

# Modelo e Análise de Disponibilidade para Acesso ao Meio baseado em Contenção em Redes de Rádio Cognitivo

Eduardo Vasconcelos<sup>1</sup>, Kelvin L. Dias<sup>1</sup>, Paulo R. F. Cunha<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro de Informática (CIn) – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)  
Caixa Postal: 7800 - 50711-970 – Recife – PE – Brasil

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

**Abstract.** *In general, the availability calculus of the opportunistic access in Cognitive Radio (CR) is based on a simple ON/OFF model, which represents the Primary User (PU) behavior. We propose and evaluate a new model to study the availability that combines a contention based MAC (Medium Access Protocol), Secondary Users (SUs), and PU behaviors. This composed model enabled us to evaluate the relationships between parameters (e.g., Number of SU, Access Time of PU, time Interval between appearances of PU) and availability. A sensitivity analyses was carried out and, among other findings, it has been concluded that the number of SU exerts an influence on availability greater than any other evaluated parameter.*

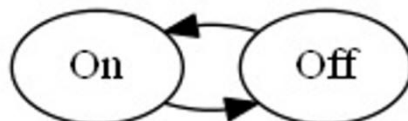
**Resumo.** *Em geral, o cálculo da disponibilidade em rádio cognitivo (RC) baseia-se em um modelo ON/OFF simples, que representa o comportamento do usuário primário (UP). Propomos um modelo para o estudo da disponibilidade que combina o acesso ao meio baseado em contenção, os comportamentos dos usuários secundários (USs) e do UP. O modelo composto permitiu avaliar a relação entre parâmetros (e.g., Número de US, Tempo de acesso do UP, Tempo entre aparições do UP) e a disponibilidade. De acordo com as análises de sensibilidade realizadas, além de outros resultados obtidos, conclui-se que o número de US tem maior influência sobre a disponibilidade que qualquer outro parâmetro avaliado.*

## 1. Introdução

A escassez e utilização ineficiente do espectro eletromagnético são fatores que exigem soluções inteligentes que suportem o aumento crescente por serviços e acesso sem fio. A comunicação baseada em Rádios Cognitivos (RC) [Mitola 2000] é um novo paradigma que busca otimizar a utilização do espectro eletromagnético através do uso de faixas ociosas, de forma oportunística, por parte dos usuários não licenciados ou secundários (US), sem causar interferência nos usuários que detêm o direito de acesso, denominados de primários (UP). Com o passar dos anos, vários estudos [Zeng 2010, Khalid 2009, Akyildiz 2006, Domenico 2010, Cordeiro 2006, Bayhan 2010] vêm contribuindo para a construção e evolução desta tecnologia, o que tem demonstrado que esta também será a solução para viabilizar novos serviços no âmbito das redes sem fio.

Uma das funcionalidades mais importantes de RC, o sensoriamento de espectro [Choi 2010, Aripin 2010], permite que USs observem as faixas espectrais com o objetivo de perceber a atividade nos canais licenciados e, assim, utilizá-los, quando ociosos, sem causar interferência na transmissão do UP. Então, os USs decidem através dos resultados do sensoriamento, que faixas de frequência poderiam utilizar. Em geral,

para representar o comportamento do UP e, assim, extrair a disponibilidade do canal para avaliar novas propostas, a literatura da área utiliza um modelo ON/OFF [Kim 2008] simples, como ilustrado da Figura 1.



**Figura 1. Modelo ON/OFF**

Neste modelo, o estado ON representa o canal ocupado pelo UP e o estado OFF representa o canal livre para a transmissão dos USs. A disponibilidade do canal é calculada utilizando-se a seguinte equação:

$$D = \frac{T_{OFF}}{T_{ON} + T_{OFF}} \quad (1)$$

Onde D é a probabilidade do canal estar em estado OFF,  $T_{OFF}$  representa o tempo em que o canal está em estado OFF e  $T_{ON}$  representa o tempo em que o canal está em estado ON. Alguns autores consideram modelos com mais estados, como em [Zhao 2005], que apresentam um modelo baseado em processo de decisão Markoviano, que consiste em modelar todos os canais em um ambiente. O problema deste tipo de abordagem é a explosão de estados gerada com a adição de canais ao modelo. Além disso, outros parâmetros importantes para o estudo da disponibilidade, como o compartilhamento com outros USs, não são considerados nestes modelos.

Recentemente, corporações como o Google e a Microsoft têm demonstrado interesse em utilizar faixas de frequência licenciadas para aplicações de TV. Tais fatos têm incentivado o desenvolvimento de padrões que utilizem faixas conhecidas como *TV White Space* (TVWS) [Ghosh 2011, Shin 2010]. O termo *White Space* refere-se ao intervalo de tempo em que o canal não está sendo utilizado pelo UP. Os trabalhos da literatura relacionam este termo à disponibilidade do canal. Um dos primeiros padrões a utilizarem estas faixas foi o IEEE 802.22 [IEEE 2011]. Mais recentemente, o desenvolvimento do padrão IEEE 802.11af [Shen 2010], também conhecido como Wi-Fi2.0 ou White-Fi tem se destacado, já que é basicamente uma adaptação do conhecido IEEE 802.11 para acesso oportunístico ao TVWS.

O termo disponibilidade é bastante referenciado nos trabalhos relacionados, onde esta estatística é extraída direta ou indiretamente do modelo apresentado na Figura 1. Lai [Lai 2008], por exemplo, apresenta uma abordagem para estimar indiretamente o melhor canal com base em um modelo ON/OFF, onde é construído um modelo semelhante. Porém, é necessário entender o que realmente o termo disponibilidade significa nestes estudos. Para o canal físico, em relação ao UP, a disponibilidade refere-se à presença ou não deste. Contudo, para o US, o canal estará disponível quando este efetivamente conseguir transmitir. Em síntese, pode-se afirmar que, atualmente, a disponibilidade utilizada para evolução das estratégias de acesso ao meio em Rádio Cognitivo baseia-se apenas nas informações do comportamento do UP. Dessa forma, torna-se importante investigar a influência de outros parâmetros nesta estatística, tais como a quantidade de US concorrentes e o método de acesso ao meio. Até onde sabemos estudos relacionados a estes parâmetros e no contexto de Rádio Cognitivo ainda não foram realizados.

O objetivo deste trabalho é o de realizar um estudo sobre a disponibilidade do canal para USs em rádio cognitivo, através do uso de análise de sensibilidade, em específico as seguintes análises: Um parâmetro por vez [Hamby 1994]; análise diferencial [Hamby 1994]; Correlação e Regressão [Ross 2010]; Índices de Sobol [Archer 1997, Allard 2009].

Para alcançar o objetivo, é necessária a especialização do modelo ON/OFF tradicional para representar os USs e o mecanismo de acesso ao meio, de tal forma que não haja explosão de estados. Neste trabalho, o protocolo que será utilizado para representar o acesso oportunístico será baseado em contenção, como forma de representar a classe na qual o MAC do novo padrão IEEE 802.11af se enquadra. Para melhor realizar os estudos propostos neste trabalho, outras características dos mecanismos de acesso ao meio baseado em contenção serão abstraídos, o objetivo aqui é apenas investigar o acesso ao meio por parte do US, demais funcionalidades serão implementadas em trabalhos futuros.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a extensão do modelo ON/OFF, bem como o desenvolvimento do cálculo da disponibilidade do canal a partir deste novo modelo; os estudos baseados nas análises de sensibilidade realizadas são apresentados na Seção 3; a Seção 4 conclui o artigo, com o resumo do estudo realizado, suas principais contribuições e trabalhos futuros.

## **2. Modelo do Canal para Rádio Cognitivo**

Como mencionado na Seção 1, a maioria dos trabalhos baseia-se no modelo ON/OFF simples apresentado na Figura 1. Embora este modelo represente bem a atividade do UP, o cálculo da disponibilidade do canal dependerá de outras variáveis, como a quantidade de USs e o tipo de mecanismo utilizado para acessá-lo. Para viabilizarmos o desenvolvimento do cálculo da disponibilidade baseado nestas variáveis, o modelo ON/OFF tradicional deve ser estendido.

O método utilizado para fazer a expansão do modelo ON/OFF foi o seguinte:

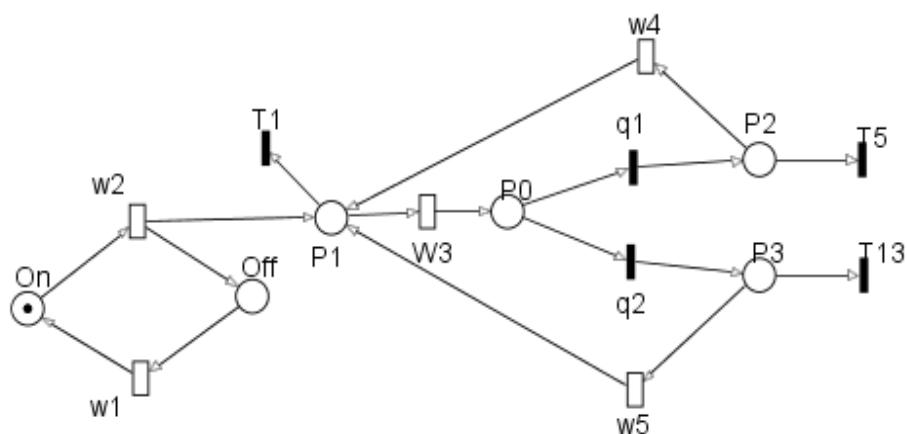
- Primeiramente foi construído um modelo em Rede de Petri Estocástica Generalizada [Chiola 1993];
- Em seguida este modelo foi transformado em uma cadeia de Markov [Bolch 2006];
- Após a extração da cadeia de Markov, o cálculo da disponibilidade foi derivado.

### **2.1 Rede de Petri do modelo ON/OFF estendido**

Utilizamos inicialmente o formalismo de Redes de Petri [Chiola 1993], pois conceber modelos segundo esse formalismo é mais intuitivo e direto que a utilização de cadeias de Markov, o que facilita a explicação e compreensão do modelo. Dessa forma, como o primeiro passo da metodologia, a Figura 2 ilustra o modelo ON/OFF estendido do acesso ao canal e que também contempla o comportamento dos USs.

Este modelo considera um canal onde existe um UP e vários USs. O mecanismo de acesso ao meio utilizado para a criação deste modelo é baseado no CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance*) [Shen 2010] que forma a base da funcionalidade de acesso ao meio para o 802.11af. O modelo é dividido em duas partes:

a primeira parte representa a relação entre o canal e o UP (lugares #ON e #OFF); a segunda parte representa a relação entre os USs e o canal (lugares #P0, #P1, #P2 e #P3).



**Figura 2. Modelo ON/OFF estendido para o acesso ao canal pelo US**

Quando houver um *token* no lugar #On, significa que o UP está utilizando o canal, a transição temporizada  $w_2$  representa o tempo de permanência do UP no canal. Uma vez que  $w_2$  é disparada, o *token* é retirado do lugar #On e um *token* é gerado para o lugar #Off, bem como, outro para #P1. Quando esta marcação é alcançada, significa que o canal foi liberado pelo UP e os USs podem competir pelo meio. Como o mecanismo utilizado é baseado no CSMA/CA, o lugar #P1 representa os USs esperando para começar a transmitir. A transição  $w_3$  representa o tempo de espera dado pelo valor do *DIFS* (*Distributed Coordination Function Inter-Frame Space*) somado à janela de contenção.

Quando a transição  $w_3$  é disparada, um *token* é gerado para o lugar #P0, indicando que um dos USs que está competindo pelo canal venceu a concorrência e está pronto para transmitir. Quando existir um *token* no lugar #P0, um conflito é habilitado entre as transições imediatas  $q_1$  e  $q_2$ . Este conflito modela a concorrência pelo canal. Se a transição  $q_1$  for disparada, significa que o US que está sendo modelado ganhou a concorrência, caso a transição  $q_2$  seja disparada, outro US venceu a concorrência. Sendo assim, o peso configurado para  $q_1$  é sempre igual a 1, e o peso configurado para  $q_2$  é  $NUS - 1$ , onde NUS representa a quantidade de USs competindo pelo canal.

Quando um *token* for gerando para o lugar #P2, significa que o US está utilizando o canal, se o *token* for gerado para o lugar #P3 indica que outro SU está utilizando o canal. As transições temporizadas  $w_4$  e  $w_5$  representam os tempos de utilização do canal pelos USs. A transição  $w_1$  representa o tempo em que o UP permanece ausente do canal. Sendo assim, o disparo dessa transição indica que o UP requer transmissão no canal e todos os US devem liberar o canal imediatamente. Por fim, as transições imediatas  $T_1$ ,  $T_5$  e  $T_{13}$  possuem uma guarda que as habilita quando existir um *token* no lugar #On. Dessa forma, quando a transição temporizada  $w_1$  é disparada, as transições  $T_1$ ,  $T_5$  e  $T_{13}$  podem ficar habilitadas para retirar o *token* de um dos lugares #P0, #P2 e #P3, fazendo com que o canal seja liberado mediante a presença do UP.

## 2.2 Modelo baseado em Cadeia de Markov

A partir da Rede de Petri da Figura 2, foi possível derivar a Cadeia de Markov de Tempo Contínuo da Figura 3. O processo de derivação consiste em gerar o grafo de alcançabilidade do modelo através do mapa de marcações da rede. Por exemplo, a marcação que corresponde a um token no lugar #On, corresponde ao estado M0 da cadeia de Markov. Quando a transição temporizada  $w2$  for disparada, *tokens* são gerados para os lugares #off e #P1, o que corresponde ao estado M1, e assim sucessivamente. Para maiores informações sobre este mapeamento, por favor, consulte [Marsan 1995].

Os valores das transições dos estados da cadeia de Markov são obtidos a partir das transições da Rede de Petri da seguinte forma:

- $\Phi_1 = w1; \quad \Phi_2 = w2;$
- $\Phi_3 = w3 * \left(\frac{q1}{[q1+q2]}\right); \quad \Phi_4 = w4;$
- $\Phi_5 = w5; \quad \Phi_6 = w3 * \left(\frac{q2}{[q1+q2]}\right);$

## 2.3. Modelo de disponibilidade

O modelo de disponibilidade do canal pode ser obtido através de uma análise estacionária da cadeia de Markov ilustrada na Figura 3. Para realizar a análise estacionária é necessário primeiro transformar os tempos  $\Phi_i$  em taxas através da equação (2):

$$\Psi_i = \frac{1}{\Phi_i} \quad (2)$$

A partir da equação (2) é possível descrever a matriz de transição de estados:

$$Q * \Pi = \begin{bmatrix} -\Psi_2 & \Psi_2 & 0 & 0 \\ \Psi_1 & -(\Psi_1 + \Psi_6 + \Psi_3) & \Psi_6 & \Psi_3 \\ \Psi_1 & \Psi_4 & -(\Psi_1 + \Psi_4) & 0 \\ \Psi_1 & \Psi_5 & 0 & -(\Psi_1 + \Psi_5) \end{bmatrix} * \Pi = 0 \quad (3)$$

Onde Q representa a matriz infinitesimal da cadeia de Markov e  $\Pi$  representa o vetor de probabilidades estacionárias dos estados  $\Pi = [\Pi_0 \Pi_1 \Pi_2 \Pi_3]$ . Como o canal está disponível para o US quando este utiliza o canal, a disponibilidade é descrita por  $\Pi_2$ , que representa a probabilidade estacionária do estado M<sub>2</sub>. O valor de  $\Pi_2$  é obtido pela equação (4):

$$\Pi_2 = \Psi_6 \left( \frac{\left[ \frac{\Psi_2 \Psi_1}{\Psi_2 + \Psi_1} \right]}{\left[ \{\Psi_1 + \Psi_6 + \Psi_3\} - \left\{ \frac{\Psi_4 \Psi_6}{\Psi_1 + \Psi_4} \right\} - \left\{ \frac{\Psi_5 \Psi_3}{\Psi_1 + \Psi_5} \right\} \right]} \right) \quad (4)$$

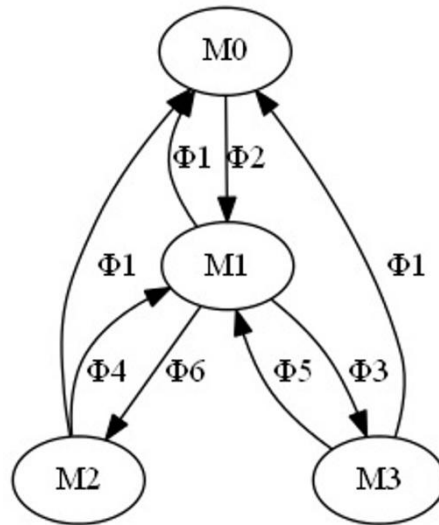


Figura 3. Modelo ON/OFF em Cadeia de Markov do acesso ao canal pelo SU

### 3. Estudo do modelo com Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade é adotada em nosso estudo como uma importante ferramenta para verificar a forma como a disponibilidade do canal é afetada pelos diferentes componentes do modelo. Inicialmente, avaliamos a disponibilidade do canal apenas em função do valor de  $T_{OFF}$  ( $w1$  no modelo da Figura 2) e a da quantidade de USs ( $q2$ ). Em seguida, outros parâmetros, como o tempo de *backoff* ( $w3$ ), o tempo de  $T_{ON}$  ( $w2$ ), e os tempos de utilização do canal por parte dos USs ( $w4$  e  $w5$ ), também foram avaliados. O valor de  $T_{OFF}$  foi o primeiro a ser analisado, pois este é o parâmetro mais utilizado nas estratégias de acesso ao canal, principalmente para os padrões em desenvolvimento que utilizam as faixas de TV. O objetivo desta análise é demonstrar que outros parâmetros também deveriam ser levados em consideração, pois podem afetar a disponibilidade do canal tanto ou mais que  $T_{OFF}$ .

A primeira abordagem utilizada para o estudo da análise de sensibilidade dos parâmetros foi variar um parâmetro por vez. A segunda foi à análise diferencial; a terceira foi à análise de correlação e regressão e, por fim, na quarta análise utilizou-se o Índice de Sobol.

As técnicas de análise de sensibilidade apresentadas neste trabalho foram utilizadas, pois seus resultados são complementares. Sendo assim: a primeira análise (Abordagem um Parâmetro por vez) nos permite observar de forma mais simples e intuitiva como a disponibilidade é afetada por cada parâmetro; a segunda abordagem (Análise Diferencial) nos permite observar como a variação de um parâmetro influencia o resultado dada uma determinada condição; a abordagem de regressão nos permite avaliar o comportamento da disponibilidade com a variação simultânea e aleatória de todos os parâmetros na análise; e por fim, o Índice de Sobol complementa os resultados da análise de regressão por demonstrar como a variabilidade de cada parâmetro afeta a variabilidade da disponibilidade.

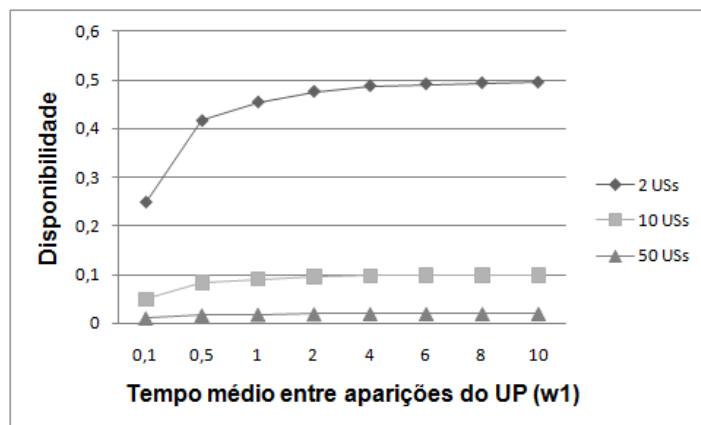
#### 3.1. Abordagem um Parâmetro por vez

A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros utilizados para esta análise.

**Tabela 1. Parâmetros para a Análise**

Parâmetro	Valor
Tempo médio entre aparições do UP	$w1 = 0.1, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10s$
Tempo médio de utilização do canal pelo UP	$w2 = 0.1s$
Tempo médio de DIFS + Backoff	$w3 = 0.000065s$
Quantidade de USs	$q1+q2 = 2, 4, 6, 8, 10, 20, 30, 40, 50.$
Tempo médio de utilização do canal pelos USs	$w4 \text{ e } w5 = 0.01s$

A Figura 4 apresenta um gráfico contendo os valores da disponibilidade através da variação do tempo médio entre aparições do UP. O gráfico apresenta três curvas que representam a variação do valor de  $w1$  em 3 situações: na primeira, a quantidade de US utilizando o canal é igual a 2, na segunda igual 10 e na terceira igual a 50.



**Figura 4. Gráfico da disponibilidade do canal variando  $w1$**

Como é possível observar, para uma quantidade de USs igual a 2, o valor de  $w1$  torna a disponibilidade do canal bastante instável, fazendo com que esta caia até aproximadamente 25%. Porém, para uma quantidade de 10 USs a variação de  $w1$  quase não afeta a curva, fazendo com que a disponibilidade varie entre 5 e 10%. Seguindo a análise, é possível observar que para uma quantidade de 50 USs a variação da disponibilidade é pequena, fazendo com que a disponibilidade varie entre 1 e 2%.

A Figura 5 apresenta um gráfico onde a quantidade de USs é variada. É possível observar como a variação da quantidade de USs afeta a disponibilidade do canal. Fixando os valores de  $w1$  em 10 e 2 (curva com losango e triângulo respectivamente), estas curvas não apresentam diferenças, ambas apresentam uma variação entre 49,5% e 1,9%. Somente é possível observar uma diferença entre as curvas para o valor de  $w1$  igual a 0,1. Neste caso, a disponibilidade varia entre 24,95% e 0,99%. Porém, para a quantidade de USs igual a 20, o valor de  $w1$  não afeta tanto a disponibilidade do canal, a diferença das disponibilidades fica entre 2% e 4%.

Através da análise realizada, observa-se que quanto maior a quantidade de USs menor a influência que o valor de  $w1$  causa à disponibilidade do canal.

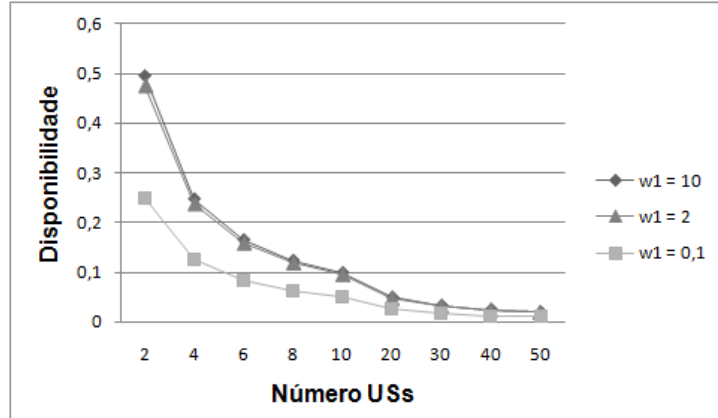


Figura 5. Gráfico da disponibilidade do canal variando a quantidade de USs

### 3.2 Análise Diferencial

A primeira etapa para a realização da segunda análise que realizamos é construir as equações diferenciais baseadas nos parâmetros estudados. Desta forma, existirá uma equação para cada parâmetro. Serão analisados os parâmetros  $w1$  (tempo médio entre as aparições do UP) e a quantidade de USs.

Para o parâmetro  $w1$ , a equação que foi derivada corresponde à equação (5), abaixo. Esta equação é a equação 4 com o valor de  $\Psi_1$  convertida em termos de  $w1$

$$\Pi_2 = \Psi_6 * \left( \frac{\left[ \frac{\Psi_2 \frac{1}{w_1}}{\Psi_2 + \frac{1}{w_1}} \right]}{\left\{ \frac{1}{w_1} + \Psi_6 + \Psi_3 \right\} - \left\{ \frac{\Psi_4 \Psi_6}{\frac{1}{w_1} + \Psi_4} \right\} - \left\{ \frac{\Psi_5 \Psi_3}{\frac{1}{w_1} + \Psi_5} \right\}} \right) \quad (5)$$

A equação (6) apresenta a equação diferencial em relação à  $w1$  da equação (5).

$$\frac{\partial \Pi_2}{\partial w_1} = \left( \frac{(\Psi_6 \Psi_2 w_1 (\Psi_6 w_1 (\Psi_5 w_1 + 1)^2 + \Psi_2 w_1 (-\Psi_3 \Psi_4 w_1^2 + \Psi_5 w_1 (\Psi_3 w_1 + 2) + \Psi_5^2 w_1^2 + 1) + \Psi_3 \Psi_4 \Psi_5 w_1^3) + 2 \Psi_3 \Psi_5 w_1^2 + \Psi_3 w_1 + \Psi_4 w_1^2 w_1^3 + 2 \Psi_4 \Psi_5 w_1^2 + \Psi_4 w_1 + 2 \Psi_5^2 w_1^2 + 4 \Psi_5 w_1 + 2))}{(\Psi_2 w_1 + 1)^2 (\Psi_6 w_1 (\Psi_5 w_1 + 1) + (\Psi_4 w_1 + 1) (\Psi_3 w_1 + \Psi_5 w_1 + 1))^2} \right) \quad (6)$$

Para a quantidade de USs, o parâmetro  $q2$  foi utilizado para derivar a equação 2. Desta forma, para construir a equação que foi derivada, temos:

$$\Psi_6 = \frac{1}{w_3 \left( \frac{q2}{[q1 + q2]} \right)} \quad (7)$$



$$\Psi_3 = \frac{1}{w_3 \left( \frac{q_1}{[q_1 + q_2]} \right)} \quad (8)$$

Como  $q_1$  representa o US que está sendo modelado, este valor será sempre igual a 1, sendo assim, a equação derivada foi:

$$\Pi_2 = \frac{1}{w_3 \left( \frac{q_2}{[q_1 + q_2]} \right)} \left( \frac{\left[ \frac{\Psi_2 \Psi_1}{\Psi_2 + \Psi_1} \right]}{\left\{ \Psi_1 + \frac{1}{w_3 \left( \frac{q_2}{[q_1 + q_2]} \right)} + \frac{1}{w_3 \left( \frac{q_1}{[q_1 + q_2]} \right)} \right\} - \left\{ \frac{w_3 \left( \frac{q_2}{[q_1 + q_2]} \right)}{\Psi_1 + \Psi_4} \right\} - \left\{ \frac{w_3 \left( \frac{q_1}{[q_1 + q_2]} \right)}{\Psi_1 + \Psi_5} \right\}} \right) \quad (9)$$

A equação 10 apresenta a equação diferencial para a equação (9).

$$\frac{\partial \Pi_2}{\partial q_2} = \frac{(\Psi_2(\Psi_1 + \Psi_5)(\Psi_4 + \Psi_1)(q_2^2(\Psi_1 w_3 + \Psi_5 w_3 + 1) + 2q_2 + 1))}{\left[ (\Psi_4(\Psi_1 q_2 w_3 + \Psi_5 q_2 w_3 + q_2 + 1) + \Psi_1^2 q_2 w_3 + \Psi_1(q_2^2 + \Psi_5 q_2 w_3 + 2q_2 + 1) + \Psi_5 q_2(q_2 + 1)) \right]^2} \quad (10)$$

Uma vez encontradas as equações que foram utilizadas para a análise, foi necessário padronizar os valores dos parâmetros, já que os dois parâmetros possuem grandezas diferentes como é possível observar na Tabela 1. Como o propósito desta avaliação é verificar a forma como os parâmetros influenciam a disponibilidade do canal, os valores foram os seguintes:  $w_1 = q_1 = [1..10]$ , com  $w_1$  e  $q_1 \in \mathbb{Z}$ .

A Figura 6 apresenta um gráfico contendo a análise para a variação de  $w_1$  fixando o valor de  $q_2$  em 1 (curva  $w_1$ -2US), e variando o valor de  $q_2$  fixando  $w_1$  em 1 (curva  $q_2$ -1s).

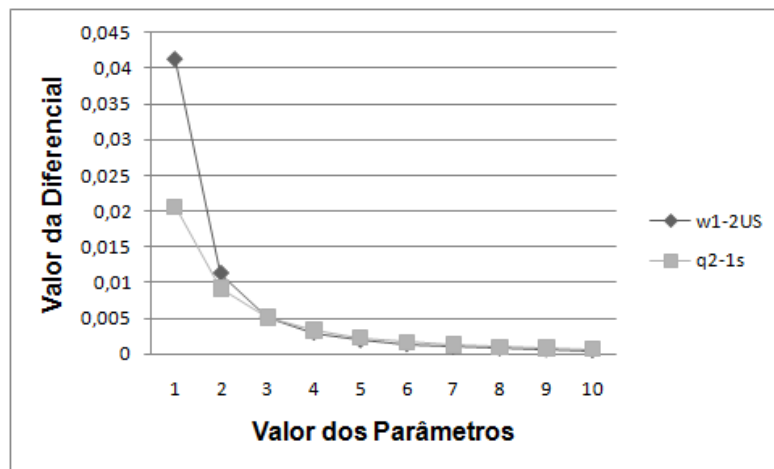


Figura 6. 1ª Análise Diferencial

A Figura 7 apresenta um gráfico contendo a análise para a variação de  $w1$  fixando o valor de  $q2$  em 10 (curva  $w1-10US$ ), e variando o valor de  $q2$  fixando  $w1$  em 10 (curva  $q2-10s$ ).

Através da Figura 6, é possível observar que quando a quantidade de USs é pequena, o valor de  $w1$  influencia a disponibilidade do canal mais que a variação da quantidade de usuários. Neste caso, pode-se observar que um baixo valor para  $w1$  inibe a capacidade de  $q2$  de variar a disponibilidade. Para a Figura 7 observa-se que a variação de  $w1$  pouco influencia a variação da disponibilidade quando existem 10 USs utilizando o canal. Finalizando, observa-se que o valor de  $q2$  gera uma maior variação da disponibilidade quando  $w1$  é fixado em 10.

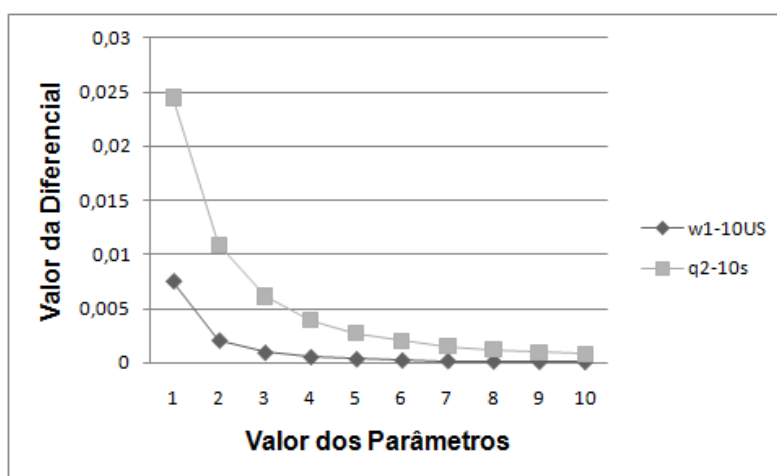


Figura 7. 2ª Análise Diferencial

### 3.3 Análise de Correlação e Regressão

A terceira análise realizada foi à análise de correlação e regressão. A partir dos parâmetros de entrada foram construídos modelos de regressão com o intuito de explicar como a disponibilidade é afetada pelos parâmetros. A primeira tarefa a ser realizada é descrever os valores que os parâmetros irão assumir, pois nessa análise, todos os parâmetros foram avaliados. A Tabela 2 apresenta os valores utilizados para as simulações.

Tabela 2. Parâmetros para a Análise de Correlação e Regressão

Parâmetro	Valor
Tempo médio entre aparição do PU	$w1 = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 2, 4, 6, 8, 10$ s
Tempo médio de utilização do canal pelo PU	$w2 = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 2, 4, 6, 8, 10$ s
Tempo médio de DIFS + Backoff	$w3 = 0.000060, 0.000061, 0.000062, 0.000063, 0.000064, 0.000065, 0.000066, 0.000067, 0.000068, 0.000069, 0.000075$ s
Quantidade de SUs	$q1+q2 = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11$
Tempo médio de utilização do canal pelos Sus	$w4$ e $w5 = 0.005, 0.006, 0.007, 0.008, 0.009, 0.010, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$ s

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos por esta análise. Pode-se observar que o parâmetro NUS (Número de Usuários Secundários) possui uma correlação com a disponibilidade igual a -0,543 o que indica que quanto maior a quantidade de USs menor o valor da disponibilidade e que ambos possuem uma boa relação. O modelo de regressão gerado através do parâmetro NUS alcançou um nível de correspondência de 29,5% em relação aos valores da disponibilidade apresentados ao modelo. Os valores do backoff, w4 e w5 pouco influenciam a disponibilidade do canal, tendo baixa correlação e modelos de regressão inexpressivos.

O parâmetro  $w1$  possui uma correlação com a disponibilidade igual a 0,39, o que significa que quanto maior seu valor, maior será a disponibilidade do canal. O modelo de regressão gerado por este parâmetro alcançou um nível de correspondência de 15,10%. Já para o parâmetro  $w2$  (que representa o tempo médio em que o UP está ocupando o canal), a correlação é de -0,416 o que indica que este parâmetro possui um grau maior de relação com a disponibilidade do que o valor de  $w1$ . É possível observar também que o nível de correspondência deste parâmetro com a disponibilidade é de 17,30%.

Pode-se notar que o parâmetro que mais influencia a disponibilidade do canal é a quantidade de USs, o que demonstra fortes indícios que este parâmetro deveria ser considerado na construção dos modelos de canal nas pesquisas em RC.

**Tabela 3. Resultados obtidos com a análise de correlação e regressão**

Parâmetro	Correlação	Regressão
NUS	-0,543	29,5%
W1	0,39	15,10%
Backoff	-0,027	0.01%
w2	-0,416	17,30%
W4 e w5	0.006	0,00%

### 3.4. Índices de Sobol.

O último teste utilizado foi o teste de Sobol [Archer 1997, Allard 2009]. Nesta análise, os valores foram gerados aleatoriamente utilizando-se a distribuição uniforme para este fim, pois, este teste necessita de uma grande quantidade de amostras, e utilizar os valores da Tabela 2 não seria apropriado. A Tabela 4 mostra os valores utilizados para cada parâmetro.

Através dos resultados apresentados na Tabela 5, observa-se que a variação da quantidade de USs corresponde a 46,86% da variabilidade da disponibilidade, enquanto  $w1$  e  $w2$  correspondem a 25,44% e 27,68%, respectivamente. Com os resultados desta última análise, podemos concluir que o número de USs é um parâmetro importante e deve ser levado em conta na construção de modelos para canais em Rádio Cognitivos, pois estratégias que não levam em consideração este parâmetro para a tomada de decisão na escolha do melhor canal, podem levar a estimativas de métricas de QoS erroneamente, degradando assim a qualidade observada pelo usuário.

**Tabela 4. Parâmetros da Análise de Sobol.**

Parâmetro	Intervalos para os valores
w1	$X \sim U(0.1, 10)$
w2	$X \sim U(0.1, 10)$
BackOff	$X \sim U(0.00005, 0.0001)$
NUS	$X \sim U(2, 20)$
w4 e w5	$X \sim U(0.005, 0.01)$

Os resultados da análise podem ser vistos na Tabela 5.

**Tabela 5. Resultados da análise de Sobol**

Parâmetro	Grau de variabilidade
w1	25,44%
w2	27,68%
BackOff	0,012%
NUS	46,86%
w5 e w4	0,000508%

### 3.5 Conclusão Sobre as Análises de Sensibilidade

Os testes realizados sobre o modelo da disponibilidade gerado neste trabalho demonstraram que os parâmetros comumente utilizados em estratégias de acesso ao canal possuem menor influência na disponibilidade que a quantidade de USs disputando o canal. Nas diversas análises realizadas, foi possível observar que  $w1$  (tempo médio entre aparições de UPs) possui um alto grau de influência apenas quando a quantidade de USs é pequena; aumentando esta quantidade, a influência exercida por outros parâmetros é muito pequena. É possível observar também que o tempo de permanência do UP no canal ( $w2$ ) tem importância maior ou equivalente ao tempo de ausência deste UP, sendo assim, é importante que  $w2$  também seja considerado nas estratégias de acesso ao canal.

Na análise de Sobol, foi possível demonstrar que a quantidade de USs corresponde à aproximadamente 47% da variabilidade da disponibilidade, o que indica que este parâmetro é o mais importante para esta métrica.

## 4. Considerações finais

Este trabalho apresentou uma análise sobre a disponibilidade do Canal para Rádio Cognitivo. Através de uma extensão do modelo ON/OFF tradicional utilizado em mecanismos de acesso ao canal, foi possível observar que a quantidade de Usuários Secundários disputando o canal influencia a disponibilidade de forma mais acentuada do que os parâmetros usuais. Os resultados para a análise de Sobol mostraram que este parâmetro corresponde a mais de 46% da variabilidade da disponibilidade. Foi possível observar também que o tempo de permanência do UP no canal, exerce mais influência que o tempo de ausência, e que os demais parâmetros exercem uma influência muito pequena.

Como resultado do estudo, o trabalho apresentou um modelo ON/OFF estendido que poderá ser utilizado pelos mecanismos de acesso ao canal para identificar a melhor oportunidade. Neste trabalho, observou-se também que para MACs cognitivos baseados em contenção, o mecanismo de acesso ao meio pouco influencia na disponibilidade, o que torna o modelo apresentado neste trabalho, um modelo genérico para estes tipos de mecanismos. Como trabalho futuro pretende-se desenvolver um mecanismo para o acesso ao canal cognitivo utilizando o modelo proposto por este trabalho e, principalmente, a equação da disponibilidade desenvolvida. Pretende-se também elaborar modelos e estudos sobre os outros mecanismos de acesso ao meio como o baseado em slots e o híbrido, objetivando gerar um modelo geral para o acesso ao meio.

## 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. *et al*, *NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive Radio Wireless Networks: A Survey*, *Computer Networks Journal* (Elsevier), 2006.
- Archer, G. E. B. *et al*, *Sensitivity Measures , Anova-Like Techniques and the use of Bootstrap*, *J. Statist. Comput. Simul.* Vol 50. Pp 99-120. 1997.
- Aripin, N. M. *A Cross-Layer Approach in Sensing and Resource Allocation for Multimedia Transmission over Cognitive UWB Networks*. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* Volume 2010, 10 pages.
- Bayhan, S. *MAC layer design in cognitive radio networks*, *World of Wireless Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*. Montreal, QC, Canada, Agosto 2010.
- Bolch, G. *et al*. *Queueing Networks and Markov Chains*. 2. Ed. New Jersey, John Wiley & Sons, 2006.
- Chiola, G. *et al*. *Generalized Stochastic Petri Nets: A Definition at the Net Level and its Implications*. *IEEE Transactions on Software Engineering*, V. 19, Issue 2, p. 89-107. IEEE Press, February 1993.
- Choi, K. W. *Adaptive Sensing Technique to Maximize Spectrum Utilization in Cognitive Radio*. *IEEE TRANS. ON VEHICULAR TECH*, VOL. 59, NO. 2, 2010.
- 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.
- Domenico, A. *et al*, *A Survey on Mac Strategies for Cognitive Radio Networks*. *IEEE Communications Surveys And Tutorials*, Issue 99, pp 1-24, 2010.
- Ghosh, C. And Roy S. *Coexistence Challenges for Heterogeneous Cognitive Wireless Networks in TV White Spaces*, *Wireless Communications IEEE*, V. 18, Issue. 4, pp. 22-31, Aug. 2011.
- Hamby, D. M. *A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models*. *Environmental Monitoring and Assessment*, p 135–154. 1994.

- IEEE std.802.22. IEEE 802.22 Working Group on Wireless Regional Area Networks, Enabling Rural Broadband Wireless Access Using Cognitive Radio Technology in TV Whitespaces, <http://www.ieee802.org/22/>, last release 2011.
- Khalid, L. And Anpalagan A., Emerging cognitive radio technology: Principles, challenges and opportunities, Computers and Electrical Engineering ,Volume 36, Issue 2, March, 2009.
- Kim, H. And Shin, K. Efficient Discovery of Spectrum Opportunities with MAC-Layer Sensing in Cognitive Radio Networks, IEEE Transactions ON Mobile Computing, VOL. 7, NO. 5, MAY 2008.
- Lai, L. *et al*, Optimal Medium Access Control In Cognitive Radios: A Sequential Design Approach, 2008. ICASSP 2008, Las Vegas, USA, pp. 2073 – 2076, Mai. 2008.
- 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.
- Shen, H. S. And Gao, W. MAC and PHY Proposal for 802.11af, <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/10/11-10-0258-00-00af-mac-and-phy-proposal-for-802-11af.pdf>, Mar. 2010.
- Shin, K, G. *et al*, Cognitive Radio for Dynamic Spectrum Access: From Concept to Reality, Wireless Communications IEEE, V. 17, Issue. 6, pp. 64-74, Dec. 2010.
- Zhao Q. *et al*, Decentralized cognitive mac for dynamic spectrum access, in proc. Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN'05), Baltimore, MD, USA, pp. 224-232, Nov. 2005.
- Zeng, Y. *et al*, A review on spectrum sensing for cognitive radio: challenges and solutions, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing - Special issue on advanced signal processing for cognitive radio networks, Volume 2010, January 2010.