

Proposta de Tratamento do Problema de Surdez de Antenas em Comunicações Direcionais

Pedro R. V. Dias, Lucas de M. Guimarães, Lucas S. N. Nunes, Marcos F. Caetano e Jacir L. Bordim

Resumo—O uso de antenas direcionais em redes sem fio tem sido considerado um mecanismo promissor para melhorar a utilização do espaço aéreo, a vazão e reduzir interferências. Porém, os protocolos MAC direcionais apresentam desafios e restrições que necessitam de soluções otimizadas. Este trabalho apresenta soluções para alguns destes problemas. Mais precisamente, este trabalho apresenta algumas alternativas para aumentar a vazão e a justiça dos protocolos MAC direcionais. Quando comparado com outros protocolos e mecanismos, a técnica proposta obteve ganhos de até 300% em vazão por fluxo e 86% em justiça.

Palavras-Chave—Antenas Direcionais, Problema de Surdez de antenas, Protocolos de Acesso ao Meio.

Abstract—The use of directional antennas in wireless networks has been considered a promising alternative to improve space division, throughput and reduce interferences. However, the directional MAC protocols have challenges and constraints that require optimized solutions. This paper presents solutions to some of these problems. More precisely, this paper presents some alternatives to increase throughput and fairness of directional MAC protocols. When compared with other protocols and mechanisms, the proposed technique was able to increase fairness up to 86% and individual flow throughput up to 300%.

Keywords—Directional Antennas, Deafness Problem, MAC protocols.

I. INTRODUÇÃO

Na última década, houve um grande aumento no uso da tecnologia de redes sem fio. As redes sem fio utilizam o espectro eletromagnético para a transmissão de dados entre dispositivos. O funcionamento das camadas de enlace e física dos dispositivos que utilizam redes sem fio é controlado por padrões, tais como os da família IEEE 802.11. Estes padrões utilizam protocolos de controle de acesso ao meio, ou seja, protocolos MAC (*Medium Access Control*) tais como o CSMA/CA (*Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) [4].

Devido à natureza descentralizada das redes sem fio *ad hoc*, a elaboração de protocolos MAC eficientes para esse tipo de rede se tornou um desafio. O objetivo de um protocolo MAC é permitir que vários nós de uma rede utilizem eficientemente um canal por eles compartilhado [5]. A eficiência de um protocolo MAC é caracterizada como sendo proporcional a quantidade de transmissões que ocorrem com sucesso entre nós em um dado intervalo de tempo [9].

Pedro Rogério Vieira Dias, Lucas de Melo Guimarães, Lucas Saad Nogueira Nunes, Marcos Fagundes Caetano e Jacir Luiz Bordim, Departamento de Ciência da Computação, Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil, E-mails: {pedrorvd,lucasmg,saad,caetano,bordim}@cic.unb.br. Este trabalho foi parcialmente financiado por CNPq, FAP-DF e DPP/UnB.

De maneira geral, os estudos correlatos a redes sem fio, partem da premissa de que os dispositivos da rede se comunicam utilizando antenas omni-direcionais [8]. Uma antena omni-direcional é aquela que irradia os sinais de rádio em todas as direções. Por isso, tais antenas impõem limitações no reuso espacial do canal, o que potencialmente diminui a eficiência do protocolo MAC, especialmente quando esta é caracterizada como sendo proporcional a quantidade simultânea de transmissões que ocorrem com sucesso [7].

Devido às restrições impostas pela utilização de antenas omni-direcionais no que diz respeito a reuso espacial, novas linhas de pesquisa em redes sem fio surgiram de maneira a estudar um tipo de antena que permita que um nó transmita ou receba em uma direção específica. Tais antenas são denominadas na literatura como antenas direcionais. Dentre os benefícios do uso desse tipo de antena estão: a redução de interferência, maior alcance da transmissão, melhor qualidade do sinal e maior controle sobre o gasto de energia na transmissão [3] [9].

Com o objetivo de melhor usar o potencial das antenas direcionais, foi proposta a utilização da detecção de portadora virtual direcional (DNAV) na proposta do *Directional Virtual Carrier Sensing* (DVCS) [12] de maneira a tentar se adaptar o padrão IEEE 802.11 [4] para transmissões direcionais. Paralelamente, identificou-se o problema de surdez em comunicações direcionais quando da proposta do protocolo *Directional MAC Protocol* (DMAC) [3]. O problema de surdez pode levar a uma distribuição irregular nos recursos do meio em cenários onde os nós se comunicam direcionalmente, levando a uma distribuição injusta dos recursos do espectro, [1] [2] [3] [13]. Esse problema será melhor explicado na Seção II. Nesse contexto, surgiram diversos trabalhos que visam mitigar os efeitos do problema em questão, tais como os propostos em [1] [2] [11] [13].

O presente trabalho propõe uma técnica de tratamento do problema de surdez em comunicações direcionais, que se baseia em informações dos fluxos de tráfego para evitar a ocorrência de situações de surdez. A validação da técnica proposta se deu via simulação através do uso do simulador de redes *Qualnet* [10]. Os resultados obtidos evidenciaram a existência de uma relação de inversa proporcionalidade entre vazão total e justiça. A técnica proposta apresentou ganho de até 300% com relação a *throughput* individual e até 86% com relação à justiça quando contraposta a outras técnicas existentes. A seguir, será apresentada uma explicação mais detalhada acerca do problema de surdez (*deafness*) em comunicações direcionais.

II. PROBLEMA DE SURDEZ EM COMUNICAÇÕES DIRECIONAIS

Um nó que utiliza uma antena direcional é considerado “surdo” em todas as direções com exceção da direção do seu feixe de recepção principal, ou seja, ele escuta somente na direção do feixe [6]. Essa característica provoca o chamado problema de surdez de antenas. Este problema foi identificado e denominado *deafness* [3]. A Figura 2(a) ilustra o problema em questão.

Considere o cenário ilustrado na Figura 2(a), onde todas as transmissões são consideradas direcionais e considere a utilização de um protocolo MAC que preconiza o incremento exponencial de tempo de *backoff* (como o padrão IEEE 802.11 [4]). Suponha que o nó X deseja se comunicar com o nó S . No entanto, suponha ainda que o nó S está transmitindo dados para D , estando assim “surdo” para X . À medida em que X tenta iniciar uma comunicação com S , **sem sucesso** (S está “surdo” para X), X vai aumentando o seu tempo de *backoff* exponencialmente. A situação descrita gera perdas de vazão e um aumento no tempo de transmissão para cada pacote que X vai transmitir. É importante mencionar que quando o problema de surdez é recorrente em um mesmo nó, essa situação é denominada de surdez persistente (*persistent deafness*) [13].

O problema de surdez pode reduzir significativamente o desempenho da rede causando perda de pacotes devido a atrasos elevados, injustiça e até situações específicas de *deadlock* [2] [6]. Por isso, torna-se evidente a necessidade de se minimizar os efeitos do problema de surdez de antenas.

III. TÉCNICA DE CONTROLE DO PROBLEMA DE SURDEZ

Nesta seção, é apresentada uma nova técnica (DVCS-DA – *Directional Virtual Carrier Sensing with Deafness Avoidance*) que busca amenizar o problema de surdez. Para isso, propõe-se um mecanismo que busca detectar quando um nó está sofrendo do problema de surdez, utilizando informações dos fluxos de dados incidentes aos nós. Utiliza-se ainda, transmissões iniciadas pelo receptor para amenizar o problema de surdez. O mecanismo de detecção de surdez e o comportamento da técnica proposta são descritos a seguir.

A. Mecanismo de Detecção de Surdez

O mecanismo de detecção de surdez determina entre os fluxos qual está sofrendo o problema de surdez a mais tempo, ou seja, qual nó vizinho está esperando há mais tempo para enviar um quadro de dados. Para isso, a detecção de surdez depende do instante de recepção do último quadro e do limiar de surdez esperada (T_i) de cada fluxo i , onde i representa o índice do fluxo ($i > 1$). A detecção é feita verificando-se, para cada fluxo i incidente ao nó, há quanto tempo um quadro não chega desse fluxo, ou seja, verificando-se o tempo de espera de recepção desse fluxo (E_i). Determina-se que o fluxo i está sofrendo do problema de surdez se o tempo de espera E_i for superior a um limiar de detecção de surdez (T_i) para esse fluxo, ou seja, caso $E_i > T_i$. Se mais de um fluxo estiver sofrendo do problema de surdez, o fluxo com maior tempo de espera (E_i) é escolhido.

É importante mencionar que o limiar de surdez é uma função que depende do valor esperado do intervalo entre pacotes (I_{esp}^i). Sendo α um fator de correção, o limiar de surdez foi definido neste trabalho como:

$$T_i = \alpha * I_{esp}^i \quad (1)$$

Tal fator de correção (n) pode ser ajustado para cada fluxo de um nó com base nas informações da tabela de fluxos ativos do nó ou da tabela de roteamento do nó, entre outras informações que podem ser utilizadas para estimar o limiar T_i .

Uma forma de determinar I_{esp}^i é calcular o tempo médio entre pacotes (I_{med}^i) à medida em que recebe-se pacotes de um fluxo. Assim, pode-se estimar que $I_{esp}^i = I_{med}^i$. Outra forma de obter o valor de I_{esp}^i , seria através da camada de roteamento, caracterizando uma solução “*cross layer*”. Pode-se também utilizar uma abordagem conjunta de informações da camada de roteamento com o cálculo do tempo médio entre pacotes. É importante mencionar que a adição de novos fluxos não é um problema para a técnica proposta, pois a camada de roteamento é atualizada quando da adição desses fluxos.

B. Comportamento da Técnica

O DVCS-DA possui dois modos de operação: o **modo padrão**, que utiliza comunicações iniciadas pelo transmissor (*sender-initiated*); e o **modo de tratamento de surdez**, que utiliza comunicações iniciadas pelo receptor (*receiver-initiated*). O **modo padrão** é baseado no IEEE 802.11 aliado a técnica DVCS, enquanto o **modo de tratamento de surdez** é utilizado somente para tratar o problema de surdez, quando este é detectado pelo mecanismo descrito anteriormente. A Figura 1 ilustra em detalhes o funcionamento do modo de tratamento de surdez.

Um exemplo que ilustra o funcionamento dos dois modos de operação do DVCS-DA está disponível na Figura 2(b). Neste cenário, assume-se que há os seguintes fluxos de dados: $X \rightarrow S$ e $S \rightarrow D$. Assume-se ainda que alguns pacotes de cada fluxo já foram transmitidos com sucesso, ou seja o nó S tem conhecimento dos dois fluxos de dados. Inicialmente, o nó S espera o seu tempo de *backoff* e então tenta iniciar uma comunicação iniciada pelo transmissor (**modo padrão**) enviando um RTS (*Request to Send*) para D . O nó D responde com um CTS (*Clear to Send*), fazendo com que S envie pacotes de dados para D que por sua vez confirma o recebimento de tais pacotes por meio de mensagens ACK. Enquanto isso, X tenta também iniciar uma comunicação iniciadas pelo transmissor (**modo padrão**) com S por meio do envio de mensagens RTS. Note que como S está com o feixe de antena direcionado para D , S não responde aos quadros RTS enviados por X , fazendo com que X tenha seu tempo de *backoff* aumentado exponencialmente. Isso ocorre até que S verifica que $E_j > T_j$, onde j corresponde ao índice do fluxo $X \rightarrow S$. Ou seja S verifica que X possivelmente está sofrendo os efeitos do problema de surdez. Desta forma, S entra no **modo tratamento de surdez** e envia um quadro RTR (*Ready to Receive*) para X , de maneira a começar uma comunicação iniciada pelo receptor. Ao receber o quadro RTR, o nó X cancela o seu tempo de *backoff* e responde a S com

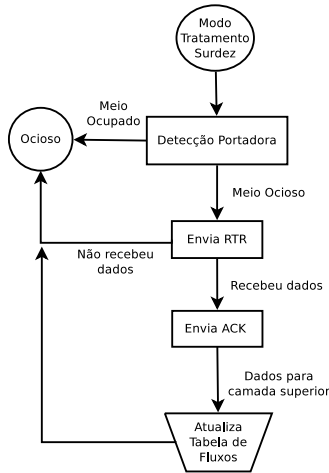


Fig. 1. Comportamento do protocolo no modo tratamento de surdez.

um quadro de dados fazendo com que a comunicação prossiga normalmente. Note que por meio das comunicações iniciadas pelo receptor é possível estabelecer uma maior justiça na vazão dos fluxos, conforme será melhor explicado na Seção IV.

Importantes considerações do funcionamento da técnica DVCS-DA serão descritas a seguir. O **quadro RTR** possui o mesmo formato e campos de um quadro RTS e somente é enviado em modo direcional. O nó que envia o RTR espera por uma resposta por um período correspondente ao tempo necessário para que o nó transmissor receba o quadro RTR e transmita o quadro de dados. Caso o quadro de dados (a resposta) não chegue, o RTR não é retransmitido como no caso das retransmissões de RTS. É ainda importante mencionar que o quadro RTR foi introduzido pelo protocolo MACA-BI [14], de maneira a iniciar a transmissão do pacote pelo nó receptor. Terminada a apresentação da técnica de tratamento de problema de surdez proposta neste trabalho, serão apresentados os resultados que validam tal técnica.

IV. AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Nessa seção, avaliou-se o desempenho do DVCS-DA comparando-o com outros três protocolos de acesso ao meio, o padrão IEEE 802.11 DCF em modo omni-direcional, sua versão direcional com a técnica de DVCS [12] e o protocolo RI-DMAC [13]. Este último protocolo foi usado como base de comparação por ter bons resultados com relação à justiça (*fairness*) na distribuição dos recursos da rede entre os fluxos incidentes a cada nó. Para realizar a avaliação de desempenho dos protocolos mencionados, foram realizadas simulações utilizando o ambiente de simulação Qualnet [10].

Nas simulações apresentadas, considerou-se o cenário ilustrado na Figura 3. Tal cenário é relevante no que tange ao problema de surdez sendo objeto de estudo de propostas recentes, tais como a disponível em [11]. É importante mencionar que a técnica foi validada também no cenário de surdez em cadeia avaliado em [2] e [13]. Entretanto, devido a limitações de espaço, a análise apresentada se restringe ao cenário da Figura 3.

Para cada fluxo de dados presente no cenário avaliado (Figura 3), utilizou-se uma taxa de transmissão constante CBR

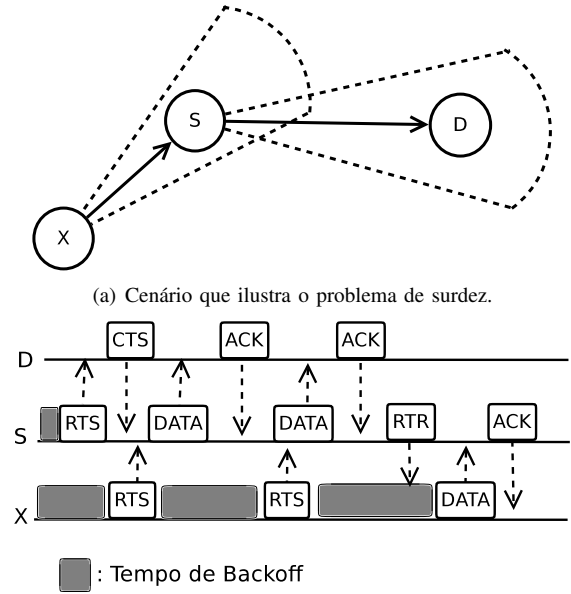


Fig. 2. Topologia exemplo do problema de surdez e do funcionamento da técnica DVCS-DA.

(*constant bit rate*), que foi variada durante as baterias de simulações modificando-se o intervalo entre transmissão de pacotes. Assumiu-se uma taxa de transmissão do canal de 2 Mbps e tamanho de pacote de 1280 bytes. Para os protocolos direcionais, assumiu-se o uso de antenas do tipo setorial (*switched beam*) com 8 setores de 45° cada. Nas simulações do DVCS-DA, assumiu-se que a predição do intervalo de envio entre pacotes (I_{esp}^i) é exata e realizada utilizando-se informações da camada de roteamento, conforme explicado na Seção III. Desta forma, utilizou-se como limiar fixo (LF):

$$LF = 1,3 * I_{esp}^i, \quad (2)$$

e como limiar variável (LV):

$$LV = \frac{I_{med}^i + 5 * I_{esp}^i}{6}. \quad (3)$$

Vale ressaltar que se deu maior peso a I_{esp}^i em detrimento a I_{med}^i , uma vez que o primeiro valor é obtido de maneira mais precisa que o segundo. Nas análises apresentadas, utilizou-se como métrica a **vazão total da rede**, que é a soma útil da vazão de todos os fluxos presentes na rede. Esta é uma métrica bastante utilizada na literatura para se comparar protocolos, porém, não é uma métrica adequada para identificar ou medir o problema de surdez [3]. Desse modo, foram utilizadas outras duas métricas para verificar a justiça na distribuição dos recursos do meio e conseqüentemente o problema de surdez: a **vazão individual de cada fluxo** e o **índice de justiça**. É importante mencionar que o índice de justiça foi definido como o valor de desvio padrão entre as vazões individuais de cada fluxo. Desta forma, um valor baixo de índice de justiça representa uma maior justiça na distribuição dos recursos do meio. Cada um dos resultados apresentados é fruto da média de 20 simulações. A seguir, será apresentado em mais detalhes o cenário utilizado, bem como os resultados obtidos.

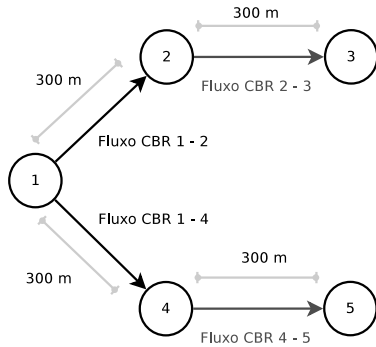


Fig. 3. Cenário de Surdez Avaliado.

A. Resultados

Conforme ilustrado na Figura 3, o cenário avaliado possui cinco nós e quatro fluxos, onde os nós 2 e 3 ficam surdos para o nó 1. Os resultados para vazão total, índice de justiça e vazão individual *versus* taxa de envio total são mostrados respectivamente nos gráficos das Figuras 4(a,b) e 5. Nos resultados apresentados de **vazão individual de fluxo e índice de justiça**, o DVCS-DA utiliza somente o limiar fixo, tal que $T_i = 1, 3 * I_{esp}^i$.

Nos resultados de vazão total (Figura 4(a)), as curvas dos protocolos RI-DMAC e DVCS estão praticamente idênticas. O mesmo acontece nos resultados de vazão individual e de índice de justiça. O gráfico de vazão individual para o RI-DMAC mostra a distribuição injusta da vazão entre os fluxos, decorrente do problema de surdez que ocorre nos nós 2 e 4, causando uma baixa vazão nos fluxos $1 \rightarrow 2$ e $1 \rightarrow 4$ e uma alta vazão nos demais.

Contudo, a técnica proposta (DVCS-DA) consegue com relativo sucesso amenizar o problema de surdez e distribuir de maneira mais justa a vazão entre os fluxos. Isso é mostrado nos índices de justiça do gráfico na Figura 4(b) e na distribuição mais igual da vazão entre os fluxos no gráfico da Figura 5(a), onde a vazão dos fluxos $1 \rightarrow 2$ e $1 \rightarrow 4$ chega a ser mais do que 300% maior do que quando se usa o DVCS ou o RI-DMAC. Os valores de índice de justiça do DVCS-DA foram sempre melhores que os do RI-DMAC e do DVCS, chegando a ser até 86% melhor. Note que os ganhos relativos à vazão individual dos fluxos $1 \rightarrow 2$ e $1 \rightarrow 4$ e à justiça são maiores quando se considera uma maior taxa de envio total.

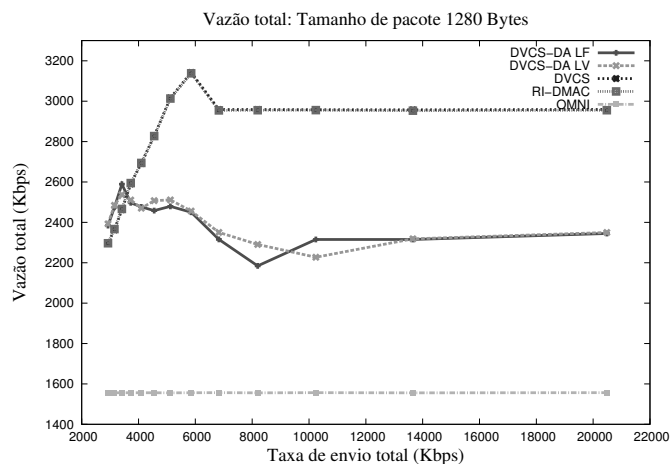
Os resultados evidenciam uma possível relação de inversa proporcionalidade entre justiça e vazão total. Note que tal relação é bastante intuitiva, uma vez que, para qualquer mecanismo de tratamento de surdez utilizado, é necessário que se dispenda um tempo maior entre cada transmissão para se verificar se está ocorrendo ou não surdez e tomar as providências cabíveis, enquanto que, quando se ignora a surdez, utiliza-se este tempo para transmitir mais dados. Tal relação ocorre também com o OMNI que possui a melhor justiça, entretanto a menor vazão total. Note que, nesse caso, isto não ocorre devido a tempo dispendido com tratamento de surdez, mas sim por características das antenas omni-direcionais. Terminada a apresentação dos resultados e a análise dos mesmos, será apresentada uma breve conclusão desse trabalho.

V. CONCLUSÃO

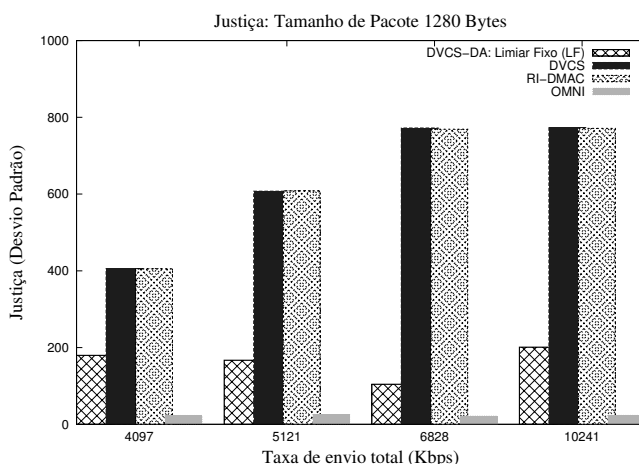
Este trabalho apresentou o contexto em que se propõe a utilização de antenas direcionais, mostrando suas vantagens bem como os problemas decorrentes de seu uso. Dentre esses problemas, um possui destaque especial: o problema de surdez. Então, o presente trabalho propôs uma técnica de tratamento do problema de surdez (DVCS-DA) baseada nas informações dos fluxos de tráfego. Tal técnica foi validada com o auxílio do simulador de redes Qualnet [10]. Quando comparado às demais técnicas, o DVCS-DA apresenta ganhos de até 300% em vazão por fluxo e 86% em justiça. Além disso, os resultados indicam a existência de uma inversa proporcionalidade entre vazão total e justiça, o que pode ser objeto de estudos futuros. Ainda com relação a trabalhos futuros, identificou-se que seria relevante realizar uma melhor parametrização do limiar T_i para todos os fluxos, o que certamente melhoraria o desempenho da técnica proposta.

REFERÊNCIAS

- [1] J.L. Bordim and K. Nakano. Deafness resilient mac protocol for directional communications. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 93(12):3243–3250, 2010.
- [2] R.R. Choudhury and N.H. Vaidya. Deafness: A MAC problem in ad hoc networks when using directional antennas. In *Network Protocols, 2004. ICNP 2004. Proceedings of the 12th IEEE International Conference on*, pages 283–292. IEEE, 2005.
- [3] R.R. Choudhury, X. Yang, R. Ramanathan, and N.H. Vaidya. Using directional antennas for medium access control in ad hoc networks. In *Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 59–70. ACM, 2002.
- [4] IEEE. IEEE Standard for information technology-telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan area networks - specific requirements - part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications. IEEE Standard 802.11, Institute of Electrical and Electronics Engineers, December 2007.
- [5] S. Kumar, V.S. Raghavan, and J. Deng. Medium Access Control protocols for ad hoc wireless networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, 4(3):326–358, 2006.
- [6] G. Li, L.L. Yang, W.S. Conner, and B. Sadeghi. Opportunities and challenges for mesh networks using directional antennas. In IEEE, editor, *Proc. First IEEE Workshop Wireless Mesh Networks (WiMesh'05)*, pages 106–116, 2005.
- [7] J. Li, C. Blake, D.S.J. De Couto, H.I. Lee, and R. Morris. Capacity of ad hoc wireless networks. In *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 61–69. ACM, 2001.
- [8] P. Mohapatra and S. Krishnamurthy. *AD HOC NETWORKS: technologies and protocols*. Springer, 2005.
- [9] R. Ramanathan. Antenna beamforming and power control for ad hoc networks. In *Mobile ad hoc networking*, volume 1, pages 139–173. Wiley-IEEE Press, 2004.
- [10] Scalable Network Technologies. Simulador qualnet. <http://www.scalable-networks.com/>, 2010.
- [11] A.P. Subramanian and S.R. Das. Addressing deafness and hidden terminal problem in directional antenna based wireless multi-hop networks. *Wireless Networks*, 16(6):1557–1567, 2010.
- [12] M. Takai, J. Martin, R. Bagrodia, and A. Ren. Directional virtual carrier sensing for directional antennas in mobile ad hoc networks. In *Proceedings of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, pages 183–193. ACM, 2002.
- [13] M. Takata, M. Bandai, and T. Watanabe. RI-DMAC: a receiver-initiated directional MAC protocol for deafness problem. *International Journal of Sensor Networks*, 5(2):79–89, 2009.
- [14] F. Talucci, M. Gerla, and L. Fratta. MACA-BI (MACA by invitation)-a receiver oriented access protocol for wireless multihop networks. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1997. Waves of the Year 2000'. PIMRC'97., The 8th IEEE International Symposium on*, volume 2, pages 435–439. IEEE, 2002.

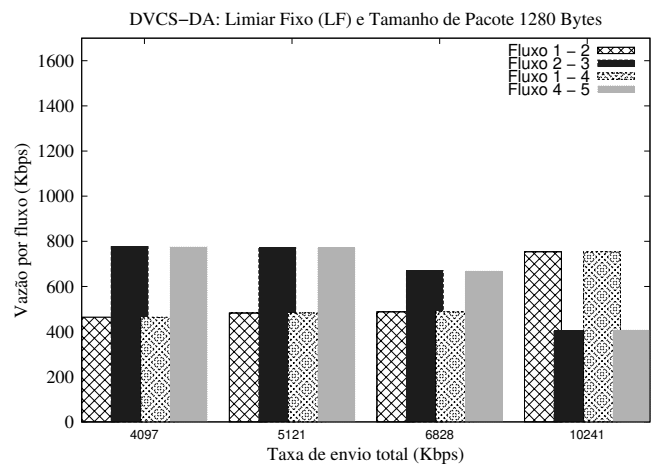


(a) Vazão total

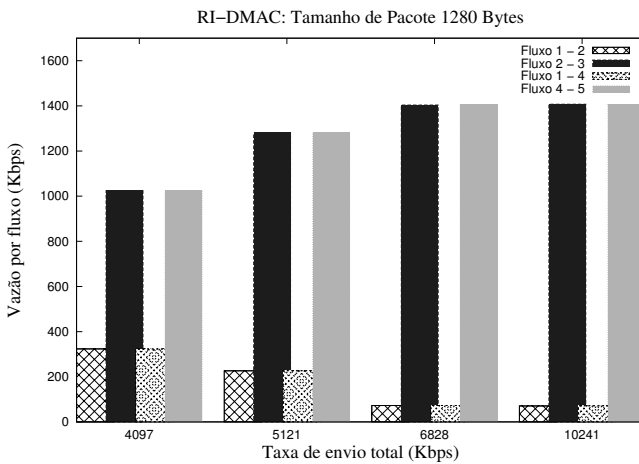


(b) Justiça

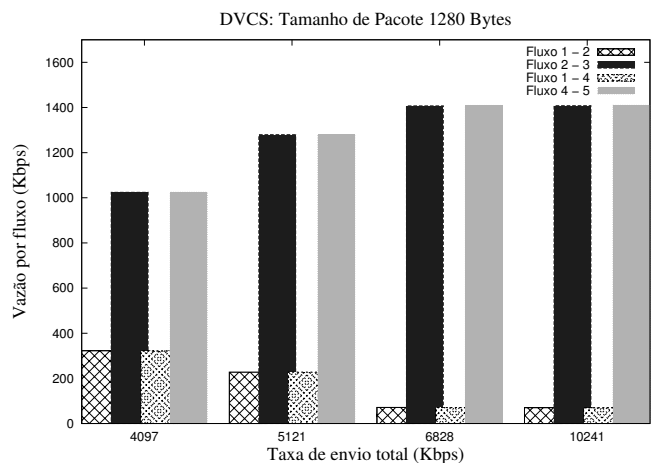
Fig. 4. Vazão total e justiça para diferentes taxas de envio.



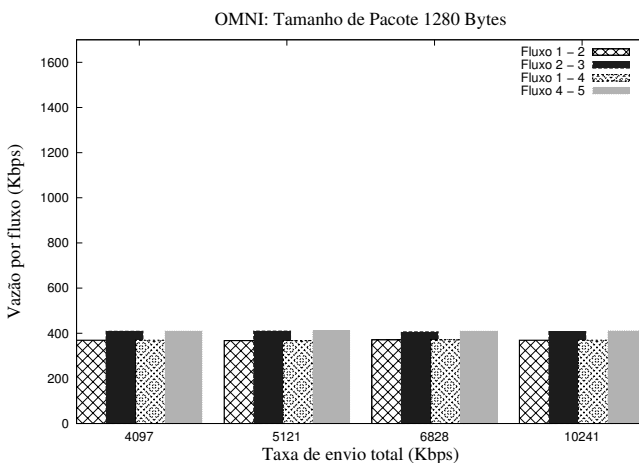
(a) DVCS-DA



(b) RI-DMAC



(c) DVCS



(d) OMNI

Fig. 5. Vazão Individual de Cada Fluxo para diferentes taxas de envio.