al. \(2009\)](#), que considerou o problema de atribuição de canais separado do restante do modelo.
- A estimativa de métricas de roteamento em WMNs utilizando um simulador de redes. O modelo de simulação proposto permite fazer uma es-

timativa destes valores, já que os simuladores disponíveis no momento não possuem recursos para tal.

1.4 Metodologia

Neste trabalho, propõe-se um modelo *cross-layer* para minimização do WCETT em uma WMN. Como se trata de um modelo de Programação Não-Linear propõe-se também uma heurística híbrida para resolver o modelo proposto.

A heurística proposta reduz a complexidade do modelo dividindo-o em dois sub-problemas. O primeiro subproblema visa encontrar os níveis de potência que os enlaces consomem e que maximiza a capacidade de transmissão dos enlaces, sujeito às restrições de controle de potência e largura de banda. As capacidades de transmissão dos enlaces são calculadas em função de seus níveis de potência, por meio de equações logarítmicas (JOHANSSON; XIAO, 2006; YUAN et al., 2006). Assim, o primeiro subproblema corresponde a um problema não-linear e sua solução é obtida por meio de meta-heurísticas. Duas meta-heurísticas são utilizadas para obter uma solução para este subproblema: *Simulated Annealing* (SA) e *Variable Neighborhood Search* (VNS).

O segundo subproblema consiste em minimizar o WCETT, sujeito às restrições de controle de fluxo e atribuição de canais. Este subproblema considera a capacidade máxima dos enlaces, obtida pela meta-heurística, e consiste em um modelo de Programação Linear Inteira Mista, resolvido por um otimizador comercial (*solver*).

Neste trabalho propõe-se um modelo de otimização ainda não explorado na literatura. Assim, os resultados obtidos pela heurística híbrida proposta necessitam de verificação. Para isto, utiliza-se um modelo de simulação que avalia o comportamento da rede e permite obter as medidas de desempenho necessárias para aferir os resultados obtidos pela heurística proposta. Um modelo de simulação é interessante, pois permite obter as medidas de desempenho da rede sem a necessidade de instalar a rede fisicamente para a coleta das métricas de tempo.

Para executar o modelo de simulação utilizou-se o simulador Network Simulator 3 (NS-3) (ANDREEV; BOYKO, 2011). Como o simulador NS-3 não possui uma biblioteca própria que trate especificamente de medidas de roteamento, como o WCETT, propõe-se um algoritmo que permite calcular os WCETTs com base na combinação de ETTs extraídos de protocolos disponíveis no NS-3.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado da forma descrita a seguir:

O Capítulo 2 apresenta os principais conceitos relacionados ao tema abordado, como redes sem fio em malha, arquitetura de redes em camadas, métricas de roteamento específicas para WMNs, modelos *cross-layer* de otimização, assim como os principais trabalhos da literatura relacionados a este tema, ressaltando suas diferenças em relação ao presente trabalho.

O Capítulo 3 apresenta o modelo *cross-layer* de Programação Não-Linear proposto para minimizar o WCETT total em WMNs. O Capítulo 4 descreve a heurística híbrida proposta para resolver eficientemente o modelo de otimização proposto. O Capítulo 5 apresenta o modelo de simulação utilizado para verificar os resultados obtidos pela heurística proposta.

O Capítulo 6 apresenta os resultados computacionais obtidos pela heurística híbrida e pelo simulador. O Capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo, apresenta-se uma revisão da literatura sobre modelos de otimização em redes sem fio, em particular, em redes sem fio em malha. São apresentados os principais trabalhos da literatura relacionados com o tema abordado, discutindo seus resultados, suas contribuições e seus relacionamentos com a proposta desta tese. O capítulo apresenta também os conceitos mais importantes para este trabalho: a arquitetura de redes em camadas, os modelos *cross-layer* de otimização, as métricas existentes para redes sem fio, os modelos de otimização não-lineares para estimar a capacidade de transmissão em redes sem fio e algumas técnicas de resolução destes modelos não-lineares, em particular, utilizando as meta-heurísticas *Simulated Annealing* e *Variable Neighborhood Search*.

As redes sem fio são compostas por equipamentos transmissores, conhecidos como pontos de acesso (APs – *Access Points*) e por dispositivos clientes. Nas redes sem fio em malha, também conhecidas como redes mesh (WMNs – *Wireless Mesh Networks*) (AKYILDIZ et al., 2005), os APs são classificados em dois tipos: *gateways*, que são os APs conectados diretamente a uma rede externa, e roteadores, que são os APs que recebem e transmitem o sinal de e para outros APs. Os dispositivos clientes são, em geral, microcomputadores, *laptops*, telefones móveis (*smartphones*), *tablets*, dentre outros, e que consomem os serviços da rede, podendo receber o sinal de qualquer um dos APs (*gateways* ou roteadores). A Figura 2.1 mostra um exemplo de WMN, contendo *gateways*, roteadores e clientes.

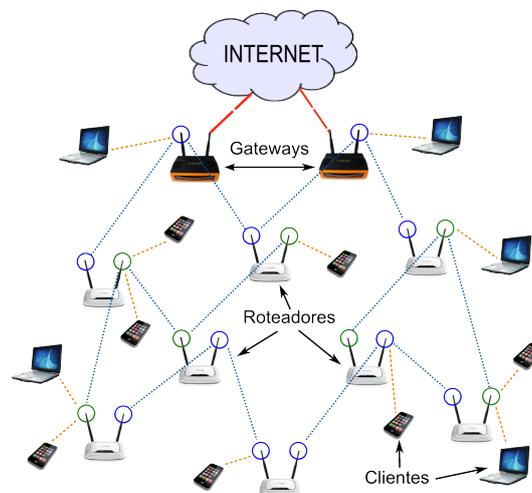


Figura 2.1 - Exemplo de uma rede sem fio em malha

Segundo Lee et al. (2006), as WMNs apresentam como vantagens, em relação às redes sem fio tradicionais, a facilidade de estender a área de cobertura da rede, a capacidade de se autoconfigurar, a facilidade de manutenção e o baixo custo, tendo em vista que, em geral, o número de *gateways* é pequeno em relação ao total de APs, o que diminui a necessidade de cabeamento. Akyildiz et al. (2005) apresentam as principais características de uma WMN:

- O uso da tecnologia multissalto, que a permite a comunicação entre APs;
- A capacidade de auto-organização, pois suas rotas de comunicação podem ser estabelecidas dinamicamente, tendo em vista a comunicação entre APs;

As WMNs, portanto, uma vez que dependem pouco de cabeamentos externos, são fáceis de serem instaladas e ampliadas. No entanto, para manter a qualidade do sinal utilizado pelos clientes, esse tipo de rede sem fio exige um trabalho mais difícil de planejamento, porque não se sabe, *a priori*, quais APs estarão envolvidos na entrega de pacotes de dados desde sua origem até seu cliente de destino. Este planejamento requer analisar os recursos disponíveis para a transmissão na rede a partir de sua arquitetura interna.

2.1 Arquitetura em camadas

A comunicação em uma rede, desde o recebimento do sinal externo até a entrega no usuário final, requer uma série de complexas tarefas de comunicação. Cada uma destas tarefas adota um protocolo específico para atender aos requisitos necessários para que aquela operação ocorra com sucesso. Para facilitar o tratamento destes protocolos, a arquitetura de uma rede é representada de forma abstrata como um conjunto de camadas. As camadas podem ser imaginadas independentes uma das outras, mas, para o funcionamento real da rede, as camadas precisam cooperar entre si e, portanto, são interdependentes (BLANK, 2004). Um dos principais modelos de arquitetura de redes é o OSI (*Open Systems Interconnection*) (SHAKKOTTAI et al., 2003; FU; SCHAAR, 2008). O modelo OSI é organizado em sete camadas (RAISINGHANI; IYER, 2004; BLANK, 2004):

- a) *Física*: responsável pelo controle dos canais de transmissão pelo meio externo, ou seja, por onde trafegam os dados pela rede;

- b) *Enlace*: responsável por encapsular os pacotes em informações binárias, auxiliando no endereçamento e na detecção de erros. Divide-se em duas subcamadas: MAC (*Media Access Control*), que estabelece a conexão com a camada física, e LLC (*Logical Link Control*), que implementa a interface com a camada de rede;
- c) *Rede*: responsável por rotear e endereçar os dados trafegados, por meio de um endereçamento lógico definido por um protocolo específico, por exemplo, o protocolo IP (*Internet Protocol*);
- d) *Transporte*: responsável por garantir o recebimento dos pacotes de dados por parte de seus destinatários. Os principais protocolos de comunicação da camada de transporte são o TCP (*Transmission Control Protocol*), utilizado para o tráfego de dados comuns, e o UDP (*User Datagram Protocol*), específico para o tráfego de dados multimídia (áudio e vídeo);
- e) *Sessão*: responsável por controlar as sessões de comunicação existentes na rede;
- f) *Apresentação*: responsável por codificar a informação de modo que seja reconhecida pela aplicação que irá utilizá-la;
- g) *Aplicação*: responsável por gerenciar os aplicativos do cliente que utilizarão os dados recebidos ou enviados.

Existem outros modelos de arquitetura em camadas, que são empregadas de acordo com a necessidade exigida pelas aplicações dos clientes. Um dos modelos existentes mais utilizados é o TCP/IP, adotado para aplicações na Internet. O modelo TCP/IP é organizado em quatro camadas:

- a) *Rádio-enlace*: reúne as funcionalidades das camadas física e de enlace do modelo OSI;
- b) *Internet*: semelhante à camada de rede do modelo OSI;
- c) *Transporte*: semelhante à camada de transporte do modelo OSI;
- d) *Aplicação*: reúne as tarefas atribuídas às camadas de sessão, apresentação e aplicação do modelo OSI.

A Figura 2.2 compara as arquiteturas OSI e TCP/IP, de acordo com a ordem e a aplicabilidade de cada uma das camadas.

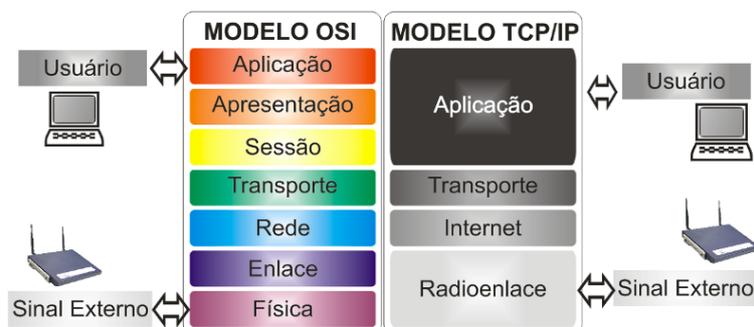


Figura 2.2 - Esquematização das camadas de rede nos modelos OSI e TCP/IP

Algumas medidas de desempenho de uma rede podem ser obtidas examinando-se as tarefas de comunicação que ocorrem entre as camadas. Estas medidas de desempenho permitem avaliar quantitativamente o serviço oferecido pela rede, indicando se o funcionamento da rede é satisfatório ou não. Algumas dessas medidas são, por exemplo, a quantidade de dados processados em um determinado intervalo de tempo (*throughput*) e o atraso médio no fluxo de dados de um enlace. Assim, o funcionamento de uma rede pode ser aprimorado utilizando-se modelos de otimização para obter configurações apropriadas para a melhoria da qualidade de serviço da rede, por exemplo, uma configuração que obtenha a máxima vazão de dados ou uma configuração que resulte no menor atraso médio possível.

Os modelos de otimização que tratam com medidas de desempenho extraídas diretamente das camadas de rede são conhecidos como modelos *cross-layer* (VERIKOUKIS et al., 2005; LIN et al., 2006). Em geral, estes modelos têm como função-objetivo a maximização ou minimização de uma determinada medida de desempenho e suas restrições referem-se a problemas relativos a diferentes camadas da rede.

Um exemplo de modelo *cross-layer* ocorre no trabalho de Fu e Schaar (2008). Neste trabalho, o problema de maximização de vazão (também conhecido, segundo o autor, como função de utilização do usuário) é modelado como um Processo Markoviano de Decisão, em que o comportamento de cada camada é alterado em função do comportamento das camadas vizinhas. Este modelo con-

sidera um sistema de equações lineares que reproduzem o funcionamento da troca de informações entre as camadas. Com isto, espera-se reproduzir o comportamento da rede em tempo real e obter as medidas de desempenho relativas a cada camada. O trabalho, no entanto, não explicita quais são as medidas que são fornecidas pelas camadas, além de apresentar apenas uma abordagem teórica e aplicável somente para redes sem fio simples, como a Wi-Fi, ou seja, não são conectadas em malha.

Em [Johansson e Xiao \(2006\)](#), um modelo *cross-layer* é proposto com o objetivo de maximizar a vazão e as taxas de transmissão de dados para redes sem fio *ad hoc*, que são redes nas quais os dispositivos clientes também compõem a malha da rede. A solução deste modelo requer a obtenção das taxas de dados fim a fim de cada sessão, além da alocação de potências, fluxo de dados e taxas de transmissão de cada enlace. O modelo inclui restrições não-lineares, o que aumenta a complexidade de resolvê-lo de forma exata. Para encontrar uma solução, os autores propõem um método de geração de colunas. Este modelo, no entanto, diferentemente do modelo proposto nesta tese, não busca otimizar a capacidade de transmissão dos enlaces em função dos seus níveis de potência.

Alguns trabalhos da literatura propõem modelos *cross-layer* especificamente para WMNs. A Seção 2.2 apresenta uma revisão destes trabalhos, apontando os avanços obtidos, os métodos propostos para resolver os modelos e como estes modelos se relacionam com a proposta desta tese.

2.2 Modelos *cross-layer* para redes sem fio em malha

Os modelos *cross-layer* para WMNs visam obter otimizar uma determinada configuração da rede, considerando restrições diretamente relacionadas às camadas da rede. Para isto, estes modelos procuram encontrar valores de variáveis associadas a diversas tarefas da rede como, por exemplo, os níveis de potência de cada AP, o fluxo de dados em cada enlace, a taxa de transmissão de dados da rede, de modo a maximizar ou minimizar uma determinada métrica de desempenho.

Todos os modelos de otimização aplicados a WMNs devem levar em conta a conectividade entre os APs. A conectividade dos APs é importante para garantir o roteamento de dados em toda a rede e trata-se de um problema de fluxo em grafo ([YUAN et al., 2006](#); [YAZDANPANAHA et al., 2011](#); [SHABDANOV et al., 2012](#); [TANG et al., 2009](#)). Em termos da tecnologia de redes, a conectividade entre APs é uma

tarefa atribuída à camada de rede (no modelo OSI) ou à camada de Internet (no modelo TCP/IP).

Em geral, os modelos de otimização *cross-layer* aplicados a WMNs propostos na literatura são difíceis de serem resolvidos de forma exata. A dificuldade de resolução exata cresce rapidamente com o aumento da quantidade de elementos de rede (como APs, canais, enlaces e sessões). Para contornar essas dificuldades, são propostas heurísticas para encontrar soluções aproximadas para estes modelos.

Em [Tang et al. \(2009\)](#), a modelagem *cross-layer* aplicada para WMNs baseia-se em problemas das camadas física, de enlace, de rede e de transporte. Nesta modelagem, três problemas são explorados: a maximização da vazão da rede, a maximização das taxas de transmissão fim a fim proporcionais e a maximização das taxas de transmissão fim a fim máximas e mínimas. Estes problemas compartilham algumas restrições, que são divididas em quatro subproblemas, resolvidos separadamente: a atribuição de canais, o controle de potência com os modos de transmissão e a maximização das taxas de transmissão. O subproblema de alocação de canais é resolvido, por uma heurística, em primeiro lugar, uma vez que os demais subproblemas dependem diretamente deste subproblema.

No modelo proposto nesta tese, diferentemente do trabalho de [Tang et al. \(2009\)](#), todas as restrições referentes aos problemas abordados estão incluídas em um único modelo de otimização, sobretudo a atribuição de canais, que é resolvida conjuntamente ao restante do modelo. Para a solução do modelo proposto nesta tese, o problema modelado também é dividido em subproblemas. Mas, diferentemente de [Tang et al. \(2009\)](#), consideram-se apenas dois subproblemas: (a) controle de potência e capacidade dos enlaces; e (b) atribuição de canais, controle de fluxo e extração dos ETTs.

Outro modelo *cross-layer* para WMNs é proposto por [Yuan et al. \(2006\)](#). Para este modelo, a rede é tratada como um grafo, cujas arestas contêm valores relativos à potência e ao fluxo de dados por enlace (respectivamente, associados às camadas física e de rede). Como as restrições de capacidade dos enlaces são equações não-lineares, os autores propõem a decomposição do modelo em dois subproblemas: a capacidade de transmissão (referente à camada física) e roteamento (referente à camada de rede). A decomposição é realizada para que seja aplicado o método primal-dual. O subproblema da camada física é resolvido

por um algoritmo baseado na Teoria de Jogos, que procura encontrar os valores das potências de cada enlace, de modo a maximizar o somatório das capacidades de transmissão de todos os enlaces. Já o subproblema de roteamento é resolvido via método de implementação distribuída, que consiste em três fases: (i) separação de sessões, (ii) computação de fluxo distribuído de mínimo custo e (iii) maximização da função-objetivo do subproblema de maximização da vazão.

No modelo proposto por [Yuan et al. \(2006\)](#), a capacidade de transmissão de dados é estimada em função do sinal recebido pelo AP de destino do enlace. O valor deste sinal é estimado a partir de um modelo físico de degradação.

Na literatura, são utilizados três modelos de degradação distintos:

- a SNR (*Signal-to-Noise Ratio*): é a razão entre o sinal recebido e o ruído presente no ambiente. O SNR é utilizado em [Laneman et al. \(2004\)](#) em um modelo para estimar a degradação do sinal recebido por um dispositivo sem fio;
- b SIR (*Signal-to-Interference Ratio*): é a razão entre o sinal recebido e o somatório de outros sinais que provocam interferência no sinal recebido. O SIR é utilizado em [Haidar et al. \(2008\)](#) para a atribuição de canais de uma rede sem fio;
- c SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*): é a razão entre o sinal recebido e a soma do ruído e da interferência de outros sinais. Como em ambientes realísticos tanto o ruído quanto a interferência, em geral, estão presentes, vários trabalhos utilizam o modelo SINR (por exemplo, [Chafekar et al. \(2007\)](#)). Em [Zhang et al. \(2010\)](#) este modelo é utilizado para avaliar os efeitos de degradação na qualidade de uma transmissão em vídeo. No trabalho de [Yuan et al. \(2006\)](#), o SINR é o modelo físico de degradação adotado.

A Figura 2.3 ilustra a possível aplicação de cada um destes modelos físicos de degradação de sinal, em função do ambiente e dos elementos existentes em uma transmissão sem fio.

Nesta figura (2.3), o item (a) mostra os elementos que provocam o ruído sobre o sinal emitido (raios amarelos), como árvores, edifícios e fenômenos da natureza. Já o item (b) ilustra um caso em que o sinal (raios amarelos) sofrem degradação

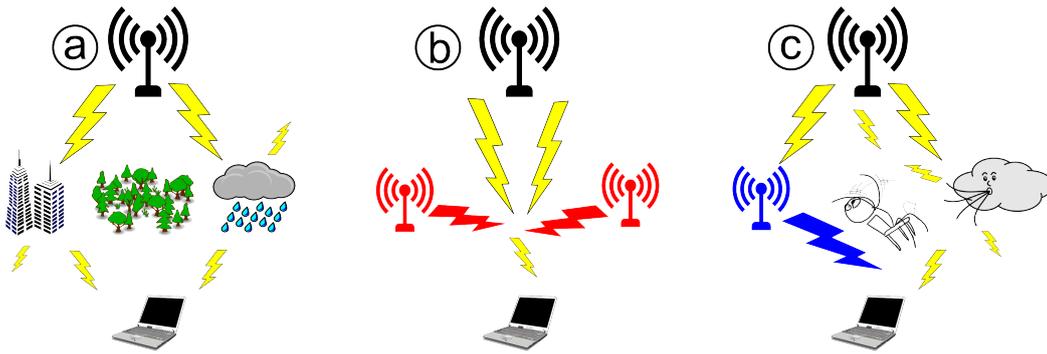


Figura 2.3 - Exemplos de ambientes onde se medem o (a) SNR, o (b) SIR e o (c) SINR.

de sinais vindos de outros dispositivos (raios vermelhos), representando um ambiente em que se aplica o SIR. O item (c) representa um ambiente em que se aplica o SINR, com sinais de interferência (raio azul) e de ruído (elementos da natureza).

O modelo físico de degradação mais adequado e, conseqüentemente, mais utilizado é o SINR. Este modelo permite estimar os valores dos sinais em todos os enlaces da rede em função dos níveis de potência emitidos pelos enlaces. O modelo SINR permite também obter a capacidade de transmissão de um enlace, como em [Khreishah et al. \(2009\)](#). Em [Kesselheim \(2011\)](#), o modelo SINR é utilizado para estimar tanto os níveis de potência quanto a capacidade de transmissão dos enlaces.

Alguns trabalhos são mais específicos em relação à tecnologia adotada na WMN. Em [Yazdanpanah et al. \(2011\)](#), o modelo *cross-layer* considera que as antenas dos APs possuem um direcionamento controlado, ou seja, o sinal não é omnidirecional como nos APs de uma rede sem fio convencional. Para encontrar a vazão máxima, o modelo possui quatro grupos de restrições: radiotransmissão, interferência, conservação de fluxo e largura de banda. Trata-se de um modelo de Programação Linear Inteira Mista, pois não considera a capacidade de transmissão dos enlaces em função dos níveis de potência. O trabalho propõe um método de geração de colunas para resolver o modelo.

[Shabdanov et al. \(2012\)](#) tratam de um modelo *cross-layer* utilizando um modelo de degradação de sinal que considera tanto a interferência de outros sinais quanto o ruído. Este modelo é utilizado para verificar o impacto da degradação do sinal sobre a vazão. O modelo é resolvido por um método de Geração de Colunas e a solução encontrada estabelece os níveis mínimo e máximo necessários

para a vazão da rede, juntamente com os níveis de potência e de fluxo de dados. No entanto, este modelo considera que todos os APs possuem o mesmo nível de potência. Além disso, não considera a capacidade de transmissão de dados de um enlace, levando em conta um modelo de degradação de sinal, como foi feito em [Yuan et al. \(2006\)](#), por exemplo.

Estratégias de otimização similares são encontradas em [Bansal e Trivedi \(2014\)](#), para uma rede que possui múltiplas entradas e múltiplas saídas simultâneas, usando a tecnologia MIMO (*Multiple-In-Multiple-Out*). Os modelos *cross-layer* propostos envolvem a taxa de alocação de dados fim a fim, o controle de fluxo de dados e o roteamento. Os objetivos de cada modelo são, respectivamente: maximizar a vazão, a taxa de alocação distribuída proporcional e a taxa de alocação máxima e mínima. Os autores propõem a utilização de uma heurística gulosa para encontrar uma solução satisfatória para cada modelo, que é validada por um algoritmo de simulação. No entanto, o trabalho se aplica para uma rede WiMAX (IEEE 802.16). O modelo proposto nesta tese aplica-se a redes sem fio em malha, considerando dispositivos Wi-Fi (IEEE 802.11), que são os mais utilizados como APs em redes sem fio.

O modelo *cross-layer* proposto por [Liao e Elhakeem \(2012\)](#) aplica-se para uma WMN com roteamento baseado na tecnologia TDD-CDMA (*Time-Division Duplex Code-Division Multiple Access*), utilizada para a telefonia móvel. Este modelo considera, conjuntamente, o controle de fluxo para o roteamento (camada de rede), o atraso médio (camada de enlace) e o SINR (camada física). O modelo trata três problemas distintos, cujo objetivo de cada um é maximizar a vazão, maximizar a taxa de sucesso nas entregas dos pacotes (SPR – *Successful Packet Rate*) e minimizar o atraso médio, cada qual com um grupo específico de restrições pertinentes ao respectivo objetivo. A Figura 2.4 mostra o relacionamento das camadas e métricas envolvidas com o modelo de otimização proposto.

O trabalho de [Liao e Elhakeem \(2012\)](#), embora considere o modelo de degradação SINR, não trata a questão da capacidade de transmissão em função do SINR, quesito importante para estimar medidas de roteamento em WMNs. O modelo proposto nesta tese também trata da minimização do atraso mas, diferentemente do trabalho de [Liao e Elhakeem \(2012\)](#), utiliza métricas de tempo específicas para WMNs.

Os modelos *cross-layer* propostos nos trabalhos citados acima são, em geral, difíceis de serem resolvidos para casos realísticos, uma vez que o esforço de

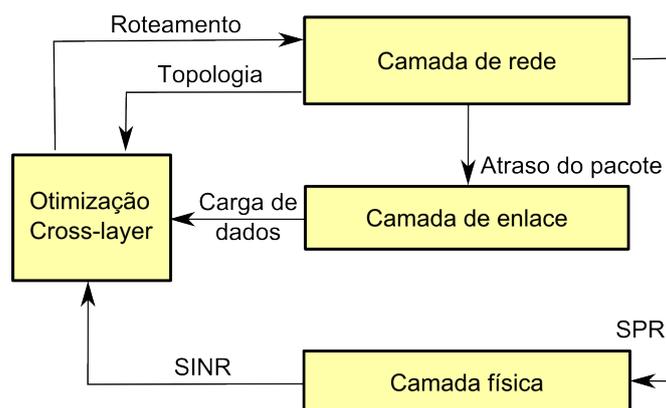


Figura 2.4 - Diagrama do modelo utilizado por Liao e Elhakeem (2012)

solução aumenta muito com o aumento do número de enlaces e do número de sessões na rede. O problema de atribuição de canais em WMNs, considerado isoladamente, é um problema do tipo NP-difícil (ver Raniwala et al. (2004)). Além disso, os modelos que estimam a capacidade de transmissão dos enlaces em função do modelo de degradação de sinal SINR, incluem restrições não-lineares. No modelo proposto nesta tese todas estas dificuldades estão presentes.

2.3 Métricas específicas para redes sem fio em malha

Como visto na seção anterior, em geral, os modelos *cross-layer* utilizam métricas específicas das camadas da rede, visando otimizar algum objetivo. No entanto, em nenhum dos modelos apresentados anteriormente, faz-se uso de métricas específicas para WMNs.

As métricas específicas para WMN precisam levar em conta o roteamento dos pacotes, pois, devido à capacidade de autoconfiguração da WMN, pode ocorrer alterações na rota previamente determinada para um pacote devido a problemas de congestionamento. A obtenção de métricas de roteamento depende do protocolo adotado pela camada de rede ou Internet. Basicamente, existem três tipos de protocolos de roteamento:

- *protocolos pró-ativos*: são protocolos em que o caminho que o pacote deve trafegar já está pré-determinado. Este protocolo implica em pacotes maiores, pois toda a informação sobre a rota está incluída no pacote. Um dos protocolos pró-ativos mais utilizados em WMNs é o OLSR (*Optimized Link State Routing*) (CLAUSEN et al., 2003). Diversos trabalhos aplicados a WMN apontam para o uso desta tecnologia (PINHEIRO et al.,

2012; ESPOSITO et al., 2008);

- *protocolos reativos*: são protocolos que trabalham sob demanda, em que uma rota é construída especificamente para o pacote a ser transmitido. Para isto, são enviados pequenos pacotes que contêm mensagens de reconhecimento (*acknowledgments*). Um dos protocolos reativos mais utilizados em redes sem fio em malha é o AODV (*Ad hoc On-demand Distance Vector*) (LEE; GERLA, 2000);
- *protocolos híbridos*: são protocolos que reúnem as características de ambos os protocolos pró-ativos e reativos. Funcionam de acordo com as necessidades para garantir o tráfego na rede. Um dos protocolos híbridos utilizados em WMN é o MR-LQSR (*Multi-Radio Link-Quality Source Routing*) (DRAVES et al., 2004).

Os protocolos OLSR e AODV permitem a extração de métricas de roteamento específicas para WMNs. Uma destas métricas é o ETX (*Expected Transmission Count*) (LAVÉN; HJÄRTQUIST, 2009), que representa o número esperado de vezes que um único AP é usado para enviar um pacote para um dispositivo de destino. Considerando-se q_s , a taxa de perda de pacotes no envio e q_r , a taxa de perda de pacotes no recebimento, o ETX pode ser calculado por:

$$ETX = \frac{1}{(1 - q_s)(1 - q_r)} \quad (2.1)$$

Outra métrica própria para WMNs é o ETT (*Expected Transmission Time*) (DRAVES et al., 2004; GENETZAKIS; SIRIS, 2008). O ETT representa o tempo esperado na transmissão de um pacote por meio de um único enlace (BORGES et al., 2010). Considerando-se o tamanho do pacote, representado por λ , e a capacidade de transmissão do enlace, representada por κ , o ETT pode ser calculado por:

$$ETT = ETX \times \frac{\lambda}{\kappa} \quad (2.2)$$

A Equação (2.2) permite calcular o tempo de transmissão em função da capacidade de transmissão do enlace (largura de banda do enlace) e do tamanho do pacote. O tamanho do pacote é um valor fixo e o valor da capacidade de transmissão do enlace pode ser obtido por modelos matemáticos. No entanto, o ETT é uma métrica de tempo que considera os enlaces de modo individual. Para avaliar

todos os trajetos dos pacotes na rede, é necessário considerar o ETT para todos os enlaces dos trajetos.

Assim, a métrica de tempo mais adequada para uma avaliação de todo o trajeto percorrido pelos pacotes é o WCETT (*Weighted Cumulative Expected Transmission Time*) (DRAVES et al., 2004). O WCETT permite estimar o tempo total que um pacote leva desde sua origem até o seu destino final. Deve-se lembrar que em uma WMN, o roteamento pode se dar tanto por rotas pré-definidas, como por rotas definidas dinamicamente, para escapar de situações de congestionamento. Assim, o WCETT considera tanto o tempo de transmissão esperado de um pacote para uma rota pré-definida, quanto o tempo esperado para possíveis mudanças na rota.

Sejam M o conjunto de enlaces que compõem um caminho pré-estabelecido para os pacotes de uma dada sessão k , ETT_j , o ETT calculado no enlace $j \in M$ e X_i definido por:

$$X_i = \sum_{j \in M \text{ no canal } i} ETT_j \quad (2.3)$$

ou seja, X_i é a soma dos ETTs para transmissões que utilizam o canal i de todos os enlaces de uma rota pré-estabelecida. Então o WCETT de uma sessão k pode ser calculado por:

$$WCETT_k = (1 - \beta) \sum_{j \in M} ETT_j + \beta \max_{1 \leq i \leq C} X_i \quad (2.4)$$

em que C é a quantidade máxima de canais disponíveis e β ($0 \leq \beta \leq 1$) é o coeficiente de reatividade da rede, ou seja, o percentual de uma rota que será construída dinamicamente para o pacote a ser transmitido. Note que, se $\beta = 0$, então a rota de um pacote é completamente pré-estabelecida e, se $\beta = 1$, toda a rota de um pacote será determinada dinamicamente. No caso de β ter um valor intermediário, por exemplo, $\beta = 0,3$, admite-se que 70% da rota de um pacote está pré-estabelecida e 30% desta rota será determinada dinamicamente.

Considerando que a rede possui um coeficiente de reatividade, o WCETT deve ser obtido por meio do protocolo MR-LQSR, que leva em conta o caminho percorrido pelos pacotes e possíveis alterações na rota. Tais alterações podem ocorrer

devido às condições de congestionamento nos canais que transmitem os dados (TANG et al., 2009; CAMPISTA et al., 2008). Este protocolo possui quatro componentes, que o caracterizam como um protocolo híbrido (DRAVES et al., 2004) e que o torna adequado para a obtenção do WCETT:

- a) Um componente que identifica quais são os APs vizinhos de um AP;
- b) Um componente que atribui pesos para os enlaces vizinhos de um AP;
- c) Um componente que propaga esta informação para outros APs da rede;
- d) Um componente que utiliza estes pesos para encontrar um bom caminho até o destino.

Draves et al. (2004) adapta o algoritmo de Dijkstra com o objetivo de encontrar uma rota que tenha o menor WCETT, considerando os ETTs como os pesos atribuídos aos enlaces. Korkmaz e Zhou (2006) consideram um algoritmo de busca iterativa para encontrar bons caminhos (possivelmente ótimos) e propõem também uma heurística de busca não-linear guiada linearmente (LGNS – *Linearly-Guided Nonlinear Search*) para descobrir caminhos melhores do que os encontrados pela busca iterativa. Ambos os trabalhos tratam de encontrar rotas com o WCETT mínimo, mas não consideram outros fatores que podem influenciar na transmissão em uma WMN como, por exemplo, a existência de interferência nos enlaces e sua consequência sobre os ETTs.

Como visto na Equação (2.4), o WCETT depende da capacidade de transmissão dos enlaces. A utilização do modelo físico de degradação de sinal SINR para estimar a capacidade de transmissão dos enlaces, leva a equações não-lineares (YUAN et al., 2006), a serem vistas na seção a seguir.

2.4 Capacidade de transmissão em redes sem fio

Para estimar, de forma realística, a capacidade de transmissão de dados de um enlace de uma rede sem fio é necessário admitir a existência de ruídos causados por elementos externos presentes no ambiente (chuva, vento, árvores, edifícios, dentre outros) e de interferências provocadas por conflitos causados por outros sinais presentes na mesma faixa da largura de banda. A existência destes fatores pode reduzir significativamente os níveis de qualidade do sinal, podendo até comprometer a transmissão. Por esta razão, os estudos sobre a estimativa da

capacidade de transmissão dos enlaces de uma rede sem fio têm recebido uma atenção especial (GUPTA; KUMAR, 2000).

Weber e Andrews (2012) afirmam que a capacidade de transmissão dos enlaces é uma métrica de desempenho que mede a intensidade espacial de transmissões sucessivas, sujeito a restrições oriundas das características da rede, como a quantidade de antenas em um AP, a tecnologia empregada nos APs e a degradação do sinal em função da interferência entre canais ou em função da distância entre os APs.

Johansson e Xiao (2006) apontam para a importância de utilizar modelos físicos para estimar a degradação do sinal em uma rede sem fio e mostra que a capacidade de transmissão de um enlace pode ser estimada por uma equação logarítmica, denominada equação de Shannon, dada por:

$$\kappa = W \log_2(1 + RS) \quad (2.5)$$

onde κ é a capacidade de transmissão do enlace, W é o tamanho da faixa de frequência da largura de banda e RS representa uma razão do nível do sinal, dada por:

$$RS = \frac{P_s}{P_r + P_i} \quad (2.6)$$

em que P_s é o nível de sinal do enlace, P_r é o ruído existente no ambiente e P_i é a interferência provocada por outros dispositivos que podem estar em um mesmo nível de frequência do sinal emitido para o enlace.

A equação (2.5) calcula a capacidade de transmissão do enlace em função do modelo físico de degradação SINR, que leva em conta tanto o ruído existente, quanto a interferência de outros sinais. A equação de Shannon é não-linear (WU; KUNG, 2006; WU et al., 2006) e sua presença em um modelo de otimização dificulta a utilização de métodos exatos de solução.

No modelo proposto por Yuan et al. (2006), uma abordagem baseada na Teoria dos Jogos foi utilizada para resolver de forma aproximada o problema não-convexo da capacidade de transmissão dos enlaces. Esta abordagem leva em conta o modelo SINR para encontrar uma solução para o problema de controle

de potência. A ideia dos autores foi maximizar a capacidade de transmissão dos enlaces com o objetivo de maximizar a vazão. Os autores argumentam que, devido à interferência, o problema de controle de potência é um problema de otimização não-convexa, inerentemente difícil de resolver. Os autores então discutem que sob certas condições ($RS \gg 1$) o problema de controle de potência pode ser resolvido de forma eficiente por técnicas de programação geométrica e, por meio de uma transformação logarítmica do vetor de potências, o problema torna-se um problema de otimização convexa.

Modelos de otimização não-convexa também ocorrem em outras aplicações de tecnologia de redes. Em Lee et al. (2005), por exemplo, um modelo não-convexo é descrito para distribuir taxas de alocação de dados para usuários de Internet. Os autores ressaltam que modelos baseados em funções côncavas, quando aplicados em situações realísticas, podem levar a instabilidades e alto congestionamento da rede. Os autores apontam que, neste caso, um modelo não-convexo é mais adequado, embora difícil de ser resolvido.

O modelo de otimização proposto nesta tese inclui restrições não-lineares por utilizar a equação (2.5) para calcular a capacidade de transmissão dos enlaces em função do modelo físico de degradação SINR, que leva em conta tanto o ruído existente, quanto a interferência provocada por outros sinais. Assim, pretende-se utilizar as meta-heurísticas SA (*Simulated Annealing*) e VNS (*Variable Neighborhood Search*), discutidas nas seções a seguir, como método de solução.

2.5 Heurísticas para a maximização da capacidade de transmissão dos enlaces

2.5.1 O algoritmo *Simulated Annealing*

A meta-heurística *Simulated Annealing* (SA) é uma técnica de busca local probabilística, proposta originalmente por Kirkpatrick et al. (1983), que se fundamenta em uma analogia com a termodinâmica, ao simular o resfriamento de um material aquecido, operação conhecida como recozimento. A técnica SA pode ser aplicada para problemas de otimização não-linear, como em Corana et al. (1987), ou de otimização não-convexa, como em Styblinski e Tang (1990). A Tabela 2.1 apresenta os principais elementos utilizados nesta meta-heurística.

Os passos básicos do procedimento SA para encontrar uma solução para um problema de maximização são apresentados no Algoritmo 1.

Tabela 2.1 - Elementos utilizados no SA

| Elemento | Descrição |
|------------|--|
| s_0 | Solução inicial |
| T_0 | Temperatura inicial |
| R | Máximo de iterações do SA |
| α | Taxa de resfriamento |
| ϵ | Temperatura mínima tolerável |
| $N(\cdot)$ | Conjunto de soluções vizinhas à solução corrente |
| $f(\cdot)$ | Função objetivo |

O procedimento SA (LUKE, 2013) começa com uma solução qualquer s_0 e, a cada iteração, gera uma nova solução s' vizinha da solução corrente. A nova solução s' é aceita como a próxima solução corrente se s' for melhor que s_0 . Caso a solução s' seja pior do que s_0 , ainda é possível que s' substitua s_0 como solução corrente, mas isto depende de uma probabilidade que é grande no começo do procedimento e vai diminuindo gradativamente à medida que o procedimento avança. Com esse procedimento, existe inicialmente uma probabilidade maior de escapar de mínimos locais e, à medida que as iterações avançam, o algoritmo comporta-se como um método de descida, pois diminui a probabilidade de se aceitar movimentos de piora.

2.5.2 O algoritmo *Variable Neighborhood Search*

A meta-heurística VNS (*Variable Neighbourhood Search*), proposta por [Mladenovic e Hansen \(1997\)](#), tem sido muito utilizada para resolver diferentes classes de problemas de Otimização Combinatória ([HANSEN et al., 2010b](#)), assim como para resolver problemas de otimização contínua ([MLADENOVIC et al., 2008](#); [HANSEN et al., 2010a](#)), problemas de Programação Não-linear ([LIBERTI; DRAZIC, 2005](#)) e problemas de otimização não-convexa ([KOVACEVIC et al., 2014](#)). O procedimento VNS é um método de busca local que explora o espaço de soluções por meio de trocas sistemáticas de estruturas de vizinhança. O método VNS explora diversas estruturas de vizinhança para obter soluções vizinhas s' da solução corrente s . A nova solução s' é aceita como a próxima solução corrente somente se s' for melhor que s . O método inclui, também, um procedimento de busca local a ser aplicado sobre a solução corrente. A Tabela 2.2 apresenta os principais elementos utilizados nesta meta-heurística.

Os passos básicos do procedimento VNS para encontrar uma solução para um problema de maximização são apresentados no Algoritmo 2 ([SOUZA, 2008](#)).

Algoritmo 1: Pseudocódigo do Simulated Annealing

Entrada: $(f(\cdot), N(\cdot), \alpha, R, T_0, s)$ $s_{opt} \leftarrow s;$ $iT \leftarrow 0;$ $T \leftarrow T_0;$ **enquanto** $T > 0$ **faça****enquanto** $iT < R$ **faça** $iT \leftarrow iT + 1;$ Gere um vizinho qualquer $s' \in N(s);$ $\Delta f \leftarrow f(s') - f(s);$ **se** $\Delta f < 0$ **então** $s \leftarrow s';$ **se** $f(s') > f(s_{opt})$ **então** $s_{opt} \leftarrow s';$ **fim****fim****senão**Tome $x \in [0, 1];$ **se** $x < e^{-\frac{\Delta f}{T}}$ **então** $s \leftarrow s';$ **fim****fim** $T \leftarrow \alpha \times T;$ $iT \leftarrow 0;$ **fim** $s \leftarrow s_{opt}$ **Saída:** s

O algoritmo VNS parte de uma solução qualquer s_0 e, a cada iteração, seleciona-se aleatoriamente um vizinho s' da solução corrente s a partir de uma estrutura de vizinhança. Esta solução vizinha s' é então submetida a um procedimento de busca local, resultando em uma nova solução s'' . Se a solução s'' for melhor que a solução corrente s , s'' passa a ser a nova solução corrente e a busca recomeça a partir da primeira estrutura de vizinhança. Caso contrário, continua-se a busca a partir da próxima estrutura de vizinhança. Este procedimento se repete até que uma condição de parada for atingida, por exemplo, o número máximo de iterações.

Para o modelo proposto nesta tese, as meta-heurísticas SA e VNS serão empregadas para obter uma solução satisfatória para o problema de maximização da

Tabela 2.2 - Elementos utilizados no VNS

| Elemento | Descrição |
|--------------|------------------------------------|
| s_0 | Solução inicial |
| R | Número de estruturas de vizinhança |
| $N_k(\cdot)$ | k -ésima estrutura de vizinhança |
| $f(\cdot)$ | Função objetivo |

Algoritmo 2: Pseudocódigo do VNS

Entrada: $(s_0, R, f(\cdot))$

$s \leftarrow s_0;$

enquanto *Critério de parada não for atendido* **faça**

$cont \leftarrow 1;$

enquanto $(cont < R)$ **faça**

 Gere um vizinho $s' \in N_k(s);$

$s'' \leftarrow Busca_{Local}(s');$

se $(f(s'') > f(s))$ **então**

$s \leftarrow s'';$

$cont \leftarrow 1;$

fim

senão

$cont \leftarrow cont + 1;$

fim

fim

fim

Saída: s

capacidade de transmissão dos enlaces. Trata-se de um problema de otimização não-linear com variáveis de decisão contínuas, inerentemente difícil de ser resolvido por métodos exatos.

3 MODELO DE OTIMIZAÇÃO *CROSS-LAYER* APLICADO A REDES SEM FIO EM MALHA

Neste capítulo descreve-se o modelo de otimização *cross-layer* proposto nesta tese. O objetivo é encontrar uma configuração da rede que minimize o WCETT total de uma WMN. O modelo possui restrições organizadas em subproblemas, tais como o controle de fluxo, o controle de potência, a atribuição de canais e a capacidade da largura de banda (capacidade de transmissão dos enlaces). Estes subproblemas estão diretamente relacionados a tarefas exercidas pelas camadas mais baixas da arquitetura da rede: física, enlace, rede e transporte.

O modelo proposto nesta tese se difere dos outros modelos *cross-layer* já propostos na literatura em relação ao objetivo de minimizar o WCETT, uma métrica de roteamento obtida a partir de elementos presentes nas camadas da rede. A utilização da métrica WCETT torna mais adequada a avaliação do desempenho de uma WMN, uma vez que considera o tempo de transmissão fim a fim para o tráfego de dados na rede. Isto é mais adequado porque considera duas características importantes das WMNs:

- O caminho total que um pacote deve percorrer, uma vez que um pacote pode percorrer mais de um salto até chegar ao cliente que o requisitou;
- As características pró-ativas e reativas do roteamento dos dados, importante mecanismo para oferecer caminhos alternativos para a entrega dos pacotes, caso haja algum congestionamento na rede.

A seguir são apresentados alguns estudos preliminares que foram desenvolvidos ao longo da preparação deste trabalho e que resultaram no modelo proposto neste capítulo.

3.1 Estudos preliminares

Algumas etapas foram necessárias para se chegar ao modelo proposto nesta tese. Primeiramente, tratou-se assegurar a conectividade entre os APs, a partir do controle de fluxo de dados. Como o fluxo de dados é um requisito fundamental para modelos aplicados a WMNs, a outra preocupação foi como calcular o WCETT a partir do fluxo de dados. Para isto, seria necessário estimar a capacidade de transmissão dos enlaces sem fio, o que implicaria em considerar que as capacidades sofrem degradação de sinal, levando a adotar um modelo físico

de degradação. Por fim, dada a importância de evitar conflitos causados por interferência entre enlaces que utilizam a mesma frequência de largura de banda, aplicou-se restrições de atribuição de canais sobre a WMN.

Os elementos necessários para o cálculo de métricas de roteamento, como ETX, ETT e WCETT, costumam estar presentes em modelos *cross-layer* propostos na literatura, por exemplo em Yuan et al. (2006), Tang et al. (2009), Yazdanpanah et al. (2011) e Shabdanov et al. (2012). No entanto, nestes modelos, o objetivo tem sido maximizar a vazão da rede. Assim, a primeira preocupação foi no sentido de inovar e utilizar essas métricas como objetivo principal ao medir o desempenho de uma WMN.

A vazão não é uma métrica adequada para a detecção de atrasos na rede. Neste trabalho procurou-se utilizar uma métrica que contemplasse a entrega eficiente de pacotes, o que é importante para aplicações multimídia. O WCETT é uma métrica que contempla esta necessidade, pois leva em conta a análise de todo o caminho que os dados percorrem até seus respectivos destinos.

A segunda preocupação foi em relação ao fluxo de dados. O fluxo de dados tem uma importância fundamental em uma WMN, pois é pelo fluxo de dados que se assegura a conectividade entre os APs. Assim, equações de balanceamento de fluxo, como proposto em Silva (2011), foram incorporadas ao modelo proposto.

Nas equações de controle de fluxo, toda informação que entra em um AP intermediário deve sair integralmente deste AP. Para um AP de origem dos dados (geralmente, um *gateway*) e para um AP de destino, deve-se considerar, respectivamente, a quantidade de dados que entrou na rede e a quantidade de dados que saiu da rede. Estas quantidades devem ser iguais, conforme mostra a Figura 3.1, que representa o fluxo de dados por λ . Um valor positivo indica que fluxo entra no AP (no caso do *gateway*, da fonte externa para o AP) e um sinal negativo indica que o fluxo sai do AP (no caso do AP de destino, sai do AP para o cliente final).

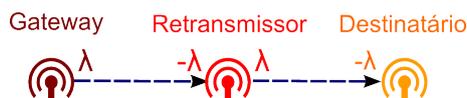


Figura 3.1 - Esquematisação de um fluxo de dados em uma WMN

A preocupação seguinte foi com o problema de atribuição de canais. A atribuição de canais tem também uma importância fundamental para o planejamento de uma WMN, pois as transmissões de dados na rede dependem desta atribuição. A atribuição de canais deve procurar garantir que transmissões paralelas não utilizem a mesma frequência para evitar que haja interferência no sinal. No entanto, a atribuição de canais numa WMN depende diretamente do problema de controle de fluxo, uma vez que para ser bem sucedida deve atender às seguintes condições (RANIWALA et al., 2004):

- O número de canais distintos a serem atribuídos é limitado pelo número de interfaces disponíveis em cada AP;
- Dois APs ligados por um enlace devem estar conectados por um mesmo canal;
- A soma do fluxo esperado de dados em enlaces que sofrem interferência em um mesmo canal não pode exceder a capacidade de enlace;
- O número total de interfaces em cada AP é fixo.

No entanto, nos trabalhos da literatura, estas condições não foram incluídas em um modelo de Programação Matemática. Para adequar os requisitos estabelecidos ao atribuir canais na rede, nesta tese, estas condições foram incorporadas diretamente como restrições do modelo *cross-layer* de otimização.

Em um ambiente de rede sem fio, em geral, existem elementos que podem degradar o sinal emitido pelos APs. Alguns elementos, como edifícios, construções, indivíduos ou fenômenos da natureza, podem causar bloqueio ou refração do sinal emitido. Normalmente, esta influência é representada como um ruído sobre o sinal recebido. Além disso, outros dispositivos que emitem sinais podem provocar interferências sobre o recebimento de sinal. Assim, a preocupação seguinte foi a de incorporar os efeitos de ruídos e interferências para que o modelo proposto seja o mais realístico possível.

Para o modelo proposto, a estimativa dos níveis de potência dos APs está relacionado com a estimativa da capacidade de enlaces, como tratado em Yuan et al. (2006). Como deseja-se minimizar os ETTs dos enlaces visando minimizar o WCETT total, considerando que a capacidade dos enlaces é inversamente proporcional ao ETT, conforme a Equação (2.2), procurou-se estabelecer os níveis

de potência dos APs de modo a maximizar a capacidade dos enlaces. A abordagem adotada para o modelo proposto neste trabalho é diferente da proposta por Yuan et al. (2006), que considerou maximizar as capacidades com o objetivo de aumentar a vazão. Outra novidade considerada no modelo proposto é a inclusão do tamanho da faixa de frequência da largura de banda sobre a capacidade de enlaces em um modelo de Programação Matemática – diferente do que foi proposto por Yuan et al. (2006), que não considerou a frequência.

A preocupação final foi reunir todos estes problemas em um único modelo matemático, levando-se em conta como incluir métricas de roteamento, como o ETT e o WCETT, sobre um modelo *cross-layer*. Estes problemas poderiam ser tratados individualmente. Mas, como o objetivo do modelo proposto é encontrar uma configuração da rede que minimize o WCETT total, estes problemas precisam ser tratados em conjunto para garantir que as restrições impostas pelas diferentes camadas da rede estejam todas satisfeitas, atrelando o cálculo das métricas de roteamento com parâmetros vindo das camadas da rede.

3.2 Componentes do modelo proposto

Apresentam-se a seguir os componentes do modelo de otimização proposto neste trabalho. A Tabela 3.1 descreve os conjuntos a serem utilizados no modelo.

Tabela 3.1 - Conjuntos do modelo proposto

| Conjunto | Descrição |
|----------|---|
| N | Conjunto de APs (roteadores e <i>gateways</i>) |
| L | Conjunto de enlaces que conectam os APs |
| S | Conjunto de sessões da rede |
| C | Conjunto de canais utilizados pelos enlaces |

Uma WMN pode ser representada por um grafo (N, L) , tal que N corresponde ao conjunto de vértices e $L \subset N \times N$ corresponde ao conjunto de arestas que conectam os APs. Uma sessão $k \in S$, é representada por uma tripla $(n_k^s, n_k^r, \lambda_k)$, onde n_k^s é o AP de origem (geralmente, um *gateway*), n_k^r é o AP de destino e λ_k é o tamanho do pacote da sessão k . A Figura 3.2 ilustra os principais elementos de uma WMN representada como um grafo.

A Tabela 3.2 mostra os subconjuntos do conjunto L a serem utilizados no modelo

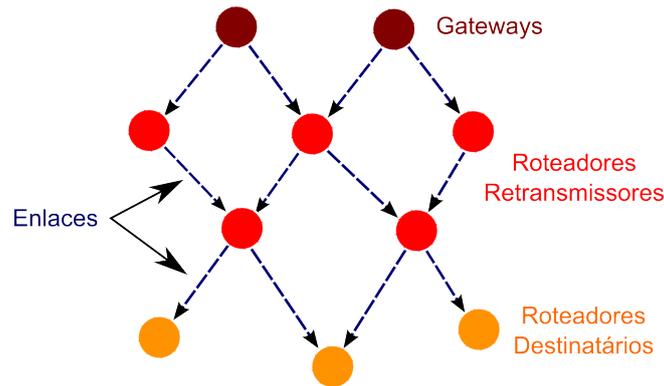


Figura 3.2 - Principais elementos de uma rede sem fio em malha no formato de grafo

proposto.

Tabela 3.2 - Subconjuntos de enlaces do modelo

| Subconjunto | Descrição |
|-------------|---|
| L^i | Conjunto de enlaces que utilizam o canal $i \in C$ |
| L_k | Conjunto de enlaces que pertencem a um caminho pré-definido para a sessão $k \in S$ |
| L_{kn}^s | Conjunto de enlaces em que $n \in N$ é o AP emissor da sessão $k \in S$ |
| L_{kn}^r | Conjunto de enlaces em que $n \in N$ é o AP receptor da sessão $k \in S$ |

A Tabela 3.3 mostra as variáveis utilizadas no modelo de otimização proposto. Para facilitar a compreensão do modelo, serão adotados como padrão os seguintes índices para as variáveis: $i \in C$ (índice de canal), $j \in L$ (índice de enlace), $k \in S$ (índice de sessão) e $n \in N$ (índice de AP).

Tabela 3.3 - Variáveis utilizadas no modelo

| Variável | Descrição | Unidade |
|---------------|---|---------|
| τ_{ij}^k | ETT do enlace j , que utiliza o canal i e a sessão k | ms |
| f_{ij}^k | Fluxo de dados no enlace j , que utiliza o canal i e a sessão k | Mb/s |
| p_j | Potência de enlace j | mW |
| κ_j | Capacidade de transmissão do enlace j | Mb/s |
| z_{ni} | Indica se o canal i será utilizado pelo AP n | binário |
| t | Valor máximo da soma de ETTs de um canal | ms |

As configurações fixas na WMN são representadas por parâmetros. A Tabela 3.4 mostra os parâmetros utilizados no modelo.

Tabela 3.4 - Parâmetros utilizados no modelo matemático

| Parâmetro | Descrição | Unidade |
|---------------|--|---------|
| χ_{ij}^k | ETX do enlace j , que utiliza o canal i e a sessão k | – |
| I | Quantidade máxima de interfaces de rede nos APs | – |
| β | Coefficiente de reatividade da rede | – |
| λ_k | Taxa de dados para a sessão k | b/s |
| P_n | Potência máxima do AP n | W |
| G_{mn} | Elemento da matriz de coeficientes de interferência entre os APs m e n | – |
| σ | Coefficiente de ruído | W |
| W | Frequência da largura de banda | Hz |

Cada ETX χ_{ij}^k será considerado como parâmetro, tendo em vista que o seu cálculo é probabilístico (DRAVES et al., 2004). O coeficiente de reatividade β será considerado como um parâmetro definido *a priori*. Assim, se $\beta < 0,5$, a rede priorizará as características pró-ativas de roteamento, enfatizando a determinação prévia de caminhos. Caso contrário, a rede priorizará as características reativas de roteamento, enfatizando a construção de caminhos de acordo com a demanda de tráfego na rede (DRAVES et al., 2004; CAMPISTA et al., 2008). O valor do elemento G_{mn} da matriz de coeficientes de interferência é calculado em função da distância entre os APs m e n (d_{mn}) e do expoente de degradação de sinal (η) (TANG et al., 2009), ou seja:

$$G_{mn} = d_{mn}^{-\eta} \quad (3.1)$$

3.3 A formulação do modelo de otimização proposto

Com base nos elementos apresentados na Seção 3.2, o modelo de otimização proposto é formulado como:

$$\min \sum_{k=1}^S \left[(1 - \beta) \sum_{j \in \mathbf{L}^k} \sum_{i=1}^C \tau_{ij}^k + \beta t \right] \quad (3.2)$$

Sujeito a:

$$t \geq \sum_{j \in \mathbf{L}_i} \sum_{k=1}^S \tau_{ij}^k \quad \forall i \in \mathbf{C} \quad (3.3)$$

$$\sum_{i=1}^C \sum_{p \in \mathbf{L}_{kn}^s} f_{ip}^k - \sum_{i=1}^C \sum_{q \in \mathbf{L}_{kn}^r} f_{iq}^k = 0 \quad \forall k \in \mathbf{S}, n \in \mathbf{N} - \{n_k^s, n_k^r\} \quad (3.4)$$

$$\sum_{i=1}^C \sum_{p \in \mathbf{L}_{kn}^s} f_{ip}^k - \sum_{i=1}^C \sum_{q \in \mathbf{L}_{kn}^r} f_{iq}^k = \lambda_k \quad \forall k \in \mathbf{S}, n \in \{n^s\} \quad (3.5)$$

$$\sum_{i=1}^C \sum_{p \in \mathbf{L}_{kn}^s} f_{ip}^k - \sum_{i=1}^C \sum_{q \in \mathbf{L}_{kn}^r} f_{iq}^k = -\lambda_k \quad \forall k \in \mathbf{S}, n \in \{n^r\} \quad (3.6)$$

$$2f_{ij}^k \leq \lambda_k(z_{ni} + z_{mi}) \quad \forall i \in \mathbf{C}; (m, n) = j \in \mathbf{L}; k \in \mathbf{S}; m, n \in \mathbf{N} \quad (3.7)$$

$$\sum_{i=1}^C z_{ni} \leq I \quad \forall n \in \mathbf{N} \quad (3.8)$$

$$z_{ni} = z_{mi} \quad \forall i \in \mathbf{C}; (m, n) \in \mathbf{L} \quad (3.9)$$

$$\sum_{k=1}^S \sum_{j \in \mathbf{L}_{kn}^s} p_j \leq P_n \quad \forall n \in \mathbf{N} \quad (3.10)$$

$$\sum_{i=1}^C \sum_{k=1}^S f_{ij}^k \leq \kappa_j \quad \forall j \in \mathbf{L} \quad (3.11)$$

$$\kappa_j = W \log_2 \left(1 + \frac{G_{mn} p_j}{\sigma + \sum_{(u,v)=\theta \in \mathbf{L}, \theta \neq j} G_{un} p_\theta} \right) \quad \forall j \in \mathbf{L} \quad (3.12)$$

$$\tau_{ij}^k = \frac{\chi_{ij}^k \lambda_k z_{mi}}{\kappa_j} \quad \forall i \in \mathbf{C}; m, n \in \mathbf{N}; (m, n) = j \in \mathbf{L}; k \in \mathbf{S} \quad (3.13)$$

$$\tau_{ij}^k \geq 0, f_{ij}^k \geq 0 \quad i \in \mathbf{C}, j \in \mathbf{L}, k \in \mathbf{S} \quad (3.14)$$

$$p_j \geq 0, \kappa_j \geq 0 \quad j \in \mathbf{L} \quad (3.15)$$

$$z_{ni} \in \{0, 1\} \quad n \in \mathbf{N}, i \in \mathbf{C} \quad (3.16)$$

A equação (3.2) é a função-objetivo do modelo, que visa minimizar a soma dos WCETTs em função dos ETTs, de acordo com a fórmula apresentada por [Draves et al. \(2004\)](#). Nesta função, aparecem as características híbridas do protocolo de roteamento considerado:

- A parcela multiplicada por $(1 - \beta)$ corresponde à característica pró-ativa da rede, em que existe uma rota pré-definida para o pacote que trafega em cada sessão;
- A parcela multiplicada por β corresponde à característica reativa da rede, em que os pacotes são entregues sob demanda em rotas determinadas de acordo com as condições de tráfego.

A restrição (3.3) é utilizada para linearizar a Equação (2.4). A finalidade desta restrição é obter o maior valor da soma de ETTs da rede para um dado canal, para calcular as medidas de tempo referentes às características reativas do protocolo de roteamento. Isto é previsto pela definição da métrica WCETT, uma vez que se analisa o pior caso quando há interferências ao utilizar um mesmo canal (DRAVES et al., 2004 apud COUTO et al., 2003).

As restrições (3.4)-(3.7) determinam o controle de fluxo da rede, tarefa executada pela camada de rede, de modo a assegurar a conectividade entre os APs. As restrições de controle de fluxo são definidas como:

- a restrição (3.4) assegura que o fluxo de dados que entra por um AP intermediário (retransmissor) é igual ao fluxo de dados que sai deste mesmo AP;
- as restrições (3.5) e (3.6) asseguram que em um AP que é origem ou destino de uma sessão, respectivamente, a diferença entre o fluxo de dados que sai e o fluxo de dados que entra neste AP deve ser igual ao tamanho do pacote da sessão. Observar que o sinal empregado no parâmetro relativo ao tamanho do pacote da sessão (λ_k) é definido de acordo com o sentido do fluxo de dados;
- A restrição (3.7) limita a quantidade de dados que pode trafegar em um enlace j que utiliza o canal i e a sessão k . Observar que considera-se o enlace j ser composto pelos APs m e n . A limitação fica assegurada se o enlace j utiliza o canal i e $z_{mi} = z_{ni} = 1$.

As restrições (3.8)-(3.9) referem-se ao problema de atribuição de canais, conforme descrito a seguir:

- A restrição (3.8) assegura que o número máximo de canais utilizados por um AP é limitado pela quantidade de interfaces de rede disponíveis aos APs;
- A restrição (3.9) assegura que um enlace composto pelos APs m e n existe somente se os dois APs envolvidos no enlace utilizam o mesmo canal.

A restrição (3.10) limita o controle de potência empregado para a transmissão em um enlace, problema tratado pela camada física. Esta restrição garante que a potência consumida por todos os enlaces que têm o AP n como emissor não pode ser maior do que a potência máxima P_n que este AP é capaz de transmitir.

As restrições (3.11)-(3.13) referem-se ao problema de capacidade de transmissão dos enlaces (largura de banda), a saber:

- A restrição (3.11) garante que o fluxo de dados total em um enlace não pode ser maior que a capacidade de transmissão deste enlace;
- A restrição (3.12) calcula a capacidade do enlace em função do modelo de degradação de sinal SINR, dada pela equação de Shannon. A Figura 3.3 mostra as variáveis correspondentes aos valores das potências consumidas pelos enlaces e os elementos da matriz de coeficientes de interferência G , considerando que o enlace j corresponde ao par de APs (m, n) e o enlace θ corresponde ao par de APs (u, v) :

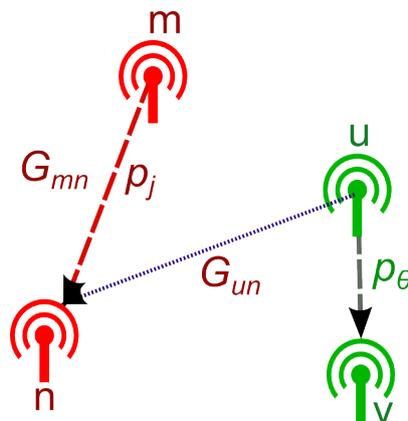


Figura 3.3 - Exemplo de extração dos valores relacionados às potências e aos coeficientes em um cenário de interferência

- A restrição (3.13) calcula o ETT em função do ETX para cada enlace, canal e sessão. Nesta restrição, τ_{ij}^k representa o ETT e χ_{ij}^k representa o ETX na transmissão de um enlace j (composto pelo par de APs m e n) que utiliza o canal i e sessão k . Conforme observado anteriormente, considera-se o ETX como um parâmetro, devido às suas características probabilísticas (DRAVES et al., 2004).

As restrições (3.14)-(3.16) estabelecem os domínios das variáveis, ou seja, as variáveis contínuas são não-negativas e as variáveis discretas são binárias.

Com esta formulação, o modelo de otimização proposto, devido às restrições (3.12) e (3.13), corresponde a um modelo de Programação Não-Linear Não-Convexo difícil de ser resolvido por um método exato. Assim, para obter uma solução satisfatória deste modelo em um tempo computacional aceitável, propõe-se uma heurística híbrida, conforme descrito no capítulo a seguir.

4 HEURÍSTICA HÍBRIDA PROPOSTA

A obtenção de uma solução ótima para o modelo de otimização *cross-layer* proposto é uma tarefa difícil. Dependendo da quantidade de elementos presentes na rede, obter uma solução ótima pode exigir um esforço computacional muito grande. Além disso, a não-linearidade das restrições de largura de banda tornam a obtenção de uma solução ótima ainda mais difícil.

Assim, para encontrar uma solução aproximada para o modelo de minimização dos WCETTs em uma WMN, em um tempo computacional aceitável, propõe-se uma heurística híbrida. Esta heurística divide o modelo proposto em dois subproblemas:

- a) *Maximização da capacidade dos enlaces*. Este subproblema consiste em encontrar os níveis de potência e as capacidades de transmissão dos enlaces, de modo a maximizar a capacidade total dos enlaces. Este subproblema é resolvido utilizando-se uma meta-heurística, conforme descrito na Seção 4.1;
- b) *Minimização dos WCETTs*. Este subproblema corresponde ao restante do modelo original, considerando que as capacidades dos enlaces já foram estabelecidas, ou seja, o modelo (3.2) sujeito às restrições (3.3)-(3.9), (3.11), (3.13)-(3.14), (3.16). O modelo formulado dessa forma torna-se um modelo de Programação Linear Inteira Mista, podendo ser resolvido por um otimizador (*solver*), conforme descrito na Seção 4.2.

O fluxograma da Figura 4.1 ilustra os passos desta heurística híbrida para resolver o modelo de otimização proposto.

4.1 Maximização da capacidade dos enlaces

O primeiro passo da heurística híbrida proposta consiste em determinar os níveis de potência de cada enlace da WMN, de modo a maximizar a capacidade total de transmissão dos enlaces da rede. Ressalte-se que, como os valores dos ETTs são inversamente proporcionais às capacidades dos enlaces, a ideia deste subproblema é determinar os maiores valores possíveis para as capacidades, de modo a minimizar os valores dos ETTs.

Maximizar a capacidade total dos enlaces é uma estratégia adotada também em Yuan et al. (2006). Deve-se notar que a capacidade de transmissão é esti-

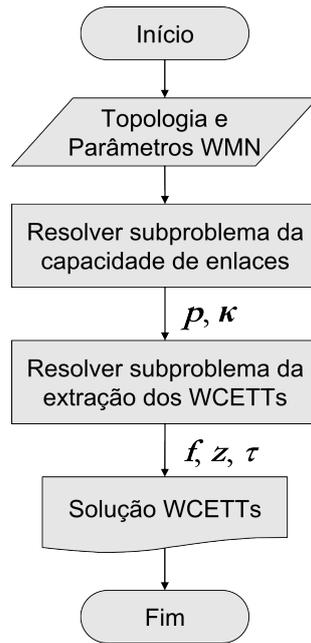


Figura 4.1 - Fluxograma para o algoritmo da heurística híbrida.

mada em função da potência do enlace e da potência dos enlaces vizinhos que causam interferência. Um grande aumento na potência de um enlace pode prejudicar o sinal dos enlaces vizinhos. Assim, espera-se que não haja uma grande discrepância entre os valores das potências dos enlaces e, conseqüentemente, que não haja uma grande discrepância entre os valores das capacidades dos enlaces.

O subproblema de maximização da capacidade dos enlaces é formulado considerando as restrições de controle de potência, para manter os níveis de potência dentro das limitações dos APs, e parte das restrições de largura de banda, mais especificamente, a restrição do cálculo das capacidades em função da razão [sinal / (interferência + ruído)] correspondente ao modelo SINR. O modelo SINR contribui para manter o equilíbrio entre os níveis de potência dos enlaces, pois se a potência de um dispositivo for muito alta, este dispositivo poderá causar grande interferência nos outros. Assim, este subproblema é formulado da seguinte forma:

$$\max \sum_{j=1}^L \kappa_j \quad (4.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k=1}^S \sum_{j \in \mathbf{L}_{kn}^s} p_j \leq P_n \quad \forall n \in \mathbf{N} \quad (3.10)$$

$$\kappa_j = W \log_2 \left(1 + \frac{G_{mn} p_j}{\sigma + \sum_{\substack{\theta \neq j \\ (u,v) = \theta \in \mathbf{L}}} G_{un} p_\theta} \right) \quad \forall j \in \mathbf{L} \quad (3.12)$$

$$p_j \geq 0, \kappa_j \geq 0 \quad j \in \mathbf{L} \quad (3.15)$$

Portanto, o subproblema de maximização da capacidade dos enlaces é formulado como um modelo de Programação Não-Linear, devido à restrição (3.12). Observa-se que trata-se de um modelo de otimização contínua. Neste trabalho, propõe-se a utilização das meta-heurísticas *Simulated Annealing* (SA) e *Variable Neighborhood Search* (VNS) para obter uma solução aproximada para este subproblema.

Um subproblema similar a este foi proposto por Yuan et al. (2006), mas sem considerar a frequência da largura de banda W e admitindo que os valores das razões SINR [sinal / (interferência + ruído)] são elevados, o que implica em sinal alto e ruído e interferência baixos. O modelo proposto neste trabalho é mais sofisticado, pois além de considerar a frequência da largura de banda, admite que o ambiente possa ter mais ruído e interferência.

4.1.1 Capacidade de enlaces utilizando *Simulated Annealing*

O algoritmo *Simulated Annealing* é uma técnica de busca local probabilística, fundamentada em uma analogia com o resfriamento de um material, operação conhecida como recozimento. Nesta técnica, a busca começa com uma solução inicial qualquer. A cada iteração, o procedimento gera aleatoriamente um único vizinho da solução corrente. O método aceita a solução vizinha como a nova solução corrente toda vez que houver melhora na função-objetivo. Mas, mesmo em caso de piora, a solução vizinha candidata também poderá ser aceita, com uma dada probabilidade, que depende de um parâmetro (temperatura) do método. Esse parâmetro assume, inicialmente, um valor elevado e vai sendo gradativamente reduzido por uma taxa de resfriamento. Com esse procedimento, no início da busca, existe uma chance maior para escapar de mínimos locais e, à medida que a temperatura aproxima-se de zero, o algoritmo comporta-se como o método

de descida, pois diminui a chance de se aceitar movimentos de piora.

Para adaptar o algoritmo SA original ao subproblema de maximização da capacidade dos enlaces foram estabelecidos:

- *A representação de uma solução do subproblema.* Uma solução do subproblema é representada por um vetor de potências dos enlaces. Conhecidos os níveis de potência consumidos pelos enlaces pode-se, pela equação (3.12), determinar as capacidades dos enlaces.
- *O algoritmo de determinação de vizinhanças.* A estratégia utilizada para determinar uma solução vizinha ($Altera(\mathbf{p}, r)$) para a solução corrente \mathbf{p} é alterar, de forma aleatória, o valor do nível de potência de um enlace. O Algoritmo 3 mostra como é realizada a escolha de uma solução vizinha.

Algoritmo 3: $Altera(\mathbf{p}, r)$

Seja $\mathbf{p} = \{p_1, p_2, \dots, p_L\}$ uma solução do subproblema;

$\mathbf{p}' \leftarrow \mathbf{p}$;

$cont \leftarrow 1$;

enquanto ($cont \leq r$) **faça**

 Escolher aleatoriamente um enlace $\ell \in \{1, 2, \dots, L\}$;

 Escolher aleatoriamente um valor $\Delta \in (0, 1)$;

 Escolher aleatoriamente a operação \oplus (incremento ou decremento);

$p'_\ell \leftarrow p'_\ell \oplus \Delta$;

 Viabilizar p'_ℓ , caso necessário;

$cont \leftarrow cont + 1$;

fim

Saída: \mathbf{p}'

No Algoritmo 3, deve-se observar que, pela restrição (3.10), $0 \leq p'_\ell \leq P_n$, onde P_n é a potência máxima do AP emissor do enlace ℓ . Assim, o processo de viabilização de p'_ℓ consiste em:

- se $p'_\ell < 0$, então $p'_\ell = 0$;
- se $p'_\ell > P_n$ então $p'_\ell = P_n$;

A Tabela 4.1 mostra os elementos utilizados no algoritmo *Simulated Annealing* aplicado ao problema de maximização da capacidade dos enlaces.

Tabela 4.1 - Elementos utilizados no algoritmo SA

| Elemento | Descrição |
|-----------------|--|
| \mathbf{p}_0 | Solução inicial |
| \mathbf{p} | Solução corrente |
| \mathbf{p}' | Solução vizinha à corrente |
| \mathbf{p}_f | Solução final fornecida pelo algoritmo SA |
| T_0 | Temperatura inicial |
| T | Temperatura corrente |
| R | Número máximo de iterações por temperatura |
| α | Taxa de resfriamento |
| ϵ | Temperatura mínima tolerável |
| $f(\mathbf{p})$ | Valor da função-objetivo para a solução \mathbf{p} , com os valores das capacidades calculados pela equação (3.12) |

O Algoritmo 4 mostra o algoritmo *Simulated Annealing* aplicado ao subproblema de maximização da capacidade dos enlaces.

4.1.2 Capacidade de enlaces utilizando *Variable Neighborhood Search*

Como forma de aferir os resultados obtidos para o subproblema de maximização da capacidade dos enlaces, propõe-se neste trabalho, resolver este subproblema utilizando também a meta-heurística VNS (*Variable Neighborhood Search*). A meta-heurística VNS é um método de busca local que consiste em explorar o espaço de soluções por meio de trocas sistemáticas de estruturas de vizinhança, ou seja, vizinhanças gradativamente mais distantes da solução corrente, focalizando a busca em torno de uma nova solução se e somente se um movimento de melhora é realizado.

Para o algoritmo VNS, emprega-se a mesma representação de solução adotada para o algoritmo SA e utiliza-se como critério de parada um número máximo de iterações. A Tabela 4.2 mostra os elementos utilizados no algoritmo VNS aplicado a este subproblema.

A função $Vizinho(\mathbf{p}, k)$. Trata-se da busca de um vizinho da solução corrente \mathbf{p} a partir da k -ésima estrutura de vizinhança. Especificamente, são utilizadas seis estruturas de vizinhança, que dependem das operações $Alterar(\mathbf{p}, r)$ (Algoritmo

Algoritmo 4: *Simulated Annealing* para maximização da capacidade de enlaces

Entrada: $(\mathbf{p}_0, T_0, R, \alpha, \epsilon)$ $\mathbf{p} \leftarrow \mathbf{p}_0;$ $\mathbf{p}_f \leftarrow \mathbf{p};$ $iT \leftarrow 0;$ $T \leftarrow T_0;$ **enquanto** $T > \epsilon$ **faça** **enquanto** $iT < R$ **faça** $iT \leftarrow iT + 1;$ $\mathbf{p}' \leftarrow \text{Altera}(\mathbf{p}, 1);$ $\Delta f \leftarrow f(\mathbf{p}') - f(\mathbf{p});$ **se** $\Delta f > 0$ **então** $\mathbf{p} \leftarrow \mathbf{p}';$ **se** $f(\mathbf{p}) > f(\mathbf{p}_f)$ **então** $\mathbf{p}_f \leftarrow \mathbf{p};$ **fim** **fim** **senão** $rnd \leftarrow$ é um valor aleatório $\in [0, 1];$ **se** $rnd < e^{\frac{\Delta f}{T}}$ **então** $\mathbf{p} \leftarrow \mathbf{p}';$ **fim** **fim** **fim** $T \leftarrow \alpha \times T;$ $iT \leftarrow 0;$ **fim**Calcular os valores de κ a partir de \mathbf{p}_f , pela Equação (3.12);**Saída:** κ

3) e $Troca(\mathbf{p}, r)$, descrito pelo Algoritmo 5. O Algoritmo 6 descreve a implementação da função $Vizinho(\mathbf{p}, k)$.

O Algoritmo 8 mostra o algoritmo VNS aplicado ao subproblema de maximização da capacidade dos enlaces.

Ao final da execução da meta-heurística (SA ou VNS), tem-se o conjunto κ de capacidades dos enlaces. Os valores das capacidades dos enlaces serão utilizados como parâmetros nas restrições (3.11) e (3.13). Deve-se observar que, desta forma, a restrição (3.13) se torna linear. Assim, obtida a solução do subproblema

Tabela 4.2 - Elementos utilizados no algoritmo VNS

| Elemento | Descrição |
|----------|---|
| p_0 | Solução inicial |
| p | Solução corrente |
| p' | Solução vizinha à corrente |
| p'' | Solução obtida pela busca local |
| p_f | Solução final fornecida pelo VNS |
| k | Número da estrutura de vizinhança |
| R | Quantidade de estruturas de vizinhança disponíveis |
| iT | Número de iterações |
| max | Máximo de iterações do VNS |
| $f(p)$ | Valor da função-objetivo para a solução p , com os valores das capacidades calculados pela Equação (3.12) |

Algoritmo 5: Troca(p, r)

Seja $p = [p_1, p_2, \dots, p_L]$ uma solução do subproblema;

$p' \leftarrow p$;

$cont \leftarrow 1$;

enquanto ($cont \leq r$) **faça**

Escolher aleatoriamente dois enlaces $a, b \in \{1, 2, \dots, L\}$;

$aux \leftarrow p'_a$;

$p'_a \leftarrow p'_b$;

$p'_b \leftarrow aux$;

$cont \leftarrow cont + 1$;

fim

retorna p'

da maximização da capacidade dos enlaces, a próxima etapa da heurística híbrida proposta é determinar quais devem ser os canais a serem utilizados pelos APs, o fluxo de dados pela rede e os valores dos ETTs que minimizam o WCETT total.

4.2 Minimização dos WCETTs

Uma vez obtidas as capacidades de transmissão dos enlaces, juntamente com os níveis de potência consumidos em cada enlace, o segundo passo da heurística híbrida proposta consiste em obter os valores referentes às variáveis responsáveis pelo controle de fluxo e pela atribuição de canais da WMN. Uma vez obtidos tais valores, determinam-se os valores dos ETTs e, conseqüentemente, o valores dos WCETTs.

Algoritmo 6: Vizinho(\mathbf{p}, k)

Seja $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_L]$ uma solução do subproblema;

$\mathbf{p}' \leftarrow \mathbf{p}$;

selecione (k) **faça**

caso 1

 | *Altera*(\mathbf{p}' , 2);

caso 2

 | *Troca*(\mathbf{p}' , 1);

caso 3

 | *Altera*(\mathbf{p}' , 4);

caso 4

 | *Troca*(\mathbf{p}' , 2);

caso 5

 | *Altera*(\mathbf{p}' , 6);

caso 6

 | *Troca*(\mathbf{p}' , 3);

fim

retorna \mathbf{p}'

É importante observar que o problema de controle de fluxo deve ser resolvido conjuntamente com o problema de atribuição de canais. Isto ocorre porque as restrições de fluxo garantem a conectividade entre os APs, condição necessária para que APs vizinhos utilizem o mesmo canal. Deve-se notar que, pela restrição (3.13), tanto o controle de fluxo quanto a atribuição de canais são importantes para definir o valor dos ETTs da rede.

Com isso, o subproblema de minimização do WCETT total é formulado como um modelo de Programação Linear Inteira Mista da seguinte forma:

$$\min \sum_{k=1}^S \left[(1 - \beta) \sum_{j \in L^k} \sum_{i=1}^C \tau_{ij}^k + \beta t \right] \quad (3.2)$$

Algoritmo 7: BuscaLocal(p)

 $p'' \leftarrow p;$ **repita** $ok \leftarrow 0;$ $j \leftarrow 0;$ Tome um número aleatório $x \in [-1, 1];$ **enquanto** ($j \leq L$) **faça** $j \leftarrow j + 1;$ $p'_j \leftarrow p_j + x;$ **se** ($(f(p') > f(p''))$) **então** $p'' \leftarrow p';$ $ok = 1;$ **fim** $p'_j \leftarrow p_j;$ **fim** $p \leftarrow p'';$ **até** ($ok = 1$);**Saída:** p

Sujeito a:

$$t \geq \sum_{j \in \mathbf{L}_i} \sum_{k=1}^S \tau_{ij}^k \quad \forall i \in \mathbf{C} \quad (3.3)$$

$$\sum_{i=1}^C \sum_{p \in \mathbf{L}_{kn}^s} f_{ip}^k - \sum_{i=1}^C \sum_{q \in \mathbf{L}_{kn}^r} f_{iq}^k = 0 \quad \forall k \in \mathbf{S}, n \in \mathbf{N} - \{n_k^s, n_k^r\} \quad (3.4)$$

$$\sum_{i=1}^C \sum_{p \in \mathbf{L}_{kn}^s} f_{ip}^k - \sum_{i=1}^C \sum_{q \in \mathbf{L}_{kn}^r} f_{iq}^k = \lambda_k \quad \forall k \in \mathbf{S}, n \in \{n^s\} \quad (3.5)$$

$$\sum_{i=1}^C \sum_{p \in \mathbf{L}_{kn}^s} f_{ip}^k - \sum_{i=1}^C \sum_{q \in \mathbf{L}_{kn}^r} f_{iq}^k = -\lambda_k \quad \forall k \in \mathbf{S}, n \in \{n^r\} \quad (3.6)$$

$$2f_{ij}^k \leq \lambda^k (z_{ni} + z_{mi}) \quad \forall i \in \mathbf{C}; (m, n) = j \in \mathbf{L}; k \in \mathbf{S}; m, n \in \mathbf{N} \quad (3.7)$$

$$\sum_{i=1}^C z_{ni} \leq I \quad \forall n \in \mathbf{N} \quad (3.8)$$

$$z_{ni} = z_{mi} \quad \forall i \in \mathbf{C}; (m, n) \in \mathbf{L} \quad (3.9)$$

$$\sum_{i=1}^C \sum_{k=1}^S f_{ij}^k \leq \kappa_j \quad \forall j \in \mathbf{L} \quad (3.11)$$

$$\tau_{ij}^k = \frac{\lambda_{ij}^k \lambda_k z_{mi}}{\kappa_j} \quad \forall i \in \mathbf{C}; m, n \in \mathbf{N}; (m, n) = j \in \mathbf{L}; k \in \mathbf{S} \quad (3.13)$$

$$\tau_{ij}^k \geq 0, f_{ij}^k \geq 0 \quad \begin{matrix} 47 \\ i \in \mathbf{C}, j \in \mathbf{L}, k \in \mathbf{S} \end{matrix} \quad (3.14)$$

$$z_{ni} \in \{0, 1\} \quad n \in \mathbf{N}, i \in \mathbf{C} \quad (3.16)$$

Algoritmo 8: VNS para maximização da capacidade dos enlaces

Entrada: (\mathbf{p}_0, R, max) $\mathbf{p} \leftarrow \mathbf{p}_0;$ **enquanto** $(iT < max)$ **faça** $k \leftarrow 1;$ **enquanto** $(k < R)$ **faça** $\mathbf{p}' \leftarrow \text{Vizinho}(\mathbf{p}, k);$ $\mathbf{p}'' \leftarrow \text{BuscaLocal}(\mathbf{p}');$ **se** $f(\mathbf{p}'') > f(\mathbf{p})$ **então** $\mathbf{p} \leftarrow \mathbf{p}'';$ $k \leftarrow 1;$ **fim** **senão** $k \leftarrow k + 1;$ **fim** **fim** $iT \leftarrow iT + 1;$ **fim** $\mathbf{p}_f \leftarrow \mathbf{p};$ Calcular os valores de κ a partir de \mathbf{p}_f , pela Equação (3.12);**Saída:** κ

A solução deste subproblema irá mostrar o fluxo de dados que está passando pelos enlaces (através dos valores de f_{ij}^k), a consonância de canais utilizados na comunicação entre APs conectados em um enlace (pelos valores binários de z_{ni}) e os valores dos ETTs τ_{ij}^k obtidos para a WMN. Os valores destas variáveis, juntamente com os níveis de potência p_j e as capacidades de enlaces κ_j , determinam a configuração que melhor atende as necessidades de transmissão na rede, com a minimização do WCETT total. Por se tratar de um modelo de Programação Linear Inteira Mista, neste trabalho, este subproblema será resolvido de forma exata pelo *solver* CPLEX (CPLEX, 2010).

Portanto, a heurística híbrida proposta neste trabalho permite que o modelo *cross-layer* seja dividido, reduzindo a complexidade computacional de se obter uma solução satisfatória, em um tempo aceitável, para o problema abordado. No entanto, como não existem soluções ótimas conhecidas para o problema como um todo, há a necessidade de verificar os resultados obtidos pela heurística proposta, assunto a ser tratado no Capítulo 5.

5 MODELO DE SIMULAÇÃO PROPOSTO

Modelos *cross-layer* permitem prever o comportamento da rede a partir da obtenção de uma configuração da rede que otimiza uma determinada função-objetivo, conforme visto nos capítulos anteriores. A verificação dos valores obtidos por esses modelos matemáticos para verificar se são coerentes com os valores encontrados em cenários reais pode ser feita por aferição direta em uma rede já existente ou por meio de modelos de simulação.

A utilização de modelos de simulação tem a vantagem de diagnosticar problemas antes que a rede esteja instalada fisicamente, com economia de tempo e de recursos. Modelos de simulação possibilitam verificar o comportamento da rede e propor melhorias em sua infraestrutura para que, uma vez instaladas fisicamente, apresentem o desempenho esperado.

Este capítulo apresenta um modelo de simulação para verificar os resultados obtidos pela heurística híbrida proposta. Este modelo foi desenvolvido para utilização com o simulador de redes NS-3 (*Network Simulator 3*) (ANDREEV; BOYKO, 2011), um dos simuladores mais utilizados pela comunidade científica e por especialistas da área. Com o simulador NS-3, é possível extrair o ETT em cada salto de uma WMN, utilizando tanto protocolos pró-ativos, como o OLSR, como utilizando protocolos reativos, como o AODV.

No entanto, com o NS-3 não é possível a utilização de protocolos híbridos, como o MR-LQSR, com o qual é possível obter diretamente o valor do WCETT. Assim, o modelo de simulação proposto neste capítulo consiste em extrair os ETTs da rede, de acordo com os protocolos OLSR e AODV separadamente e ponderar esses valores por meio do coeficiente de reatividade β , da mesma forma como utilizado na Equação (3.2). Com isto será possível obter o valor simulado para o WCETT da rede para que possa ser comparado com o valor obtido pela heurística híbrida discutida no Capítulo 4.

Com isto pretende-se superar duas dificuldades encontradas para comparar os resultados obtidos pelo modelo de otimização proposto nesta tese:

- A falta de outros modelos *cross-layer* para otimizar métricas de roteamento em WMNs;
- A indisponibilidade do protocolo MR-LQSR nos simuladores de redes mais conhecidos, para permitir o cálculo direto do WCETT.

O algoritmo de simulação proposto é composto por módulos sequenciais, organizados de acordo com as características encontradas no processo de transmissão e recepção de pacotes da rede. A Figura 5.1 mostra as principais etapas do modelo de simulação proposto.

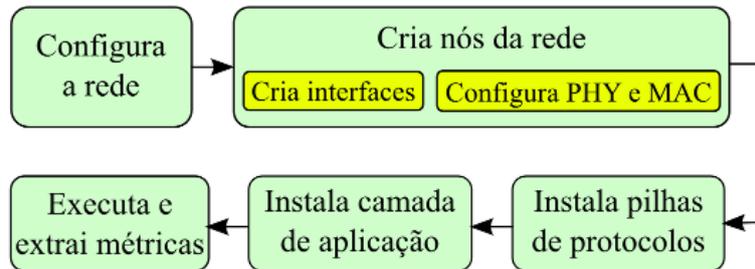


Figura 5.1 - Etapas do algoritmo de simulação

As seções a seguir detalham as cinco etapas do modelo de simulação proposto.

5.1 Configuração da rede a ser simulada

O primeiro passo do algoritmo de simulação é a leitura e configuração dos parâmetros da WMN. Nesta etapa são definidos os valores dos parâmetros apresentados na Tabela 5.1. Deve-se observar que alguns parâmetros correspondem a dados relativos à WMN, enquanto outros são importantes para o próprio algoritmo de simulação.

Tabela 5.1 - Parâmetros utilizados no modelo de simulação

| Parâmetro | Descrição |
|-------------|---|
| N | Número de APs |
| d_{mn} | Distância entre APs vizinhos $m, n \in \mathbf{N}$ |
| I | Quantidade máxima de interfaces de rede nos APs |
| λ_k | Tamanho dos pacotes na sessão k |
| σ | Coefficiente de ruído |
| β | Coefficiente de reatividade da rede |
| T | Tempo total de transmissão de dados na simulação |
| V | Intervalo de tempo entre a entrega de dois pacotes consecutivos |

Além destes parâmetros, também é importante estabelecer o tipo de protocolo

adotado pela camada de transporte. Como o interesse é simular o desempenho da rede na transmissão de pacotes multimídia, será adotado o protocolo UDP. Para este protocolo, as métricas de tempo (ETT e WCETT) são muito relevantes para não comprometer a qualidade na transmissão multimídia.

O tipo de dispositivo a ser utilizado na rede também é importante para o processo de simulação. Para o modelo proposto, considera-se que os APs adotam o padrão IEEE 802.11s. Estes dispositivos Wi-Fi são específicos para WMNs e se caracterizam por possuir mais de uma interface de rede, o que permite o funcionamento com mais de um canal simultaneamente.

5.2 Criação e instalação dos APs

A etapa de criação e instalação dos APs consiste em configurar as camadas física e de enlace, ou seja, estabelecer as funcionalidades específicas de cada dispositivo da rede e as interfaces de rede a serem utilizadas. O objetivo desta etapa é ajustar os valores pertinentes à transmissão e recepção de dados.

Todo dispositivo sem fio (seja um AP ou um dispositivo cliente) necessita de uma interface de rede para comunicar-se com outros dispositivos. Uma interface de rede pode ser considerada como uma porta de comunicação que permite o tráfego exclusivo de dados para um determinado destino. Cada interface de rede utiliza apenas um único canal por vez. No caso de redes WMN, para que haja a comunicação entre dispositivos, os APs devem conter mais de uma interface de rede.

Numa WMN, cada interface se comunica com outros dispositivos utilizando um canal dentro do espectro disponível de frequência. Como um AP necessita, tanto receber quanto enviar dados por meio de transmissões sem fio, deve existir, pelo menos, uma interface para receber os dados e, pelo menos, outra interface para retransmitir os dados, seja para um dispositivo cliente ou para outros APs que compõem a malha.

A principal vantagem de se ter diferentes interfaces de rede nos dispositivos é a possibilidade de compor uma malha sem que haja interferência de sinal ou conflito de dados. A criação de múltiplas interfaces de rede exige a configuração das camadas que utilizarão diretamente este recurso:

- *Camada física:* São ajustados três parâmetros: os níveis de potência

dos APs (ajustados em função do ruído σ), o modelo de propagação de dados e o ambiente que dá suporte ao uso de múltiplos canais;

- *Camada de enlace*: São atribuídos aos pacotes a identificação do dispositivo que irá utilizá-los e os canais a serem utilizados pelos enlaces para o tráfego de dados. Desta camada, serão extraídos os parâmetros de qualidade de serviço (QoS) necessários para a obtenção do WCETT.

Nesta etapa também é configurada a topologia da rede a ser simulada, o que implica também em ajustes nas camadas física e de enlace. Para este caso, os APs que compõem a topologia não possuem mobilidade, isto é, são considerados fixos. Uma vez configuradas estas camadas mais baixas da rede, o próximo passo é instalar as pilhas de protocolo, fundamentais para a instalação lógica da rede.

5.3 Instalação de pilhas de protocolo

A instalação das pilhas de protocolo corresponde a configurar a camada de rede, responsável por todo o roteamento da WMN. Estes protocolos são fundamentais para estabelecer a forma de transmissão dos pacotes. Como já comentado, para a extração do WCETT recomenda-se adotar o protocolo híbrido MR-LQSR (DRAVES et al., 2004), que reúne características pró-ativas e reativas. No entanto, este protocolo não está disponível no simulador NS-3. Assim, para o modelo de simulação serão adotados os protocolos OLSR (para o roteamento pró-ativo) e AODV (para o roteamento reativo), disponíveis no NS-3. Os valores dos ETTs extraídos a partir destes dois protocolos serão combinados (por meio do coeficiente de reatividade da rede β) para a obtenção do WCETT. Como foi visto no Capítulo 2, muitos trabalhos utilizam esses dois protocolos para obter métricas de desempenho da rede.

Nesta etapa ocorre também a atribuição de endereços lógicos aos dispositivos da rede. Estes endereços são utilizados como forma de identificação dos APs pelas interfaces. O endereçamento lógico, diferentemente do endereçamento físico da camada de enlace, é utilizado na camada de rede. O endereço lógico pode ser alterado conforme a necessidade da comunicação na rede. O endereçamento lógico, portanto, é utilizado particularmente dentro da própria WMN.

Concluída esta etapa, o próximo passo é instalar os protocolos na camada de transporte e definir o tipo de tráfego que a camada de aplicação irá demandar na

rede.

5.4 Instalação das aplicações

A última etapa do modelo de simulação é a instalação das camadas de transporte e de aplicação. Na camada de aplicação são especificados os tipos de dados que os clientes irão demandar da rede e na camada de transporte, os protocolos adequados para essas aplicações. Tendo em vista o objetivo deste trabalho, serão especificadas sobre a rede demandas de aplicações multimídia e, na camada de transporte, a utilização do protocolo UDP, específico para o tráfego de dados multimídia.

Nesta etapa são definidos também os tráfegos de dados da rede. Para isto, são definidos quais são os APs de origem das sessões (*gateways*), neste caso conhecidos como *UDPServers*, e quais são os APs destinatários das sessões, neste caso conhecidos como *UDPClients*. Aplicações multimídia exigem uma quantidade contínua de pacotes. Assim, os *UDPClients* são configurados para demandar serviço com base em três parâmetros:

- O tempo total de transmissão (T);
- O tamanho do pacote da sessão k (λ_k);
- A quantidade máxima de pacotes, definida pela razão entre o tempo total de transmissão e o intervalo de entrega entre dois pacotes (T/V).

O tempo total de transmissão T equivale ao tempo de avaliação da rede se esta fosse avaliada por aferição. Este tempo não está relacionado com o tempo computacional que a simulação consome no processador. Portanto, esta etapa conclui todo o processo de configuração da WMN. O próximo passo é executar o simulador e colher as métricas desejadas.

5.5 Execução e extração das métricas

Esta etapa consiste em executar o simulador para a rede configurada nas etapas anteriores. Para obter o WCETT o simulador é instruído a extrair os elementos necessários para o cálculo dos ETTs. O cálculo dos ETTs será realizado por meio da equação (3.13). Para isso, utiliza-se a ferramenta *FlowMonitor* do NS-3, que permite monitorar o tráfego fim a fim da rede e extrair as seguintes métricas:

- Número de bytes transmitidos (B_t);
- Número de bytes recebidos (B_r);
- Tempo do primeiro pacote recebido (T_0);
- Tempo do último pacote recebido (T_f).

Com base nestas métricas, são calculadas as demais métricas necessárias para obter o WCETT. Primeiramente, calcula-se a probabilidade de perda q_{loss} , ou seja, a razão entre o número de bytes perdidos entre o envio e o recebimento e o número de bytes enviados. Portanto, a probabilidade de perda é calculada pela expressão:

$$q_{loss} = \frac{(B_t - B_r)}{B_t} \quad (5.1)$$

Em seguida, pode-se calcular o ETX em um dado enlace mediante a seguinte expressão:

$$\chi = \frac{1}{(1 - q_{loss})} \quad (5.2)$$

Uma vez definido o ETX, pode-se calcular a capacidade de transmissão de um enlace, ou seja, a razão entre o número de bits recebidos, em que multiplica-se o número de bytes recebidos por 8, e o intervalo de tempo entre o último e o primeiro pacote recebidos pelo destinatário dos dados. Portanto, a capacidade de transmissão é calculada como:

$$\kappa = \frac{8 \times B_r}{T_f - T_0} \quad (5.3)$$

Uma vez obtidos o ETX e a capacidade de transmissão, pode-se calcular o ETT como:

$$\tau = \frac{\chi \lambda_k}{\kappa} \quad (5.4)$$

Utiliza-se o mesmo procedimento de estimativa dos ETTs tanto para o protocolo pró-ativo (τ_O) como para o protocolo reativo (τ_A). Com esses valores, pode-se

calcular os valores dos WCETTs com base na equação (2.4) e, portanto, obter o WCETT total da rede a partir de:

$$\sum_{k=1}^S \left[(1 - \beta) \sum_{j \in \mathbf{L}^k} \tau_O^k + \beta \sum_{j \notin \mathbf{L}^k} \tau_A^k \right] \quad (5.5)$$

Desta forma, os valores obtidos pela heurística híbrida apresentada no Capítulo 4 podem ser comparados com os valores obtidos pelo processo de simulação da rede real. O Anexo A mostra o código do programa de simulação utilizado para efetuar o cálculo do WCETT total utilizando o simulador NS-3.

6 RESULTADOS COMPUTACIONAIS

6.1 Cenário utilizado

O modelo de otimização proposto neste trabalho foi aplicado sobre uma WMN simulada com topologia em grade, instalada em um ambiente externo (*outdoor*), contendo $N = 9$ APs, sendo 1 *gateway*, 7 roteadores retransmissores e 1 roteador de destino. A área de cobertura desta rede corresponde a 10000 m² de um condomínio residencial localizado em Pindamonhangaba, SP, conforme ilustra a Figura 6.1. O algoritmo proposto foi implementado na linguagem de programação C++, utilizando bibliotecas do *solver* IBM CPLEX versão 12.5, e foi executado em um microcomputador com processador de 4 núcleos de 2,5 GHz e com 4 GB de memória RAM.



Figura 6.1 - WMN aplicada em Pindamonhangaba (Fonte: Google Maps)

A configuração apresentada para esta rede na Tabela 6.1 baseia-se em configurações utilizadas em alguns trabalhos em que modelos *cross-layer* foram aplicados sobre WMNs ou redes sem fio similares (SHABDANOV et al., 2012; TANG et al., 2009; JOHANSSON; XIAO, 2006; YUAN et al., 2006; DRAVES et al., 2004). Esta configuração será denominada ao longo deste capítulo como **configuração padrão**.

A configuração padrão apresenta os valores dos parâmetros relativos à infraestrutura da rede. Os demais parâmetros do modelo proposto são apresentados na Tabela 6.2.

Considera-se que esta WMN utiliza dispositivos do tipo IEEE 802.11s em uma faixa de frequência não-licenciada de 2,4000 a 2,4835 GHz, ou seja, uma banda de 83,5 MHz. Considera-se que será utilizada para W uma frequência de 20 MHz

Tabela 6.1 - Dados de infraestrutura da configuração padrão

| Elemento | Parâmetro | Valor |
|--------------------|-----------|-------|
| APs | N | 9 |
| Enlaces | L | 12 |
| Canais disponíveis | C | 3 |
| Interfaces por AP | I | 2 |
| Sessões | S | 6 |

Tabela 6.2 - Valores utilizados para os demais parâmetros do modelo

| Parâmetro | Descrição | Valor | Unidade |
|---------------|---|-----------|---------|
| χ_{ij}^k | Valor estimado para os ETXs | 1,05 | – |
| β | Coefficiente de reatividade da rede | 0,3 | – |
| λ_k | Tamanho do pacote para todas as sessões | 1 | MB |
| P_n | Potência máxima para todos os APs | 100 | mW |
| σ | Coefficiente de ruído da rede | 10^{-8} | W |
| W | Frequência da largura de banda | 20 | MHz |
| η | Expoente de degradação de sinal | 3 | – |

por canal.

6.2 Parâmetros dos algoritmos

A Tabela 6.3 apresenta os valores dos parâmetros utilizados pelas meta-heurísticas e pelo algoritmo de simulação. Estes valores foram fixados após uma série de testes computacionais com estes algoritmos para a solução do problema considerando a configuração padrão.

Tabela 6.3 - Valores para os parâmetros das meta-heurísticas

| Parâmetro | Descrição | Valor | Algoritmo |
|------------|--|--------|-----------|
| T_0 | Temperatura inicial | 10000 | SA |
| α | Taxa de resfriamento | 0,9 | SA |
| ϵ | Temperatura mínima tolerável | 0,001 | SA |
| R | Número máximo de iterações por temperatura | 20000 | SA |
| max | Número máximo de iterações | 400000 | VNS |
| T | O tempo total de transmissão de dados na simulação | 900 s | Simulação |
| V | Tempo entre a entrega de dois pacotes consecutivos | 0,1 s | Simulação |

6.3 Resultados obtidos para a configuração padrão

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos pela heurística híbrida proposta. Em todos os casos testados, os valores dos parâmetros não alterados correspondem aos valores estabelecidos na configuração padrão da rede, conforme definido na Tabela 6.2. Inicialmente, são apresentados os valores obtidos pelas meta-heurísticas SA e VNS para os níveis de potência e para as capacidades dos enlaces. Em seguida, são apresentados os resultados obtidos pelo solver para o subproblema de minimização do WCETT total.

6.3.1 Subproblema de maximização da capacidade de transmissão dos enlaces

Nos testes realizados para este subproblema, cada uma das meta-heurísticas SA e VNS foi executada 100 vezes. A Tabela 6.4 mostra os valores obtidos considerando a WMN na configuração padrão. Nesta tabela, o desvio médio corresponde a razão entre a média dos desvios-padrão e a solução média.

Tabela 6.4 - Resultados obtidos para a configuração padrão – Subproblema 1

| Métrica | SA | VNS |
|-------------------------|--------|--------|
| Solução média (Mb/s) | 832,00 | 846,49 |
| Melhor solução (Mb/s) | 866,29 | 876,78 |
| Desvio médio (%) | 1,54 | 1,30 |
| Tempo Computacional (s) | 21,65 | 22,18 |

Pelos resultados obtidos, nota-se que as meta-heurísticas obtêm soluções relativamente próximas, sendo o algoritmo VNS bem mais rápido do que o algoritmo SA. A Figura 6.2 apresenta as capacidades médias de transmissão dos enlaces, obtidas pelos algoritmos SA e VNS.

A Figura 6.2 mostra as capacidades médias de transmissão para cada um dos enlaces da rede. Nota-se que o algoritmo SA obtém capacidades médias maiores para a maioria dos enlaces próximos ao *gateway*, em relação às capacidades médias dos demais enlaces. Este resultado é coerente com o modelo físico da rede, pois a interferência é maior (e conseqüentemente, a capacidade de transmissão é menor) nos enlaces mais distantes do *gateway*, onde existe uma quantidade maior de dispositivos que causam interferência sobre o sinal dos enlaces.

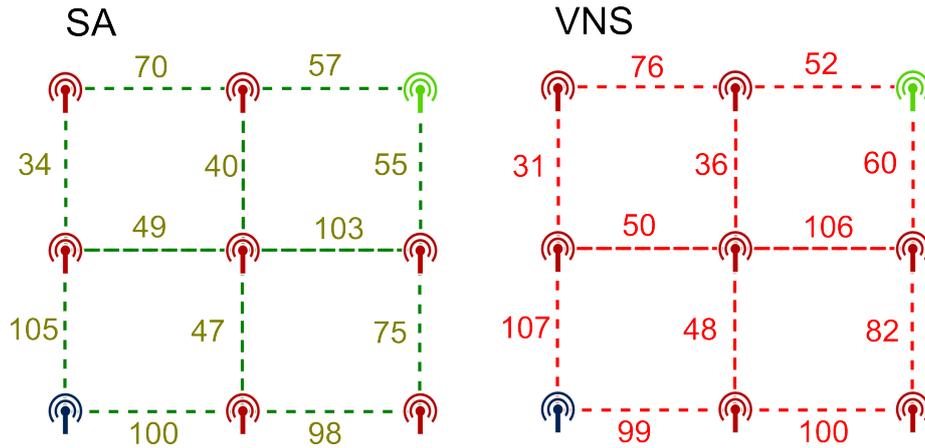


Figura 6.2 - Capacidades médias de transmissão dos enlaces

6.3.2 Subproblema de minimização do WCETT total

Com as capacidades de transmissão de cada um dos enlaces pode-se resolver o subproblema de minimização do WCETT total. A Tabela 6.5 mostra os resultados obtidos pelo *solver* para este subproblema, considerando as capacidades médias de transmissão dos enlaces obtidas pelas meta-heurísticas SA e VNS e a WMN na configuração padrão.

Tabela 6.5 - Resultados obtidos para a configuração padrão – Subproblema 2

| Métrica | SA | VNS |
|----------------------------|--------|--------|
| WCETT total (s) | 0,1465 | 0,1480 |
| WCETT médio por sessão (s) | 0,0244 | 0,0247 |
| ETT médio (ms) | 1,787 | 1,803 |

Os resultados da Tabela 6.5 mostram que as soluções para os dois casos (SA e VNS) são próximas, com um resultado sobre o WCETT total melhor quando se utiliza o SA. O *solver* resolve esse subproblema, em ambos os casos, em menos de 1 segundo.

A solução final é composta por um conjunto de ETTs que compõem o WCETT total da rede. A Figura 6.3 mostra os valores dos tempos esperados para cada um dos enlaces (ETTs), em milissegundos, para cada uma das estratégias utilizadas para o exemplar do problema estudado.

Nota-se que os menores valores de ETTs correspondem aos enlaces com as

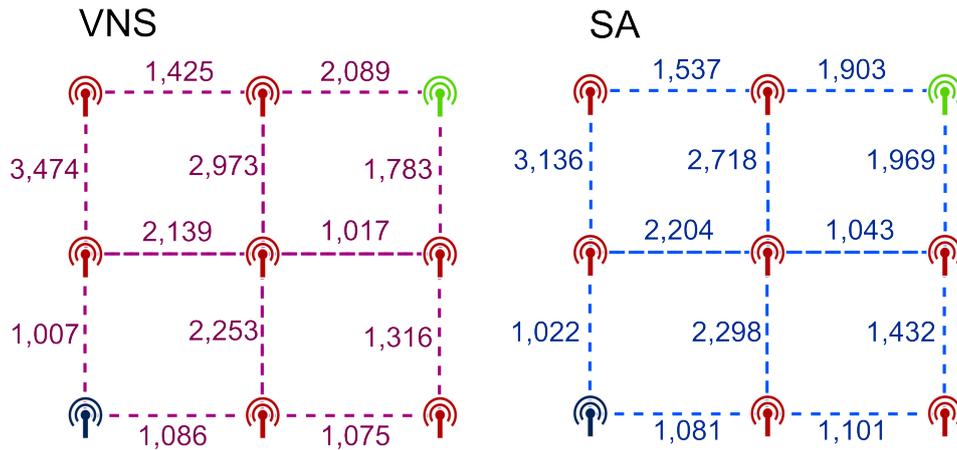


Figura 6.3 - Representação dos ETTs obtidos pelas diferentes estratégias da heurística híbrida

maiores capacidades de transmissão, conforme vistos pela Figura 6.2, pois os ETTs são inversamente proporcionais às capacidades dos enlaces.

6.4 Resultados obtidos para cenários diferentes da configuração padrão

Os algoritmos propostos foram executados para alguns cenários em que foram modificados alguns parâmetros da configuração padrão da rede. Foram escolhidos cinco diferentes cenários, em cada um dos quais o valor de um parâmetro foi alterado. Para cada cenário, observa-se a variação da função-objetivo (WCETT total) em função do parâmetro alterado da configuração padrão.

6.4.1 Alteração do tamanho do pacote

O tamanho do pacote em cada sessão é representado pelas taxas λ_k , com $k \in S$. A Tabela 6.6 mostra os resultados obtidos para alguns valores de λ_k , considerando que as taxas são iguais para todas as sessões. A Figura 6.4 mostra a evolução do WCETT total obtido em função do valor adotado para o tamanho do pacote.

Os resultados obtidos mostram uma tendência de crescimento linear da função-objetivo (WCETT total), coerente pois com o aumento da demanda espera-se um aumento dos ETTs de cada enlace e, conseqüentemente, um aumento do tempo esperado de duração do trajeto total dos pacotes desde a origem até o destino final. Nota-se também que os resultados obtidos com a utilização da meta-heurística SA são ligeiramente melhores (em relação à meta-heurística VNS), justificável pelo fato do SA ter obtido soluções melhores para a capacidade dos

Tabela 6.6 - Resultados obtidos com variação do tamanho do pacote

| λ (Mb/s) | WCETT total | |
|------------------|-------------|----------|
| | SA (ms) | VNS (ms) |
| 1 | 0,1465 | 0,1480 |
| 2 | 0,2931 | 0,2961 |
| 4 | 0,7091 | 0,7168 |
| 8 | 1,4181 | 1,4337 |
| 16 | 2,8362 | 2,8673 |
| 32 | 5,6725 | 5,7346 |

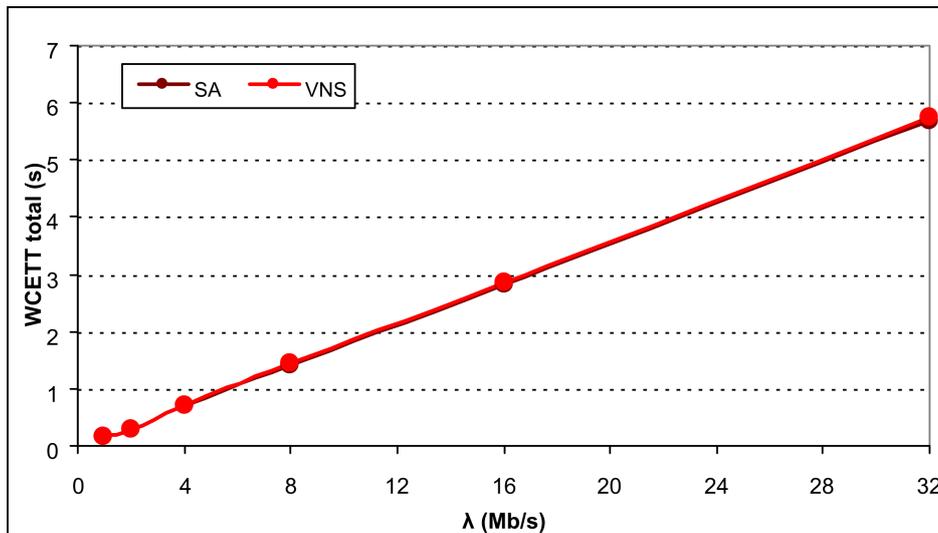


Figura 6.4 - Evolução do WCETT total em função do tamanho do pacote

enlaces em relação ao VNS.

6.4.2 Alteração do valor estimado para os ETXs

Deve-se esperar que o aumento do valor estimado para os ETXs implique em um crescimento próximo do linear do WCETT total, uma vez que trata-se de um parâmetro diretamente proporcional ao ETT. A Tabela 6.7 e a Figura 6.5 confirmam esta tendência, considerando o valor do ETX como sendo o mesmo para todos os enlaces.

Como o ETX está diretamente relacionado à perda de pacotes (Equação (2.1)), o aumento do ETX acarreta uma maior perda de pacotes, o que influencia também no tempo de transmissão para a entrega dos pacotes, conforme mostra a Figura 6.5.

Tabela 6.7 - Resultados obtidos com variação dos ETXs

| $(1 - q_{loss})$ | χ | WCETT total | |
|------------------|--------|-------------|---------|
| | | SA (s) | VNS (s) |
| 0,10 | 10,00 | 1,3920 | 1,4063 |
| 0,15 | 6,67 | 0,9280 | 0,9375 |
| 0,20 | 5,00 | 0,6960 | 0,7031 |
| 0,25 | 4,00 | 0,5568 | 0,5625 |
| 0,30 | 3,33 | 0,4640 | 0,4688 |
| 0,35 | 2,86 | 0,3977 | 0,4018 |
| 0,40 | 2,50 | 0,3480 | 0,3516 |
| 0,45 | 2,22 | 0,3093 | 0,3125 |
| 0,50 | 2,00 | 0,2784 | 0,2813 |
| 0,55 | 1,82 | 0,2531 | 0,2557 |
| 0,60 | 1,67 | 0,2320 | 0,2344 |
| 0,65 | 1,54 | 0,2142 | 0,2163 |
| 0,70 | 1,43 | 0,1989 | 0,2009 |
| 0,75 | 1,33 | 0,1856 | 0,1875 |
| 0,80 | 1,25 | 0,1740 | 0,1758 |
| 0,85 | 1,18 | 0,1638 | 0,1654 |
| 0,90 | 1,11 | 0,1547 | 0,1563 |
| 0,95 | 1,05 | 0,1465 | 0,1480 |

6.4.3 Alteração do coeficiente de reatividade da rede

A Tabela 6.8 e a Figura 6.6 mostram os resultados obtidos em função da variação do coeficiente de reatividade da rede.

Tabela 6.8 - Resultados obtidos com variação do coeficiente de reatividade

| β | WCETT total | |
|---------|-------------|---------|
| | SA (s) | VNS (s) |
| 0,0 | 0,1517 | 0,1291 |
| 0,2 | 0,3494 | 0,3397 |
| 0,4 | 0,5663 | 0,5503 |
| 0,6 | 0,7832 | 0,7609 |
| 0,8 | 1,0000 | 0,9715 |
| 1,0 | 1,3321 | 1,2983 |

Deve-se esperar que quanto menor o valor de β , menor seja o tempo de transmissão fim a fim na WMN, uma vez que com isto aumenta-se o peso das características pró-ativas da rede. Esta tendência foi confirmada pelos resultados

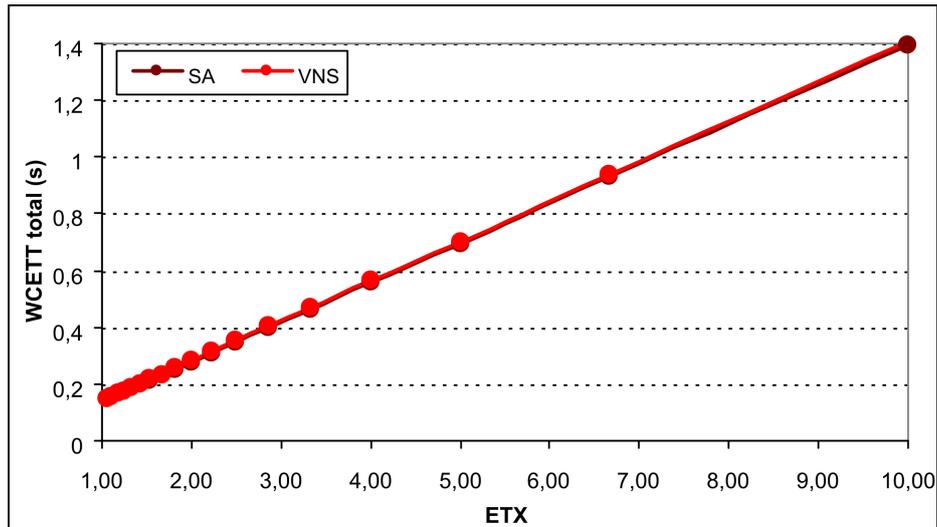


Figura 6.5 - Variação do WCETT total em função dos ETXs

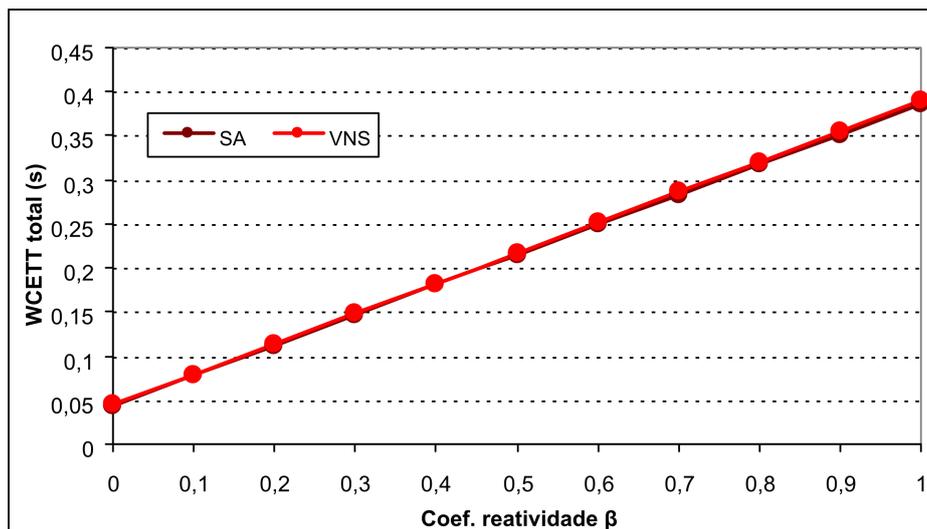


Figura 6.6 - Variação do WCETT total em função do coeficiente de reatividade

obtidos, conforme mostra a Figura 6.6.

6.4.4 Alteração do coeficiente de ruído da rede

A Tabela 6.9 e a Figura 6.7 mostram os resultados obtidos em função da variação do coeficiente de ruído da rede.

Os resultados obtidos mostram que, para a faixa de ruído testada (de 10^{-8} a 10^{-3}), não foi possível identificar uma variação significativa sobre o WCETT total da rede, qualquer que seja a meta-heurística utilizada.

Tabela 6.9 - Resultados obtidos com variação do coeficiente de ruído

| σ (W) | WCETT total | |
|--------------|-------------|---------|
| | SA (s) | VNS (s) |
| 10^{-3} | 0,1459 | 0,1536 |
| 10^{-4} | 0,1553 | 0,1481 |
| 10^{-5} | 0,1525 | 0,1500 |
| 10^{-6} | 0,1509 | 0,1449 |
| 10^{-7} | 0,1464 | 0,1517 |
| 10^{-8} | 0,1497 | 0,1508 |

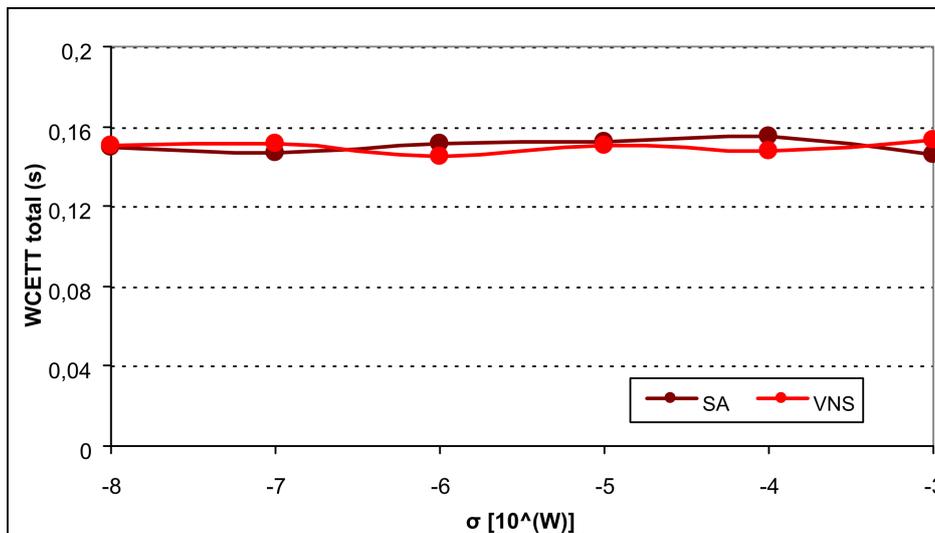


Figura 6.7 - Variação do WCETT total em função do coeficiente de ruído

6.4.5 Alteração do nível máximo de potência dos APs

O nível máximo de potência suportado por um AP também pode influenciar no tempo de transmissão fim a fim da rede. A Tabela 6.10 e a Figura 6.8 mostram os resultados obtidos em função da variação do nível máximo de potência dos APs.

O fato de permitir que haja o aumento de potência não reflete na diminuição do WCETT total, conforme ilustrado pelos resultados. Isto pode ser justificado pela presença de maior interferência causada por APs vizinhos, podendo comprometer a qualidade da transmissão. Deve-se ressaltar que, além de não ser vantajoso, um nível de potência muito alto pode causar um grande consumo de energia e prejudicar a saúde dos indivíduos mais próximos do AP emissor.

Tabela 6.10 - Resultados obtidos com variação do nível máximo de potência dos APs

| P_n (mW) | WCETT total | |
|------------|-------------|----------|
| | SA (ms) | VNS (ms) |
| 100 | 0,1451 | 0,1439 |
| 200 | 0,1461 | 0,1482 |
| 300 | 0,1522 | 0,1474 |
| 400 | 0,1467 | 0,1443 |
| 500 | 0,1477 | 0,1502 |
| 600 | 0,1478 | 0,1416 |
| 700 | 0,1458 | 0,1446 |
| 800 | 0,1496 | 0,1532 |
| 900 | 0,1479 | 0,1526 |
| 1000 | 0,1482 | 0,1483 |

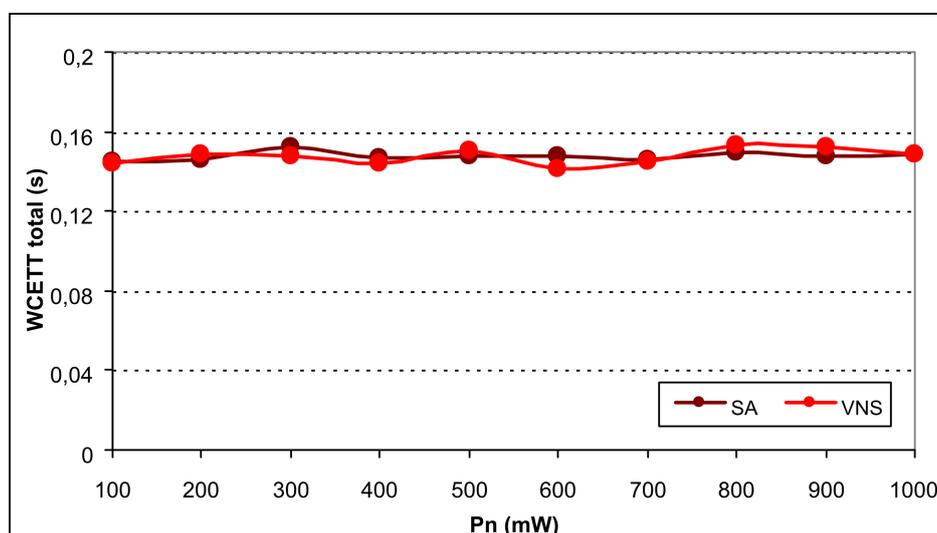


Figura 6.8 - Variação do WCETT total em função do nível máximo de potência dos APs

6.5 Resultados com a alteração da topologia da rede

Os testes apresentados anteriormente foram realizados alterando-se alguns parâmetros do modelo de otimização proposto, mas sem alterar os parâmetros que definem a infra-estrutura da rede. Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos pela heurística híbrida proposta para cenários em que os valores dos parâmetros de infraestrutura da rede, mostrados na Tabela 6.1, são alterados.

A Tabela 6.11 mostra os resultados obtidos em função do aumento da dimensão da grade da rede. Para estes testes manteve-se o raio de 50 m de distância entre os APs que estão conectados entre si (APs de nós vizinhos da grade). Manteve-

se também o número máximo de canais por AP ($C = 3$), mas alterou-se o número de sessões de transmissão por enlace (S , que passou de 6 para 4). Nesta tabela, são mostrados os valores obtidos para o WCETT total, o ETT médio e o tempo computacional (TC). Considera-se, para esta série de testes, que a origem e o destino dos dados de uma sessão são os APs que compõem uma diagonal.

Tabela 6.11 - Resultados obtidos a partir de diferentes dimensões da grade

| Grade | Enlaces por sessão | WCETT total (s) | | ETT médio (ms) | | TC (s) | |
|---------|--------------------|-----------------|--------|----------------|-------|--------|------|
| | | SA | VNS | SA | VNS | SA | VNS |
| 4 × 4 | 6 | 0,2496 | 0,2509 | 2,240 | 2,273 | 91 | 90 |
| 6 × 6 | 10 | 0,5181 | 0,5251 | 2,820 | 2,860 | 290 | 273 |
| 8 × 8 | 14 | 0,9993 | 0,9978 | 3,199 | 3,224 | 586 | 753 |
| 12 × 12 | 30 | 2,4932 | 2,3799 | 3,719 | 3,746 | 2326 | 2721 |

Os resultados obtidos mostram um rápido crescimento do valor da função-objetivo e do tempo computacional com o aumento da dimensão da grade. Este resultado é coerente, pois com o aumento da grade aumenta o esforço computacional (aumenta o número de APs e o número de caminhos na rede) e aumenta o tamanho dos caminhos em cada sessão e, conseqüentemente, o tempo de transmissão fim a fim da rede. Assim, espera-se que os valores dos ETTs aumentem, assim como WCETT total. As Figuras 6.9 e 6.10 mostram a evolução dos valores obtidos para o WCETT total e para o ETT médio, em função do aumento da grade da rede.

Pelos gráficos ilustrados pelas Figuras 6.9 e 6.10, percebe-se que o resultado de ambas as abordagens para a heurística híbrida obtiveram soluções muito próximas, sendo a heurística com SA melhor para os exemplares com grades menores e a heurística com VNS melhor para cenários com grades maiores. Ambas as abordagens para a heurística híbrida apresentaram tendências quanto ao aumento da grade: o WCETT total possui uma curva que apresentou crescimento semelhante à curva exponencial, enquanto que o ETT médio apresentou uma curva semelhante à curva logarítmica como representação do crescimento de seus valores ao se aumentar a grade da WMN.

Em relação ao tempo computacional levado para obter uma solução, quase todo o tempo foi consumido pelas meta-heurísticas. O tempo computacional levado pelo *solver* para obter a solução do WCETT total foi bem inferior em relação às meta-heurísticas, não sendo considerado separadamente. A Figura 6.11 mostra

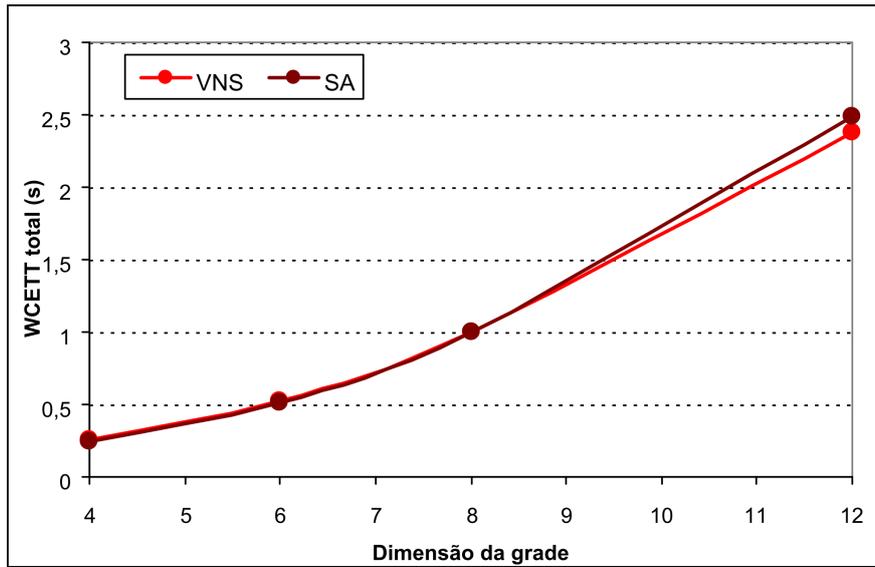


Figura 6.9 - Variação do WCETT total em função do aumento da grade

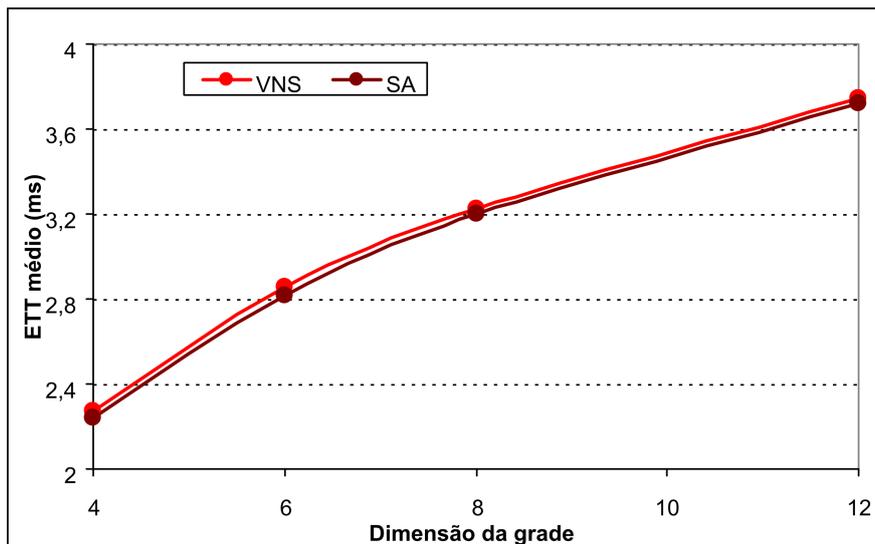


Figura 6.10 - Variação do ETT médio em função do aumento da grade

a evolução do tempo computacional ao se aumentar a dimensão da grade.

6.5.1 Resultados com a alteração da quantidade de sessões

Alguns testes foram realizados sobre a WMN de configuração padrão, alterando-se apenas a quantidade de sessões sobre a rede. O objetivo desta série de testes é verificar o comportamento da rede quando aumenta-se o tráfego de dados sobre ela. As sessões foram criadas aleatoriamente, com uma quantidade

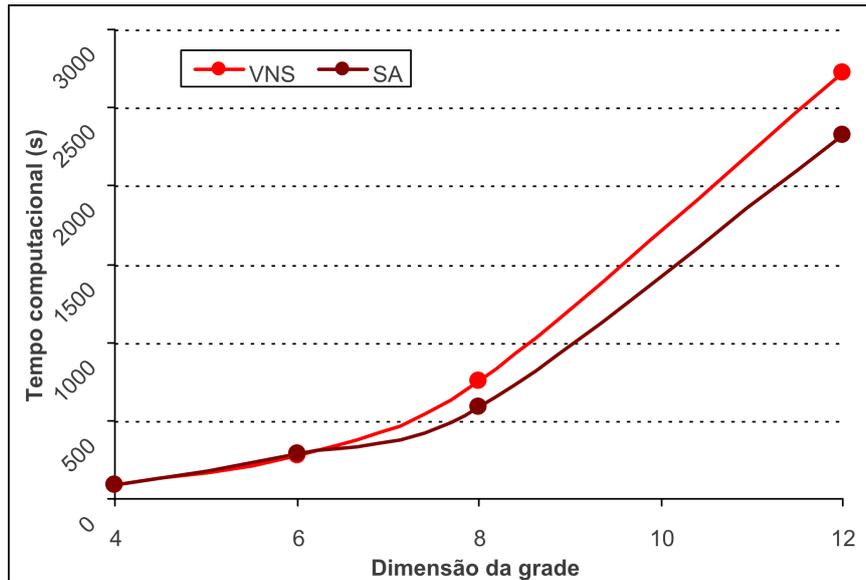


Figura 6.11 - Evolução dos valores do ETT médio em função do aumento da dimensão da grade

fixa de enlaces, onde a origem dos dados é sempre o *gateway* indicado pela Figura 6.1.

Foram executados testes com exemplares de rede que contém uma quantidade variada de sessões sobre a rede. A Tabela 6.12 mostra os resultados obtidos para o WCETT total, para cada um dos casos em que se altera a quantidade de sessões. A Figura 6.12 mostra o gráfico que mostra a variação dos valores do WCETT total quando se acrescenta a quantidade de sessões na rede.

Tabela 6.12 - Resultados obtidos ao alterar a quantidade de sessões na rede

| Sessões | WCETT total | |
|---------|-------------|---------|
| | SA (s) | VNS (s) |
| 4 | 0,1039 | 0,1090 |
| 8 | 0,2077 | 0,2183 |
| 12 | 0,3806 | 0,4038 |
| 16 | 0,4913 | 0,5144 |
| 24 | 0,6082 | 0,6377 |

Pelos resultados obtidos, nota-se um crescimento aproximadamente linear do WCETT total com o aumento da quantidade de sessões da rede. Os testes mostraram também que a heurística com SA apresentou resultados melhores em

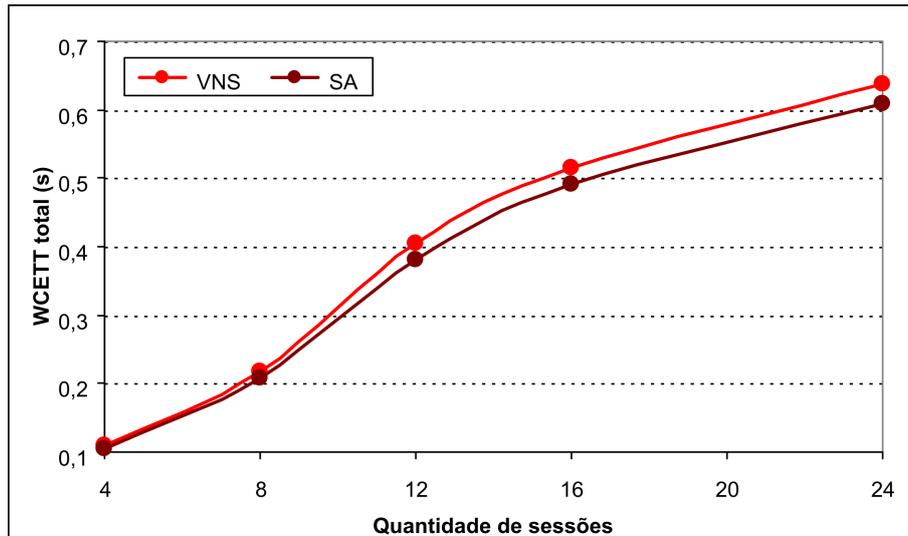


Figura 6.12 - Evolução dos valores do WCETT total em função do aumento de sessões

todos os casos em relação à heurística com o VNS.

6.6 Simulação com o *Network Simulator 3*

Os resultados obtidos pelo algoritmo heurístico proposto também foram comparados com valores extraídos a partir do modelo de simulação proposto no Capítulo 5. Esta comparação tem a finalidade de verificar se os resultados obtidos para o modelo de otimização proposto são aceitáveis, uma vez que ainda não há modelos de otimização na literatura que visam minimizar o WCETT total de uma WMN. É importante enfatizar que o simulador NS-3 não possui o cálculo do ETT e, conseqüentemente, do WCETT. Neste sentido, foram incluídos métodos para estimativa de ambos os parâmetros.

Os valores obtidos pelo modelo de otimização proposto são comparados com os valores de métricas de tempo obtidas por meio de um algoritmo implementado na linguagem de programação C++, utilizando bibliotecas do simulador NS-3. A Tabela 6.13 mostra os parâmetros considerados no processo de simulação da rede.

Os testes foram realizados de modo a comparar os resultados obtidos pela heurística proposta (para ambos os algoritmos SA e VNS, usados para a solução do subproblema de maximização da capacidade dos enlaces) em função do aumento da grade. A simulação foi executada 20 vezes em cada caso. Para os testes realizados, são ilustrados apenas os valores médios em cada caso. Os

Tabela 6.13 - Valores dos parâmetros de simulação

| Parâmetro | Descrição | Valor | Unidade |
|-----------|---|-------|---------|
| d_{mn} | Distância entre os APs m e n | 50 | m |
| T | Tempo total de transmissão de dados na simulação | 900 | s |
| V | Intervalo de tempo entre a entrega de dois pacotes consecutivos | 10 | ms |
| λ | Tamanho dos pacotes | 1024 | bytes |

desvios-padrão dos WCETT total e do ETT médio não apresentaram diferenças significativas durante as execuções do simulador para estes exemplares. A Tabela 6.14 mostra os valores do ETT médio e do WCETT total, obtidos pela heurística proposta e pelo algoritmo de simulação, além do tempo computacional da simulação.

Tabela 6.14 - Resultados obtidos pela simulação

| Dimensão | WCETT total (s) | | | ETT médio (ms) | | |
|----------|-----------------|--------|--------|----------------|-------|-------|
| | SA | VNS | NS-3 | SA | VNS | NS-3 |
| 3 × 3 | 0,1020 | 0,1075 | 0,1277 | 1,894 | 1,999 | 1,354 |
| 4 × 4 | 0,2492 | 0,2585 | 0,3054 | 2,261 | 2,358 | 1,598 |
| 5 × 5 | 0,3512 | 0,3593 | 0,6548 | 2,546 | 2,605 | 4,049 |

A ilustração dos dados comparativos estão presentes graficamente pela Figura 6.13, mostrando a evolução do crescimento da função-objetivo em relação a cada um dos modelos apresentados.

O quadro comparativo mostra que ambas as estratégias para a heurística híbrida apresentaram valores para o WCETT total inferiores se comparados aos dados obtidos pelo modelo de simulação. Estes resultados mostram que a heurística híbrida é capaz de propor uma configuração de rede que possa melhorar a transmissão da rede. No entanto, a heurística híbrida não considera detalhes de configuração de parâmetros de funcionamento da rede, dado que a simulação considera configurações como o tipo de tecnologia que cada camada utiliza, detalhes de protocolos, entre outros. Outro fator que é levado em conta nesta comparação é que a simulação calcula dinamicamente a perda de pacotes, diferentemente da heurística, que trata os valores para os ETXs como parâmetros para obtenção das métricas, uma vez que a heurística considera em 0,95 a pro-

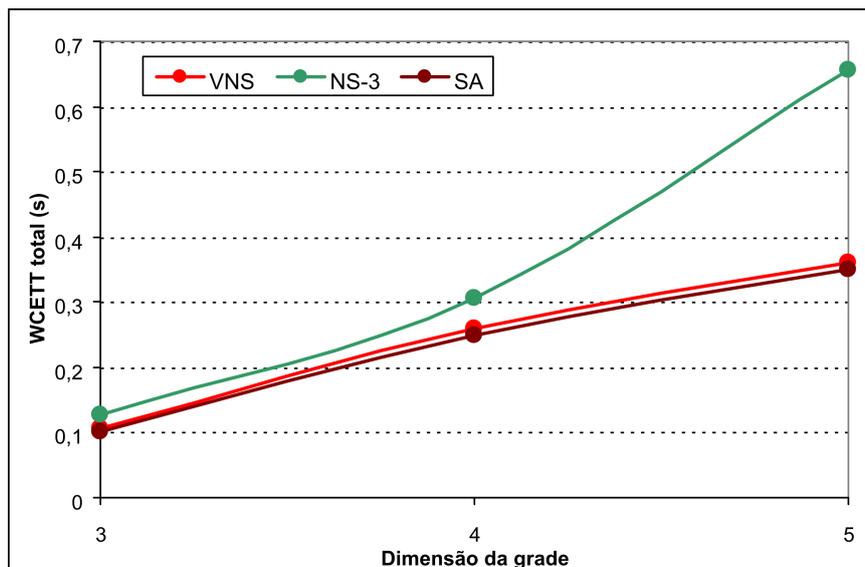


Figura 6.13 - Evolução da função-objetivo em cada um dos modelos propostos

babilidade de sucesso nas transmissões.

Em relação ao tempo computacional, foram computados o tempo que cada algoritmo levou para obter os valores da função-objetivo. O tempo computacional para cada uma das abordagens da heurística híbrida são apresentados na Tabela 6.15. A Figura 6.14 mostra a evolução do tempo computacional em função da dimensão da grade.

Tabela 6.15 - Tempo computacional por amostragem entre os modelos propostos

| Grade | SA (s) | VNS (s) |
|-------|--------|---------|
| 3 × 3 | 21 | 22 |
| 4 × 4 | 61 | 62 |
| 5 × 5 | 136 | 132 |

Pelos resultados apresentados, nota-se que as duas heurísticas apresentam tempos computacionais bem próximos. A abordagem com SA foi melhor para as grades 3 × 3 e 4 × 4, enquanto a abordagem com VNS foi melhor para a grade 5 × 5. O modelo de simulação executado pelo computador em que os testes foram realizados não conseguiu apresentar soluções compatíveis para grades maiores do que 5 × 5.

O teste do simulador com grade 6 × 6, por exemplo, consumiu, em média, um

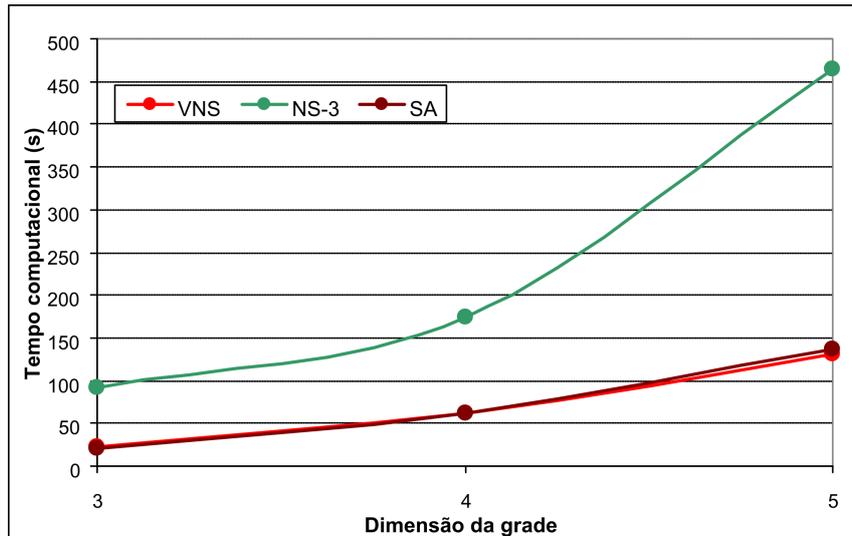


Figura 6.14 - Evolução do tempo computacional para cada um dos modelos propostos

tempo computacional de 6248 segundos por amostragem. Além disso, os resultados para esta grade (com o WCETT total médio igual a 110,74) não são compatíveis com os resultados obtidos pelas heurísticas (0,5181 com SA e 0,5251 com VNS). Isto pode ser justificado pelo fato de os protocolos de roteamento utilizados (AODV e OLSR) não serem otimizados pelo NS-3.

A modelagem matemática proposta nesta tese determina o ETT em cada enlace e, conseqüentemente, o WCETT. O simulador NS-3 foi utilizado para mostrar se a estimativa dos ETTs e do WCETT total obtidos pela heurística híbrida proposta são válidos em cenários realísticos. Pelos resultados apresentados pode-se constatar que os resultados são válidos para grades até 5×5 .

7 CONCLUSÕES

7.1 Conclusões do trabalho

A expansão do uso de redes sem fio tem exigido a criação de técnicas para aprimorar sua utilização e garantir a satisfação dos usuários com o serviço oferecido. Garantir a qualidade de serviço aos usuários, principalmente com a demanda cada vez maior de dados de áudio e vídeo, exige um bom planejamento da rede sem fio, com a instalação da quantidade e da localização adequada dos dispositivos de acesso (APs). No entanto, em alguns lugares a instalação destes dispositivos é uma tarefa difícil, devido a fatores como falta de infraestrutura, não disponibilidade de locais adequados, dificuldades para expandir a área de cobertura, dentre outros.

A rede sem fio em malha (WMN) é uma opção interessante para a oferta de redes sem fio em localidades nas quais é difícil a instalação de APs. Como uma WMN requer uma quantidade muito menor de gateways em relação às redes sem fio tradicionais, as WMNs exigem menos infraestrutura para expandir a área de cobertura da rede e servir a um número maior de usuários. Mesmo em residências, as WMNs estão sendo bastante utilizadas devido ao baixo custo e facilidade de instalação.

A utilização de serviços multimídia por meio de dispositivos sem fio exige que a rede esteja muito bem configurada, pois atrasos significativos na entrega de dados de áudio e vídeo podem comprometer a qualidade das transmissões multimídia. Em WMNs, uma boa configuração é difícil de ser obtida, pois o roteamento dos pacotes de dados precisa levar em conta os enlaces entre APs para todo o trajeto entre o gateway de origem e o dispositivo de destino. Recomenda-se, neste caso, que métricas específicas de roteamento sejam usadas para quantificar o nível de qualidade da rede.

A maioria dos trabalhos da literatura especializada visam maximizar a vazão (*throughput*). No entanto, esta não é uma métrica suficiente para avaliação de dados multimídia. Como se trata de tráfego que privilegie dados multimídia, é importante também que se leve em conta o tempo em que estes pacotes de dados cheguem até os clientes. Além disso, para o caso das WMNs, a vazão é uma métrica importante para determinar o roteamento dos dados até os respectivos destinos, o que concilia a sua importância juntamente com as métricas de tempo.

Uma métrica que deve ser considerada para avaliar a QoS com respeito ao roteamento medindo o tempo total de transmissão é o WCETT. Esta métrica depende do tempo esperado de transmissão (ETT). Como o WCETT trata o tráfego de dados multimídia, considerando o tempo de transmissão sobre uma WMN, o WCETT se posiciona como uma métrica muito importante para avaliar a qualidade do serviço. A vazão e as métricas de tempo estão relacionadas direta ou indiretamente no cálculo do WCETT. O WCETT, portanto, é uma métrica de QoS mais adequada para tratar do tráfego de dados multimídia, em que exige-se um menor tempo de transmissão sobre uma WMN.

A partir da necessidade de oferecer serviços de qualidade para os usuários da rede, é importante que o funcionamento da rede seja otimizado, de forma que os serviços oferecidos sejam os melhores possíveis, dentro das condições oferecidas pela rede. Para isto, utilizaram-se modelos *cross-layer*, de modo a considerar diversos fatores relacionados à arquitetura em camadas de rede. Estes modelos buscam otimizar uma métrica de QoS, de acordo com as necessidades da rede.

Este trabalho contribui para o aprimoramento do planejamento de WMNs ao apresentar um novo modelo de otimização que objetiva obter uma configuração da rede que minimize o tempo fim a fim de transmissão dos pacotes (WCETT). O modelo configura os níveis de potência que os enlaces consomem, a capacidade de transmissão dos enlaces, os canais a serem utilizados pelos APs e o fluxo de dados em cada uma das sessões da rede. Para a resolução deste modelo, o trabalho propõe uma heurística que divide o problema em dois subproblemas: a maximização da capacidade de transmissão dos enlaces e a minimização dos ETTs em cada enlace.

O modelo proposto nesta tese é um modelo de Programação Não-Linear que contém equações não-convexas – mais complexas de serem resolvidas por métodos analíticos. Por se tratar de um modelo em que existe a dificuldade de se utilizar métodos exatos, foi proposta uma heurística híbrida para encontrar uma solução satisfatória para o problema, dividindo-o em dois subproblemas: a capacidade de transmissão dos enlaces e a extração dos ETTs.

O subproblema da capacidade de transmissão dos enlaces se trata de um modelo de Programação Não-linear, como forma de avaliar a eficiência ao se obter um conjunto de capacidades de enlaces, a ser utilizada posteriormente sobre o restante do modelo como parâmetros fixos. Para encontrar uma solução satisfatória, aplicaram-se meta-heurísticas conhecidas na literatura: os algoritmos

Simulated Annealing (SA) e *Variable Neighborhood Search* (VNS). Apesar da grande dificuldade de obter a solução ótima, por se tratar de um subproblema de otimização contínua, ambas as meta-heurísticas foram utilizadas para obter soluções satisfatórias para o subproblema não-linear em tempo computacional hábil.

A utilização das meta-heurísticas permitiu que o WCETT total fosse obtido por um modelo de Programação Linear Inteira Mista, capaz de ser resolvido por um *solver*. Ao utilizar um *solver*, criou-se a possibilidade de se obter, a partir da parametrização das capacidades de transmissão dos enlaces, uma solução ótima para o subproblema da extração do WCETT total, como estratégia para oferecer uma solução mais refinada.

O modelo proposto neste trabalho para a minimização do WCETT não possui similares na literatura. Assim, para verificar os resultados obtidos a partir do modelo proposto utilizou-se um algoritmo para simular o comportamento da rede em cenários realísticos.

Para extrair o WCETT dentro de um cenário realístico, utilizou-se a ferramenta de simulação de redes NS-3. O NS-3 reproduz as principais funcionalidades de uma WMN, o que permitiu construir uma simulação para estimar o WCETT de modo aproximado, uma vez que o protocolo específico para o WCETT ainda não foi implementado para o simulador. Desta forma, a aproximação do WCETT total foi feita utilizando protocolos de roteamento disponíveis pelo simulador, como o protocolo pró-ativo OLSR e o protocolo reativo AODV. Ambos os protocolos podem estimar o ETT, cujo o WCETT é calculado em função dos ETTs da rede.

Portanto, o modelo proposto trouxe como contribuição o tratamento de métricas de roteamento específicas para WMN por modelos *cross-layer* de otimização. O modelo mostrou a relação entre as métricas utilizadas pelas camadas de rede e medidas próprias para WMNs, como o ETT e o WCETT. ETT e WCETT também são métricas de tempo e que são importantes em se tratando de transmissões com vários enlaces (multissalto).

Uma das contribuições esperadas por este trabalho era a viabilização da obtenção de valores satisfatórios para o modelo *cross-layer* proposto. Embora uma das dificuldades para obter uma solução satisfatória estava justamente nas restrições que envolviam capacidades de transmissão de enlaces, a estratégia de buscar uma solução para o conjunto de capacidades simplificou a obtenção de

soluções que atendessem às exigências das demandas da rede, ao utilizar estratégias rápidas para a obtenção de soluções, que são as meta-heurísticas com a Programação Linear Inteira Mista.

As meta-heurísticas utilizadas para obter a solução para o subproblema da capacidade de enlaces mostraram-se em termos de tempo computacional e acurácia na solução. Com o desvio-padrão em torno de 1%, as soluções apresentadas pelas meta-heurísticas comportaram-se satisfatoriamente, uma vez que se tratou de um problema de otimização com variáveis contínuas, o que dificultou ainda mais na busca de um possível ótimo global.

A estratégia utilizada pela heurística híbrida também viabilizou a obtenção de uma solução para o WCETT total, sendo que, a grande dificuldade para estimar esta métrica estava justamente no cálculo de seus principais componentes: os ETTs. Foi visto que, para obter os valores dos ETTs, a grande dificuldade era obter tais métricas, devido a sua não-linearidade. Como as capacidades de transmissão dos enlaces foram obtidas previamente pelas meta-heurísticas, a obtenção dos ETTs tornou-se mais fácil dentro do modelo de Programação Matemática, dependendo apenas dos resultados obtidos pela atribuição de canais.

A segunda parte da heurística híbrida, por ser uma simplificação do modelo *cross-layer* em termos de tamanho e da quantidade de equações não-lineares, obteve soluções rápidas em relação ao tempo computacional ao utilizar o *solver*. Esperava-se, com isto, obter valores satisfatórios que permitissem reproduzir uma forma em que os APs pudessem ser configurados, com base na solução do modelo, para se aplicarem em WMNs reais.

Como este modelo veio com o objetivo de ser uma ferramenta de planejamento da rede, necessitou-se a verificação das métricas de roteamento – principal objetivo deste modelo *cross-layer* – frente a uma rede realística. Como existe a dificuldade de instalar redes reais para testes, então utilizou-se um algoritmo de simulação específico para a extração das métricas ETT e WCETT.

O modelo de simulação utilizado permitiu que houvesse a comparação dos valores obtidos pela heurística híbrida com o funcionamento de uma WMN em tempo real. Como visto nos resultados, a configuração proposta pela heurística híbrida apresentou melhorias de tempo para a rede em relação a autoconfiguração sugerida pelo simulador.

A partir do que foi apresentado neste trabalho, é possível concluir a eficiência dos modelos propostos, com base nos resultados obtidos. A primeira parte da heurística, composta pelo subproblema da capacidade de transmissão dos enlaces, foi solucionada pelas meta-heurísticas SA e VNS, obtendo, dentro de várias execuções, pouca diferença entre os valores obtidos. A solução do subproblema de capacidade de transmissão dos enlaces permitiu que o restante do modelo fosse solucionado como um modelo de Programação Linear Inteira Mista, em que um *solver* obteve uma solução rápida para o restante do problema.

Este estudo também permitiu a aplicabilidade deste modelo no planejamento de WMNs, sobretudo, em casos em que a instalação é complexa, devido a condições de ambiente e de infraestrutura. A partir do que foi explorado, será possível determinar quais tipos de melhorias poderão ser propostas para contribuir para a qualidade do serviço da rede. Pretende-se, com a pesquisa efetuada, auxiliar na difusão desta tecnologia a localidades que possuem infraestrutura precária, como localidades remotas na Amazônia, de modo a oferecer uma rede sem fio de qualidade sem prejudicar o ambiente.

7.2 Sugestões de trabalhos futuros

Como trabalho futuro sugere-se o estudo de outras estratégias de solução para o modelo de otimização proposto nesta tese. Uma ideia seria implementar uma heurística para resolver o modelo como um todo, em vez de usar a divisão do problema em subproblemas. Esta estratégia facilitaria a implantação da heurística como um algoritmo embarcado nos APs da rede, de modo a permitir que decisões sobre roteamento de pacotes seja feito dinamicamente. Esta estratégia também poderia ser utilizada para comparar os resultados obtidos pela heurística híbrida proposta nesta tese.

Outra sugestão seria modificar o modelo de otimização proposto para calcular outras métricas específicas para WMNs, tais como *Medium Time Metric* (MTM), *Metric of Interference and Channel switching* (MIC) e *Multi-Channel Routing Metric* (MCR) (PARISSIDIS et al., 2009). Além disso, sugere-se implementar no simulador NS-3 os algoritmos de extração do WCETT e dessas outras métricas de roteamento específicas para WMNs.

Outras sugestões de trabalhos futuros seriam explorar as aplicações de métricas específicas para o planejamento de redes em malha, comparando-as com as métricas tradicionais de rede sem fio, como o atraso médio, a variação do atraso

(*jitter*) e a perda de pacotes, além de utilizar outras estratégias para a capacidade de enlaces, como por exemplo, maximizar a capacidade mínima dos enlaces.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PARISSIDIS, Georgios and Karaliopoulos, Merkourios and Baumann, Rainer and Spyropoulos, Thrasyvoulos and Plattner, Bernhard. In: . [S.l.: s.n.]. 21

AKYILDIZ, I. F.; WANG, X.; WANG, W. Wireless mesh networks: a survey. **Computer Networks ISDN Systems**, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, v. 47, n. 4, p. 445–487, mar. 2005. ISSN 0169-7552. 2, 11, 12

ANDREEV, K.; BOYKO, P. Ieee 802.11s mesh networking ns-3 model. In: WORKSHOP ON NS-3. **Proceedings...** 2011. Disponível em: <<http://www.nsnam.org/workshops/wns3-2010/dot11s.pdf>>. 8, 49

BAHL, P.; ADYA, A.; PADHYE, J.; WALMAN, A. Reconsidering wireless systems with multiple radios. **SIGCOMM Comput. Commun. Rev.**, ACM, New York, NY, USA, v. 34, n. 5, p. 39–46, out. 2004. ISSN 0146-4833. 2

BANSAL, M.; TRIVEDI, A. Cross-layer optimization for fair end-to-end rate allocation in wmns with mimo links. **Transactions on Emerging Telecommunications Technologies**, v. 25, n. 5, p. 496–506, 2014. ISSN 2161-3915. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/ett.2584>>. 19

BLANK, A. G. **TCP/IP Foundations**. [S.l.]: Sybex, 2004. 12

BORGES, V. C. M.; CURADO, M.; MONTEIRO, E. A cross-layer routing scheme for scalable triple play service in wireless mesh networks. In: 19TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER COMMUNICATIONS AND NETWORKS, 2010, Zurich. **Proceedings...** Zurich: IEEE, 2010. p. 1–6. 21

CAMPISTA, M.; ESPOSITO, P.; MORAES, I.; COSTA, L.; DUARTE, O.; PASSOS, D.; ALBUQUERQUE, C.; SAADE, D.; RUBINSTEIN, M. Routing metrics and protocols for wireless mesh networks. **Network, IEEE**, v. 22, n. 1, p. 6 –12, jan.-feb. 2008. ISSN 0890-8044. 23, 34

CHAFEKAR, D.; KUMAR, V. A.; MARATHE, M. V.; PARTHASARATHY, S.; SRINIVASAN, A. Cross-layer latency minimization in wireless networks with sinr constraints. In: 8TH ACM INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MOBILE AD HOC NETWORKING AND COMPUTING, 2007, Montreal. **Proceedings...** New York: ACM, 2007. (MobiHoc '07), p. 110–119. ISBN 978-1-59593-684-4. 17

CLAUSEN, T.; JACQUET, P.; ADJIH, C.; LAOUITI, A.; MINET, P.; MUHLETHALER, P.; QAYYUM, A.; VIENNOT, L. **Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)**. 2003. Network Working Group. Disponível em: <<https://hal.inria.fr/inria-00471712>>. 20

CORANA, A.; MARCHESI, M.; MARTINI, C.; RIDELLA, S. Minimizing multimodal functions of continuous variables with the “simulated annealing” algorithm. **ACM Trans. Math. Softw.**, ACM, New York, NY, USA, v. 13, n. 3, p. 262–280, set. 1987. ISSN 0098-3500. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/29380.29864>>. 25

COUTO, D. S. J.; AGUAYO, D.; MORRIS, R.; BICKET, J. **A High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Routing**. 2003. 36

CPLEX, I. I. V12.5: User's manual for cplex. **International Business Machine Corporation**, 2010. 48

DRAVES, R.; PADHYE, J.; ZILL, B. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks. In: 10TH ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE COMPUTING AND NETWORKING. **Proceedings...** New York, NY, USA: ACM, 2004. (MobiCom '04), p. 114–128. ISBN 1-58113-868-7. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1023720.1023732>>. 2, 21, 22, 23, 34, 35, 36, 38, 52, 57

ESPOSITO, P.; CAMPISTA, M.; MORAES, I.; COSTA, L.; DUARTE, O.; RUBINSTEIN, M. Implementing the expected transmission time metric for olsr wireless mesh networks. In: 1ST IFIP WIRELESS DAYS, 2008, 2008, Dubai. **Proceedings...** Dubai: IEEE, 2008. p. 1–5. 21

FU, F.; SCHAAR, M. van der. Learning for cross-layer optimization. **Proceedings of CIP**, v. 71, n. 2, p. 69–74, 2008. 12, 14

GENETZAKIS, M.; SIRIS, V. A contention-aware routing metric for multi-rate multi-radio mesh networks. In: SENSOR, MESH AND AD HOC COMMUNICATIONS AND NETWORKS, 2008. SECON '08. 5TH ANNUAL IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY CONFERENCE ON, 2008, San Francisco. **Proceedings...** San Francisco: IEEE, 2008. p. 242–250. 21

GUPTA, P.; KUMAR, P. R. The capacity of wireless networks. **Information Theory, IEEE Transactions on**, v. 46, n. 2, p. 388–404, Mar 2000. ISSN 0018-9448. 24

Haidar, M.; Ghimire, R.; Al-Rizzo, H.; Akl, R.; Chan, Y. Channel assignment in an IEEE 802.11 WLAN based on signal-to-interference ratio. In: ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, 2008. CCECE 2008. CANADIAN CONFERENCE ON, 2008, Niagara Falls. **Proceedings...** Niagara Falls: IEEE, 2008. p. 001169–001174. ISSN 0840-7789. 17

Hansen, P.; Mladenovic, N.; Brimberg, J.; Pérez, J. A. M. Variable neighborhood search. In: Gendreau, M.; Potvin, J.-Y. (Ed.). **Handbook of Metaheuristics**. [S.l.]: Springer US, 2010, (International Series in Operations Research & Management Science, v. 146). p. 61–86. 26

Hansen, P.; Mladenovic, N.; Pérez, J. M. Variable neighbourhood search: methods and applications. **Annals of Operations Research**, Springer US, v. 175, n. 1, p. 367–407, 2010. ISSN 0254-5330. 26

Johansson, M.; Xiao, L. Cross-layer optimization of wireless networks using nonlinear column generation. **Wireless Communications, IEEE Transactions on**, v. 5, n. 2, p. 435–445, feb. 2006. 8, 15, 24, 57

Kesselheim, T. A constant-factor approximation for wireless capacity maximization with power control in the SINR model. In: TWENTY-SECOND ANNUAL ACM-SIAM SYMPOSIUM ON DISCRETE ALGORITHMS, 2011. **Proceedings...** SIAM, 2011. (SODA '11), p. 1549–1559. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2133036.2133156>>. 18

Khreishah, A.; Wang, C.-C.; Shroff, N. Cross-layer optimization for wireless multihop networks with pairwise intersession network coding. **Selected Areas in Communications, IEEE Journal on**, v. 27, n. 5, p. 606–621, 2009. ISSN 0733-8716. 18

Kirkpatrick, S.; Gelatt, C. D.; Vecchi, M. P. Optimization by simulated annealing. **Science**, v. 220, n. 4598, p. 671–680, 1983. 25

Korkmaz, T.; Zhou, W. On finding optimal paths in multi-radio, multi-hop mesh networks using WCETT metric. In: 2006 INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING. **Proceedings...** New York: ACM, 2006. (IWCMC '06), p. 1375–1380. ISBN 1-59593-306-9. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1143549.1143824>>. 23

Kovacević, D.; Mladenović, N.; Petrović, B.; Milošević, P. De-vns: Self-adaptive differential evolution with crossover neighborhood search for

continuous global optimization. **Computers & Operations Research**, v. 52, Part B, n. 0, p. 157 – 169, 2014. ISSN 0305-0548. Recent advances in Variable neighborhood search. Disponível em:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054813003602>.

26

LANEMAN, J.; TSE, D.; WORNELL, G. W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. **Information Theory, IEEE Transactions on**, v. 50, n. 12, p. 3062–3080, Dec 2004. ISSN 0018-9448. 17

LEE, J.-W.; MAZUMDAR, R.; SHROFF, N. Non-convex optimization and rate control for multi-class services in the internet. **Networking, IEEE/ACM Transactions on**, v. 13, n. 4, p. 827–840, 2005. ISSN 1063-6692. 25

LEE, M.; ZHENG, J.; KO, Y.-B.; SHRESTHA, D. Emerging standards for wireless mesh technology. **Wireless Communications, IEEE**, v. 13, n. 2, p. 56–63, april 2006. 12

LEE, S.-J.; GERLA, M. Aodv-br: backup routing in ad hoc networks. In: WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE, 2000, 1997, Chicago. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2000. v. 3, p. 1311–1316. ISSN 1525-3511. 21

LIAO, D.; ELHAKEEM, A. K. A cross-layer joint optimization approach for multihop routing in tdd-cdma wireless mesh networks. **Transactions on Emerging Telecommunications Technologies**, John Wiley & Sons, Ltd, v. 23, n. 1, p. 6–15, 2012. ISSN 2161-3915. Disponível em:
<http://dx.doi.org/10.1002/ett.1503>. xv, 19, 20

LIBERTI, L.; DRAZIC, M. Variable neighbourhood search for the global optimization of constrained ntps. In: GO WORKSHOP, 2008, Almeria. **Proceedings...** Almeria, 2005. v. 1, p. 18–22. 26

LIN, X.; SHROFF, N.; SRIKANT, R. A tutorial on cross-layer optimization in wireless networks. **Selected Areas in Communications, IEEE Journal on**, v. 24, n. 8, p. 1452 –1463, aug. 2006. ISSN 0733-8716. 14

LUKE, S. **Essentials of Metaheuristics**. second. Lulu, 2013. Disponível em:
[http://cs.gmu.edu/~sim\\$sean/book/metaheuristics/](http://cs.gmu.edu/~sim$sean/book/metaheuristics/). 26

MLADENOVIĆ, N.; DRAZIĆ, M.; KOVACEVIC-VUJČIĆ, V.; CANGALLOVIĆ, M. General variable neighborhood search for the continuous optimization.

European Journal of Operational Research, v. 191, n. 3, p. 753 – 770, 2008. ISSN 0377-2217. [26](#)

MLADENOVIC, N.; HANSEN, P. Variable neighborhood search. **Computers & Operations Research**, v. 24, n. 11, p. 1097 – 1100, 1997. ISSN 0305-0548. [26](#)

PARISSIDIS, G.; KARALIOPOULOS, M.; BAUMANN, R.; SPYROPOULOS, T.; PLATTNER, B. Routing metrics for wireless mesh networks. In: MISRA, S.; MISRA, S.; WOUNGANG, I. (Ed.). **Guide to Wireless Mesh Networks**. [S.l.]: Springer London, 2009, (Computer Communications and Networks). p. 199–230. ISBN 978-1-84800-908-0. [79](#)

PINHEIRO, B.; NASCIMENTO, V.; LOPES, R.; CERQUEIRA, E.; ABELEM, A. A fuzzy queue-aware routing approach for wireless mesh networks. **Multimedia Tools and Applications**, Springer US, v. 61, p. 747–768, 2012. ISSN 1380-7501. [21](#)

RAISINGHANI, V. T.; IYER, S. Cross-layer design optimizations in wireless protocol stacks. **Computer Communications**, v. 27, n. 8, p. 720 – 724, 2004. [12](#)

RANIWALA, A.; GOPALAN, K.; CHIUEH, T.-c. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks. **SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.**, ACM, New York, NY, USA, v. 8, n. 2, p. 50–65, abr. 2004. ISSN 1559-1662. Disponível em: <http://doi.acm.org/10.1145/997122.997130>. [6](#), [7](#), [20](#), [31](#)

SHABDANOV, S.; MITRAN, P.; ROSENBERG, C. Cross-layer optimization using advanced physical layer techniques in wireless mesh networks. **Wireless Communications, IEEE Transactions on**, v. 11, n. 4, p. 1622–1631, abril 2012. ISSN 1536-1276. [15](#), [18](#), [30](#), [57](#)

SHAKKOTTAI, S.; RAPPAPORT, T. S.; KARLSSON, P. C. Cross-layer design for wireless networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 41, n. 10, p. 74–80, 2003. [12](#)

SILVA, M. d. **Planejamento de redes em malha sem fio com atendimento a parâmetros de qualidade de serviço**. 81 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011-02-21 2011. [30](#)

SOUZA, M. J. F. Inteligência computacional para otimização. Notas de aula, Departamento de Computação, Universidade Federal de Ouro Preto. 2008.

Disponível em: <<http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/Disciplinas/InteligenciaComputacional/Introducao.pdf>>. 26

STYBLINSKI, M. A.; TANG, T.-S. Experiments in nonconvex optimization: Stochastic approximation with function smoothing and simulated annealing. **Neural Networks**, v. 3, n. 4, p. 467 – 483, 1990. ISSN 0893-6080. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/089360809090029K>>. 25

TANG, J.; XUE, G.; ZHANG, W. Cross-layer optimization for end-to-end rate allocation in multi-radio wireless mesh networks. **Wirel. Netw.**, Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA, USA, v. 15, n. 1, p. 53–64, jan. 2009. 5, 7, 15, 16, 23, 30, 34, 57

VERIKOUKIS, C.; Alonso Zárate, L. G.; GIAMALIS, T. Cross-layer optimization for wireless systems: an european research key challenge. **IEEE Communications Magazine**, IEEE-INST ELECTRICAL ELECTRONICS ENGINEERS INC, v. 47, n. 7, p. 2–3, 2005. 14

WEBER, S.; ANDREWS, J. G. Transmission capacity of wireless networks. **CoRR**, abs/1201.0662, 2012. 24

WU, Y.; CHIANG, M.; KUNG, S.-Y. Distributed utility maximization for network coding based multicasting: A critical cut approach. In: MODELING AND OPTIMIZATION IN MOBILE, AD HOC AND WIRELESS NETWORKS, 2006 4TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON, 2006. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2006. p. 1–6. 24

WU, Y.; KUNG, S.-Y. Distributed utility maximization for network coding based multicasting: a shortest path approach. **Selected Areas in Communications, IEEE Journal on**, v. 24, n. 8, p. 1475–1488, 2006. ISSN 0733-8716. 24

YAZDANPANA, M.; ASSI, C.; SHAYAN, Y. Cross-layer optimization for wireless mesh networks with smart antennas. **Computer Communications**, v. 34, n. 16, p. 1894 – 1911, 2011. 5, 15, 18, 30

YUAN, J.; LI, Z.; YU, W.; LI, B. A cross-layer optimization framework for multihop multicast in wireless mesh networks. **Selected Areas in Communications, IEEE Journal on**, v. 24, n. 11, p. 2092–2103, nov. 2006. 5, 7, 8, 15, 16, 17, 19, 23, 24, 30, 31, 32, 39, 41, 57

ZHANG, H.; ZHENG, Y.; KHOJASTEPOUR, M.; RANGARAJAN, S. Cross-layer optimization for streaming scalable video over fading wireless networks. **Selected Areas in Communications, IEEE Journal on**, v. 28, n. 3, p. 344–353, 2010. ISSN 0733-8716. [17](#)

IMPLEMENTAÇÃO DA EXTRAÇÃO DO WCETT NO NS-3

A.1 Configuração da rede

```
#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/network-module.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/wifi-module.h"
#include "ns3/mesh-module.h"
#include "ns3/mobility-module.h"
#include "ns3/mesh-helper.h"
#include "ns3/aodv-helper.h"
#include "ns3/olsr-helper.h"

#include <iostream>
#include <sstream>
#include <fstream>
#include <ctime>
#include <sys/time.h>

#include "ns3/flow-monitor-module.h"
#include "ns3/netanim-module.h"

using namespace ns3;
using namespace std;

NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("TestMeshScript");

int proto = 2; //1 = OLSR; 2 = AODV
int      m_xSize;
int      m_ySize;
float    ploss, texpis, bitsp, segun;
double   m_step;
double   m_randomStart;
double   m_totalTime;
double   m_packetInterval, Prss, offset;
uint32_t m_packetSize;
```

```

uint32_t  m_nIfaces;
bool      m_chan;
bool      m_pcap;
struct timeval timea, timeb;
std::string m_stack;
std::string m_root;
/// Lista dos APs
NodeContainer nodes;
/// Lista de todos os dispositivos
NetDeviceContainer meshDevices;
//Endereços das interfaces
Ipv4InterfaceContainer interfaces;
MeshHelper mesh;

void Configuracao(){
    m_xSize = 6;
    m_ySize = 6;
    m_step = 50.0; //50 m
    m_randomStart = 0.1;
    m_totalTime = 900.0;
    m_packetInterval = 0.01;//0.1;
    m_packetSize = 1024;
    m_nIfaces = 2;
    m_chan = true;
    m_pcap = false;
    m_stack = "ns3::Dot11sStack";
    m_root = "ff:ff:ff:ff:ff:ff";
    offset = 81;
    Prss = -50;
}

int main (int argc, char *argv[])
{
    gettimeofday(&timea, NULL);
    Packet::EnablePrinting();
    Configuracao();
}

```

A.2 Criação dos APs

```
nodes.Create (m_ySize*m_xSize);
YansWifiPhyHelper wifiPhy = YansWifiPhyHelper::Default ();

wifiPhy.Set("TxGain", DoubleValue(Prss));

YansWifiChannelHelper wifiChannel =
    YansWifiChannelHelper::Default();

wifiPhy.SetChannel (wifiChannel.Create());

mesh = MeshHelper::Default ();
if (!Mac48Address (m_root.c_str()).IsBroadcast ())
    mesh.SetStackInstaller (m_stack, "Root",
        Mac48AddressValue (Mac48Address (m_root.c_str ()))));
else
    mesh.SetStackInstaller (m_stack);

mesh.SetSpreadInterfaceChannels (MeshHelper::SPREAD_CHANNELS);

mesh.SetMacType ("RandomStart",
    TimeValue (Seconds(m_randomStart)));
mesh.SetNumberOfInterfaces (m_nIfaces);
meshDevices = mesh.Install(wifiPhy, nodes);
MobilityHelper mobility;
mobility.SetPositionAllocator("ns3::GridPositionAllocator",
    "MinX", DoubleValue (0.0), "MinY", DoubleValue (0.0),
    "DeltaX", DoubleValue (m_step),
    "DeltaY", DoubleValue (m_step),
    "GridWidth", UIntegerValue (m_xSize),
    "LayoutType", StringValue ("RowFirst"));
mobility.SetMobilityModel ("ns3::ConstantPositionMobilityModel");
mobility.Install (nodes);
```

A.3 Instalação de pilhas de protocolo

```
//-----Adicionando OLSR E AODV-----
```

```

OlsrHelper olsr;
AodvHelper aodv;
Ipv4StaticRoutingHelper staticRouting;

InternetStackHelper ternety;
if (proto == 1)
    ternety.SetRoutingHelper (olsr);
else
    ternety.SetRoutingHelper (aodv);
ternety.Install(nodes);

Ipv4AddressHelper address;
address.SetBase ("10.1.1.0", "255.255.255.0");
interfaces = address.Assign (meshDevices);

```

A.4 Instalação das aplicações

```

//-----APLICAÇÃO-UDP-----
UdpEchoServerHelper echoServer (m_ySize*m_ySize);
ApplicationContainer serverApps =
    echoServer.Install (nodes.Get (0));
serverApps.Start (Seconds (5.0));
serverApps.Stop (Seconds (m_totalTime));

UdpEchoClientHelper echoClient
    (interfaces.GetAddress (0), m_ySize*m_ySize);
echoClient.SetAttribute ("MaxPackets", UIntegerValue
    ((uint32_t)(m_totalTime*(1/m_packetInterval))));
echoClient.SetAttribute
    ("Interval", TimeValue (Seconds (m_packetInterval)));
echoClient.SetAttribute
    ("PacketSize", UIntegerValue (m_packetSize));
ApplicationContainer clientApps =
    echoClient.Install (nodes.Get (m_ySize*m_ySize - 1));
clientApps.Start (Seconds (5.0));
clientApps.Stop (Seconds (m_totalTime));

```

A.5 Execução e extração das métricas

```
Config::Connect("/NodeList/*/DeviceList*/$ns3::MeshPointDevice/
    ForwardTrace", MakeCallback (&ForwardTracedCallback));

FlowMonitorHelper flowmon;
Ptr<FlowMonitor> monitor = flowmon.InstallAll();

Simulator::Stop (Seconds(m_totalTime));
Simulator::Run ();

monitor->CheckForLostPackets ();
Ptr<Ipv4FlowClassifier> classifier =
    DynamicCast<Ipv4FlowClassifier>(flowmon.GetClassifier ());
std::map<FlowId, FlowMonitor::FlowStats> stats =
    monitor->GetFlowStats ();
taxis = 1;
for (std::map<FlowId, FlowMonitor::FlowStats>::const_iterator i
    = stats.begin (); i != stats.end (); ++i)
{
    Ipv4FlowClassifier::FiveTuple t =
        classifier->FindFlow (i->first);
    std::cout << "Flow " << i->first << " (" << t.sourceAddress <<
        " -> " << t.destinationAddress << ")\n";
    ploss = (float)(i->second.txBytes - i->second.rxBytes)/
        i->second.txBytes;
    std::cout << " Tx Bytes:  " << i->second.txBytes << "\n";
    std::cout << " Rx Bytes:  " << i->second.rxBytes << "\n";
    if (i->second.rxBytes > 1024)
    {
        taxis *= (1 - ploss);
        bitsp = (float)(8*i->second.rxBytes);
        segun = (float)((i->second.timeLastRxPacket.GetDouble() -
            i->second.timeFirstRxPacket.GetDouble())/1000000000);
        std::cout << " Bits per:  " << bitsp/segun << " Mb/s\n";
    }
}
}
```

```

ett = (1/taxis)*m_packetSize/(bitsp/segun);
std::cout << "\n***ETT: " << ett << "\n"; // ETX*pacote/band
wcett = (0.3)*4*2*(m_xSize - 1)*m_xSize*ett; // AODV
wcett = (0.7)*4*2*(m_xSize - 1)*m_xSize*ett; // OLSR
std::cout << "WCETT = " << wcett << "\n";

if (proto == 2)
    monitor->SerializeToXmlFile("aodv.xml", true, true);
else
    monitor->SerializeToXmlFile("olsr.xml", true, true);

Simulator::Destroy ();
gettimeofday(&timeb, NULL);
cout << "Tempo computacional: "
      << (timeb.tv_sec - timea.tv_sec) << " s" << endl;
return 0;

```

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o International Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.