

Capacidade das redes WMN em ambientes com desvanecimento

David M. Gallego, Álvaro A. M. de Medeiros, Paulo Cardieri,
Michel D. Yacoub, Carlos E. Seo e Elvio J. Leonardo

Resumo — Um tipo particular de redes ad hoc, a rede *mesh* sem fio (*Wireless Mesh Networks* – WMN), tem despertado grande interesse em estudos recentes. Neste tipo de redes, o tráfego é encaminhado para um *gateway* ligado a outras redes. Este artigo estuda, através de simulação computacional, como o desvanecimento e algumas propriedades do canal físico, afetam a qualidade de serviço e a capacidade de uma rede WMN. Foi observada uma degradação na capacidade da rede em ambientes com desvanecimentos lento e rápido. Observou-se também um compromisso entre a redução do número de saltos nas transmissões e a diminuição na interferência experimentada pelos nós, sendo que o primeiro mostrou-se mais vantajoso para a capacidade da rede.

Palavras-Chave — Redes sem fio, redes ad hoc, capacidade, desvanecimento lento, desvanecimento rápido.

Abstract — A particular type of ad hoc networks, the Wireless Mesh Network (WMN), is drawing considerable attention in recent studies. The WMNs provide good reliability, scalability and low infrastructure investments, which grants a market appeal to this technology. Because of the specific characteristics of the WMN's traffic, the capacity and quality of service parameters of this type of network have been studied, but in most cases, considering a simple propagation environment. This paper studies, through computational simulation, how some properties of the physical channel affect the quality of service and the capacity of a WMN.

Keywords — wireless networks, ad hoc networks, capacity, slow fading, fast fading.

I. INTRODUÇÃO

Uma rede ad hoc é formada por nós que se comunicam através de uma conexão sem fio sem nenhum tipo de controle centralizado. Cada nó tem a capacidade de detectar outros nós em seu alcance. A transmissão através dos nós pode ser feita de forma direta ou através do repasse de pacotes, caso o nó de destino não esteja no alcance de transmissão do nó origem. Como as redes ad hoc têm o ar como meio de transmissão, elas herdam os problemas convencionais

das redes sem fio como otimização de banda, controle de potência, confiabilidade do enlace, qualidade da transmissão, entre outros. Um tipo específico de redes ad hoc, que tem despertado atenção ultimamente, é a rede *mesh* sem fio (*Wireless Mesh Networks* – WMN). Neste tipo de rede, o tráfego de todos os nós é dirigido para ou provém dos *gateways*, que servem como entrada para as redes convencionais (por exemplo, a Internet). A WMN encontra grande aplicação especialmente em regiões onde os custos de infraestrutura são muito altos e também em áreas rurais e pouco povoadas. A WMN requer técnicas especiais de projeto e dimensionamento, visto que todo o tráfego é encaminhado a um ou vários pontos específicos da rede, criando gargalos nas regiões próximas dos *gateways*, o que limita a vazão dos nós mais distantes e compromete sua escalabilidade. Características importantes da rede como o número de nós e a quantidade de informação a ser transmitida devem ser levadas em consideração nas etapas de planejamento, implementação e otimização. O estudo da capacidade das WMN [1] busca analisar esses aspectos com a finalidade de encontrar limites de transmissão segundo determinados requerimentos de qualidade de serviço (*Quality of Service* – QoS), assim como o modo de operação ótimo no qual este limite pode ser alcançado.

Um primeiro estudo sobre a capacidade das redes ad hoc é apresentado em [2], onde os autores propõem um modelo teórico para obter os limites superiores para a vazão nas redes ad hoc, mostrando que estes decaem com $1/\sqrt{n}$, onde n é o número de nós na rede. Este resultado, confirmado através de simulações e testes físicos em [9], é um resultado pessimista em relação à escalabilidade destas redes e inspira estudos para incrementar a vazão média. Em [3], é mostrado que a mobilidade pode incrementar a capacidade, mas em contrapartida o atraso médio das transmissões aumenta consideravelmente e um tamanho maior dos buffers é requerido nos nós de repasse. A análise da influência de outros parâmetros de rede, como a atenuação, pode ser encontrada em [4]. Outras técnicas, como o uso de antenas direcionais [5,6], gerenciamento da potência de transmissão [7], e o uso de infra-estrutura fixa [8], têm sido propostas com a finalidade de incrementar a capacidade das redes ad hoc mantendo a qualidade de serviço.

Os limites de capacidade das WMN são estudados por meio de simulação em [1] usando o modelo de propagação de dois raios (*Two-Ray Ground*). O estudo

David M. Gallego, Álvaro A. M. de Medeiros, Paulo Cardieri, Michel D. Yacoub, Carlos E. Seo e Elvio J. Leonardo, Wireless Technology Laboratory (Wissstek) DECOM/FEEC/UNICAMP – C.P. 6101, Campinas – SP, 13.081-970, e-mails: [dmunoz, alvaro, cardieri, michel, seo, elvio]@wissstek.org. Este trabalho foi financiado parcialmente pelo CNPq, FAPESP, e a Fundação CPqD.

indica que o limite da capacidade total da rede decai com $1/n$, o que é um resultado pior do que aquele apresentado para as redes ad hoc convencionais em [2], devido a suas peculiaridades no tráfego. A influência de outros parâmetros importantes da camada física não foi estudada em [1], o que abre campo a novas pesquisas no dimensionamento e planejamento de estas redes.

A maioria das pesquisas na área de redes ad hoc apresenta modelos de propagação idealizados: os nós têm um alcance de transmissão fixo e todos os receptores neste alcance recebem a transmissão corretamente, se não ocorrerem colisões. Porém, devido ao desvanecimento e a efeitos de multi-percurso, esta suposição se distancia da realidade: as transmissões podem sofrer desvanecimento com pequenas mudanças na posição ou através do tempo. Estas variações têm uma severa implicação no desempenho dos protocolos e na capacidade da rede.

Alguns estudos [10-12] têm sido realizados para analisar os efeitos do desvanecimento nas redes ad hoc, mas nenhum dos trabalhos encontrados na literatura analisa os seus efeitos nas redes WMN especificamente.

Este artigo investiga a influência do desvanecimento no dimensionamento das redes WMN através de simulações computacionais, levando em consideração parâmetros importantes como topologia da rede e frequência de transmissão. Esta influência é então apresentada através de alguns parâmetros, tal como taxa de cruzamento de nível (*Level Crossing Rate* – LCR), potência recebida e vazão. Mostrar-se-á ao longo do artigo que existe um compromisso entre a redução do número de saltos nas transmissões, em virtude da diminuição da frequência e a diminuição na interferência experimentada pelos nós causada pelo aumento da frequência. Contudo, a primeira opção apresentou melhores resultados para a capacidade.

O artigo tem a seguinte estrutura: a Seção II mostra os modelos de propagação utilizados no artigo; a Seção III descreve os cenários de simulação utilizados; a Seção IV apresenta e discute os resultados obtidos; e na Seção V são feitas as considerações finais.

II. MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Dentre os modelos de propagação usualmente empregados na simulação e análise das redes ad hoc, o mais simples é o modelo de espaço livre. Este modelo sozinho é muito simples para ser utilizado em aplicações práticas. Um modelo de propagação mais realista, o modelo de dois raios, considera a reflexão do sinal e também o sinal direto. Em distâncias curtas, apenas o sinal direto é levado em conta. A potência decai exponencialmente com a distância segundo um expoente de perdas α . Para distâncias acima de um determinado limiar, os dois sinais se combinam criando

um fator de perdas maior (tipicamente entre três e quatro).

Neste artigo, além do modelo determinístico de perda de percurso, são também utilizados modelos estatísticos para o desvanecimento. Para o desvanecimento lento, as perdas são modeladas como uma variável aleatória com distribuição log-normal. A relação entre as potências $P_r(d)$ (em dB) a uma distância d e $P_r(d_1)$ (em dB) a uma distância d_1 é dada por [13]

$$P_r(d) - P_r(d_1) = -10\alpha \log\left(\frac{d}{d_1}\right) + X \quad (1)$$

onde X é uma variável aleatória de média nula e desvio padrão entre 2 e 15 dB. Devido à aleatoriedade do sinal algumas das transmissões, que estão dentro do alcance de transmissão definido pela perda de percurso apenas, podem ser perdidas e outras fora deste alcance podem ser bem sucedidas. Para o desvanecimento rápido utilizado é o modelo de Rice, que contempla como caso particular o de Rayleigh. A envoltória de Rice segue a distribuição [13]

$$p(r) = \frac{r}{\sigma_r^2} \exp\left(-\frac{r^2 + a^2}{2\sigma_r^2}\right) I_0\left(\frac{ar}{\sigma_r^2}\right) \quad (2)$$

onde $I_0(ar/\sigma_r^2)$ é a função de Bessel modificada de ordem zero, r é a envoltória, e a é amplitude do sinal direto. A relação $k = a^2/2\sigma_r^2$ expressa a razão entre a potência da componente direta e da componente espalhada e é conhecida como fator de Rice. Para o caso Rayleigh, este fator é nulo, o que tipifica uma condição ruim do canal. À medida que este fator aumenta uma melhora da condição do canal é verificada.

Outro fator importante que se considera no modelo utilizado é o deslocamento Doppler, que é dado pela diferença entre as frequências de transmissão e recepção, que por sua vez está relacionada à diferença de velocidades entre o nó transmissor e receptor. Para o caso do modelo apresentado neste artigo, os nós se consideram estáticos e o deslocamento Doppler se dará pelo movimento dos espalhadores. Como se mostra em [13], o deslocamento Doppler é proporcional à velocidade. Assim, o modelo de simulação utilizado para o desvanecimento de pequena escala considera o parâmetro *Velocidade Máxima* como entrada, assim como o fator de Rice K , descrito anteriormente.

III. CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Para o propósito do estudo mostrado nesse artigo, o padrão IEEE 802.11b foi usado nas camadas físicas (PHY) e de acesso ao meio (MAC). O padrão IEEE

802.11 é o mais popular para redes locais sem fio e tem sido usado para implementações experimentais de redes ad hoc. Cada técnica de espalhamento espectral definida na camada física [14] está relacionada com diferentes taxas de dados nominais. Na verdade, a vazão máxima dependerá das interações entre a camada PHY e MAC e certamente é menor que a taxa nominal. Em [15], os autores mostram como calcular esta taxa máxima teórica para o padrão IEEE 802.11, sendo este o limite superior para a vazão da rede.

TABELA I
PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Camada PHY	
Espalhamento espectral	HR-DSSS
Potência de transmissão	0,2818W
Expoente de perda de percurso (α)	2
Desvio padrão (σ)	4
Sensibilidade do receptor	$3,652 \times 10^{-10} \text{W}$
Altura das antenas	1,5m

Camada MAC	
Protocolo	802.11b RTS/CTS
Taxa de transmissão nominal	11Mbps
Tamanho janela de contenção (CW)	min 63 / max 1023
Duração Slot	$20 \mu\text{s}$
Espaço curto entre frames (SIFS):	$10 \mu\text{s}$
Espaço distribuído entre frame (DIFS)	$50 \mu\text{s}$
Taxa básica (para sinais controle)	1Mbps

As simulações foram implementadas no simulador NS2 (*Network Simulator*). O modelo usado contempla os parâmetros mostrados na Tabela I. O modelo de tráfego utilizado foi o de taxa constante (CBR – *Constant Bit Rate*) com direção dos nós para o *gateway*.

Três frequências de portadora foram testadas: 400MHz, 900MHz e 2400MHz. Os alcances de transmissão e de interferência são dependentes da frequência e têm valores aleatórios. Para as frequências de 400MHz, 900MHz e 2400MHz, o alcance de transmissão médio é de 550m, 420m e 140m respectivamente. O alcance de interferência foi ajustado para dobro do alcance de transmissão.

Foram definidas duas topologias para as simulações: cadeia de 11 nós espaçados de 100m (10 nós e o *gateway* ao final), grade de 25 nós (24 nós e um *gateway* central dentro de um quadrado de 500m de lado).

IV. RESULTADOS

A. Desvanecimento Log-normal

Baseado nos cenários e modelos descritos na seção anterior para o desvanecimento lento, a vazão foi analisada para as duas topologias e para as três frequências usando tráfego CBR e variando a carga oferecida, ou seja, o tráfego originado em cada nó. O *gateway* não gera tráfego, sendo este o destino do tráfego de todos os nós.

A Figura 1 mostra a variação da vazão com o incremento da carga oferecida para a topologia de cadeia e frequência de transmissão de 400MHz. As curvas correspondem à vazão máxima, relativa ao nó mais próximo do *gateway*; mínima, relacionada com o nó mais distante do *gateway*; e a vazão média, que corresponde à média da vazão de todos os nós na rede. Pode-se notar que existe uma região no gráfico onde a vazão de todos os nós tem o mesmo valor e é equivalente à carga oferecida. Tal região, representada por uma reta, corresponde à vazão para cargas oferecidas menores que aproximadamente 250kbps. A partir desse ponto, não existe mais equidade (*fairness*) na rede, visto que a soma de todos os tráfegos da rede ultrapassa a vazão teórica máxima para a camada MAC, calculada em [15].

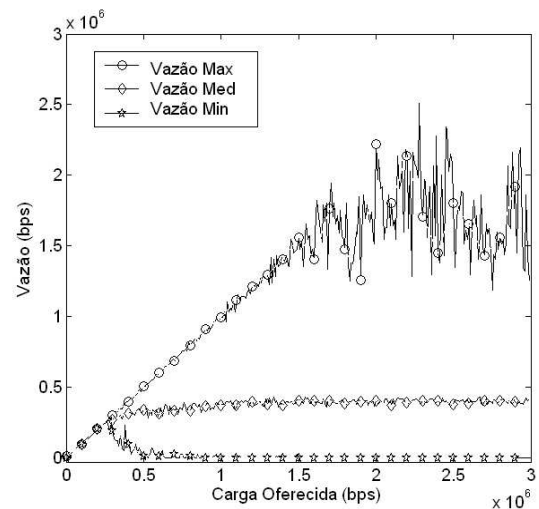


Fig. 1. Vazão em função da carga oferecida para topologia em cadeia usando tráfego CBR para 400MHz.

A partir do ponto no qual a vazão de equidade é ultrapassada, os nós mais próximos ao *gateway* não são mais capazes de encaminhar todo o tráfego proveniente dos nós mais distantes. Os nós mais próximos do *gateway* esgotam toda a capacidade da rede, o que indica falhas no protocolo IEEE 802.11 para redes de múltiplos saltos (*multihop*). Isto aparece na Figura 1, com a vazão mínima (que corresponde ao nó mais distante do *gateway*), caindo para zero. Resultados

similares para um ambiente de Dois Raios foram apresentados por Jun e Sichitiu em [1].

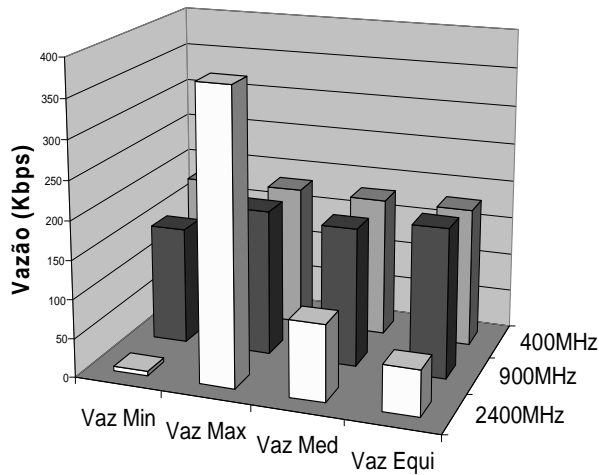


Fig. 2. Vazão máxima, média, mínima e de equilíbrio para topologia em grade usando tráfego CBR.

O alcance de transmissão controla o número de saltos (*hops*) para o tráfego chegar ao *gateway*, e o nível de interferência gerada. Ao se diminuir a freqüência, o alcance aumenta e, portanto, o número de saltos diminui. Porém, visto que o alcance de interferência aumenta também, menos transmissões podem ser feitas ao mesmo tempo ao longo da rede. Na Figura 2, são mostradas as vazões máxima, média, mínima e de equilíbrio para cada freqüência em uma rede com topologia de grade. A carga oferecida se variou entre 0 e 3Mbps como no caso da Figura 1.

A vazão de equilíbrio, como se mostrou na Figura 1, equivale ao ponto no qual a capacidade do canal é alcançada. A partir de ela, se observou uma degradação da vazão dos nós mais distantes. Pode-se observar que, para 2400MHz, a vazão máxima é maior do que para as outras freqüências, mas em detrimento das vazões média e de equidade. Para a freqüência de 400MHz e 900MHz, têm-se maiores alcances de transmissão e interferência e, conseqüentemente, uma maior contenção dos nós. Assim todos os nós tendem a manter a mesma taxa, visto que cada um tem que transmitir por vez.

B. Desvanecimento Rice e Rayleigh

Na Figura 3, é mostrada a variação temporal da potência recebida para diferentes valores do fator de Rice k , e para uma transmissão entre dois nós em um ambiente Rice com freqüência de 400MHz. O tráfego é do tipo CBR a uma taxa de 1Mbps. Pode-se observar uma maior deterioração do canal para k menores, como esperado. A taxa de cruzamento de nível, que indica quão rápido os desvanecimentos aparecem,

aumenta com a diminuição de k , fazendo com que mais pacotes sejam perdidos pela falta de conexão entre transmissor e receptor em determinados instantes. Para o cenário simulado, foi observada uma variação de 2.5dB na potência média recebida ao variar k de 0 (Rayleigh) até 10^4 (dois raios). Contudo um desvio padrão de 5dB foi observado no sinal recebido no ambiente Rayleigh, enquanto para o caso no qual o parâmetro K era maior que 1000, se achou um desvio padrão menor de 0.1dB.

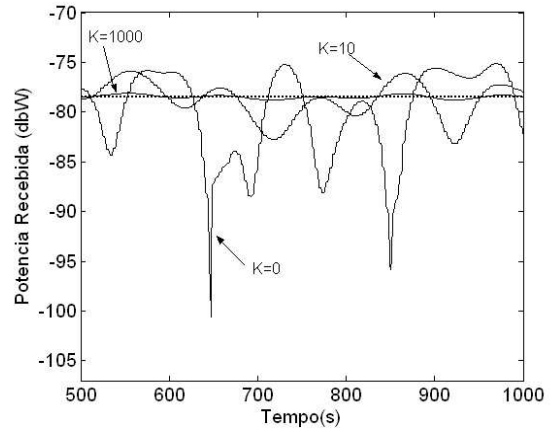


Fig. 3. Potência recebida para vários valores de K em ambiente Rice

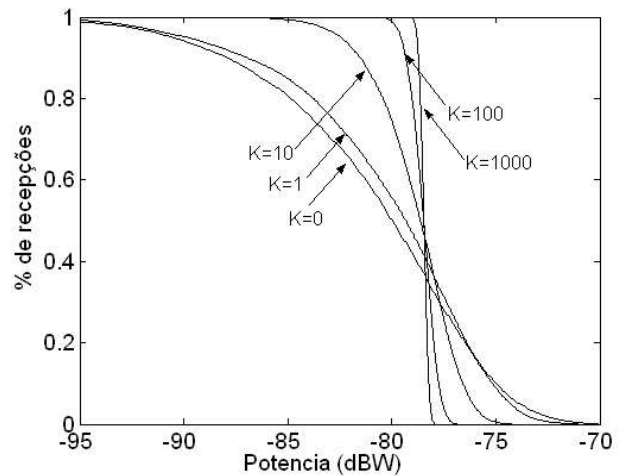


Fig. 4. Porcentagem de recepções com potência acima da abscissa.

Na Figura 4, pode-se notar a porcentagem de pacotes recebidos acima de um valor de potência definido pela abscissa para diferentes valores de k . Para avaliar a influência do desvanecimento na capacidade da rede, uma rede com topologia em cadeia foi simulada, na qual 10 nós transmitem tráfego CBR a uma freqüência de 400MHz e a uma taxa ajustável de 0 a 3Mbps sob um ambiente Rice.

Na Figura 5, é mostrada a vazão média da rede em função da carga oferecida. Pode-se observar que a vazão média da rede não se vê tão afetada pelo

desvanecimento para cargas oferecidas que estão dentro da região de equidade (inferior a 250 kb/s), porém para cargas oferecidas maiores, a vazão média da rede chega ter variações de até 700Kbps. Esta variação da vazão pode ser justificada observando que, à medida que a carga oferecida cresce, a taxa na qual os pacotes (de dados e de controle) são enviados pela rede também aumenta. Conseqüentemente, aumenta a chance da transmissão de um pacote ser atingida por um forte desvanecimento, o que diminui a probabilidade de sucesso de transmissão de pacotes. Esta probabilidade de sucesso será tanto menor quanto menor for o fator de Rice.

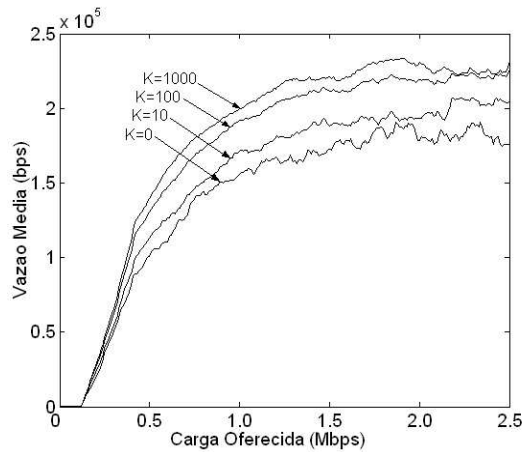


Fig. 5. Vazão média em função da carga oferecida para vários valores de K para uma topologia em cadeia de 11 nós em ambiente com desvanecimento Rice.

Na Figura 6, é mostrada a variação temporal da potência recebida em um ambiente Rayleigh para várias frequências Doppler (f_m). Nota-se que, ao se variar a frequência Doppler, a frequência de ocorrência dos desvanecimentos varia de forma considerável com pequenas mudanças de f_m , como esperado. Nota-se, portanto, que o desvio Doppler tem uma grande influência tanto na taxa de ocorrência dos desvanecimentos quanto no seu tempo médio. Obviamente, isso tem impacto direto no desempenho do sistema.

De fato, é conhecido [13] que a LCR é diretamente proporcional ao deslocamento Doppler. A influência do desvanecimento, que se vê refletida em um aumento do LCR, é percebida principalmente na perda instantânea de conexão entre nós devido a quedas do nível do sinal, com a potência tendo variações rápidas da ordem de dezenas de decibéis. Vários trabalhos recentes [10, 11, 17] têm estudado a conectividade de redes ad hoc em ambientes com desvanecimento. Tais trabalhos visam encontrar uma distância ótima que permita que os nós não percam conectividade. Nenhum deles, porém, aborda a questão da capacidade.

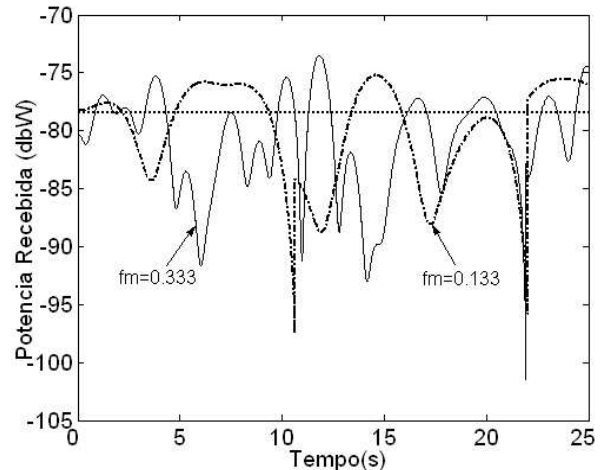


Fig. 6. Potência recebida para vários valores de f_m em ambiente Rice

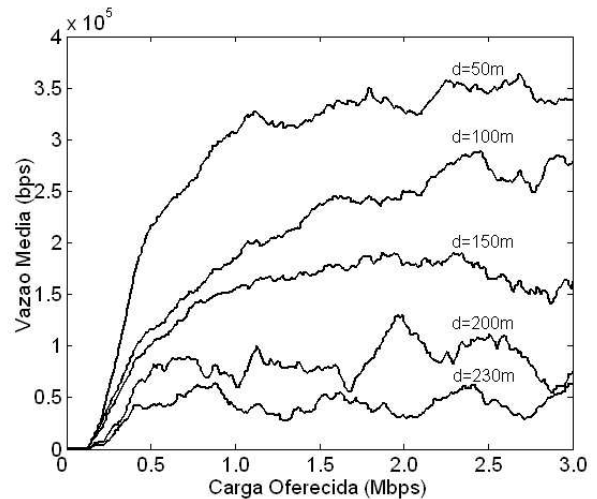


Fig. 7. Vazão média em função da carga oferecida para várias distâncias de transmissão para uma topologia em cadeia de 11 nós em ambiente com desvanecimento Rayleigh.

Na Figura 7, é mostrada a vazão média da rede em função da carga oferecida para uma topologia em cadeia com 11 nós em um ambiente com desvanecimento Rayleigh, similar ao mostrado na figura 5, variando as distâncias entre os nós. À medida que a distância entre nós aumenta, a vazão média é menor, como esperado. O alcance de transmissão médio para um nó é de 240m. Assim, para distâncias de 50m e 100m entre nós, tem-se um alcance de transmissão de 3 e 2 saltos, respectivamente. Para os outros casos, tem-se um alcance de transmissão de apenas um salto. Ganhos na vazão média para distâncias entre nós de 50m e 100m, podem ser atribuídos a uma menor probabilidade de perda de conexão, bem como a um menor número de saltos para chegar ao destino, mesmo apresentando uma maior interferência. Para os casos de distância entre nós de 150m, 200m e 230m, aumenta-se a probabilidade de perda de conectividade e apesar da diminuição da interferência, há um aumento do número de saltos

percorridos por pacotes. Assim, observa-se uma diminuição na vazão média.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo, a capacidade de redes WMN em diferentes ambientes de propagação foi analisada através de técnicas de simulação. Os resultados apresentados mostram a influência do desvanecimento, frequência de transmissão, frequência Doppler, dentre outros fatores, na vazão de uma rede WMN nas topologias cadeia e grade. Foi observada uma vantagem em favor das frequências de transmissão baixas, o que indica que uma redução do número de saltos na transmissão, obtida com a diminuição da frequência, se torna mais benéfico do que a redução na interferência obtida com o uso de frequências altas. Este efeito pode ser atribuído a pouca habilidade do protocolo IEEE 802.11 para repassar pacotes e prover equidade em redes ad hoc *multihop*. Comprovou-se, mediante simulações computacionais, o efeito negativo do desvanecimento na vazão média da rede, assim como sua influência no aumento da taxa de cruzamento de nível e sua repercussão na perda de capacidade da rede.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] J. Jun e M. L. Sichitiu. "The Nominal Capacity of Wireless Mesh Networks". *IEEE Wireless Communications*, vol. 10, no. 5, pp. 8-14, Outubro 2003.
- [2] P. Gupta e P. R. Kumar. "The Capacity of Wireless Networks". *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 46, no. 2, pp. 388-404, Março 2000.
- [3] M. Grossglauser e D. Tse. "Mobility Increases the Capacity of Ad Hoc Wireless Networks". *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 10, no.4, pp. 477-486, Agosto 2002.
- [4] O. Arpacioglu e Z. J. Haas. "On the Scalability and Capacity of Wireless Networks with Omnidirecional Antennas". *Proc. IPSN '04*, pp. 169-177, Abril 2004.
- [5] S. Yi, Y. Pei e S. Kalyanaraman. "On the Capacity Improvement of Ad Hoc Wireless Networks Using Directional Antennas". *Proc. of the 4th ACM MOBIHOC*, pp. 108-116, Outubro 2003.
- [6] A. Spyropoulos e C. S. Raghavendra. "Capacity Bounds For Ad-Hoc Networks Using Directional Antennas". *Proc. of IEEE ICC 2000*, vol. 1, pp. 348-352, Maio 2003.
- [7] T. A. ElBatt, S. V. Krishnamurthy, D. Connors e S. Dao. "Power Management for Throughput Enhancement in Wireless Ad Hoc Networks". *Proc. of IEEE ICC'03*, vol. 3, pp. 1506-1513, Junho 2000.
- [8] B. Liu, Z. Liu e D. Towsley. "On the Capacity of Hybrid Wireless Networks". *Proc. of 22nd IEEE INFOCOM*, vol. 2, pp. 1543-1552, 2003.
- [9] J. Li, C. Blake, D. de Couto, H. Lee e R. Morris. "Capacity of Ad Hoc Wireless Networks". *Proc. of 7th Annual ACM/IEEE MobiCom*, pp. 61-69, 2001.
- [10] P. Stuedi A. Chinellato, G. Alonso. "Connectivity in the presence of Shadowing in 802.11 Ad Hoc Networks". *IEEE WCNC*, v. 3, pp. 2225-22230, Março, 2005.
- [11] C. Bettstetter and C. Hartmann. "Connectivity of wireless multihop networks in a shadow fading environment". *MSWiM*, 2003.
- [12] F. Xue, L. Xie, and P.R. Kumar. "The Transport Capacity of Wireless Networks Over Fading Channels", *IEEE Transactions on Information Theory*. vol. 51, pp. 834-847, Março, 2005.
- [13] M. Yacoub,. "Foundations on mobile radio engineering". Ed. CRC Press. pp 84-135.
- [14] IEEE, *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification*, IEEE Std. 802.11, Junho 1999.
- [15] J. Jun, P. Peddabachagari e M. Sichitiu. "Theoretical maximum throughput of IEEE 802.11 and its applications". *Proc. of 2nd IEEE NCA*, pp 249-256, Abril 2003.
- [16] Antenna and radio communication group. Additions to the NS network simulator to handle Ricean and Rayleigh fading.. <http://www.ece.cmu.edu/wireless/>
- [17] Ratish J. Punnoose, Pavel V. Nikitin, and Daniel D. Stancil. "Efficient Simulation of Ricean Fading within a Packet Simulator". *Proc of 52nd IEEE VTS-Fall VTC2000*, vol. 2, pp. 764-767, Setembro 2000.