

Sobre a disputa por recursos de rede WLAN por aplicações VoIP: uma proposta de modelagem usando Teoria dos Jogos*

Edson H. Watanabe, Daniel S. Menasché, Fernando Silveira Filho
Edmundo A. de Souza e Silva, Rosa Maria M. Leão

COPPE-PESC e Dept. de Ciência da Computação – UFRJ

{edson, sadoc, fernando, edmundo, rosam}@land.ufrj.br

Abstract. *We present the results of a VoIP experiment over a wireless network. Users share an access point (AP), and may choose the transmission rate at which the VoIP traffic is received. Each user makes his own decisions with the sole goal of maximizing the perceived quality of service. We are interested in the convergence point of this system. Using a game-theoretic framework, we model the adaptation process of users to the current network conditions. In particular, we propose a methodology which includes network measurements to gain new insights concerning the dynamics through which selfish users converge to equilibrium points.*

Resumo. *Neste artigo são apresentados os resultados de um experimento envolvendo usuários que acessam uma rede sem fio para transmissão de voz sobre IP. Os usuários compartilham um ponto de acesso (AP) e podem escolher livremente a taxa com que transmitem dados na rede. Cada usuário toma suas decisões individuais com o objetivo exclusivo de maximizar a qualidade da voz por ele recebida. Estamos interessados no ponto de convergência deste sistema. À luz da teoria dos jogos, modelamos o processo de adaptação dos usuários às condições da rede. Em particular, propomos uma metodologia envolvendo medições na rede, para melhor compreender a dinâmica através da qual usuários egoístas convergem para um ponto de equilíbrio.*

1. Introdução

Um dos elementos essenciais de uma rede é a habilidade de lidar adequadamente com o congestionamento. A atual estabilidade da Internet deve-se em grande parte ao emprego do TCP pela maioria dos fluxos. Entretanto, num breve futuro, este cenário deve mudar, pois o TCP não é adequado para a transmissão de dados multimídia em tempo real. De fato, o uso do UDP para a transmissão de mídias como voz e vídeo vem crescendo amplamente [PriMetrica, Inc. 2005]. Uma vez que o UDP não oferece nenhum tipo de controle de congestionamento, é essencial estudar o comportamento da rede quando for usada massivamente para transmissão dessas novas mídias.

Alguns autores sugerem que o protocolo de transporte UDP seja adotado em conjunto com algum mecanismo de controle de congestionamento [Floyd et al. 2000]. O uso destes mecanismos seria importante para prevenir um potencial colapso devido ao congestionamento excessivo (*congestion collapse*). Entretanto, não é evidente que técnicas

*Este trabalho foi suportado em parte pelo CNPq, FAPERJ e FINEP/RNP.

de controle passem a ser impostas e o cenário mais provável é que a adoção de mecanismo de controle seja completamente voluntária.

Em Ciências Econômicas, as múltiplas demandas por um recurso escasso são mediadas pelo mercado. Quem estiver disposto a pagar mais por um recurso escasso terá a oportunidade de usá-lo. No entanto, a Internet hoje não possui mecanismos de tarifação escaláveis. Com raras exceções, toda a infraestrutura da Internet é compartilhada sem que exista uma política de *diferenciação de serviços* em larga escala.

Uma outra abordagem para lidar com o problema do congestionamento consiste em delegar a responsabilidade do controle para os usuários. Por exemplo, no contexto de transmissão de voz e vídeo, algumas aplicações permitem aos usuários escolher a taxa que usarão para codificar os dados. Além disso, essas aplicações podem também adotar diferentes mecanismos de redundância (FEC, ou *forward error correction*) para mascarar perdas de pacotes e aumentar a qualidade do serviço prestado aos usuários, às custas de um aumento da taxa de transmissão individual. Dessa forma, os usuários podem ajustar dinamicamente a taxa, procurando aprimorar a qualidade de serviço (QoS) por eles percebida. A idéia de permitir que os usuários determinem a taxa de recepção de dados como um mecanismo de controle de congestionamento é ainda pouco explorada na literatura. Neste cenário, os usuários possuem uma função de utilidade que depende das características da rede (e.g., vazão e retardo) e assume-se que os mesmos são egocêntricos (*self-regarding*). Os usuários competem por recursos compartilhados, e as ações de um afetam o desempenho dos outros. Neste contexto, a teoria dos jogos emerge como uma ferramenta natural para modelar e avaliar o desempenho destes sistemas.

Neste artigo apresentamos os resultados de um experimento envolvendo usuários acessando uma rede sem fio para transmissão de voz sobre IP. Os usuários considerados compartilham um ponto de acesso (AP), e escolhem livremente a taxa com a qual transmitem dados na rede. Cada usuário toma suas decisões individuais com o objetivo exclusivo de maximizar a qualidade da voz por ele recebida. Estamos interessados no ponto de convergência deste sistema e no processo dinâmico através do qual os usuários convergem para este ponto.

Uma vez que as redes sem fio em geral possuem problemas de contenção e interferência, além de queda da potência do sinal em função da distância [Choi et al. 2004], estas diferenciam-se das redes cabeadas, sendo mais difícil garantir a qualidade de serviço neste cenário. Assim sendo, os conflitos de interesses entre os usuários nestas redes podem ser mais proeminentes, o que nos motivou a adotar uma rede sem fio IEEE 802.11 em nossos experimentos.

A principal contribuição deste artigo é a metodologia proposta para melhor compreender o comportamento de usuários egoístas que compartilham recursos numa rede de computadores sem fio. Em particular a metodologia combina um modelo envolvendo teoria dos jogos evolucionários, medições na rede, e uma rede neural para estimar, a partir das medições feitas na rede, a qualidade de serviço experimentada pelos usuários.

O restante deste artigo está dividido da seguinte forma: na próxima seção, apresentamos uma breve introdução à teoria dos jogos e discutimos os trabalhos relacionados. Na Seção 3 descrevemos o modelo adotado para capturar o processo dinâmico de ajuste dos usuários para os pontos de equilíbrio. Na Seção 4 descrevemos o experimento im-

plementado, envolvendo usuários acessando uma rede sem fio, e na Seção 5 constam os resultados obtidos. Na Seção 6 apresentamos em detalhes a metodologia utilizada para inferir os parâmetros do modelo proposto, necessária para fazermos uso prático do mesmo. Esta metodologia envolve medições e uma rede neural. Na Seção 7 apresentamos a análise do experimento à luz do modelo exposto na Seção 3. Finalmente, a Seção 8 traz as conclusões e trabalhos futuros.

2. Teoria dos Jogos

O principal objetivo da teoria dos jogos é entender como agem os jogadores (usuários) quando estes confrontam-se com um cenário onde existem conflitos de interesses. Neste cenário, cada jogador deve tomar uma decisão a partir de um conjunto de opções a ele disponíveis. Na nomenclatura da teoria dos jogos, cada opção disponível é conhecida como uma estratégia. Os ganhos obtidos por cada jogador dependem da estratégia por ele adotada bem como das estratégias adotadas pelos outros jogadores.

O problema fundamental da Teoria dos Jogos é entender como os jogadores irão agir ao defrontarem-se com um determinado jogo. Em particular, procura-se prever as estratégias que estes irão adotar. Ao perfil das estratégias previsto para os jogadores dá-se o nome de *solução do jogo*. Entretanto, existem vários conceitos de *solução do jogo* definidos no âmbito da Teoria dos Jogos. Vamos adotar o mais comum, conhecido como equilíbrio de Nash. O equilíbrio de Nash é um conjunto de escolhas, uma para cada jogador, com a propriedade de que nenhum jogador pode aumentar seu *payoff* modificando, unilateralmente, suas estratégias.

Neste trabalho consideramos um cenário análogo ao sugerido por [Key and McAuley 1999], e estudado de forma teórica por [Menasché et al. 2005]. Trata-se de um ambiente completamente assíncrono, caracterizado pela falta de acordos, onde usuários gulosos selecionam suas taxas de transmissão de dados baseando-se exclusivamente na qualidade de serviço percebida a nível de aplicação (*user level QoS*). Para uma descrição de trabalhos relacionados ao problema do controle de congestionamento de redes de computadores e Teoria dos Jogos, veja [Menasché et al. 2005].

O alicerce do presente estudo é a teoria dos jogos comportamental (*behavioral game theory*) [Camerer 2003, Gintis 2000]. De uma forma geral, a teoria dos jogos pode ser usada como uma ferramenta *normativa*, para estabelecer o que deve ser feito pelos projetistas e usuários dos sistemas, ou como uma ferramenta *descritiva*, para ajudar no entendimento do comportamento dos usuários ao se defrontarem com situações de conflitos de interesses. A este último uso da teoria dos jogos dá-se o nome de teoria dos jogos comportamental. A abordagem padrão da teoria de jogos comportamental consiste em realizar experimentos e identificar os pontos para os quais os usuários eventualmente convergem. Estabelece-se então que estes são os equilíbrios de Nash – por definição, pontos tais que nenhum usuário tem incentivos unilaterais para mudar de estratégia (ou seja, pontos de convergência). A partir daí, procura-se inferir quais foram as motivações e incentivos que levaram os usuários a convergir para tais pontos.

Dois artigos que se destacam neste contexto são [Friedman and Huberman 2004, Friedman et al. 2004]. O objetivo é capturar o comportamento de usuários que interagem repetidamente de forma assíncrona. Para tal, [Friedman and Huberman 2004] consideram um jogo no qual jogadores humanos e robôs compartilham recursos em uma

rede. Cada usuário visa minimizar o tempo de *download* de seus arquivos, podendo interromper e recomençar seus *downloads* quando lhe convier. De uma forma mais geral, [Friedman et al. 2004], inspirados em simulações realizadas por [Greenwald et al. 2001], analisaram um cenário no qual humanos interagem visando maximizar seus ganhos monetários. Os jogadores não sabem de antemão os detalhes do jogo no qual estão participando, e os autores do trabalho investigam o processo de aprendizado dos participantes na medida em que o jogo transcorre.

Nós propomos uma nova metodologia para a realização de experimentos a fim de capturar o comportamento de usuários que interagem em uma rede onde os recursos são escassos. Apesar de existirem algumas semelhanças entre o presente trabalho e os dois mencionados acima, há diferenças fundamentais. Em primeiro lugar, os trabalhos mencionados não consideram a interação de usuários em uma rede real. [Friedman and Huberman 2004], por exemplo, simulam via *software* as condições da rede, fazendo com que os usuários sintam-se como se estivessem jogando um *video game*. No presente trabalho, analisamos um experimento envolvendo usuários reais interagindo numa rede sem fio, em um ambiente controlado. Em segundo lugar, nos trabalhos mencionados as funções de utilidade foram artificialmente construídas. Cada jogador podia monitorar sua pontuação (uma medida objetiva, computada em função de métricas como retardo ou vazão) ao longo do processo e recebia, no final do experimento, uma quantia módica de dinheiro em função do seu desempenho. No presente trabalho os usuários adaptam-se às condições da rede tendo como único retorno a qualidade da voz por eles recebida (uma medida subjetiva, que pode variar, por exemplo, de acordo com a sensibilidade do sistema auditivo do receptor). Por último, o modelo por nós utilizado para analisar os resultados obtidos é uma extensão daquele proposto por [Menasché et al. 2005].

3. Modelo Proposto

Nesta seção apresentamos um modelo teórico usado para avaliar o que ocorre quando usuários compartilham um canal para transmissão de tráfego multimídia, como voz. O modelo é uma extensão do proposto por [Menasché et al. 2005].

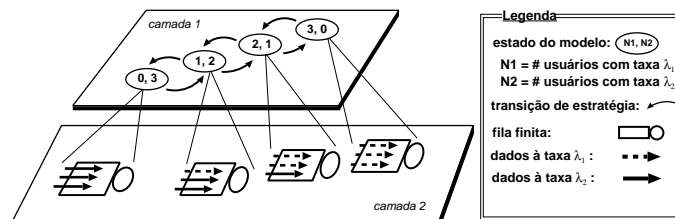


Figura 1. O modelo em duas camadas.

Propomos uma Cadeia de Markov (CM), $\mathcal{X} = \{X(t) : t \geq 0\}$, para modelar o processo dinâmico de como usuários fazem suas escolhas relativas à taxa de transmissão de dados em função do tempo. Seja $k = |A|$ o número de estratégias disponíveis para cada usuário. O modelo possui espaço de estados finito \mathcal{S} e os estados são caracterizados pelo número de usuários adotando cada uma das estratégias disponíveis. Então, $s_i = \langle n_1, \dots, n_k \rangle \in \mathcal{S}$ é o estado do modelo onde n_l ($1 \leq l \leq k$) representa o número de usuários adotando a estratégia l . A cada estado s_i de \mathcal{S} é associado um modelo de desempenho que irá determinar as características do canal compartilhado. Este modelo

gera medidas apropriadas, como vazão, probabilidade de descarte de pacotes e retardo, que são então usadas para calcular a QoS experimentada pelos usuários naquele estado. A QoS percebida por cada usuário também será usada para determinar a taxa de transição entre os estados da Cadeia de Markov. A Figura 1 ilustra o modelo em duas camadas para o caso em que o número de usuários é igual a 3 ($N = 3$) e o número de taxas disponíveis para cada usuário é 2 ($k = 2$).

O Processo Dinâmico de Ajuste de Estratégias: A seguir descrevemos os detalhes do processo dinâmico de ajuste de estratégias. Cada estado da Cadeia de Markov (Figura 1) define um resultado (*outcome*) correspondente no *stage game* subjacente, ou seja, no modelo descrito na camada inferior. Assim sendo, cada estado da Cadeia de Markov dá origem a k diferentes *payoffs* e cada *payoff* corresponde à QoS que um usuário naquele estado irá receber quando jogar uma certa estratégia. Como os usuários possuem funções de utilidade simétricas, denotamos por $U(l, s_i)$ a QoS percebida por um usuário que escolhe a estratégia $l \in A$ quando o estado do sistema é $s_i \in \mathcal{S}$. Sejam $s_i = \langle n_1, \dots, n_l, \dots, n_m, \dots, n_k \rangle$ e $s_j = \langle n_1, \dots, n_l - 1, \dots, n_m + 1, \dots, n_k \rangle$ dois estados da Cadeia de Markov, onde $n_l, 1 \leq l \leq k$, representa o número de usuários adotando a estratégia l . O processo transiciona de s_i para s_j quando um usuário muda sua estratégia de l para m . A taxa de transição do estado s_i para s_j é uma função da diferença entre as QoS's recebidas nestes dois estados. Seja $n_l^{(i)}$ o número de usuários no estado s_i adotando a estratégia l e seja $\sigma_l^{(i)} = n_l^{(i)} / N$ a fração de usuários adotando l em s_i . A taxa de transição de $s_i = \langle n_1, \dots, n_l, \dots, n_m, \dots, n_k \rangle$ para $s_j = \langle n_1, \dots, n_l - 1, \dots, n_m + 1, \dots, n_k \rangle$ é dada por

$$\begin{cases} n_l^{(i)} \Phi \left(U(m, s_j) - U(l, s_i) \right) & \text{se } U(m, s_j) - U(l, s_i) > 0 \text{ e } U(l, s_i) > L \\ n_l^{(i)} T & \text{se } U(l, s_i) < L \\ n_l^{(i)} \epsilon & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

A equação 1 é a diferença fundamental entre o modelo deste artigo e o proposto por [Menasché et al. 2005]. O parâmetro L (limiar, ou *threshold*), caracteriza a qualidade de serviço mínima suportada por um usuário. Caso a qualidade de serviço experimentada pelo usuário no estado s_i seja menor que L , este irá explorar os estados adjacentes de forma aleatória. Neste caso, a taxa de transição de cada usuário do estado s_i para o estado adjacente s_j é dada por T , o fator de exploração.

Um usuário pode cometer erros ao escolher sua estratégia, de tal forma que uma transição de s_i para s_j pode ocorrer mesmo que a QoS percebida em s_i seja maior que a percebida em s_j . Isto ocorre com taxa ϵ por usuário, que é um parâmetro do processo dinâmico. A função $\Phi(x)$ foi empregada para aumentar a flexibilidade do modelo. Considere, por exemplo, a seguinte definição de $\Phi(x)$: $\Phi(x) = \epsilon$ se $x < \eta$ e $\Phi(x) = x$ caso contrário. Neste caso, a função $\Phi(\cdot)$ indica que caso a diferença de QoS entre dois estados s_i e s_j seja menor que η , os usuários não têm capacidade de perceber esta diferença (*zona morta*). Logo, eles não têm incentivos para transicionar de s_i para s_j , e a transição entre estes dois estados só ocorre com uma probabilidade muito pequena (ϵ).

Resta-nos mostrar como a função de utilidade $U(l, s_i)$ é calculada. Em geral, as medidas de desempenho associadas com as condições do *link* gargalo podem ser derivadas a partir de qualquer modelo de desempenho (*performance model*), ou a partir de

medições feitas na rede. [Menasché et al. 2005] adotaram a primeira abordagem; neste artigo iremos adotar a segunda (Seção 6).

Dentre as propriedades do modelo apresentado destaca-se o fato de que, quando $t \rightarrow 0$ e $\epsilon \rightarrow 0$, os estados que recebem probabilidade não desprezível correspondem a equilíbrios de Nash. A recíproca desta afirmação, por outro lado, não é verdadeira. Nem todos os equilíbrios de Nash recebem probabilidade não desprezível em estado estacionário. Desta forma, o modelo proposto pode ser usado para auxiliar na solução do problema da *seleção do equilíbrio de Nash*: se mais de um equilíbrio de Nash estiver presente no jogo, qual deles será selecionado pelos jogadores a longo prazo? Em princípio, se apenas um estado da cadeia de Markov receber probabilidade não desprezível em estado estacionário, ele caracteriza a resposta para esta pergunta.

4. O Experimento

Selecionamos seis voluntários para participar do experimento. Estes são divididos em três duplas. Reservamos duas salas, e dividimos as duplas em dois grupos, acomodando três jogadores em uma sala e os demais em uma outra. Para cada jogador designamos uma máquina com suporte a rede sem fio (uma interface de rede IEEE802.11b/g da SMC), rodando a ferramenta de transmissão de voz sobre IP VivaVoz [Land 2005]. Todos os participantes estão familiarizados com o uso desta ferramenta.

Em uma das salas instalamos um ponto de acesso (AP, ou *access point*) sem fio IEEE802.11b/g comercial, da USRobotics (modelo USR5450), e todos os seis usuários compartilham um canal deste único AP (Figura 2(a)). A rede em questão opera no modo infraestruturado, com o mecanismo de acesso ao meio DCF (*Distributed Coordination Function*), sem quadros RTS/CTS nem criptografia. Os pacotes gerados pelo VivaVoz são suficientemente pequenos para evitar a fragmentação. O ponto de acesso é propositalmente configurado para suportar uma capacidade nominal de 1Mbps, o que lhe confere uma capacidade efetiva de 160 Kbps (vide Seção 7). O propósito de restringir a banda é o de intensificar a disputa por recursos entre os usuários.

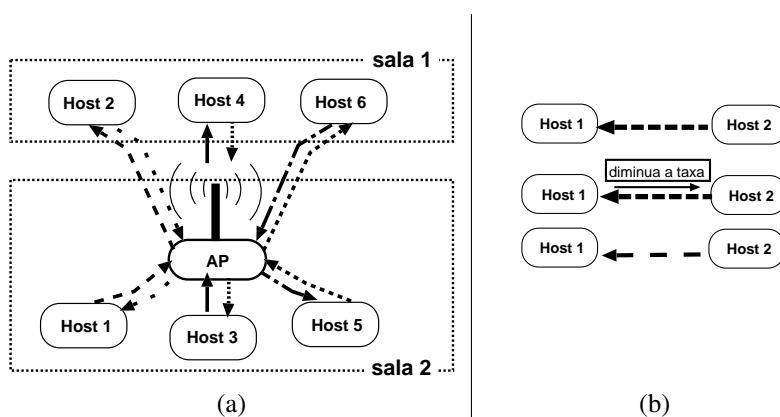


Figura 2. O experimento e o protocolo.

Precedendo o experimento foram lidas instruções descrevendo os objetivos e as regras. Os participantes tomam conhecimento do número total de usuários acessando o sistema, da capacidade do enlace da rede sem fio, da topologia da rede, do número de opções de taxas de transmissão que cada um tem (Tabela 1) e do tempo de duração máxima de

Tabela 1. Estratégias disponíveis para os usuários (taxas em Kbps).

Codec	Redund	Taxa	Codec	Redund	Taxa	Codec	Redund	Taxa
PCM	None	131.22	SPEEX 4	1:2	14.00	SPEEX 11.2	1:2::3:6	33.50
PCM	1:2	200.00	SPEEX 4	1:2::3:6	19.20	SPEEX 14.2	None	18.40
PCM	1:2::3:6	267.00	SPEEX 6	None	9.20	SPEEX 14.2	1:2	30.80
GSM	None	16.40	SPEEX 6	1:2	17.00	SPEEX 14.2	1:2::3:6	41.50
GSM	1:2	27.80	SPEEX 6	1:2::3:6	23.20	SPEEX 18.4	None	21.60
GSM	1:2::3:6	37.50	SPEEX 8	None	11.20	SPEEX 18.4	1:2	35.60
SPEEX 2.4	None	5.60	SPEEX 8	1:2	20.00	SPEEX 18.4	1:2::3:6	47.50
SPEEX 2.4	1:2	11.60	SPEEX 8	1:2::3:6	27.50	SPEEX 24.8	None	28.00
SPEEX 2.4	1:2::3:6	16.00	SPEEX 11.2	None	14.40	SPEEX 24.8	1:2	45.20
SPEEX 4	None	7.20	SPEEX 11.2	1:2	24.80	SPEEX 24.8	1:2::3:6	60.70

Tabela 2. Restrição do espaço de estratégias para modelagem (taxas em Kbps).

Codec	Red.	Taxa	Representa a faixa	Codec	Red.	Taxa	Representa a faixa	Codec	Red.	Taxa	Representa a faixa
SPEEX 6	None	20	5.6 – 24.8 (baixa)	SPEEX 14.2	1:2	33.5	27.5 – 33.5 (média)	SPEEX 14.2	1:2::3:6	47.5	35.6 – 60.7 (alta)

uma sessão do experimento. Sempre que possível, as recomendações do [ITU 2000] foram observadas.

Cada usuário recebe um microfone e um headphone, e estabelece conexão com seu parceiro localizado em outra sala. Uma vez estabelecidas as conexões, solicita-se aos jogadores que conversem livremente. Durante a conversa, cada jogador tem a liberdade de modificar a taxa através da qual recebe os dados, de tal forma a maximizar a qualidade de serviço (QoS) recebida. A ferramenta VivaVoz foi adaptada para isto, de modo a permitir que cada usuário pudesse alterar, dinamicamente, o nível de redundância usado para mascarar perdas de pacotes na rede (FEC) e o *codec* utilizados (Figura 2(b)). Como a decisão sobre a taxa de dados gerada pelas aplicações é transferida aos usuários, as ações de cada um passa a afetar o desempenho dos restantes.

Na Tabela 1 listamos os codecs e esquemas de redundância disponíveis para cada usuário. Em resumo, temos 3 codificações de voz: (i) PCM linear com 16 bits, (ii) GSM 06.10 RPE-LT e (iii) Speex, baseado no CELP, que dispõe de 8 taxas. Temos 3 esquemas de redundância (Tabela 1). O esquema de redundância FEC 1:2 corresponde ao envio de dados duplicados nos pacotes com número de sequência (SN) i e $i+1$. O esquema de FEC 1:2::3:6 é proposto em [Figueiredo and de Souza e Silva 1999] e permite a recuperação de perdas em rajada, às custas de um aumento da taxa de transmissão (o esquema 1:2 não consegue recuperar a perda de pacotes consecutivos). Em resumo, quanto maior a redundância mais protegidos estão os dados, embora a sobrecarga associada à redundância possa agravar o problema do congestionamento na rede e diminuir a qualidade da voz recebida.

Considere, por exemplo, um usuário recebendo dados via Speex 11.5 Kbps sem redundância (Tabela 1), com dificuldade para compreender seu parceiro devido a alta taxa de perda de pacotes. Este usuário pode optar por diminuir a taxa do codec para 8 Kbps, e adotar um esquema de redundância, procurando assim maximizar a qualidade

da voz recebida ao reduzir as perdas sem agravar o congestionamento. Como um segundo exemplo, considere um usuário recebendo dados via Speex 4 Kbps, insatisfeito com a qualidade da voz recebida. Este usuário pode aumentar a taxa do codec para 11.5 Kbps e avaliar o impacto dessa mudança. Em essência, estes dois exemplos ilustram como se dá o processo dinâmico de ajuste dos usuários. A existência de um ponto de equilíbrio é uma das questões investigadas.

O experimento foi concebido de tal forma a capturar as seguintes características de um ambiente típico de transmissão de voz sobre IP: (i) assincronia, i.e. cada usuário pode a qualquer instante mudar o codec e/ou o mecanismo de FEC que utiliza para receber os dados; (ii) informação incompleta, i.e. cada usuário sabe apenas a taxa que ele está usando para receber dados. Ele também sabe o número de usuários participando do jogo, e o número de estratégias disponíveis para cada um. O usuário não sabe a taxa que está usando para transmitir dados ao seu parceiro, nem a taxa que os demais usuários da rede estão empregando; (iii) recursos escassos, i.e. dependendo da taxa que o usuário escolhe para receber dados, sua decisão pode gerar impactos negativos nos fluxos de dados dos demais.

Conforme mencionado acima, permitimos que os usuários conversem e adaptem suas estratégias livremente em relação às condições da rede. Para estabelecer o ponto de convergência do sistema, solicitamos que cada usuário, após ficar dois minutos sem fazer nenhuma modificação na sua taxa de recepção de dados, anote sua estratégia (codec+FEC), em conjunto com uma nota de 1 a 5 identificando o seu nível de satisfação. Deste momento em diante, o usuário não poderá mais modificar sua estratégia. Caso todos os usuários anotem seus resultados, alcançamos um ponto de convergência.

Vamos denotar o experimento no qual os membros de cada dupla conversam e interagem de EXPERIMENTO INTERATIVO. O EXPERIMENTO INTERATIVO foi repetido 5 vezes (5 sessões). Estamos interessados nos pontos de convergência do sistema em cada uma das sessões (que denotamos por convergência a médio prazo), bem como nas tendências de convergência entre as sessões (que denotamos por convergência a longo prazo). Um variante do EXPERIMENTO INTERATIVO, o EXPERIMENTO NÃO INTERATIVO, também foi repetido cinco vezes. Vamos denotar por \mathcal{A}_i e \mathcal{B}_i os membros da dupla i (onde $1 \leq i \leq 3$). No EXPERIMENTO NÃO INTERATIVO, ao invés de \mathcal{A}_i e \mathcal{B}_i conversarem, \mathcal{A}_i transmite um fluxo de dados pré-gravado (com o hino brasileiro) para \mathcal{B}_i (e vice versa). O restante do experimento permanece inalterado: cada usuário pode adaptar-se dinamicamente às condições da rede, mudando a taxa com a qual recebe os dados de voz. Comparando o cenário interativo com o cenário envolvendo o *streaming* de fluxos pré-gravados, procuramos avaliar qual o impacto da interatividade nas decisões dos usuários. Os resultados do experimento são apresentados na próxima seção, e na Seção 7 eles são interpretados com auxílio do modelo proposto na Seção 3.

5. Resultados do Experimento

Como o experimento foi realizado no período manhã/tarde de um dia de semana (em setembro de 2005) as salas envolvidas não estavam livres de interferências externas. Paredes e obstáculos entre as estações e o ponto de acesso (AP) deram margem ao *problema dos múltiplos caminhos* (ou desvanecimento do sinal). Essencialmente, o cenário é de um típico ambiente de escritório (ou *indoor*). O nosso desafio consistiu em implementar

o experimento tendo em vista este panorama semi-realista, e interpretar os resultados *a posteriori*. Conforme dito na Seção 4, os 6 participantes foram divididos em 3 duplas. Nas Tabelas 3 e 4, os usuários i e $i + 1$ compõem a dupla $(i + 1)/2$ (i igual a 1, 3, ou 5).

Na Tabela 3 listamos os pontos de convergência do EXPERIMENTO NÃO INTERATIVO. Pode-se observar que quase todos os usuários optaram por alguma proteção a seus dados, utilizando um esquema de FEC. Ao longo das 5 sessões a diferença entre as taxas dos distintos usuários diminuiu, o que resultou em uma divisão progressivamente mais igualitária dos recursos. Isto indica uma possível evolução no pensamento estratégico dos usuários, que conduziu-os a cenários cada vez mais uniformes e justos. Um dos fatos mais interessantes observados na Tabela 3 refere-se à taxa agregada adotada pelos usuários. Para nossa surpresa, em todas as sessões os usuários convergiram para taxas agregadas que variaram entre 150 Kbps e 160 Kbps. Como a capacidade efetiva do canal considerado é de 160 Kbps, isto indica uma tendência dos usuários à convergência para um estado onde a rede seja plenamente utilizada, e ao mesmo tempo uma auto-regulação dos mesmos de tal modo a evitar um possível colapso devido ao excessivo congestionamento.

Tabela 3. Resultados do experimento não interativo (taxas em Kbps).
Abreviações: Sp = Speex [CELP], Fec A = Esquema 1:2, Fec B = Esquema 1:2::3:6

ses #	taxa agreg	Usuário 1		Usuário 2		Usuário 3		Usuário 4		Usuário 5		Usuário 6	
		estratégia	tx	estratégia	tx	estratégia	tx	estratégia	tx	estrat.	tx	estratégia	tx
1	156.7	GSM(B)	37.5	Sp4(-)	7.2	Sp11.2(B)	33.5	Sp6(B)	23.2	Sp8(B)	27.5	GSM(A)	27.8
2	152.5	Sp14.2(B)	41.5	Sp2.4(B)	16.0	Sp6(A)	17.0	Sp11.2(B)	33.5	Sp8(B)	27.5	Sp6(A)	17.0
3	151.2	GSM(B)	37.5	Sp14.2(-)	18.4	Sp8(A)	20.0	Sp8(B)	27.5	Sp8(A)	20.0	GSM(A)	27.8
4	160.5	GSM(B)	37.5	Sp8(B)	27.5	Sp8(A)	20.0	Sp6(B)	23.2	Sp8(B)	23.2	Sp11.2(A)	24.8
5	155.3	Sp8(B)	27.5	Sp8(B)	27.5	Sp11.2(A)	24.8	Sp6(B)	23.2	Sp8(B)	27.5	Sp11.2(A)	24.8

Para o EXPERIMENTO INTERATIVO (Seção 4) os pontos de convergência são os listados na Tabela 4. Nesse caso, pode-se observar que inicialmente os usuários 2, 5 e 6 optaram por taxas menores do que as observadas no EXPERIMENTO NÃO INTERATIVO. A taxa agregada dos usuários como um todo foi inicialmente pequena, mas cresceu gradativamente. Mais uma vez observamos o fenômeno da auto-regulação dos usuários no sentido de evitar um possível colapso devido ao excessivo congestionamento.

Tabela 4. Resultados do experimento interativo (taxas em Kbps).
Abreviações: Sp = Speex [CELP], Fec A = Esquema 1:2, Fec B = Esquema 1:2::3:6

ses #	taxa agreg	Usuário 1		Usuário 2		Usuário 3		Usuário 4		Usuário 5		Usuário 6	
		estratégia	tx	estratégia	tx	estrat.	tx	estratégia	tx	estrat.	tx	estratégia	tx
1	135.2	GSM (B)	37.5	Sp4 (-)	7.2	Sp8(A)	20.0	Sp11.2(B)	33.5	Sp6(A)	17.0	Sp8 (A)	20.0
2	148.2	Sp11.2(B)	33.5	Sp4 (A)	14.0	Sp8(A)	20.0	GSM (B)	37.5	Sp6(B)	23.2	Sp8 (A)	20.0
3	148.6	GSM (B)	37.5	Sp2.4(-)	5.6	Sp8(A)	20.0	GSM (B)	37.5	Sp6(B)	23.2	Sp11.2 (A)	24.8
4	142.1	Sp11.2(B)	33.5	Sp2.4(-)	5.6	Sp8(B)	27.5	Sp14.2(B)	41.5	Sp4(A)	14.0	Sp8 (A)	20.0
5	160.0	Sp14.2(B)	41.5	Sp6 (-)	9.2	Sp8(A)	20.0	Sp18.4(B)	47.5	Sp6(A)	17.0	Sp11.2 (A)	24.8

6. Metodologia Proposta

Nesta seção apresentamos a metodologia proposta para investigar as motivações que levaram os usuários a convergir para os pontos de equilíbrio do experimento apresentado

na última seção. A metodologia baseia-se na obtenção de medidas de desempenho do canal (e.g. taxa de perda e tamanho médio da rajada de perda), bem como na inferência da QoS percebida pelos usuários em função destas medidas, em cada um dos estados do modelo proposto (Figura 3). Para gerar as medidas de desempenho, usamos o gerador de tráfego Tangram-II TrafficGenerator [Carmo et al. 1998]. Para estimar a QoS percebida pelos usuários usamos uma rede neural (RNN), proposta por [Mohamed et al. 2004]. Por fim, para modelar o processo de adaptação dos usuários às condições da rede adotamos o modelo descrito na Seção 3. A seguir, analisamos detalhadamente cada um dos módulos da Figura 3.

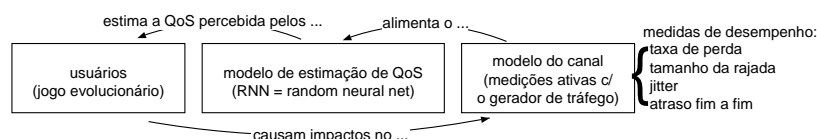


Figura 3. Metodologia.

O Modelo do Canal. Com o objetivo de modelar o canal, e estimar as medidas de desempenho (e.g., taxa de perdas e *jitter*) em todos os estados do modelo, emulamos ativamente fluxos de voz na rede ilustrada na Figura 2(a) utilizando o Tangram-II TrafficGenerator. O gerador de tráfego possui dois módulos: um emissor, que injeta dados na rede de acordo com um padrão estabelecido pelo usuário, e um receptor, que computa estatísticas em função de informações contidas no cabeçalho dos pacotes recebidos. Procuramos emular da forma mais fiel possível o cenário apresentado na Figura 2(a). Para cada combinação de estratégias por parte dos jogadores (ou seja, para cada estado do modelo proposto), repetimos o seguinte procedimento. Executamos seis instâncias do gerador de tráfego, e seis instâncias do receptor. Injetamos tráfego na rede ajustando o intervalo de tempo entre a geração dos pacotes e o tamanho dos mesmos a valores similares aos observados na aplicação de voz VivaVoz [Land 2005] para a combinação de estratégias em questão. Medimos então a taxa de perda, o tamanho médio da rajada de perdas, o *jitter* (variância do atraso) e o atraso fim a fim (*one way delay*) em cada um dos fluxos emulados.

O Modelo de Estimacão de QoS. Uma vez obtidas as medidas de desempenho para cada um dos estados do modelo, é necessário estimar em função delas a QoS percebida pelos usuários. Para tal, utilizamos uma Rede Neural Randômica (RNN) [Mohamed et al. 2004]. A qualidade do fluxo de voz é caracterizada pelo MOS (*mean opinion score*), que varia de 1 (qualidade inaceitável) a 5 (excelente). Em particular, a rede neural utilizada foi especialmente treinada para calcular o MOS experimentado por usuários da ferramenta de voz VivaVoz. A RNN estima o MOS percebido pelo mesmo, tendo como entrada o (i) codec e o (ii) mecanismo de FEC adotados pelo usuário (Tabela 1) além das medidas de desempenho do canal, isto é: (iii) taxa de perda; (iv) tamanho médio da rajada de perda; (v) *jitter* e (vi) atraso fim a fim. Outras metodologias para avaliação de qualidade em aplicações multimídias são apresentadas em [Mohamed et al. 2004] e em [Varela 2005].

Na Figura 4 ilustramos, por meio de dois exemplos, a saída da RNN. Na Figura 4(a) temos o MOS percebido pelo usuário em função da taxa do codec (Speex) e da taxa de perdas na rede (todos os demais quatro parâmetros fixos). Quanto menor a taxa

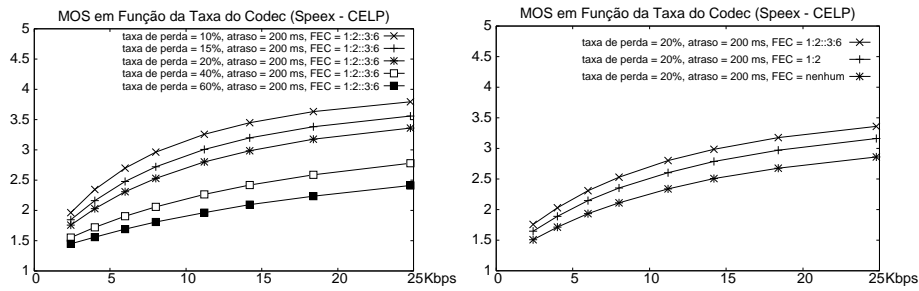


Figura 4. Exemplos de saída da rede neural randômica (RNN).

de perda, e quanto maior a taxa do codec, maior o MOS. Na Figura 4(b) temos o MOS em função da taxa do codec (Speex) e do esquema de FEC adotado (os demais quatro parâmetros fixos). Note que, mantendo-se fixa a taxa de perda, quanto maior a quantidade de FEC, mais protegidos estão os dados, e maior é o MOS. É importante ressaltar que a Figura 4 apresenta apenas um subconjunto dos resultados utilizados no modelo.

O Modelo de Adaptação dos Usuários. De posse da estimativa da qualidade de voz percebida por cada usuário para cada uma das combinações possíveis de estratégias, vamos utilizar o modelo proposto na Seção 3 para investigar a existência de equilíbrios de Nash. Caso exista mais de um ponto de equilíbrio, tentamos entender como se dá a seleção de um dentre estes pontos por parte dos usuários.

7. Interpretando o Experimento com Auxílio da Metodologia Proposta

Nesta seção vamos interpretar os resultados do experimento com auxílio da metodologia proposta.

Medições na rede sem fio. Para modelar o canal compartilhado pelos usuários realizamos medições ativas na rede. A primeira medida de interesse é a capacidade efetiva. Para calculá-la, injetamos na rede fluxos de dados com taxas cada vez maiores, e medimos a vazão (*goodput*) a cada acréscimo. Os resultados encontram-se na Figura 5(a). Podemos observar uma tendência inicial de crescimento da vazão em função da taxa injetada. No entanto, há um momento de saturação. Quando a taxa agregada injetada no canal ultrapassa o valor de 180 Kbps, a vazão passa a oscilar em torno de 157 Kbps, e concluímos que esta é aproximadamente a capacidade efetiva do canal.

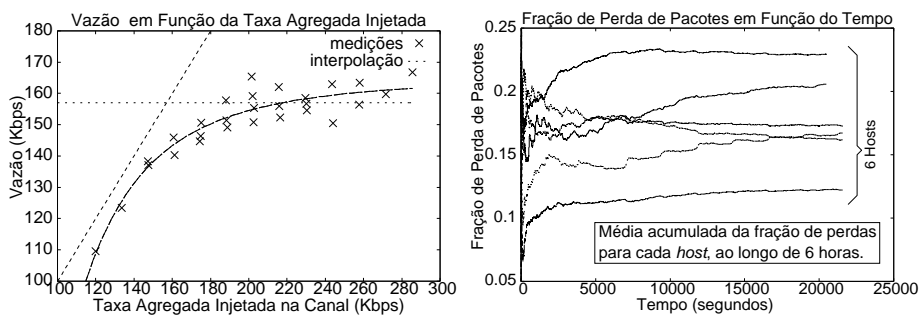


Figura 5. (a) A capacidade efetiva do sistema; (b) taxa de perdas individual

Para ilustrar algumas das dificuldades encontradas ao se realizar medições em uma rede sem fio, recorremos à Figura 5(b). Nesta figura apresentamos os resultados de uma

emulação por 6 horas do cenário (Figura 2(a)) envolvendo 6 *hosts* que enviam dados a uma mesma taxa de 33.6 Kbps. As curvas representam a média acumulada da fração de perdas de pacotes, para cada um dos *hosts*. Em primeiro lugar, não está claro se após 6 horas os fluxos convergem para um estado estacionário. Isto significa que oscilações do sistema em função de complexos fatores fora de nosso controle, como interferência externa, *drivers* instáveis e desvanecimento do sinal, podem causar um impacto nas medidas. Segundo, apesar de os 6 *hosts* enviarem dados a uma mesma taxa, eles apresentam frações de perda de pacotes distintas. Esta assimetria (também documentada por [Choi et al. 2004] entre outros) está relacionada à distância entre os *hosts* e o ponto de acesso, e às paredes e obstáculos que dificultam a propagação do sinal. Apesar destas complicações, é possível obter algumas conclusões a partir das medições, conforme descrevemos a seguir.

Como nosso principal objetivo é analisar os conflitos de interesses entre os usuários de uma rede, é fundamental compreendermos o impacto das ações de um usuário sobre os outros. Vamos para isto emular o que ocorre quando um usuário mantém sua taxa fixa e igual a λ_* , enquanto os demais cinco variam progressivamente suas taxas dentro de três níveis 2: (i) baixa, 20 Kbps, (ii) média, 33.6 Kbps e (iii) alta, 47.5 Kbps. Consideramos duas possibilidades, $\lambda_*=20$ Kbps (Figuras 6(a) e 6(b)) e $\lambda_*=47.5$ Kbps (Figuras 6(c) e 6(d)). Na Figura 6, linhas cheias representam métricas do *host* que mantém a taxa fixa. Vamos primeiramente analisar o cenário em que o *host* 6 (vide Figura 2(a)) fixa sua taxa $\lambda_*=20$ Kbps, e os demais usuários variam suas estratégias. Podemos notar que, quando a taxa de dados agregada injetada no sistema aumenta, o atraso experimentado pelo *host* 6 aumenta e a sua vazão diminui sutilmente (Figuras 6(a) e 6(b)).

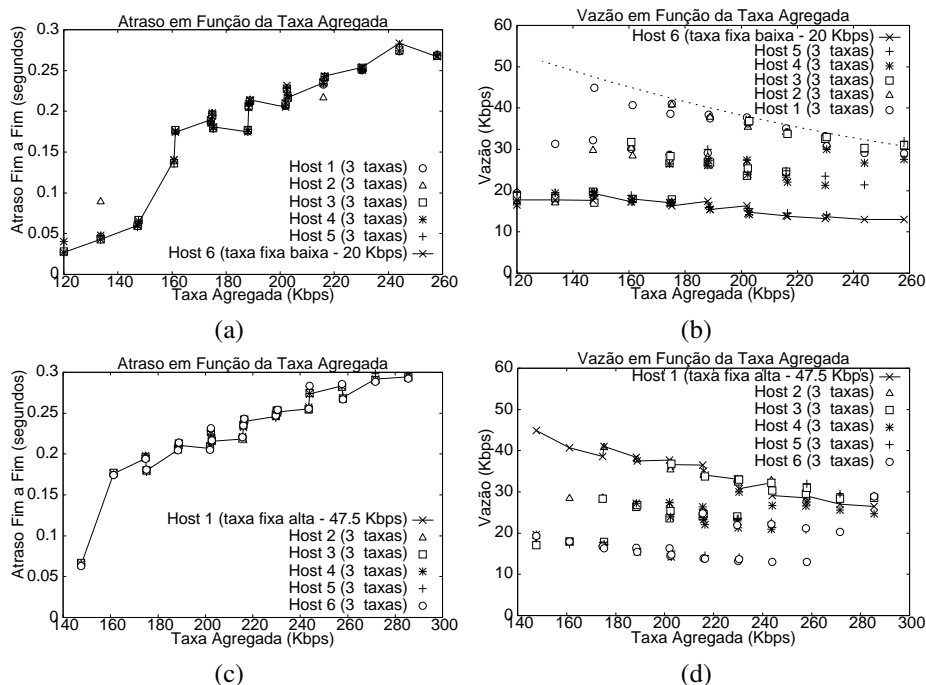


Figura 6. Os conflitos de interesses

O atraso experimentado pelo *host* 6 é muito similar ao percebido pelos outros *hosts* (repare as aglomerações de pontos em torno da linha cheia na Figura 6(a)). Uma consequência particular é que o canal é simétrico em relação ao atraso: dado um par de

hosts \mathcal{A} e \mathcal{B} , o atraso de \mathcal{A} para \mathcal{B} é muito próximo ao atraso no sentido contrário. Quanto à vazão, podemos identificar claramente três faixas nas Figuras 6(b), associadas às taxas baixa, média e alta disponíveis para cada um dos *hosts*. A vazão do *host* 6 é, em geral, menor que a dos demais (note a disparidade entre a linha cheia e os pontos dispersos na Figura 6(b)). No extremo esquerdo da Figura 6(b), todos os 6 *hosts* usam a taxa baixa e experimentam a mesma vazão (6 pontos praticamente unidos). Caminhando para a direita (Figura 6(b)), na medida em que os *hosts* de 1 a 5 aumentam suas taxas, a vazão deles aumenta, e a do *host* 6 diminui. No extremo direito, quando os *hosts* de 1 a 5 adotam a taxa máxima, a vazão deles é maior do que no extremo esquerdo, porém a do *host* 6 é menor. Para cada valor da taxa agregada a partir de 140 Kbps, os pontos de ordenada mais alta mostram uma tendência de declínio (linha pontilhada). Este declínio reflete o fato de que quando a taxa agregada do sistema aumenta, a maior vazão experimentada por qualquer um dos *hosts* diminui. Temos claramente um conflito de interesses: do ponto de vista individual, cada *host* pode aumentar sua vazão, incrementando sua taxa; do ponto de vista coletivo, quando um *host* aumenta sua taxa, ele gera uma *externalidade negativa* nos outros *hosts*, fazendo com que a vazão destes últimos diminua.

O cenário em que o *host* 1 fixa sua taxa em 47.5 Kbps (Figuras 6(c) e 6(d)) é análogo ao descrito acima, embora a vazão diminua mais bruscamente do que no cenário anterior (compare as Figuras 6(b) e 6(d)). Esta brusca diminuição indica que, ao adotar a taxa alta, o usuário pode obter uma vazão maior, porém está suscetível a grandes oscilações, em função do comportamento dos demais usuários.

O Modelo de Estimação de QoS. Até o momento, analisamos separadamente a vazão e o atraso no sistema; vamos agora analisar, com auxílio de uma rede neural randômica (RNN), o impacto conjunto destes e mais quatro fatores (Figura 3) na qualidade de serviço (MOS) percebida pelos usuários (Figura 7). No contexto da metodologia proposta, as medidas de MOS serão usadas para alimentar o modelo de decisão dos usuários (Figura 3). Por ora, vamos a analisar um subconjunto dos resultados obtidos nesta etapa do processo.

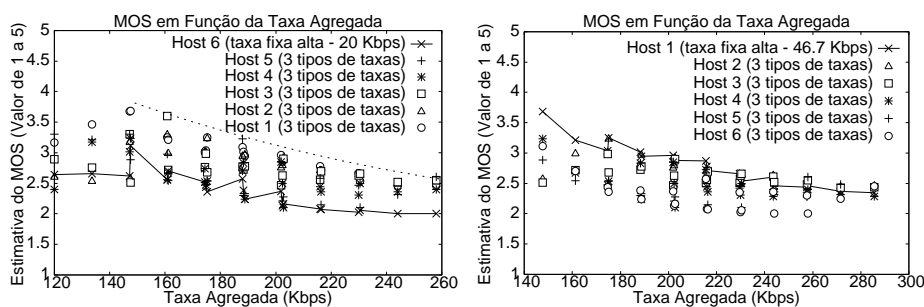


Figura 7. A qualidade de serviços (MOS) percebida pelos usuários

Na Figura 7(a), notamos que quando a taxa agregada do sistema aumenta, o MOS percebido pelo *host* 1, que mantém sua taxa fixa em $\lambda_1=20$ Kbps, diminui. Comparando as Figuras 7(a) e 6(b) podemos notar que o conflito de interesses discutido em relação à vazão também aplica-se ao MOS. Este é um exemplo de semelhança, mas vamos nos deter nas diferenças. Quando a taxa agregada no sistema é igual a 160 Kbps, a vazão do *host* 1 é maior que a do 3 (Figura 6(b)), porém o MOS percebido pelo *host* 3 é maior que o do 1 (Figura 7(a)). Isto ocorre porque, além da vazão, outros fatores, como atraso (Figura 6(a)),

jitter, tamanho médio da rajada de perdas, codec e mecanismo de FEC influenciam o MOS. Como outro exemplo, considere o extremo esquerdo da Figura 6(b), onde todos os 6 *hosts* usam a taxa baixa e experimentam a mesma vazão, embora a percepção de qualidade dos usuários seja distinta (extremo esquerdo da Figura 7(a)). Na Figura 7(b), notamos que quando a taxa agregada do sistema aumenta, o MOS percebido pelo usuário do *host* 6, que mantém sua taxa fixa em 46.7 Kbps, diminui. Comentários análogos aos da Figura 7(a) aplicam-se.

O Modelo de Decisão dos Usuários. Para que o modelo seja computacionalmente tratável agregamos o espaço de estratégias em 3 classes, em função das taxas (Tabela 2), de forma que estratégias com taxas semelhantes sejam agrupadas na mesma classe. Apresentamos os resultados nas Figuras 8 e 9.

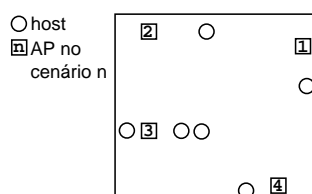


Figura 8. Planta (escala 3cm:7m)

Cenário	Equilíbrio
1	(0,6,0)
2	(0,6,0)
3	(6,0,0) com probab. 0.14 (0,6,0) com probab. 0.86
4	(0,6,0)

Figura 9. Pontos de equilíbrio.

Para identificar o impacto da posição do AP nos resultados do experimento, realizamos medições considerando quatro posições distintas (Figura 8). Na Figura 9, temos os pontos de equilíbrio do modelo. O estado (n_1, n_2, n_3) corresponde a n_1, n_2 e n_3 usuários adotando as taxas alta, média e baixa, respectivamente. Para obter estes resultados, usamos os seguintes parâmetros do modelo, empiricamente escolhidos: $L=2.6$, $\epsilon = 10^{-12}$ e $\Phi(x) = x$. Os pontos de equilíbrio correspondem a estados da cadeia de Markov que recebem probabilidade não desprezível em estado estacionário, ou seja, equilíbrios de Nash. O ponto de convergência obtido do modelo é, em todos os cenários, menos um, aquele em que todos os usuários adotam a taxa média, injetando na rede uma taxa agregada de 201.6 Kbps, um pouco superior à capacidade efetiva da rede. A exceção é o cenário 3, que apresenta dois equilíbrios de Nash.

Na Figura 10 ordenamos as 28 configurações do modelo de forma crescente em função da estimativa do MOS médio dos usuários (obtida através da RNN). A fim de confrontarmos este resultado com o experimento, utilizamos a Tabela 2 para mapear as estratégias observadas durante o experimento nas 3 estratégias representadas no modelo. Na Figura 10 destacamos com círculos os pontos de convergência dos usuários do experimento real (Tabelas 3 e 4) e com um quadrado o equilíbrio de Nash selecionado pelo modelo. Notamos dois fatos relevantes. Em primeiro lugar, observamos que os usuários convergiram para os estados que apresentam MOS médio mais elevado. Isto contrasta com alguns resultados da Teoria dos Jogos, onde há perda de eficiência significativa devido à falta de coordenação entre os usuários. Em segundo lugar, o ponto de equilíbrio do modelo situa-se na zona de MOS elevado – mais precisamente, na mesma faixa dos pontos de convergência experimentalmente observados. Isto mostra uma excelente concordância do modelo com os resultados práticos, apesar da sua simplicidade.

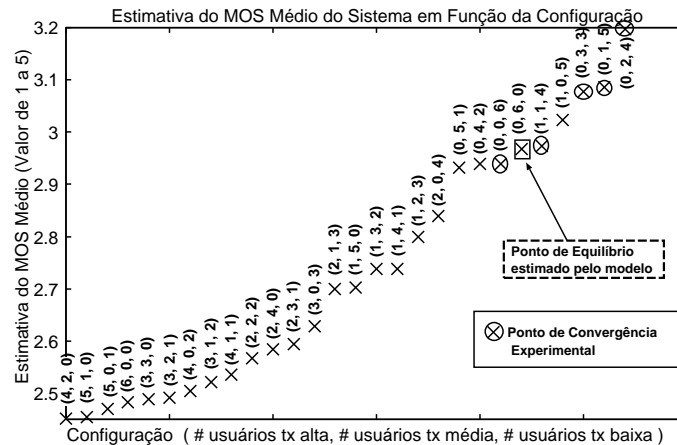


Figura 10. Os pontos de convergência experimentais e o estimado pelo modelo.

8. Conclusão

A ampla utilização de modelos envolvendo Teoria dos Jogos por parte da comunidade de redes de computadores reflete o interesse em modelar a *complexidade sócio-econômica* envolvida nos ambientes distribuídos. Este interesse advém do fato dos mecanismos de compartilhamento de recursos (e.g. TCP) implementados nas redes modernas serem adotados pelos usuários de forma completamente voluntária. A não adesão em larga escala a estes mecanismos pode dar origem a problemas de injustiça e à *tragédia dos bens comuns*: um colapso devido ao excessivo congestionamento.

Neste artigo apresentamos os resultados de um experimento envolvendo usuários acessando uma rede sem fio para transmissão de voz sobre IP, usando UDP sem qualquer controle de congestionamento subjacente. Os usuários podem escolher livremente a taxa com que transmitem dados na rede. Os resultados do experimento proposto apontam para duas importantes implicações. Em primeiro lugar, identificamos que os usuários ajustaram suas taxas de uma forma tal que, no ponto de convergência, os recursos da rede foram plenamente utilizados. Em segundo lugar, a justiça entre os usuários do sistema evoluiu na medida em que transcorreram os experimentos. Isto pode ser um indicativo de que o aprendizado individual dos usuários sobre o sistema conduziu-os coletivamente a cenários cada vez mais uniformes.

Com o objetivo de corroborar as tendências observadas de forma empírica, propomos uma metodologia para avaliar quantitativamente as motivações que levaram os usuários aos pontos de equilíbrio observados no experimento. A metodologia envolve (i) medições ativas na rede, (ii) um mecanismo de estimação de QoS baseado em uma rede neural randômica e (iii) um modelo para capturar a evolução estratégica dos usuários inspirado na teoria dos jogos evolucionários. Embora a metodologia seja apenas uma primeira tentativa no sentido de capturar o comportamento dos usuários, ela nos levou aos seguintes pontos: (a) identificamos problemas de ordem prática que podem afetar os usuários no processo de tomada de decisões (por exemplo, quantitativamente analisamos o fato bem conhecido de que a proximidade do usuário ao ponto de acesso causa um grande impacto na qualidade de voz por ele percebida); (b) usando a metodologia, ajustamos o modelo de adaptação estratégica dos usuários, o que culminou com o esquema apresentado na Seção 3. Acreditamos que seja possível refinar o modelo, modificando,

por exemplo, a função $\Phi(x)$ e o limiar L , e estudando a sensibilidade do ponto de convergência aos parâmetros. As ligeiras divergências entre os resultados obtidos com o modelo e o experimento devem-se aos erros nas medições, instáveis devido a problemas como o desvanecimento do sinal, e à agregação realizada. Não obstante, o modelo captura tendências sobre a adaptação dos usuários às condições da rede.

Referências

- Camerer, C. (2003). *Behavioral Game Theory*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Carmo, R., de Carvalho, L., de Souza e Silva, E., Diniz, M., and Muntz, R. (1998). Performance/Availability Modeling with the TANGRAM-II Modeling Environment. *Performance Evaluation*, 33:45–65. Disponível em: <http://www.land.ufrj.br/tools/tangram2/>.
- Choi, S., Park, K., and Kim, C.-K. (2004). On the performance characteristics of wlangs: Revisited. *Performance evaluation review*, 33 (1):97–108.
- Figueiredo, D. R. and de Souza e Silva, E. (1999). Efficient Mechanisms for Recovering Voice Packets in the Internet. In *Proceedings of IEEE/Globecom'99, Global Internet: Application and Technology Symposium.*, pages 1830–1837, Rio de Janeiro, Brazil.
- Floyd, S., Padhye, J., and Widmer, J. (2000). Equation-based congestion control for unicast applications. In *ACM SIGCOMM*, Stockholm, Sweden.
- Friedman, D. and Huberman, B. (2004). Internet congestion: A laboratory experiment. In *ACM SIGCOMM Workshop of Practice/Theory of Incentives and Game Theo. in Net Systems*, pages 177–182.
- Friedman, E., Shor, M., Shenker, S., and Sopher, B. (2004). Asynchronous learning with limited information: an experimental analysis. *Games and Economic Behavior*, 47 (2):325–352.
- Gintis, H. (2000). *Game Theory Evolving*. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Greenwald, A., Friedman, E., and Shenker, S. (2001). Learning in network contexts: Experimental results from simulations. *Journal of Games and Economic Behavior*, 35(1/2):80–123.
- ITU (2000). *ITU-T Recommendation P.920: Interactive test methods for audiovisual communications*.
- Key, P. and McAuley, D. (1999). Differential QoS and Pricing in Networks. In *IEEE Proceedings Software*, pages 177–182.
- Land (2005). VivaVoz. Disponível em: <http://www.land.ufrj.br/tools/tools.html>.
- Menasché, D., Figueiredo, D., and de Souza e Silva, E. (2005). An evolutionary game-theoretic approach to congestion control. *Performance Evaluation*, 62 (1-4):295–312.
- Mohamed, S., Rubino, G., and Varela, M. (2004). Performance evaluation of real-time speech through a packet network: a random neural networks-based approach. *Perform. Eval.*, 57(2):141–161.
- PriMetrica, Inc. (2005). Telegeography reports and databases.
- Varela, M. (2005). *Évaluation Pseudo-Subjettive de la Qualité d'un Flux Multimédia et ses Applications au Contrôle*. Tese de Doutorado. Disponível em: <http://www.irisa.fr/centredoc/publis/theses>.