

ZAP: Um Algoritmo de Atribuição Distribuída de Canais para Mitigação de Interferências em Redes com Rádio Cognitivo

Paulo R. Walenga Jr.^{1,2}, Mauro Fonseca¹, Anelise Munaretto³,
Aline Carneiro Viana^{2,4}, Artur Ziviani⁵

¹PPGIA, Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR)
Curitiba, PR - Brasil

²Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA)
Orsay - França

³CPGEEI, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
Curitiba, PR - Brasil

⁴Technische Universität Berlin (TU-Berlin)
Berlim - Alemanha

⁵Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC)
Petrópolis, RJ - Brasil

{paulo.walenga, mauro.fonseca}@ppgia.pucpr.br, anelise@utfpr.edu.br
aline.viana@inria.fr, ziviani@lncc.br

Abstract. *This paper presents ZAP, a protocol for distributed assignment of frequency channels to links in cognitive radio networks. These radios are capable of identifying under-utilized licensed bands of the spectrum, allowing their reuse without interfering with primary users. The frequency assignment must be simple, incur acceptable communication overhead, provide timely response and be adaptive to accommodate constant changes in the network. Another challenge is the optimization of network capacity through interference minimization. Unlike the related proposals in the literature, ZAP responds to this challenge with a distributed approach based only on local (neighborhood) knowledge, while significantly reducing computational cost and number of messages required for channel assignment. Simulations confirm the good quality of ZAP in terms of (1) performance compromise between different metrics and (2) fast solution achievement regardless of network size.*

Resumo. *Este artigo apresenta o ZAP, um protocolo para atribuição distribuída de canais de frequência a enlaces em redes com rádios cognitivos. Tais rádios são capazes de identificar bandas licenciadas do espectro que estão subutilizadas, possibilitando sua reutilização de maneira não-interferente com os usuários primários. Nessas condições, a atribuição deve ser simples, incorrer em um overhead de comunicação aceitável, fornecer resposta em tempo hábil e ser adaptativa para acomodar as constantes mudanças na rede. Outro desafio é a otimização da capacidade da rede minimizando o número de interferências. Diferentemente das propostas relacionadas encontradas na literatura, o ZAP responde a este desafio com uma abordagem distribuída baseada em conhecimento local (vizinhança), reduzindo significativamente o custo computacional e o número de mensagens necessárias à atribuição de canais. As simulações atestam a boa qualidade do ZAP em termos de (1) compromisso de desempenho levando-se em conta diversas métricas e (2) rápida obtenção da solução independentemente do tamanho da rede.*

1. Introdução

A porção não-licenciada do espectro de radiofrequência está cada vez mais saturada [Arslan 2007] devido ao aumento no número de dispositivos sem fio e o crescente

interesse dos usuários em mobilidade. Em busca de alternativas a um uso mais eficiente das faixas de frequência disponíveis, estudos recentes têm mostrado que, enquanto um pequeno número de faixas de frequência é fortemente utilizado, uma grande parte do espectro permanece subutilizada na maior parte do tempo. No entanto, tipicamente, essas faixas de frequência pouco ou não utilizadas estão licenciadas para uso dos chamados usuários primários e não podem ser livremente utilizadas por outros usuários.

Em 2002, a FCC (*Federal Communications Commission*) publicou um relatório [Commission 2002] tratando da possibilidade de reuso de tais faixas de frequência subutilizadas por usuários ditos secundários de maneira não-interferente com a utilização de um novo conceito chamado *rádio cognitivo*. O rádio cognitivo [Mitola-III e Maguire-Junior 1999] pode ser definido como sendo um sistema sem fio capaz de investigar o espectro de modo a estar ciente do ambiente que o cerca. Outra habilidade requerida por tal dispositivo seria uma aprendizagem adaptativa, para permitir o planejamento na seleção de futuros parâmetros baseado em observações históricas de comportamento do meio. Esse tipo de dispositivo seria capaz de identificar os “espaços brancos” (ou seja, bandas de frequência não-utilizadas num determinado instante de tempo) e configurar seus parâmetros de transmissão para se comunicar com outros dispositivos similares em faixas de frequência não utilizadas, aproveitando essa subutilização do espectro.

Uma vez identificados os espaços brancos, surge o problema de como distribuir as faixas de frequência subutilizadas disponíveis para dispositivos que compõem uma rede. Tal problema, denominado *atribuição de canais*, tem por objetivo atribuir um único canal para cada enlace de uma rede de modo a maximizar a capacidade total desta, e tem sido o foco de muitos trabalhos recentes na literatura [Subramanian et al. 2008, Shiang e van der Schaar 2009, Cheng et al. 2009, Li e Zekavat 2009].

Parte das propostas encontradas para o problema de atribuição de canais consiste em uma abordagem centralizada [Subramanian et al. 2008]. Apesar de uma abordagem centralizada obter resultados ótimos em termos de capacidade, as propostas baseadas nesta estratégia usualmente geram muito *overhead* de comunicação, além de incorrerem em problemas de vulnerabilidade na entidade central. Considerando-se uma eventual variação na disponibilidade de canais ao longo do tempo (fruto da característica inerentemente oportunística das redes com rádio cognitivo), tais abordagens tornam-se ineficientes, uma vez que a resposta encontrada pode já não mais refletir o atual estado da rede.

Justifica-se então o uso de uma abordagem distribuída, com menor custo, menos vulnerável a problemas, e que apresente um resultado competitivo, ainda que não alcance a resposta ótima. Abordagens desse tipo também estão presentes na literatura [Shiang e van der Schaar 2009, Li e Zekavat 2009]. Embora apresentem resultados interessantes, as propostas anteriores de abordagem distribuída para o problema de atribuição de canais não se preocupam em reduzir o *overhead* de comunicação nem com mudanças constantes na rede.

Idealmente, um algoritmo de atribuição de canais deve ser frugal na sua utilização de recursos de comunicação. Em particular, um algoritmo de atribuição de canais deve ser simples, incorrer em um *overhead* de comunicação aceitável, aprimorar a capacidade

da rede, minimizar a interferência, fornecer resposta em tempo hábil, e ser adaptativo para acomodar as constantes mudanças na rede (p.ex. devido à atividade dos usuários primários ou à disponibilidade de canais). Claramente, os objetivos acima citados podem ser contraditórios. Além disso, a otimização distribuída da capacidade da rede minimizando o número de interferências é um desafio.

Neste artigo, é proposto o algoritmo ZAP para atribuição distribuída de canais em redes com rádios cognitivos, tendo como foco um compromisso eficiente entre as características desejáveis a uma solução eficaz neste contexto. O ZAP permite fazer a atribuição de canais em uma rede com rádios cognitivos mitigando as interferências entre transmissões simultâneas com baixo *overhead* de comunicação.

As simulações atestam a qualidade do algoritmo proposto em termos de compromisso de desempenho levando-se em conta diversas métricas quando comparado com uma atribuição aleatória de canais – de resultado ineficiente – e com uma atribuição de canais centralizada – de resultado ótimo. Os resultados mostram que as 6 primeiras interações do ZAP atingem 99% do desempenho que seria alcançado caso fossem realizadas infinitas interações do mesmo, *independentemente do tamanho da rede*, comprovando a rapidez na obtenção da solução e proporcionando escalabilidade ao sistema. Além disso, por utilizar apenas conhecimento local (vizinhança) em cada nó, o ZAP reduz significativamente o número de mensagens necessárias à atribuição de canais em relação a um algoritmo centralizado com conhecimento global da rede.

A seguir, na Seção 2, o problema é especificado, e são definidos os modelos adotados de rádio, rede, e interferência. A Seção 3 descreve o algoritmo ZAP proposto. Os resultados das simulações são apresentados e discutidos na Seção 4. Na Seção 5, o ZAP é comparado a trabalhos existentes na literatura. Por fim, a Seção 6 finaliza este artigo enfatizando as contribuições oferecidas pelo ZAP.

2. Formulação do Problema

Nesta seção são apresentados os modelos de rádio cognitivo, rede, e interferência, usados neste trabalho para especificação do problema e definição da proposta.

2.1. Modelo de Rádio Cognitivo

De acordo com o modelo proposto em [Akyildiz et al. 2009], o ciclo cognitivo é composto por 4 funções de gerenciamento de espectro: sensoriamento, decisão, compartilhamento e mobilidade. Apenas as duas primeiras funções (sensoriamento e decisão) estão relacionadas diretamente ao problema de atribuição de canais. Por esse motivo, foram desconsideradas neste artigo as demais funções (compartilhamento e mobilidade).

A função de sensoriamento é responsável pela busca de bandas de frequência não-utilizadas (*out-of-band sensing*) e também pelo monitoramento das bandas a serem empregadas na comunicação do próprio dispositivo (*in-band sensing*). O objetivo é detectar um possível início de utilização por usuários licenciados e assim interromper imediatamente o seu uso pelo usuário secundário. Assume-se que os canais sejam ortogonais entre si, de maneira que as bandas de frequência não se sobreponham, ao contrário do que acontece no padrão IEEE 802.11 [P802.11 2007]. É razoável considerar que inicialmente um equipamento gaste um determinado tempo procurando canais (bandas) livres para criar uma lista prévia de utilização. À medida que os usuários primários comecem a fazer uso

de alguns dos canais, estes vão sendo retirados da lista até que restem apenas poucos canais (i.e. 2 ou 3), momento em que se deve realizar novamente um sensoriamento para nova busca de bandas de frequência não-utilizadas.

Responsável pela escolha das faixas de frequências a serem utilizadas para comunicação, a função de decisão pode ser subdividida em 3 módulos: caracterização, seleção e reconfiguração. Tendo como parâmetros as características de canal (interferência, perda de percurso, taxa de erros e atraso de propagação) e o comportamento histórico dos usuários primários, o módulo de caracterização tem como objetivo classificar os canais encontrados pelo sensoriamento. Considera-se então que a caracterização forneça como saída uma lista ordenada de canais. O módulo de seleção é a entidade que realiza a atribuição *criterosa*¹ de canais a partir da lista ordenada obtida da caracterização, e é o foco deste trabalho. Por fim, o módulo de reconfiguração tem por função adaptar os protocolos das camadas superiores aos parâmetros do canal em operação, e foge do escopo deste artigo.

Em termos de equipamento, assume-se que haja duas interfaces de rádio: uma permanentemente sintonizada em um Canal Comum de Controle (CCC) e a outra interface capaz de comutar de canal rapidamente (em relação ao tempo de transmissão dos pacotes). Essa segunda interface pode ser utilizada tanto para comunicação efetiva de dados quanto para a realização do sensoriamento.

2.2. Modelo de Rede

Considera-se neste artigo uma rede em malha (mesh) sem fio, com roteadores sem fio estáticos e equipados de um rádio cognitivo cada. Essa rede é modelada por um grafo de comunicação, cujos vértices representam os nós (roteadores) da rede e as arestas representam os enlaces entre dois nós vizinhos. Cada nó possui um identificador único e uma lista dos canais disponíveis conhecidos pelo nó. Dois nós são ditos vizinhos se, e somente se, estiverem ao alcance um do outro e a intersecção de suas listas de canais seja diferente de um conjunto vazio. Considera-se que os nós estão ao alcance um do outro quando conseguem se comunicar através do CCC.

2.3. Modelo de Interferência

Quando se analisa um cenário com múltiplos saltos, um dos fatores que limita o desempenho da rede é a interferência. Dois enlaces interferentes não conseguem realizar suas comunicações se estiverem tentando fazê-lo no mesmo canal ao mesmo tempo. No presente trabalho, adota-se um modelo modificado de interferência a dois saltos [Padhye et al. 2005], em que dois enlaces são ditos interferentes se estão a exatamente dois saltos de distância entre si. Justifica-se a escolha desse modelo pela existência de apenas uma interface de rádio para comunicação de dados, de modo que um nó pode comunicar-se com apenas um de seus vizinhos a cada vez. Considera-se, por esse motivo, a interferência a um salto como contenção (gerenciada por envios de RTS e CTS pelo CCC), não sendo possível eliminá-la. Resta, assim, tentar mitigar ao máximo a interferência a dois saltos.

Assume-se um modelo de interferência binário (dois enlaces ou interferem completamente, ou não interferem entre si), e um modelo de tráfego uniforme em todos os

¹Neste caso, o critério adotado foi a interferência.

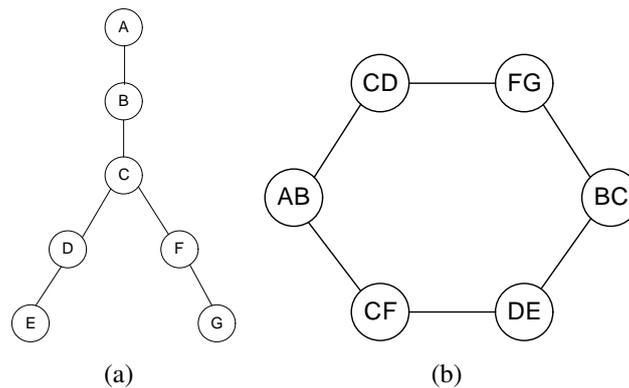


Figura 1. (a) Grafo de comunicação e (b) seu correspondente grafo de conflito.

enlaces. Os enlaces que interferem entre si são representados utilizando-se um grafo de conflito, cujos vértices correspondem aos enlaces do grafo de comunicação, e as arestas, às possibilidades de interferência caso os enlaces façam uso de um mesmo canal.

A Figura 1 ilustra a correspondência entre um grafo de comunicação (Figura 1(a)) e um grafo de conflito (Figura 1(b)), respeitando o modelo de interferência adotado. Nota-se na Figura 1(b) que os enlaces BC, CD e CF não são marcados como interferentes entre si no grafo de conflito, uma vez que o tipo de interferência entre eles não pode ser removido devido à característica material do modelo de rádio (apenas uma interface de rádio para comunicação de dados).

2.4. Especificação do Problema

Com o grafo de conflito construído, é possível melhor especificar o problema de atribuição de canais. Trata-se de selecionar um único canal (dentre os disponíveis na intersecção entre as listas de canais dos dois nós envolvidos pelo enlace) para cada enlace (vértice do grafo de conflito), de maneira que dois enlaces interferentes (i.e. que têm uma aresta comum no grafo de conflito) não façam uso de um mesmo canal.

Para redes pequenas que não apresentem variações significativas (devido à mobilidade dos nós ou alteração na disponibilidade dos canais), o mais adequado seria eleger um nó como entidade central. Esse nó central recebe as informações sobre todos os outros nós, em seguida utiliza uma função de atribuição de canais que obtenha o mínimo de interferência possível e por último repassa aos outros nós da rede a atribuição final.

Contudo, no caso de redes com rádios cognitivos, o principal cuidado a se tomar é o de não interferir na comunicação dos usuários primários. Essa condição sugere que os canais disponíveis possam variar de um instante para outro, de acordo com o comportamento dos usuários primários, e, portanto, as redes (formadas pelos usuários secundários) que fazem uso desses canais não podem ser consideradas sempre estáticas. Para tais redes, é aconselhável a utilização de uma abordagem distribuída, para que as mensagens sejam trocadas apenas pelos nós afetados pela modificação ocorrida na rede. O uso de tal abordagem pode ser considerado válido devido à natureza localizada da interferência (modelo de interferência a dois saltos).

Como se assume um tráfego uniforme em todos os enlaces, define-se a interferência total (IT) da rede como sendo o número de pares de enlaces que interferem entre

si, ou seja, que possuem o mesmo canal atribuído e estão conectados por uma aresta no grafo de conflito. Outro modo de indicar a eficiência de um algoritmo de atribuição de canais é avaliar a interferência removida após a atribuição (IR) em relação à interferência quando da existência de apenas um canal (interferência máxima - IM), de acordo com a equação:

$$IR(\%) = \frac{IM - IT}{IM} \quad (1)$$

Para a obtenção de uma atribuição de canais eficiente, o objetivo, então, passa a ser *maximizar a interferência removida (IR)*, que resulte no aumento da capacidade total da rede [Gupta e Kumar 2000].

3. Algoritmo Proposto: ZAP

O algoritmo ZAP para atribuição dinâmica de canais está descrito em detalhes nesta seção. Por operar de maneira distribuída, o ZAP necessita de processamento local em cada nó e de trocas de mensagens entre os nós da rede. Conforme o modelo presente na Seção 2.1, o dispositivo considerado dispõe de uma interface de rádio permanentemente sintonizada num Canal Comum de Controle (CCC). Como o CCC é utilizado para *todas* as trocas de mensagens do algoritmo, o ZAP *nunca* interfere na comunicação de dados.

Há dois tipos de mensagens trocadas entre os nós: mensagens de *hello* e mensagens de interação. As mensagens de *hello* são compostas por duas listas: a primeira contém as identificações do nó de origem da mensagem e de seus vizinhos, e a segunda contém os canais disponíveis para cada um desses nós. As mensagens de interação criadas em um nó são constituídas pelo vetor de prioridade desse nó e por uma lista com a atribuição de cada um dos enlaces do nó em questão. O intervalo entre duas mensagens consecutivas é sempre calculado somando-se uma constante $T/2$ a um valor sorteado aleatoriamente entre 0 e $T/2$ para evitar a sincronização dos instantes de envio das mensagens e, com isso, minimizar a ocorrência de colisões.

O funcionamento do ZAP é baseado numa máquina de 4 estados: (1) Gerente de Topologia, (2) Atribuição Local, (3) Mecanismo de Interação, e (4) Escalonador. O diagrama de estados pode ser visto na Figura 2.

3.1. Estado 1: Gerente de Topologia

O Gerente de Topologia é responsável por manter atualizadas as variáveis de topologia – grafos de comunicação (*CommGraph*) e de conflito (*ConflictGraph*), e listas de enlaces (*LinkList*) e de canais disponíveis (*ChannelList*). Enquanto essas variáveis não estiverem estabilizadas, são enviadas mensagens periódicas de *hello* e o algoritmo alterna entre os estados 1 e 4. Quando for alcançada a condição de estabilidade, o algoritmo terá as informações necessárias para a realização da atribuição local, passará para o estado 2, e cessará a troca de mensagens de *hello*. O estado 1 só será ativo novamente em caso de mudança na disponibilidade de canais ou na topologia.

Ao passar para o estado 1, o algoritmo verifica o evento que originou essa troca de estado. Se a troca foi ocasionada pela chegada de uma mensagem de *hello* de um nó vizinho, o grafo de comunicação é atualizado. Se a troca foi ocasionada pelo estouro

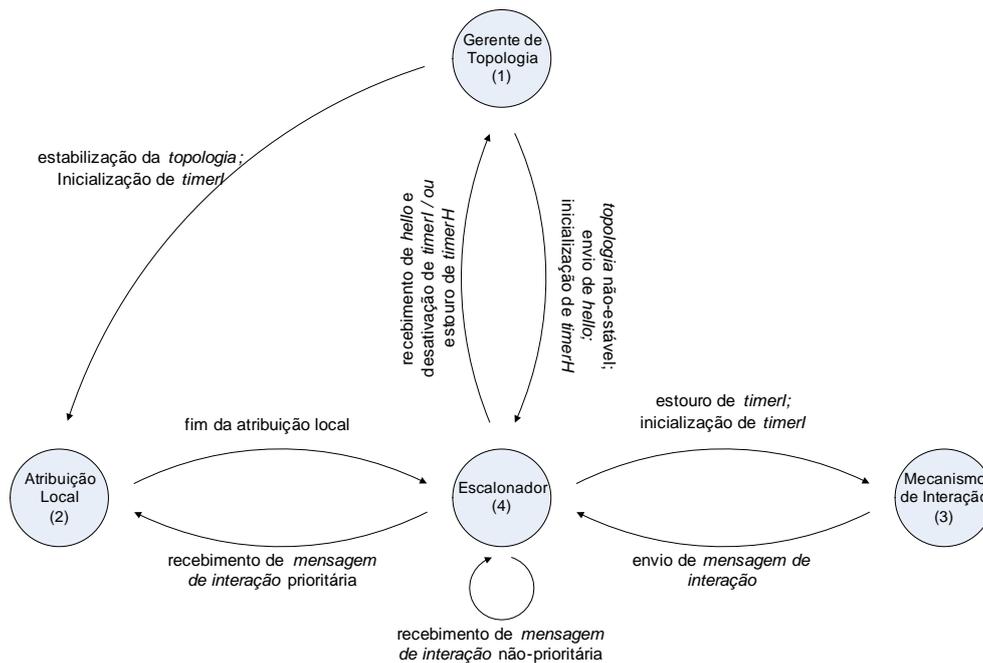


Figura 2. Diagrama de estados do ZAP.

do temporizador $timerH$, verifica-se a estabilidade das informações. Caso o grafo de comunicação tenha se mantido o mesmo entre dois envios consecutivos de mensagens, assume-se que as informações são estáveis. Inicializa-se então o temporizador $timerI$, constroem-se o grafo de conflito e a lista de enlaces, e o fluxo desvia para o estado 2. Caso contrário (informações instáveis), o temporizador $timerH$ é recarregado e passa-se para o estado 4.

Para exemplificar, pode-se imaginar que inicialmente os nós não possuam nenhuma informação e que não ocorram modificações na rede. Após trocarem a primeira mensagem de *hello*, terão o conhecimento de seus vizinhos. Ao trocarem a segunda, conhecerão sua vizinhança. A terceira mensagem não trará nenhuma alteração, o que tornará as informações estáveis de acordo com o exposto anteriormente. Portanto são necessárias normalmente 3 trocas de mensagens de *hello* até que o algoritmo passe para o estado 2.

3.2. Estado 2: Atribuição Local

A Atribuição Local é responsável por elaborar uma atribuição prévia baseada no conhecimento local do nó. Uma vez calculada essa atribuição, o algoritmo muda para o estado 4 e só retorna ao estado 2 quando receber uma mensagem de interação vinda de um nó com maior prioridade de decisão.

O Algoritmo 1 detalha o procedimento de Atribuição Local. De início, cria-se uma lista L contendo os enlaces ainda não atribuídos de $LinkList$, uma lista C contendo as listas de canais disponíveis para os enlaces de L (obtidas de $ChannelList$), uma lista vazia $InterferentList$ para armazenar enlaces interferentes, e uma lista $AssignedList$ com os enlaces já atribuídos de $LinkList$. Enquanto existirem em L enlaces que ainda não foram atribuídos, seleciona-se um deles de acordo com os critérios² a seguir, respei-

²Foram testados vários conjuntos de critérios, tendo sido selecionado o conjunto que apresentou a me-

tando a ordem:

- enlace mais restrito (menor número de canais disponíveis);
- enlace com maior probabilidade de interferência (maior número de arestas no grafo de conflito);
- enlace com a maior soma de graus dos nós (considera-se como grau de um nó o número de enlases de *LinkList* dos quais o nó em questão faz parte);
- menor índice do enlace (o que estiver no topo de *L*).

Algoritmo 1: Atribuição Local - Estado 2

Entrada: *LinkList*, *ConflictGraph*

Saída: *AssignedList*

L ← enlases não atribuídos de *LinkList*;

AssignedList ← enlases atribuídos de *LinkList*;

enquanto *L* ≠ ∅ **faça**

seleciona enlace de acordo com os critérios e o armazena em *link*;

remove *link* de *L*;

se não há canais em *C* disponíveis para *link* **então**

insere *link* em *InterferentList*;

continua;

fim

ch ← melhor canal de *C* disponível para *link*;

atribui *ch* a *link* em *AssignedList*;

para cada enlace ∈ *L* **faça**

se enlace é vizinho a *link* em *ConflictGraph* **então**

remove *ch* de *C* na posição correspondente a *enlace*;

fim

fim

fim

para cada *link* ∈ *InterferentList* **faça**

c ← canal de *ChannelList* disponível para *link* com menor número de ocorrências

entre os vizinhos de *link* em *ConflictGraph*;

atribui *canal* a *link* em *AssignedList*;

fim

Armazena-se o enlace selecionado na variável *link* e ele é removido da lista *L*. Se não houver canais disponíveis para *link*, ele é marcado como interferente e incluído em *InterferentList* para atribuição posterior. Nesse caso, escolhe-se um novo enlace respeitando os critérios anteriores. Caso contrário, tendo pelo menos um canal disponível, armazena-se o *melhor canal*³ dentre os disponíveis para *link* na variável *ch*. Em seguida, atribui-se *ch* a *link* em *AssignedList*. Da lista *C*, remove-se *ch* nas posições cujos índices são respectivos aos enlases da lista *L* que estão conectados a *link* em *ConflictGraph*.

Repete-se o processo até que não haja mais enlases em *L*. Neste momento, os enlases que foram incluídos em *InterferentList* receberão atribuição na mesma ordem em que foram inseridos na lista. Novamente utiliza-se a variável *link* para armazenar o

lhor resposta. Um critério só é aplicado caso haja empate entre dois ou mais enlases na aplicação do critério anterior.

³Assume-se que a lista de canais esteja ordenada do pior para o melhor canal, de forma que o melhor canal seja o de maior índice. A classificação dos canais é feita pelo módulo de caracterização de espectro, conforme mencionado na Seção 2.1.

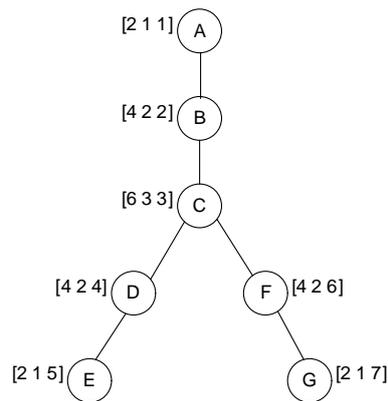


Figura 3. Grafo de comunicação ilustrando os vetores de prioridades de cada nó.

enlace que está sendo processado. Como os possíveis canais para *link* foram removidos quando da atribuição de outro enlace, deve-se buscar na lista original *ChannelList* os canais inicialmente disponíveis para *link*. Dentre esses canais, é atribuído aquele que gerar mínima interferência com os outros enlaces já atribuídos, tendo por base o *ConflictGraph* e *AssignedList*. Em seguida, atribui-se esse canal a *link* em *AssignedList*.

3.3. Estado 3: Mecanismo de Interação

O Mecanismo de Interação é responsável por mesclar, baseado no grau de conhecimento que cada nó tem da rede como um todo, as atribuições propostas por diferentes nós. Enquanto o critério de parada não for atingido, os nós trocam mensagens de interação em intervalos regulares, e o algoritmo alterna entre os estados 3 e 4.

Escolheu-se expressar o grau de conhecimento do nó através de um vetor de prioridade em 3 níveis, calculado com base nos seguintes parâmetros:

- maior número de enlaces (diretos e indiretos) conhecidos pelo nó;
- maior número de enlaces diretos conhecidos pelo nó;
- menor identificador do nó (inserido para assegurar execução determinística).

A Figura 3 mostra um exemplo de vetores de prioridade dos nós em um grafo de comunicação. Para esta rede, a ordem decrescente de grau de conhecimento (prioridade) dos nós é: C, B, D, F, A, E, G. Portanto, o nó C decidirá a atribuição dos enlaces BC, CD e DF; o nó B decidirá a atribuição de AB; o nó D, a atribuição de DE; o nó F, a atribuição de FG; os demais nós apenas aceitam as atribuições realizadas pelos outros nós.

No instante em que a mensagem de interação é enviada, a informação que ela contém deixa de ser apenas uma prévia e passa a ser a atribuição utilizada para comunicação de dados. Tal atribuição só será modificada em duas situações: no instante de envio de uma nova mensagem de interação; ou no recebimento de uma mensagem de interação vinda de um nó com maior grau de conhecimento (prioridade). Nesse segundo caso, o nó não tem mais a permissão para modificar a atribuição dos enlaces que estavam contidos na mensagem prioritária, devendo recalculá-la apenas para os outros enlaces.

3.4. Estado 4: Escalonador

O Escalonador é responsável por responder aos estímulos internos e externos ao nó (estouro de temporizadores e recebimento de mensagens, respectivamente), bem como pelo bloqueio do processo na ausência prolongada desses estímulos. Ao identificar o estímulo recebido, o estado 4 faz o fluxo de execução desviar para algum dos estados anteriores e, por esta razão, recebe o nome de Escalonador.

Quando ocorre um estouro de *timerH*, é o momento de enviar uma nova mensagem de *hello*, e o fluxo de execução desvia para o estado 1. Esse fluxo também desvia para o estado 1 quando receber uma mensagem de *hello*, e neste caso ainda deve ser desativado *timerI*, para interromper as interações, pois houve mudança na topologia. Se ocorre um estouro de *timerI*, deve ser enviada uma nova mensagem de interação, e o algoritmo desvia para o estado 3 após recarregar *timerI*. Por fim, quando uma mensagem de interação é recebida, o escalonador compara as prioridades da mensagem e do nó. Se a mensagem tiver maior prioridade, o estado 2 é chamado para recalcular a atribuição local. Caso contrário, a mensagem é ignorada e o estado 4 é mantido.

3.5. Análise da complexidade

A complexidade do ZAP está primordialmente relacionada à Atribuição Local (estado 2). Os outros estados não exigem uma grande capacidade de processamento, motivo pelo qual são desconsiderados na análise de complexidade. Conforme é possível observar no Algoritmo 1, há dois laços de repetição aninhados com $|L|$ iterações. Portanto, a complexidade algorítmica local do ZAP é $O(|L|^2)$, em que $|L|$ corresponde ao número de enlaces conhecidos pelo nó. Esse número cresce com o aumento da densidade de conexão da rede, mas é *independente* do número total de nós. Desta forma, não há problemas de escalabilidade sob o ponto de vista da complexidade.

Em termos de mensagens trocadas, apenas os estados 1 e 3 têm influência. O Gerente de Topologia requer a troca de, em média, 3 mensagens até que se obtenha completo conhecimento da vizinhança. O Mecanismo de Interação, por sua vez, realiza a troca de um número finito de mensagens, correspondente ao critério de parada estipulado.

4. Resultados

A fim de se avaliar o desempenho do ZAP, foram implementados dois outros métodos de atribuição de canais: o Centralized Tabu-Based Algorithm (CTBA) [Subramanian et al. 2008] e uma atribuição aleatória (RANDOM). O CTBA foi escolhido por ser um algoritmo centralizado com mínima interferência e representa o limite superior de desempenho. Foi utilizada apenas a Primeira Fase do CTBA. A Segunda Fase foi desconsiderada, pois o presente trabalho não necessita da restrição⁴ imposta pelos autores do CTBA, que justificava a execução do procedimento de mescla. O RANDOM foi implementado de maneira a atribuir um canal para cada enlace através de um sorteio equiprovável entre os canais disponíveis. Como praticamente não há custo nessa forma de atribuição, seu resultado foi adotado como limite inferior de desempenho. Obviamente, o desempenho do ZAP deve estar numa região intermediária entre o RANDOM e o CTBA

⁴No trabalho presente em [Subramanian et al. 2008], os autores consideram que as interfaces de rádio não comutam de canal em tempo de pacote. Assim, o número de canais utilizados por um nó *não pode* ser maior que o número de interfaces de rádio presentes nesse nó.

em termos de qualidade da atribuição de canais (aqui avaliada pelo grau de interferência removida). O comportamento dos usuários primários foi modelado como tendo o tempo médio de não-utilização maior que 10 vezes o tempo para o protocolo atingir o critério de parada. O único efeito decorrente de uma possível variação na disponibilidade de canais antes do ponto final do algoritmo é o reinício da execução do mesmo. O impacto dessa variação seria praticamente desprezível, considerando que esse fato é uma exceção. Portanto, as listas de canais e de vizinhos não sofrem nenhuma modificação durante o tempo de simulação.

Aplicadas essas condições, o ZAP foi avaliado em quatro cenários distintos: a) variação no critério de parada; b) variação no número de canais disponíveis; c) variação na densidade média da rede; d) variação no número de nós da rede. Em cada cenário foram geradas aleatoriamente 1000 topologias, sendo esse número projetado de maneira que o intervalo de confiança de 95% para a média fosse sempre inferior a 1%. Para cada topologia, foi criado um grafo de conexão preenchido de forma binária através de sorteios aleatórios cuja probabilidade de ocorrência de enlace respeite os parâmetros de número de nós e densidade média da rede.

Na Figura 4(a), foram utilizadas topologias com 100 nós, com disponibilidade de 5 canais. Cada curva representa uma densidade média de rede. O único parâmetro variável foi o número de interações, que reflete o critério de parada. Pode-se observar que a partir da 6ª interação o ganho é muito pequeno, independentemente da densidade. Portanto, a realização de mais de 6 interações aumenta o custo sem trazer ganhos na mesma proporção. Sendo assim, um bom critério de parada sugerido a partir da simulação é de 6 interações.

A Figura 4(b) teve suas topologias geradas com 100 nós, de densidade média de conexão igual a 5, como a anterior, mas foi fixado o critério de parada em 6 interações, conforme apresentado anteriormente, e o número de canais disponíveis variou entre 2 e 10. Observa-se nesse gráfico que o número de canais tem relação direta com a eficiência dos três métodos. Nota-se que quando há disponibilidade de 3 a 8 canais, o resultado alcançado com o ZAP distancia-se dos resultados do RANDOM e aproxima-se dos resultados do CTBA. Assim, considera-se essa região indicada para o funcionamento do ZAP. Dessa forma, não se exige muito tempo da função de sensoriamento, pois a busca é restrita aos primeiros 8 canais livres, e também não é requerido muito recurso disponível.

A Figura 4(c) simula redes com 100 nós, mas varia a densidade média de conexão da rede entre 3 e 7. Para facilitar o entendimento do cenário, pode-se imaginar que inicialmente os 100 nós estavam distribuídos em uma área X. À medida que reduzimos essa área, os nós vão ficando cada vez mais próximos e assim cada nó passa a ter mais vizinhos. Assim como no cenário anterior, foram consideradas 6 interações. O número de canais disponíveis foi fixado em 5. Curiosamente, conforme mostrado na figura, o desempenho do RANDOM não depende da densidade, mantendo-se constante. Enquanto isso, o ZAP e o CTBA têm desempenho decrescente com o aumento da densidade. Dessa forma, o uso do ZAP justifica-se para redes de baixa densidade (inferior a 7).

A Figura 4(d) representa o efeito da expansão da rede, com número de nós variando entre 10 e 100. Para visualizar esse efeito de forma isolada, a densidade média de conexão da rede foi mantida constante e igual a 5. Pensando em termos de área, como

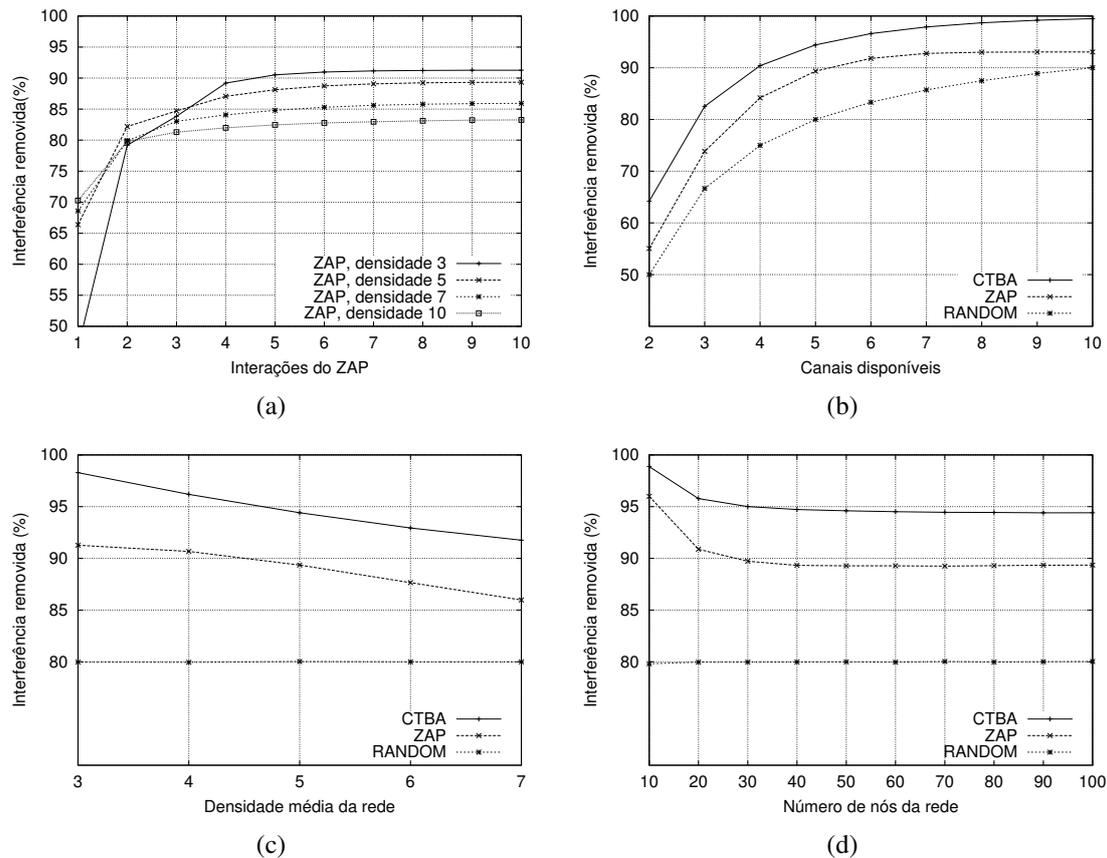


Figura 4. (a) Interferência removida x interações do algoritmo ZAP (b) Interferência removida x número de canais. (c) Interferência removida x densidade média da rede. (d) Interferência removida x número de nós.

no caso anterior, podemos imaginar que inicialmente havia 10 nós numa área X. Se o número de nós dobrar (20), a área também deverá dobrar (2X), a fim de que a densidade se mantenha constante. Os outros dois parâmetros (critério de parada e disponibilidade de canais) foram mantidos os mesmos do cenário anterior. Como anteriormente, o desempenho do RANDOM não foi afetado pelo aumento no número de nós. Os outros dois métodos apresentaram desempenho decrescente entre 10 e 40 nós. Porém, acima deste número, não sofrem mais alterações significativas em termos de interferência reduzida. O CTBA, por ser centralizado, tem seu custo crescendo exponencialmente com o aumento do número de nós devido à inundação da rede com mensagens. Ao contrário, o ZAP não enfrenta problemas de escalabilidade por atuar de maneira descentralizada, trocando mensagens apenas entre vizinhos sem inundar a rede. O ZAP foi proposto para utilizar somente informações de vizinhos até 2 saltos.

5. Trabalhos relacionados

Em [Li e Zekavat 2009], os autores apresentam diferentes métodos para atribuição de canais em redes utilizando rádios cognitivos e técnicas de *clusters*. Após os canais disponíveis terem sido detectados e divididos entre os nós CRs do *cluster*, cada nó CR, de acordo com a informação do canal, pode usar os métodos propostos para distribuidamente selecionar um canal para comunicação, enquanto maximiza a eficiência espectral média

ou o total de taxa de dados dos nós CRs. Os métodos propostos reduzem neste artigo a necessidade de um controlador central e reduz o overhead das redes CRs. Entre os cinco métodos propostos neste artigo, o que mais se assemelha ao ZAP é o quarto método, que propõe uma escolha de canais baseado no nível de interferência. Porém a principal diferença deste trabalho é a escolha aleatória de cada nó e o nível de interferência atribuído em ordem ascendente. No algoritmo ZAP a escolha de canais é baseada em modelo de interferência modificado a dois saltos, conforme apresentado na Seção 2.3, e utilizando somente conhecimento local (vizinhança).

Em [Huang et al. 2009], os autores analisaram limites de desempenho da vazão em redes utilizando rádios cognitivos. Assim, eles desenvolveram uma estratégia de acesso ótimo ao espectro utilizando detecção fina dos usuários primários. Sem essa detecção fina, os autores quantificaram o impacto dessa falta de detecção e falsos alarmes, e assim propuseram uma estratégia modificada de acesso ao espectro baseada em limites a qual alcança desempenhos próximos ao ótimo. O objetivo desse trabalho é principalmente manter a proteção do usuário primário sem degradação significativa de desempenho da vazão dos nós CRs. Entretanto, neste artigo não foi considerado o impacto da interferência no desempenho da vazão dos nós primários nem CRs.

[Shiang e van der Schaar 2009] investigaram o problema do gerenciamento de recursos multiusuários em redes utilizando rádios cognitivos para aplicações sensíveis ao atraso. Eles propõem um algoritmo distribuído baseado em informação local através da adoção de um conceito de aprendizado multiagente (i.e.: *adaptive fictitious play*) o qual utiliza informação de interferência disponível. Porém nesse artigo existe uma troca de informações exigida e um custo para o aprendizado. Além disso, o desempenho do trabalho proposto neste artigo é dependente da baixa variabilidade das aplicações e das condições de rede.

O protocolo ZAP proposto nesse artigo analisa os modelos de interferência para redes sem fio com múltiplos saltos e introduz uma proposta distribuída de atribuição de canais em uma rede com rádios cognitivos mitigando as interferências entre transmissões simultâneas com baixo *overhead* de comunicação. A proposta se aproxima do desempenho de algoritmos centralizados em termos de atribuição ótima de canais, porém com um desempenho bem melhor em termos de sobrecarga de comunicação. Os resultados demonstraram a garantia de um compromisso eficiente entre as características desejáveis a uma solução eficaz neste contexto.

6. Conclusão

Neste artigo foi proposto o ZAP, um algoritmo de atribuição distribuída de canais para redes com rádio cognitivo. A principal contribuição dessa proposta reflete-se na capacidade do ZAP realizar uma atribuição eficiente de canais de maneira totalmente distribuída utilizando apenas conhecimento local (vizinhança) de cada nó envolvido. Dessa forma, o ZAP oferece um compromisso eficiente entre uma atribuição ótima de canais obtida por soluções centralizadas encontradas na literatura e um número reduzido de mensagens para realizar esta atribuição em comparação com outras propostas anteriores. Os resultados atestam que as 6 primeiras interações do ZAP atingem 99% do desempenho alcançado caso fossem realizadas infinitas interações do mesmo, *independentemente do tamanho da rede*, comprovando a rapidez e escalabilidade atingidas pela proposta. Assim, o algoritmo

ZAP garante uma otimização distribuída da capacidade da rede minimizando o número de interferências.

Esta proposta abre também perspectivas de trabalhos futuros. Como exemplos de possíveis trabalhos futuros, elencam-se as seguintes possibilidades: (i) proposição de novos conjuntos de critérios para Atribuição Local, bem como de parâmetros do vetor de prioridade; e (ii) incorporação de métricas de roteamento e de QoS – pesos – aos enlaces, priorizando a eliminação da interferência sobre os enlaces de maior peso.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação Araucária, CNPq e FAPERJ.

Referências

- Akyildiz, I. F., Lee, W.-Y., e Chowdhury, K. R. (2009). Crahns: Cognitive radio ad hoc networks. *Ad Hoc Network*, 7(5):810–836.
- Arslan, H. (2007). *Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems (Signals and Communication Technology)*. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA.
- Cheng, W., Cheng, X., Znati, T., Lu, X., e Lu, Z. (2009). The complexity of channel scheduling in multi-radio multi-channel wireless networks. In *INFOCOM 2009, IEEE*, pág. 1512–1520.
- Commission, F. C. (2002). Spectrum policy task force. Technical report, ET Docket No. 02-135.
- Gupta, P. e Kumar, P. R. (2000). The capacity of wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 46(2):388–404.
- Huang, S., Liu, X., e Ding, Z. (2009). Optimal transmission strategies for dynamic spectrum access in cognitive radio networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 8(12):1636–1648.
- Li, X. e Zekavat, S. A. R. (2009). Distributed channel assignment in cognitive radio networks. In *Proc. of the 2009 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing: Connecting the World Wirelessly*, Leipzig, Germany.
- Mitola-III, J. e Maguire-Junior, G. Q. (1999). Cognitive radio: Making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, 6(4):13–18.
- P802.11, I. (2007). *IEEE 802.11 Standard - 2007*.
- Padhye, J., Agarwal, S., Padmanabhan, V. N., Qiu, L., Rao, A., e Zill, B. (2005). Estimation of link interference in static multi-hop wireless networks. In *Proc. of the 5th ACM SIGCOMM conference on Internet Measurement (IMC)*, pág. 28–28, Berkeley, CA, USA.
- Shiang, H.-P. e van der Schaar, M. (2009). Distributed resource management in multi-hop cognitive radio networks for delay-sensitive transmission. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(2):941–953.
- Subramanian, A. P., Gupta, H., Das, S. R., e Cao, J. (2008). Minimum interference channel assignment in multiradio wireless mesh networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 7(12):1459–1473.