

MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO CONJUNTA PARA A OBTENÇÃO DE WCETT EM REDES SEM FIO EM MALHA**Marlon da Silva****Nandamudi Lankalapalli Vijaykumar**
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
São José dos Campos – SP
{marlon.silva, vijay}@lac.inpe.br**Edson Luiz França Senne**Universidade Estadual Paulista – Campus de Guaratinguetá
Guaratinguetá – SP
elfsenne@feg.unesp.br**Diego Lisboa Cardoso****Carlos Renato Lisboa Francês**
Universidade Federal do Pará
Belém – PA
{diego, rfrances}@ufpa.br**RESUMO**

Devido a uma rede de computadores ser estruturada em camadas, existe a necessidade de explorá-las através de métodos de otimização para encontrar a configuração que otimize as medidas de desempenho, especialmente em redes sem fio em malha. Uma destas medidas é o WCETT (*Weighed Cumulative Expected Transmission Time*), que avalia ponderadamente os tempos de transmissão medidos em cada salto da rede. Este trabalho apresenta um modelo de Programação Linear Inteira Mista que minimiza o WCETT, sujeito a restrições encontradas em algumas camadas. Propõe-se uma heurística para obter os valores do modelo, decompondo-o em subproblemas, de acordo com cada camada utilizada.

PALAVRAS-CHAVE. Redes em malha sem fio, WCETT, Otimização cross-layer.**Área principal:** TEL&SI - PO em Telecomunicações e Sistemas de Informações; PM - Programação Matemática**ABSTRACT**

Due to networks are structured in layers, there is need of exploit it using optimization methods to find one configuration that optimizes the quality of service parameters, specially in wireless mesh networks. One of these metrics is WCETT (*Weighed Cumulative Expected Transmission Time*), where evaluates ponderously every time of each network hop. This paper presents a Mixed Integer Linear Programming model that minimizes WCETT, subject to constraints found in some network layers. It is proposed an heuristic to obtain metric values of model, using decomposition in subproblems, aggregated by each layer used in this model.

KEYWORDS. Wireless mesh networks, WCETT, Cross-layer optimization.**Main area:** TEL&SI - OR in Telecommunications and Information Systems; PM - Mathematical Programming

1. Introdução

Ultimamente, a utilização de redes sem fio sofreu um aumento significativo de adeptos devido ao acesso crescente a dispositivos portáteis, tais como *laptops*, *tablets* e telefones celulares, e à expansão da variedade de aplicações que exploram recursos multimídia de áudio e vídeo, como nas redes sociais, em aulas de educação a distância, na transmissão de videoconferências, e em operações remotas como, por exemplo, em aplicações de telemedicina. As redes sem fio em malha ou redes *mesh* (Akyldiz *et al.*, 2005) são uma boa alternativa quando há necessidade de ampliar a área de cobertura de uma rede sem fio sem elevar significativamente os custos de instalação e manutenção. Os principais equipamentos componentes de uma rede sem fio são conhecidos como pontos de acesso (ou APs – *Access Points*).

Numa rede *mesh*, os APs podem ser classificados como *gateways* ou como roteadores retransmissores. Os *gateways* são APs conectados à uma rede externa e proveem acesso a serviços externos de rede, como a Internet, por exemplo. Os demais APs são roteadores retransmissores, que se comunicam uns com os outros e com os *gateways* por meio de transmissão multissalto, estendendo a área de cobertura da rede sem fio e permitindo que serviços de rede sejam disponibilizados em lugares remotos. A Figura 1 mostra a representação de uma rede sem fio em malha.

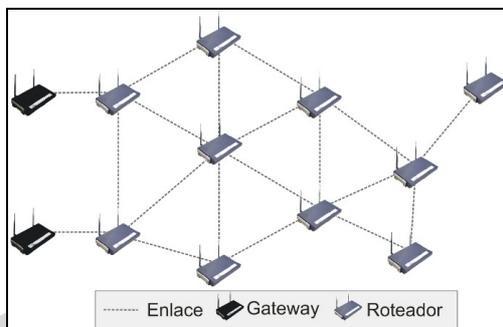


Figura 1 – Exemplo de uma rede sem fio em malha e seus principais componentes

A transmissão de pacotes multimídia em redes sem fio em malha é um grande desafio, pois para assegurar um nível adequado de qualidade, a rede precisa estar bem configurada de modo a reduzir os efeitos provocados por atrasos na transmissão de pacotes. O problema torna-se complexo porque, devido à arquitetura em camadas adotada para os protocolos de comunicação das redes de dados, a redução de atrasos envolve fatores que interagem entre si e que são relativos a diferentes camadas, como controle de fluxo, intensidade de sinal e largura de banda.

A principal vantagem da organização de redes em camadas está na modularidade dos protocolos de comunicação. Com a organização em camadas, o protocolo de cada camada pode ser descrito em termos de funcionalidades específicas, deixando os detalhes de execução e os parâmetros internos ocultos para as camadas restantes. Isto facilita a concepção dos protocolos de comunicação de cada camada, mas exige a interoperabilidade entre camadas. As tarefas de comunicação na rede são divididas entre as camadas, que se comunicam entre si. Cada camada fornece informações que suprem as funcionalidades de comunicação da rede, atendendo aos requisitos necessários para que exista a interação entre a rede e seus usuários (Blank, 2004).

Para assegurar a qualidade de transmissão em redes, os modelos de otimização exploram diversas métricas. A vazão (*throughput*) é uma das métricas mais exploradas (Yuan *et al.*, 2006; Johansson e Xiao, 2006; Yazdanpanah *et al.*, 2011; Shabanov *et al.*, 2012). Para a transmissão de pacotes multimídia em redes sem fio em malha, no entanto, busca-se explorar métricas relacionadas aos atrasos na transmissão multissalto dos pacotes.

Para a avaliação por salto, utilizam-se métricas como a contagem média por salto (ou ETX – *Expected Transmission Count*) e o tempo esperado por salto (ou ETT – *Expected Transmission Time*) (Draves *et al.*, 2004). Em termos de roteamento, a rede precisa ser avaliada em função do caminho que o pacote deverá percorrer até chegar ao cliente que o requisitou. A métrica WCETT (*Weighted Cumulative Expected Transmission Time*) calcula de forma

ponderada os ETTs na rede, ou seja, acumulados ao longo do caminho percorrido por um pacote. Esta métrica agrega características encontradas em protocolos de roteamento, como o OLSR (Lavén e Hjártquist, 2009).

Este trabalho tem por objetivo propor um modelo de otimização para minimizar o WCETT de uma rede sem fio em malha, porém, não é um cálculo trivial. Considerando que a capacidade de enlace seja fixa, o modelo é considerado de Programação Linear Inteira Mista, a fim de obter o menor WCETT possível, a fim de obter quanto flui e qual o tempo gasto por salto em cada uma das combinações entre canais, sessões e enlaces. Como forma de facilitar na resolução do modelo, propõe-se um algoritmo heurístico, que segrega o modelo de acordo com subproblemas classificados em função das diferentes funcionalidades de cada camada.

O trabalho está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 enumera os principais trabalhos referentes a modelos de otimização *cross-layer*, que servem como parâmetro para estruturação do modelo, bem como as métricas utilizadas especificamente para redes sem fio em malha. A Seção 3 apresenta a formulação matemática proposta para o problema abordado, bem como o algoritmo de solução proposto. Alguns resultados computacionais são apresentados na Seção 4. A Seção 5 apresenta as conclusões do trabalho e aponta direções para estudos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

O modelo apresentado neste trabalho possui como base a otimização *cross-layer* – aplicada em problemas específicos em redes de computadores, principalmente, em redes sem fio. Os modelos de otimização *cross-layer* visam tratar em um único modelo, problemas associados a camadas de rede que, por serem interdependentes, devem ser resolvidos conjuntamente (Lin *et al.*, 2006). Em geral, os modelos de otimização *cross-layer*, dentro de cenários realistas, são difíceis de serem resolvidos computacionalmente. É frequente a utilização de métodos aproximativos, como simulações e heurísticas, para encontrar soluções de modelos desta natureza (Johansson e Xiao, 2006; Fu e van der Schaar, 2008). Nesta seção, são revistos alguns trabalhos que aplicam a otimização *cross-layer* em redes sem fio e, em especial, a redes sem fio em malha.

Um dos problemas que precisam ser tratados em qualquer modelo de otimização em redes sem fio em malha refere-se à conectividade entre os APs. Esta conectividade é assegurada por um subproblema de controle de fluxo na camada de rede, que modela a retransmissão de dados pela tecnologia multissalto (Yuan *et al.*, 2006; Yazdanpanah *et al.*, 2011; Shabanov *et al.*, 2012; Tang *et al.*, 2009; Chatterjee *et al.*, 2012).

Em muitos modelos, o objetivo é maximizar a vazão da rede (*throughput*). Em Yuan *et al.* (2006), propõe-se um modelo de otimização para uma rede sem fio em malha que leva em conta as camadas física e de rede. Para resolver o modelo, o problema original é dividido em dois subproblemas: um subproblema de capacidade de transmissão do enlace na camada física e um subproblema de roteamento na camada de rede. A partir desta decomposição, o problema é resolvido por meio de um algoritmo primal-dual iterativo.

Em Tang *et al.* (2009), modelos de otimização *cross-layer* foram aplicados em uma rede sem fio em malha, sendo observadas quatro camadas: transporte, rede, enlace e física. Para a resolução dos modelos, cujo objetivo é avaliar a vazão e as respectivas taxas de transmissão da rede fim a fim – ou seja, avalia toda a trajetória dos pacotes, ao invés de avaliar um único salto – propôs-se a decomposição, para cada modelo, em subproblemas de atribuição de canais, seleção de modos de transmissão, controle de energia e alocação de taxas de transmissão. Os subproblemas de atribuição de canais e de controle de energia são resolvidos por meio de modelos de Programação Linear e de Programação Convexa (com base numa função-objetivo logarítmica), enquanto os subproblemas de seleção de modos de transmissão e de alocação de taxas são resolvidos por meio de algoritmos heurísticos.

A otimização em redes sem fio em malha fim a fim é estudada também em Liao e Elhakeem (2012), onde são analisadas métricas como a taxa de sucesso da entrega de pacotes (SPR – *Successful Packet Rate*) e o atraso dos pacotes. Nesta abordagem, o roteamento dos pacotes é coordenado pela camada de rede, o atraso, pela camada de enlace, e a interferência,

pela camada física. O modelo de otimização *cross-layer* busca encontrar o melhor desempenho para a rede a partir das métricas avaliadas, levando-se em conta a tecnologia do protocolo de acesso múltiplo por divisão de código (CDMA – *Code Division Multiple Access*). A tecnologia de múltipla entrada e múltipla saída (MIMO) em redes sem fio em malha é estudada em Bansal e Trivedi (2012). O modelo de otimização *cross-layer* é decomposto em um problema dual, obtendo os resultados a partir de um algoritmo iterativo, com base nos problemas de roteamento e de controle de potência. A obtenção destes resultados se dá em modelos de Programação Linear e Convexa, que alocam taxas proporcionais de vazão dos dados.

Pela revisão bibliográfica realizada, nota-se a dificuldade em encontrar valores ótimos para os modelos de otimização *cross-layer*, principalmente devido a não-linearidade dos modelos, o que tem levado à decomposição do problema original em subproblemas e à utilização de heurísticas. Nota-se também que os trabalhos não levaram em conta métricas específicas para redes sem fio em malha.

Devido à característica da tecnologia multissalto, algumas métricas são utilizadas especificamente para redes sem fio em malha. De acordo com o protocolo de roteamento adotado, diferentes métricas podem ser utilizadas, devido às características do protocolo. Um dos mais utilizados é o protocolo OLSR (*Optimized Link State Routing*), cuja característica é possuir a capacidade de retransmitir os pacotes de dados para seus vizinhos. A partir deste protocolo de roteamento, é possível a extração de algumas métricas específicas para redes sem fio em malha (Pinheiro *et al.*, 2012; Campista *et al.*, 2008).

Uma destas medidas é o ETX (Lavén e Hjártquist, 2009), que representa o número de vezes que um AP espera enviar ou reenviar um pacote para o receptor sem que o pacote seja corrompido durante a entrega. Esta métrica pode ser calculada a partir das probabilidades de perda de pacotes no envio (p_j^o) e no recebimento (p_j^d) do enlace j :

$$ETX_j = \frac{1}{(1-p_j^o)(1-p_j^d)} \quad (1)$$

Outra medida utilizada é o ETT, ou seja, o tempo médio esperado por salto. O ETT é utilizado para avaliar quanto tempo, em média, um pacote trafega por um enlace (Borges *et al.*, 2010). Dado um enlace j , o ETT pode ser calculado em função do ETX (Draves *et al.*, 2004; Genetzakis e Siris, 2008), a partir do tamanho do pacote λ_j e pela largura de banda b_j . O ETT permite avaliar o tempo médio gasto apenas entre dois saltos da rede, identificando se há um possível atraso na transmissão do pacote em um enlace da rede. Ambas as métricas são medidas em tempo de execução (Lavén e Hjártquist, 2009) e podem ser implementadas no protocolo OLSR (Esposito *et al.*, 2008). Desta forma, o ETT pode ser calculado como:

$$ETT_j = ETX_j \frac{\lambda_j}{b_j} \quad (2)$$

Como o ETT não leva em conta problemas de comunicação em um enlace, como a interferência provocada por elementos presentes no meio ou entre canais da rede, foi proposto o WCETT (Draves *et al.*, 2004), que mede o tempo acumulado dos saltos, levando em conta a possibilidade de mudança de canais durante a transmissão. O WCETT é definido em função do ETT acumulado ao longo de um subconjunto de enlaces que compõe um dado caminho μ que o pacote percorre:

$$WCETT_j = (1-\gamma) \sum_{j \in \mu} ETT_j + \gamma \max_{1 \leq i \leq c} X_i \quad (3)$$

onde ETT_j é o ETT calculado a partir do enlace j , $\gamma \in [0, 1]$ é um coeficiente de ajuste de ponderação pré-definido (Campista *et al.*, 2008), i é um dos c canais disponíveis e X_i é definido pela fórmula:

$$X_i = \sum_{j \in \mu \text{ no canal } i} ETT_j \quad (4)$$

onde X_i é a somatória do ETT de todos os enlaces do caminho que trafegam pelo canal i .

A vantagem de se utilizar o WCETT como métrica de QoS (*Quality of Service*) da rede está no fato de que todo o caminho percorrido pelo pacote é avaliado (Campista *et al.*, 2008). Para avaliar o WCETT é utilizado o protocolo de roteamento para redes sem fio em malha – o MR-LQSR (*Multi-Radio Link-Quality Source Routing*), que combina características de roteamento de protocolos pró-ativos, que já possuem o caminho pré-determinado, como no caso do protocolo OLSR, com estratégias sob demanda (reativas), que funcionam em torno das condições oferecidas pelos saltos da rede (Draves *et al.*, 2004; Tang *et al.*, 2009; Campista *et al.*, 2008), além de levar em conta interferências entre canais da rede.

Entretanto, modelos que avaliam o WCETT no ponto de vista de otimização *cross-layer* não foram explorados na literatura. Um dos motivos é o fato de modelos analíticos não avaliarem métricas de tempo em redes sem fio, devido a estes modelos tratarem mais especificamente a vazão de dados entre camadas. Outro fator importante a ser observado é que métricas específicas para redes sem fio em malha não serem analisadas num ponto de vista de modelagem entre camadas, dado que os estudos relativos à modelagem *cross-layer* neste tipo de rede não analisam as medidas específicas, mas sim, métricas comuns em redes sem fio.

3. O Modelo Proposto

Com o objetivo de encontrar o menor valor para o WCETT em uma rede sem fio em malha, propõe-se um modelo de otimização que leva em consideração características importantes em uma transmissão em redes sem fio, como o controle de fluxo, a atribuição de canais e a largura de banda da rede. Estas características estão atreladas às camadas mais baixas da arquitetura em camadas da rede e, no caso, envolvem as camadas física, de enlace e de rede. Como diferentes camadas estão sendo levadas em consideração, isto caracteriza tal modelo como de otimização *cross-layer*.

3.1. Elementos do modelo

Para a formulação do modelo, considera-se a rede sem fio em malha representada por um grafo (N, L) , como mostra a Figura 2, onde $N = \{1, \dots, n\}$ representa o conjunto de APs (roteadores e *gateways*) da rede e $L = N \times N = \{1, \dots, \ell\}$ é o conjunto de enlaces.

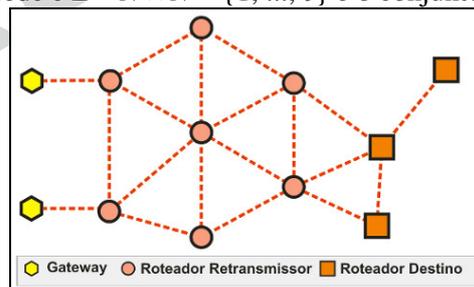


Figura 2 – Rede *mesh* representada como um grafo

Seja $C = \{1, \dots, c\}$ o conjunto de canais a serem utilizados pelos enlaces na rede. A utilização de diferentes canais é importante para que não haja interferência entre diferentes dados que trafegam em uma mesma frequência (Silva *et al.*, 2012). Considera-se também o conjunto de sessões de transmissão de dados $S = \{1, \dots, s\}$, em que cada sessão é representada por uma tripla (n_o, n_d, λ_k) , onde n_o é o AP de origem e n_d é o AP de destino e λ_k ($k \in S$) é o tamanho (em bytes) do pacote que trafegará naquela sessão. Como forma de distinguir o direcionamento do fluxo de dados, considera-se conjunto $L_n = L_n^+ \cup L_n^-$ o conjunto de enlaces que estão conectados ao AP $n \in N$, onde L_n^+ é o subconjunto de enlaces que partem do AP n e L_n^- , o subconjunto de enlaces onde o AP n é o receptor.

O modelo de otimização proposto agrega grupos de restrições associados a

subproblemas que envolvem diferentes camadas. O objetivo do modelo é minimizar o WCETT, considerando todas as sessões de transmissão de dados na rede, os respectivos enlaces e os canais utilizados de uma rede sem fio em malha. Para o controle de fluxo, deve ser assegurado que haja a comunicação entre APs, através da transmissão multissalto – tarefa coordenada pela camada de rede (Yuan *et al.*, 2006), responsável por definir a rota da qual os pacotes de dados irão trafegar.

Para a formulação do modelo consideram-se as seguintes variáveis:

- f_{ij}^k , que representa o fluxo de dados que trafega em cada enlace $j \in L$, utilizando o canal $i \in C$ em cada sessão $k \in S$;
- $x_{ij}^k = 1$, se o canal $i \in C$ for utilizado pelo enlace $j \in L$ dentro da sessão $k \in S$; caso contrário, $x_{ij}^k = 0$;
- τ_{ij}^k , que representa o ETT de cada enlace $j \in L$ que trafega pelo canal $i \in C$ na sessão $k \in S$;
- d_i , que representa o valor máximo a ser encontrado dentre os canais utilizados na rede, onde $i \in C$.

Acompanhando as variáveis, são estabelecidos alguns parâmetros:

- κ_j , que representa a capacidade de transmissão do enlace $j \in L$, definida a partir das restrições de largura de banda;
- χ , que representa o ETX, que será tratado como um parâmetro, dado que o cálculo dele é probabilístico (Draves *et al.*, 2004);
- C_{max} é o máximo de canais que um AP poderá utilizar, onde $C_{max} \leq c$;
- T , que é o tempo máximo tolerado para uma transmissão por salto.

3.2. Modelo de Programação Linear Inteira Mista

Com tais elementos, neste trabalho propõe-se o seguinte modelo de Programação Matemática para minimização do WCETT:

$$\min \sum_{i=1}^c \left[(1-\gamma) \sum_{j=1}^{\ell} \sum_{k=1}^s \tau_{ij}^k + \gamma d_i \right] \quad (5)$$

Sujeito à:

$$d_i \geq \sum_{j=1}^{\ell} \sum_{k=1}^s \tau_{ij}^k \quad \forall i \in C \quad (6)$$

$$\sum_{p \in L_{n+}} \sum_{i=1}^c f_{ip}^k - \sum_{q \in L_{n-}} \sum_{i=1}^c f_{iq}^k = 0 \quad \forall k \in S, n \in N - \{n_o, n_d\} \quad (7)$$

$$\left| \sum_{p \in L_{n+}} \sum_{i=1}^c f_{ip}^k - \sum_{q \in L_{n-}} \sum_{i=1}^c f_{iq}^k \right| = \lambda_k \quad \forall k \in S, n \in \{n_o, n_d\} \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^c x_{ij}^k \leq 1 \quad \forall j \in L, k \in S \quad (9)$$

$$\sum_{j \in L_n} \sum_{k=1}^s x_{ij}^k \leq C_{max} \quad \forall i \in C \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^s x_{ij}^k \leq 1 \quad \forall j \in L, i \in C \quad (11)$$

$$\sum_{j \in L_n} \sum_{i=1}^c x_{ij}^k \leq \ell_n \quad \forall k \in S \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^s f_{ij}^k \leq \kappa_j \quad \forall j \in L \quad (13)$$

$$f_{ij}^k \leq \kappa_j x_{ij}^k \quad \forall i \in C, j \in L, k \in S \quad (14)$$

$$\tau_{ij}^k = \chi \frac{\lambda_j}{\kappa_j} x_{ij}^k \quad \forall i \in C, j \in L, k \in S \quad (15)$$

$$0 \leq \tau_{ij}^k \leq T \quad \forall i \in C, j \in L, k \in S \quad (16)$$

$$f_{ij}^k \geq 0 \quad \forall i \in C, j \in L, k \in S \quad (17)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad \forall i \in C, j \in L, k \in S \quad (18)$$

A função-objetivo (5) corresponde ao cálculo do WCETT, de acordo com a equação (3), a fim de encontrar o valor mínimo para a métrica. Baseada na mesma equação (3), o termo máximo dentre os ETTs de um canal é representado na restrição (6), pelas variáveis d_i . A restrição (7) assegura que o fluxo de dados recebidos por um AP retransmissor será o mesmo fluxo de dados enviados. Já a restrição (8) aponta que, para um determinado AP n que seja de origem ou destino da sessão, o fluxo será igual ao tamanho do pacote de dados a ser trafegado na sessão k . Tais condições garantem o balanceamento do fluxo de dados, caracterizando a propriedade multissalto da rede sem fio em malha.

Além disso, é muito importante que seja definida uma atribuição entre os canais da rede, de forma que não haja conflitos entre canais que trafegam numa mesma frequência de sinal. A limitação de um único canal por enlace é definido pela restrição (9). A inequação (10) delimita a quantidade máxima de canais que devem trafegar em um dispositivo; não podendo ser maior que a quantidade de enlaces que estão conectados em um AP, $L_n = L_{n+} \cup L_{n-}$. Na equação (11), um enlace j trafegando pelo canal i deve ser atribuído a uma sessão. O número total de enlaces que estão conectados em um dado AP n , representado por ℓ_n , deve ser igual ao número de enlaces atribuídos aos canais da rede, representado pela equação (12).

As restrições de largura de banda servem para aprimorar o fluxo da rede (Yazdanpanah *et al.*, 2011), caracterizando a otimização *cross-layer*. Na restrição (13), o fluxo total de dados em um enlace não poderá ser maior do que sua capacidade de transmissão, enquanto que a restrição (14) determina se o fluxo de dados de esteja trafegando no enlace esteja atribuído a um determinado canal numa dada sessão. Como τ_{ij}^k representa o ETT de uma transmissão, de acordo com a Equação (2), cada ETT é igual ao produto entre uma taxa χ , que representa o ETX do enlace, a razão entre o tamanho do pacote (dado por λ_j) e a capacidade do enlace, de acordo com a restrição (15). As restrições (16), (17) e (18) delimitam os valores atribuídos às variáveis de decisão.

3.3. Algoritmo heurístico

No modelo ilustrado na subseção anterior, a restrição (15) aponta o cálculo do ETT em função apenas do conjunto de variáveis x_{ij}^k . Entretanto, a equação é linear devido à presença do valor do parâmetro λ_k – que representa uma aproximação para a utilização das variáveis f_{ij}^k . Uma vez utilizadas as variáveis de fluxo na equação do ETT, o modelo tenderia a ser não-linear, o que dificultaria a obtenção da solução do modelo.

Além disso, modelos de otimização *cross-layer* tendem a ser computacionalmente ineficazes para resolver problemas com uma quantidade elevada de variáveis (Yazdanpanah *et al.*, 2011). Para uma solução aproximada do problema propõe-se o algoritmo heurístico mostrado na Figura 3. Este algoritmo decompõe o problema em dois subproblemas: a atribuição de canais e o controle de fluxo.

O subproblema de atribuição de canais tem por objetivo encontrar uma combinação de canais que favoreça a transmissão de dados sem que haja interferência entre eles e que possa encontrar o valor máximo de transmissão dentre os canais, a partir de parâmetros pré-

estabelecidos. Com base no esquema de atribuição de canais, o subproblema de controle de fluxo tem por objetivo encontrar o menor valor para o WCETT da rede a partir das condições de fluxo da rede e da capacidade de cada enlace, em função do ETT de cada enlace.

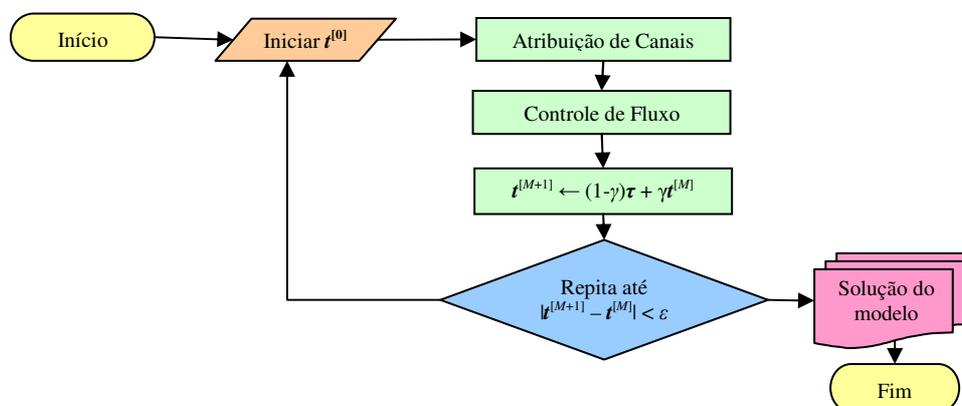


Figura 3 – Algoritmo heurístico para a solução aproximada do problema

3.3.1. Subproblema de atribuição de canais

Para ser feita a decomposição do modelo, divide-se a função-objetivo (5) em duas parcelas, onde cada parcela será utilizada como uma função-objetivo em cada subproblema. Esta decomposição será importante para que o cálculo do problema seja facilitado, de modo a reduzir o esforço computacional.

Uma nova função-objetivo é agregada a partir da parcela da somatória dos valores d_i da função-objetivo do problema original (5) juntamente com a restrição (6), compondo uma nova função, onde são estabelecidos parâmetros iniciais $t_{ij}^{k[0]} \neq 0$. A partir desta nova equação, é constituído o subproblema de atribuição de canais, classificado como um modelo de Programação Inteira, cujas variáveis de decisão x_{ij}^k são utilizadas. Este subproblema é resolvido inicialmente por reduzir uma restrição do modelo, que está diretamente relacionada aos canais da rede e, além das variáveis x_{ij}^k tornarem parâmetros na restrição (15). Logo, o modelo é definido pelas seguintes equações:

$$K_c = \max \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^{\ell} \sum_{i=1}^c t_{ij}^{k[M]} x_{ij}^k \quad (19)$$

Sujeito à

Restrições (9), (10), (11), (12) e (18)

A única equação não incluída no modelo original é a função-objetivo do subproblema, definida pela equação (19), cujo objetivo é maximizar a soma dos ETTs dos enlaces de acordo com os canais disponíveis. O modelo de Programação Inteira retornará como resultado uma combinação de enlaces atribuídos a diferentes canais, em diferentes sessões. Uma vez obtidos os valores das variáveis x_{ij}^k , a próxima etapa do algoritmo é resolver o subproblema de controle de fluxo, agregado com as restrições de largura de banda.

3.3.2. Subproblema de controle de fluxo

A partir dos valores encontrados no subproblema de atribuição de canais, o próximo passo é estabelecer os valores para o controle de fluxo de rede. Além de definir o valor máximo dentre os canais para o ETT com ganho máximo de canal (definido pelo conjunto de variáveis τ_{ij}^k), a decomposição do problema de atribuição de canais também define os valores das variáveis binárias x_{ij}^k , tornando-as coeficientes da restrição (15). O subproblema de controle de fluxo é definido da seguinte forma:

$$K_f = \min(1 - \gamma) \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^{\ell} \sum_{i=1}^c \tau_{ij}^k \quad (20)$$

Sujeito à

Restrições (7), (8), (13), (16) e (17)

$$f_{ij}^k \leq \kappa_j x_{ij}^k \quad \forall i \in C, j \in L, k \in S \quad (14)$$

$$\tau_{ij}^k = \chi \frac{\lambda_j}{\kappa_j} x_{ij}^k \quad \forall i \in C, j \in L, k \in S \quad (15)$$

A função-objetivo (20) reúne a soma de todos os ETTs da rede, juntamente com o valor da função-objetivo encontrado no subproblema de atribuição de canais. Outra diferença presente neste subproblema é que x_{ij}^k são considerados parâmetros, cujos valores são compostos pela solução obtida pelo subproblema de atribuição de canais. Neste trabalho, considera-se a capacidade de enlace κ_j como valores fixos, não considerando possíveis ruídos provocados por interferências do sinal externo, a serem explorados em trabalhos futuros.

3.3.3. Composição da solução

Ao final do processo de resolução dos subproblemas do modelo, o último passo é atualizar o valor dos parâmetros t_{ij}^k , uma vez que estes são atualizados e utilizados novamente como parâmetros para a nova resolução do problema de atribuição de canais. A equação de atualização dos valores de ETT é dada por:

$$t_{ij}^{k[M+1]} \leftarrow \gamma_{ij}^{k[M]} + (1 - \gamma) \tau_{ij}^k \quad (21)$$

onde M representa o passo do algoritmo iterativo. Repete-se o processo, até que haja uma convergência de valores, isto é, quando $|t_{ij}^{k[M+1]} - t_{ij}^{k[M]}| < \varepsilon$, onde ε é um limiar de aproximação.

A convergência se dá ao passo em que os valores de t_{ij}^k se aproximam a cada iteração, de acordo com os valores atribuídos a γ e aos resultados das variáveis nos subproblemas.

4. Resultados Computacionais

O algoritmo foi aplicado em uma pequena rede hipotética, baseada no exemplar utilizado em Yuan *et al.* (2006), contendo $n = 12$ APs, onde um deles é o *gateway*, 8 são roteadores que retransmitem os dados para outros roteadores e três são os roteadores de destino dos dados. Entre os APs, existem $\ell = 18$ enlaces, responsáveis por trafegar três sessões ($s = 3$). Os pontos foram aplicados em uma área de 200×200 m², que representa um bairro residencial, localizado em Pindamonhangaba, Brasil, conforme ilustra a Figura 4.



Figura 4 – Mapa da rede em malha instalada no bairro. (Fonte: Google Maps)

O algoritmo foi implementado na linguagem de programação C, utilizando as

bibliotecas do ambiente CPLEX. Nos testes realizados, utiliza-se como configuração padrão os parâmetros apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na configuração padrão.

| Parâmetro | Valor (inicial) |
|---------------|---------------------------------|
| κ_j | 54 Mb/s |
| χ | $1/(0.3 \times 0.7) = 4.761905$ |
| C_{max} | 4 canais |
| T | 1000 ms |
| ε | 10^{-5} |
| γ | 0.3 |
| λ_k | 4 Mb/s |

Com base nos parâmetros apresentados acima, executou-se a heurística, juntamente com o modelo de Programação Linear Inteira Mista, a fim de comparar os resultados, considerando os dados adotados para os parâmetros, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados obtidos pela configuração padrão.

| Iteração | WCETT (ms) | ETT médio (ms) |
|--------------|------------------|-----------------|
| 1 | 51.000000 | 0.546914 |
| 2 | 27.892594 | 0.370210 |
| 5 | 18.880705 | 0.357977 |
| 8 | 17.996639 | 0.352766 |
| 11 | 17.989615 | 0.352735 |
| Ótimo | 17.989434 | 0.352734 |

Os resultados apresentados na tabela acima mostram que a heurística converge para um valor próximo ao valor ótimo, logo em poucas iterações, neste caso, em apenas 11 iterações. O tempo computacional medido é muito próximo do valor do modelo original – o que torna a heurística uma alternativa para utilizá-la, por exemplo, em problemas em que existam modelos não-lineares para medir a capacidade em função de possíveis ruídos de transmissão, como o SINR (a ser explorados em trabalhos futuros).

Outros resultados foram explorados no modelo, a fim de medir o comportamento da rede em função do aumento ou diminuição dos parâmetros pré-estabelecidos na rede, baseado nos valores da configuração padrão, presentes na Tabela 1. A Tabela 3 ilustra diferentes execuções do algoritmo, alterando alguns parâmetros da configuração padrão e obtendo os valores da função-objetivo (em milissegundos) da quantidade máxima de canais, da constante γ , do valor máximo de fluxo no enlace permitido e da capacidade máxima do enlace, respectivamente.

Tabela 3 – Outros resultados obtidos, com a alteração de parâmetros da rede.

| Qtde | C_{max} | γ | | λ_k | | κ_j | |
|------|-----------|----------|-----------|-------------|------------|------------|-----------|
| | WCETT | Valor | WCETT | Valor | WCETT | Valor | WCETT |
| 3 | 19.989421 | 0 | 19.047636 | 4* | 13.439173 | 27 | 26.878310 |
| 4* | 19.047627 | 0.3* | 13.439173 | 8 | 26.878310 | 54* | 13.439173 |
| 5 | 19.047623 | 0.7 | 5.961205 | 16 | 53.756657 | 108 | 6.719587 |
| 6 | 19.047623 | 1 | 0.352743 | 32 | 107.513276 | 216 | 3.359774 |

* Adotados como padrão nos testes realizados

Os resultados apresentados na tabela acima mostram que não há uma diferença significativa na redução do WCETT, acrescentando-se a quantidade máxima de canais na rede, uma vez que, em cenários reais, uma quantidade próxima de 3 canais (Silva *et al.*, 2012) já é suficiente para que não haja interferência entre canais. Percebe-se que houve uma redução

significativa nos valores de WCETT ao aumentar os valores da constante γ , sendo reduzidos os valores dos ETTs que trabalham de forma pró-ativa e acrescentando-se os valores que tratam a rede sob demanda. Os valores da capacidade diminui inversamente proporcional o valores do WCETT ao aumentar-se os valores do parâmetro κ_p , enquanto que o WCETT cresce diretamente proporcional ao aumentar-se o fluxo máximo dos enlaces, representado por λ_k .

5. Conclusões

Este trabalho apresentou uma abordagem para a minimização do tempo médio de transmissão acumulado ponderado (WCETT) em uma rede sem fio em malha, do ponto de vista das camadas de rede. Foi proposto um modelo de otimização *cross-layer*, em que buscou-se encontrar um conjunto de métricas utilizadas em diferentes camadas da rede de modo a minimizar o WCETT. Diante do esforço computacional para executar este modelo até a otimalidade, propôs-se uma heurística para determinar um valor satisfatório para o problema.

Como próximos passos do trabalho, propõe-se melhorar a formulação apresentada considerando a capacidade de transmissão do enlace como variável, adotando um modelo de interferência como o SINR (Chafekar et al., 2007), o que implicará na inclusão de restrições não-lineares no modelo. Outra proposta de trabalho futuro é incluir na formulação do problema algumas especificidades das características de transmissões em vídeo, mais precisamente, do protocolo UDP da camada de enlace, para atender casos em que hajam prioridades para diferentes pacotes de vídeo. Além disso, pretende-se avaliar outras métricas de tempo na função-objetivo, como atraso e variação de atraso (*jitter*) na rede como um todo, uma vez que neste trabalho foi avaliado apenas o tempo acumulado entre saltos, o que é relevante para redes *mesh*.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao PROCAD/CAPES por todo o suporte ao projeto de cooperação acadêmica entre as instituições envolvidas. O primeiro e o terceiro autores agradecem ao CNPq pelos auxílios concedidos.

Referências

- Akyildiz, I. F.; Wang, X. e Wang, W. Wireless mesh networks: a survey. *Computer Networks ISDN Systems*, vol. 47, no. 4, pp. 445–487, mar. 2005.
- Bansal, M. e Trivedi, A. Cross-layer optimization for fair end-to-end rate allocation in wmnns with MIMO links. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2012.
- Benyamina, D.; Hafid, A.; Gendreau, M. e Maureira, J. On the design of reliable wireless mesh network infrastructure with QoS constraints. *Computer Networks*, vol. 55, no. 8, pp. 1631 – 1647, 2011.
- Blank, A. G. *TCP/IP Foundations*. Sybex, 2004.
- Borges, V. C. M.; Curado, M. e Monteiro, E. A cross-layer routing scheme for scalable triple play service in wireless mesh networks. In *Computer Communications and Networks (ICCCN), 2010 Proceedings of 19th International Conference on*, aug. 2010, pp. 1–6.
- Campista, M.; Esposito, P.; Moraes, I.; Costa, L.; Duarte, O.; Passos, D.; Albuquerque, C.; Saade, D. Rubinstein, M. outing metrics and protocols for wireless mesh networks. *Network, IEEE*, vol. 22, no. 1, pp. 6 –12, jan.-feb. 2008.
- Chafekar, D.; Kumar, V. A.; Marathe, M. V.; Parthasarathy, S.; Srinivasan, A. Cross-layer latency minimization in wireless networks with SINR constraints, In: *Proceedings of the 8th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, MobiHoc '07*, ACM, New York, EUA, 2007, pp. 110-119, 2007
- Chatterjee, A.; Deb, S. Srinivasan, V. Multiband wireless mesh networks: Frequency aware spectrum allocation and cross-layer optimization. In *Communication Systems and Networks (COMSNETS), 2012 Fourth International Conference on*, pp. 1-9, 2012.

- Draves, R.; Padhye, J. e Zill, B.** Routing in multi-radio, multihop wireless mesh networks. *In Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking, ser. MobiCom '04*. New York, USA: ACM, pp. 114–128, 2004.
- Esposito, P.; Campista, M.; Moraes, I.; Costa, L.; Duarte, O. e Rubinstein, M.** Implementing the expected transmission time metric for OLSR wireless mesh networks. *In Wireless Days, 2008. WD '08. 1st IFIP*, pp. 1–5, nov. 2008.
- Fu, F. e van der Schaar, M.** Learning for cross-layer optimization. *In Proceedings of CIP*, vol. 71, no. 2, pp. 69–74, 2008.
- Genetzakis, M. e 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*, pp. 242–250, jun 2008.
- Johansson, M. e Xiao, L.** Cross-layer optimization of wireless networks using nonlinear column generation. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 5, no. 2, pp. 435–445, feb. 2006.
- Lavén, A. e Hjärtquist, P.** Multimetric OLSR and ETT. *In 5th OLSR Interop & Workshop*, 2009.
- Liao, D. e Elhakeem, A. K.** A cross-layer joint optimization approach for multihop routing in TDD-CDMA wireless mesh networks. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 23, no. 1, pp. 6–15, 2012.
- Lin, X.; Shroff, N. e Srikant, R.** A tutorial on cross-layer optimization in wireless networks. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 24, no. 8, pp. 1452–1463, 2006.
- Pinheiro, B.; Nascimento, V.; Lopes, R.; Cerqueira, E. e Abelem, A.** A fuzzy queue-aware routing approach for wireless mesh networks. *Multimedia Tools and Applications*, vol. 61, pp. 747–768, 2012.
- Shabdanov, S.; Mitran, P. e Rosenberg, C.** Cross-layer optimization using advanced physical layer techniques in wireless mesh networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 11, no. 4, pp. 1622–1631, 2012.
- Silva, M.; Senne, E. L. F. e Vijaykumar, N. L.** Wireless mesh networks planning based on parameters of quality of service. *In Proceedings of 1st International Conference on Operations Research and Enterprise Systems*, vol. 1, pp. 441–446, Vilamoura, 2012.
- Tang, J.; Xue, G. e Zhang, W.** Cross-layer optimization for end-to-end rate allocation in multi-radio wireless mesh networks. *Wireless Networks*, vol. 15, no. 1, pp. 53–64, Jan. 2009.
- Yazdanpanah, M.; Assi, C. e Shayan, Y.** Cross-layer optimization for wireless mesh networks with smart antennas. *Computer Communications*, vol. 34, no. 16, pp. 1894–1911, 2011.
- Yuan, J.; Li, Z. Yu, W. e Li, B.** A cross-layer optimization framework for multihop multicast in wireless mesh networks. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 24, no. 11, pp. 2092–2103, nov. 2006.