

# Análise do Comportamento de Canais UHF Utilizando Sensoriamento Espectral, Geo-localização e Modelos de Propagação

Gabriel Wanderley Albuquerque Silva



CENTRO DE INFORMÁTICA (CIN)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO (UFPE)

Recife, 2017

Gabriel Wanderley Albuquerque Silva

# Análise do Comportamento de Canais UHF Utilizando Sensoriamento Espectral, Geo-localização e Modelos de Propagação

Monografia apresentada ao curso Engenharia da Computação  
do Centro de Informática, da Universidade Federal de Pernambuco,  
como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenheiro da Computação.

Orientador: Kelvin Lopes Dias

Julho de 2017



CENTRO DE INFORMÁTICA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia da Computação intitulado *Análise do Comportamento de Canais UHF Utilizando Sensoriamento Espectral, Geo-localização e Modelos de Propagação* de autoria de Gabriel Wanderley Albuquerque Silva, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

---

Prof. Dr. Kelvin Lopes Dias  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Daniel Carvalho da Cunha  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Coordenador do Curso de Engenharia da Computação Centro de Informática  
Prof. Dr. Renato Mariz de Moraes  
CIn/UFPE

Recife, 20 de Julho de 2017

Centro de Informática, Universidade Federal de Pernambuco  
Av. Jorn. Aníbal Fernandes, s/n, Cidade Universitária, Recife, Pernambuco, Brasil CEP: 50740-560  
Fone: +55 (81) 2126-8430

*Lembremo-nos de que o homem interior se renova sempre. A luta enriquece-o de experiência, a dor aprimora-lhe as emoções e o sacrifício tempera-lhe o caráter. O Espírito encarnado sofre constantes transformações por fora, a fim de acrisolar-se e engrandecer-se por dentro.*

*Chico Xavier*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por proporcionar todas essas oportunidades de aprendizado na minha vida e por zelar sempre pela minha evolução espiritual.

À minha mãe, Rosileide Albuquerque, que sempre deu o seu melhor para me educar na honestidade e na caridade. Sempre me amou como ninguém. Tudo que faço é por ti. Também à minha madrinha Gorete Albuquerque e à minha avó Neuza Albuquerque, que me educaram e me fizeram chegar até aqui.

À minha família, que sempre acreditou no meu potencial acadêmico, profissional e humano.

A meu orientador, Prof. Kelvin Lopes, pelo suporte e pela confiança depositada no meu trabalho. Agradeço em especial a Andson Balieiro, pelo auxílio na orientação do trabalho e por ter sido peça importante no desenvolvimento deste. Agradeço também a Marcos Falcão e a Francisco Mendonça pelo acompanhamento nas pesquisas.

Ao Convênio CIn/Motorola pelo apoio e suporte no desenvolvimento desta pesquisa, disponibilizando os equipamentos necessários. Também ao Centro de Informática e todos os seus professores, coordenadores e alunos pela base a qual foi essencial para esta construção acadêmica.

A meus amigos da minha cidade natal, Sirinhaém. Com o apoio deles, construí essa personalidade confiante e positiva que levo para todos os aspectos da vida. Em especial, agradeço a Nara Brito e a Talita Messias por terem suportado minhas inseguranças e terem estado comigo em diversos momentos importantes. Aos meus amigos do Recife também, em especial a Natália Brito, por me dar a segurança necessária.

A meus amigos da turma de Engenharia da Computação 2012.1 por terem passado por todos esses obstáculos juntos comigo. Em especial a Eduardo Cintra, Felipe Nunes, Graciliano Galindo, Larissa Lages e Letícia Lapenda por compartilhar experiências acadêmicas e sentimentos de afeto.

A meus amigos do Centro de Informática Heitor Fonseca e Alice Zloccowick por me apoiarem em todas as decisões corretas. Em especial, a Maria Luiza por auxiliar nas medições de campo e pela ajuda dada em cada situação importante. A proteção e o amparo de vocês é muito importante pra mim.

Aos meus amigos do Convênio OKI Brasil-CIn, pelo apoio dado nesse período de desenvolvimento do Trabalho de Graduação e pelo clima de descontração.

A todos que ajudaram a construir, direta ou indiretamente, a pessoa que sou hoje. Muito Obrigado.

## RESUMO

A escassez do espectro eletromagnético voltado para as transmissões sem fio tem incentivado o desenvolvimento de tecnologias que visam a melhor utilização dessas faixas de espectro. Uma dessas novas abordagens é a tecnologia de Rádios Cognitivos, que visa o acesso oportunista a canais que podem pertencer a usuários licenciados. A técnica de sensoriamento auxilia no processo de decisão do uso do canal. Dois tipos de monitoramento do espectro são abordados: sensoriamento em tempo real e consulta à base de dados geo-localizada (BDGL). O uso de base de dados geo-localizada para análise do espectro é uma técnica que evita problemas apresentados pelo sensoriamento em tempo real e o estudo prévio do espectro para geração desta BDGL é essencial. Neste trabalho, dois tipos de análise são realizadas. Na primeira delas, analisamos os níveis de potência recebida em três localidades do Campus da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) baseados no sensoriamento em tempo real em ambientes *indoor* e *outdoor*. Nesta análise, são levantados problemas que afetam esses dois tipos de cenários e seus impactos investigados. Após explorar este cenário, modelos de propagação que refletem melhor cada localidade e cada tipo de ambiente são sugeridos. Na segunda análise, possíveis *TV White Spaces* (TVWS) são apresentados para todos os canais da faixa UHF (*Ultra High Frequency*). Desta forma, obtemos um estudo completo do espectro desta área e faixa de frequência.

**Palavras-chave:** Sensoriamento Espectral ; Base de Dados Geo-localizada, Modelo de Propagação.

## LISTA DE FIGURAS

1	Média do uso do espectro em seis diferentes localidades. . . . .	14
2	Buracos espectrais e oportunidades de uso de canais livres. . . . .	15
3	Fluxo de capacidades cognitivas. . . . .	16
4	Sinal na banda base e sinal após modulação. . . . .	17
5	Processo do método de Detecção de Energia. . . . .	22
6	Efeito Sombreamento. . . . .	23
7	Efeito Propagação Multipercurso. . . . .	23
8	Efeito Nó Escondido. . . . .	24
9	(a) Processo da decisão por BDGL (b) Processo da decisão envolvendo BDGL e Detecção de Energia. . . . .	25
10	Equipamento usado para sensoriamento do espectro: <i>Universal Software Radio Peripheral (USRP)</i> . . . . .	29
11	Esquema da irradiação de antenas de TV. . . . .	30
12	Campus da Universidade Federal e Pernambuco. . . . .	32
13	Ambientes de transmissão e recepção do sinal de TV. . . . .	33
14	Diagrama exemplo da irradiação de uma antena de TV. . . . .	34
15	Nível de perda de percurso. . . . .	40
16	Média do espectro de frequência - Reitoria-UFPE. . . . .	43
17	Média do espectro de frequência - CIn-UFPE. . . . .	43
18	Média do espectro de frequência - CFCH-UFPE. . . . .	44
19	Ocupação relativa do espectro - Reitoria-UFPE. . . . .	45
20	Ocupação relativa do espectro - CIn-UFPE. . . . .	46
21	Ocupação relativa do espectro - CFCH-UFPE. . . . .	46

## LISTA DE TABELAS

1	Parâmetros de sensoriamento. . . . .	29
2	Coordenadas e distância dos pontos de medição para a antena de transmissão. . . . .	33
3	Ambiente <i>outdoor</i> - Comparação entre a potência recebida real e a potência recebida teórica. . . . .	37
4	Ambiente <i>indoor</i> - Comparação entre a potência recebida real e a potência recebida teórica. . . . .	37
5	Ambiente <i>outdoor</i> - <i>Perdas de Percurso</i> . . . . .	39
6	Ambiente <i>indoor</i> - <i>Perdas de Percurso</i> . . . . .	39
7	Ambiente <i>outdoor</i> - Erro médio e desvio padrão. . . . .	39
8	Ambiente <i>indoor</i> - Erro médio e desvio padrão. . . . .	40
9	Erro médio quadrático (EMQ). . . . .	41
10	Melhor modelo de propagação para cada local e ambiente. . . . .	42

## Conteúdo

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	Objetivos . . . . .	12
1.2	Organização do Trabalho . . . . .	12
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>13</b>
2.1	Oportunidade de Uso e <i>TV White Spaces</i> . . . . .	13
2.2	Rádios Cognitivos . . . . .	14
2.3	<i>Rádios Definidos por Software</i> . . . . .	17
<b>3</b>	<b>MODELOS DE PROPAGAÇÃO</b>	<b>18</b>
<b>4</b>	<b>DETECÇÃO DE TVWS</b>	<b>21</b>
4.1	Sensoriamento do Espectro em Tempo Real . . . . .	21
4.1.1	Detecção de Energia . . . . .	21
4.1.2	Efeitos na Potência Recebida . . . . .	22
4.2	Base de Dados Geo-localizada . . . . .	24
4.3	Base de Dados Geo-localizada x Sensoriamento Espectral . . . . .	25
<b>5</b>	<b>ANÁLISE ESPECTRAL E PROPOSTA DE CONSTRUÇÃO DE BASE DE DADOS GEO-LOCALIZADA</b>	<b>28</b>
5.1	Equipamento de Sensoriamento . . . . .	29
5.2	Transmissor de TV . . . . .	30
5.3	Metodologia . . . . .	30
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>36</b>
6.1	Modelos de Propagação - Premissas . . . . .	36
6.2	Definição do Limiar . . . . .	38
6.3	Sinal Captado e Dados dos Modelos de Propagação . . . . .	38
6.4	Oportunidades de Transmissão do Usuário Oportunista . . . . .	42
6.5	Implicações Práticas . . . . .	47

<b>7 CONCLUSÃO</b>	<b>49</b>
<b>8 TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>51</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>51</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O aumento dos dispositivos sem fio e de seus serviços têm feito do espectro eletromagnético um recurso raro. Em decorrência deste fato, a alocação de canais para as diferentes aplicações está sendo complexa. Pesquisas indicam que o espectro de frequência não está escasso, mas sim mal utilizado [1].

Considerando essa configuração do espectro, a tecnologia de Rádios Cognitivos dá suporte para solucionar este problema propondo a identificação de porções do espectro de frequência disponíveis para transmissão [2]. Para planejar este cenário, a tecnologia de Rádios Cognitivos classifica os usuários da rede em dois principais grupos: usuários primários (PU) e usuários secundários (SU). Os UPs detêm os direitos sobre aquela faixa de frequência, então possuem livre acesso ao canal. Ao contrário dos UPs, os USs não possuem a liberdade para transmitir naquela faixa de frequência, estando condicionados à disponibilidade do canal, definida pela presença ou ausência do UP, e precisam garantir que os usuários licenciados não sejam afetados.

Para executar uma transmissão em uma faixa de frequência não ocupada pelo UP daquele canal, os USs precisam garantir que o detentor do canal não está executando nenhuma transmissão em uma certa janela de frequência e de tempo, evitando, assim, uma interferência indesejada na transmissão do usuário licenciado. Para isto, duas principais técnicas são propostas: o sensoriamento em tempo real do espectro de frequência e o sensoriamento por consulta à base de dados contendo dados da regularidade do UP naquela faixa e naquele local. A técnica de sensoriamento em tempo real apresenta diversos desafios, sendo dois dos principais deles a exigência de hardware capaz de executar tal tarefa e o problema da interferência de fenômenos que atrapalham a recepção do sinal [3]. Para minimizar estes problemas, a técnica de sensoriamento por consulta à base de dados geo-localizadas (BDGL) é sugerida e consegue evitar que esses problemas afetem o sensoriamento do canal. Porém, problemas como má construção da BDGL ou impedimento ao acesso a essas bases podem tornar essa abordagem insuficiente. Abordagens híbridas, que agregam aspectos dos dois métodos, podem ser sugeridas.

A troca da transmissão analógica para a transmissão digital do sinal de TV proporcionará uma oportunidade para essas transmissões oportunistas, pois uma larga porção do espectro VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*), também conhecido como *TV White Space* (TVWS), será liberada ao final deste processo [4]. Este processo também está acontecendo na cidade do Recife-PE-Brasil, e uma análise espectral se faz necessária para análise e estudo de possíveis TVWS. Há também a necessidade de suporte a Redes de Campus Wi-Fi, que são redes sem fio pertencentes a uma instituição ou área delimitada. Para construção desta base é necessário sensoriar o espectro da área com um aparelho específico em diferentes faixas de horários e em diferentes localidades. Após este

processo, um modelo de propagação deve ser proposto e a geração da base é dada a partir desses artefatos.

## 1.1 Objetivos

A proposta do Trabalho de Graduação tem como objetivo principal observar a distribuição geográfica de TVWS (*TV White Space*) e embasar a geração de uma base de dados do espectro de um canal de transmissão de uma emissora local baseada na geolocalização do Campus da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Como objetivos específicos, o trabalho irá disponibilizar um estudo do espectro da área, assim como irá propor modelos de propagação baseados em parâmetros de transmissão e medições realizadas nos ambientes do experimento para o sinal transmitido no canal escolhido. Além deste estudo, uma análise envolvendo taxas de ocupação de canal e potência recebida será desenvolvida para todos os 38 canais da banda UHF destinados à transmissão de TV. Também será realizada uma análise das oportunidades de transmissão para USs e serão levantados fatores que podem impactar no desempenho do uso da base de dados.

## 1.2 Organização do Trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: na Seção 2, é dada uma base teórica para execução da proposta, explorando aspectos conceituais e tecnológicos. Já na Seção 3, os modelos de propagação utilizados para análise do espectro local são apresentados. Na Seção 4, foram abordadas as formas de obter o estado atual do espectro e os aspectos positivos e negativos de cada técnica. Na Seção 5, a proposta do projeto é apresentada seguida da metodologia abordada, e, logo após, na Seção 6, os resultados dessa análise são apresentados. Finalizando o trabalho, na Seção 7, algumas conclusões do estudo são feitas e na Seção 8 alguns trabalhos futuros são propostos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

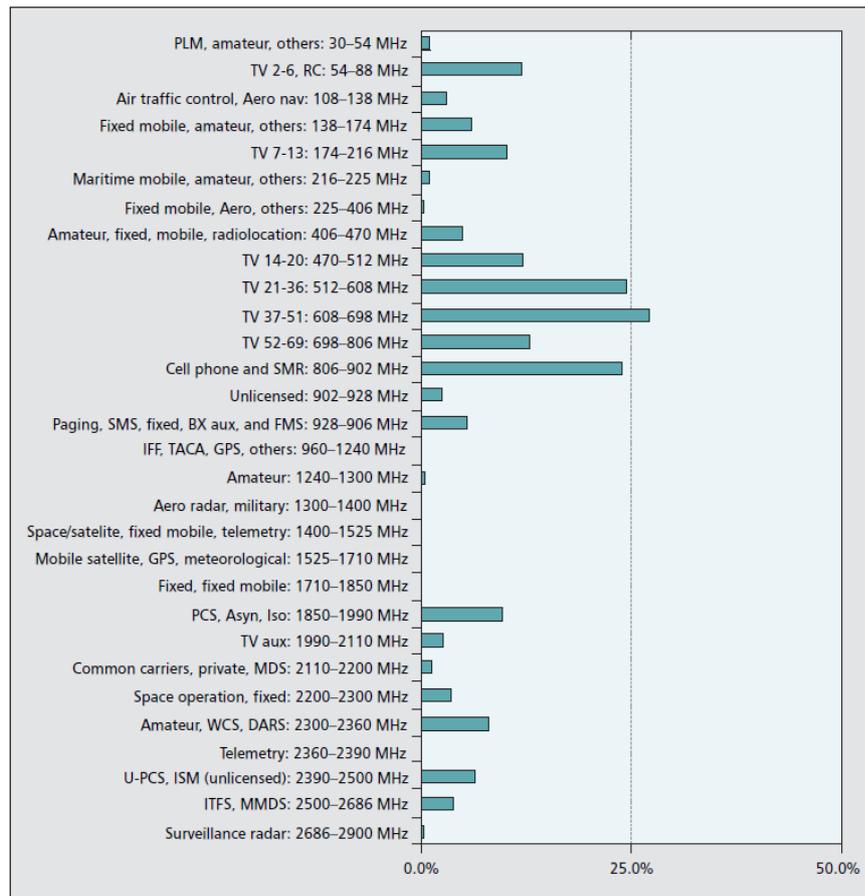
### 2.1 Oportunidade de Uso e *TV White Spaces*

O espectro eletromagnético é um recurso limitado e de propriedade pública. Mas a faixa dedicada às comunicações sem fio tem peculiaridades adicionais. A cooperação entre todos os usuários que fazem uso desta faixa é essencial para não causar interferências e prejudicar a transmissão, evidenciando uma interdependência alta entre esses usuários. Em diversos países esta faixa é regulamentada por órgãos governamentais, como FCC (*Federal Communications Commission*) nos Estados Unidos e Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações) no Brasil. Estas organizações têm como objetivo manter o plano de alocação do espectro, distribuir e dar finalidades às frequências de rádio, incluindo detalhes de uso associados com seus serviços e atividades de telecomunicação [5].

Habitualmente, algumas faixas de frequência, também chamadas de canal, podem ser cedidas ou leiloadas para empresas. Assim, aquela fração de espectro torna-se um espectro licenciado. Nesse intervalo de frequência (também chamada de banda do canal), apenas o usuário detentor do canal pode transmitir, não sendo possível a transmissão de usuários sem autorização, evitando, assim, possíveis interferências. Este sistema de banda licenciada garante integridade ao sistema, mas mostra-se ineficiente [6]. Este modelo produz uma escassez e uma má utilização do espectro. Essas desvantagens podem ser observadas na Figura 1, onde é ilustrado a subutilização do espectro reservado para agências e órgãos.

Além deste problema de aproveitamento do espectro, outros problemas que envolvem questões tecnológicas e monetárias podem ser elencados. Por exemplo, o processo de aquisição da licença de um canal é lento e burocrático, além de beneficiar, usualmente, grandes empresas e órgãos. Esta circunstância acaba provocando outro problema que é a transmissão de determinado sinal em frequências não-naturais, ou seja, quando o sinal tem um desempenho melhor em uma certa faixa de frequência, mas o transmissor não pode utilizá-la. Em [6], um estudo mostrou que a média de uso do espectro é de 3,4% do total disponível nas bandas licenciadas.

Figura 1 - Média do uso do espectro em seis diferentes localidades.



Fonte: [1]

O chamado *TV White Space* está surgindo como uma das alternativa para resolver esses problemas. *White Space* é uma faixa de frequência não utilizada (em determinado intervalo de tempo) pelo detentor do canal licenciado ou uma banda de guarda entre dois canais consecutivos. A faixa VHF (*Very High Frequency*) (30MHz-300MHz) apresenta grande potencial para utilização devido ao desligamento do sinal de TV analógico (*switch-over*), mas outras faixas de frequências, como a UHF (*Ultra High Frequency*) (300MHz-3GHz) também apresentam esse potencial em áreas que os sinais transmitidos pelos detentores dos canais não alcançam (como, por exemplo, em algumas áreas rurais). Esta faixa tem diversas qualidades, dentre elas a excelente propriedade de propagação para sinais de radio, bandas contínuas de 6MHz a 8MHz e pode ser utilizada para diversas aplicações, desde prover conexão banda larga para áreas rurais até auxiliar na comunicação em áreas afetadas por desastre [7].

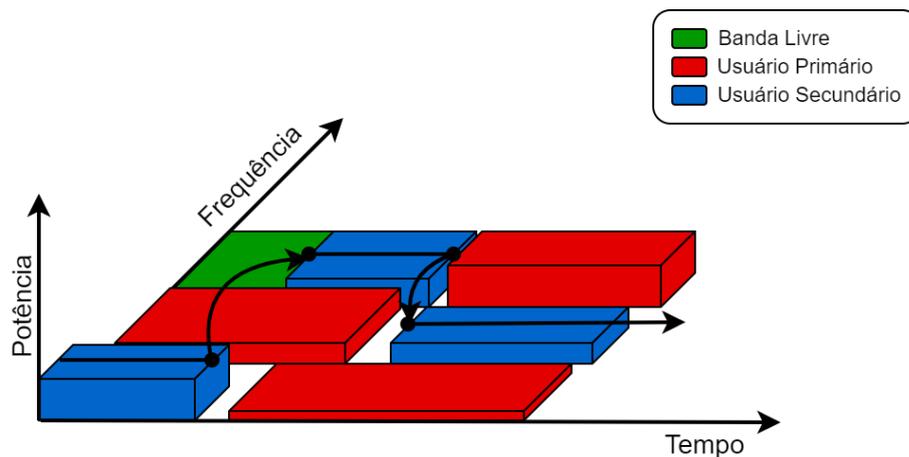
## 2.2 Rádios Cognitivos

Um rádio cognitivo é um sistema capaz de observar e analisar o ambiente de frequência no qual está inserido e tomar decisões inteligentes em relação àquele estado do

espectro. Esta técnica possibilita sensoriar o espectro eletromagnético à procura de buracos espectrais (canais desocupados) para o uso oportunista desta banda de frequência. Além de conseguir sensoriar o espectro, dispositivos com esta abordagem também são capazes de decidir se o usuário detentor do canal está transmitindo e adaptar-se a essa transmissão, seguindo um comportamento cooperativo. Este uso do espectro também pode ser intermitente, ou seja, não precisa necessariamente de uma faixa contínua de frequência ou de tempo para uma transmissão com sucesso.

Em rádios cognitivos, os usuários são divididos em dois tipos: usuários primários (UPs) e usuários secundários (USs). Os UPs possuem o direito de transmitir no canal sem a necessidade de permissões. Esses usuários também são chamados de usuários licenciados e estes adquiriram a prioridade para transmissão no canal. Os USs são os usuários que utilizam o espectro de maneira oportunista e dependem da disponibilidade do UP. Também podem ser referidos como usuários oportunistas ou não-licenciados. UPs têm maior prioridade para transmissão no canal do que USs, evidenciando, assim, uma hierarquia para uso do espectro (Figura 2).

**Figura 2 - Buracos espectrais e oportunidades de uso de canais livres.**



Fonte: Baseado em [8]

Essas redes cognitivas podem ser configuradas de várias maneiras e sua arquitetura pode seguir tanto um cenário conservador (com apenas UPs) ou pode envolver cenários com usuários não-licenciados organizados por uma infraestrutura centralizada ou não [9]. Duas maneiras de utilizar o espectro estão disponíveis para USs:

- **Redes Sobrepostas:** o US só pode fazer uso do canal quando o usuário detentor daquele canal não está executando nenhuma transmissão. Assim, sensoriar o espectro é essencial para o US a fim de não prejudicar o UP.
- **Redes Subjacentes:** o US pode transmitir no canal mesmo quando o UP está utilizando aquele canal. Porém, o US deve proteger a transmissão do UP de interferências e controlar sua potência de transmissão.

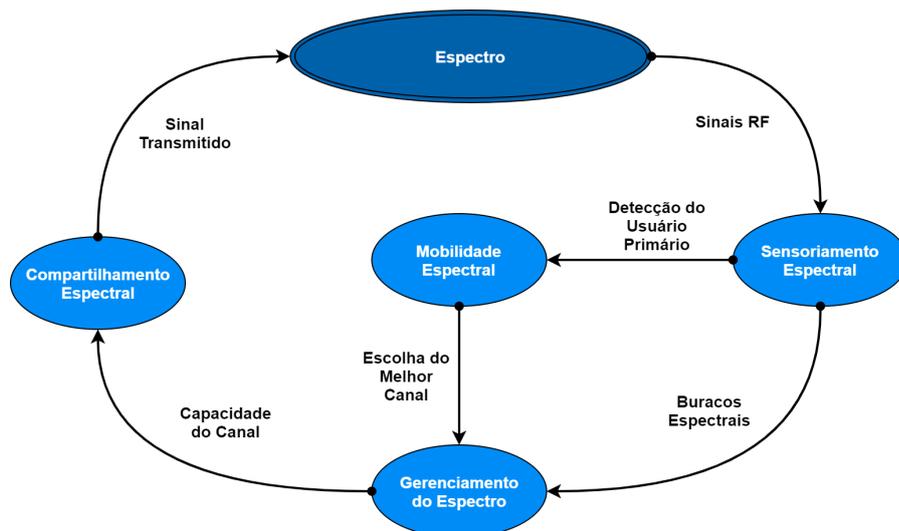
Dada a regulamentação, UPs e USs podem coexistir tanto nas mesma faixas de frequência quanto nas mesmas faixas de tempo.

Quatro etapas fundamentais para o perfeito funcionamento da rede cognitiva são descritas em [9] :

1. **Sensoriamento Espectral:** a tarefa mais importante do processo é o monitoramento do espectro eletromagnético com a finalidade de procurar *White Spaces* e detectar a presença de UPs.
2. **Gerenciamento do Espectro:** esta habilidade confere ao usuário não-licenciado a capacidade de escolher a melhor faixa de frequência livre em conjunto com os melhores parâmetros de transmissão, tudo isso de acordo com os requisitos e QoS (Quality of Service).
3. **Mobilidade Espectral:** capacidade de permutar de frequência e mover-se para um canal que oferece maiores taxas de transmissão ou menor probabilidade de interrupção.
4. **Compartilhamento Espectral:** a aptidão de coexistir com outros usuários da rede cognitiva e propiciar taxas de transmissão justas a seus usuários.

Na Figura 3 é apresentado um fluxo dessas etapas.

**Figura 3 - Fluxo de capacidades cognitivas.**



Fonte: O Autor

Variantes da arquitetura comum apresentada na literatura também podem ser sugeridas, assim como em [10], onde foi proposta uma arquitetura de hierarquia de prioridade tripla: um tipo de UP e dois tipos de USs, com prioridades diferentes. Além dessa abordagem, uma proposta de agregação e fragmentação de canais foi analisada com objetivo

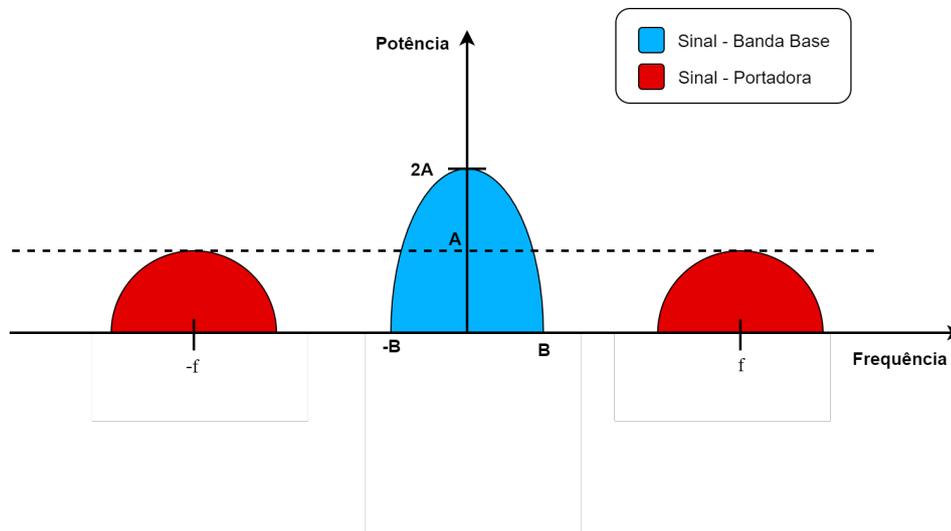
de ampliar as taxas de ocupação dos canais e minimizar interrupções e interferências de transmissão.

### 2.3 Rádios Definidos por Software

*Rádios Definidos por Software* (RDS) é um dispositivo em que algumas, ou todas, as funções da camada física são definidas e implementadas em software ao invés de hardware [11]. Como consequência desta mudança, parâmetros de recepção e transmissão podem ser configurados em tempo real. Esse equipamento possibilita, então, que um usuário da rede obtenha o status de uso do espectro em diversas faixas de frequência e permite a transmissão de sinais em diversas larguras de banda.

Para atender às demandas dessas novas tecnologias que visam o maior aproveitamento do espectro são necessários equipamentos que suportam essas tarefas desempenhadas por usuários de rádios cognitivos. Uma das principais funções que esses aparelhos precisam desempenhar é a transposição do sinal de sua frequência da banda base para a frequência da portadora (Figura 4), pois, sem esta funcionalidade, o US não é capaz de definir uma faixa de frequência para transmissão.

**Figura 4 - Sinal na banda base e sinal após modulação.**



Fonte: O Autor

Esses dispositivos RDS podem trabalhar em cooperação com outros dispositivos que o auxiliem a realizar as etapas básicas de rádios cognitivos. Assim, por exemplo, se este equipamento não dispuser de uma antena para sensoriamento do espectro, a alternativa pode ser captar o estado da rede a partir de outras maneiras e processar esses dados externos. O RDS executando todas as etapas, o usuário é capaz de fazer uso eficiente dos canais disponíveis.

### 3 MODELOS DE PROPAGAÇÃO

Em comunicações sem fio, nem sempre é possível obter informações de transmissão nos espectros de frequência em tempo real. A fim de estimar essas informações, principalmente informações de perda de percurso e, conseqüentemente, de potência recebida, modelos de propagação são propostos na literatura. Esses modelos de propagação têm, geralmente, baixo custo computacional [12] e auxiliam sistemas que pretendem obter o estado atual do espectro. Neste trabalho, utilizamos 4 modelos de propagação.

#### Modelo de Perda no Espaço Livre (PEL)

Em telecomunicações, o Modelo de Perda no Espaço Livre (PEL) é descrito como a perda do nível de sinal de uma onda eletromagnética que se assemelha a um caminho de linha de visão através de espaço livre, sem obstáculos próximos para causar reflexão ou difração. Neste trabalho, não há inclusão de fatores como perda associada a imperfeições de hardware nos modelos de propagação. Assim, consideramos os ganhos das antenas do transmissor e receptor unitários [13]. Este modelo, portanto, é proporcional ao quadrado da distância entre o transmissor e o receptor, e também proporcional ao quadrado da frequência do sinal. Logo, a Equação 1 define este modelo:

$$PEL = \left( \frac{4\pi df}{c} \right)^2 \quad (1)$$

, onde  $d$  é a distância entre o transmissor e o receptor em metros,  $f$  é a frequência do sinal em MHz e  $c$  é a velocidade da luz no vácuo. Sua representação em decibéis é expressa conforme a Equação 2:

$$PEL(dB) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 92,45 \quad (2)$$

, onde  $d$  é definido em metros e  $f$  em GHz.

#### Modelo de Hata

Também conhecido como o modelo de Okumura-Hata, é definido como uma representação gráfica do modelo de Okumura, que em ambientes cujas frequências situam-se de 150 a 1920 MHz leva em consideração parâmetros como o tipo de ambiente e a irregularidade do terreno para células que possuam raios de 1 a 100 Km e altura de antena - transmissão e recepção - entre 30 e 1000m [14]. Porém, no cenário definido por Hata, há limitações para faixa de frequência, operando apenas de 150 a 1500 MHz. O Modelo de Hata é expresso pelas Equações 3 e 4:

$$L_{Hata} = 69,55 + 26,16 \log f - 13,82 \cdot \log h_t - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \log h_t) \cdot \log d \quad (3)$$

, onde

$$a(h_r) = (1,1 \cdot \log f - 0,7)h_r - (1,56 \cdot \log f - 0,8)dB \quad (4)$$

,  $f$  é a frequência do sinal em MHz,  $h_t$  é a altura da antena do transmissor em metros,  $h_r$  é a altura da antena do receptor em metros e  $d$  é a distância entre o transmissor e o receptor em metros.

### **Ericsson 9999**

O modelo Ericsson 9999 é uma extensão do Modelo de Hata, de tal maneira que os parâmetros são ajustados de acordo com um dado cenário [15]. A perda de percurso é definida para áreas urbanas, portanto, conforme as Equações 5 e 6:

$$PL_{Ericsson} = 36,2 + 30,2 \log d - 12 \log h_t + 0,1 \log h_t \log d - 3,2(\log 11,75) \cdot h_r + g(f)) \quad (5)$$

, onde

$$g(f) = 44,49 \log f - 4,78(\log f)^2 \quad (6)$$

,  $f$  é a frequência do sinal em MHz,  $h_t$  é a altura da antena do transmissor em metros,  $h_r$  é a altura da antena do receptor em metros e  $d$  é a distância entre o transmissor e o receptor em metros.

### **Egli**

O Modelo Egli é um modelo de terreno para propagação de radiofrequências. Este modelo de previsão é aplicável a uma frequência de 40 a 900 MHz e a faixa de ligação é inferior a 60 km e prevê a perda de caminho total para um link ponto-a-ponto [14]. A Equação 7 para o modelo de predição de perda de propagação de Egli é definida a seguir:

$$L_t = 20 \log f + 40 \log d - 20 \log h_t + 76,3 - 10 \log h_r \quad (7)$$

, onde  $f$  é a frequência do sinal em MHz,  $h_t$  é a altura da antena do transmissor em metros,  $h_r$  é a altura da antena do receptor em metros e  $d$  ( $d > 10m$ ) é a distância entre o transmissor e o receptor em metros.

## 4 DETECÇÃO DE TVWS

É fundamental que o usuário oportunista obtenha uma informação precisa e correta da presença ou ausência do usuário detentor do canal em questão. Com a finalidade de auxiliar neste propósito, várias técnicas para obter o estado atual da faixa de frequência estão disponíveis na literatura. Neste trabalho, duas abordagens serão analisadas: a abordagem que emprega Base de Dados Geo-Localizadas e a que utiliza o Sensoriamento Espectral em tempo real.

### 4.1 Sensoriamento do Espectro em Tempo Real

O sensoriamento do espectro de frequência é uma das etapas mais importantes do processo envolvendo transmissões oportunistas em canais licenciados e não-licenciados. Esta etapa do fluxo de rádios cognitivos impacta diretamente nas taxas de interferência ao UP e nas taxas de vazão e perdas de oportunidades de transmissão do US. Para realizar esta tarefa, algumas técnicas de sensoriamento do espectro são apresentadas na literatura [16], tais como: Detecção de Energia, Detecção por Filtro Casado, Detecção Ciclo Estacionária e Temperatura de Interferência.

Neste trabalho, o método utilizado para sensoriar o espectro é a técnica por Detecção de Energia. Esta técnica, como outras na literatura, está suscetível a efeitos que possam afetar a recepção do sinal transmitido pelo UP e, conseqüentemente, prejudicar a decisão do sensoriamento.

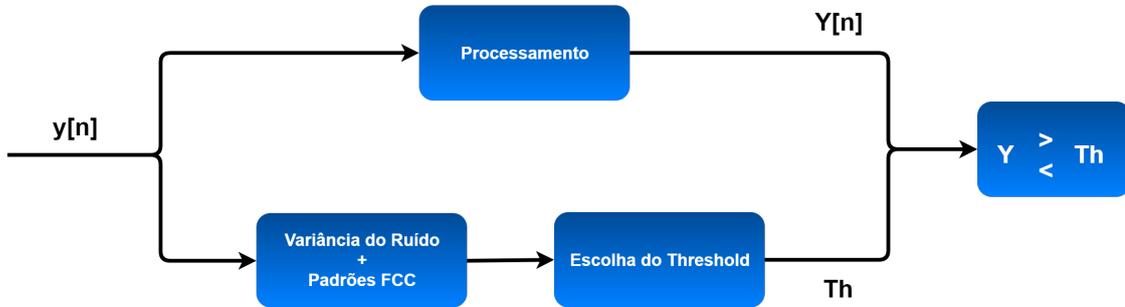
#### 4.1.1 Detecção de Energia

A Detecção de Energia é a técnica que envolve menor complexidade para decidir se há uma transmissão do UP na faixa de frequência monitorada. O nível de potência do sinal é tomado como entrada deste método e, dependendo de um limiar definido previamente, aquela faixa de frequência é determinada como livre ou ocupada. Quando esta faixa sensorizada é relativa à faixa UHF, estes canais livres podem significar TVWS e, assim, estarem disponíveis para transmissão de US.

Esta técnica é utilizada quando o usuário que está sensoriando o espectro não tem conhecimento prévio das condições de transmissão do UP. Usualmente, a técnica de Detecção de Energia também requer uma boa relação sinal-ruído para ter um bom desempenho na decisão do sensoriamento [16]. Quando o nível de potência do ruído é alto, a Detecção de Energia pode considerar aquele ruído como uma transmissão efetiva do UP, elevando a taxa de falso alarme (quando o UP é considerado presente no canal mesmo não havendo transmissão deste).

Após sensoriar o nível de potência recebido em uma dada frequência, o valor é comparado com um limiar e, assim, o algoritmo de Detecção de Energia decide se aquela frequência está livre. Este fluxo é ilustrado no Figura 5.

**Figura 5 - Processo do método de Detecção de Energia.**



Fonte: baseado em [17]

Para estimar o nível de potência do canal  $c$ , a média da energia de  $N$  amostras coletadas são utilizadas conforme indicado na Equação (8):

$$Y_{de}(c) = -\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y[n]|^2} \quad (8)$$

e para decidir se o canal está livre, o algoritmo toma como base o limiar  $\lambda$  da seguinte maneira:

- Se  $Y_{de}(c) < \lambda$ , então o canal é considerado livre e não há transmissão do UP neste canal.
- Se  $Y_{de}(c) \geq \lambda$ , então o canal é considerado ocupado e há transmissão do UP neste canal.

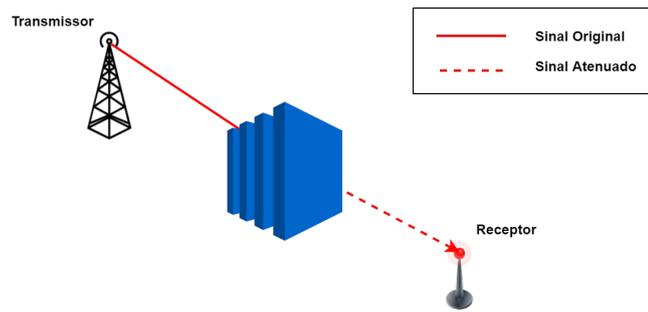
Dadas essas condições, métricas podem ser sugeridas para avaliar a escolha do limiar e avaliar a performance da Detecção de Energia. Uma análise envolvendo limiar e a técnica de Detecção de Energia é apresentada em [17].

#### 4.1.2 Efeitos na Potência Recebida

Objetos que possam interferir na irradiação do sinal ocasionam difração e/ou refração nas ondas transmitidas. Por efeito dessas interferências, o sinal transmitido é atenuado e pode ser sensoriado com uma menor potência no receptor. Dentre esses efeitos, três deles são usualmente considerados na literatura: Nó Escondido, Sombreamento e Propagação Multipercuro.

O efeito de Sombreamento ocorre quando o sinal é obstruído por algum objeto que está posicionado entre o transmissor e o receptor [18]. Este efeito evidencia a refração que as irradiações eletromagnéticas podem sofrer. Nos ambientes de medição, estes objetos podem ser construções vizinhas às coletas ou, no caso das medições internas, paredes do prédio onde o receptor está. A Figura 6 ilustra cenários de Sombreamento.

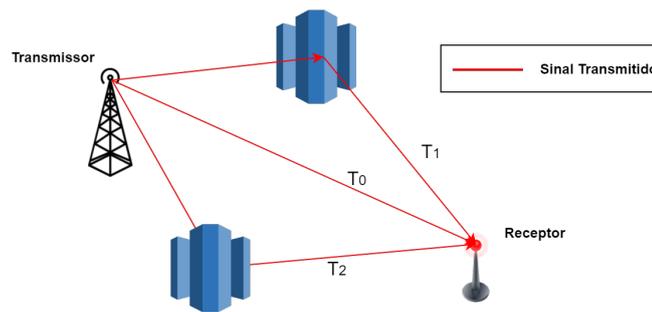
**Figura 6 - Efeito Sombreamento.**



Fonte: O Autor

Propagação Multipercurso é ocasionado pelo efeito de difração provocado também por construções entre o transmissor e o receptor. Neste efeito, o sinal é fracionado e segue diferentes caminhos até o receptor. Essa fragmentação é feita pelo meio no qual o sinal está sendo transmitido, que pode conter prédios e construções diversas. Esse fenômeno pode mudar de acordo com o tempo, com o posicionamento e com a banda sensorizada [18]. A Figura 7 ilustra cenários de Propagação Multipercurso.

**Figura 7 - Efeito Propagação Multipercurso.**

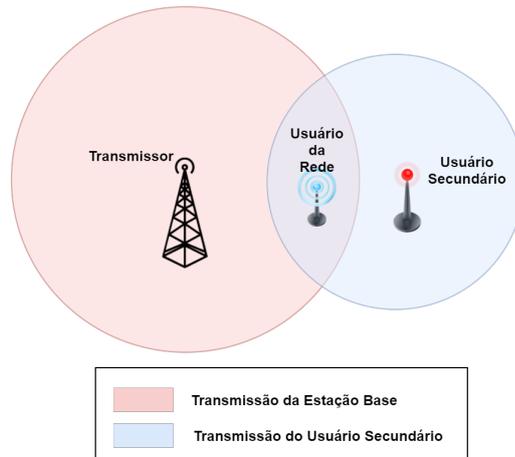


Fonte: O Autor

Quando o usuário oportunista está a uma distância na qual o sinal transmitido não pode ser sensorizado (ou chega com uma potência abaixo do limiar) e esse usuário decide transmitir, este cenário é caracterizado como Nó Escondido [19]. Este efeito pode ter contribuições dos efeitos de Sombreamento e Propagação Multipercurso. A Figura 8 ilustra cenários de Nó Escondido.

As atenuações provocadas por esses efeitos apresentados podem ser modeladas por distribuições estatísticas e os valores gerados podem ser comparados aos valores obtidos pelo sensoriamento. Estas análises não serão abordadas nesse trabalho e podem ser

**Figura 8 - Efeito Nó Escondido.**



Fonte: O Autor

observadas em [18] e [19].

## 4.2 Base de Dados Geo-localizada

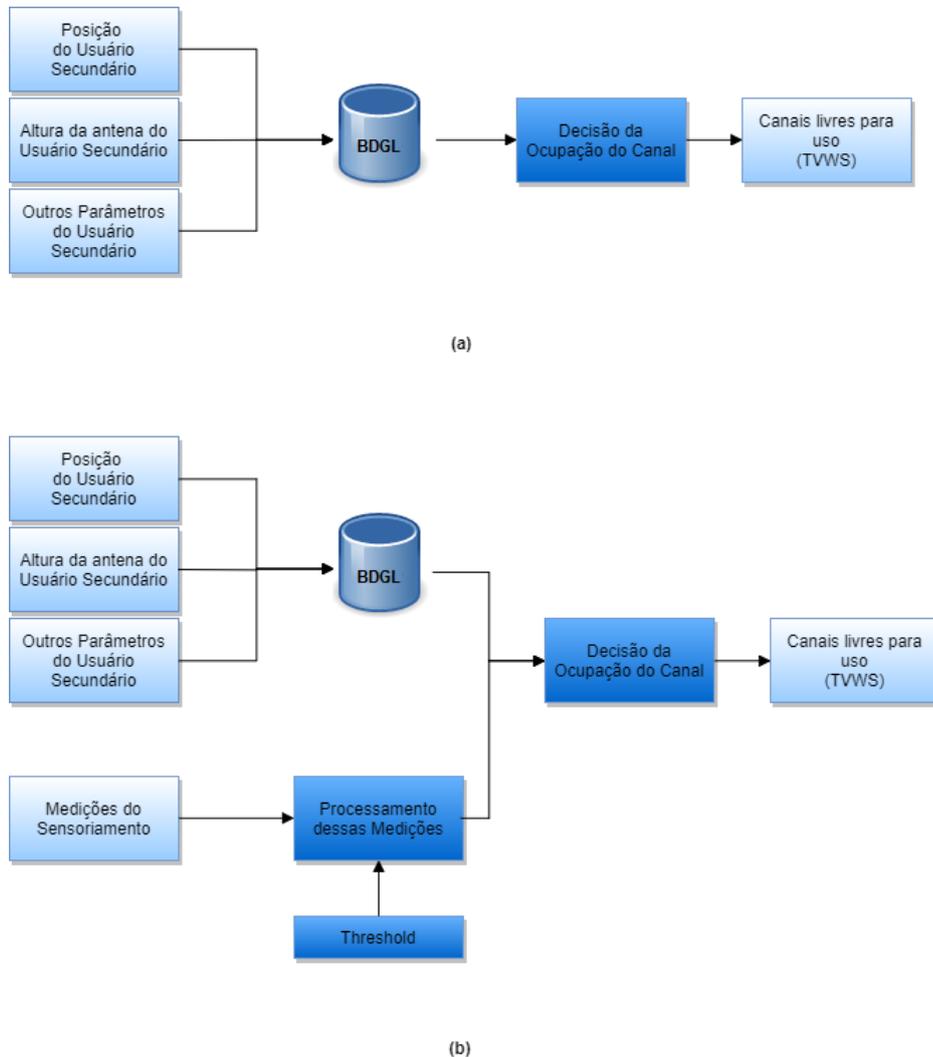
Bases de Dados Geo-localizada são repositórios que armazenam informação do espectro de frequência de locais ou áreas definidas. Estas informações podem ser relativas à disponibilidade de TVWS. Dado o posicionamento do usuário oportunista, alcance de frequência e/ou horário, esta base de dados informa quais canais estão livres ou ocupados para as transmissões secundárias [20]. Esta técnica pode substituir o sensoriamento em tempo real (Figura 9(a)) ou estas estratégias podem ser usadas em conjunto para auxiliar na decisão do sensoriamento (Figura 9(b)).

A BDGL é construída considerando diversos parâmetros e variáveis do local, dentre eles estão o posicionamento do US, as alturas das antena de transmissão e recepção, além de outro fatores de terreno e condições de sensoriamento/transmissão. Um modelo de propagação que reflita o nível de sinal real recebido naquele local é necessário para fidelizar a decisão do US. Além disto, esta base precisa estar acessível para o US sempre que o mesmo decide transmitir. Uma característica importante é que este método não leva em consideração transmissões ocorrendo em tempo real, ou seja, se um US decide usar determinado canal que já está sendo usado por outro US, este US que ainda não está transmitindo não estará ciente da transmissão do US que ocupa o canal, podendo ocasionar uma interferência nesta transmissão [21].

Algumas BDGL estão disponíveis para consulta, como, por exemplo, a BDGL disponibilizada pela *Spectrum Bridge* [22], onde é possível inserir a localização geográfica desejada e a BDGL disponibiliza se há TV White Spaces no local e qual a potência máxima permitida para transmissão. Essa base também disponibiliza áreas protegidas, ou seja, áreas onde determinados dispositivos não podem utilizar os *White Spaces*. Há

também bases de dados disponíveis para utilização comercial, que é o caso da BDGL disponibilizada pela Google [23]. Ambas as BDGLs são regulamentadas pela FCC e não possuem cobertura no Brasil.

**Figura 9 - (a) Processo da decisão por BDGL (b) Processo da decisão envolvendo BDGL e Detecção de Energia.**



Fonte: O Autor

### 4.3 Base de Dados Geo-localizada x Sensoriamento Espectral

Essas duas abordagens possuem aspectos positivos e negativos e esses aspectos precisam ser analisados antes de decidir qual técnica utilizar. Dentre esses aspectos, podemos elencar as seguintes questões para cada uma delas [3]:

- Base de Dados Geo-Localizada:
  - Dependência de um modelo de propagação que fidelize os aspectos que interferem na irradiação do sinal.

- Dependência de uma infraestrutura de telecomunicações confiável.
  - Requer uma base de dados centralizada.
  - Alto custo administrativo, de implementação e manutenibilidade.
- Sensoriamento Espectral:
    - Diversos desafios técnicos, como definição de parâmetros de sensoriamento.
    - Requer equipamentos apropriado para sensoriamento.
    - Requer grandes blocos de canais *White Space* para aproveitamento máximo.
    - Resultados afetados pelos efeito Sombreamento, Propagação Multipercurso e Nó Escondido..

Dados esses pontos, não há a possibilidade de decidir qual técnica é melhor para todos os cenários possíveis. Por exemplo, se tivermos a disponibilidade de um equipamento de sensoriamento, soubermos os parâmetros ideais para sensoriar determinada faixa de frequência e os problemas de Propagação Multipercurso, Sombreamento e Nó Escondido não influenciarem nas medições, a opção de executar o sensoriamento espectral para determinar se o UP está ocupando a faixa é uma boa escolha. Mas, caso não tenhamos disponibilidade deste equipamento (o que já impossibilita o uso da abordagem do sensoriamento), podemos usar a abordagem da base de dados geo-localizada quando há uma grande fidelidade dos modelos de propagação comparados a dados reais de transmissão do UP e quando há uma base de dados condizente com os parâmetros de transmissão deste usuário.

O tipo do ambiente do usuário oportunista pode afetar estas diversas questões elencadas acima. Por exemplo, áreas rurais possuem menos edifícios e, conseqüentemente, os efeitos de Propagação Multipercurso e Sombreamento são mínimos. Nessas áreas, o uso do sensoriamento espectral pode ser a melhor escolha. Em áreas urbanas, onde todos esses problemas podem ser potencialmente agravados pela alta densidade dessas construções, talvez o uso da base de dados seja uma boa escolha. Mas, por exemplo, se uma infraestrutura não está disponível nestas áreas urbanas nem um equipamento de sensoriamento disponível na área rural, estas abordagens não podem ser escolhidas.

Outro fator importante é o posicionamento *indoor/outdoor* do US. Ambientes *outdoor* oferecem uma precisão maior na captação do sinal, pois há um número menor de obstáculos (paredes e objetos) que possam interferir e/ou impedir que o sinal seja sensoriado com a potência próxima à real. Já em ambientes *indoor*, o fator que mais afeta a captação do sinal é o efeito de Sombreamento, o qual objetos impedem que o sinal chegue ao captador de sinal. Ao definir como a detecção do sinal transmitido será feita, estes fatores devem ser considerados e analisados cuidadosamente.

O sensoriamento cooperativo, o qual possibilita o compartilhamento das informações de sensoriamento entre os usuários da rede, também pode auxiliar na minimização desses efeitos de Propagação Multipercurso, Sombreamento e Nó Escondido, pois os diversos USs podem estar posicionados de acordo com que os obstáculos que afetam o sensoriamento de alguns usuários não afetem o sensoriamento de outros usuários da mesma rede.

Em um cenário onde há impedimentos para ambas as técnicas, uma abordagem híbrida pode ser sugerida e, por exemplo, as medições do sensoriamento espectral auxiliar o modelo de propagação escolhido para aquela região a definir o nível de potência do sinal transmitido.

## 5 ANÁLISE ESPECTRAL E PROPOSTA DE CONSTRUÇÃO DE BASE DE DADOS GEO-LOCALIZADA

As faixas de espectro destinadas a transmissão de sinais de TV (faixas VHF e UHF) oferecem muitas oportunidades de transmissão para usuários não-licenciados para determinados canais, como exposto na Seção 2, onde a ocupação máxima de umas das faixas de TV foi de 27% da capacidade máxima oferecida (Figura 1). Esta configuração da rede possibilita a utilização desta faixa livre em determinado intervalo de tempo por usuários oportunistas. *TV White Space* também possuem boas propriedades de irradiação de sinais de rádio e podem ser aproveitadas para, por exemplo, auxiliar na comunicação sem fio em Redes de Campus. Rede de Campus é uma rede formada pela comunicação de redes locais (LAN) dentro de uma área delimitada. Essa área pode pertencer a uma empresa, universidade ou órgão governamental. A tecnologia de rádios cognitivos pode promover o aumento da capacidade de acesso desta rede.

Para dar suporte a esses tipos de rede, um monitoramento do espectro deve ser realizado nesses locais a fim de capturar o comportamento da recepção desses sinais transmitidos pelos UPs. Após esse sensoriamento ser realizado, uma análise envolvendo potência dos sinais captados, localidades e condições de sensoriamento (se foi em ambientes *indoor* ou *outdoor*, horários do sensoriamento, etc) deve ser realizada e um modelo de propagação proposto dadas essas variáveis. Este modelo de propagação auxiliará na construção de um Base de Dados Geo-Localizada, e esta contribuirá para a decisão do US, definindo se o canal está disponível para uso ou não.

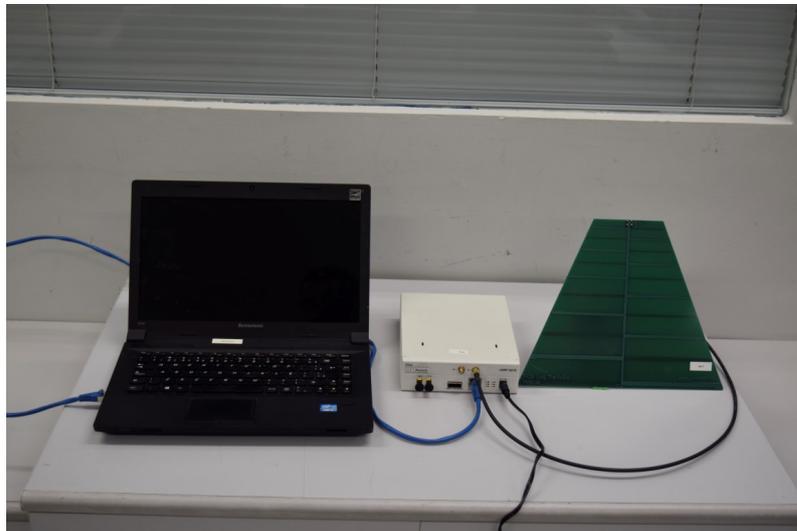
Esta análise também é importante quando o US escolher por em prática a abordagem do monitoramento em tempo real para decidir se haverá transmissão oportunista ou não, pois fenômenos que distorcem o sensoriamento variam de acordo com o local e com os fatores externos do ambiente. Assim, com uma análise do ambiente no qual o US está inserido, este usuário não-licenciado pode usufruir das oportunidades de transmissão sem causar interferência nos usuários detentores do canal.

A metodologia utilizada (apresentada na Seção 5.3) foi planejada para ser empregada em qualquer localidade e condição de sensoriamento. Esta metodologia analisa o sinal recebido considerando distância para a estação base, altura das antenas de transmissão e recepção e, principalmente, condições do ambiente no qual o US está inserido, ou seja, ambientes *indoor* e *outdoor*. Ao fim desta análise, obtemos um levantamento do estado do espectro para determinados canais, auxiliando o US a decidir quando transmitir, aumentando, assim, sua vazão.

## 5.1 Equipamento de Sensoriamento

O sensoriamento da faixa de espectro correspondente à banda de canais UHF foi realizado com o auxílio de um Kit USRP (*Universal Software Radio Peripheral*) composto por uma USRP N210 (Ettus Research) e uma antena LP0410 (Ettus Research) (Figura 10), as quais possibilitam o sensoriamento e transmissão em frequências que variam entre 400MHz a 1000MHz. Neste trabalho, apenas a função de recepção foi utilizada. Juntamente com o auxílio do software livre GNU Radio, estes equipamentos permitem obter informações do espectro de frequência em tempo real.

**Figura 10 - Equipamento usado para sensoriamento do espectro: *Universal Software Radio Peripheral* (USRP).**



Fonte: O Autor

A Tabela 1 apresenta os parâmetros configurados no equipamento com a finalidade de fidelizar a análise deste trabalho.

**Tabela 1 - Parâmetros de sensoriamento.**

Parâmetro	Valor
Largura de Banda do Canal	6.250Hz
Deslocamento <i>LO Frequency</i>	0 Hz
Limiar de contenção	0 Hz
Tamanho da FFT	160
Frequência Inicial	400 MHz
Frequência Final	1000MHz

O software livre GNU Radio disponibiliza em sua biblioteca para equipamentos de Rádios Cognitivos o script de sensoriamento na linguagem *python usrp\_spectrum\_sense.py*. Neste script, é possível configurar estes parâmetros e realizar este sensoriamento de uma forma robusta. Um notebook *Intel Core i5-3230M CPU 2,60GHz x 4* com sistema operacional Ubuntu foi usado para captura desses dados providos pelo Kit USRP. De acordo

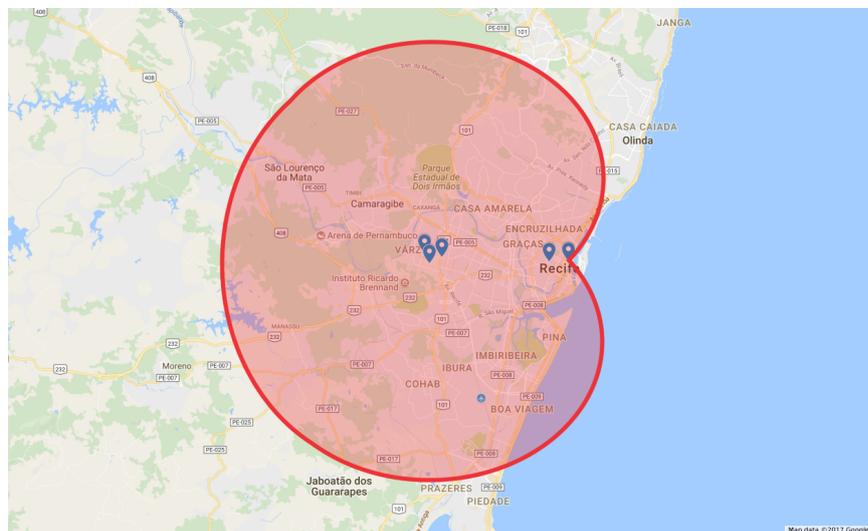
com os parâmetros definidos acima, foram geradas 96.000 medições de potência de sinal para cada janela 400-1000MHz. Estas janelas eram geradas em uma média de 6,5 minutos cada.

## 5.2 Transmissor de TV

Como transmissor rádio base, foram coletados dados de uma antena de TV Digital (UHF) pertencente a um canal de TV aberta local (Rede Globo Nordeste) localizada no Bairro de Santo Amaro, Recife-PE (Latitude:  $8^{\circ}3'16,1''S$  e Longitude:  $34^{\circ}52'41,3''W$ ). A torre possui 137 metros de altura com antenas de irradiação próximas ao topo. A transmissão ocorre com frequência central 605,143 MHz (canal 36 na faixa UHF) e com potência de 30kW. Informações de altitude do terreno também foram utilizadas para efeitos de cálculos dos modelos de propagação.

A antena desta emissora segue um modelo de irradiação cardioide (Figura 11), direcionando, assim, a potência máxima do sinal para uma direção de ângulo aberto. Seguindo esta restrição, todos os pontos de medição foram escolhidos no sentido de dissipação maior da potência da antena.

**Figura 11 - Esquema da irradiação de antenas de TV.**



Fonte: O Autor

## 5.3 Metodologia

Os experimentos realizados neste trabalho consistem do sensoriamento da faixa de frequência correspondente à faixa UHF no Brasil voltada para transmissão de TV (470MHz - 698MHz) e do processamento desses dados gerados pelo sensoriamento considerando os 38 canais definidos para esta faixa. Por motivos de limitação do software,

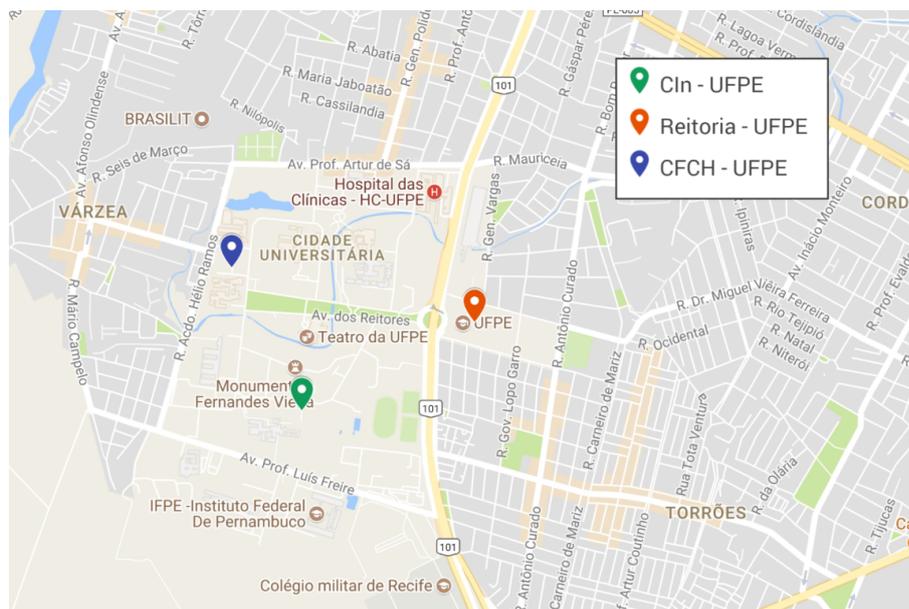
apenas a faixa UHF foi analisada, ficando a faixa VHF para futuras análises. Este processamento consiste em analisar esses dados sensoriados em diversas localidades e compará-los a dados gerados por modelos de propagação utilizados na literatura. Feita esta análise, é possível concluir qual modelo de propagação aproxima-se mais dos dados reais de sensoriamento e propor uma abordagem de geração de uma base de dados geo-localizada. Esta abordagem pode variar de ponto para ponto, assim também como pode variar de acordo com as condições do ambiente do usuário (*indoor* ou *outdoor*). O trabalho também dispõe da análise das oportunidades de transmissão relativas disponíveis para USs nestas localidades. Os resultados mostram um estudo comparativo entre as diversas localidades e entre as diversas condições do ambiente, evidenciando a importância da deliberação em relação ao uso oportunista do espectro de frequência.

Os sensoriamentos foram conduzidos na Universidade Federal de Pernambuco em três localidades estrategicamente definidas. A Figura 12 indica a localização geográfica desses pontos escolhidos. Os locais foram definidos de forma com que esses três pontos estruturassem um triângulo envolvendo o Campus e também conseguissem captar as peculiaridades da irradiação dos sinais em pontos extremos da Universidade.

Abaixo, os pontos definidos e suas propriedades:

- **Reitoria - UFPE:** Sala de telecomunicações, localizada no térreo de um prédio de 3 andares e está distante 7,34 Km da fonte do sinal. Este local situa-se na latitude  $8^{\circ}3'8''S$  e na longitude  $34^{\circ}56'41''W$ , tem 14 metros de altitude (*Indoor*: 15m) e é o ponto mais próximo do Campus da antena de transmissão da emissora Globo Nordeste. As medições externas foram realizadas no estacionamento do mesmo prédio, há poucos metros ( $\sim 15m$ ) do ponto de medição *indoor*.
- **Centro de Informática (CIn-UFPE):** Laboratório do Convênio Motorola/CIn, localizado no segundo andar do prédio do Centro de Informática da UFPE e está distante 8,05 Km da fonte do sinal. Este local situa-se na latitude  $8^{\circ}3'20''S$  e na longitude  $34^{\circ}57'4''W$ , tem 15 metros de altitude (*Indoor*: 23m) e é o segundo ponto mais próximo do Campus da antena de transmissão da emissora Globo Nordeste. As medições externas foram realizadas no estacionamento do mesmo prédio, há poucos metros ( $\sim 10m$ ) do ponto de medição *indoor*.
- **Centro de Filosofia e Ciências Humanas (CFCH-UFPE):** Sala de Telecomunicações, localizado no segundo andar do prédio do Centro de Filosofia e Ciências Humanas da UFPE e está distante 8,35 Km da fonte do sinal. Este local situa-se na latitude  $8^{\circ}3'1''S$  e na longitude  $34^{\circ}57'14''W$ , tem 16 metros de altitude (*Indoor*: 25m) e é o ponto mais distante do Campus da antena de transmissão da emissora Globo Nordeste. As medições externas foram realizadas no estacionamento do mesmo prédio, há poucos metros ( $\sim 8m$ ) do ponto de medição *indoor*.

Figura 12 - Campus da Universidade Federal e Pernambuco.



Fonte: O Autor

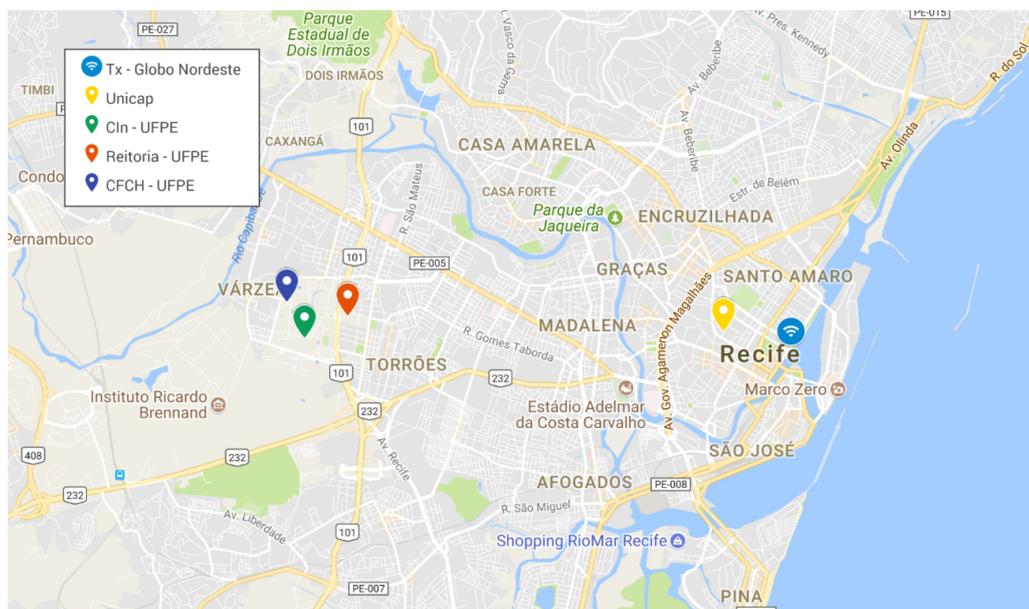
Além desses três pontos de medição no Campus da UFPE, alguns dos resultados obtidos necessitavam de ponto de referência para o cálculo da perda de percurso, levadas em consideração nos modelos analisados. Para este ponto  $d_0$ , escolhemos o seguinte local:

- **Universidade Católica de Pernambuco (Unicap):** Estacionamento próximo à Unicap, localizado na área externa do prédio e está distante 1,22 Km da fonte do sinal. Este local situa-se na latitude  $8^{\circ}3'17''S$  e na longitude  $34^{\circ}53'18''W$ , tem 10 metros de altitude e é o ponto mais próximo da antena de transmissão da emissora Globo Nordeste.

No caso específico desta localidade, obtivemos apenas coletas do ambiente *outdoor* com a finalidade de não distorcer dados deste monitoramento e, conseqüentemente, não afetar negativamente os cálculos que utilizam dados deste ponto inicial. A Figura 13 indica o posicionamento geográfica de todos os pontos analisados.

A Tabela 2 resume informações de latitude, longitude, altitude e distância entre cada ponto de medição e o ponto onde a antena transmissora está instalada.

**Figura 13 - Ambientes de transmissão e recepção do sinal de TV.**



Fonte: O Autor

**Tabela 2 - Coordenadas e distância dos pontos de medição para a antena de transmissão.**

Nome do Local	Latitude Longitude	Altitude (m)	d (Km)
Universidade Católica de Pernambuco (Ponto $d_0$ )	8°3'17"S 34°53'18"W	10	1,22
Reitoria (UFPE)	8°3'8"S 34°56'41"W	14	7,34
Centro de Informática (CIn - UFPE)	8°3'20"S 34°57'4"W	15	8,05
Centro de Filosofia e Ciências Humanas (CFCH - UFPE)	8°3'1"S 34°57'14"W	16	8,35

Para validar que a distância entre este ponto  $d_0$  e a antena não é pequena o bastante para que efeitos de Difração de Campo Distante aconteçam, foi necessário conferir algumas regras de parametrização. Efeitos inesperados, que não seguem as regras de irradiação, podem acontecer caso as duas seguinte regras não sejam seguidas:

- $d \gg \lambda$
- $d \gg D$

, onde  $d$  é a distância da região de campo próximo (distância mínima para a qual as regras de irradiação são válidas),  $D$  é a maior distância linear das dimensões da antena e  $\lambda$  é o comprimento de onda emitido pela fonte.

Assumindo que o comprimento de onda é definido pela Equação 9:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{300.000}{605.143} \simeq 0,5m \quad (9)$$

E admitindo que a antena ocupe 10% do comprimento da torre que a suporta, ou seja,  $D > 13,7m$

Temos que:

$$d \gg 13,7m$$

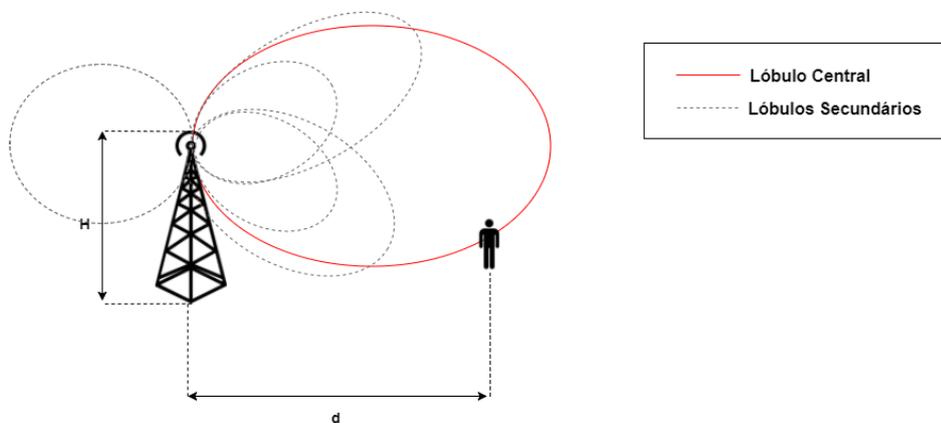
$$d \gg 0,5m$$

Considerando que uma valor muito maior seja de, pelo menos, dez vezes o valor referencial, temos:

$$d \geq 140m$$

Além disto, precisamos considerar o diagrama de irradiação da antena, de forma que capturemos a potência do lóbulo central da propagação daquele sinal pela fonte (Figura 14).

**Figura 14 - Diagrama exemplo da irradiação de uma antena de TV.**



Fonte: O Autor

Embora antenas de TV Digital tenham lóbulo principal com ângulos mais abertos, é necessário criar uma margem de segurança com a finalidade de produzir dados condizentes com a situação real. Para este trabalho, foi definido como margem de segurança que, se há um ângulo maior que  $70^\circ$  entre o sinal irradiado e a torre da antena (em relação ao usuário), então este usuário consegue captar sinais do lóbulo principal. Para que isto ocorra, é preciso que o usuário captador do sinal esteja, no mínimo, com o dobro de distância do comprimento da torre ( $H$ ), ou seja:

$$d > 2 \times H = 2 \times 137 = 274$$

Desta forma, concluímos que a distância mínima para um ponto  $d_0$  é  $\simeq 280\text{m}$ . Como o ponto  $d_0$  (ponto de sensoriamento mais próximo da antena) está a 1,22 Km, então esta condição é satisfeita.

Dados teóricos de perda de percurso e dados de potência recebida no local baseados nos modelos de propagação foram gerados com o objetivo de confrontar os dados medidos com os dados teóricos. Para gerar esses dados teóricos, esses modelos de propagação precisam de alguns parâmetros de transmissão da fonte. Por razões de limitação de informação dos parâmetros de outras antenas de transmissão de TV Digital e por considerar a análise com uma fonte suficiente, a pesquisa envolvendo a análise de diferentes modelos de propagação foi feita envolvendo apenas os dados do canal 36 (602MHz - 608MHz), o qual é utilizado pela Rede Globo Nordeste.

As potências recebidas em cada uma das localidades serão confrontadas com as potências teóricas calculadas, considerando que a perda entre a fonte e o ponto  $d_0$  respeitam a regra da perda no espaço livre. Logo após, os dados de perda de percurso são gerados para todos os modelos de propagação apresentados na Seção 3 e também para os dados da medição. Então, resultados de erro médio e desvio padrão entre as medições e os modelos de propagação são gerados e um erro médio quadrático é calculado para cada modelo. Esta análise é executada tanto para ambientes *indoor* quanto para ambientes *outdoor*. Por fim, esses dois resultados são comparados.

Os resultados gerados possibilitam a análise dos modelos de uma forma mais geral, mas também permite que possamos analisar a melhor abordagem para cada ponto de medição e também para cada ambiente *indoor* e *outdoor*. Deste modo, iremos propor o melhor modelo para cada localidade e condições do usuário oportunista.

Após esta análise detalhada do nível de potência de sinal recebido e de perda no espaço livre, outro estudo do espectro é proposto neste trabalho. Nesta fase da análise, todos os 38 canais serão observados para avaliar quantitativamente a disponibilidade de uso para USs. Esta análise também é feita para ambientes *indoor* e *outdoor*. Fatores que podem afetar a transmissão do sinal como Sombreamento, Nó Escondido e Propagação Multipercurso poderão ser refletidos nesses resultados. Essas duas análises serão comparadas e conclusões serão construídas a partir desses resultados.

O objetivo principal do experimento é analisar como o sinal eletromagnético transmitido por antenas de TV Digital (que, neste cenário, consideramos como UPs) é irradiado nesta região e gerar um estudo geo-localizado desses sinais com a finalidade de explorar faixas de frequência de TV pouco utilizadas (*TV White Spaces*) e encontrar padrões de ocupação desses canais através de sensoriamento e da base de dados geo-localizada proposta. Este estudo auxilia no desenvolvimento de alternativas para redes sem fio para Campus Universitários.

## 6 RESULTADOS

Para cada localidade e para cada condição do ambiente, foram realizados sensoria-  
mentos com duração total de 1,25 horas, onde o sensoriamento de cada janela de 228MHz  
(470MHz - 698MHz) levava aproximadamente 3 minutos. Entre o sensoriamento de cada  
janela correspondente a faixa de TV Digital, um intervalo de 4 minutos era realizado.  
Desta forma, obtivemos aproximadamente de 10 a 11 medições para cada localidade.

Após a coleta, estimamos o nível de potência recebida para cada canal utilizando  
o método descrito na Seção 4.1.1 considerando os parâmetros a seguir:

$y[n]$  = Medição  $n$  do canal  $C$ .

$Y_{de}(C)$  = Potência recebida no canal  $C$ .

Largura de Banda do Canal ( $Hz$ ) =  $6MHz$ .

Intervalo entre medições =  $6.250Hz$ .

Este cálculo foi executado para cada janela coletada. Para sumarizar estes resulta-  
dos, uma média de todas as janelas foi calculada para cada canal. Desta forma, obtemos  
um nível de sinal médio recebido para cada um dos 38 canais listados.

### 6.1 Modelos de Propagação - Premissas

Para prosseguir com a análise dos dados capturados pelo sensoriamento, é ne-  
cessário confirmar que a Lei da Dependência Quadrática é válida para o ambiente que  
realizamos as medições. A Lei de Friis (Equação 10) é utilizada para estimar o nível de  
potência teórico:

$$P_r(d) = P_r(d_o) + 20 * \log(d_o/d) \quad (10)$$

, onde  $P_r(d)$  é a potência recebida teórica no ponto distante  $d$  metros da antena,  $P_r(d_o)$   
é a potência recebida medida no ponto distante  $d_o$  metros da antena.

Com esta potência recebida no ponto mais próximo da antena de transmissão  
( $P_r(d_o)$ ), podemos estimar o nível de potência recebida nos outros pontos ao longo do  
Campus da UFPE. Para esta análise, duas tabelas (Tabela 3 e Tabela 4) foram geradas  
indicando níveis de potência recebida (teórica e medida) para ambientes *indoor* e *outdoor*:

**Tabela 3 - Ambiente *outdoor* - Comparação entre a potência recebida real e a potência recebida teórica.**

Nome	d (Km)	Medição (dBm)	Calculado ( $P_r(d)$ ) (dBm)	Medição - Calculado (dBm)
Unicap ( $d_0$ )	1,22	-82,25	Potência de referência	-
Reitoria - UFPE	7,34	-81,78	-97,84	16,06
CIn - UFPE	8,05	-92,15	-98,64	6,49
CFCH - UFPE	8,35	-87,88	-98,96	11,08

**Tabela 4 - Ambiente *indoor* - Comparação entre a potência recebida real e a potência recebida teórica.**

Nome	d (Km)	Medição (dBm)	Calculado ( $P_r(d)$ ) (dBm)	Medição - Calculado (dBm)
Unicap ( $d_0$ )	1,22	-83,36	Potência de referência	-
Reitoria - UFPE	7,34	-107,51	-98,95	-8,56
CIn - UFPE	8,05	-95,65	-99,75	4,10
CFCH - UFPE	8,35	-91,58	-100,07	8,49

Analisando essas tabelas, é possível concluir que há semelhanças entre os valores medidos e os valores teóricos na maioria das ocasiões, pois, de acordo com [3], as quatro localidades de medição que têm distâncias para a estação base semelhantes às localidades de medição deste trabalho obtiveram uma diferença de 9 dBm, em média. Desta forma, isto confirma que a Lei da Dependência Quadrática se aplica ao experimento, de forma que também foram obtidos esses mesmos níveis de diferença entre valores de medição e valores teórico neste trabalho. A maior divergência refere-se à medição externa da Reitoria-UFPE. Isto ocorreu porque este local apresenta maiores características rurais (poucos prédios em volta). Assim, o efeito de Propagação Multipercorso e Sombreamento foi potencialmente mais fraco nesta localidade, permitindo que o sinal fosse sensoriado sem obstáculos e refrações e que os níveis de potência recebida neste local fossem maiores que valores de outros ambiente.

A Potência Efetiva Isotrópica Irradiada (PEII) do transmissor, o ganho e o retorno da perda do receptor determinam a perda de potência real [3]. Devido ao desconhecimento de alguns parâmetros de transmissão, como padrões de transmissão e ganhos de antena, o que é importante para determinar a PEII, a seguinte suposição foi feita:

- A perda de percurso no ponto  $d_0$  é igual a perda do espaço livre.

Esta suposição é consistente com as conclusões obtidas a partir dos resultados apresentados pelas Tabelas 3 e 4.

## 6.2 Definição do Limiar

A tarefa de definir um limiar é um dos pontos importantes do trabalho. Este limite determina a partir de qual nível de potência recebida o US irá considerar a presença do UP na rede. Esta decisão afeta diretamente as taxas de probabilidade de disponibilidade do canal. As consequências de uma má definição deste parâmetro acarreta em diversos problemas. Por exemplo, se for escolhido um limiar abaixo do ideal, o sistema pode se tornar excessivamente conservador e o US pode perder oportunidades de transmissão quando o UP não estiver efetivamente no canal. Por outro lado, se um limiar acima do ideal for escolhido, o US pode acabar causando interferências na transmissão do UP por não obter informações da presença deste usuário na faixa de frequência.

Por estes motivos, não há uma convenção na literatura de qual é a melhor escolha para um valor de limiar. Segundo a FCC (*Federal Communications Commission*), o valor ideal para limiar para sinais de TV Digital é -114 dBm para canais de 6MHz [24]. Porém, este limite é considerado conservador por alguns trabalhos da literatura, como, por exemplo, em [25], que indica que este limiar é altamente conservador. Limiar abaixo do valor ideal pode ocasionar alertas falsos, ou seja, USs podem detectar a presença do UP mesmo quando ele não está transmitindo naquele canal. Em [25], o limiar definido é de -85,5 dBm/8 MHz para canais de TV Digital. Em [26], o limiar definido para sensoriamento foi de -107 dBm, considerando medições para identificação de sinal de transmissão primária presente.

Neste trabalho, foi identificado que um limiar conservador sugerido pela FCC iria prejudicar as taxas de oportunidades de transmissão, assim como o limiar sugerido por [25] poderia prejudicar a transmissão do canal de TV. Assim, foi decidido que o limiar utilizado foi também de -107 dBm, assim como em [26].

## 6.3 Sinal Captado e Dados dos Modelos de Propagação

Como definido na Seção 6.1, a perda de percurso no ponto  $d_0$  é igual à perda no espaço livre. De posse desta premissa e das medições do nível de potência recebida, é possível calcular a perda de potência nas localidades da UFPE. Os valores de perda de percurso medidos foram calculados da seguinte maneira:

Para cada localidade  $i$  e ponto de referência  $p_0$ :

$M_0$  = Potência medida no ponto  $p_0$ .

$M_i$  = Potência medida no ponto  $i$ .

$P_{th}(p_0)$  = Perda de percurso no ponto  $p_0$ .

$P_{th}(p_0, i)$  = Perda de percurso entre  $p_0$  e o ponto  $i$ .

$P_{th}(i)$  = Perda de percurso no ponto  $i$ .

$$P_{th}(p_0, i) = M_0 - M_i \quad (11)$$

$$P_{th}(i) = P_{th}(p_0, i) + P_{th}(p_0) \quad (12)$$

As perdas de percurso referentes aos modelos de propagação apresentados na Seção 3 foram calculados considerando os parâmetros de cada localidade. Esses dados foram gerados para ambientes *indoor* e *outdoor*. Esses valores foram apresentados nas Tabela 5 e 6 .

**Tabela 5 - Ambiente *outdoor* - Perdas de Percurso.**

Local	d (Km)	Perdas de Percurso (dB)				
		Medição	PEL	Ericsson 9999	Egli	Hata
Unicap ( $d_0$ )	1,22	89,81	89,81	87,99	83,83	108,43
Reitoria - UFPE)	7,34	89,34	105,40	108,18	110,78	128,89
CIn - UFPE	8,05	99,71	106,20	108,11	110,58	128,84
CFCH - UFPE	8,35	95,44	106,52	108,21	110,69	128,94

**Tabela 6 - Ambiente *indoor* - Perdas de Percurso.**

Local	d (Km)	Perdas de Percurso (dB)				
		Medição	PEL	Ericsson 9999	Egli	Hata
Unicap ( $d_0$ )	1,22	89,81	89,81	87,99	83,83	108,43
Reitoria - UFPE	7,34	113,96	105,40	107,72	110,14	128,44
CIn - UFPE	8,05	102,1	106,20	105,74	107,43	126,47
CFCH - UFPE	8,35	98,03	106,52	105,65	107,34	126,39

Para melhor comparar os resultados medidos com os resultados calculados pelos modelos de propagação, os valores de medição foram subtraídos dos valores dos modelos. Os valores de média e desvio padrão também foram gerados para auxiliar na análise.

**Tabela 7 - Ambiente *outdoor* - Erro médio e desvio padrão.**

Local	Perdas de Percurso (dB)			
	Medição e PEL	Medição e Ericsson 9999	Medição e Egli	Medição e Hata
Unicap ( $d_0$ )	0	-1,82	-5,98	18,62
Reitoria - UFPE	16,06	18,84	21,44	39,55
CIn - UFPE	6,49	8,4	10,87	29,13
CFCH - UFPE	11,08	12,77	15,25	33,5
<b>Média</b>	8,41	9,55	10,40	30,2
<b>Desvio padrão</b>	5,92	7,54	10,17	7,64

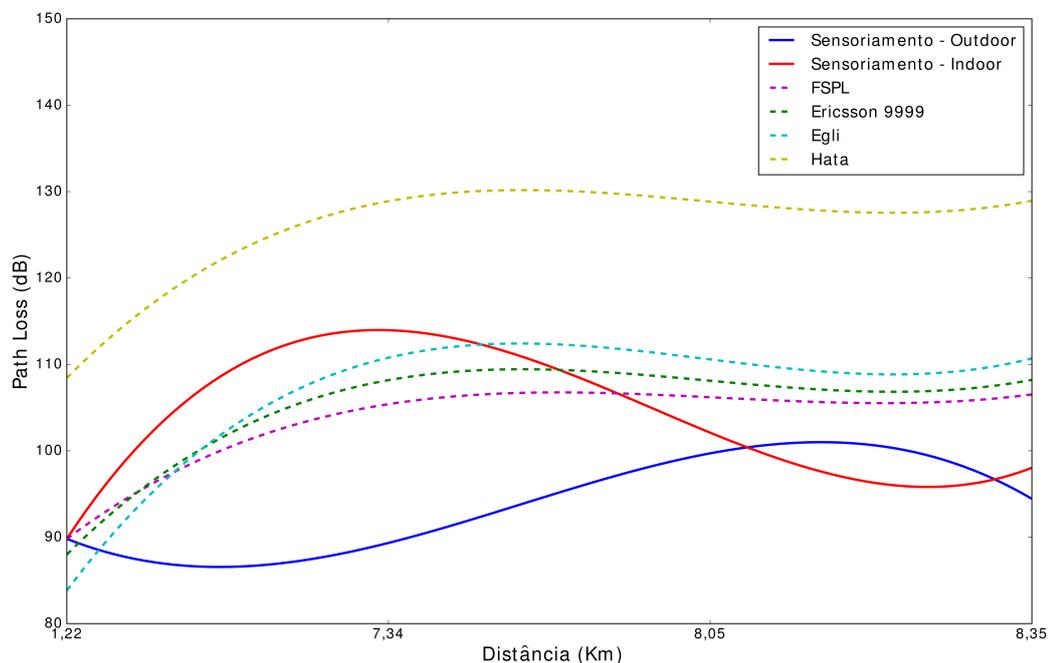
**Tabela 8 - Ambiente *indoor* - Erro médio e desvio padrão.**

Local	<i>Perdas de Percurso (dB)</i>			
	Medição e PEL	Medição e Ericsson 9999	Medição e Egli	Medição e Hata
Unicap ( $d_0$ )	0	-1,82	-5,98	18,62
Reitoria - UFPE	-8,56	-6,24	-3,82	14,48
CIn - UFPE	4,1	3,64	5,33	24,37
CFCH - UFPE	8,49	7,62	9,31	28,36
<b>Média</b>	1,01	0,80	1,21	21,46
<b>Desvio padrão</b>	6,29	5,27	6,32	5,31

Numericamente, os valores das medições internas se aproximaram mais dos preditos nos modelos do que os das medições externas. Isto ocorreu porque as medições externas conseguiram detectar um nível de potência maior (por volta de 9% maior) que as medições internas e os modelos de propagação apresentaram valores de perda de percurso superiores ao das medições externas, dados os parâmetros.

Para melhor visualização dos resultados, um gráfico com esses níveis de perda de percurso foi criado (Figura 15).

**Figura 15 - Nível de perda de percurso.**



Fonte: O Autor

Observando a Figura 15, podemos constatar que os valores de perda de percurso das medições *indoor* variaram entre os valores preditos pelos modelos de propagação. Pode-se atribuir a causa dessa variação aos fatores que adicionam uma aleatoriedade no processo, como quantidade de obstáculos (paredes, objetos, etc...) entre o sinal irradiado e a antena receptora e a diferença de piso no qual aquela medição foi realizada. Por exemplo, pisos

mais baixos sofrem uma maior quantidade de difrações e reflexões [27]. Um pouco desta variação também é observada nas medições *outdoor*. Isto ocorreu porque, em algumas localidades, como no caso da Reitoria-UFPE, o sensoriamento foi realizado em campo aberto. Isto possibilitou uma melhor receptividade do sinal do que, por exemplo, medições da Unicap (onde havia vários prédios ao redor do sensoriamento) e do CFCH (onde também há prédios ao redor).

Estas características acabam comprovando que o sensoriamento pode sofrer com fatores de Sombreamento, que pode ser provocado pelas paredes dos prédios, e pela Propagação Multipercurso, que pode ser provocado pela presença de prédio ao redor dos locais de sensoriamento. O efeito de Nó Escondido não foi estudado nessas análises, mas este efeito também pode acontecer neste cenário.

Por fim, o EMQ (Erro Médio Quadrático) é apresentado na Tabela 9.

**Tabela 9 - Erro médio quadrático (EMQ).**

<b>Modelo de Propagação</b>	<b>EMQ (dB) (Outdoor)</b>	<b>EMQ (dB) (Indoor)</b>	<b>Média</b>
PEL	10,28	6,37	8,32
Ericsson 9999	12,16	5,33	8,74
Egli	14,54	6,43	10,48
Hata	31,15	22,11	26,63

De posse dos resultados apresentados na Tabela 9, podemos definir o modelo de propagação que mais se adéqua nas seguintes abordagens:

1. Modelo Geral.
2. Modelo específico para cada ambiente.
  - 2.1. Melhor modelo *outdoor* geral.
  - 2.2. Melhor modelo *indoor* geral.
  - 2.3. Melhor modelo *outdoor* para cada localidade.
  - 2.4. Melhor modelo *indoor* para cada localidade.

Baseando-se na Tabela 9, o modelo que mais se adequa ao caso geral é o modelo PEL, obtendo média de RMSE de 8,32 dB. O modelo Ericsson 9999 obteve taxas semelhantes ao PEL e também pode ser considerado para este cenário. Considerando cenários *indoor* e *outdoor*, o modelo PEL também obteve menor RMSE para ambientes *outdoor*, apresentando 10,28 dB de erro. Entretanto, para ambientes *indoor*, o modelo que apresentou mais semelhança numérica com os dados do sensoriamento foi o Ericsson

9999, obtendo um erro médio quadrático de 5,33 dB, ficando próximo dos resultados dos modelos PEL e Egli para este mesmo ambiente.

Para definir os modelos de propagação mais adequados para cada localidade e condições do ambiente de medição em separado, analisamos as Tabelas 7 e 8 e definimos este resultado levando em consideração o menor valor de erro entre o sensoriamento e o valor teórico de cada modelo. Abaixo, os modelos definidos para cada situação.

**Tabela 10 - Melhor modelo de propagação para cada local e ambiente.**

Local	Ambiente	
	<i>Outdoor</i>	<i>Indoor</i>
Reitoria - UFPE	PEL	Egli
CIn - UFPE	PEL	Ericsson 9999
CFCH - UFPE	PEL	Ericsson 9999

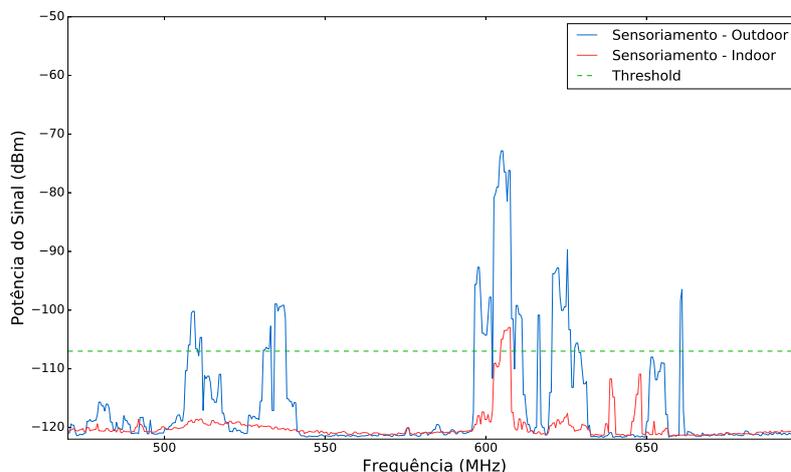
Analisando a tabela acima, concluímos que as medições *outdoor* apresentaram uma boa consistência na questão da congruência com modelos de propagação. Nas medições *indoor*, cada localidade adequou-se melhor a um modelo distinto e isso refletiu o impacto dos fatores que afetam esse tipo de condição de sensoriamento. Concluímos que, em um caso geral, o modelo que mais se adequou as medições foi o modelo de perda em espaço livre (PEL).

Ao escolher qual abordagem adotar, é necessário analisar também os custos e dificuldades enfrentados por cada uma delas. Por exemplo, optando pela abordagem que define um modelo geral para todos os cenários, o comportamento do canal e os níveis de potência do UP são considerados os mesmos tanto para ambientes *outdoor* quanto para ambientes *indoor*, possibilitando equívocos do US ao indicar se o canal está disponível ou não para uso. Caso contrário, se for escolhido o cenário que indica o melhor modelo para cada localidade e cada ambiente, obteríamos uma maior fidelidade com a realidade, aumentando a probabilidade de acertos na predição da presença do UP. Porém, se essa abordagem for adotada, uma complexidade a mais é incorporada ao método, pois aumentaria o número de experimentos e possibilidades disponíveis para este caso. Assim, esses aspectos devem ser considerados de acordo com os requisitos e recursos do sistema.

#### 6.4 Oportunidades de Transmissão do Usuário Oportunista

Esta Seção apresenta a análise de ocupação e oportunidades de transmissão oportunistas considerando os ambientes *indoor* e *outdoor* da UFPE dotados no estudo. As Figuras 16, 17 e 18 apresentam o nível de intensidade de sinal ao longo das faixas de frequência nos locais investigados.

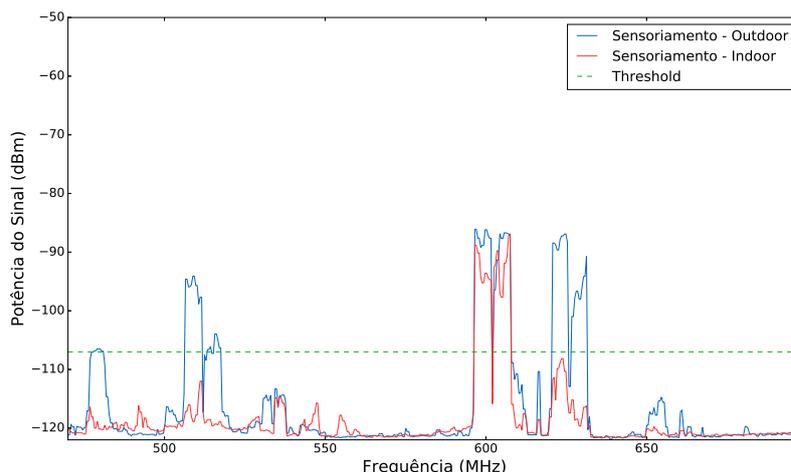
**Figura 16 - Média do espectro de frequência - Reitoria-UFPE.**



Fonte: O Autor

Devido aos fatores que afetam mais intensamente as medições internas explanados na Seção 4.1.2, os níveis de sinais captados em ambientes internos são, comumente, menores que os sinais captados em ambientes externos, como pode ser observado na figura 16. Fatores como nível do piso em que o sinal foi sensoriado e localidade podem também beneficiar medições internas, como é o caso de algumas faixas de frequência das medições da Reitoria-UFPE, por volta da frequência 650 MHz (Figura 16).

**Figura 17 - Média do espectro de frequência - CIn-UFPE.**

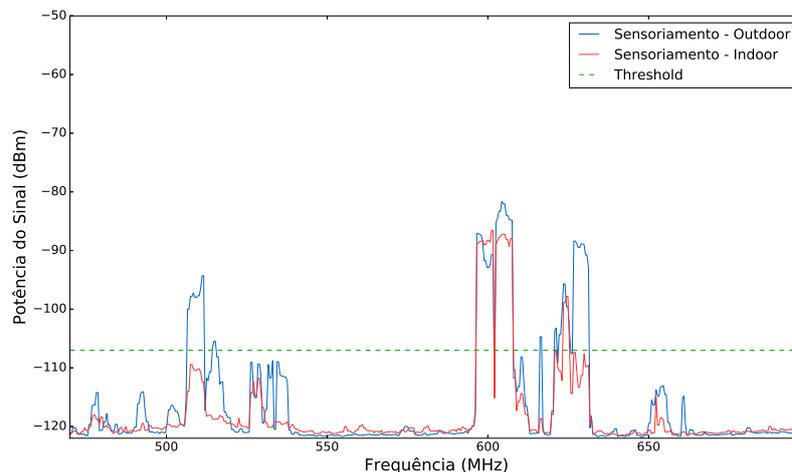


Fonte: O Autor

Também podemos obter níveis de potência similares para os mesmos canais tanto nas medições internas quanto nas externas, como é o caso de frequências por volta de 600MHz no CIn-UFPE (Figura 17). Como esperado, em diversas faixas de frequência, considerando a média dos sensoriamentos, o nível do sinal da coleta externa supera a

linha do limiar e o nível da coleta interna não alcança os mesmos níveis nestas mesmas frequências. Este caso acaba classificando um caso de falso negativo, onde o UP está presente no canal e o sensoriamento do US no ambiente interno não identifica esta presença. Este caso pode classificar um caso de Nó Escondido e, assim, ocasionar interferência na transmissão do UP. Este fato pode ser observado, por exemplo, por volta da frequência 510 MHz no espectro do CFCH-UFPE (Figura 18). Essas circunstâncias também podem ser consideradas para a decisão do limiar mais adequado ao cenário e local em questão. Por exemplo, se, neste caso, o limiar escolhido fosse menor que -110dBm, aquela faixa de frequência iria ser considerada ocupada pelo US que está executando tanto o sensoriamento externo quanto o interno. No entanto, como explanado na Seção 6.2, este pode ser um limiar não ideal para o sensoriamento.

**Figura 18 - Média do espectro de frequência - CFCH-UFPE.**



Fonte: O Autor

Um critério importante para mensurar sistemas que possibilitam acesso oportunista é a taxa de oportunidade de transmissão. Esta métrica pode ser definida de diversas maneiras, contanto que evidencie o comportamento da ocupação de cada canal. Neste trabalho, utilizaremos a métrica da Ocupação Relativa do Espectro [26]. A ocupação relativa do espectro  $O_{RS}(c)$  em um canal  $c$  é definida pelas Equações (13), (14) e (15).

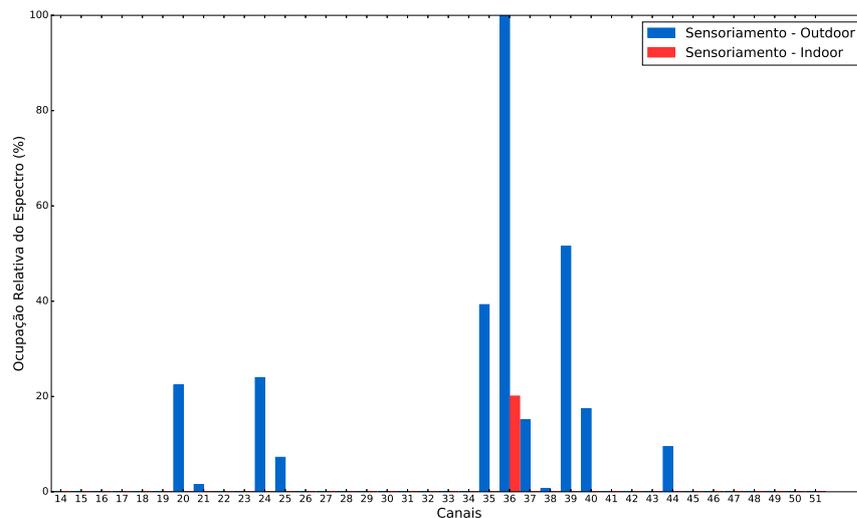
$$N(c, t) = SS(c) - t \quad (13)$$

$$M(c, t) = \max(N(c, t)) \quad (14)$$

$$O_{RS} = 100 \cdot N(c, t) / M(c, t) \quad (15)$$

, sendo  $SS(c)$  o sinal sensoriado no canal  $c$ ,  $t$  é o limiar definido na Seção 6.2,  $N(c, t)$  é o nível de ocupação do canal  $c$  (onde o valor mínimo possível é zero),  $M(c, t)$  é a ocupação relativa máxima para aquele canal, definindo-se o cenário. Para esta análise, um valor de  $M(c, t)$  foi definido para cada localidade e cada ambiente. Logo em seguida, o maior valor de  $M(c, t)$  dentre as medições interna e externa de cada localidade foi definido como o valor de  $M(c, t)$  daquele local. Esses dados foram calculados para cada um dos 38 canais e os resultados expostos nas Figuras 19, 20 e 21.

**Figura 19 - Ocupação relativa do espectro - Reitoria-UFPE.**

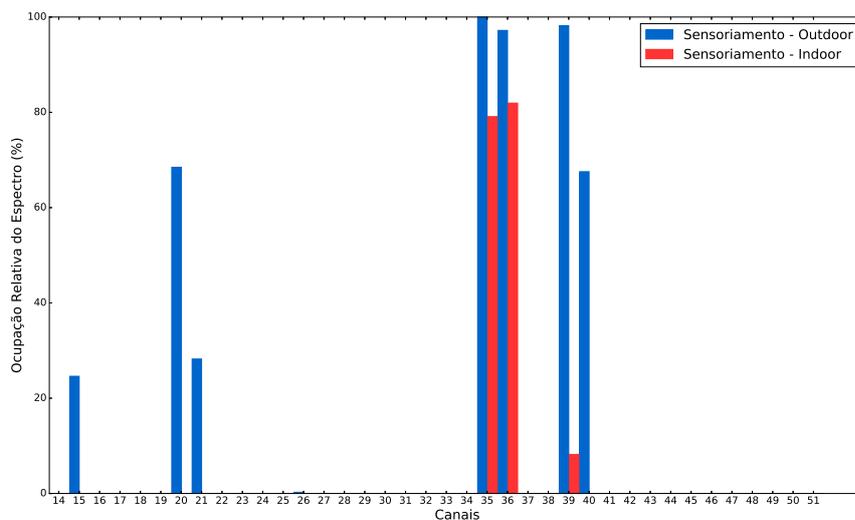


Fonte: O Autor

A princípio, calculando a razão entre a quantidade de canais que têm ocupação relativa igual a zero pela quantidade de canais total, é possível concluir que, em média, 75% dos canais pertencentes à faixa UHF no Brasil têm ocupação relativa do espectro igual ou próximas a zero. Ou seja, na maior parte do tempo, estes canais não estão ocupados por nenhum UP. Este valor indica um grande potencial para o uso oportunista do espectro de frequência nestes locais. Fazendo um comparativo entre os gráficos de ocupação relativa dos diferentes locais, foi verificado que a medição interna da Reitoria-UFPE foi a mais prejudicada pelos fatores que ocasionam Sombreamento e Nó Escondido. Analisando a Figura 19, podemos observar que o sensoriamento interno neste sítio conseguiu identificar uma ocupação relativa de apenas 22% no canal 36. Em contrapartida, o sensoriamento externo obteve uma ocupação de 100% neste mesmo canal. Além deste canal, a medição externa identificou transmissão em outros 10 canais além da coleta interna.

No CIn-UFPE, houve uma certa paridade entre as medições internas e externas no canal 35 e 36. Isto indica que esses canais seriam considerados ocupados na maior parte do tempo em ambas as condições de sensoriamento. Mas, ainda assim, o sensoriamento externo conseguiu uma taxa maior de ocupação que o sensoriamento interno. Este local também apresentou os maiores níveis de ocupação relativa no espectro, tanto no

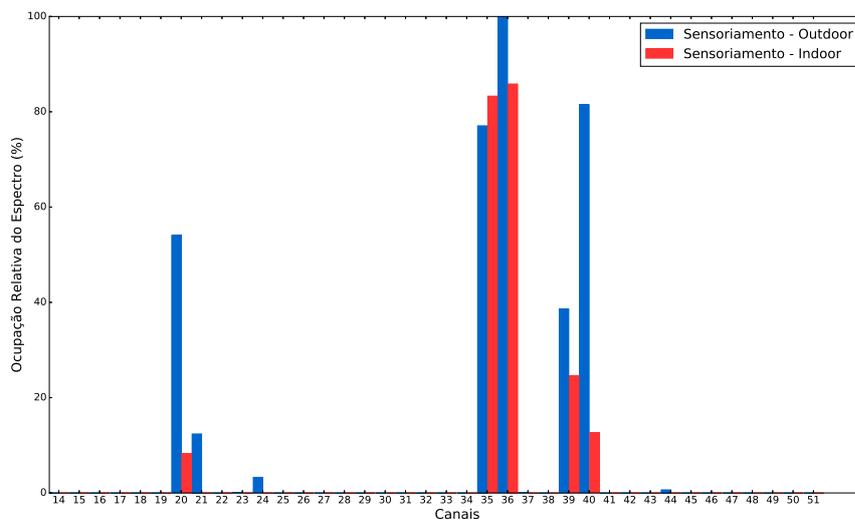
Figura 20 - Ocupação relativa do espectro - CIn-UFPE.



Fonte: O Autor

sensoriamento interno quanto no externo.

Figura 21 - Ocupação relativa do espectro - CFCH-UFPE.



Fonte: O Autor

Condições como nível do piso do prédio interno que o sensoriamento ocorre, visão direta e ângulos de recepção de sinal podem provocar situações inversas às esperadas em relação às medições internas e externas. Ou seja, o nível de potência de um sinal pode ser detectado com maior valor nas coletas internas do que nas coletas externas. No CFCH-UFPE, a taxa de ocupação relativa para o canal 35 é maior no sensoriamento interno do que no sensoriamento externo. Isto pode ter ocorrido devido ao fato de que o sensoriamento no CFCH-UFPE aconteceu no segundo piso do prédio do CFCH. Além deste fato, as medições internas deste local foram as que obtiveram o maior número de ocupação relativa do espectro maiores que 0%. Isto indica que este sensoriamento conseguiu identificar o maior número de transmissões de UPs nos canais.

Finalmente, pudemos demonstrar que os efeitos de Sombreamento, *Multi-path Fading* e Nó Escondido podem afetar o sensoriamento, dadas as condições de sensoriamento do local, pois as medições *indoor* obtiveram níveis menores de potência que medições *outdoor*. Mas que, dependendo do limiar escolhido, o sensoriamento interno ainda pode refletir o real comportamento do espectro.

## 6.5 Implicações Práticas

Notou-se grande capacidade de transmissões oportunistas tanto em ambientes externos quanto internos. Esse potencial pode ser empregado em diversas situações, como, por exemplo, em Redes de Campus. As oportunidades de transmissão dos USs em ambientes *outdoor* e *indoor* podem ser consideradas em separado, pois foi possível propor um modelo de propagação (ou um BDGL) para cada tipo de ambiente. Também é factível propor uma BDGL para cada localidade e cada tipo de ambiente. A título de exemplo, um Campus Universitário com vários departamentos, laboratórios e prédios administrativos pode usufruir de transmissões oportunistas em faixas de espectro subutilizadas considerando a disponibilidade de *White Spaces* para cada situação.

Esse sistema permite utilizar melhor a capacidade de uso disponível pelas faixas de frequência dedicadas a sinais de TV (VHF e UHF), as quais possuem muitos aspectos que auxiliam na transmissão do sinal sem fio, como excelentes propriedades de propagação de sinais de rádio, faixas largas de canais (de 6 a 8 MHz) e periodicidade dos sinais dos UPs, o que permite uma melhor predição da presença dos UPs. Desta maneira, esse método possibilita a realização de experimentos da tecnologia de rádios cognitivos em tais faixas sem a interferência nos UPs, que é condição mínima para todo sistema de uso oportunista.

Para atender a todos esses requisitos propostos por rádios cognitivos, um planejamento e uma análise completa do ambiente no qual o US está inserido é imprescindível. Uma base de dados geo-localizada pode ser construída com base nos resultados obtidos pela análise do espectro local, propondo padrões de ocupação dos canais levando

em consideração o local e o tipo do ambiente do US, caracterizando, assim, um modelo *location-and-environment type aware*.

Este espectro livre também pode ser aproveitado utilizando técnicas de sensoriamento, porém estas técnicas de monitoramento do espectro em tempo real necessitam de equipamentos capazes de capturar o nível de potência dos canais, além de ser suscetível a diversos problemas de sensoriamento, os quais podem distorcer os resultados do monitoramento e, conseqüentemente, afetar nas decisões de transmissão, interferindo nas atividades dos UPs. Devido a estes problemas, uma abordagem híbrida, utilizando BDGL e Sensoriamento Espectral, pode ser adotada. Como exposto acima, alguns cenários, principalmente os *indoor*, sofreram com fenômenos de Sombreamento e Nó Escondido. O US mitigaria esses problemas utilizando a abordagem híbrida, captando dados do ambiente em tempo real em conjunto com dados da BDGL, aumentando, assim, a confiabilidade do sistema.

## 7 CONCLUSÃO

Este trabalho abordou o problema da subutilização do espectro eletromagnético voltado para transmissões de ondas de rádio, mais especificamente para a faixa relativa à transmissão de TV. Foi levantado o fato que, para utilizar essas faixas de frequências oportunisticamente, o usuário não-licenciado precisa obter o estado atual daquele canal corretamente, ou seja, se o usuário licenciado daquele canal está usando ou não aquela faixa. Para auxiliar nesta decisão, dois métodos de monitoramento do espectro foram abordados: sensoriamento em tempo real e consulta à base de dados geo-localizadas (BDGL).

Essas oportunidades de transmissão podem ser utilizadas em diversos cenários, inclusive em áreas que necessitam de Redes de Campus Sem Fio. Redes de instituições ou órgãos governamentais podem fazer o uso dessas faixas de frequência quando o UP estiver ausente, aumentando, assim, sua vazão.

Para realizar a análise dessa faixa em específico, experimentos de sensoriamento do espectro em tempo real foram realizados no Campus da Universidade Federal de Pernambuco em três locais específicos: Reitoria, Centro de Informática (CIn) e no Centro de Filosofias e Ciências Humanas (CFCH). O monitoramento foi realizado tanto em ambientes *indoor* quanto em ambientes *outdoor* para cada localidade. Nesses pontos de coleta, o monitoramento dos 38 canais que constituem essa faixa foram sensoriados por um kit USRP e um computador por 1,25h e esses dados processados. Também foram realizados experimentos na Universidade Católica de Pernambuco e esse ponto foi adotado como ponto de referência para perda de sinal em espaço livre.

Primeiramente, a análise foi voltada para o canal 36 com a finalidade de observar o comportamento da irradiação do sinal transmitido pela antena da emissora da TV Globo Nordeste e realizar comparações com valores gerados por 4 diferentes modelos de propagação. Propomos, para cada localidade e para cada tipo de ambiente, um modelo de propagação que mais se assemelha aos dados medidos. Para um cenário geral, o modelo que mais se adequou foi o PEL, obtendo um RMSE de 8,32 dB.

Logo após, foram analisados os 38 canais em relação às oportunidades de transmissão. Taxas de Ocupação Relativas do Espectro foram calculadas para cada canal em ambientes *indoor* e *outdoor*, observando que o impacto de efeitos de Sombreamento, Propagação Multipercurso e Nó Escondido afetam mais medições internas do que externas. Foi mostrado que mais de 75% desses canais ficam livres na maior parte do tempo e que as medições externas conseguiram refletir melhor o estado atual do espectro.

De posse desta análise, uma BDGL pode ser gerada para este local, assim como esta metodologia pode ser adotada também para outros locais e tornar a construção de

uma base de dados voltada para outras localidades possível.

## 8 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, melhorias na análise deste espectro podem se propostas, como, por exemplo, a observação do espectro em diferentes datas e horários à procura de variações na transmissão do sinal pelo UP ao longo dessas variáveis. De posse deste dados, uma distribuição estatística pode ser sugerida, aumentando a confiabilidade da decisão do US para transmissão do sinal.

Também propomos o uso de modelos de propagação que façam uso de parâmetros e variáveis externas, como densidade de objetos em volta do US e também o uso de variáveis de relevo, posicionamento, etc. Espera-se que esses parâmetros aumentem a precisão desses modelos de propagação e que os valores de RMSE diminuam.

Análises das outras fases de rádios cognitivos, além do sensoriamento do canal, podem ser realizadas com o propósito de melhorar todo o processo de transmissão oportunista. A fim de observar o impacto da possível interferência que USs podem causar na transmissão do UP, experimentos de transmissão pelo US também podem ser realizados e efeitos de fenômenos como Nó Escondido analisados e soluções propostas.

## REFERÊNCIAS

- [1] GHASEMI, A.; SOUSA, E. S. **Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: Requirements, Challenges and Design trade-offs.** *IEEE Communications Magazine*, 46:32–39, 2008.
- [2] CORMIO, C.; CHOWDHURYA, K. R. **A Survey on MAC Protocols for Cognitive Radio Networks.** *Ad Hoc Networks*, 7:1315–1329, 2009.
- [3] MAUWA, H. ET AL. **Systematic Analysis of Geo-location and Spectrum Sensing as Access Methods to TV White Space.** In *ITU Kaleidoscope: ICTs for a Sustainable World (ITU WT)*. IEEE, 2016.
- [4] BARNES, S.D.; BOTHA, P.R.; MAHARAJ, B.T. **Spectral Occupation of TV Broadcast Bands: Measurement and Analysis.** *Measurement*, 93:272–277, 2016.
- [5] SILVA, R. B. F. DA; SILVA, C. T. R. DA. **Spectrum regulation in Brazil.** *IEEE Wireless Communications*, 23:1536–1284, 2016.
- [6] POPOOLA, J. J.; OLST, R. V. **Dynamic Spectrum Access as an Alternative Radio Spectrum Regulation System.** In *2010 Second Region 8 IEEE Conference on the History of Communications (HISTELCON)*. IEEE, 2010.
- [7] SUPRITHA ET AL. **A Study on TV-White Space.** In *2016 International Conference on Emerging Trends in Engineering, Technology and Science (ICETETS)*. IEEE, 2016.
- [8] AKYILDIZ, I. F. ET AL. **NeXt Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey.** *Computer Networks*, 50:2127–2159, 2006.
- [9] JASIM, A. M.; AL-ANBAGI, H. N. **A Comprehensive Study of Spectrum Sensing Techniques in Cognitive Radio Networks.** In *2017 International Conference on Current Research in Computer Science and Information Technology (ICCIT)*, pages 107–114. IEEE, 2017.
- [10] FALCÃO, M.; SILVA, G. A.; DIAS, K. **Three-layered Prioritized Cognitive Radio Networks with Channel Aggregation and Fragmentation Techniques.** In *2016 8th IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*. IEEE, 2016.

- [11] MOHAMED, H. ET AL. **Partial Discharge Detection Using Software Defined Radio.** In *2016 International Conference for Students on Applied Engineering (ICSAE)*. IEEE, 2016.
- [12] SARKAR, T.K. ET AL. **A Survey of Various Propagation Models for Mobile Communication.** *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 45:239–307, 2003.
- [13] SKLAR, B. ***Digital Communications: Fundamentals and Applications.*** Prentice Hall, 2<sup>a</sup> edição edition, 2001.
- [14] ROSLEE, M. B.; KWAN, K. F. **Optimization of Hata Propagation Prediction Model in Suburban Area in Malaysia.** *Progress In Electromagnetics Research C*, 13:91–106, 2010.
- [15] JIMOH, A.A. ET AL. **Performance Analysis of Empirical Path Loss Models in VHF & UHF Bands.** In *6th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS)*. IEEE, 2015.
- [16] CARVALHO, F.B.S. DE; LOPES, W.T.A.; ALENCAR, MARCELO S. **Performance of Cognitive Spectrum Sensing Based on Energy Detector in Fading Channels.** *Procedia Computer Science*, 65:140–147, 2015.
- [17] PLATA, D. MERCEDES M.; REÁTIGA, Á. G. A. **Evaluation of Energy Detection For Spectrum Sensing Based on The Dynamic Selection of Detection-Threshold.** *Procedia Engineering*, 35:135–143, 2012.
- [18] AULAKH, I. K.; KAUR, N. **Optimal Sensing Simulation in CRNs Under Shadow-fading Environments.** In *3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, pages 901–905. IEEE, 2016.
- [19] ARAGÓN-ZAVALA, A.; BROWN, T. W. C.; CASTAÑÓN, G. **Polarization and Effects on Hidden Node/Shadowing Margin for TVWS.** *IEEE Transactions on Broadcasting*, 62:46–54, 2016.
- [20] MWANGOKA, J. W.; MARQUES, P.; RODRIGUEZ, J. **TV White Spaces Exploitation Through a Bicameral Geo-location Database.** *Telecommunications Policy*, 37:116–129, 2013.
- [21] OH, S. W.; CHAI, C. C. **Geo-Location Database with Support of Quality of Service for TV White Space.** In *24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications: Services, Applications and Business Track*, pages 3428–3433. IEEE, 2013.
- [22] **TV White Spaces Database.** <http://whitespaces.spectrumbridge.com>. Acesso Em: 05/07/2017.

- [23] **Google Spectrum Database.** <https://www.google.com/get/spectrumdatabase/channel/>. Acessado Em: 05/07/2017.
- [24] GENACHOWSKI, C. ET AL. **FCC 10-174 Report.** *Federal Communications Commission (FCC)*, 2017.
- [25] YING, X. ET AL. **Exploring Indoor White Spaces in Metropolises.** In *The 19th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (ACM MobiCom)*. ACM, 2013.
- [26] MAUWA, H.; BAGULA, A.; ZENNARO, M. **Exploring TV White Spaces for Use in Campus Networks.** In *International Conference on e-Infrastructure and e-Services for Developing Countries*, pages 14–25. EAI, 2015.
- [27] MARTIJN, E.F.T.; HERBEN, M.H.A.J. **Characterization of Radio Wave Propagation Into Buildings at 1800 MHz.** *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2:122–125, 2003.
- [28] RAP, S. **Estimating the Zigbee Transmission-range ISM Band-designers of Short-range Wireless Devices in the 900-mhz and 2.4-ghz Band Need to Understand What and How Parameters Affect The Transmission Range.** *EDN*, 52(11):67–74, 2007.