

Dinâmica de Seleção de Melhores Canais em Redes IEEE 802.11 com Modelo de Interferência CCA/SINR

Sérgio Gramacho, Madson Araujo, Gustavo Figueiredo

Departamento de Ciência da Computação - Instituto de Matemática

Universidade Federal da Bahia (UFBA)

Caixa Postal 15.064 – 91.501-970 – Salvador – BA – Brasil

{sergioluis, madsonra, gustavo}@dcc.ufba.br

Abstract. *WLANs are more and more present in uncoordinated contexts making higher the probability of interference between nearby networks. In this paper we introduce an approach which combines a client based, uncoordinated and greedy algorithm and an appropriate interference model to this context. The interference effects are minimized through the best channel selection which allows the highest speed at each dynamic's step. Emulations have shown a performance gain when using all available channels from 2.4GHz band, compared to using only orthogonal ones. Even if only a subset of nearby networks uses the approach, the subset and their neighbors will benefit. When all execute, the group's performance improves.*

Resumo. *WLANs são cada vez mais presentes em cenários não coordenados, aumentando a probabilidade de interferência entre redes próximas. Neste artigo é apresentada abordagem que combina algoritmo baseado no cliente, não coordenado e guloso com modelo de interferência adequado a este contexto. Os efeitos da interferência são minimizados por meio da seleção do canal que permita a maior velocidade a cada passo da dinâmica. Emulações mostraram um ganho de desempenho ao usar todos os canais do espectro de 2.4GHz e não somente canais ortogonais. Mesmo que apenas algumas das redes sem fio executem a abordagem, estas e suas vizinhas são beneficiadas. Se todas a executam, o desempenho do grupo aumenta.*

1. Introdução

Estudos recentes projetam, aproximadamente, 18 milhões de acessos em banda larga fixa no Brasil até o segundo trimestre de 2012 [TELECO 2012]. Além disso, é percebida uma tendência, cada vez maior, de uso de equipamentos portáteis, tais como *Notebooks*, *Smartphones* e *Tablets*. Esta tendência implica disseminação do uso de redes locais sem fio no padrão 802.11 do IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) associadas ao acesso em banda larga, sendo que seu uso típico se dá em redes de pequeno porte como em residências e pequenas empresas [Mishra 2006a].

As WLANs (*Wireless LANs*) IEEE 802.11 são regulamentadas para operação em espaços de frequências (bandas ISM - *Industrial, Scientific and Medical*) que compor-

tam apenas três ou quatro redes sem sobreposição¹. O seu uso intenso, portanto, não foi acompanhado de aumento do espectro de frequências para sua operação. A consequência, em especial em áreas urbanas com alta densidade populacional, é o fenômeno da interferência entre redes próximas, resultando em velocidades de comunicação muito inferiores aos limites máximos definidos nas normas do IEEE.

Este problema torna-se mais evidente em redes sem fio não coordenadas, como as WLANs em residências e pequenas empresas. No contexto não coordenado, as WLANs são isoladas umas das outras, não possuem gestão especializada (ou mesmo qualquer gestão) e usam equipamentos fechados e de limitada funcionalidade. Tal contexto diverge do contexto das redes coordenadas que ocorrem em grandes organizações. Nas redes sem fio coordenadas é feito o uso de pontos de acesso (APs - *Access Points*) interligados para aumentar o alcance da rede, é feita gestão centralizada e realizada por especialistas e os APs usados têm maior funcionalidade e recursos avançados. Os dois contextos, porém, se assemelham quanto à restrição do espectro de frequências disponível.

Este trabalho propõe uma abordagem para a seleção do “melhor canal” para a WLAN em contexto não coordenado. O canal definido como melhor é aquele capaz de propiciar a maior velocidade de comunicação. Para tal, é usado um modelo de interferência mais completo, considerando contenções de transmissão (TX) e degradação da recepção. O modelo é alimentado pela perspectiva do cliente de redes 802.11 em modo infraestrutura e medidas discretas disponíveis em APIs (*Application Program Interfaces*) de redes sem fio de sistemas operacionais de mercado. O uso da perspectiva do cliente permite a sintonia do desempenho da rede para clientes, considerando que existem diferenças no perfil de interferência de clientes em relação ao perfil percebido pelo AP. Além disso, a aplicação real é viabilizada sem a necessidade de substituição de *firmwares* de APs, processo muito complexo para o perfil dos usuários envolvidos no contexto aqui proposto.

A continuação deste artigo está assim organizada: a Seção 2 apresenta trabalhos relacionados; a Seção 3 apresenta a solução proposta neste trabalho; a Seção 4 apresenta a abordagem de emulação utilizada e os resultados obtidos; a Seção 5 apresenta a conclusão e propostas de trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

O problema de minimização dos efeitos da interferência entre redes sem fio 802.11 pode ser tratado por diferentes abordagens como controle de potência de transmissão nos dispositivos da rede e seleção de canais para uma rede com máximo afastamento possível em relação aos canais de redes próximas [Mishra 2006a]. O controle de potência de transmissão exige a operação coordenada dos APs da rede, o que permite a distribuição

¹ Considerando largura de banda de 20 MHz, típica dos padrões IEEE 802.11a, IEEE 802.11g e 802.11n, a depender da regulamentação do país, da modulação ou mesmo dos critérios de sobreposição, para o espectro mais comum em 2.4 GHz.

dos nós pelos APs como contrapartida da redução das potências, para minimizar o impacto de perdas de alcance. Isto é viável apenas em contextos coordenados, nos quais diversos APs operam numa mesma rede para garantir maior cobertura da área de uso. Em [Kauffmann 2007] é discutida a seleção de canais em simultaneidade com a distribuição de usuários por APs num contexto coordenado.

A seleção de canais tem efeito sobre a transmissão de todos os elementos de uma rede 802.11 (APs e nós), podendo ser feita de forma centralizada ou descentralizada em contexto coordenado. Em contextos não coordenados a seleção de canais é feita de forma independente nos APs, pois estes operam em redes não relacionadas. Em [Albuquerque 2012] é apresentado mecanismo centralizado em controlador, baseado em coloração de grafos e para contexto coordenado. Este mecanismo depende de implantação de *firmware* específico (OpenWRT) nos APs para obtenção de suas medições e para troca de canal. Em [Mishra 2006a] é apresentado um algoritmo baseado em *channel hopping* num contexto não coordenado. Em [Zhou 2012] é apresentado um algoritmo guloso com base num grafo de APs interferentes entre si. Este algoritmo é aplicado em contexto coordenado e usa um modelo de interferência que considera apenas o SINR.

A seleção de canal para um AP deve levar em consideração a possibilidade de minimização dos efeitos de interferência e, portanto, depende de um modelo de interferência que permita a determinação do canal mais apropriado. Em [Villegas 2007] é apresentado um modelo de interferência mais completo por considerar os efeitos de interferência por sobreposição de sinais de diferentes WLANs transmitidos ao mesmo tempo, tornando o sinal de uma WLAN ruído para a outra, além de considerar os efeitos de contenção na capacidade de transmissão de uma rede. Esta contenção ocorre quando os mecanismos de verificação de “meio ocupado” numa rede detectam sinais de redes próximas, operando no mesmo canal ou em canais adjacentes, mas com intensidade tal que permita interpretação como uma comunicação já em andamento.

Em nosso melhor entendimento, este trabalho se diferencia dos demais por estudar o problema da maximização de desempenho em WLANs não coordenadas combinando algoritmo guloso, modelo de interferência mais completo, uso de informações discretas de APIs e mecanismo para obtenção de convergência. O modelo mais completo de interferência considera tanto interferência pela sobreposição de sinais (redução do SINR - *Signal to Interference plus Noise Ratio*) quanto pela contenção na transmissão (falso negativo de CCA - *Clear Channel Assessment*). O mecanismo de estabilização busca convergência das escolhas dos diversos APs ao alcance para um estado estável. Adicionalmente, o processo de convergência até a estabilidade, para diferentes cenários, é apresentado e comparado.

3. Solução para Minimização de Interferência com Medições Discretas

Como foi dito, a solução proposta neste trabalho está baseada em dois componentes: um algoritmo de seleção de canal e um modelo de interferência que permite estimar as velocidades possíveis em cada canal do espectro a cada varredura. Esta estimativa de veloci-

dades usa a percepção de interferência em nó chamado Nó Monitorador (NMon). A velocidade de transmissão potencial em cada canal será uma fração da velocidade máxima da interface WLAN do NMon. Esta fração é definida em função do total de WLANs ao alcance do NMon, cujos níveis de sinal podem determinar "falsos negativos" do mecanismo CCA. Já a velocidade de recepção é definida pelo MCS (*Modulation and Coding Schemes*) possível em função do SINR estimado em cada canal. Curvas de correlação de BER (*Bit Error Rate*) x SINR para os diferentes MCS foram usadas para determinar o limite mínimo de SINR que viabiliza cada MCS.

O algoritmo de seleção proposto, por sua vez, é responsável por escolher o canal que ofereça a melhor velocidade e também por controlar a confiabilidade da informação de melhor canal. Os critérios de confiabilidade serão apresentados na seção 3.2 e visam tornar a solução estável, convergindo para um estado no qual nenhuma rede terá melhor canal que o último escolhido.

A implementação do modelo foi feita utilizando-se medições discretas (*measurement based*) disponíveis em APIs de redes 802.11 de sistemas operacionais de mercado, como Linux, Windows e Mac OS X. Isto viabiliza a aplicação desta abordagem de forma prática. A natureza discreta destas medições (como a das redes ao alcance, obtida na varredura do espectro) implicou necessidade de definição de mecanismo específico para segmentação dos efeitos de interferência por contenção no falso negativo de CCA e por redução de SINR.

Outra premissa assumida para o modelo de interferência é um cenário no qual todas WLANs estarão operando com máximo tempo de ocupação de canal. Isso produz, segundo mostrado em [Villegas 2007], atenuação zero no sinal de uma rede interferente na sua correlação com o seu tempo de ocupação de canal. A premissa de redes em ocupação máxima equivale, portanto, a desconsiderar a informação da ocupação da rede interferente na análise de interferência. A assunção desta premissa é válida para o contexto de medições discretas, pois a dinâmica de alteração da variável "ocupação da rede" é muito maior que a velocidade de captura de medições discretas de varredura. Com intervalos entre varreduras da ordem de 45 segundos, o impacto na capacidade de comunicação da interface de rede sem fio é da ordem de 1%², sendo, assim, aceitável. O intervalo de 45s implica frequência muito inferior à frequência da variação de carga numa rede. Além disso, a abordagem de maximização de desempenho por escolha do melhor canal será válida para o pior caso (quando as redes estão em máxima ocupação).

3.1 Modelo para a Interferência em Redes 802.11

Dois fatores de interferência determinam a capacidade de transmissão e recepção em sistemas IEEE 802.11: CCA e SINR [Villegas 2007]. O CCA é um mecanismo concebido para identificar se o canal está livre para transmissão. Uma resposta negativa deste

² Considerando que o tempo de varredura de um canal é da ordem de 10 a 20 milissegundos e que uma interface sem fio fará, no pior caso, varredura de 13 canais em 2.4 GHz e mais 24 canais em 5.0 GHz (Roshan, 2003).

mecanismo implica adiamento de uma transmissão e representa, portanto, uma perda de capacidade. A resposta negativa do CCA, indicando canal ocupado, varia em função do tipo de modulação utilizado.

Para a modulação DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*, usada em 802.11b), há 4 técnicas de CCA e três delas demandam a capacidade de demodulação do pacote ou de detecção de sinal modulado [Scalia 2010]. No modelo aqui proposto foi assumido que CCA negativo ocorrerá quando for possível a demodulação de um pacote ou a detecção do sinal modulado que, por sua vez, implica SINR em nível superior ao mínimo para demodulação na menor velocidade (1Mbps). O limiar inferior de SINR é de 10dB, conforme curva BER x SINR para DSSS no MCS de 1Mbps (DBPSK - *Differential Binary Phase-Shift Keying*) e uma BER de 10^{-5} (essa BER equivale a uma PER - *Packet Error Rate* - de 10^{-1} para pacotes de tamanho médio próximos de 2000 bytes) [Mo 2005]. A correlação entre PER e BER em função do tamanho do pacote pode ser verificada em [Chen 2011] e [Villegas 2007].

Na modulação OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*, usada em 802.11a/g/n), o mecanismo CCA leva em consideração a possibilidade de detecção do preâmbulo do pacote para sinais entre -82dBm e -62dBm e a capacidade de demodulação de qualquer parte do pacote para sinais acima de -62dBm [Scalia 2010].

Num contexto de análise em que se tenha acesso aos pacotes, como no *firmware* de rádios 802.11, a verificação da coincidência entre a demanda de transmissão e a ocorrência do preâmbulo de pacote é possível. Contudo, no cenário aqui adotado, baseado em medições discretas de varredura, torna-se muito complexo avaliar esta probabilidade de coincidência para sinais cuja intensidade está entre -82dBm e -62dBm. Assim, é proposta, neste trabalho, uma abordagem para determinação do CCA em função de redes interferentes, levando em consideração a natureza discreta das medições usadas e o atendimento às duas modulações. O mecanismo DCF (*Distributed Coordination Function*) do 802.11 prevê que, uma vez que um nó da rede detecte o meio como ocupado, o nó deve esperar o tempo de transmissão (conforme informado no pacote), esperar um DIFS (*Distributed InterFrame Space*) e um tempo aleatório (*backoff time*) para fazer nova verificação CCA [Qiao 2002]. Foi assumido que se a SINR deste sinal for superior ao mínimo necessário na modulação em questão, somado a uma “margem de segurança”, haverá elevada probabilidade de sincronismo de transmissão deste nó com esta rede, implicando contenção de transmissão. Se o SINR for inferior ao mínimo, o sinal desta rede interferente não contribuirá como interferência sob a forma de contenção de transmissão, mas como aumento do nível de energia interferente (fator I do SINR). Assumindo a mesma premissa de BER de 10^{-5} e curva específica da modulação OFDM de 6Mbps (menor velocidade, MCS BPSK 1/2), o limiar de detecção de sinais OFDM é de 3dB. A “margem de segurança” de 3dB é suficiente para garantir alta probabilidade, como pode ser visto nas curvas BER x SINR da modulação OFDM [Villegas 2007] e da modulação DSSS [Mo 2005]. Sendo assim, na abordagem proposta, se um sinal de uma rede interferente supera um “limiar inferior seguro” (limiar + margem) de SINR para detecção na modulação em questão, sua interferência será por contenção de TX, contribuindo para reduzir a capacidade de transmissão. Por outro lado, se for inferior ao limiar

seguro de SINR, o seu nível de sinal contribuirá para aumentar o componente "Interferência" do próprio SINR.

Para resolver essa interdependência do critério de seleção da forma de interferência com a realimentação na própria SINR, foi utilizada uma abordagem iterativa. O algoritmo iterativo inspeciona o nível de sinal de todas as WLANs ao alcance e verifica se é do tipo contenção ou redução de SINR. Este algoritmo está descrito no Quadro 2 da seção 3.2.

3.2 Algoritmo de Seleção de Canal e Determinação de Velocidades Potenciais

No Quadro 1, é apresentado um pseudocódigo para algoritmo de seleção de melhor canal. Este algoritmo é executado a cada nova varredura disponível. É um algoritmo guloso, pois está considerando, oportunisticamente, a sua perspectiva de maximização de velocidade pela escolha do canal que a proporcione. Para efeito de simplificação, foi omitida a lógica que limita a escolha do melhor canal entre os ditos ortogonais. Em resumo, o algoritmo pode ser executado permitindo escolher qualquer canal disponível no espectro ou somente os canais ditos ortogonais. A seguir, descritivos de variáveis do algoritmo de seleção. Sejam: **S** - eSpectro de canais em uso; **ISF** - Interface Sem Fio do nó; **UMC** - Último Melhor Canal, obtido em execução anterior do algoritmo; **RAA** - Redes Ao Alcance, obtidas na varredura do espectro; **TMSM** - constante com Tempo Mínimo para canal repetidamente escolhido ser considerado Sistemáticamente Melhor.

selecionaMelhorCanal (S, ISF, UMC)
1: RAA <- Varredura (S, ISF)
2: VelocEmCanaisEspectro <- VelocPotEmCanais (S, RAA)
3: VelocEmCanaisOrd <- OrdPorMaiorVeloc (VelocEmCanaisEspectro)
4: MelhorCanalPot <- Primeiro (VelocEmCanaisOrd)
5: MelhorVelocPot <- VelocPot (MelhorCanalPot, VelocEmCanaisEspectro)
6: CanalAtual <- ObtemCanalEmUso (ISF)
7: AtualVelocPot <- VelocidadePotencial (CanalAtual, VelocEmCanaisEspectro)
// Verifica se supera <i>THRESHOLD</i> em relação ao canal atual
8: GanhoVeloc <- MelhorVelocPot - AtualVelocPot
9: Se (GanhoVeloc Maior Threshold) então
10: MelhorCanal <- MelhorCanalPot
// Verifica sistematicidade do melhor canal
11: Se (MelhorCanal Diferente UMC) então
12: TempoDeMelhorCanal <- 0
13: UMC <- MelhorCanal
14: Se (TempoDeMelhorCanal Maior TMSM)
15: OrdenarTrocaCanalAP (MelhorCanal)

Quadro 1. Algoritmo Guloso de Seleção de Canal.

Um cuidado especial foi tomado com o objetivo de evitar que mudanças muito frequentes ou mudanças por máximos momentâneos tornassem o "sistema" instável. Assim, foi estabelecido um limiar de vantagem mínima de velocidade, representado pela expressão *THRESHOLD*, a ser superado para que um melhor canal seja utilizado como

o canal em operação. O THRESHOLD contribui para a parada do processo de trocas de canal das diversas redes ao alcance, quando as vantagens passam a ser inferiores à mínima. Para os experimentos deste trabalho, o THRESHOLD foi fixado em 3Mbps. Outro mecanismo adotado foi o de tempo mínimo para que um "MelhorCanal" seja considerado "Sistematicamente Melhor" (TMSM). Um canal somente é utilizado por uma rede se for o melhor por um tempo maior que o definido por TMSM.

A função que computa as velocidades de transmissão e de recepção potenciais em cada canal do espectro para uma dada varredura é denominada, no algoritmo do Quadro 1, "VelocPotEmCanais" e seu pseudocódigo é apresentado no Quadro 2. A seguir, descritivos do algoritmo de determinação de velocidades. Sejam: **IN** - a soma da Interferência com o ruído (*Noise*) intrínseco da ISF; **INIt** - IN em uma iteração; **RCFCCA** - número de Redes em Contenção por Falso negativo de CCA; **redeInt** - rede Interferente; **grauAdj** - grau de Adjacência de uma rede interferente em relação ao canal do espectro em análise; **redesRemovidas** - quantidade de redes removidas de RAA numa iteração; **rssNoCanal** - nível atenuado de sinal de uma redeInt no canal em análise; **rssISF** - nível de sinal na ISF, fornecido pela rede de conexão atual.

VelocPotEmCanais (S, RAA, ISF)	
1:	Para todo canal de S
2:	IN <- -90 dBm
3:	RCFCCA <- 0
4:	Para Iteracao de 1 a 5
5:	INIt <- IN
6:	redesRemovidas <- 0
7:	Para toda redeInt de RAA
8:	grauAdj <- canalDaRede (redeInt) - canal
9:	rssNoCanal <- nivelSinalInterfPorAdjacencia (redeInt, grauAdj)
10:	SINRInt <- rssNoCanal - INIt
11:	foiCCA? <- tipoInterferencia (rssNoCanal, INIt)
12:	Se (foiCCA?) então
13:	incrementar (RCFCCA)
14:	Senão
15:	IN <- IN + rssNoCanal
16:	removerRedeDaLista (redeInt, RAA)
17:	incrementar (redesRemovidas)
18:	terminarIteracoesSeNaoHouveRedesRemovidas (redesRemovidas)
19:	rssISF <- rssDaConexaoAtual (ISF)
20:	SINR <- rssISF - IN
21:	velocPotTXeRXNesteCanal <- obtemVelocParaCanal (RCFCCA, SINR)
22:	adicionarAoVetor (velocPotTXeRXNesteCanal, VelocPotencialNosCanais)
23:	retornar VelocPotencialNosCanais

Quadro 2. Algoritmo de Determinação de Velocidades Potenciais em Canais.

Na iteração inicial, o nível de energia interferente IN é definido apenas em função do componente N (figura de ruído do rádio no valor de -90dBm). Em cada iteração,

são somados os níveis de sinal das redes que contribuíram como interferência tipo SINR e acrescentados à figura de ruído (linha 15). Estas redes são em seguida eliminadas do grupo de redes em análise (linha 16). Na iteração seguinte o valor de IN da iteração anterior é utilizado e a mesma separação das redes interferentes restantes em RAA é realizada. A quantidade de redes interferindo como contenção de CCA fica acumulada em RCFCCA a cada iteração (linha 13). Na última iteração, é obtido o IN resultante da acumulação de todas as iterações e também a quantidade de redes que interferem como contenção (RCFCCA). O valor de SINR resultante (linha 20) é utilizado para determinação da velocidade potencial de recepção no canal em análise e a quantidade de redes em sincronismo de CCA (RCFCCA) é utilizada como fator de divisão da velocidade máxima da modulação em questão (linha 21). Por fim, são obtidas as velocidades potenciais de transmissão e de recepção para o canal do espectro em questão, em função da interferência das redes ao alcance. Este processo é repetido para todos os canais do espectro S (laço da linha 1).

O processo de varredura do espectro identifica as redes ao alcance e os seus parâmetros operacionais. O parâmetro RSSI (*Received Signal Strength Indication*) representa o nível de sinal em dBm que uma rede tem em seu canal de operação. Na análise de interferência, é estimada a interferência das redes ao alcance em todos os canais do espectro. É necessário, portanto, utilizar um mecanismo que avalie o nível de sinal que uma rede interferente tem em todos os canais do espectro. Conforme mostrado em [Villegas 2007], [Chen 2011] e [Mishra 2006b] é possível determinar o nível de atenuação que um sinal de uma rede tem em função do grau de adjacência entre o seu canal de operação e o canal para o qual a análise é realizada. Em essência, uma tabela de atenuação em função do grau de adjacência é usada. Esta tabela é construída pela análise da quantidade de energia resultante do produto das curvas que representam as máscaras de transmissão e recepção dos rádios para uma dada modulação. As máscaras de transmissão estão definidas na norma IEEE 802.11. Foi assumido que o filtro de recepção tem o mesmo comportamento da máscara de transmissão. Foram usadas as tabelas conforme proposto em [Villegas 2007] tanto para a modulação OFDM quanto para a DSSS. No algoritmo do Quadro 2, o processo descrito neste parágrafo é identificado como "nivelSinalInterfPorAdjacencia" (linha 9).

4. Exemplos Numéricos

Para avaliar a solução proposta, foram realizadas emulações usando uma implementação real dos mecanismos apresentados. O ambiente de emulação tem dois componentes: NMon e Emulador. O NMon é um componente de software independente (aplicação), capaz de acessar as APIs de redes sem fio, solicitar medições de varredura, executar o algoritmo de seleção de canal e comandar a troca de canal no AP associado. O NMon tem mecanismo de agendamento para atualização do processo de varredura a intervalos definidos, permitindo avaliação contínua do melhor canal. Para cada WLAN do experimento é usado um NMon. O Emulador é outra aplicação que computa as medições de varredura emulada e as envia aos NMon, conforme a distribuição dos APs definida na emulação (vide Figura 1). O Emulador acata os comandos de mudança de canal dos

NMons e consolida as informações de velocidade destes a cada passo (cada mudança de canal em cada NMon é um passo da dinâmica de maximização de velocidade das redes ao alcance) para posterior análise e representação gráfica. A Figura 1 mostra a interface do usuário do Emulador. Os círculos claros (alaranjados) com números de canal no topo direito são os APs e os quadrados escuros com número de canal no topo direito são os respectivos NMon associados, aqueles que executam o algoritmo de seleção. As distâncias usadas na computação de níveis de sinal das redes são reais, conforme Figura 1.

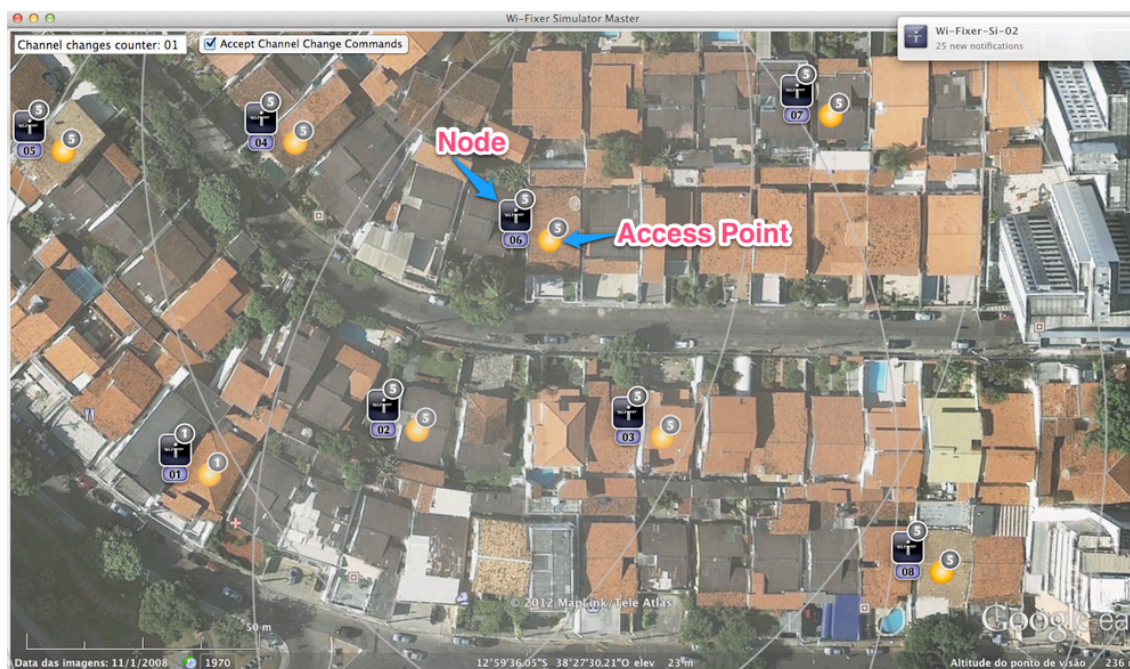


Figura 1. Interface do Usuário do Emulador.

Nos experimentos realizados, há um grupo de 8 WLANs, cada uma com 1 AP e 1 NMon associado, distribuídas numa região metropolitana (cada par interno em uma residência). A escala da figura 1 mostra 4 segmentos de 12,5m num total de 50m. A disposição é tal que cada nó enxerga todos os APs com sinais não inferiores a -90dBm em suas varreduras. A atenuação dos sinais recebidos segue fórmula de atenuação de sinais eletromagnéticos no espaço livre, acrescentada de atenuações de 20dB na recepção de sinais de APs em residências distintas, para representar perdas na travessia de obstáculos, e atenuação de 15dB para sinal do AP na mesma residência, por estar o NMon em cômodo diferente do AP. Todos operam no modo 802.11n, na faixa de frequência de 2.4GHz, com largura de banda de 20MHz, *Guard Interval* de 800nS, apenas 1 *spatial stream* (1 antena apenas, ou MIMO 1x1). Nesta configuração, a velocidade máxima é de 65Mbps [IEEE 2012]. Cada NMon faz varredura emulada do espectro (computação realizada pelo Emulador e enviada ao NMon) e executa algoritmo de seleção de canal, para então comandar a mudança de canal conforme a sua percepção de melhor estratégia a cada passo. Na partida das emulações, todos os APs (e, conseqüentemente, os NMons) usam o mesmo canal: 6. Esta situação pode ser considerada o pior caso em termos de interferência. É esperado que a ação independente e distribuída dos NMons leve o grupo a uma situação de menor interferência e maior desempenho.

Os resultados permitiram comparar os ganhos de velocidade agregada do grupo de redes versus a quantidade de mudanças de canal necessárias até a convergência para o estado de equilíbrio. A emulação 1 (E1) permitiu uso de canais ortogonais com 5 canais de afastamento (canais 1, 6 e 11). A emulação 2 (E2) usou ortogonalidade com 4 canais de afastamento (canais 1, 5, 9, 13).

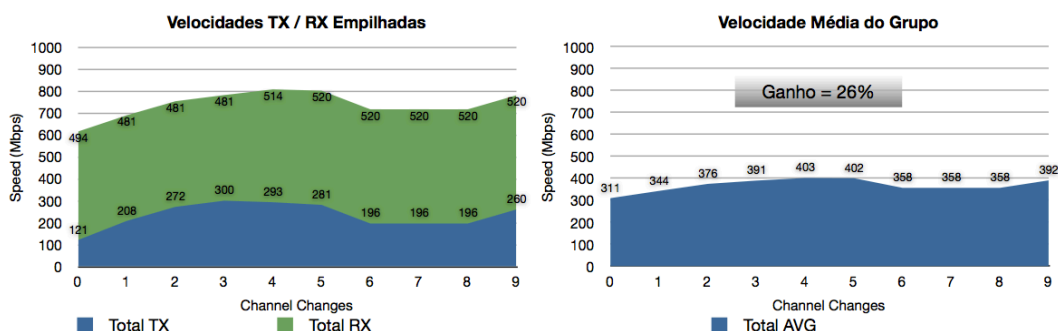


Figura 2. Dinâmica da Emulação 1 (8 Redes Dinâmicas).

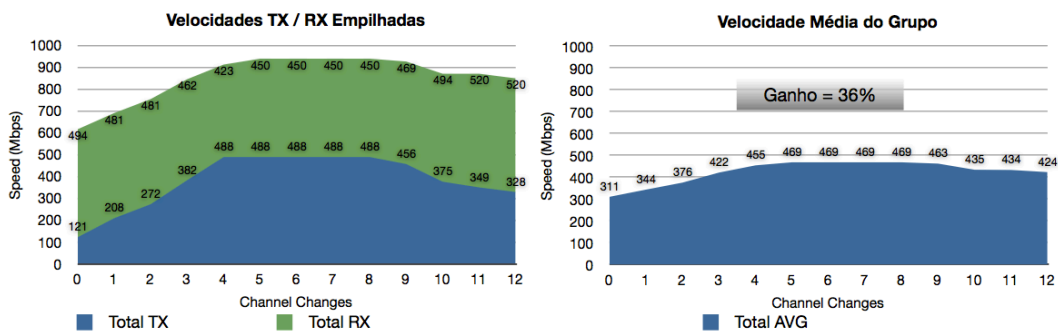


Figura 3. Dinâmica da Emulação 2 (8 Redes Dinâmicas).

A emulação 3 (E3) usou todos os canais disponíveis na regulamentação americana (canais 1 a 11). Por fim, a emulação 4 (E4) usou todos os canais da regulamentação brasileira (canais 1 a 13). As Figuras 2 a 5 apresentam os resultados das emulações. Nas 4 emulações, as 8 redes estavam em dinâmica de seleção de canal.

Da observação das Figuras 2 a 5, é verificado que quanto maior a disponibilidade de canais para seleção (3, 4, 11 e 13 canais, respectivamente a E1, E2, E3 e E4), maior o potencial de ganho de velocidade agregada pelos NMONs (26, 36, 55 e 59% respectivamente). Também maior foi a velocidade agregada final com a maior disponibilidade de canais (392, 424, 482 e 494Mbps respectivamente). Em contrapartida, a quantidade de mudanças de canal no grupo de redes cresce com a maior quantidade de canais disponíveis para uso (9 e 12 contra 21 e 18). Em E1 e E2, o máximo do grupo não foi atingido no final, mas com 4 e 5 passos respectivamente. Observando-se as velocidades individuais dos NMONs de E2 (figuras suprimidas por restrição de espaço), é verificado que, no passo 5, alguns NMONs atingiram velocidade máxima (65Mbps), enquanto o NMON de menor velocidade estava a 46Mbps. No estado final, o NMON de menor velocidade estava com 49Mbps e muitos outros NMONs estavam na mesma velocidade, mostrando menor diferença de velocidade entre os NMONs (*fairness*) pela seleção independente da melhor estratégia para sua rede por cada NMON. Em [Mishra 2006a] foi definido um melhor *fairness* como um objetivo.

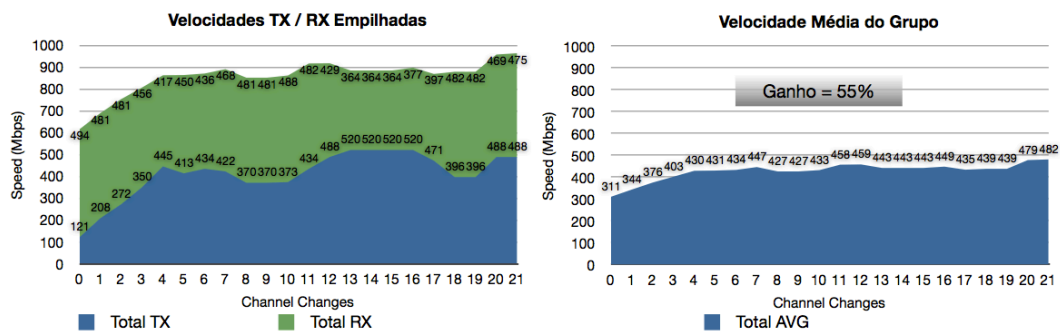


Figura 4. Dinâmica da emulação 3 (8 redes dinâmicas).

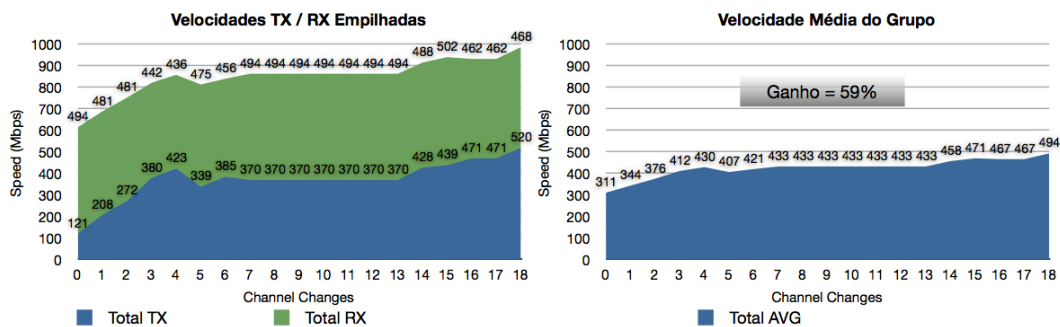


Figura 5. Dinâmica da Emulação 4 (8 Redes Dinâmicas).

Em E1 e E2, da observação do painel de velocidades em canais do NMon ao final do processo, foi verificado que em alguns NMons havia melhor estratégia de canal se não fosse respeitado o critério de selecionar apenas canais ortogonais. A Figura 6 exemplifica este caso. Esta possibilidade de aumento de velocidade foi comprovada em E3 e E4 quando foi permitida a seleção de qualquer canal disponível na regulamentação em uso.

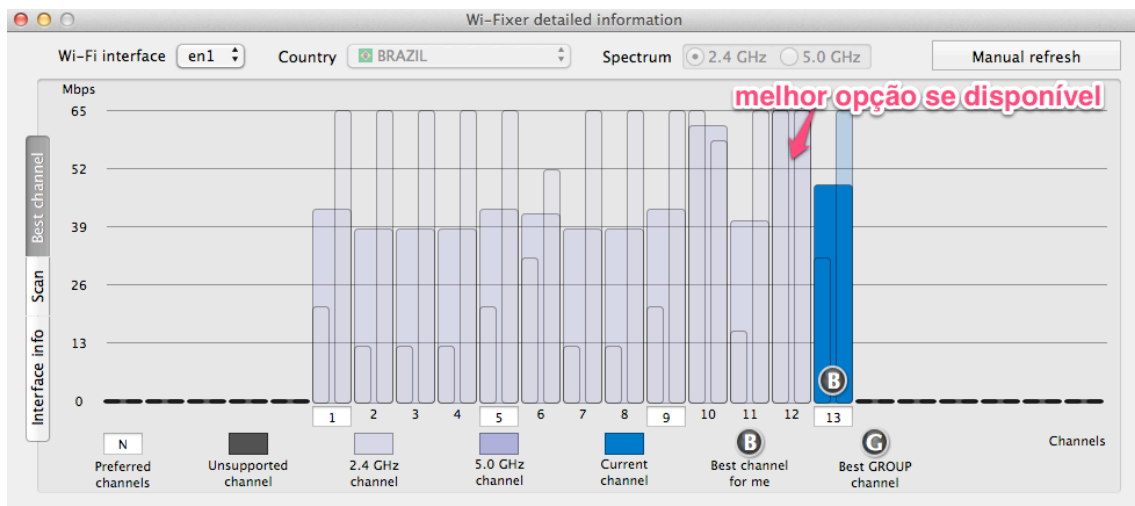


Figura 6. Painel do NMon com Velocidades Potenciais nos Canais do Espectro.

As Figuras 7 e 8 representam resultados de novas emulações (E1-4d e E4-4d, similares a E1 e E4), mas com apenas 4 das 8 redes selecionando canais dinamicamente.

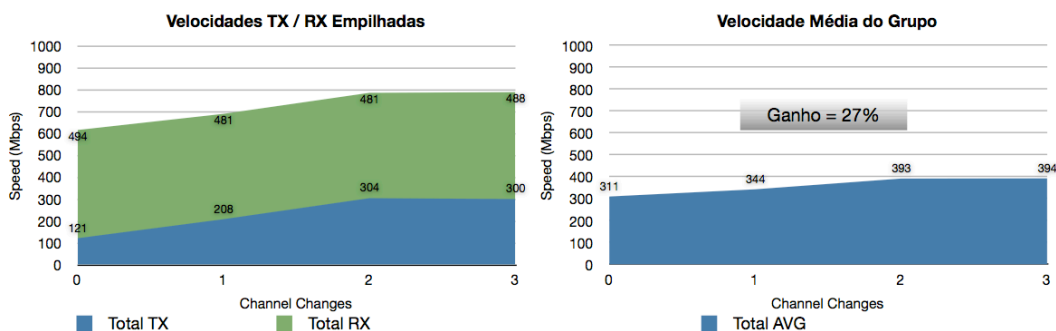


Figura 7. Dinâmica da Emulação 1 (4 Redes Dinâmicas e 4 Estáticas).

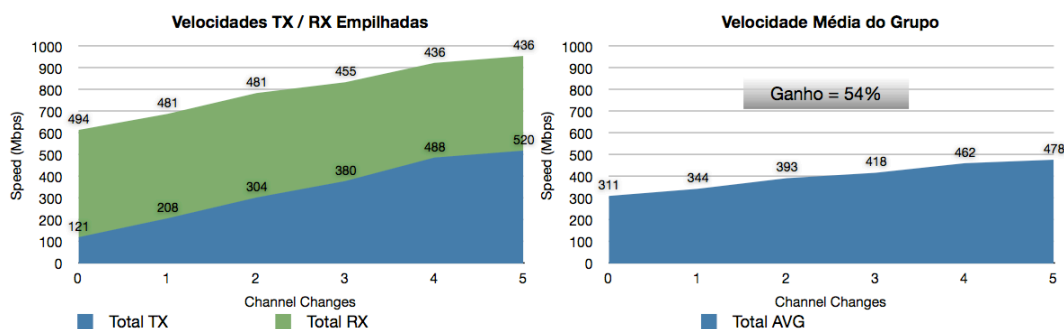


Figura 8. Dinâmica da Emulação 4 (4 Redes Dinâmicas e 4 Estáticas).

Em E1-4d (Figura 7), as redes “dinâmicas” conseguiram valores de velocidade final em geral maiores que as “estáticas” (NMons 3 e 7 saíram de 37 para 49Mbps, NMon 1 saiu de 37 para o máximo de 65Mbps e NMon 5 foi de 37 para 52Mbps), porém as estáticas também obtiveram ganho em relação à situação inicial, como efeito da ação de minimização de interferência das dinâmicas, já que o fenômeno de interferência é recíproco (NMons 2, 4 e 6 saíram de 37 para 39 Mbps e o NMon 8 saiu de 37 para 62 Mbps). Foi observado que todas as redes foram beneficiadas, mas as dinâmicas obtiveram, no geral, resultados superiores. O desvio médio das velocidades finais das redes em E1 e em E1-4d é muito próximo (8 e 8,75Mbps), portanto a redução de NMons dinâmicos não representou grande impacto no *fairness*. No painel de velocidades de alguns dos NMons ativos em E1-4d foi observada a possibilidade de obtenção de maiores velocidades se todos os canais estivessem disponíveis. Este fenômeno ocorreu para algumas redes estáticas e também para algumas redes dinâmicas.

Em E4-4d (Figura 8), foi confirmada a expectativa de maior agregado final de velocidade pela maior disponibilidade de canais para seleção, conforme esperado dos resultados individuais de algumas redes em E1-4d. O agregado final em E1-4d foi de 394Mbps contra 478Mbps em E4-4d. Tanto em E1-4d como em E4-4d ocorreu menor quantidade de mudanças de canal até o ponto de estabilização, como efeito da menor quantidade de redes buscando, dinamicamente, oportunidades de aumento de suas velocidades potenciais.

5. Considerações Finais e Trabalhos Futuros

Com base em estatísticas que demonstram a larga adoção de banda larga fixa no Brasil e no advento da larga disseminação da computação móvel em contraponto à restrição em termos de espectro de frequências disponíveis para WLANs, é verificada a relevância do problema da interferência entre WLANs em contextos não coordenados. Neste trabalho, foi usada a estratégia mais frequente para minimização da interferência, que consiste na escolha de canais com grande afastamento em relação a WLANs interferentes. Entretanto, a abordagem para o modelo de interferência é mais completa, considerando não somente os efeitos de redução da capacidade de recepção pela redução de SINR, mas também os efeitos de contenção na transmissão no controle de acesso ao meio de comunicação por falsos negativos de CCA. Usando a predição de velocidade potencial de transmissão e de recepção para os canais do espectro, providas pelo modelo de interferência proposto, foi aplicado algoritmo de seleção de canal que escolhe aquele que lhe ofereça potencial de velocidade média de TX e RX sistematicamente melhor. O modelo é adequado ao contexto de medições discretas do ambiente sem fio e usa a perspectiva do cliente. Experimentos realizados mostraram que quanto maior a disponibilidade de canais, maior o resultado final no estado de convergência, em termos de agregado de velocidade do grupo de WLANs. Estes resultados evidenciam a importância de abordagens automatizadas de seleção de canal, se providas de modelo de interferência adequado ao contexto não coordenado. Adicionalmente, foi mostrado que se apenas algumas WLANs usam a abordagem de seleção de canal, ainda assim existem benefícios para o grupo e, inclusive, para as WLANs que não usam essa abordagem. Finalmente, o uso da perspectiva do cliente e de medidas discretas viabiliza a sua aplicabilidade de forma prática.

Como trabalhos futuros, espera-se complementar o modelo de interferência de forma a permitir que novos experimentos sejam realizados, contemplando cenários heterogêneos no que tange a diferentes modos de enlace 802.11. Para tanto, é necessário determinar tabelas de adjacência que contemplem transmissores e receptores que usam diferentes modulações (OFDM e DSSS) e diferentes larguras de banda. Não foram encontrados trabalhos científicos que tenham utilizado heterogeneidade de WLANs. Outro estudo levará em consideração que, no processo de ordenação de canais pelas maiores velocidades potenciais, é possível haver empates, permitindo testar diferentes abordagens de desempate para acelerar o tempo de convergência do grupo de redes. Outra oportunidade é considerar o limiar THRESHOLD como um percentual da velocidade máxima do modo de enlace em questão. Um novo algoritmo pode ser criado considerando a perspectiva de mais de um NMon numa mesma rede (modo de cooperação). Usando uma abordagem de multiagentes, os NMons comunicarão suas perspectivas e um deles será eleito para executar o algoritmo de seleção do melhor canal em cooperação. Esta proposta está baseada na percepção de que, ao longo de experimentos práticos em locais com alta densidade de redes sem fio não coordenadas, é comum que entre os nós de uma mesma rede sem fio existam alguns com diferentes perspectivas de interferência.

6. Referências

- Albuquerque, C. et al. (2012). "Algoritmo de seleção de canais centralizado para redes IEEE 802.11 com controlador". Em SBRC 2012 - WRA.
- Chen, F. et al. (2011). "Realistic Simulation and Experimental Validation of Adjacent-Channel Interference in Planning of Industrial Wireless Networks". Em ACM PE-WASUN. ACM.
- Gast, M. (2005). "802.11® Wireless Networks The Definitive Guide". O'Reilly.
- IEEE Computer Society. (2012). "IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications". IEEE.
- Kauffmann, B. et al. (2007). "Measurement-based self organization of interfering 802.11 wireless access networks". Em IEEE INFOCOM 2007. IEEE.
- Mishra, A. et al. (2006a). "Distributed channel management in uncoordinated wireless environments". Em MobiCom '06. ACM. New York, NY, USA.
- Mishra, A. et al. (2006b). "Partially Overlapped Channels Not Considered Harmful". Em SIGMETRICS '06/Performance '06. ACM. New York, NY, USA.
- Mo, T. et al. (2005). "A Throughput Optimization and Transmitter Power Saving Algorithm For IEEE 802.11b Links". Em *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. IEEE.
- Proakis, J. et al. (2008). "Digital Communications". 5th Ed. McGraw-Hill.
- Qiao, Daji et al. (2002). "Goodput Analysis and Link Adaptation for IEEE 802.11a Wireless LANs". Em *IEEE Transactions on Mobile Computing*. IEEE.
- Roshan, P. et al. (2003). "802.11 Wireless LAN Fundamentals". Cisco Press.
- Scalia et al. (2010). "On the Side Effects of Packet Detection Sensitivity in IEEE 802.11 Interference Management". Em IEEE WoWMoM 2010. IEEE.
- TELECO. (2012). "Estatísticas de Banda Larga no Brasil - Dados Trimestrais". Disponível em: <http://www.teleco.com.br/blarga.asp>. Acesso em 01/11/2012.
- Villegas et al. (2007). "Effect of adjacent channel interference in IEEE 802.11 WLANs". Em IEEE CrownCom 2007. IEEE.
- Zhou et al. (2012). "Channel Assignment for WLAN by Considering Overlapping Channels in SINR Interference Model". Em IEEE ICNC 2012. IEEE.