

# Estudo Experimental da Utilização Espectral na Banda ISM de 2.4 GHz

Ruan D. Gomes e Marco A. Spohn  
 Universidade Federal de Campina Grande, Brasil.  
 {ruan, maspohn}@dsc.ufcg.edu.br

**Resumo**— O presente estudo experimental tem como objetivo observar a distribuição da utilização do espectro ao longo da faixa de frequências disponíveis na banda ISM de 2.4 GHz. Considerando que, idealmente, deveria haver uma simetria na utilização ao longo do intervalo de frequências, o estudo determinou a eficiência do uso da banda em relação a essa simetria. Outro parâmetro observado no estudo foi o impacto causado pela inserção de novas fontes de interferência, sejam elas utilizadas para comunicação ou não. Essa informação pode ser utilizada para justificar a necessidade de adaptação contínua dos rádios em relação ao ambiente onde estão inseridos. Os experimentos analisaram a ocupação espectral na banda ISM de 2.4 GHz a partir de duas perspectivas. A primeira diz respeito à análise de ocupação dos canais definidos pelo padrão de comunicação sem fio IEEE 802.11b e, por último, uma análise do ponto de vista do padrão de comunicação sem fio IEEE 802.15.4. Com esse propósito, foi verificada a potência média induzida em cada canal, com o objetivo de estimar como se dá a utilização das faixas de espectro relativas aos canais em cada cenário considerado.

**Palavras chave**— ocupação espectral, banda ISM, IEEE 802.11b, IEEE 802.15.4

## I. INTRODUÇÃO

As redes sem fio são redes formadas por nós que se comunicam através de um enlace sem fio, ou seja, o meio físico para comunicação é o próprio ar. Usualmente a comunicação é feita por meio de ondas de rádio-frequência. A utilização de redes sem fio leva a um novo e grande conjunto de possibilidades, gerando diversas aplicações que podem dar suporte a diversas atividades. Com o desenvolvimento do conceito que conhecemos por “internet das coisas”, será possível construir uma nova rede, no qual não apenas computadores, mas pessoas e objetos estarão conectados através de enlaces de comunicação sem fio. Isso irá gerar grande fluxo de informações, tornando possível um acompanhamento efetivo e em tempo real de pessoas, automóveis, objetos, entre outras coisas, trazendo maior rapidez e exatidão na coleta de dados [1] [2]. Conseqüentemente haverá um aumento na utilização do espectro disponível para comunicação sem fio.

O espectro para comunicação sem fio é regulado por agências governamentais e a faixa de espectro disponível é

limitada. A banda disponível para comunicação varia dependendo da região. Grande parte do espectro atribuído é utilizada esporadicamente e, de acordo com a *Federal Communications Commission* (FCC), as variações geográficas na utilização do espectro atribuído vão de 15% a 85%, com alta variância no tempo [3]. Hoje em dia os rádios utilizam, em sua grande maioria, uma abordagem de alocação estática do espectro utilizado para comunicação. Essa abordagem tende a não funcionar de maneira satisfatória à medida que uma grande quantidade de dispositivos é inserida no ambiente e compartilham do espectro disponível.

Atualmente muitos dispositivos de comunicação operam na faixa de transmissão de 2.4 GHz, que é uma banda não licenciada denominada *Industrial, Scientific and Medical* (ISM), incluindo rádios que utilizam as tecnologias Bluetooth, WiFi e Zigbee, além de outros aparelhos como telefones sem fio, mouses e teclados sem fio e fornos microondas [4]. A banda ISM foi inicialmente alocada para usos não comerciais, sendo mais tarde modificada para permitir mais serviços, provocando um grande fluxo de aplicações de comunicação sem fio. Essas aplicações tiram vantagem dessa banda para livre operação [5].

Como a banda ISM é uma banda não licenciada, nenhum usuário possui prioridade de uso em relação a outro. A única restrição para os usuários nessa banda é a potência do sinal. A restrição de potência é utilizada para limitar a interferência entre sistemas coexistentes [6]. Como não existe proteção contra interferência de usuários coexistentes, é necessário o desenvolvimento de tecnologias eficientes de coexistência para permitir uma operação suficientemente boa de sistemas em banda não licenciada. Portanto, é necessário um novo tipo de abordagem para o projeto de sistemas de comunicação sem fio, que devem incluir medidas da ocupação do espectro, modelagem da interferência de coexistência e avaliação de desempenho [5].

A abordagem de alocação estática do espectro pode não funcionar de forma satisfatória à medida que muitos dispositivos sem fio são inseridos na rede, devido aos efeitos causados pela co-existência dos mesmos. Portanto, se faz necessária uma abordagem de alocação dinâmica do espectro, na qual os rádios passam a estar cientes do espectro disponível e tomam decisões baseados nessa informação. Utilizando essa nova abordagem, os rádios serão capazes de utilizar o espectro disponível de forma mais oportunista, sendo capazes de escolher a melhor porção de espectro disponível no momento de entrar na rede, além de possuir capacidade de adaptação contínua, levando a um uso inteligente do espectro não apenas

no momento da inserção na rede, mas durante toda a operação do rádio.

Dentre os padrões de comunicação que fazem uso da banda ISM para sua operação, podemos destacar os padrões IEEE 802.11b e IEEE 802.15.4. O primeiro é largamente utilizado em redes locais sem fio [7], enquanto que o segundo é um padrão que oferece uma solução escalável, de baixo custo e baixo consumo de energia para redes de sensores sem fio [8].

O presente estudo experimental foi realizado a partir da perspectiva desses dois padrões. Com esse propósito, foi verificada a potência média induzida nos canais definidos pelos padrões, com o objetivo de estimar como se dá a utilização das faixas de espectro alocadas para cada canal.

Foi possível observar, através dos experimentos realizados, que para os ambientes considerados no estudo existem regiões subutilizadas no espectro em relação às demais, justificando a necessidade de alocação dinâmica do espectro no momento da entrada do rádio na rede. Também foi observado o impacto da inserção de uma nova fonte de interferência no ambiente. A partir dos dados obtidos no experimento foi possível constatar que a distribuição de uso do espectro pode sofrer uma alteração significativa após a inserção de uma nova fonte de interferência no meio, justificando a necessidade de adaptação contínua dos rádios.

## II. REVISÃO DE LITERATURA

### A. Rádios Cognitivos e Compartilhamento de Espectro

Como dito anteriormente, uma abordagem de alocação estática pode não funcionar de forma satisfatória à medida que muitos dispositivos sem fio são inseridos na rede. Estudos realizados por [9] mostram que, em 2004, o uso de WLANs já estava bem difundido, mas seu volume de uso ainda não era suficiente para causar problemas de escassez de espectro. Porém, acredita-se que o uso da tecnologia de comunicação sem fio aumentou significativamente de lá para cá e irá aumentar ainda mais com o passar dos anos. Dessa forma, se faz necessária uma abordagem de alocação dinâmica do espectro, na qual os rádios passam a estar cientes do espectro disponível e tomam decisões baseados nessa informação. Utilizando essa nova abordagem, os rádios serão capazes de utilizar o espectro disponível de forma mais oportunista [3].

As redes cognitivas irão prover alta largura de banda a usuários móveis via arquiteturas sem fio heterogêneas e técnicas de acesso dinâmico ao espectro. O rádio cognitivo pode ser definido como um rádio que pode modificar seus parâmetros de comunicação baseados na interação com o ambiente no qual opera. Mais especificamente, a tecnologia do rádio cognitivo permitirá que usuários determinem quais porções do espectro estão disponíveis, bem como detectar a presença de usuários licenciados, quando estão operando em uma banda licenciada (sensoriamento de espectro). Dadas as informações sobre o ambiente em que operam, os rádios serão capazes de selecionar o melhor canal disponível (gerenciamento de espectro), coordenar o acesso ao canal com outros usuários (compartilhamento de espectro) e desocupar o canal quando um usuário licenciado é detectado, no caso de operação em bandas licenciadas (mobilidade de espectro) [3].

### Sensoriamento de Espectro

O sensoriamento de espectro é baseado na observação local de sinais oriundos de transmissores e outras fontes de interferência. Três exemplos de esquemas de detecção que podem ser utilizados são: *matched filter detection*, detecção de energia e detecção de característica cicloestacionária [3].

Quando não se tem informações suficientes dos transmissores, a detecção de energia se mostra como a melhor opção para detecção desses transmissores em uma rede. De forma simples, para realizar a detecção de energia é necessário definir um limiar que vai determinar a presença ou não de um usuário licenciado. Quanto menor o limiar, menor a probabilidade de interferência com usuários licenciados, porém parte da banda disponível pode ser desperdiçada devido a alarmes falsos. Por outro lado, utilizando um limiar alto, é garantida uma utilização mais efetiva da banda disponível, porém o risco de interferência aumenta.

A técnica de detecção de energia é fácil de implementar, porém apresenta problemas em ambientes com muito ruído. Outro problema com essa técnica é que ela não é capaz de diferenciar sinais, apenas detecta a presença dos mesmos, o que resulta em alarmes falsos [3].

No caso de bandas não licenciadas, como a ISM, na qual não se faz necessária a detecção de usuários licenciados, apenas a informação sobre ocupação da banda, independentemente da fonte, pode ser suficiente para a seleção do melhor canal disponível.

### B. Padrão IEEE 802.11b

O padrão IEEE 802.11b é um padrão que visa oferecer tecnologia para redes locais sem fio com alta taxa de transferência e alta disponibilidade, operando na faixa de 2.4GHz. Esse padrão define a camada física e a camada de acesso ao meio. O meio físico de comunicação é dividido em canais de frequência, sendo definidos 11 canais para utilização desse padrão nos Estados Unidos e Brasil, por exemplo. As faixas de frequência dos canais definidos pelo padrão são detalhadas na tabela 1. O estudo experimental apresentado nesse artigo foi realizado seguindo essa especificação [7] [10].

TABELA I  
FREQUÊNCIAS DOS CANAIS RELATIVOS AO IEEE 802.11B

Canal	Frequência mais baixa (Hz)	Frequência central (Hz)	Frequência mais alta (Hz)
1	2.401	2.412	2.423
2	2.404	2.417	2.428
3	2.411	2.422	2.433
4	2.416	2.427	2.438
5	2.421	2.432	2.443
6	2.426	2.437	2.448
7	2.431	2.442	2.453
8	2.436	2.447	2.458
9	2.441	2.452	2.463
10	2.451	2.457	2.468
11	2.451	2.462	2.473

### C. Padrão IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 é um padrão que visa oferecer uma solução escalável, de baixo consumo e baixo custo para redes de sensores sem fio. Esse padrão pode operar em três faixas de frequências dependendo da região. São definidos 16 canais de

operação na banda ISM de 2.4 GHz. As faixas de frequência dos canais definidos pelo padrão na banda ISM de 2.4 GHz são detalhadas na tabela 2. O estudo experimental apresentado nesse artigo foi realizado seguindo essa especificação [8].

TABELA II  
FREQUÊNCIAS DOS CANAIS RELATIVOS AO IEEE 802.15.4

Canal	Frequência mais baixa (Hz)	Frequência central (Hz)	Frequência mais alta (Hz)
1	2.404	2.405	2.406
2	2.409	2.410	2.411
3	2.414	2.415	2.416
4	2.419	2.420	2.421
5	2.424	2.425	2.426
6	2.429	2.430	2.431
7	2.434	2.435	2.436
8	2.439	2.440	2.441
9	2.444	2.445	2.446
10	2.449	2.450	2.451
11	2.454	2.455	2.456
12	2.459	2.460	2.461
13	2.464	2.465	2.466
14	2.469	2.470	2.471
15	2.474	2.475	2.476
16	2.479	2.480	2.481

### III. METODOLOGIA

#### A. Design do Experimento

O experimento é dividido em duas etapas, focando uma hipótese por etapa. Na primeira etapa do experimento foram feitas medidas da ocupação do espectro em dois tipos de ambientes por determinados períodos de tempo, com o objetivo de verificar a distribuição do uso do espectro nesses ambientes. Com este propósito, o espectro foi dividido em canais, no qual a determinação dos canais é feita de acordo com os padrões. Foi feita então uma comparação entre os valores de potência induzidos em cada canal.

Na segunda etapa, foi estudado o efeito da inserção de uma nova fonte de interferência no ambiente. Para esse estudo, foi atribuído um valor constante para a variável “ambiente”. A seguir são detalhados os fatores e variáveis de resposta consideradas no experimento:

##### Primeira Etapa

- Fatores Secundários (FS1)

FS1-1 - Ambiente: este fator é categórico e possui dois níveis: ambiente residencial e universidade.

FS1-2 – Padrão: este fator é categórico e possui dois níveis: IEEE 802.11b e IEEE 802.15.4.

- Fatores Primários (FP1)

FP1-1 - Canal: este fator é categórico e possui:

11 níveis para o padrão IEEE 802.11b: canal 1, canal 2,..., canal 11

16 níveis para o padrão IEEE 802.15.4: canal 1, canal 2,..., canal 16

- Variáveis de Resposta (VR1)

VR1-1 – Ocupação do Espectro: esta variável de resposta diz respeito à potência induzida na faixa de espectro relativa ao canal.

##### Segunda Etapa

- Fatores Secundários (FS2)

FS2-1 – Padrão: este fator é categórico e possui dois níveis: IEEE 802.11b e IEEE 802.15.4.

- Fatores Primários (FP2)

FP2-1 - Canal: este fator é categórico e possui:

11 níveis para o padrão IEEE 802.11b: canal 1, canal 2,..., canal 11

16 níveis para o padrão IEEE 802.15.4: canal 1, canal 2,..., canal 16

FP2-2 – Fontes de Interferência: este fator é categórico e possui dois níveis: forno microondas ligado e forno microondas desligado.

- Fatores Constantes (FC2)

FC2-1 - Ambiente: este fator é categórico e possui um único nível: ambiente residencial.

- Variáveis de Resposta (VR2)

VR2-1 – Ocupação do Espectro: esta variável de resposta diz respeito à potência induzida na faixa de espectro relativa ao canal.

Como a quantidade de fatores é pequena e a quantidade de níveis para cada fator também é pequena, excetuando o fator “Canal”, será utilizado um design fatorial completo. Apesar de a quantidade de níveis do fator “Canal” ser grande, o instrumento utilizado no experimento é capaz de realizar medição em todos os níveis de forma suficientemente rápida.

Para aumentar a validade dos resultados, foram realizadas doze replicações do experimento na primeira etapa e três replicações na segunda etapa.

Com isso, tivemos para a primeira etapa um experimento de um fator, visto que temos apenas um fator primário, e para a segunda etapa tivemos um experimento de dois fatores com replicação, visto que temos dois fatores primários.

##### B. Definição das Hipóteses

Com o objetivo de guiar a definição das hipóteses, são formulados os seguintes questionamentos:

- A utilização da banda ISM ocorre de maneira uniforme em toda faixa de espectro disponível?
- A inclusão de uma fonte de interferência altera de maneira significativa a distribuição de utilização da banda?

Para o primeiro questionamento acredita-se que a resposta correta seja negativa. Como os rádios seguem uma política de atribuição estática do espectro, eles tendem a não fazer um uso equilibrado da faixa de espectro disponível.

Para o segundo questionamento, acredita-se que a resposta correta seja afirmativa. Quando ocorre a introdução de novas fontes de interferência a distribuição de uso ao longo do espectro sofre uma alteração e essa alteração pode exigir uma reconfiguração dos rádios presentes na rede, com o objetivo de fazer um uso mais oportunista do espectro disponível.

### Formalização das Hipóteses

Temos que  $f_j \in F$  é uma componente de frequência do espectro e  $F$  é o conjunto de todas as componentes de frequência do espectro consideradas no experimento.

Seja  $c_r$  um canal de comunicação e  $CF_r$  o conjunto de frequências relativo ao canal  $c_r$ , onde  $CF_r \subseteq F$ .

Temos que a potência induzida na componente de frequência  $f_j$  do espectro em um determinado instante  $t$ , é denotada por  $p_t(f_j)$ , e a potência  $P_t(c_r)$  induzida no canal  $c_r$ , em um determinado instante  $t$ , obtida através da média entre as potências das componentes de frequências pertencentes a  $CF_r$ , é dada por:

$$P_t(c_r) = \frac{\sum_{f_j \in CF_r} p_t(f_j)}{|CF_r|}$$

O valor médio de potência em um canal  $c_r$ , em um determinado intervalo de tempo discreto  $\Delta t_w$ , denotado por  $\overline{P(c_r)_w}$ , é obtido através da média dos valores de  $P_t(c_r)$  medidos em cada instante durante o intervalo de tempo  $\Delta t_w$ .

Temos que  $S_k$  é o conjunto de canais para um dado padrão  $k$ , onde  $k = \{IEEE\ 802.11b, IEEE\ 802.15.4\}$ .

Portanto, seguindo a formalização definida anteriormente, podemos definir a primeira hipótese como segue:

- H1-0 (hipótese nula): Para um dado padrão  $k$  e um dado intervalo de tempo  $\Delta t_w$ , temos que  $\overline{P(c_m)_w} = \overline{P(c_n)_w}$ ,  $\forall c_m, c_n \in S_k$ , considerando certo nível de significância.
- H1-1 (hipótese alternativa): Para um dado padrão  $k$  e um dado intervalo de tempo  $\Delta t_w$ , temos que  $\exists c_n, c_m \in S_k$ , tal que  $\overline{P(c_m)_w} \neq \overline{P(c_n)_w}$ , considerando certo nível de significância

Seja  $IS_w$  o conjunto de fontes de interferência presentes no meio em um determinado intervalo de tempo  $\Delta t_w$ . Supomos que, durante o intervalo de tempo  $\Delta t_w$ , a quantidade de fontes de interferência permanece constante.

Seja  $IS_b$  o conjunto de fontes de interferência presentes no meio em um determinado intervalo de tempo  $\Delta t_b$ , e  $IS_a$  é o conjunto de fontes de interferência após a inserção de uma nova fonte de interferência em  $IS_b$ , em um determinado intervalo de tempo  $\Delta t_a$ .

Seguindo a formalização e a suposição definida anteriormente, podemos definir a segunda hipótese como segue:

- H2-0 (hipótese nula): Para um dado padrão  $k$ , temos que, se  $\overline{P(c_m)_b} \leq \overline{P(c_n)_b}$ , então  $\overline{P(c_m)_a} \leq \overline{P(c_n)_a}$ ,  $\forall c_n, c_m \in S_k$ , considerando certo nível de significância.
- H2-1 (hipótese alternativa): Para um dado padrão  $k$ , temos que  $\exists c_n, c_m \in S_k$ , tal que, se  $\overline{P(c_m)_b} \leq \overline{P(c_n)_b}$ , então  $\overline{P(c_m)_a} > \overline{P(c_n)_a}$ , considerando certo nível de significância.

### C. Ameaças à Validade

O momento em que o experimento é realizado poderia afetar as conclusões, visto que o padrão de ocupação do espectro pode variar com o tempo. Porém, o experimento foi replicado várias vezes, permitindo observar o comportamento da variável de resposta em diversos momentos, evitando assim restringir as conclusões a um intervalo de tempo específico.

Não existem fatores não controlados e com potencial de influenciar as conclusões referentes à primeira hipótese. O sensor utilizado para captação do espectro mede apenas a potência existente ao longo do espectro e acredita-se que não haja meio de induzir uma captação de potência no sensor sem que essa potência seja também induzida no espectro.

Para a segunda hipótese existe uma ameaça de validade, visto que não será possível obter controle total sobre o fator primário FP2-2 (fontes de interferência). No momento da inserção de uma nova fonte de interferência, pode ocorrer entrada ou saída de outras fontes de interferência de maneira não controlada. Além disso, pode existir ruído inerente ao meio, capaz de causar uma alteração na distribuição de uso do espectro. Para minimizar essa ameaça à validade foram feitas replicações do experimento.

Algumas conclusões obtidas através do estudo experimental não poderão ser aplicadas além do escopo do estudo. Isso se deve à limitação na quantidade de ambientes estudados. Logo, essas conclusões serão representativas apenas para ambientes semelhantes aos estudados. Outros ambientes podem apresentar um conjunto diferente de fontes de interferência e que ocupam o espectro seguindo um padrão diferente.

### D. Metodologia para Análise dos Dados

Na primeira etapa de experimentos os dados foram analisados com o objetivo de testar a hipótese *H1*. Para esse fim, foram feitos estudos em dois ambientes definidos para o fator secundário FS1-1(Ambiente), e os dados foram analisados a partir do ponto de vista de dois padrões, o IEEE 802.11b e o IEEE 802.15.4, definidos como níveis do fator secundário FS1-2(Padrão).

Para testar a hipótese *H1*, os valores médios de potência  $\overline{P(c_r)_w}$  medidos para cada canal  $c_r$ , em cada padrão  $k$  e durante determinados intervalos de tempo  $\Delta t_w$ , foram analisados para verificar se podemos refutar a hipótese nula. Para que a hipótese nula não seja refutada, não deve haver diferença significativa entre os níveis de potência de cada canal, considerando certo nível de significância. Para descobrir se existem ou não diferenças significantes, foram

realizados testes estatísticos apropriados para esse fim. Apesar de os dados coletados terem sido normalizados, através do cálculo de médias, a quantidade de replicações foi relativamente pequena. Portanto, os dados foram analisados para verificar se seguem a distribuição normal, permitindo decidir por utilizar análise de variância ou um método não paramétrico.

Na segunda etapa de experimentos, os dados foram analisados com o objetivo de testar a hipótese  $H_2$ . Nessa etapa foram realizados testes em apenas um ambiente, que foi definido pelo fator constante FC2-1 (Ambiente). Também foi feita uma análise a partir da perspectiva dos padrões IEEE 802.11b e IEEE 802.15.4, definidos como níveis do fator secundário FS2-1 (Padrão).

Para testar a hipótese  $H_2$ , os valores médios de potência  $\overline{P(c_r)_b}$  medidos para cada canal  $c_r$ , para cada padrão  $k$  e durante um intervalo de tempo  $\Delta t_b$ , foram comparados com os valores médios de potência  $\overline{P(c_r)_a}$ , para cada canal  $c_r$  em um intervalo de tempo  $\Delta t_a$ . Durante o intervalo de tempo  $\Delta t_b$ , foi atribuído ao fator primário FP2-2 (Fontes de Interferência) o nível “microondas desligado”, enquanto que no intervalo de tempo  $\Delta t_a$  foi atribuído o nível “microondas ligado”. Verificou-se se existe ou não de diferença significativa na distribuição de uso do espectro nos intervalos de tempo  $\Delta t_b$  e  $\Delta t_a$ , ou seja, se os níveis de potência relativos dos canais permanecem os mesmos, de acordo com a definição formal da hipótese  $H_2$ .

#### E. Instrumentação

A infra-estrutura necessária para realização do projeto experimental é formada por um componente de hardware e um componente de software. A Figura 1 mostra os componentes da infra-estrutura e a interface de comunicação entre eles.

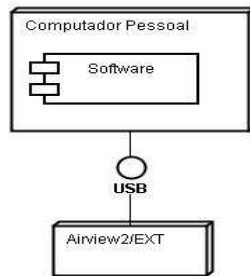


Figura 1. Diagrama de Distribuição referente à Infra-estrutura do Experimento.

O Airview2/EXT [11] é um hardware capaz de realizar medição de potência ao longo da banda ISM, na faixa de 2.4 GHz. O Airview2/EXT realiza uma varredura que abrange um espectro de frequências variando de 2.399 MHz a 2.485 MHz. São colhidos pontos em intervalos de 0,5 MHz, resultando em 173 medições por varredura.

Um software foi responsável por realizar a comunicação com o Airview2/EXT para aquisição dos dados das varreduras. O software também realizou o processamento dos dados para extrair algumas informações necessárias para o teste das hipóteses.

#### F. Configuração do Experimento

A Tabela 3 resume a configuração utilizada para realização dos experimentos.

TABELA III  
PARÂMETROS DO EXPERIMENTO

Parâmetros do Experimento	
Faixa de Frequência Considerada no Experimento (MHz)	2.401 a 2.481
Quantidade de componentes de frequência consideradas ( $ F $ )	161
Intervalo entre Frequências (MHz)	0,5
Duração dos Intervalos de Tempo de Aquisição ( $\Delta t_w$ )	2 minutos
Taxa de Aquisição do Instrumento (não configurável)	605 amostras por segundo (3,5 amostras por componente de frequência)

A unidade dos valores de potência adquiridos através do Airview2/EXT é o *decibel (dBm)*. Para realização de cálculos com os valores, foi necessária a conversão para *miliwat (mW)*, visto que o *dBm* se apresenta como uma unidade logarítmica, logo algumas operações, como média aritmética, não podem ser realizadas diretamente nessa unidade. Os resultados, entretanto, são mostrados na unidade *dBm*, visto que essa unidade é o padrão para a notação de potência em redes sem fio.

#### IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção mostra os resultados obtidos através da análise estatística dos dados colhidos no experimento. Através dos resultados obtidos foi possível realizar o teste das hipóteses. O nível de confiança utilizado em todos os testes foi de 95%.

##### A. Primeira Etapa de Experimentos (Teste da Hipótese $H_1$ )

##### Experimentos para o Padrão IEEE 802.11b

Esta seção foca os resultados obtidos levando em consideração o padrão IEEE 802.11b, um dos níveis definidos pelo fator secundário FS1-2 (Padrão).

A primeira parte do experimento foi realizada em um laboratório na Universidade Federal de Campina Grande, correspondendo ao ambiente “Universidade”, definido como um dos níveis do fator secundário FS1-1 (Ambiente).

Foi observado que os dados coletados, apesar de terem sido obtidos a partir de médias, não seguem uma distribuição normal. Isso pode ser explicado pela pequena quantidade de amostras utilizadas no experimento (doze). Portanto, optamos por um teste não-paramétrico para verificar se existe diferença entre os níveis de potência dos canais. Foi realizado um teste de *Kruskal-Wallis*. Na tabela 4 podemos verificar as informações obtidas a partir do teste.

Tabela 4. Resultados do Teste de *Kruskal-Wallis*.

Informação	Valor
Kruskal-Wallis qui-quadrado	120,216724
Graus de Liberdade	10
P-valor	4,57271E-21

A partir dos resultados do teste podemos concluir que, para o nível de confiança de 95%, existe diferença entre o nível de potência de pelo menos um canal em relação aos demais.

A figura 2 mostra graficamente os intervalos de confiança obtidos para o ambiente “universidade”, no qual o eixo  $x$  corresponde ao canal e o eixo  $y$  corresponde à potência média, na unidade  $dBm$ .

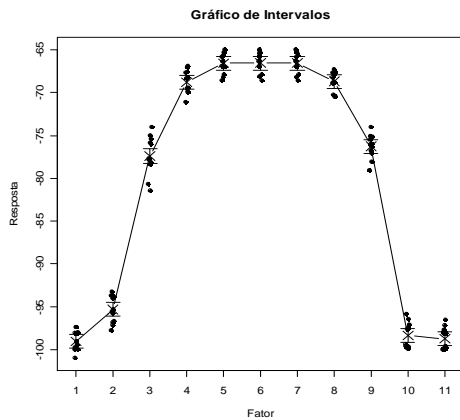


Figura 2. Intervalos de Confiança (Ambiente: “universidade”; Padrão: IEEE 802.11b).

Através do teste e da análise dos intervalos de confiança, é possível observar que existem canais que possuem um menor nível de atividade em relação aos outros, ou seja, não existe simetria na utilização do espectro disponível. Portanto, a hipótese  $H1-0$  é refutada para esse experimento.

A segunda parte do experimento foi realizada em um ambiente residencial. Foi observado que os dados coletados, apesar da pequena quantidade de amostras (doze), se aproximam da distribuição normal. Portanto, optamos por realizar análise de variância para verificar se existe diferença entre os níveis de potência dos canais. Na tabela 5 podemos verificar as informações obtidas a partir do teste.

Tabela 5. Resultados da Análise de Variância.

Tabela da Anova	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Estatística F
Canal	10	3028,65716	302,865716	432,4179
Resíduos	121	84,7484591	0,70040048	

A partir dos resultados do teste podemos concluir que, para o nível de confiança de 95%, existe diferença entre o nível de potência de pelo menos um canal em relação aos demais.

Foi observado que os resíduos se aproximam da distribuição normal. Além disso, os resíduos são uma ordem de magnitude menor que os valores da variável de resposta. Portanto, podemos confiar no resultado obtido a partir da análise de variância.

A figura 3 mostra graficamente os intervalos de confiança obtidos para o ambiente residencial, no qual o eixo  $x$  corresponde ao canal e o eixo  $y$  corresponde à potência média, na unidade  $dBm$ .

Através do teste  $F$  e da análise dos intervalos de confiança, é possível observar que existem canais que possuem um menor nível de atividade, ou seja, não existe simetria na utilização do espectro disponível. Portanto, a hipótese  $H1-0$  é refutada também para esse experimento.

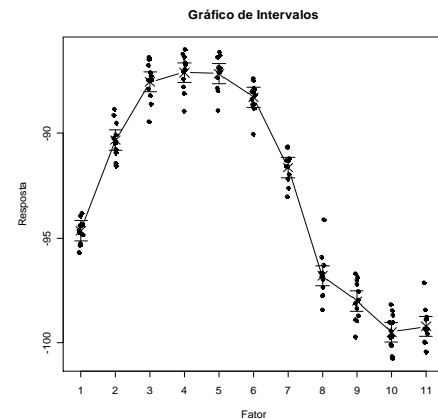


Figura 3. Intervalos de Confiança (Ambiente: “residencial”; Padrão: IEEE 802.11b).

#### Experimentos para o Padrão IEEE 802.15.4

Esta seção foca os resultados obtidos levando em consideração o padrão IEEE 802.15.4, um dos níveis definidos pelo fator secundário FS1-2 (Padrão).

A primeira parte do experimento foi realizada em um laboratório na Universidade Federal de Campina Grande. Foi observado que os dados coletados não seguem a distribuição normal. Portanto, foi realizado um teste de *Kruskal-Wallis*. Na tabela 6 podemos verificar as informações obtidas a partir do teste.

Tabela 6. Resultados do Testes de *Kruskal-Wallis*.

Informação	Valor
Kruskal-Wallis qui-quadrado	68,39499525
Graus de Liberdade	16
P-valor	1,90304E-08

A partir dos resultados do teste, podemos concluir que, para o nível de confiança de 95%, existe diferença entre o nível de potência de pelo menos um canal em relação aos demais.

A figura 4 mostra graficamente os intervalos de confiança obtidos para o ambiente “universidade”, no qual o eixo  $x$  corresponde ao canal e o eixo  $y$  corresponde à potência média, na unidade  $dBm$ .

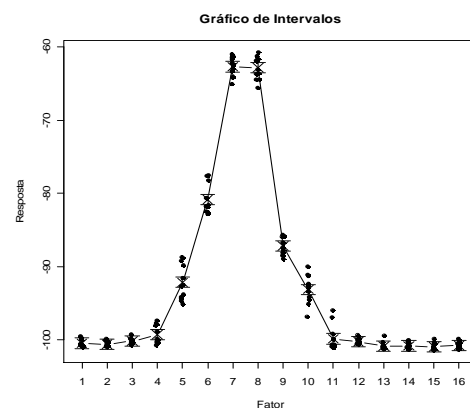


Figura 4. Intervalos de Confiança.

Através do teste e da análise dos intervalos de confiança, é possível observar que existem canais que possuem um menor nível de atividade, ou seja, não existe simetria na utilização do espectro disponível. Portanto, a hipótese  $H1-0$  é refutada também para esse experimento.

A segunda parte do experimento foi realizada em um ambiente residencial. Foi observado que os dados também não seguiram a distribuição normal. Portanto, optamos também pelo teste de *Kruskal-Wallis*. Na tabela 7 podemos verificar as informações obtidas a partir do teste.

Tabela 7. Resultados do Testes de *Kruskal-Wallis*.

Informação	Valor
Kruskal-Wallis qui-quadrado	37,9162136
Graus de Liberdade	16
P-valor	0,001555527

A partir dos resultados do teste, podemos concluir que, para o nível de confiança de 95%, existe diferença entre o nível de potência de pelo menos um canal em relação aos demais.

A figura 5 mostra graficamente os intervalos de confiança obtidos para o ambiente residencial, no qual o eixo  $x$  corresponde ao canal e o eixo  $y$  corresponde à potência média, na unidade  $dBm$ .

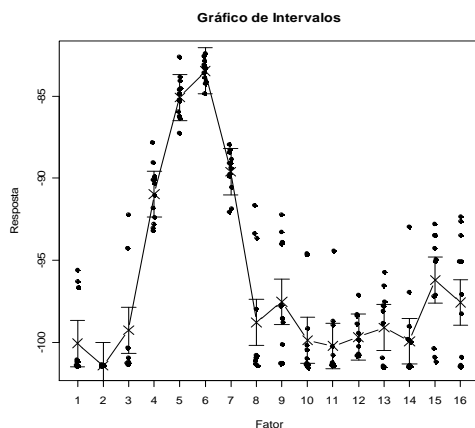


Figura 5. Intervalos de Confiança.

Através do teste e da análise dos intervalos de confiança, é possível observar que existem canais que possuem um menor nível de atividade, ou seja, não existe simetria na utilização do espectro disponível. Portanto, a hipótese  $H1-0$  é refutada também para esse experimento.

### B. Segunda Etapa de Experimentos (Teste da Hipótese $H2$ )

Essa etapa de experimentos teve como objetivo avaliar o impacto da inserção de uma nova fonte de interferência no ambiente. O ambiente foi considerado constante e os níveis de potência dos canais foram analisados, para intervalos de tempo antes ( $\Delta t_b$ ) e depois ( $\Delta t_a$ ) da inserção da nova fonte de interferência.

Foram adquiridos dados de potência dos canais no ambiente por seis intervalos de tempo. Em três desses intervalos de tempo, foi colocado em funcionamento um novo dispositivo (forno microondas) a poucos metros do ponto de medição. As medições com e sem a inclusão do novo dispositivo no

conjunto de fontes de interferência foram feitas de forma intercalada, com o objetivo de minimizar o risco de uma possível mudança não controlada no ambiente durante as medições.

### Experimentos para o Padrão IEEE 802.11

A figura 6 mostra graficamente os intervalos de confiança obtidos para o padrão IEEE 802.11b, no qual o eixo  $x$  corresponde ao canal e o eixo  $y$  corresponde à potência média, na unidade  $dBm$ .

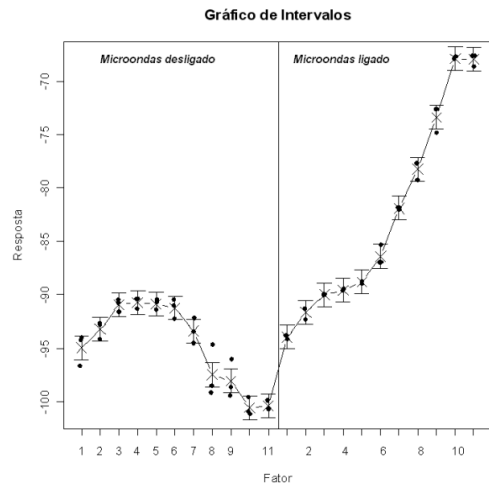


Figura 6. Intervalos de Confiança (Padrão: IEEE 802.11b)

A figura 7 mostra o gráfico de interação entre os fatores, no qual pode ser observado o impacto da ativação do forno microondas no nível médio de potência dos canais.

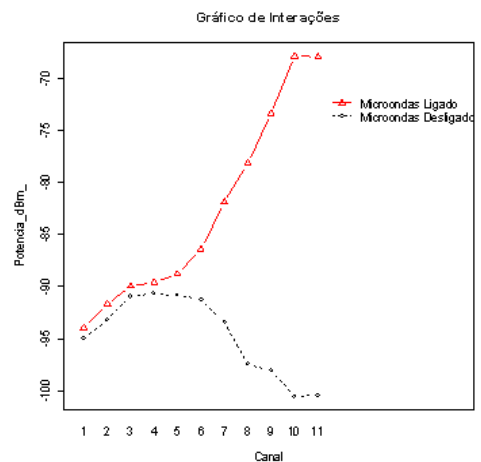


Figura 7. Gráfico de Interações (Padrão: IEEE 802.11b).

A partir da análise dos intervalos de confiança, podemos observar que a inserção de uma nova fonte de interferência influencia na distribuição de uso do espectro. Alguns canais que possuíam baixo nível relativo de potência antes da inserção da nova fonte de interferência, passaram a possuir um alto nível relativo de potência. Portanto, a hipótese  $H2-0$  é refutada para esse experimento.



### Experimentos para o Padrão IEEE 802.15.4

A figura 8 mostra graficamente os intervalos de confiança obtidos para o padrão IEEE 802.15.4, no qual o eixo  $x$  corresponde ao canal e o eixo  $y$  corresponde à potência média, na unidade  $dBm$ .

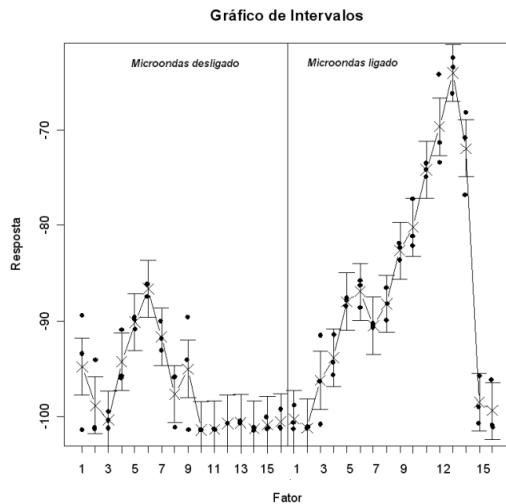


Figura 8. Intervalos de Confiança (Padrão: IEEE 802.15.4)

A figura 9 mostra o gráfico de interação entre os fatores, no qual pode ser observado o impacto da ativação do forno microondas no nível médio de potência dos canais.

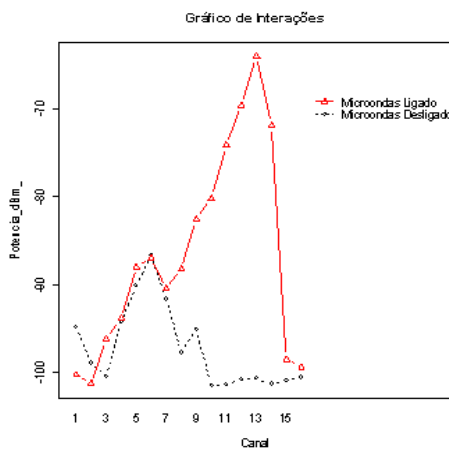


Figura 9. Gráfico de Interações (Padrão: IEEE 802.15.4).

A partir da análise dos intervalos de confiança, podemos observar que a inserção de uma nova fonte de interferência influencia na distribuição de uso do espectro. Alguns canais que possuíam baixo nível relativo de potência antes da inserção da nova fonte de interferência, passaram a possuir um alto nível relativo de potência. Portanto, a hipótese  $H2-0$  é refutada também para esse experimento.

### V. CONCLUSÕES

O estudo comprovou que, para determinados ambientes, pode haver espaços subutilizados no espectro. Conseqüentemente, a partir de uma atribuição dinâmica do espectro pelos rádios, pode-se obter uma melhor qualidade de

comunicação. Nos exemplos estudados, observa-se também a diferença na utilização nos diversos ambientes.

O estudo comprovou que, para os cenários estudados, a inserção de uma nova fonte de interferência no ambiente é capaz de modificar o padrão de utilização do espectro, exigindo que em alguns casos, para continuar com a mesma qualidade de serviço, seja necessária a realocação de canal por parte dos rádios. Essa realocação por parte dos rádios só é possível se eles utilizarem uma abordagem de atribuição dinâmica do espectro.

Como continuidade desse trabalho, espera-se realizar experimentos em ambientes totalmente controlados com o objetivo de realizar uma caracterização fiel da co-existência entre dispositivos. Seguindo a mesma metodologia descrita no artigo, pretende-se realizar estudos em ambientes onde a ocupação espectral se apresenta como um fator crítico de operação, como em um ambiente industrial, por exemplo. Outro ponto interessante a se investigar é a inter-relação entre mobilidade e utilização espectral em redes móveis sem fio. A partir de estudos experimentais, pretende-se definir métricas de mobilidade que levem em consideração a utilização espectral.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo fornecimento da bolsa de Mestrado.

### REFERÊNCIAS

- [1] Tanenbaum, A. S. Redes de Computadores. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003
- [2] The Internet of things – ITU-T Executive Report, 2005
- [3] I. F. Akyildiz, W. Lee, M. C. Vuran, S. Mohanty, A NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey. Computer Networks: Elsevier, 2006.
- [4] DIY 2.4 GHz Spectrum Analyser. Disponível em: <<http://www.wireless.org.au/~jhecker/specan>>. Acessado em: 11 de agosto de 2010.
- [5] Hanyu Li, Mubashir Syed, Yu-Dong Yao, and Theodoros Kamakaris. Spectrum Sharing in an ISM Band: Outage Performance of a Hybrid DS/FH Spread Spectrum System with Beamforming. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. Volume 2009, Article ID 834527.
- [6] Raul Etkin, Abhay Parekh, and David Tse, Spectrum Sharing for Unlicensed Bands. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 25, no. 3, april 2007.
- [7] IEEE Std 802.11™-2007. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.
- [8] IEEE Std 802.15.4™-2006. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs).
- [9] M. Biggs, A. Henley and T. Clarkson. Occupancy Analysis of the 2.4GHz ISM Band. IEE Proceedings Communications., Vol. 151, No. 5, October 2004
- [10] <http://www.moonblinkwifi.com/2point4freq.cfm>. Acessado em: 11 de agosto de 2010.
- [11] <<http://www.ubnt.com/airview>>. Acessado em: 11 de agosto de 2010.
- [12] Raj Jain, The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation and Modeling, John Wiley, 1991, ISBN: 0-471-50336-3.
- [13] K. S. Trivedi, Probability and Statistics with Reliability, Queuing, and Computer Science Applications, 2nd Edition, WileyBlackwell, 2001, ISBN: 978-0471333418
- [14] <<http://portalaction.com.br/>>. Acessado em: 11 de agosto de 2010.