

Uma Análise da Conectividade do Canal de Interatividade Ad Hoc para a TV Digital

Aurelio Amodei Junior, Igor M. Moraes, Daniel de O. Cunha, Miguel Elias M. Campista, Pedro Miguel Esposito, Luís Henrique M. K. Costa e Otto Carlos M. B. Duarte

Resumo—Com o advento da transmissão digital terrestre, a TV pode atuar como um veículo de inclusão digital de custo reduzido. Este artigo analisa a adoção de um Canal de Interatividade Ad Hoc para a provisão de interatividade aos usuários de TV digital. O canal proposto utiliza o padrão IEEE 802.11 em modo ad hoc e atende às características geográficas e morfológicas brasileiras. Ao utilizar o Canal de Interatividade Ad Hoc, é importante avaliar a conectividade da rede em diferentes cenários característicos do Brasil. Com este objetivo, foi implementada uma ferramenta de simulação específica. Observou-se através de simulações que em cenários de maior densidade de usuários atinge-se a conectividade total com 20% dos nós ligados e em cenários esparsos com 40% dos *set-top boxes* ativos.

Palavras-Chave—TV digital, redes ad hoc, interatividade.

Abstract—The upcoming terrestrial digital television brings the opportunity for the television to become a low cost vehicle for the digital inclusion. This paper analyzes the utilization of an Ad Hoc Interactivity Channel to provide interactivity to the digital TV users. The proposed channel uses the IEEE 802.11 standard in ad hoc mode, and adapts to the variable geographical and morphological characteristics of Brazil. To assert the suitability of the Ad Hoc Interactivity Channel, a key issue is to analyze the connectivity provided by the channel in the very diverse scenarios found in the country. We implemented a specific simulation tool to analyze the connectivity of the network. The simulation results have shown that in the scenarios with higher density of users, complete connectivity is achieved with 20% of the nodes on, whereas when the users are sparser, at least 40% of the set-top boxes have to be turned on.

Keywords—Digital TV, ad hoc networks, interactivity.

I. INTRODUÇÃO

A televisão é o meio de comunicação que possui a maior penetração nos lares de todo mundo. A difusão terrestre de TV consiste de uma estação base, normalmente uma antena colocada em uma região de maior altitude de um centro urbano, que transmite sinais de radiofrequência para os receptores de TV. Dessa forma, difunde-se de maneira simples e eficaz os sinais de TV dentro de um raio de alcance que atinge milhões de receptores em regiões densamente povoadas.

As funções primordiais da TV são o entretenimento e a informação. Entretanto, com o advento da TV Digital terrestre é possível, além de aumentar a qualidade da recepção de áudio e vídeo, prover novos serviços, como o acesso à Internet e o ensino a distância. Com a adoção destes serviços, um aparelho de TV passa a ter funcionalidades cada vez mais semelhantes

Aurelio Amodei Junior, Igor M. Moraes, Daniel de O. Cunha, Miguel Elias M. Campista, Pedro Miguel Esposito, Luís Henrique M. K. Costa e Otto Carlos M. B. Duarte, Grupo de Teleinformática e Automação, PEE/COPPE-DEL/POLI – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, E-mails: {aurelio,igor,doc,miguel,pedro,luish,otto}@gta.ufrj.br. Este trabalho foi realizado com recursos do CNPq, CAPES, FAPERJ, FINEP, RNP e FUNTEL.

às de um computador pessoal. Dessa forma, por ser um meio de grande penetração, a TV pode atuar como um veículo de inclusão digital de custo reduzido, ideal para países em desenvolvimento como o Brasil.

Para prover novos serviços, os sistemas de TV digital devem adotar um canal de comunicação de retorno, também chamado de Canal de Interatividade. A função deste canal é permitir a interação do usuário com a programação da TV. O usuário poderá escolher ou adequar o conteúdo segundo sua vontade.

No contexto do Sistema Brasileiro de TV Digital (SBTVD), atualmente em desenvolvimento, a tecnologia a ser empregada na implementação do canal de retorno independe dos outros componentes do sistema de TV digital. Uma alternativa para implementar o canal de retorno é utilizar uma rede ad hoc sem fio, onde cada *set-top box* é um nó da rede. Esta é a proposta abordada neste trabalho.

As redes ad hoc sem fio não necessitam de qualquer infra-estrutura pré-instalada. Em uma rede ad hoc, os nós se comunicam diretamente uns com os outros, cooperando para o funcionamento da rede. Entretanto, o preço pago pela maior flexibilidade e robustez destas redes é a complexidade dos nós, que agora têm de implementar todas as funcionalidades necessárias à operação da rede.

Uma outra característica das redes ad hoc sem fio é que cada nó está limitado a comunicações somente dentro do seu raio de alcance. No entanto, é possível estabelecer redes de múltiplos saltos, onde todos os nós atuam como roteadores. Sendo assim, nós que estejam mutuamente fora de alcance podem se comunicar uma vez que as mensagens são reencaminhadas através de outros nós.

Um problema das redes ad hoc de múltiplos saltos é como garantir que um nó consiga se comunicar com um outro nó qualquer da rede. Uma série de trabalhos analisa este problema. Bettstetter [1] deriva uma expressão que calcula o raio de alcance necessário para que não haja nenhum nó isolado numa dada área. O autor propõe ainda uma expressão para calcular quantos nós podem falhar sem que haja prejuízo à conectividade da rede. Dousse *et al.* [2] examinam a probabilidade de dois nós quaisquer numa rede ad hoc estarem conectados. Os autores também analisam a probabilidade de haver conectividade entre nós espalhados em cenários de uma ou duas dimensões. O impacto de *gateways* fixos na rede também é verificado. Gupta e Kumar [3] analisam a capacidade de transmissão de uma rede ad hoc supondo que n nós estejam dentro de uma área definida. Os autores verificam que aumentando o número de nós a vazão da rede vai a zero. Por isso, redes que conectam um número limitado de usuários ou onde as comunicações sejam realizadas entre vizinhos próximos são mais bem sucedidas. Santi *et al.* [4] definem o

valor do raio de alcance dos nós para garantir que a rede esteja fortemente conectada. A análise é feita através de expressões probabilísticas.

Apesar de muitos trabalhos analisarem a conectividade em redes ad hoc, nenhum trata dos cenários particulares para o canal de retorno da TV digital interativa. No caso específico do canal de retorno, todos os nós da rede devem conseguir se comunicar com o *gateway*, que é o ponto de interconexão com a rede da emissora. O objetivo deste artigo é analisar a conectividade em redes ad hoc sem fio IEEE 802.11, de acordo com características particulares do canal de retorno da TV digital interativa e dos cenários geográficos brasileiros. São analisados cenários de diferentes densidades, urbanos e rurais, considerando o uso ou não de antenas. A métrica usada para avaliar a conectividade da rede é o percentual de nós ad hoc (*set-top boxes*) que conseguem se comunicar com o *gateway* em função do percentual de nós ativos na rede. A taxa de transmissão de dados de cada nó também é variada. Os resultados mostram que em cenários urbanos, com maior densidade, pode-se alcançar conectividade total com uma fração muito pequena de nós ativos e aumentar a taxa de transmissão à medida que essa fração aumenta. Em cenários rurais, é demonstrada a necessidade do uso de antenas para aumentar o alcance dos *set-top boxes* e garantir a conectividade.

Este artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção II é caracterizado o canal de interatividade proposto neste trabalho. O modelo de propagação e o simulador usado na análise de conectividade são apresentados na Seção III. Nesta mesma seção, são descritos os cenários utilizados nas simulações. Na Seção IV os resultados das simulações são discutidos. Por fim, na Seção V são apresentadas as considerações finais, bem como as futuras direções deste trabalho.

II. O CANAL DE INTERATIVIDADE AD HOC

O Canal de Interatividade possui diferentes requisitos dependendo da aplicação de interesse. Algumas aplicações exigem bidirecionalidade no canal de retorno, enquanto que algumas são atendidas pela comunicação unidirecional no sentido espectador-emissora. No sentido emissora-espectador as informações são enviadas por difusão terrestre. Em alguns casos específicos, como nos jogos *online*, pode ser interessante prover comunicações ponto-a-ponto ou ponto-multiponto entre usuários. Além disso, as aplicações possuem requisitos variáveis de banda passante, latência e confiabilidade.

Um Canal de Interatividade Ad Hoc, como o proposto neste trabalho, é capaz de se adequar às necessidades de diferentes aplicações. Dependendo da tecnologia empregada, este canal pode ser naturalmente bidirecional e possibilitar de forma direta a comunicação ponto-a-ponto entre dois espectadores quaisquer. Uma das maiores vantagens da utilização do canal de retorno ad hoc é o seu baixo custo de instalação, pois as redes ad hoc são auto-organizáveis. Portanto, basta que o *set-top box* seja ligado para que ele comece a buscar seus vizinhos e a estabelecer as rotas. Esta flexibilidade, no entanto, faz com que algumas aplicações com requisitos estritos de banda passante ou *jitter* possam experimentar problemas devido às variações no canal. Porém, as principais aplicações no

contexto da inclusão digital, como o governo eletrônico (e-gov), o ensino a distância e o correio eletrônico, podem ser implementadas de forma satisfatória através das redes ad hoc.

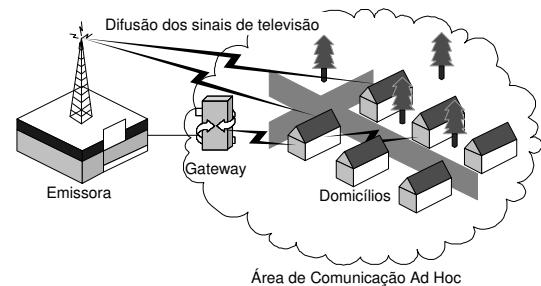


Fig. 1. Sistema de TV digital com canal de retorno ad hoc.

Desta forma, nas regiões onde for adotado o canal de retorno ad hoc o sistema funcionará como mostrado na Figura 1. Neste caso, os sinais de televisão são enviados normalmente via difusão terrestre. O canal de retorno é implementado através de uma rede ad hoc ligando os usuários a um nó *gateway* conectado à emissora. Os *set-top boxes* dos usuários funcionam como nós ad hoc, roteando os dados de diferentes usuários em direção ao *gateway* e possibilitando a entrega das informações enviadas pela emissora através do *gateway* para seus destinatários.

Uma questão chave para o correto funcionamento do canal de retorno ad hoc é garantir uma conectividade mínima entre os nós da rede (*set-top boxes* de diferentes usuários) para possibilitar a troca de dados com o *gateway* e, conseqüentemente, com a emissora. Diversos fatores influenciam a conectividade da rede: o número de *set-top boxes* numa determinada região, o alcance de transmissão de um *set-top box* e a fração do tempo que os *set-top boxes* estão ligados. O número de *set-top boxes* está diretamente ligado à densidade populacional de uma região, pois se espera que a maioria dos domicílios tenha, pelo menos, um aparelho de TV digital, como já ocorre com a TV analógica [5]. O alcance de transmissão depende da tecnologia empregada, neste caso o padrão IEEE 802.11, e da taxa de transmissão de dados utilizada, pois taxas mais baixas toleram menores relações sinal-ruído e alcançam maiores distâncias. Além disso, pode-se optar pela utilização ou não de uma antena externa para aumentar o alcance da transmissão. A fração do tempo que os dispositivos passam ligados é diretamente dependente dos hábitos dos espectadores, se eles desligam ou não o *set-top box*. Em horários de maior audiência espera-se encontrar a maior parte dos dispositivos operando, enquanto que em horários onde há um número menor de espectadores é natural que menos dispositivos estejam participando da rede.

A Seção III detalha as simulações realizadas para analisar a conectividade da rede, passo importante para determinar a viabilidade do sistema proposto. Estas simulações levam em conta as três características discutidas anteriormente através da modelagem de cenários baseados na realidade brasileira.

III. SIMULAÇÕES

A conectividade do canal de retorno ad hoc em diferentes cenários brasileiros é analisada através de simulações. Nas Seções III-A e III-B descreve-se o simulador desenvolvido,

o modelo de propagação e os cenários de referência utilizados nas simulações.

A. O Modelo de Propagação e o Simulador Desenvolvido

Na análise de conectividade de uma rede ad hoc deve se levar em conta a potência de transmissão e a sensibilidade de recepção de cada nó para as taxas analisadas. A sensibilidade de recepção de um nó é a potência mínima de recepção necessária para que o nó consiga receber corretamente um quadro de dados em uma determinada taxa. Os valores utilizados neste trabalho consideram os valores típicos de dispositivos que implementam o padrão de redes locais sem fio IEEE 802.11 e valores definidos por esta mesma norma. A potência de transmissão utilizada é de 18 dBm, ou 63,1 mW, que é um valor máximo característico dos produtos disponíveis comercialmente [6]. Para a sensibilidade de recepção utiliza-se os valores especificados no padrão IEEE 802.11 [7], que são apresentados na Tabela I. Apesar de, na prática, alguns fabricantes desenvolverem produtos mais sensíveis, serão utilizados os valores mínimos exigidos pela norma como análise de pior caso.

TABELA I
SENSIBILIDADE DE RECEPÇÃO DO PADRÃO IEEE 802.11G.

Taxa (Mbps)	Potência de recepção	
	dBm	pW
54	-65	316
48	-66	251
36	-70	100
24	-74	39,8
18	-77	20
12	-79	12,6
9	-81	7,94
6	-82	6,31
11	-80	10
5,5	-86	2,51
2	-88	1,58
1	-92	0,631

Nas simulações foram utilizadas as taxas de 54, 36, 24, 11 e 1 Mbps. A taxa de 11 Mbps foi utilizada por ser a maior taxa compatível com o padrão IEEE 802.11b, o que permite avaliar o uso de dispositivos deste padrão. Alguns fabricantes fornecem valores de sensibilidade diferentes dos valores encontrados nesta tabela, de acordo com a sensibilidade do hardware utilizado em cada equipamento. A norma especifica os valores mínimos de sensibilidade para todos os dispositivos IEEE 802.11.

O alcance dos nós é determinado pela perda de propagação no meio, ou seja, pela atenuação do sinal transmitido até a sua chegada no receptor. Para uma comunicação em linha de visada, sem obstruções e sem perdas adicionais, utiliza-se a equação de espaço livre. Dado que P_t é a potência de transmissão, G_t e G_r são os ganhos de transmissão e recepção das antenas, λ é o comprimento de onda, d é a distância do nó receptor e Pr_0 é a potência recebida, a equação do espaço livre é determinada pela Equação 1:

$$Pr_0(d) = \frac{\lambda^2}{(4 \times \pi)^2} * \frac{P_t \times G_t \times G_r}{d^2}. \quad (1)$$

No entanto, para o canal de retorno ad hoc o modelo de espaço livre não é o mais adequado, uma vez que ele

não retrata as características de propagação dos cenários em questão. No caso do canal de retorno ad hoc, dificilmente dois nós da rede irão conseguir uma comunicação em visada direta principalmente em cenários urbanos mais densos. Além disso, espera-se que as antenas possam ser acopladas aos *set-top boxes*, ficando dentro das casas junto aos aparelhos de TV. Isso torna o ambiente de propagação mais próximo de um ambiente interno (*indoor*) do que de um ambiente externo (*outdoor*), o que aumenta a perda de propagação. Essas características do canal de retorno motivam o emprego do modelo de propagação de perda de percurso [8]. Esse modelo considera uma perda de percurso exponencial de acordo com um parâmetro β , que é o expoente de perda de propagação, como mostra a equação seguinte:

$$Pr(d) = \frac{Pr_0(d_0) \times d_0^\beta}{d^\beta}. \quad (2)$$

A Equação 2 representa o modelo utilizado, onde β é o expoente de perda de propagação, d_0 é a distância de referência (tipicamente de um metro), d é a distância do nó receptor. O parâmetro $Pr_0(d_0)$ equivale à potência recebida calculada pelo modelo de espaço livre, Equação 1, para uma distância d_0 e Pr é a potência recebida pelo nó receptor.

Pode-se notar que para uma distância fixa, a atenuação aumenta com o valor de β , pois a potência é inversamente proporcional a d^β . Para o caso de $\beta = 2$ tem-se a propagação em espaço livre. Para comunicações em ambientes externos em áreas urbanas, por exemplo, utiliza-se valores de β entre 2,7 e 5,0 [8], [9].

Para analisar a conectividade da rede ad hoc utilizando o padrão IEEE 802.11 foi desenvolvido um simulador, escrito em linguagem C, que determina o número de nós conectados ao *gateway*. Considera-se um nó conectado aquele que tenha pelo menos um caminho de n saltos para chegar até o *gateway*, com $n \geq 1$. No simulador desenvolvido, implementa-se o modelo de propagação de perda de percurso. Esse modelo é usado para calcular o alcance dos nós, de acordo com a taxa de transmissão utilizada e com o valor do parâmetro β , dependente do cenário utilizado. O simulador também é capaz de gerar cenários onde os nós estão dispostos em grade ou dispostos de forma aleatória. Dessa forma é possível representar os cenários de referência para o território brasileiro, descritos na Seção III-B. Para determinar a conectividade, inicia-se o processo de descoberta de nós conectados a partir do *gateway*. Verifica-se então quais nós são vizinhos do *gateway*. Depois de identificados, os nós vizinhos são adicionados a uma lista de nós conectados. O próximo passo é verificar os nós vizinhos dos nós que estão na lista de conectados. Os vizinhos dos nós da lista também são adicionados à lista de conectados, uma vez que eles possuem uma rota para o *gateway*. Este processo é repetido até que um nó não possua mais vizinhos para adicionar à lista de conectados.

B. Os Cenários de Referência

O Brasil é um país de muitas diferenças, com cenários que variam muito quanto à concentração demográfica, às características geográficas e à distribuição de renda. Avaliar a conectividade de uma rede ad hoc em cenários que retratem esta diversidade é o objetivo deste artigo.

TABELA II
PARÂMETROS PARA OS CINCO CENÁRIOS DE REFERÊNCIA.

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5
Bairro/Cidade	Rocinha	Ramos	Copacabana	Parque Anchieta	Paty do Alferes
Área total (km²)	1,4	2,8	4,1	3,9	319
Área residencial (km²)	1,4	1,5	2,5	2,2	-
Área simulada (km²)	1,4	1,5	1,0	2,2	319
Número de domicílios	17000	11819	61000	7778	6813
Densidade (domicílios/km²)	12142	8117	24797	3487	21
Beta (β)	3,9	3,9	3,9	3,9	3,0
Disposição dos nós	grade	grade	grade 3D	grade	aleatória

Para representar as diferentes condições geográficas, morfológicas, sócio-econômicas e populacionais brasileiras são definidos cinco cenários de referência:

- Cenário 1 - região urbana de residências em morros com alta densidade populacional, caracterizada pelas favelas;
- Cenário 2 - região urbana com imóveis horizontais e alta densidade populacional;
- Cenário 3 - região urbana caracterizada por imóveis verticais e alta densidade populacional;
- Cenário 4 - região urbana com imóveis horizontais e média ou baixa densidade populacional;
- Cenário 5 - região rural de grandes dimensões e densidade populacional muito baixa.

Os dados obtidos para a caracterização destes cinco cenários são reais [10], [11], conforme mostra a Tabela II. Para os cenários de 1 a 4 foram usados dados de regiões administrativas ou bairros do município do Rio de Janeiro. Para o Cenário 5, os dados obtidos são referentes ao município de Paty do Alferes, localizado na zona rural do estado do Rio de Janeiro. Como 90% dos domicílios do país possuem pelo menos um aparelho de TV [5], considera-se que o número de nós da rede será dado pelo número de domicílios existentes em uma determinada área. Para o Cenário 3, considera-se nas simulações que, em média, os imóveis verticais possuem 10 andares.

Para representar os cinco cenários de referência, são definidos três tipos de disposições dos nós na área simulada. Para representar as áreas urbanas, predominantemente compostas por imóveis horizontais, utilizou-se um cenário em grade. Esta escolha se justifica, pelas áreas urbanas seguirem um padrão de espaçamento entre domicílios. No caso das favelas o cenário em grade também se aplica, pois apesar de não haver um espaçamento regular, os domicílios estão muito próximos uns dos outros. Para a área urbana com imóveis verticais utilizou-se um cenário em grade tridimensional para que fosse possível representar os edifícios. Cada plano xy representa um andar no eixo z . Para a área rural, devido à grande dimensão e à baixa densidade de domicílios, utilizou-se um cenário aleatório. Neste cenário, devido à grande distância entre os nós, é considerado o uso de antenas nos *set-top boxes* para garantir a conectividade dos usuários.

Considera-se, para todos os cenários simulados, que o *gateway* está localizado em um dos vértices do quadrilátero que representa a área simulada. Este é um cenário de pior caso, uma vez que só a quarta parte do alcance do *gateway*

estará sendo considerada.

O parâmetro β é definido de acordo com o ambiente de propagação de cada cenário. Para os cenários urbanos (1 a 4) foi definido $\beta = 3,9$ baseando-se em trabalhos da literatura [6], [9], [12]. Já para o Cenário 5, rural, por possuir uma menor densidade de residências, foi definido $\beta = 3,0$. Isto deve-se ao fato de que áreas urbanas assemelham-se a ambientes internos, devido à alta densidade de casas e prédios. Já o Cenário 5, por ser um cenário rural, assemelha-se a um ambiente externo, devido à existência de grandes campos abertos.

IV. RESULTADOS

O simulador desenvolvido foi utilizado para avaliar a conectividade do canal de retorno ad hoc nos cinco cenários de referência. Em todos os cenários, considera-se a existência de apenas um *gateway*, localizado em um dos vértices da área simulada. Nas análises de conectividade em todos os cenários, varia-se o percentual de nós ligados na rede e considera-se quatro taxas de transmissão de dados diferentes: 1, 11, 36 e 54 Mbps. Os demais parâmetros das simulações estão especificados na Tabela II. Cada ponto de todas as curvas foi calculado com intervalo de confiança de 95% relativo à média das amostras.

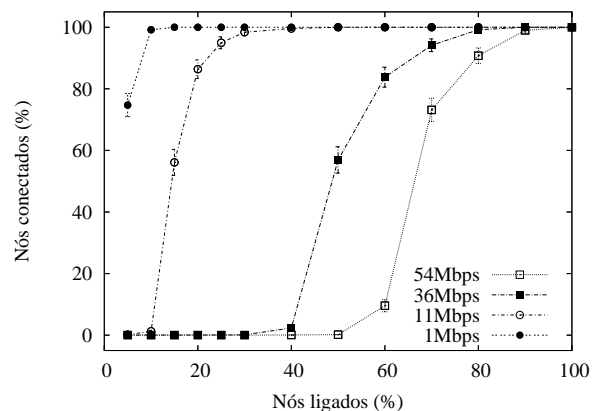


Fig. 2. Conectividade do canal ad hoc no Cenário 1 - Rocinha.

A. Cenário 1

O Cenário 1 possui as características de uma favela. Para representar este cenário, obteve-se dados demográficos referentes à região administrativa da Rocinha, a maior favela do Rio de Janeiro. A Figura 2 mostra que para as quatro taxas

de transmissão obtém-se a conectividade total da rede. Em virtude da alta densidade de domicílios, a conectividade é total quando apenas 20% dos nós da rede estão ligados e operando na taxa de 1 Mbps. Nessas condições todos os nós conseguem se comunicar com o gateway.

Por outro lado, para taxas de transmissão mais elevadas, a conectividade total é alcançada quando mais nós estão ligados. Quando os nós operam na maior taxa, 54 Mbps, a conectividade total é alcançada quando 90% dos *set-top boxes* estão ligados. Esta é uma situação comum em horários de pico de audiência. Vale ressaltar que a porcentagem de nós ligados para garantir a conectividade total na taxa máxima pode ser reduzida com a instalação de antenas nos *set-top boxes*.

B. Cenário 2

Para representar o Cenário 2, escolheu-se o bairro de Ramos. Localizado na zona norte do Rio de Janeiro, Ramos é caracterizado pela grande densidade de domicílios, em sua maioria casas. Os resultados para este cenário são apresentados na Figura 3. Observa-se que a conectividade é garantida para todos os nós após 20% de nós ligados, como ocorrido no Cenário 1. Entretanto, observa-se que para poucos nós ligados a conectividade é menor que no Cenário 1, pois a densidade de domicílios é menor no Cenário 2, Tabela II. Pelo mesmo motivo, com menos nós ligados, a quantidade de nós conectados a 11 Mbps é maior no Cenário 1. Esse efeito diminui para as duas taxas mais altas, pois a quantidade de nós ligados já é alta o suficiente para suportar ambas as taxas de acordo com os cenários analisados.

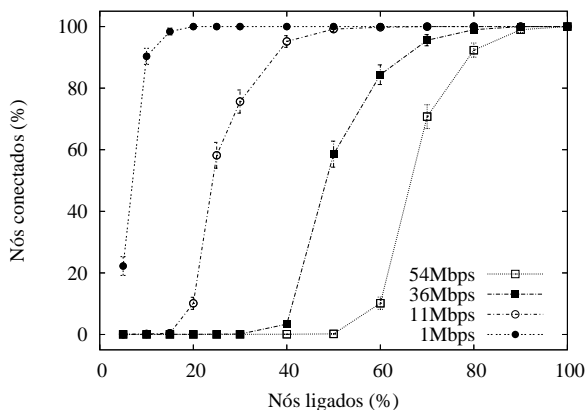


Fig. 3. Conectividade do canal ad hoc no Cenário 2 - Ramos.

Ainda é visto na Figura 3 que apenas com 80% de nós ligados é que todos os nós conseguem alcançar taxas de 36 Mbps e para todos atingirem a taxa máxima é necessário que todos estejam ligados. Esse fato é devido às limitações de alcance que as taxas mais altas possuem devido aos seus esquemas de modulação. Tais esquemas não são apropriados para baixas relações sinal-ruído.

C. Cenário 3

Para representar o Cenário 3 foi escolhido o bairro de Copacabana, zona sul do Rio de Janeiro, por sua elevada densidade de domicílios e por ser uma região composta, quase que exclusivamente, por edifícios. Como mostra a Figura 4, para a taxa de 1 Mbps a conectividade é total quando pelo

menos 10% dos nós da rede estão ativos. Quando a porcentagem de nós ligados atinge 20%, também é possível alcançar a conectividade total da rede, usando a taxa de transmissão de 11 Mbps. Para as duas taxas mais elevadas, independentemente do percentual de nós ativos, a conectividade da rede é próxima de zero. Isto ocorre, pois o alcance da transmissão diminui, assim como o número de vizinhos de cada nó, em relação aos Cenários 1 e 2. Apesar de uma maior densidade total de domicílios, a densidade média de usuários por plano *xy* é menor do que nos dois cenários anteriores. Tem-se uma densidade média de cerca de 2500 nós por andar, supondo edifícios com 10 andares, de acordo com Tabela II. Para o Cenário 2, plano, esta densidade é cerca de três vezes maior.

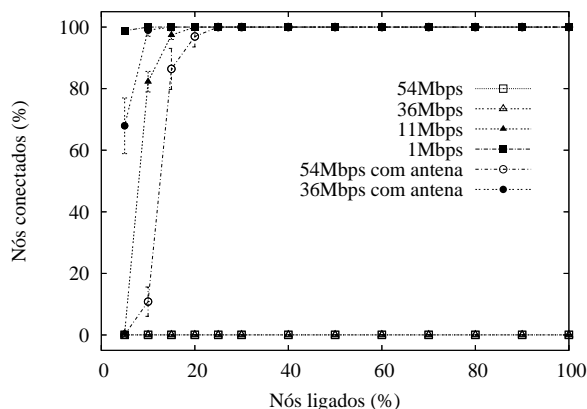


Fig. 4. Conectividade do canal ad hoc no Cenário 3 - Copacabana.

Para que a conectividade total seja atingida para as taxas de 36 e 54 Mbps, pode-se utilizar antenas acopladas aos *set-top boxes*. A Figura 4 mostra os resultados para as simulações considerando uma antena de 6 dBi. Nota-se que com 10% dos nós ligados já se consegue conectividade total para uma taxa de 36 Mbps. Para 54 Mbps, são necessários 30% dos *set-top boxes* ligados.

D. Cenário 4

O Cenário 4 é representado pelo bairro Parque Anchieta, predominantemente residencial, localizado na zona norte do Rio de Janeiro.

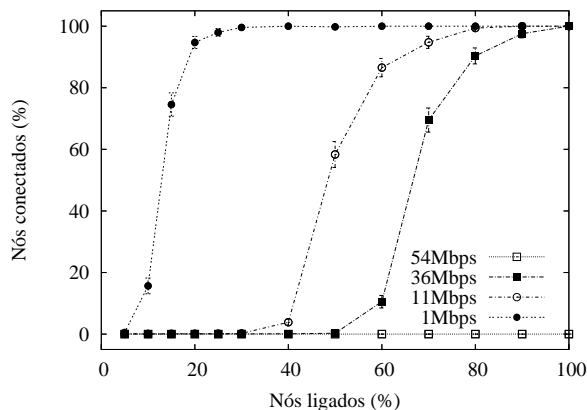


Fig. 5. Conectividade do canal ad hoc no Cenário 4 - Parque Anchieta.

Os resultados para o Cenário 4 são mostrados na Figura 5. É possível observar que devido à baixa densidade de domicílios,

a taxa máxima não é atingida. Isso ocorre por nessas regiões a distância entre os vizinhos ser em média maior que a necessária para se estabelecer comunicações a 54 Mbps. Mais uma vez, isso é atribuído às limitações de alcance, resultantes da modulação utilizada. Entretanto, é visto que mesmo em cenários mais esparsos a conectividade completa já é obtida com menos de 40% dos nós ligados e antes disso uma alta porcentagem de conectividade já pode ser vista com 15%. Taxas de 36 Mbps são alcançadas com 80% dos nós ligados e a taxa máxima, 54 Mbps, somente se todos os nós estiverem funcionando. Esse comportamento segue o visto nos Cenários 1 e 2. Agora, porém, para taxas de 54 Mbps, com um número menor de nós ligados, a conectividade é menor. Isso mostra que para mais nós transmitirem na taxa máxima, é necessária a presença de muitos nós ligados dadas as maiores distâncias em média.

E. Cenário 5

Para o Cenário 5, os dados obtidos são referentes ao município de Paty do Alferes, localizado na zona rural do estado do Rio de Janeiro. A partir da Figura 6 pode-se perceber que com os valores especificados na norma IEEE 802.11 e sem a utilização de uma antena externa é impossível obter a conectividade desejada na rede. Nesta figura é mostrado apenas o caso de transmissões a 1Mbps, pois todas as outras taxas possuem alcances menores. Já com a utilização de uma antena externa de 6 dBi, é possível obter conectividade de mais de 95% dos nós na taxa de 1Mbps com pelo menos 60% dos nós ligados. No entanto, não se obtém uma conectividade satisfatória para a taxa de 11Mbps. Por outro lado, uma antena de 12 dBi possibilita uma conectividade alta mesmo à taxa de 11 Mbps e permite uma conectividade intermediária mesmo para a taxa de 24 Mbps.

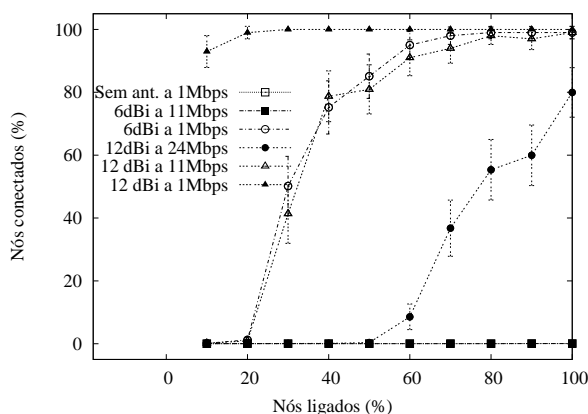


Fig. 6. Conectividade do canal ad hoc no Cenário 5 - Paty do Alferes.

V. CONCLUSÕES E DIREÇÕES FUTURAS

A TV digital alia o alto poder de penetração da TV convencional à interatividade. Isto faz com que a TV digital seja vista como um poderoso instrumento de inclusão digital. A base da interatividade do sistema de TV digital é o canal de retorno, responsável por enviar as informações dos espectadores à emissora e vice-versa. Esse canal pode ser implementado com diferentes tecnologias. Neste trabalho é focada a utilização de um canal de retorno ad hoc baseado

no padrão IEEE 802.11. A opção por esta tecnologia se deve a uma maior flexibilidade e um menor custo de instalação. No entanto, para garantir o correto funcionamento da rede, deve-se garantir uma conectividade mínima da rede.

Este artigo analisou a conectividade do canal de retorno ad hoc em diferentes cenários baseados na realidade brasileira. Para isto, desenvolveu-se um simulador específico. Foram levadas em consideração questões como a densidade de nós, fração de nós ativos, ambiente de propagação e taxa de transmissão. Os resultados mostram que em áreas mais densamente povoadas é possível obter 100% de nós conectados mesmo com uma pequena fração de nós ativos. Nesses cenários, à medida que o número de nós ativos aumenta, torna-se possível a utilização de taxas de transmissão mais elevadas sem comprometer a conectividade. Além disso, mesmo em cenários de média densidade, é possível obter conectividade total com cerca de 30% dos nós ativos. Nos cenários de mais baixa densidade, como as regiões rurais, a adoção de dispositivos IEEE 802.11 comercialmente disponíveis se mostra insuficiente para garantir a conectividade da rede. No entanto, é demonstrado neste trabalho que para estes casos específicos é possível utilizar antenas externas para aumentar o alcance das transmissões e garantir a conectividade em taxas de transmissão mais baixas.

Um outro fator que pode influenciar na conectividade de uma rede ad hoc é o protocolo de roteamento utilizado. De acordo com a carga de controle gerada por cada protocolo para a descoberta de rotas, pode haver colisão de pacotes e congestionamento na rede. Com isso, a conectividade será reduzida. Nesta direção, será feita uma análise dos diferentes protocolos de roteamento para determinar o protocolo que provê a maior conectividade da rede.

REFERÊNCIAS

- [1] C. Bettstetter, "On the Minimum Node Degree and Connectivity of a Wireless Multihop Network", em *ACM MobiHoc'02*, pp. 80-91, junho de 2002.
- [2] O. Dousse, P. Thiran e M. Hasler, "Connectivity in ad-hoc and hybrid networks", em *IEEE INFOCOM'02*, pp. 1079-1088, junho de 2002.
- [3] P. Gupta e P. R. Kumar, "The Capacity of Wireless Networks", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 2, pp. 388-404, março de 2000.
- [4] P. Santi, D. M. Blough e F. Vainstein, "A Probabilistic Analysis for the Range Assignment Problem in Ad Hoc Networks", em *ACM MobiHoc'01*, pp. 212-220, outubro de 2001.
- [5] IBGE, "PNAD 2003 - Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios", 2004. http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/trabalhoerendimento/pnad2003/sintese_pnad2003.pdf.
- [6] H. Bengtsson, E. Uhlemann e P. Wiberg, "Protocol for wireless real-time systems", em *11th Euromicro Conference on Real-Time Systems*, junho de 1999.
- [7] IEEE, "Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High-speed physical layer in the 2.4 GHz band". IEEE Standard 802.11g, 2003.
- [8] T. S. Rappaport, *Wireless Communications, Principles and Practice*. 2002.
- [9] D. Cheung e C. Prettie, "A path loss comparison between the 5 GHz UNII band (802.11a) and the 2.4 GHz ISM band (802.11b)", relatório técnico, Intel Labs, jan 2002.
- [10] IPP - Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos, "Armazém de dados", 2005. <http://www.armazemdedados.rio.rj.gov.br/>.
- [11] IBGE, "Cidades@", 2005. <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/>.
- [12] S. Zvanovec, P. Pechac e M. Klepal, "Wireless LAN Networks Design: Site Survey or Propagation Modeling?", *RADIOENGINEERING*, vol. 12, no. 4, pp. 42-49, dezembro de 2003.