

1 Introdução

A comunicação sem fio representa, na atualidade, a parte significativa dos serviços de telecomunicações disponíveis aos usuários. A variedade de serviços, aplicações e dispositivos apresentam uma grande revolução tecnológica que traz desafios técnicos importantes na prestação de serviços com alta disponibilidade, capacidade e orientados para a Qualidade de Serviços (QoS) fim-a-fim.

O mundo chegou, nesta década, a um marco importante na história da tecnologia, como indica pesquisa de mercado da iSuppli: “Em setembro de 2010 havia 5 bilhões de assinantes móveis no mundo. Esse é um número que equivale a 73,4% da população da Terra. E até o final de 2010, o número chegou a 5,1 bilhões de assinantes móveis que equivale a 74,5 por cento da população do mundo” [1]. Outro resultado mostra que, em 2007, o número de assinantes de telefonia móvel no mundo era de 3,4 bilhões. Já em 2012, foram 6 bilhões de usuários no mundo [2,3].

No final de 2012 o Brasil contava com 261,8 milhões de acessos do Serviços Móvel Pessoal (SMP). No ano, foram registradas 19,5 milhões de novas habilitações, crescimento de 8.1% na base de assinantes em relação ao ano anterior. Com esse resultado a densidade do serviço alcançou a marca de 132.8 acessos para cada grupo de cem habitantes. O gráfico da Figura 1.1 apresenta a evolução do número de acessos e das taxas de crescimento da telefonia móvel nos últimos anos.

Apesar de o crescimento de 8,1 %, do crescimento anual, ter sido o menor registrado pela Agência desde 1999, a base de 261,8 milhões de telefones celulares fez com que o Brasil permanecesse em sexto lugar na classificação mundial de número de acessos da telefonia móvel, atrás, apenas, da China, da Índia, dos Estados Unidos, da Rússia e da Indonésia, conforme dados da União Internacional de Telecomunicações (UIT)[4].

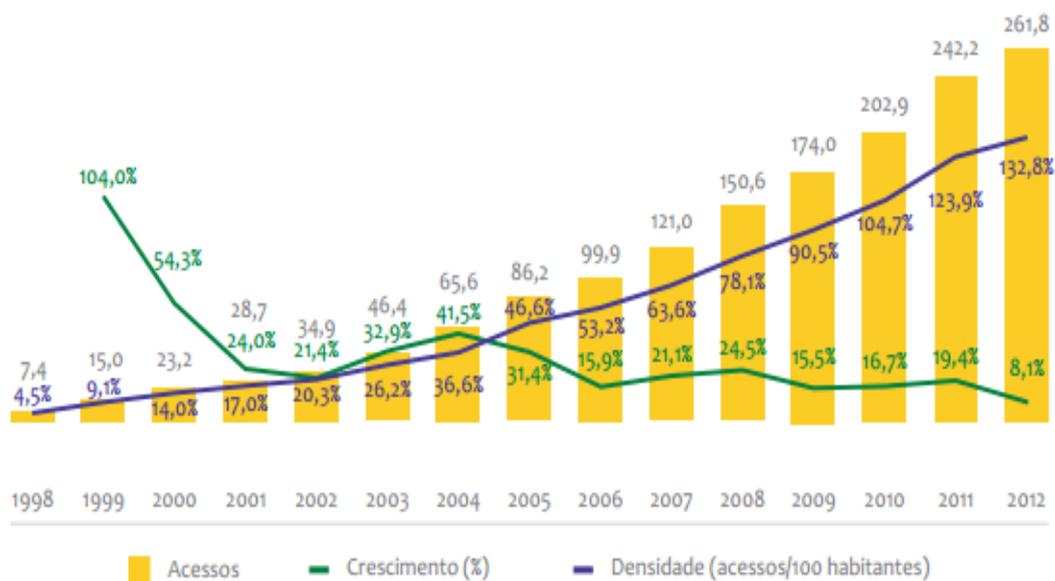


Figura 1.1: Evolução do número de acessos.

A penetração de assinantes sem fio varia muito por regiões. No lado mais baixo está o conjunto da África e Oriente Médio, onde a penetração equivale a 50 por cento. No lado mais alto está a Europa Ocidental, onde há mais subscrições do que os cidadãos com penetração de 157,6 por cento. Os europeus têm frequentemente várias subscrições e telefones, permitindo-lhes manter a comunicação enquanto viajam por diferentes nações utilizando diferentes prestadores de serviços e padrões de tecnologia [1].

As principais tecnologias que proporcionam acesso sem fio banda larga são, atualmente, as seguintes:

- Radio MMDS/LMDS - tecnologia utilizada no interior do Brasil, devido ao baixo custo de manutenção e boas taxas de preço e velocidade. Consiste em distribuir o sinal da Internet, captado por uma linha E1, utilizando antenas e o distribuindo através de POPs (*Ponto de Presença*) espalhados pela cidade, formando uma grande rede de usuários.
- Redes padrão IEEE 802.11 - tecnologia popularmente conhecida como Wi-Fi, consiste em botar um sinal de rede numa determinada área para que assinantes com modems adequados em seus computadores capturem o sinal e acessem a Internet sem usar um fio sequer. Todos os computadores pessoais fabricados a partir de 2003 já vem preparados para este tipo de acesso, bem

como todos os modelos de *Macintosh*. Os pontos que disponibilizam o sinal são chamados pontos de acesso (*Hotspots*) e podem ser públicos (Cafés, Aeroportos) ou privados.

- Redes padrão IEEE 802.16 - esta tecnologia, conhecida como WiMAX estende o alcance do sinal Wi-Fi a maiores áreas, podendo cobrir cidades inteiras com uso de repetidores de sinal. Nos Estados Unidos, o popular buscador e diretório Google está cobrindo várias cidades com esta tecnologia.

- Redes Celulares - As redes de telefonia celular 3G, padrão WCDMA, permitem o acesso sem fio em alta velocidade a computadores e dispositivos móveis. Chegou ao Brasil, em 2007, e vem se expandindo apesar do alto preço por dados trafegado. A rede 4G, padrão LTE, que começou a ser implantada no Brasil em 2013, é ainda mais veloz com grande cobertura de sinal.

- Satélite - Usada em menor escala e principalmente, por empresas e instituições financeiras, esta tecnologia utiliza satélites de comunicação para transmitir o sinal diretamente a terminais, que os captam através de antenas parabólicas comuns e receptores. A grande vantagem é que se pode estabelecer conexão em qualquer local, até mesmo em áreas remotas. A velocidade depende do satélite envolvido e do serviço. No Brasil, a Embratel oferece o serviço pela *Star One* - bidirecional completo - tanto para usuários residenciais como corporativos [5].

1.1. Espectro de radiofrequências

O espectro de radiofrequências é um recurso natural essencial e limitado, correspondente a ondas eletromagnéticas entre 3 kHz e 300 GHz. As faixas de frequência, cujo uso é regulamentado pela ITU e pelas agências reguladoras de cada país, são classificadas como na tabela a seguir.

Frequências	Tipos de serviços
ELF 3-30 Hz	Comunicação com submarinos
SLF 30-300 Hz	Comunicação com submarinos
ULF 300-3 kHz	Comunicação com submarinos, Comunicações com minas
VLF 3-30 kHz	Telegrafia para navios com alcance mundial; serviços de navegação; padrões horários.
LF 30-300 kHz	Comunicação de longa distância com navios, rádio difusão e serviços de navegação.
MF 300 – 3000 kHz	Rádio difusão, radionavegação, alguns serviços móveis.
HF 3 – 30 MHz	Fixo ponto a ponto; móvel terrestre, marítimo e aeronáutico; rádio difusão.
VHF 30 – 300 MHz	Fixo terrestre; móvel terrestre e por satélite; rádio difusão; rádio farol.
UHF 300 – 3000 MHz	Fixo terrestre; radar; móvel terrestre e por satélite; rádio difusão e TV; celular e pcs.
SHF 3 – 30 GHz	Fixo terrestre e por satélite; móvel terrestre e por satélite; sensoriamento remoto; radar.
EHF 30 – 300 GHz	Rádio acesso fixo e móvel; sistemas por satélite; sensoriamento remoto.

Tabela 1.1: Tipos de serviços para cada frequência.

1.2.

Alocação do espectro radioelétrico para comunicações sem fio

Tecnologias sem fio estão se tornando cada vez mais difundidas, especialmente com a popularidade dos *smartphones* e *tablets*. Estes dispositivos, e os novos que virão, dependem de forma essencial da conectividade sem fio provida por redes de acesso em banda larga. Além disso, mais e mais setores estão usando novas tecnologias sem fio como RFID para conectar redes de sensores ou automatizar processos em fábricas ou em casa. No setor automobilístico as

tecnologias sem fio começam a ser usadas para aumentar a segurança rodoviária. Além disso, o espectro de rádio é também vital em áreas de serviços científicos [6].

Hoje em dia, com o desenvolvimento tecnológico no setor de telecomunicações, o espectro radioelétrico está quase totalmente ocupado com um grande número de múltiplas atribuições, visando proporcionar capacidade suficiente aos muitos serviços sem fio em aplicações comerciais e não comerciais, tais como a defesa, o tráfego aéreo e a exploração científica [7].

A Figura 1.2 mostra, a título de ilustração, as atribuições de espectro no Brasil. Cada cor representa um tipo de serviço ao qual é alocada uma banda de frequência [7].

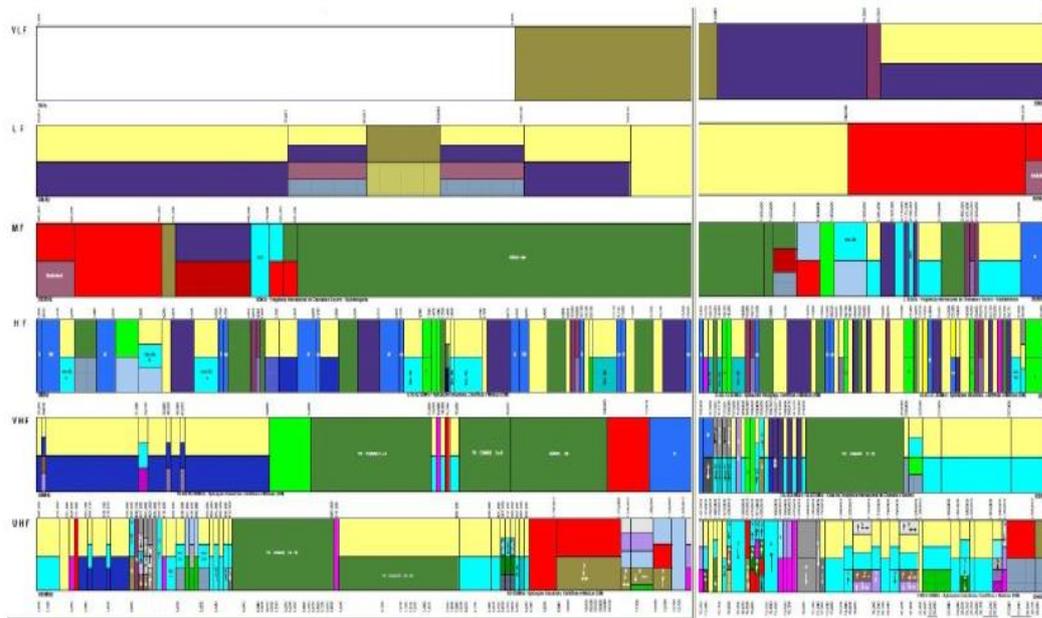


Figura 1.2: Alocações de espectro no Brasil.

Como pode ser observado na Figura 1.2, o espectro tem uma alta ocupação, não sendo encontrada uma banda de uso livre. Estudos recentes realizados pela FCC (Comissão Federal de Comunicações), motivados pela demanda reprimida para a implementação de novos serviços de comunicações e pela necessidade de mais altas taxas de transmissão, indicam que somente 20% ou menos do espectro de radiofrequências disponível é efetivamente ocupado, em tempo e espaço.

O espectro eletromagnético é um dos nossos recursos naturais mais preciosos, por isso, uma considerável quantidade de esforços está sendo direcionada pelo desenvolvimento de técnicas de comunicação que minimizem a largura de banda necessária para transmitir uma determinada informação e, assim, conservar o espaço do espectro. Isso proporciona mais espaços para canais adicionais e permite o desenvolvimento de novos serviços e o atendimento a um maior número de usuários.

Outra alternativa é a utilização de rádios cognitivos, com capacidade de sensoriar o uso do espectro e utilizar frequências momentaneamente disponíveis de forma oportunista. Partindo dessa premissa, o rastreamento e a utilização dos intervalos espectrais, ou espaços brancos (*white spaces*), através da tecnologia de rádios cognitivos, permitirá aumentar a eficiência de uso do espectro, com a introdução de novos serviços de telecomunicações a serem explorados por usuários secundários obrigados a não interferir, ou provocar interferência muito limitada nos usuários primários [8].

1.3. Rádio cognitivo e sensoriamento do espectro

Um caminho promissor, para aliviar a contenção entre as demandas de tráfego atuais e a necessidade de crescimento real da capacidade dos sistemas de comunicação sem fio, é explorar faixas do espectro ocupadas com baixa eficiência. A tecnologia de rádios cognitivos está surgindo como uma eficaz alternativa para aumentar o número de usuários em diversas faixas de frequências.

O uso dos rádios cognitivos prevê o sensoriamento do espectro, a gerência dos dados de ocupação detectados e o compartilhamento dinâmico de frequências. A execução destas funções exige a implementação de rádios definidos por *software* (*software defined radios* – SDR) com características adaptativas. O rádio cognitivo é, portanto, um SDR inteligente que pode, após a avaliação do ambiente de radiofrequências, registrar as informações detectadas e associá-las à sua região geográfica e a outros dados técnicos relevantes. Os dados obtidos, devidamente processados, permitem tomar decisões quanto à ocupação do espectro, o início e interrupção da irradiação pelos sistemas secundários, e as alterações de

configuração dos transceptores e frequências de operação, para que seja garantida a devida compatibilidade eletromagnética na área explorada.

A detecção de energia é a técnica mais largamente utilizada devido à sua simplicidade de implementação, no entanto, esta opção pode levar a erros de detecção devido às flutuações nos níveis de ruídos e outros fatores relacionados à propagação no ambiente considerado. Estas variações do sinal podem reduzir a probabilidade de acertos na identificação de usuários primários.

O presente estudo abordará os aspectos relativos ao sensoriamento espectral não cooperativo por meio da implementação de algoritmos encontrados na literatura. Os algoritmos que farão parte deste estudo são:

- Detector de Energia (*Energy Detector*).
- Detecção do valor absoluto de covariância (CAV - *Covariance Absolute Value*)
- Sensoriamento de Covariância Espectral (SCS - *Spectral Covariance Sensing*).

1.4. Objetivos

O objetivo geral deste estudo é avaliar o desempenho dos principais algoritmos de detecção cega de espaços brancos no espectro de rádio frequências por meio de dados experimentais obtidos em campanhas de medições e simulação computacional.

Os algoritmos serão testados para avaliar o seu desempenho em termos de:

- Probabilidade de detecção;
- Complexidade computacional;
- Diferentes probabilidades de falso alarme requerida;
- Robustez para baixas relações sinal/ruído.

Os dados experimentais utilizados neste trabalho são os de campanhas de medições realizadas em ambiente urbano nas faixas de 3.5 GHz.

1.5. Organização do Trabalho

Esta dissertação é composta por cinco capítulos.

O capítulo 1 define o contexto (definição do problema, conceito de espectro de radiofrequências, demanda atual e a solução à demanda pelo uso de rádio cognitivo), objetivos e organização do trabalho.

O capítulo 2 define o conceito de rádio cognitivo (CR – “*Cognitive Radio*”) seu comportamento num ambiente genérico, e o conceito de espaços brancos (*White Spaces*).

O capítulo 3 apresenta os três algoritmos que serão comparados, sua definição conceitual e as formulações matemáticas para obter medidas de seu desempenho.

No capítulo 4, a análise do desempenho dos três algoritmos de detecção será apresentada, incluindo o cálculo da complexidade computacional e o desempenho na detecção de sinais reais medidos em campo.

O capítulo 5 apresenta as conclusões da dissertação fundamentadas nos resultados obtidos, assim como as sugestões para trabalhos futuros.