

Um Algoritmo de Seleção de Canais Verde para Redes de Rádios Cognitivos

Eduardo Vasconcelos, Kelvin Dias, Paulo Cunha

Centro de Informática (CIn) – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Caixa Postal: 7800 - 50711-970 – Recife – PE – Brasil

{emv2,kld,prfc}@cin.ufpe.br

Abstract. *This paper proposes an green and energy-aware channel selection algorithm for contention based cognitive radio that takes into account the SU's applications requirements and the spectrum capacity derived by an extended on-off model which represents a jointly behavior of the PU, SUs and the medium access. Simulations performed using Petri nets demonstrate that the proposal is better than actual Wi-Fi networks in terms of energy efficiency. The results shown that it was possible to reach an economy of around 281kW per month, what represents in an year of operation one reduction of 619,91 Kg of CO₂ emitted on atmosphere.*

Resumo. *Este artigo propõe um algoritmo para a seleção de canais energeticamente eficiente para redes de rádios cognitivos baseadas em contenção (IEEE 802.11af). Para isto, o algoritmo considera os requisitos das aplicações dos Usuários Secundários (US) e a capacidade do canal que é obtida através de um modelo ON/OFF estendido. Por meio de simulações utilizando-se redes de Petri mostrou-se que a proposta é superior em termos de eficiência energética às redes Wi-Fi atuais. Baseado no cenário utilizado, é possível obter uma economia de cerca de 281 kW por mês o que representa em um ano de operação uma redução de 619,91Kg de CO₂ emitido na atmosfera.*

1. Introdução

Nos últimos anos, o consumo de energia no setor de telecomunicações foi responsável por cerca de 2% da emissão de CO₂ na atmosfera [Hasan 2011], o que tem contribuído com o aumento da poluição nas grandes cidades. Este aumento na emissão de gases poluentes é devido ao elevado consumo de energia que as infraestruturas de comunicação têm demandado para dar suporte a crescente necessidade das pessoas por comunicação móvel e de qualidade. Para resolver este problema, a indústria e a academia têm reunido esforços com o objetivo de criar novos mecanismos e protocolos na tentativa de tornar as tecnologias de acesso à internet mais “verde” [Amanna 2009, Amanna 2010, Lian 2011, Vo 2010].

A tecnologia de Rádios Cognitivos (RC) [Mitola 2000] foi desenvolvida originalmente para permitir o uso do espectro eletromagnético de forma oportunista e eficiente, e pode também ser considerada uma abordagem promissora para propiciar comunicação verde [Dejonghe 2007]. A base desta tecnologia é permitir aos usuários não licenciados (Usuários Secundários - US) usarem faixas de frequência licenciadas quando os dispositivos que possuem a licença de uso (Usuários Primários - UP), tais como usuários de TV digital (DTV) e microfones sem fio (rádios utilizados por

seguranças em shoppings, microfones), não as estiverem utilizando. A característica principal que permite a esta tecnologia oferecer comunicação verde é a habilidade de reconfigurar seus parâmetros por meio de software. Desta forma, se um US realizar o sensoriamento do espectro, observar mudanças no ambiente, ele pode planejar ações futuras e reconfigurar seus parâmetros de forma a otimizar seu desempenho (ciclo cognitivo [Akyildiz 2008]).

Poucos trabalhos na literatura têm desenvolvido alternativas verdes com base em Rádios Cognitivos (*Green Cognitive Radio*) [Grace 2009]. A maioria dos trabalhos têm voltado seus esforços para descrever novas formas de codificação de ondas e novas técnicas de processamento de sinais [Mahapatra 2009, hayah 2011]. As poucas pesquisas existentes buscam soluções em camada física sem considerar estudos sobre a distribuição dos recursos com o objetivo de reduzir o consumo de energia. Neste contexto, existem alguns estudos que usam protocolos e algoritmos de seleção de canais [Hou 2010, Song 2007, Li 2008], porém estes estudos consideram apenas pares de usuários e soluções simplistas que consistem apenas em escolher um canal para transmissão momentânea, uma vez que a transmissão é finalizada os participantes devem escolher outro canal. Ou seja, estes protocolos não consideram a complexidade das redes infraestruturadas, e a minimização do consumo de energia.

Em relação às tecnologias de acesso, alguns mecanismos vêm sendo desenvolvidos para reduzir o consumo de energia tanto nos dispositivos dos usuários como na infraestrutura da rede. Neste âmbito, as redes Wi-Fi (IEEE 802.11) possuem um importante papel no desenvolvimento de aplicações ubíquas devido ao seu baixo custo de instalação e manutenção, e principalmente pela grande popularidade que esta tecnologia vem alcançando nos últimos anos, o que motiva cada vez mais a construção de novos mecanismos que permitam a redução do consumo de energia.

O objetivo deste artigo é desenvolver e avaliar um novo algoritmo de seleção de canais que permita aos USs e à infraestrutura da rede reduzir o consumo de energia. Basicamente, o principal objetivo dos trabalhos relacionados que desenvolvem técnicas de seleção de canal é maximizar a vazão e, em muitos casos, usam apenas informações sobre os UPs e os requisitos de suas aplicações para ajudar na decisão [Hou 2010, Song 2007], sem considerar que esta seleção pode exercer forte influência no consumo de energia em redes sem fio. Assim, neste trabalho é proposto um método de seleção canais não cooperativo e descentralizado em redes IEEE 802.11af, que objetiva a redução do consumo de energia garantindo a vazão mínima requisitada pelos USs.

Este artigo está organizado da seguinte forma: A Seção 2 apresenta o estado da arte. A Seção 3 apresenta a proposta deste trabalho; simulações e validações são apresentadas na Seção 4; na Seção 5 são apresentados os resultados obtidos e, por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões e os trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

Na literatura, existe uma gama de trabalhos que investigam e propõem melhorias em relação ao consumo de energia nas redes de comunicação sem fio. Os trabalhos geralmente ou propõem melhorias na infraestrutura ou no dispositivo do usuário, nunca consideram soluções em ambas as partes.

Hasan [Hasan 2011] em seu trabalho mostrou um panorama do consumo de energia das redes infraestruturadas. Segundo seus estudos, cerca de 58% do consumo de

energia nas redes celulares é devido à utilização das Estações Radio Base (ERB), e destes 58%, 65% do consumo está relacionado aos amplificadores de potência. Ainda neste estudo, pode-se observar que 20% do consumo estão relacionados aos computadores móveis, e 15% à transmissão.

Em vista deste panorama, muitos autores têm direcionado seus trabalhos ao desenvolvimento de técnicas que permitam melhorar a eficiência energética em relação às ERBs. Neste intuito, o principal objetivo é desligar algumas ERBs em momentos de baixa densidade de usuários na rede [El-Beaino 2012]. Porém, o desligamento de ERBs faz com que regiões fiquem sem cobertura, o que acarretará negação de serviço para usuários que chegam à rede. Para resolver este problema, algumas técnicas sugerem o aumento da potência de transmissão das ERB vizinhas com o intuito de cobrir a área anteriormente coberta pela ERB desligada. O problema desta abordagem é o aumento do consumo de energia das outras ERBs, o que, dependendo da quantidade de usuários que chegam àquela rede pode levar a rede a uma baixa eficiência energética. Outra solução é a utilização de micro e pico células para cobrir as áreas cobertas pela ERB desligada, entretanto, estas micro células são limitadas em termos de alcance de transmissão, quantidade de usuários suportados, o que pode acarretar na diminuição da qualidade oferecida.

Para resolver todos os problemas apresentados, os pesquisadores têm voltado seus esforços na tentativa de criar algoritmos e mecanismos para estimar os ganhos e as possibilidades de uso neste cenário, com o objetivo de configurar a rede sempre buscando maximizar a eficiência energética garantindo a qualidade para os usuários.

Uma importante técnica utilizada para economizar energia no dispositivo do usuário no LTE (*Long Term Evolution*) é conhecida como transmissão/recepção descontinuada (DTX/DRX) [Fodor 2012]. Nesta abordagem, o dispositivo móvel só transmite ou recebe, quando há uma grande quantidade de dados a serem enviados. Desta forma, o dispositivo pode permanecer uma maior quantidade de tempo no estado *sleep*.

Já na tecnologia WCDMA (*Wide-band Code-Division Multiple Access*), a utilização dos recursos de rádio é controlada pelo protocolo RRC (*Radio Resource Control*) [Barbuzzi 2012]. Este protocolo define estados de utilização dos canais, em que cada estado possui um consumo diferente de energia, estes estados são: CELL_DCH, CELL_FACH, CELL_PCH e *Idle Mode*, onde $E(CELL_DCH) > E(CELL_FACH) > E(CELL_PCH) > E(Idle\ Mode)$ sendo $E(.)$ a representação do consumo de energia de cada estado. A transição entre os estados depende do tempo em que o dispositivo permanece inativo. O problema existente nesta abordagem é encontrar os períodos para as transições entre os estados de forma a não comprometer a qualidade oferecida às aplicações, neste sentido, a utilização de abordagens *cross-layer* é indispensável para a obtenção de uma melhor eficiência energética, pois através desta abordagem é possível definir os tempos entre as transições dos estados de acordo com as características da aplicação.

IEEE 802.11af [IEEE 2011] é uma especialização da tecnologia Wi-Fi com as funcionalidades das redes de rádios cognitivos. Embora esta tecnologia ainda esteja em fase de definição, muito já foi feito em relação a consumo de energia para as redes IEEE 802.11 a/b/g/n o que implica que estas soluções também serão incorporadas no padrão IEEE 802.11af. Uma das contribuições mais significativas apresentadas na literatura

consiste em desligar alguns APs (*Access Points*) em determinados momentos do dia [Jardosh 2009, Lorincz 2010], para redes disponibilizadas em ambiente empresarial. Estas redes são infraestruturadas, e geralmente são compostas por vários APs, alguns *switches* e um *WLAN Controller*, sendo o último responsável por publicar redes virtuais (VWLAN – *Virtual Wireless Local Area Network*) entre os APs. O ganho de energia pode chegar a 25W por AP desligado.

Outra importante contribuição no âmbito das redes Wi-Fi com relação ao consumo de energia é a técnica conhecida como PSM (*Power Save Mode*) [Sangkyu 2008]. Esta técnica consiste em colocar a interface do usuário para dormir enquanto o AP armazena os dados destinados ao cliente. De tempos em tempos o AP avisa ao cliente que tem dados endereçados a ele, e este por sua vez acorda sua interface, e compete pelo canal com os outros dispositivos para receber estes dados.

Em redes de rádios cognitivos infraestruturadas, existem poucos trabalhos voltados ao desenvolvimento de algoritmos e mecanismos em camada de enlace visando à eficiência energética. Um dos poucos trabalhos existentes neste contexto é o de Bayhan [Bayhan 2012]. Em seu trabalho, Bayhan desenvolveu um algoritmo energeticamente eficiente de escalonamento que utiliza técnicas de acesso ao meio (*Medium Access Control* - MAC) baseadas em coordenação, tais como o Superframe. O modelo de consumo de energia utilizado considera os tempos de transmissão, de ociosidade, e de troca de canal. A autora apresenta algumas métricas que devem ser maximizadas pelo mecanismo e apresenta um algoritmo de tempo polinomial para um problema NP-completo. A base do mecanismo é alocar frames aos usuários de forma a melhor distribuir os recursos baseado nas restrições do consumo de energia e de vazão. Desta forma, o algoritmo tenta balancear os tempos de transmissão, de ociosidade e de mudança de canal, uma vez que cada um dos três estados possui um consumo de energia diferenciado, baseado na restrição imposta (Ex: vazão mínima sobre a restrição do menor consumo de energia possível). Embora a autora tenha desenvolvido um mecanismo de seleção de canais, esta seleção não considera a eficiência energética na escolha dos canais a serem utilizados, sendo esta seleção apenas um fator secundário, uma vez que esta escolha não é baseada no ganho de propagação que um determinado canal tem em relação a outro. Em seus resultados, a autora não apresenta uma comparação efetiva com outros mecanismos devido a não existência de trabalhos relacionados, desta forma a comparação é feita entre as diferentes métricas utilizadas no próprio algoritmo desenvolvido no trabalho.

Como é possível observar, a maioria dos trabalhos visa desenvolver técnicas relacionadas ao desligamento de equipamentos para economizar energia no núcleo da rede, ou colocar as interfaces para dormir para aumentar o tempo de duração das baterias dos usuários. Poucos trabalhos consideram uma forma de selecionar canais de maneira eficiente em termos de energia e quando o fazem, tratam/selecionam canais objetivando apenas a maximização da vazão.

Os trabalhos que apresentam soluções para melhor distribuir os recursos de rádio são muito complexos para serem utilizados em dispositivos que possuem baixo poder computacional, como APs e Smartphones. Desta forma, é possível observar a necessidade de criação de mecanismos simples que permitam distribuir os recursos de rádio de forma eficiente e que possam ser utilizados em dispositivos menores. Para que este mecanismo seja simples, é essencial que ele funcione sem cooperação entre os

dispositivos (não cooperativos), e que possa ser executado pelos dispositivos dos usuários (decentralizado).

3. Método Proposto

Neste trabalho, é considerado um equipamento de rede Wi-Fi que gerencia uma infraestrutura conhecida como *WLAN Controller*. Este *Controller* é responsável por gerenciar uma grande quantidade de APs. A proposta apresentada por este artigo é mais adequada para ambientes com uma alta densidade de USs, tais como praças de alimentação em shoppings ou salas de apresentações em eventos científicos. A principal característica destes cenários é a necessidade da existência de mais de um AP, uma vez que em RC, um AP é capaz de oferecer apenas 12Mbps [Lekomtcev 2012], o que seria insuficiente para uma quantidade de 70 USs, por exemplo.

Desta forma, antes do US escolher o canal que irá utilizar, deverá estimar a capacidade do canal. Neste processo, cada US escolhe aquele canal que garanta a vazão mínima requisitada com uma restrição de consumo de energia. Para isto, antes do US escolher um canal para comunicar, ele deve estimar a capacidade do mesmo. Para realizar esta estimativa, é utilizada uma extensão do modelo ON/OFF desenvolvida em [Vasconcelos 2012], uma vez que o modelo ON/OFF não contempla todos os parâmetros que governam a disponibilidade do canal para o US, tais como: mecanismos de acesso ao meio, quantidade de USs usando o canal e tempo gasto pelo US utilizando este canal. Estes parâmetros podem influenciar a vazão esperada.

3.1 Modelo ON/OFF Estendido

O modelo ON/OFF, é uma cadeia de Markov de dois estados que representa a atividade do UP no canal. O primeiro estado representa o UP transmitindo, e o segundo representa o canal livre. Com este modelo, a disponibilidade representa a porção do tempo em que o canal esta livre da presença do UP, estando assim, disponível para os USs

A Figura 1 ilustra a cadeia de Markov de tempo contínuo [Marsan 1995] desenvolvida a partir do modelo ON/OFF, mais detalhes deste desenvolvimento pode ser visto em [Vasconcelos 2012].

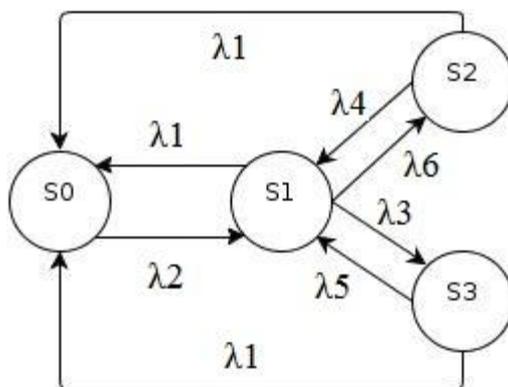


Figura 1. Extended ON/OFF Markov Chain

Os estados da cadeia de Markov representam momentos em que o US esta usando o canal: o estado S0 representa o canal ocupado pelo UP; O estado S1 representa o canal

livre e sendo disputado entre os USs; o estado S2 representa o canal em uso pelo US que está sendo modelado; e o estado S3 representa o canal sendo utilizado por outro US.

Os valores de λ_i , onde $0 \leq i \leq 6$, representam as taxas das transições entre os estados, conforme descrito a seguir:

- $\lambda_1 = \frac{1}{T_{off}}$, onde T_{off} representa o tempo médio em que o canal está livre da presença do UP.
- $\lambda_2 = \frac{1}{T_{on}}$, onde T_{on} representa o tempo médio em que o canal está sendo ocupado pelo UP.
- $\lambda_3 = \frac{1}{T_{InterTrans} * (\frac{\zeta}{\theta + \zeta})}$, onde $T_{InterTrans}$ representa o tempo médio, referente ao intervalo entre a utilização do canal. (*backoff* para mecanismos de acesso ao meio baseado em contenção, ou o preâmbulo usado no superframe). ζ representa o US que está sendo modelado, e θ representa a quantidade de USs competindo por este canal. Neste trabalho, baseado em simulações realizadas, será utilizado o valor $65\mu s$ para $T_{InterTrans}$;
- $\lambda_4 = \frac{1}{T_{SUusage}}$, onde $T_{SUusage}$ representa o tempo médio em que o US que está sendo modelado permanece usando o canal. O valor considerado para $T_{SUusage}$ será $1ms$;
- $\lambda_5 = \frac{1}{T_{OSUusage}}$, onde $T_{OSUusage}$ representa o tempo médio em que outro US permanece usando o canal. O valor utilizado para $T_{OSUusage}$ será $1ms$;
- $\lambda_6 = \frac{1}{T_{InterTrans} * (\frac{\theta}{\theta + \zeta})}$, este parâmetro se diferencia de λ_3 pelo componente $(\frac{\theta}{\theta + \zeta})$, que em λ_3 o valor é dividido por ζ . Este valor representa a probabilidade de outro US ganhar a disputa pela utilização do canal

Originalmente, o modelo da Figura 1 foi desenvolvido para funcionar com o mecanismo de acesso ao meio baseado em contenção. Porém em [Vasconcelos 2012], foi realizado um estudo de sensibilidade que mostra que o tempo referente à janela de contenção exerce pouquíssima influência na disponibilidade do canal. Baseado nesta análise pode-se afirmar que este modelo pode ser utilizado também com outros mecanismos de acesso ao meio. Sendo assim, o valor de $T_{InterTrans}$ pode ser configurado para o tempo que o US espera antes de transmitir em um canal, e no caso de um mecanismo onde não há este tipo de espera, pode-se fazer $T_{InterTrans}$ aproximar-se de 0 sem que isso afete o valor da disponibilidade estimada.

Baseado na Figura 1 é possível extrair a equação da disponibilidade estacionária do estado S2 da seguinte forma:

$$\Pi_2 = \lambda_6 \left(\frac{\left[\frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 + \lambda_1} \right]}{\left[\{\lambda_1 + \lambda_6 + \lambda_3\} - \left\{ \frac{\lambda_4 \lambda_6}{\lambda_1 + \lambda_4} \right\} - \left\{ \frac{\lambda_5 \lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_5} \right\} \right]} \right) \quad (1)$$

Onde Π_2 representa a disponibilidade do modelo no estado S2. O valor de Π_2 indica a proporção de tempo durante o qual o modelo estará no estado S2, ou seja, este valor representa o tempo em que o US permanecerá transmitindo. Sendo assim, se é possível estimar o tempo de utilização do canal, é possível estimar sua vazão, bastando apenas resolver a seguinte equação:

$$Th_{Expected} = \Pi_2 * Th_{Channel} \quad (2)$$

Onde $Th_{Expected}$ representa a vazão esperada e $Th_{Channel}$ é a capacidade do canal que pode ser obtida através de $Th_{Channel} = B * \log_2(1 + SRN)$.

3.2 Algoritmo de Seleção de Canais

Antes de descrever o algoritmo de seleção de canais, algumas considerações necessitam ser feitas:

- Primeiramente, supõe-se que há um canal de controle através do qual o *WLAN Controller* dissemina para os USs as informações sobre os canais ativos;
- Existem N APs na rede e cada AP está vinculado estritamente a uma faixa de frequência de 6MHz, que corresponde a um canal de TV [Cordeiro 2006].
- Cada US é ciente de seus próprios requisitos de QoS.
- Baseado nos dados do canal, sempre que um US identifica que não há canais ativos que ofereçam a qualidade requerida, este manda uma mensagem para o *WLAN Controller* pedindo que um novo canal seja ativado [IEEE 2011]. Sendo assim, o *WLAN Controller* ativará um AP que servirá este US.
- Para simplificar as simulações, neste trabalho consideramos que há 24 APs, pois deseja-se verificar a economia de energia usando um mecanismo não cooperativo de seleção de canais. Neste caso, se houvesse uma limitação da quantidade de APs, o *WLAN Controller* poderia negar a conexão para o US ou pedir para os USs reduzirem os requisitos de suas aplicações para que se adaptem a esta nova realidade.
- As atividades dos UPs são previamente conhecidas em cada canal ativo. Supõe-se que os participantes da rede usam técnicas de sensoriamento de espectro [Yucek 2009] para obter estas informações.
- Neste trabalho é considerado que o US sempre tem dados a transmitir ou receber.

A tabela 1 representa o pseudocódigo contendo o algoritmo de seleção proposto.

Tabela 1. Algoritmo de Seleção de Canais

```

Begin:
ChannelList = GetListOfActiveChannelsSortedByEnergy()
Foreach (Ch from ChannelList) do
  Val  $\pi_2$  = Calculate $\pi_2$ Value(Ch)
  IF( $\pi_2 * Ch.MaxThroughput > SU.RequiredTh +$ 
    (SU.ThTolerance * SU.RequiredTh)) then
    IF(Ch == SU.Channel) then
      NoChannelChange()
      EndOfAlgorithm()
    EndIf
  SU.ChangeChannelTo(Ch)

```

```
EndOfAlgorithm()
EndIf
EndForeach
AskingToBSActivateANewChannel();
ConnectingToNewChannel()
EndAlgorithm
```

Primeiramente o US lista os canais, ordenando-os por consumo de energia. Logo após, o usuário, percorrerá a lista verificando se a vazão estimada para aquele canal é maior que a vazão requisitada somada a uma taxa de tolerância. Esta taxa de tolerância é necessária, pois o US pode selecionar um canal que ofereça exatamente a vazão mínima e, neste caso, uma pequena variação na capacidade do canal poderia afetar a qualidade percebida pelo US.

Como os canais são ordenados pelo consumo de energia, o primeiro canal que oferecer a vazão requerida será aquele em que o US gastará menos energia. Como este processo é periódico, se o canal observado for aquele que o US está usando, a execução do algoritmo será finalizada, pois a melhor solução já está sendo adotada. Caso o canal seja diferente, significa que o US encontrou uma solução melhor para se comunicar. O algoritmo apresentado possui complexidade $O(n)=n$, onde n será igual a quantidade de canais ativos.

Somente após o US percorrer toda a lista de canais sem encontrar um canal apropriado, ele requisitará ao *WLAN Controller* a ativação de um novo AP. Após a ativação do AP, as informações sobre este serão disseminadas no canal de controle comum.

4. Simulações

Para realizar as simulações foi desenvolvido um simulador baseado no formalismo das redes de Petri coloridas utilizando o CPN Tools [CPN Tools].

4.1 Cenário de Simulação

Nas simulações foi considerado um cenário contendo 24 APs conectados a um *WLAN Controller*. Cada AP opera em uma faixa de frequência de 6MHz. Com base na teoria da atenuação do meio livre e na equação do fóton, é considerado também que para transmitir em um canal com baixa frequência, o US e o AP gastam menos energia que em uma frequência mais alta.

Para comparação, foi considerado um ambiente onde foram oferecidos 24 APs aos usuários, e estes terão que escolher uma delas pra se comunicar, modo que normalmente é empregado em ambientes com alta densidade de usuários. Nas simulações, cada associação aos APs foi realizada de forma aleatória.

Neste trabalho não será utilizado o mecanismo desenvolvido por [Bayhan 2012], pois este considera múltiplos canais utilizando a técnica de salto de frequência como ocorre no padrão IEEE 802.22 [Stevenson 2009], e o modelo de conservação de energia não utiliza as características físicas dos canais como meio de economia.

4.2 Processo de Simulação

O processo de simulação aconteceu da seguinte forma:

- As simulações foram realizadas em rodadas, cada uma correspondendo à uma hora de simulação;
- No fim de cada rodada, a média de cada métrica foi armazenada;
- As rodadas foram repetidas até que a média das médias alcançasse um erro de 5%, esta medida nos permitiu obter dados que seguem uma distribuição Normal.

4.2.1 Parâmetros das Simulações

A Tabela 2 apresenta os parâmetros usados na simulação.

Tabela 2. Parâmetros

Parâmetros	Valores
Quantidade de USs :	10, 20, 30 USs.
Requisito de QoS Mínimo:	X~U(100kbps,3000kbps)
Período ON do UP:	X~E(100ms)
Período OFF do UP:	X~E(1000ms)

Baseado em [Lekomtcev 2012], foi considerado que cada canal possui uma largura de banda de 6MHz, e no melhor caso, a vazão do canal é 12Mbps. Os dados dos períodos de On e Off foram extraídos diretamente de [Swarup 2013].

Cada US tem um requisito de QoS em termos de vazão mínima. Neste trabalho, foram contemplados USs que demandam baixa vazão (100 kbps), até USs que precisam de mais vazão (3000kbps).

Para o consumo de energia da transmissão de dados, foi utilizada a equação que representa a energia do fóton, com $E = f \cdot h$, onde f representa a frequência da onda e h representa a constante de Planck que é igual a $6.63 \cdot 10^{-34}$. Sendo assim, a potência do sinal pode ser extraída através da equação $P = E \cdot N$ onde N representa a quantidade de fótons transmitida na comunicação. Para a quantidade de fótons na transmissão, foi considerado que a potência de transmissão máxima permitida para uma rede com alcance de 100m é de 100mw [Ghosh 2011]. foi considerando também uma potência de transmissão média é de 25mw (distância média de 50m), e que o AP possui uma antena de 4dbi de ganho, o que significa que a potência de saída para do AP será de 9,95mw. Com esta potência, para a faixa de frequência de 97MHz temos uma quantidade média de $2,4 \cdot 10^{21}$ fótons. Utilizando esta configuração, transmitindo em uma frequência de 54MHz, o dispositivo gastará 8,59mw.

4.2.2 Métricas das Simulações

Para avaliar a proposta, foram utilizadas as seguintes métricas:

- Quantidade média de energia gasta pelos USs;
- Quantidade média de energia gasta pela rede (USs e APs);
- Eficiência Energética dada por $\eta = \frac{\text{Energia}}{\text{Vazão}}$ em W/bit
- Quantidade de canais ativos;

5. Resultado das Simulações

A Figura 2 apresenta um gráfico contendo a energia gasta por US. Como é possível observar, considerando apenas a transmissão de sinais, no melhor caso (10 USs) a economia chega a 72,2%, enquanto para 130 USs a economias chega a 40,95%. Como é possível observar também, o consumo de energia é decrescente para os USs que não utilizam o método proposto. Isto acontece, pois O valor apresentado no gráfico é obtido pela média de consumo de todos os USs, com poucos USs a dispersão entre os canais é maior, o que implica que a probabilidade de se ter USs com uma grande diferença de consumo é maior.

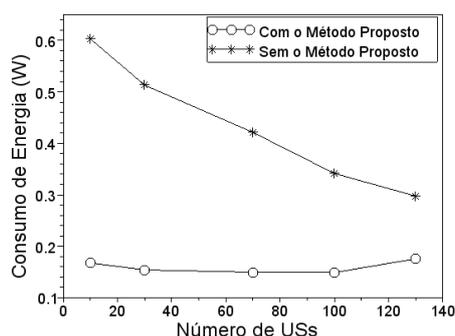


Figura 2. Consumo de energia dos USs

A Figura 3 apresenta a eficiência energética alcançada pelos USs.

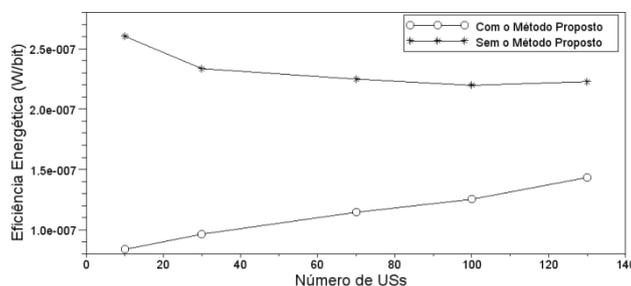


Figura 3. Eficiência energética alcançada pelos USs

Como é possível observar no gráfico da Figura 3, a quantidade de energia gasta por bits pelos USs que usam o método proposto é, em todos os casos nas simulações, menor que o gasto dos USs que não utilizam o método. No melhor caso, o consumo dos USs que não utilizam o método chega a 311% a mais. Isto ocorre principalmente pela capacidade que o mecanismo tem de agrupar os USs em uma quantidade de canais menor, aproveitando de uma melhor forma os recursos de rádio.

A Figura 4 apresenta o gráfico contendo o consumo de energia total, onde são considerados os USs e os APs.

Como é possível observar na Figura 4, o crescimento do consumo de energia para a configuração da rede que não utiliza o método proposto, é maior que o método proposto. Neste caso, a economia pode chegar a 105W. Isto ocorre, pois o algoritmo agrupa os USs nos APs que funcionam nos canais com maior eficiência de transmissão, desta forma, aqueles canais mais dispendiosos só serão utilizados quando existirem usuários com alto requisito de aplicação.

Os gráficos apresentados mostram que a proposta é capaz de permitir aos USs e a rede economizar energia de forma eficiente. Vale salientar que com a proposta apresentada neste trabalho, todos os USs tiveram seus requisitos de QoS atendidos, fato que não foi confirmado na operação normal das redes Wi-Fi. Isto ocorreu, pois quando os USs conectam a uma das redes que aparecem em seu dispositivo, não existem garantias que a rede que ele escolher oferecerá a qualidade necessitada, pois geralmente as redes são ranqueadas pela potência do sinal.

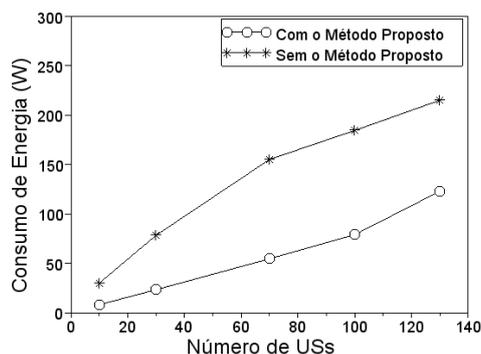


Figura 4. Consumo de energia da rede.

Por fim, a Figura 5 apresenta um gráfico em barras que representa a quantidade de APs ativos no decorrer das simulações para o método proposto. Como é possível observar, o método foi capaz de distribuir os 130 USs em apenas 17 canais, oferecendo a cada um a qualidade requisitada.

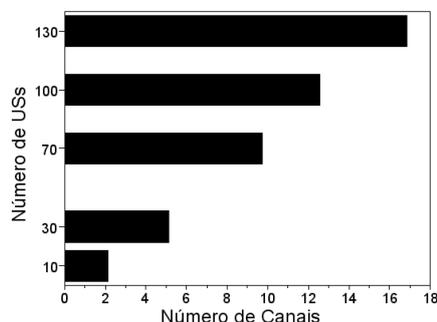


Figura 5. Quantidade de Canais Ativos

Segundo [Jardosh 2009], um AP ocioso consome em média 5W, e cada porta ativa de um switch consome 15W. Desta forma, se considerarmos que em um ambiente contendo 24 APs publicando 24 ESSIDs como ocorre na rede utilizada como comparação neste artigo, o consumo de energia mínimo vai ser de 480W, independente da quantidade de USs utilizando a rede. De acordo com a Figura 5, para uma quantidade de 10 USs foi necessário liberar apenas dois APs cada um associado a um canal específico, o que permitiu desligar 22 APs, representando uma economia de mais de 440W. Considerando o caso médio (70USs), a economia alcançada com o desligamento dos APs alcança 285.8W, que somada a economia apresentada na figura 4, permite uma economia total de 391W, o que representaria uma redução de 281,37kW em um mês de operação significando uma economia de R\$83,32 no Estado de Pernambuco [Aneel 2013] considerando apenas uma praça de alimentação em um shopping. Em relação à diminuição da emissão de gases poluentes, esta economia permite uma redução de

619,91 Kg de CO₂ emitidos na atmosfera em um ano de operação considerando a queima de gás natural [Carbontrust 2013].

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou uma técnica de distribuição de Usuários Secundários entre os canais disponíveis objetivando a economia de energia, tanto na rede como nos dispositivos dos usuários. A base da técnica apresentada consiste em permitir que os Usuários Secundários escolham a qual canal se conectar baseado em seu requisito de aplicação. Desta forma, no método proposto o Usuário Secundário estima a capacidade do canal e escolhe aquele que oferece a vazão requisitada sobre a restrição do consumo de energia na transmissão dos sinais.

Resultados obtidos através de simulações mostraram que considerando apenas a transmissão de sinais foi possível obter uma economia média de até 105W, e quando considerado o desligamento de APs na infraestrutura da rede, esta economia chega a 391W considerando o número médio de usuários utilizados nas simulações. Em relação ao consumo dos dispositivos dos USs, foi demonstrado que a técnica proposta alcança uma maior eficiência energética, sendo esta eficiência por volta de 311%.

Como trabalhos futuros, pretende-se analisar por meio de modelos o impacto da seleção de canais para outros modelos de alocação de canais, como o OFDMA utilizado no LTE e o mecanismo de salto de frequência, utilizado pelo IEEE 802.22.

Referências

- Allard, A. And Fisher, N. *Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing*, World Scientific Publishing Company, pp. 1– 6. 2009.
- Akyildiz, I.F.; Won-Yeol Lee; Vuran, Mehmet C.; Mohanty, S., "A survey on spectrum management in cognitive radio networks," *Communications Magazine*, IEEE , vol.46, no.4, pp.40,48, April 2008.
- Amanna, A. et al. *METRICS AND MEASUREMENT TECHNOLOGIES FOR GREEN COMMUNICATIONS*, NIST Technology Innovation Program. March 2009.
- Amanna, A. *Green Communications: Annotated Literature Review and Research Vision*, Technical Report, 2010.
- Aneel, Agencia Nacional de Energia Eletrica. <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idarea=493> acessado em: 20/04/2013.
- Barbuzzi, A.; Perala, P.H.J.; Boggia, G.; Pentikousis, K., "3GPP radio resource control in practice," *Wireless Communications*, IEEE , vol.19, no.6, pp.76,83, December 2012.
- Bayhan, S.; Alagoz, F., "Scheduling in Centralized Cognitive Radio Networks for Energy Efficiency," *Vehicular Technology*, IEEE Transactions on , vol.62, no.2, pp.582,595, Feb. 2013.
- Carbon Trust. Conversion factors. http://www.carbontrust.com/media/18223/ctl153_conversion_factors.pdf.
- Cordeiro, C. *et al*, Cognitive PHY and MAC layers for dynamic spectrum access and sharing of TV bands, *Proceeding TAPAS '06 Proceedings of the first international*

- workshop on Technology and policy for accessing spectrum, New York, NY, USA, 2006.
- CPN Tools. www.daimi.au.dk/CPNTools/.
- Dejonghe, A. Green Reconfigurable Radio Systems, *IEEE Signal Processing Magazine*, V. 24, Issue 3, PP 90 – 101, 2007.
- El-Beaino, W.; El-Hajj, A.M.; Dawy, Z.; , "A proactive approach for LTE radio network planning with green considerations," *Telecommunications (ICT), 2012 19th International Conference on*, pp.1-5, 23-25 April 2012.
- Fodor, G. and Kasmi, M. A. Discontinuous Transmission and Reception, US 8320271 B2, Nov. 2012.
- Ghosh, C.; Roy, S.; Cavalcanti, D., "Coexistence challenges for heterogeneous cognitive wireless networks in TV white spaces," *Wireless Communications, IEEE* , vol.18, no.4, pp.22,31, August 2011.
- Grace,D. *et al.* Using cognitive radio to deliver ‘Green’ communications, *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, 2009. Hannover, Germany, PP 1 – 6, 2009.
- Hasan, z. *et al.* Green Cellular Networks: A Survey, Some Research Issues and Challenges , *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, V. 13, Issue 4, PP 524 – 540, 2011.
- Hayar, A. Some Issues on Cognitive Radio and UWB Technology Convergence for Enabling Green, *Systems, Signal Processing and their Applications (WOSSPA)*, Tipaza, Algeria, PP 365 – 370, 2011.
- Hoque, M.; Siekkinen, M.; Nurminen, J., "Energy Efficient Multimedia Streaming to Mobile Devices — A Survey," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE* , vol.PP, no.99, pp.1,19, 2012.
- Hou, F. And Huang, J. Dynamic Channel Selection in Cognitive Radio Network with Channel Heterogeneity, *IEEE Global Communications Conference*, Miami, USA, 2010.
- IEEE. Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Policies and Procedures for Operation in the TV Bands. IEEE Computer Society, 2011.
- IEEE P802.11af™/D1.02 Draft Standard for Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications Amendment 3: TV White Spaces Operation U.S.", June 2011.
- Jardosh, P. A. *et al.* Green WLANs: On-Demand WLAN Infrastructures, *Mobile Networks and Applications*, Volume 14, Issue 6, pp. 798-814, Dec 2009.
- LEKOMTCEV, D.; MARŠÁLEK, R. Comparison of 802.11af and 802.22 standards – physical layer and cognitive functionality, *Elektronika a optoelektronika, elektrotechnika*, N. 2, ISBN: 1213-1539, p. 12 – 18, 2012.

- Li, C. And Li, C. Dynamic Channel Selection Algorithm for Cognitive Radios, Circuits and Systems for Communications, 2008. ICCSC 2008. Shanghai, China, p. 275 – 278, Jun 2008.
- Lian, X. *et al.* Green Communications and Positioning by Integration of Adaptive and Distributed Beam-forming Technologies in Cognitive Radio Systems, *Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology*, Chennai, India, 2011.
- Lorincz, Josip; Capone, Antonio; Bogarelli, Massimo; , "Energy savings in wireless access networks through optimized network management," *Wireless Pervasive Computing (ISWPC)*, 2010 5th IEEE International Symposium on , vol., no., pp.449-454, 5-7 May 2010
- Mahapatra, R. Energy consumption analysis in link adaptive cognitive radio network, *Proceedings of the 3rd international conference on Advanced Networks and Telecommunication systems*, Piscataway, USA, 2009.
- Marsan, M. J. **Modelling with Generalized Stochastic Petri Nets** Wiley Series in Parallel Computing John Wiley and Sons, 1995.
- Mitola, J. Cognitive Radio: Na integrated agent architerture for Software defined Radio, Ph. D. Dissertation, KTH Royal Intitute of Technology, Stockholm, Sweden, 2000.
- Ross, S. *Introductory Statistics*. Elsevier Science. Third Edition, 2010.
- Sangkyu Baek; Bong Dae Choi, "Performance analysis of power save mode in IEEE 802.11 infrastructure WLAN," *Telecommunications*, 2008. ICT 2008. International Conference on , vol., no., pp.1,4, 16-19 June 2008.
- Song, Y. et al. Stochastic Channel Selection in Cognitive Radio Networks, *IEEE Global Telecommunications Conference*, Washington, USA, PP 4878 – 4882, 2007.
- Stevenson, C.; Chouinard, G.; Zhongding Lei; Wendong Hu; Shellhammer, S.J.; Caldwell, W., "IEEE 802.22: The first cognitive radio wireless regional area network standard," *Communications Magazine*, IEEE , vol.47, no.1, pp.130,138, January 2009
- Swarup, V.M.; Ribeiro, V.J.; Gupta, A., "A comparative study of scheduling schemes for cognitive radio networks: A quality of service perspective," *Communication Systems and Networks (COMSNETS)*, 2013 Fifth International Conference on , vol., no., pp.1,6, 7-10 Jan. 2013
- Vasconcelos, E. Dias, K. AND Cunha, P. Modelo e Análise de Disponibilidade para Acesso ao Meio baseado em Contenção em Redes de Rádio Cognitivo. XXXII Congresso da Sociedade Brasileira de Computação, XI WPerformance, Curitiba, Paraná, 2012.
- Vo, Q. D. *et al.* Green Perspective Cognitive Radio-based M2M Communications for Smart Meters. *Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju, South Korea, PP 382 – 383, 2010. Yucek, T.; Arslan, H., "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *Communications Surveys & Tutorials*, IEEE , vol.11, no.1, pp.116,130, First Quarter 2009.