

## Capítulo

# 1

## Estudo da Camada Física de Redes Wi-Fi (IEEE 802.11) Através de Análise Espectral

Maurício C. Dambros, Tiago R. Balen e Rafael Kunst

### *Abstract*

*This work presents a study of the physical layer of Wi-Fi (IEEE 802.11) networks. A theoretical review of relevant aspects is firstly presented. An introduction of wireless communications, the basic concepts, network topologies, digital modulation techniques, antenna and power issues are presented. In a second moment, an experimental case study is described. The experiment consists in the power spectrum analysis of a 2.4 GHz Wi-Fi link. The radio interface, the router board and the spectrum analyzer, as well as their technical characteristics, are presented. The goal of the experiment is to show the frequency bands of the radio channel and sub-channels, with and without data traffic, as well as the implications of the use of the different allowable modulation techniques on the power spectrum.*

### *Resumo*

*Este trabalho consiste em estudo da camada física de redes Wi-Fi (IEEE 802.11). Inicialmente, uma revisão teórica de tópicos relevantes ao assunto é realizada. Uma introdução às comunicações sem-fio, os conceitos básicos, as topologias de rede, técnicas de modulação digital e aspectos relacionados às antenas e à potência de um enlace são apresentados. Posteriormente um estudo de caso experimental é descrito. O experimento consiste na análise do espectro de potência de um enlace Wi-Fi de 2,4 GHz. A interface de rádio, a placa de roteamento e o analisador de espectro, bem como suas características técnicas, são apresentados. O objetivo do experimento é mostrar as faixas de frequência ocupadas pelo canal de rádio e seus sub-canais (com e sem tráfego), bem como a implicação do uso das diferentes técnicas de modulação possíveis no espectro de potência.*

## **1.1. Introdução**

As redes sem-fio apresentam elevado desenvolvimento tecnológico, justificado pela busca de praticidade e acessibilidade aos meios de comunicação. A necessidade de maior mobilidade e largura de banda para os usuários que utilizam infra-estrutura de rede, estimula a pesquisa voltada à esse meio de transmissão. Nesse sentido, grande parte dos esforços estão direcionados às pesquisas e soluções voltadas a redes locais (Wireless Local Area Networks - LAN).

Essas redes locais, padronizadas pela norma IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.11[IEEE-802.11], proporcionam mobilidade para redes de pequenas extensões geográficas. A taxa de transmissão máxima pode atingir até 54 Mbit/s (IEEE 802.11a/g), com acesso ao meio compartilhado e não orientado à conexão. Atualmente, é possível atingir taxas de transmissão mais elevadas através do emprego da emenda IEEE 802.11n.

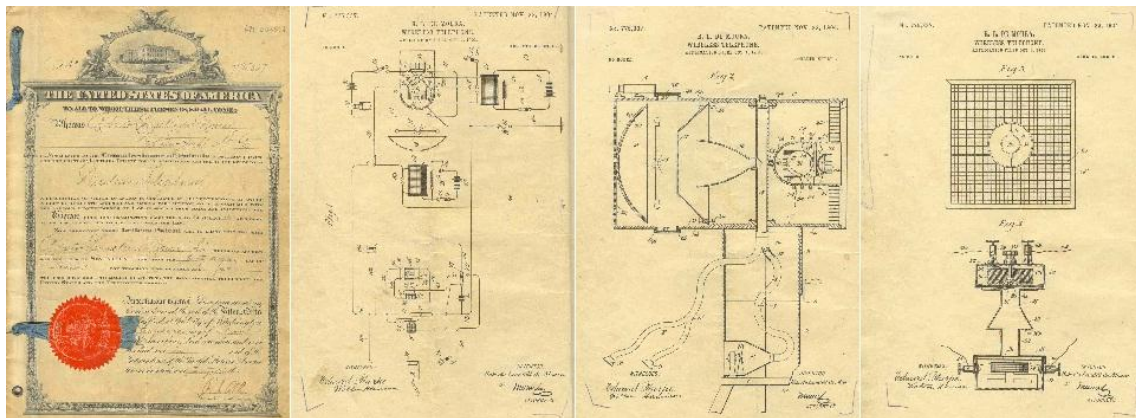
A variação na taxa de transmissão em redes locais que seguem o padrão IEEE 802.11 está ligada a alterações nas condições de propagação do canal sem fio. Essas alterações refletem na escolha da técnica a ser utilizada para acesso ao canal, bem como na técnica de modulação empregada. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é, inicialmente, realizar um levantamento teórico sobre as técnicas suportadas pela padronização e, posteriormente, explorar as variações nessas técnicas através de experimentos práticos.

Os experimentos práticos serão conduzidos através da utilização de hardwares e software específicos para o cenário proposto, ou seja, comunicação de estações IEEE 802.11. Em termos de hardware, um transmissor e um receptor, capazes de realizar transmissões considerando os padrões IEEE 802.11b e IEEE 802.11g são utilizados. Além disso, um analisador de espectro de frequências será empregado, a fim de permitir a visualização do comportamento do espectro de frequência quando as técnicas de acesso ao canal e de modulação são alteradas.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte maneira. Na seção 1.2, são apresentados conceitos básicos de comunicações sem fio. As principais técnicas de modulação digital são estudadas na seção 1.3. O padrão IEEE 802.11, bem como suas emendas são discutidos na seção 1.4. As normativas empregadas para os serviços de telecomunicação utilizando o padrão IEEE 802.11 são discutidas na seção 1.5. Técnicas de transmissão e antenas são estudadas na seção 1.6. Teorias relativas ao cálculo de potência das transmissões são apresentadas na seção 1.7. Em seguida, na seção 1.8, é apresentado um estudo de caso prático, envolvendo análise espectral de transmissão IEEE 802.11. Por fim, são apresentadas considerações finais.

## 1.2. Comunicações sem fio

Comunicações sem fio são estudadas há bastante tempo em nível mundial. No Brasil, o Padre Roberto Landell de Moura (1861-1928) é conhecido como patrono dos radioamadores. Nascido em Porto Alegre – RS, ele foi o pioneiro na transmissão de voz humana através de um meio sem fios. Em 1900, estabeleceu um enlace de voz entre a Av. Paulista e o Bairro Santana, ambos os pontos na cidade de São Paulo – SP. Antes dele, o Italiano Guglielmo Marconi (1874-1937) já havia obtido uma comunicação sem fios, mas transmitido apenas sinais telegráficos. A Figura 1.1 mostra a patente do telefone sem-fio (*Wireless Telephony*), obtida pelo Padre Landell de Moura no ano de 1904.



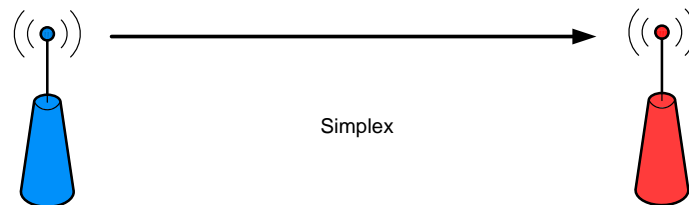
**Figura 1.1. Patente do Wireless Telephony**  
Imagem obtida do CD-ROM Memória Científica Landell de Moura – IHG-RS

Para entender o comportamento das redes sem fio, é fundamental a compreensão dos conceitos envolvidos na comunicação. Os principais conceitos, neste contexto, são:

- **Transmissor:** Agente responsável pelo envio dos dados no meio de transmissão.
- **Receptor:** Agente responsável pela recepção dos dados do meio de transmissão.
- **Meio de transmissão:** É o caminho físico por onde os dados serão transmitidos do transmissor ao receptor. No caso de comunicações sem fio, é o espectro eletromagnético.
- **Protocolo:** É um conjunto de regras para garantir a interoperabilidade entre o transmissor e o receptor. Neste capítulo veremos o protocolo IEEE 802.11.
- **Dados:** São as mensagens a serem transportadas do transmissor ao receptor através do meio de transmissão.

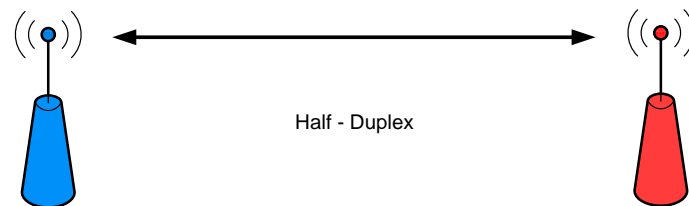
No que diz respeito à transmissão dos dados, os sistemas de comunicação podem ser classificados em três classes, que são discutidas a seguir:

**Simplex:** Comunicação unidirecional, na qual um dispositivo é apto somente a transmitir e o outro somente a receber. O meio de transmissão é como uma via de um único sentido, como pode ser visto na Figura 1.2.



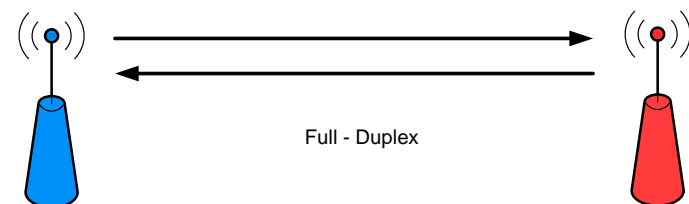
**Figura 1.2. Fluxo de dados *Simplex***

**Half-Duplex:** Comunicação bidirecional, porém não simultânea. Ambos os dispositivos são aptos a enviar e receber, mas não ao mesmo tempo. O mesmo canal de transmissão é utilizado para enviar dados nos dois sentidos de comunicação, mas em instantes de tempo diferentes. Esse comportamento é ilustrado na Figura 1.3.



**Figura 1.3. Fluxo de dados *Half-Duplex***

**Full-Duplex:** Comunicação bidirecional em simultâneo. Ambos os dispositivos são aptos a enviar e receber ao mesmo tempo. O canal de transmissão é composto por duas vias, uma em cada sentido, conforme ilustra a Figura 1.4.



**Figura 1.4. Fluxo de dados *Full-Duplex***

Em comunicações sem fio, o fluxo de dados simplex é utilizado em rádios *Amplitude Modulation* (AM) ou *Frequency Modulation* (FM), por exemplo. Os enlaces de dados mais simples operam em *half-duplex*, situação na qual o dispositivo possui apenas uma antena. Enlaces sem fio do tipo *full-duplex* só podem ser configurados em equipamentos que possuam no mínimo duas antenas. Caso contrário a antena será compartilhada para enviar e para receber os dados.

As transmissões sem fio, independente do modo de operação, podem trabalhar considerando diferentes topologias, as quais são discutidas a seguir.

**Ponto a Ponto ou *Bridging*:** enlace sem fio interligando dois pontos. Normalmente em um dos pontos há um rádio configurado para *Master* e o outro como *Slave*. Isso serve para centralizar as sincronizações e ajustes do enlace como: modulação, retransmissões, sinalizações, etc. Outras denominações utilizadas nessa situação são: *Bridge/Station*, *AP single/Client*. Esta topologia é muito utilizada em *backbones*. O funcionamento dessa organização é ilustrado na Figura 1.5.



Figura 1.5. Topologia PTP – Ponto a Ponto ou *Bridging*

**Ponto Multi-Ponto ou Infra-estruturadas:** enlaces sem fios interligando um Ponto de Acesso (*Access Point*) e uma ou mais estações clientes. Como pode ser visto na Figura 1.6, a característica desta topologia é ter um ponto concentrador, que é responsável por gerenciar questões como técnica de modulação a ser empregada, controle de acesso ao meio, retransmissões, registro de estações, criptografia, etc. Normalmente são redes sem fio utilizadas em pontos de presença (POP) de provedores de internet via rádio, em pontos de acesso público e nas residências e escritórios.

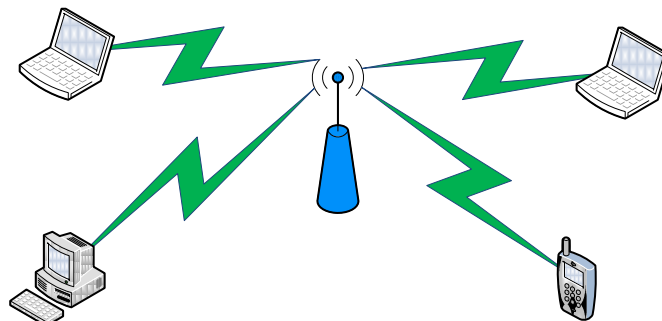
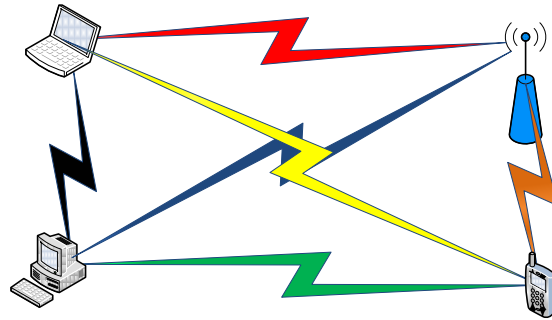


Figura 1.6. Topologia PMP – Ponto Multi-Ponto.

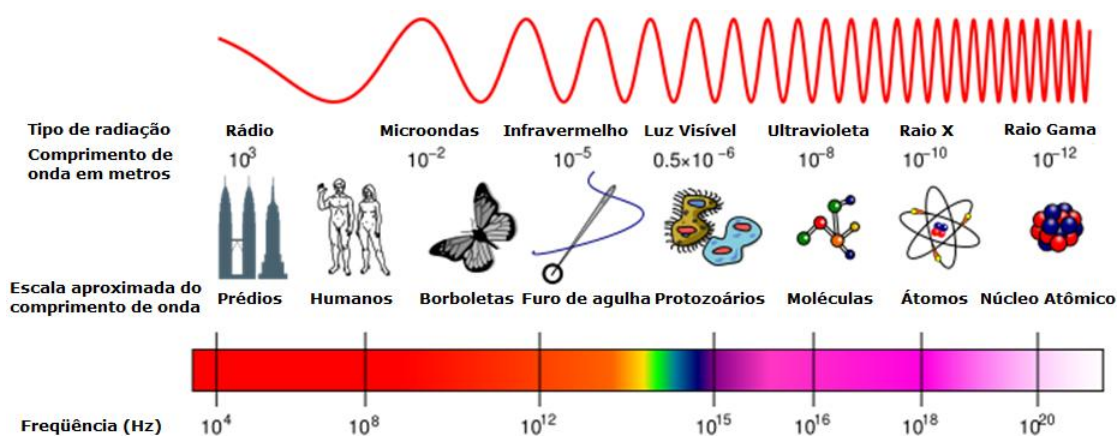
**Malha, Mesh ou Ad-Hoc:** enlaces sem fios interligando duas ou mais estações clientes, sem a necessidade de um ponto concentrador. Nessa topologia, a comunicação é direta entre as estações, sem o intermédio de um *Access Point*. Normalmente é utilizada para troca de arquivos direta entre duas estações e muito útil em ambientes de desastres, devido a sua facilidade de implementação. As estações conectam-se mutuamente e formam uma rede em malha aumentando a sua abrangência. A Figura 1.7 ilustra a organização desta topologia.



**Figura 1.7. Topologia Malha**

As transmissões sem fio são realizadas utilizando o espectro eletromagnético, que compreende o intervalo completo radiações eletromagnéticas. Parte do espectro de frequência é utilizada para transmissão de sinais de rádio. Esta faixa vai de aproximadamente dezenas de kHz até as frequências da ordem de 1 THz. As faixas de frequências superiores a 1GHz é também denominada faixa de microondas, devido aos comprimentos de onda serem da ordem de centímetros. Por outro lado, as ondas utilizadas em radiodifusão possuem comprimento maior, podendo chegar a vários metros. Acima da faixa de microondas estão as frequências de infra-vermelho, a luz visível, as frequências UV (ultra-violeta), além das frequências das radiações x e  $\gamma$  (gamma), como pode ser visto na Figura 1.8.

As transmissões de dados de redes sem fio situam-se na faixa de microondas. Mais especificamente, as frequências utilizadas pelo padrão IEEE 802.11 estão nas faixas de 2.4GHz e 5GHz.



**Figura 1.8. Imagem ilustrativa Espectro eletromagnético.**  
Imagem obtida da Internet [ESPEC01] traduzida e adaptada.

Uma onda é uma perturbação de um determinado meio. Ondas eletromagnéticas são perturbações no espectro eletromagnético. Quando esta perturbação é realizada de maneira controlada, pode-se utilizar uma onda eletromagnética para carregar informação útil.

Todas as ondas eletromagnéticas possuem a mesma velocidade de propagação no vácuo:  $3 \times 10^8$  m/s, que é a velocidade da luz. A relação entre o comprimento de onda e a frequência de uma onda eletromagnética, tomando como base sua velocidade de propagação no vácuo é dada por:

$$c = \lambda f \quad (1.1)$$

Onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo,  $\lambda$  é o comprimento de onda em metros, e  $f$  é a frequência em Hertz.

Para que seja possível a transmissão de informações úteis em uma onda, é necessário que as informações sejam moduladas. Esse procedimento é discutido na próxima seção.

## 1.3 Modulação

É a técnica que consiste em modificar características de um sinal analógico (usualmente uma senoide), para inserir informações. Essa modificação é conhecida como modulação, pois o sinal de informação (**modulante**) irá modular estes parâmetros da onda **portadora**. A onda portadora tem este nome pois ela porta (leva consigo) a informação. As características do sinal analógico (onda portadora) que podem ser modificadas são: amplitude, frequência e fase.

Dependendo da natureza do sinal de informação (modulante), a modulação pode ser classificada como analógica (sinal modulante é analógico) ou digital (sinal modulante é digital). As modulações analógicas mais conhecidas são a modulação em amplitude (AM) e em frequência (FM). Os sistemas de radiodifusão utilizam estes esquemas de modulação para transmitir um sinal analógico (áudio), de modo que este sinal altere, proporcionalmente a sua amplitude instantânea, a frequência ou amplitude de uma portadora. A frequência da portadora é a frequência de transmissão do sinal, ou o centro do canal no espectro de radiofrequência.

A modulação se faz necessária para otimizar a utilização do meio físico de transmissão, ou até mesmo para permitir a utilização deste meio. Um sinal pode ser transmitido em banda base, ou seja, simplesmente inserindo este sinal no meio de transmissão. No entanto, dependendo do meio de transmissão, isso pode não ser possível. Para transmitir um sinal pelo ar, é necessário que este sinal esteja na faixa de radiofrequência. A modulação é capaz de transladar um sinal de frequência mais baixa (áudio, por exemplo) para a faixa de RF.

Mesmo se o meio físico permitir a transmissão em banda-base, para sinais digitais esta transmissão pode demandar uma largura de banda maior do que transmissões por portadoras. Além disso, a modulação permite que diferentes fontes de informação utilizem o mesmo meio físico para a transmissão de sinais, através da utilização de canais de frequência distintos.

Quando o sinal a ser transmitido é digital, a modulação da onda portadora analógica é feita em níveis quantizados pré-determinados. As técnicas de modulação digital utilizadas em comunicação de dados são derivadas de três esquemas básicos (*Amplitude Shift Keying* - ASK, *Frequency Shift Keying* - FSK e *Phase Shift Keying* - PSK), os quais são explicitados a seguir.

Similarmente às modulações analógicas, os esquemas de modulação digital também consistem em modular fase, frequência e amplitude de um sinal analógico. Embora os esquemas de modulação digital utilizados em sistemas reais de transmissão de dados, como redes sem-fio e TV digital, sejam mais complexos do que os esquemas básicos apresentados a seguir, o princípio básico é o mesmo. Logo, o entendimento de técnicas simples de modulação leva ao posterior entendimento de sistemas mais complexos.

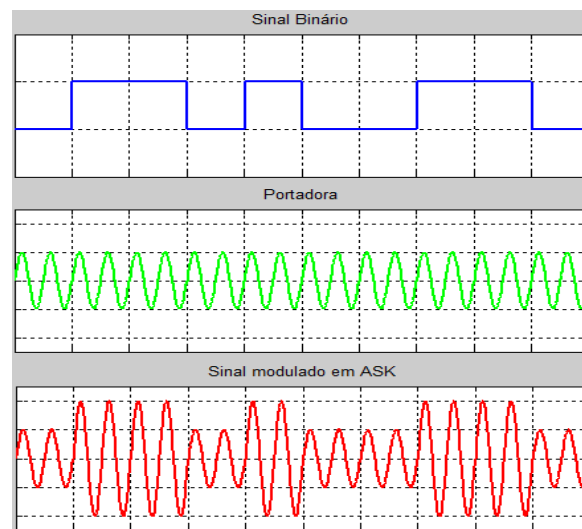
### 1.3.1 Modulação ASK

A técnica de modulação ASK baseia-se em realizar um chaveamento por mudança de amplitude. Nesse tipo de modulação a representação dos bits é realizada através de



diferentes níveis de amplitude. O esquema mais simples de modulação digital em amplitude codifica apenas dois níveis de amplitude, como pode ser visto no exemplo apresentado na Figura 1.9. Nesse exemplo, pode-se ver um sinal binário que será modulado em uma portadora senoidal e logo abaixo o sinal modulado em ASK de dois níveis ou ASK binário.

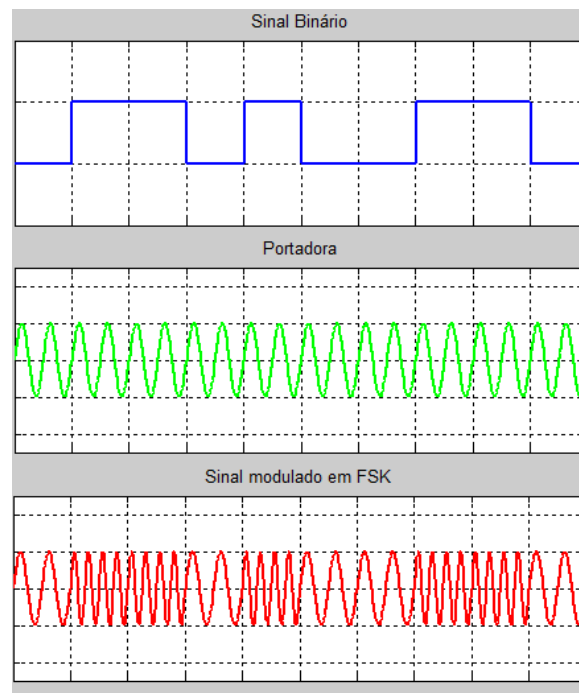
Embora o exemplo mostrado apresente a modulação ASK binária, existem modulações ASK com mais de dois níveis de amplitude, podendo assim transportar maior quantidade de informações. Por exemplo, no caso de haver quatro níveis de amplitude cada nível será representado por 2 bits o que dobraria a capacidade de tráfego da modulação original. Neste esquema de modulação, fase e amplitude nunca se alteram.



**Figura 1.9. Modulação ASK.**

### **1.3.2 Modulação FSK**

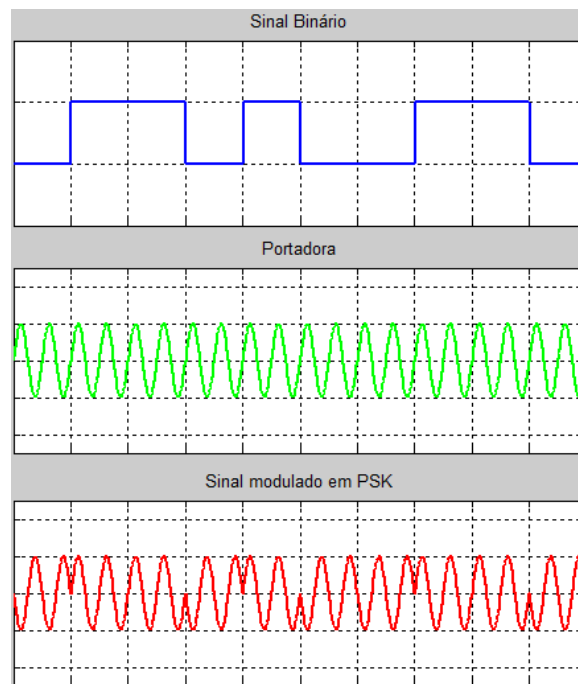
Nesse tipo de modulação os bits são representados através de variações na frequência de transmissão. No modo mais básico, a frequência é alterada em dois níveis conforme pode-se ver na Figura 1.10, que representa primeiramente o sinal binário, logo abaixo a portadora senoidal e por fim o sinal modulado através da técnica FSK. Nessa técnica, fase e amplitude permanecem constantes.



**Figura 1.10. Modulação FSK**

### 1.3.3 Modulação PSK

Na técnica de modulação PSK, os dados são codificados de acordo com as variações na fase da portadora. A Figura 1.11 mostra o sinal binário a ser transmitido, logo abaixo o sinal da portadora em fase  $0^\circ$ . Pode-se notar que quando o sinal binário é 0, a fase do sinal modulado inverte  $180^\circ$  e quando o bit é 1 o sinal está em fase idêntica ao sinal da portadora.

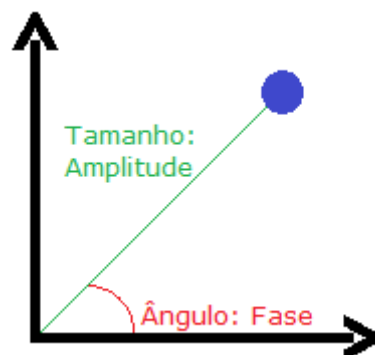


**Figura 1.11. Modulação PSK**

### 1.3.4 QAM

A técnica de modulação *Quadrature Amplitude Modulation* é obtida através da união de duas técnicas de modulação, o ASK e o PSK. O QAM baseia-se em utilizar duas portadoras distintas defasadas em quadratura e com diferentes níveis de amplitude. Essas variações tornam o QAM uma técnica com elevada capacidade de transmissão de dados.

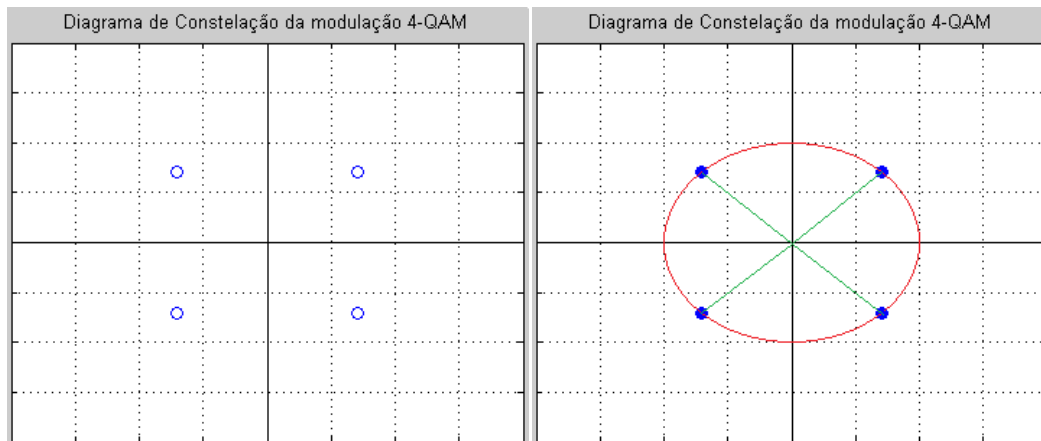
Através da análise dos diagramas de constelação pode-se obter mais informações sobre a modulação QAM. Na Figura 1.12, o símbolo de modulação, que carrega informações, está representado através de um círculo. A distância do símbolo para a origem do eixos denota o nível de amplitude desse símbolo. Por outro lado, o ângulo formado entre o eixo X e o símbolo indica a fase.



**Figura 1.12. Análise do Diagrama de Constelação**

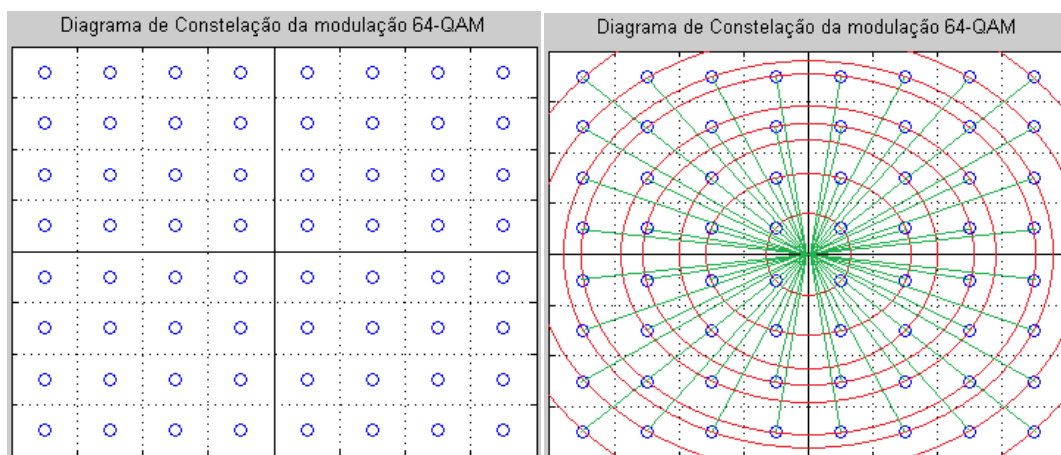
A constelação de modulação QAM é formada por símbolos distribuídos nos quadrantes. Um exemplo de diagrama de constelação de modulação 4-QAM é

mostrado na Figura 1.13. Pode-se observar na parte direita da figura em questão que os símbolos de modulação QAM estão em quatro diferentes níveis de fase ( $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  e  $315^\circ$ ). Também pode-se observar na figura que no esquema de 4-QAM há somente um nível de amplitude que está representado por um círculo, ilustrando que os 4 símbolos estão a mesma distância da origem.



**Figura 1.13. diagram de Constelação 4-QAM.**

Outro exemplo de modulação QAM é apresentado na Figura 1.14, que mostra o diagrama de constelação de uma modulação 64-QAM. Esta modulação é utilizada pelo *Wi-Fi*, dentre outras tecnologias. Neste diagrama pode-se constatar que há 64 símbolos, os quais estão distribuídos em 11 níveis de amplitude e em 52 fases distintas.



**Figura 1.14. Diagrama de constelação 64-QAM**

#### 1.4. Introdução ao padrão IEEE 802.11 e suas variantes

O padrão IEEE 802.11 teve seu início no ano de 1989, quando o FCC (Federal Communications Commission) destinou três faixas de frequência para comunicações sem fio. Em 1997 o IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) instaurou um grupo de trabalho para a definição de um padrão para conectividade sem fio. Em 1999, houve a aprovação dos padrões IEEE 802.11a e IEEE 802.11b. O primeiro opera na faixa de frequência de 5GHz e o segundo em 2.4GHz. Posteriormente, no ano de 2003,

foi apresentado a emenda IEEE 802.11g, que também opera na faixa de 2.4GHz, porém oferece taxas de transmissão mais altas. Outras importantes atualizações foram o IEEE 802.16e que agrega especificações para uso de QoS (*Quality of Service*) e o padrão IEEE 802.11n, que possui taxas de transferências de até 600 Mbps.

Os fabricantes de equipamentos baseados no padrão IEEE 802.11, preocupados com a compatibilidade entre dispositivos de diferentes empresas, criaram o WECA (*Wireless Ethernet Compatibility Alliance*). O WECA foi proposto como um comitê sem fins lucrativos, com o objetivo de garantir a interoperabilidade entre os dispositivos produzidos por diferentes fabricantes. Esse comitê, posteriormente, passou a ser denominado *Wi-Fi Alliance*. Os equipamentos que possuem compatibilidade certificada pelo *Wi-Fi Alliance* têm o direito de utilizar a logomarca mostrada na Figura 1.15, indicando que o equipamento é compatível com a padronização IEEE 802.11.



**Figura 1.15 – Logomarca Wi-Fi Certified**  
Imagem obtida da Internet [WIFI01]

Áreas com cobertura de sinal Wi-Fi também são identificadas com a logomarca *Wi-Fi Zone*, como mostra a figura 1.16. É comum nos depararmos com essas placas em centros comerciais, hotéis, cafeterias e até mesmo em áreas públicas como parques, praças, etc.



**Figura 1.16 – Logomarca Wi-Fi Zone**  
Imagem obtida na Internet [WIFI01]

A seguir, são discutidas as características das principais emendas do padrão IEEE 802.11. O estudo dessas características, com foco principal no padrão IEEE 802.11g é bastante importante para a compreensão dos cenários de experimentação que serão apresentados neste trabalho.

#### **1.4.1. IEEE 802.11a**

Este padrão foi estabelecido em 1999. Opera na faixa de frequência de 5GHz e possui taxas nominais de transmissão (*data-rates*) de 6, 12, 18, 24, 36, 48 e 54 Mbps. Utiliza a tecnologia OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e suas sub-portadoras são moduladas com: 64-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), 16-QAM, QPSK (*Quadrature Phase shift keying*), BPSK (*Binary Phase Shift Keying*).

#### **1.4.2. IEEE 802.11b**

Padrão estabelecido em 1999. Opera na faixa de frequência de 2.4 GHz e possui taxas nominais de transmissão de 1, 2, 5.5, 11Mbps. Tem sua portadora modulada em DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) e suas sub-portadoras com DBPSK (*Differential Binary Phase Shift Keying*), DQPSK(*Differential Quadrature Phase Shift Keying*), CCK (*Complementary Code Keying*).

#### **1.4.3. IEEE 802.11g**

Padrão estabelecido em 2003. Trabalha na mesma faixa de frequência do IEEE 802.11b, isto é 2.4GHz. Porém tem taxas nominais de transmissão mais altas devido as suas técnicas de modulação. Opera com taxas nominais de 6, 12, 18, 24, 36, 48 e 54Mbps assim como o IEEE 802.11a. Isso se deve ao fato de ambos usarem o mesmo tipo de modulação: OFDM e 64-QAM, 16-QAM, QPSK, BPSK para suas sub-portadoras. O que diferencia o 802.11a do 802.11g é a sua faixa de frequência, esta diferença também torna os equipamentos IEEE 802.11a e IEEE 802.11g incompatíveis. Um equipamento 802.11a não se comunica com um equipamento 802.11g.

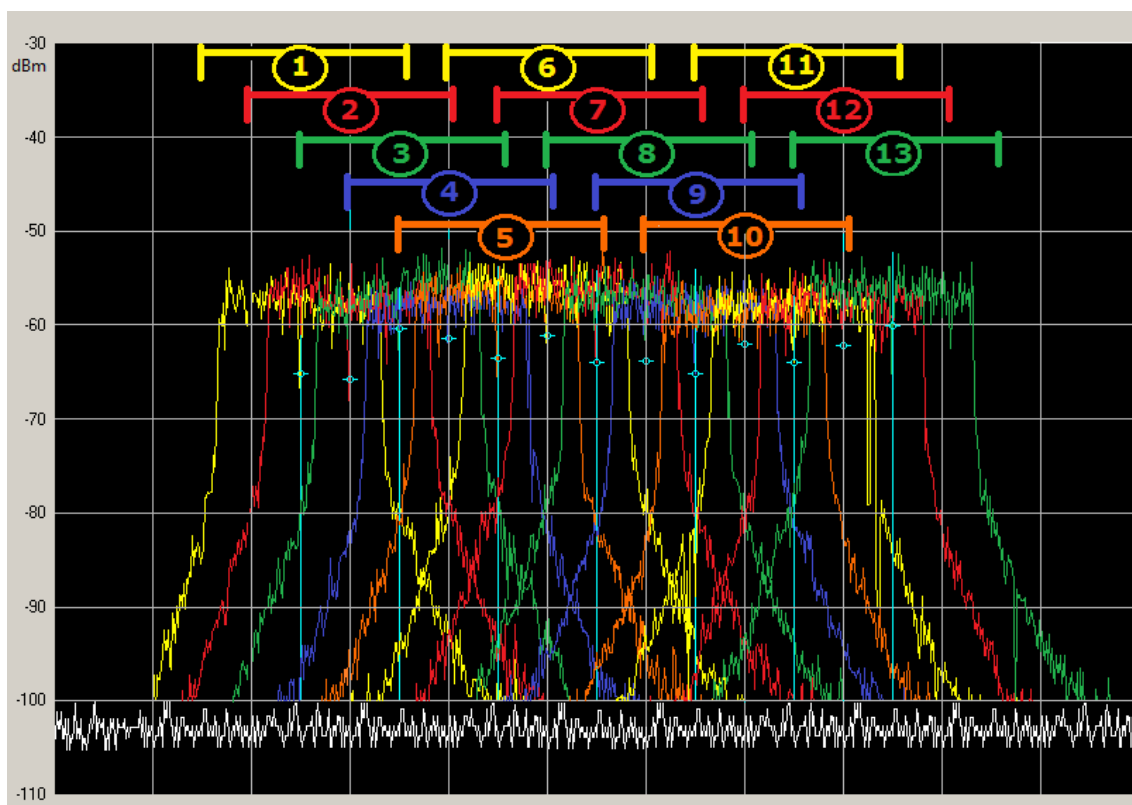
Como já visto anteriormente os padrões IEEE 802.11b e IEEE 802.11g utilizam a mesma faixa de frequência, o 2.4GHz. No Brasil esta faixa estende-se de 2.400 GHz até 2.4835 GHz, totalizando 83.5 MHz de largura de banda. Cada canal do IEEE 802.11 ocupa 22 MHz. No Brasil existem 13 opções de canais, sendo denominados de acordo com o seu centro de frequência. A partir do primeiro canal (2.412GHz), os demais canais são dados a um espaçamento de 5MHz. O que faz com que dos 13 canais existentes, seja possível utilizar apenas 3 deles simultaneamente, sem causar sobreposição em frequência. Esse arranjo pode ser feito de algumas formas como: canais 1, 6 e 11; canais 1, 7, 13; canais 2, 7, 12, entre outras. Abaixo é apresentada uma tabela contendo todos os canais disponíveis para o IEEE 802.11b/g no Brasil.

**Tabela 1.1. Canalização 802.11b/g no Brasil**

<b>Nº do canal</b>	<b>Frequência Central</b>
1	2.412 GHz
2	2.417 GHz
3	2.422 GHz
4	2.427 GHz

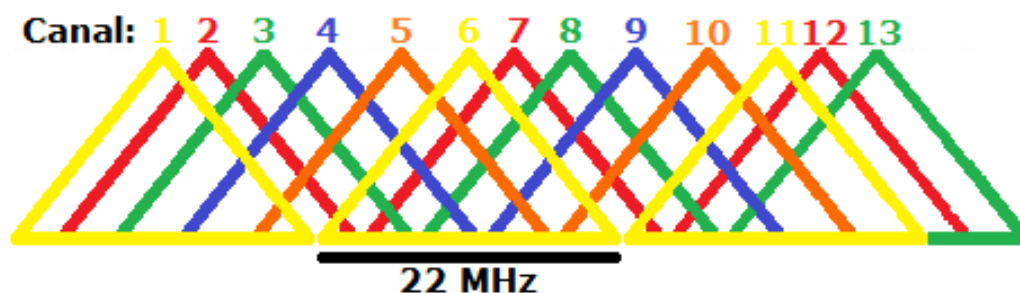
5	2.432 GHz
6	2.437 GHz
7	2.442 GHz
8	2.447 GHz
9	2.452 GHz
10	2.457 GHz
11	2.462 GHz
12	2.467 GHz
13	2.472 GHz

Para facilitar a compreensão das sobreposições dos canais é, apresentada, na Figura 1.17, uma sobreposição de imagens geradas por um equipamento analisador de espectro. A figura deixa claro que haveria interferências no caso de todos os canais serem utilizados simultaneamente, dificultando a propagação do sinal.



**Figura 1.17. Canalização no espectro eletromagnético em 2.4GHz.**

Outra forma de representar a sobreposição dos canais é apresentada na Figura 1.18, na qual é possível visualizar claramente os canais que podem ser utilizados simultaneamente.



**Figura 1.18. Sobreposição dos canais em 2.4GHz.**

A disposição dos canais é definida pelo governo de cada país. Sendo assim, na próxima seção, serão discutidas normativas para utilização da tecnologia IEEE 802.11 no Brasil.

### 1.5. Aspectos normativos do setor

Segundo a Constituição Brasileira os serviços de telecomunicações competem à União. E ela deve explorar diretamente ou mediante autorizações, concessões ou permissões. Também compete privativamente a União legislar sobre telecomunicações. E assim foi criada a lei nº 9.472 de 1997, conhecida como LGT – Lei Geral das Telecomunicações – que dispõe sobre a organização dos serviços de telecomunicações, a criação e funcionamento de um órgão regulador (ANATEL) e outros aspectos institucionais.

Citações:

#### **Constituição Brasileira de 1988**

*“Art. 21. Compete à União:*

*XI - explorar, diretamente ou mediante autorização, concessão ou permissão, os serviços de telecomunicações, nos termos da lei, que disporá sobre a organização dos serviços, a criação de um órgão regulador e outros aspectos institucionais;”*

*“Art. 22. Compete privativamente à União legislar sobre:*

*IV - águas, energia, informática, telecomunicações e radiodifusão;”*

*“Art. 48. Cabe ao Congresso Nacional, com a sanção do Presidente da República, não exigida esta para o especificado nos arts. 49, 51 e 52, dispor sobre todas as matérias de competência da União, especialmente sobre:*

*XII - telecomunicações e radiodifusão;”*

#### **Lei nº 9.472 de 1997**

*Art. 1º Compete à União, por intermédio do órgão regulador e nos termos das políticas estabelecidas pelos Poderes Executivo e Legislativo, organizar a exploração dos serviços de telecomunicações.*

*Parágrafo único. A organização inclui, entre outros aspectos, o disciplinamento e a fiscalização da execução, comercialização e uso dos serviços e da implantação e funcionamento de redes de telecomunicações, bem como da utilização dos recursos de órbita e espectro de radiofrequências.*

*Art. 19. À Agência compete adotar as medidas necessárias para o atendimento do interesse público e para o desenvolvimento das telecomunicações brasileiras, atuando com independência, imparcialidade, legalidade, impessoalidade e publicidade, e especialmente:*



*VIII - administrar o espectro de radiofrequências e o uso de órbitas, expedindo as respectivas normas;*

*IX - editar atos de outorga e extinção do direito de uso de radiofrequência e de órbita, fiscalizando e aplicando sanções;*

*Art. 127. A disciplina da exploração dos serviços no regime privado terá por objetivo viabilizar o cumprimento das leis, em especial das relativas às telecomunicações, à ordem econômica e aos direitos dos consumidores, destinando-se a garantir:*

*VII - o uso eficiente do espectro de radiofrequências;*

*Art. 157. O espectro de radiofrequências é um recurso limitado, constituindo-se em bem público, administrado pela Agência.*

*§ 1º O plano destinará faixas de radiofrequência para:*

*I - fins exclusivamente militares;*

*II - serviços de telecomunicações a serem prestados em regime público e em regime privado;*

*III - serviços de radiodifusão;*

*IV - serviços de emergência e de segurança pública;*

*V - outras atividades de telecomunicações.*

*§ 2º A destinação de faixas de radiofrequência para fins exclusivamente militares será feita em articulação com as Forças Armadas.*

*Art. 159. Na destinação de faixas de radiofrequência serão considerados o emprego racional e econômico do espectro, bem como as atribuições, distribuições e consignações existentes, objetivando evitar interferências prejudiciais.*

*Art. 160. A Agência regulará a utilização eficiente e adequada do espectro, podendo restringir o emprego de determinadas radiofrequências ou faixas, considerado o interesse público.*

*Parágrafo único. O uso da radiofrequência será condicionado à sua compatibilidade com a atividade ou o serviço a ser prestado, particularmente no tocante à potência, à faixa de transmissão e à técnica empregada.*

*Art. 161. A qualquer tempo, poderá ser modificada a destinação de radiofrequências ou faixas, bem como ordenada a alteração de potências ou de outras características técnicas, desde que o interesse público ou o cumprimento de convenções ou tratados internacionais assim o determine.*

Para facilitar a compreensão, nas Tabelas 1.2 e 1.3 é apresentada uma compilação dos dados distribuídos nas resoluções 272 e 506 da ANATEL, além da LGT (Lei Geral das Telecomunicações). É importante ressaltar que as potências e dimensões das antenas variam de acordo com a topologia do enlace, com faixa de frequência e número de habitantes da cidade. Esses critérios foram adotados para garantir um uso mais eficiente do espectro eletromagnético.

**Tabela 1.2. Potências máximas e ganho máximo de antenas segundo as resoluções 272 e 506 da ANATEL.**

<b>Situação / Antena</b>	<b>6 dBi</b>	<b>8 dBi</b>	<b>12 dBi</b>	<b>14 dBi</b>	<b>17 dBi</b>	<b>21 dBi</b>	<b>24 dBi</b>	<b>27 dBi</b>	<b>30 dBi</b>	<b>36 dBi</b>
<b>2.4GHz PMP</b> Cidade < 500 mil habitantes	1w	630mW	251mW	158mW	79mW	31mW	15mW			
<b>2.4GHz PMP</b> Cidade > 500 mil habitantes	100mW		25mW							
<b>2.4GHz PTP</b>	1w		630mW	501mW	398mW	316mW	250mW	200mW	158mW	100mW
<b>5.8GHz PTP</b>	1W	1W	1W	1W	1W	1W	1W	1W	1W	1W
<b>5.8GHz PMP</b>	1W	630mW	251mW	158mW	79mW	31mW	15mW			

**Para enlaces ponto a ponto, com antenas diretivas:**

**Tabela 1.3. Potência máxima irradiada Segundo resoluções 272 e 506 da ANATEL.**

<b>Frequência (MHz) / Tipo de uso</b>	<b>Indoor</b>	<b>Outdoor</b>	<b>P eirp (W)</b>	<b>P eirp (dBm)</b>
902 a 907,5	SIM	SIM	4	36
915 a 928	SIM	SIM	4	36
2400 a 2483,5 Cidades > 500 mil habitantes.	SIM	SIM	0,4	26
2400 a 2483,5 Cidades < 500 mil habitantes.	SIM	SIM	4	36
5150 a 5350 Com TPC	SIM	NÃO	0,2	23
5150 a 5350 Sem TPC	SIM	NÃO	0,1	20
5470 a 5725 Com TPC	SIM	SIM	1	30
5470 a 5725 Sem TPC	SIM	SIM	0,5	27
5725 a 5825	SIM	SIM	4	36
<b>Atenção:</b> Nas faixas 5.250-5.350 MHz e 5.470-5.725 MHz, é obrigatório o uso de mecanismo de seleção dinâmica de frequência ( <i>Dynamic Frequency Selection</i> - DFS)				

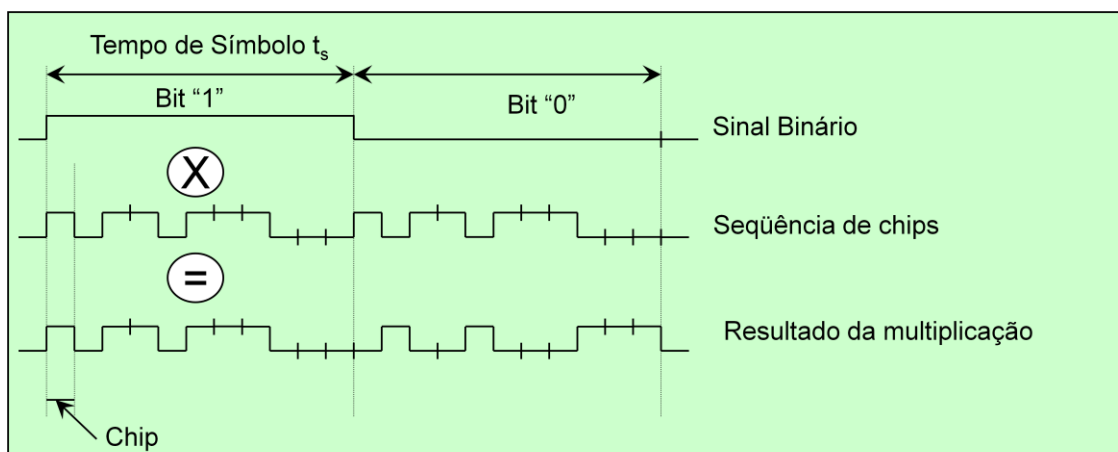
## 1.6. Técnicas de transmissão:

O padrão IEEE 802.11 utiliza duas técnicas principais de transmissão, conhecidas como DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) e OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Essas técnicas são explicadas nas próximas seções.

### 1.6.1. DSSS

DSSS é a técnica de transmissão empregada no padrão IEEE 802.11b. Com ela é possível atingir taxas nominais de transferência de dados (*data-rates*) de 1, 2, 5.5 e 11 Mbps.

Na IEEE 802.11b, o DSSS opera da seguinte forma: cada bit transmitido é codificado através da multiplicação dele por uma sequência pseudo-aleatória de 11 bits. Esta sequência é denominada de código Barker e cada bit desta sequência é denominado chip. Para a transmissão do bit 0, utiliza-se a sequência original de 11 bits. Por outro lado, para transmitir o bit 1, é enviado o complemento binário da sequência, que é exatamente o seu inverso. Esse processo é representado na Figura 1.19.



**Figura 1.19. Técnica de transmissão DSSS**

Esta técnica de transmissão é muito robusta a interferência. Já que para cada bit original, são transmitidos 11 bits sequenciais. O que facilita para o receptor interpretar e distinguir o sinal recebido de outras fontes de interferência. Essa robustez, por sua vez gera uma sobrecarga no meio de transmissão, uma vez que são transmitidos bits adicionais.

### 1.6.2. OFDM

Essa técnica de transmissão é empregada no padrão IEEE 802.11g. Com a implementação desta técnica de transmissão foi possível aumentar consideravelmente as taxas nominais de transferências de dados (*data-rates*), que no padrão em questão podem variar entre 6, 12, 24, 48 e 54 Mbps.

Esta técnica consiste em dividir o espectro em diversas sub-portadoras. No IEEE 802.11g o canal de transmissão é dividido em 52 sub-portadoras, sendo 4 delas utilizadas para a sincronização. As outras 48 sub-portadoras são utilizadas para a transmissão de dados e

são moduladas com diferentes tipos de modulação de acordo com a taxa de transmissão nominal desejada.

A ortogonalidade com que as sub-portadoras são divididas garante a esta técnica de transmissão uma boa imunidade a interferência entre as próprias sub-portadoras. Os lóbulos laterais de cada sub-portadora acabam sendo anulados pelos lóbulos laterais da sub-portadora vizinha. Isso pode ser identificado na Figura 1.20, que mostra que as cristas das portadoras são uniformemente separadas, o tem o objetivo de alinhar em amplitudes opostas os lóbulos laterais de cada portadora, atenuando-os significativamente. Na primeira parte da figura é possível visualizar envoltória do OFDM. Na segunda parte são apresentadas as sub-portadoras.

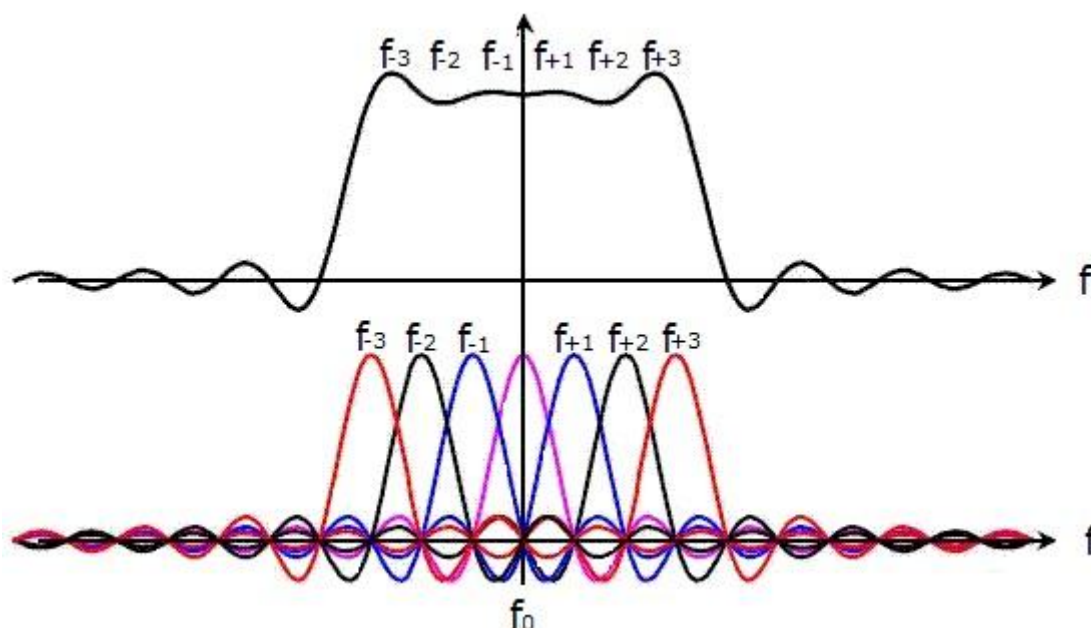


Figura 1.20. Técnica de transmissão OFDM

## 1.7. Cálculo de potência, ganho e atenuação em um enlace de radiofrequência

### 1.7.1 conceitos de ganho e atenuação

Em telecomunicações, ganho é a propriedade de se aumentar a intensidade de um determinado sinal, em relação à sua amplitude ou potência. Normalmente, os elementos que resultam em ganho em um dado sinal são amplificadores, equalizadores e antenas.

A atenuação é a propriedade pela qual um determinado sinal tem sua amplitude ou potência reduzida. Em um esquema de comunicação sem fio, o meio físico de transmissão dos sinal normalmente impõe a atenuação deste sinal. Quanto mais longo é o enlace, maior é atenuação imposta ao sinal.

Em temos diretos, o cálculo do ganho ou atenuação de um determinado canal, circuito ou elemento, em um sistema de telecomunicações é dado pelas seguintes equações:

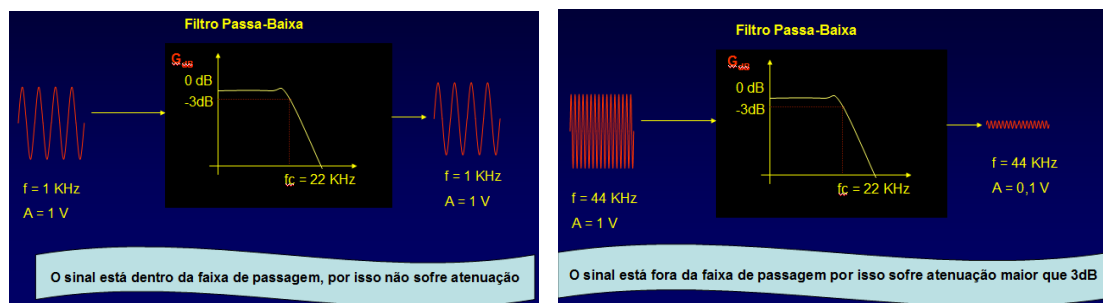
$$G_A = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (1.2)$$

$$G_P = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1.3)$$

onde  $G_A$  e  $G_P$  são, respectivamente, os ganhos de amplitude e potência;  $V_{in}$  e  $P_{in}$  são, respectivamente, a amplitude e a potência do sinal na entrada do sistema;  $V_{out}$  e  $P_{out}$  são, respectivamente, a amplitude e a potência do sinal na saída do sistema.

O ganho calculado pelas equações 1.2 e 1.3 representa a relação linear entre entrada e saída do sistema, ou simplesmente, quantas vezes a amplitude ou potência do sinal de saída é maior do que a amplitude ou potência do sinal de entrada. Se o valor resultante for maior que a unidade, o sistema impõe ganho ao sinal. Por outro lado, um valor for menor que a unidade, indica que houve atenuação. Finalmente, quando o ganho é unitário, o sistema não modifica a amplitude e a potência do sinal de sua entrada para sua saída.

A Figura 1.21 exemplifica o cálculo de ganho de amplitude para um filtro do tipo passa-baixas, que é um bloco, comum em sistemas de telecomunicações. A Figura 1.21.a mostra o caso em que o sinal está dentro da faixa de passagem do filtro, logo, não sofre atenuação e seu ganho ( $V_{out}/V_{in}$ ) é unitário. Já a Figura 1.21.b mostra o caso em que o sinal está fora da faixa de passagem, logo, há atenuação, ou seja o ganho é menor que a unidade (neste caso  $G=0,1$ ).



**Figura 1.21. Exemplo de ganho e atenuação para um filtro passa-baixas.**

Na ainda é possível visualizar menção à escala logarítmica e à unidade  $dB$ , as quais são muito utilizadas em cálculo de potência e ganho, e serão abordadas na seção seguinte.

### 1.7.2. Escala logarítmica

A escala logarítmica foi criada para facilitar os cálculos com grandezas muito diferentes. Para comparar duas grandezas é necessário utilizar a mesma unidade de medida. Como exemplo, pode-se comparar a capacidade de carga de um navio petroleiro de porte médio com a capacidade de carga de um tanque de combustível de um carro de pequeno porte.

Se em um porto há 15 navios. Quantos carros seria possível abastecer? E se o petróleo fosse armazenado em latas de 350 mililitros? Nesse caso, há dificuldade em comparar ou trabalhar com esses números, pois a escala de grandeza é muito diferente. Para casos como este, foi projetada a escala logarítmica. O decibel é uma escala logarítmica que facilita o cálculo de grandezas.

**Tabela 1.4. Capacidade volumétrica aproximada em litros.**

Petroleiro	300 000 000 litros
Carro	50 litros
Lata	0,350 litros

Na escala logaritimica decimal uma variação de 1 à 100.000 corresponde de 0 a 5. O que facilita consideravelmente os cálculos e as análises numéricas. Em telecomunicações também é necessário trabalhar com grandezas muito diferentes: a potência de um transmissor uma rádio pode ser em torno de dezenas de kilowatts, enquanto a sensibilidade de um receptor em torno de microwatts.

**Table 1.5. Relação entre números decimais, potencia de 10 e logaritmos decimais de um número.**

Número	Potência de 10	Logaritmo decimal do n°
100000	$10^6$	6
10000	$10^5$	5
1000	$10^4$	4
100	$10^3$	3
10	$10^2$	2
1	$10^1$	1
0,1	$10^0$	0
0,01	$10^{-1}$	-1
0,001	$10^{-2}$	-2
0,0001	$10^{-3}$	-3
0,00001	$10^{-4}$	-4
0,000001	$10^{-5}$	-5
0,0000001	$10^{-6}$	-6

### 1.7.3. Escala Decibel

O decibel é uma unidade de medida adimensional. É utilizada em várias áreas como: Física, acústica, eletrônica, telecomunicações, etc. Sua função é dez vezes o logaritmo da razão dos valores comparados.

**Potência:**

$$dB = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (1.4)$$

**Tensão:**

$$dB = 20 \log \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (1.5)$$

#### Escalas padronizadas do Decibel

Ao padronizar um valor para o denominador ( $I_0$  ou  $P_0$ ) é possível obter uma escala de referência. Exemplos: dBm, dBW, dBμ, dBV.

O dBm é a escala decibel usando como referência um miliwatt (1mW).

$$dBm = 10 \log \left( \frac{I}{0,001W} \right) \quad (1.6)$$

Exemplo:

$$dBm = 10 \log \left( \frac{0,250W}{0,001W} \right) \therefore dBm = 10 \log(250) \therefore \cong 24dBm$$

**Tabela 1.4. Relação entre dBm e potência em mW (miliwatts).**

<b>dBm</b>	<b>Potência</b>
0	1 mW
1	1,3 mW
2	1,6 mW
3	2 mW
6	4 mW
9	8 mW
10	10 mW

<b>dBm</b>	<b>Potência</b>
15	32 mW
20	100 mW
30	1 W
33	2 W
36	4 W
40	10 W
50	100 W

Regras básicas da escala dBm:

+ 3 dBm = dobro da potência em Watts

- 3 dBm = metade da potência em Watts

+ 10 dBm = aumento de dez vezes a potência em Watts

- 10 dBm = diminuição de dez vezes a potência em Watts

**Já o dBW é em relação à 1W:**

$$dBW = 10 \log \left( \frac{P}{1W} \right) \quad (1.7)$$

Exemplo:

$$dBW = 10 \log \left( \frac{0,250W}{1W} \right) \quad \therefore \quad dBW = 10 \log(0,25) \quad \therefore \quad \cong -6dBW$$

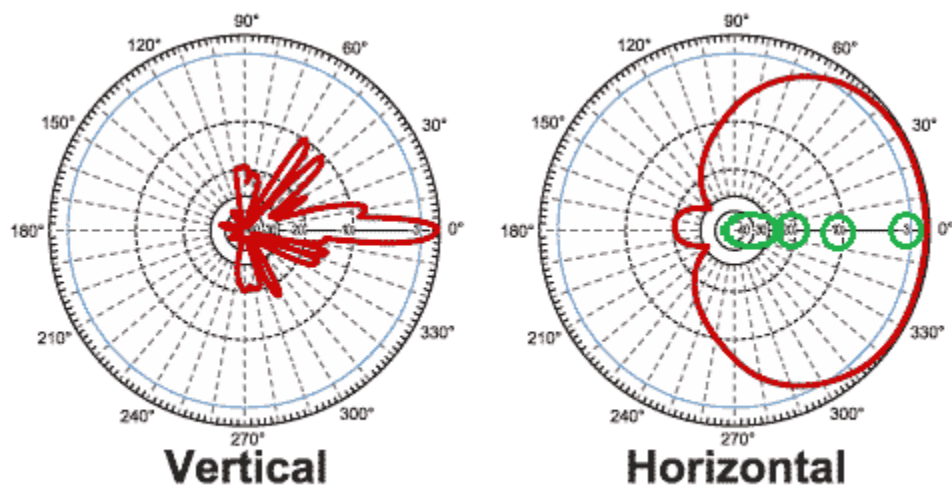
#### 1.7.4. Tipos de antenas e suas características

Antenas são dispositivos mecânicos, passivos aptos a receber ou transmitir radiações eletromagnéticas. As antenas são necessárias para dar ganho a um determinado sinal, tanto na recepção quanto na transmissão. Em comunicações mais longas utiliza-se antenas com maior ganho, para que ela amplifique o sinal.

Outra funcionalidade das antenas é direcionar a transmissão ou recepção dos sinais. Esta diretividade é útil para fazer um uso mais eficiente do espectro eletromagnético e evitar interferências. Em uma comunicação ponto a ponto, não é necessário irradiar em todas as direções. Portanto, é possível utilizar antenas com uma abertura menor. Ou seja, uma antena mais diretiva. Já um ponto de acesso sem fios localizado no centro de uma praça necessita irradiar em todas as direções para dar uma cobertura satisfatória.

A forma analítica de visualizar o como uma antena irradia é através dos diagramas de irradiação. O mais utilizado pelos fabricantes de antenas é o diagrama de irradiação do tipo polar. Ele é formado por duas imagens que representam a irradiação da antena nos planos horizontal e vertical, em 360°. Os círculos na Figura 1.22 mostram valores pré-definidos (3, 10, 20, 30 e 40 dBi). Essa escala marca a atenuação da antena. A marca de 3 dBi é muito importante, pois é ela que define o grau de abertura da antena. No diagrama de irradiação mostrado na Figura 1.22, é mostrada uma antena com uma abertura horizontal de 120°. Esta informação foi obtida analisando a imagem seguir onde pode-se ver que a linha de ganho cruza a linha do -3dBi em 60° e em 300°, totalizando 120°. Já a abertura horizontal é bem pequena, na ordem de 3°. A linha de -3dBi também é chamada de linha de meia potência, como visto anteriormente, a cada 3 dB temos uma relação de dobro ou metade.

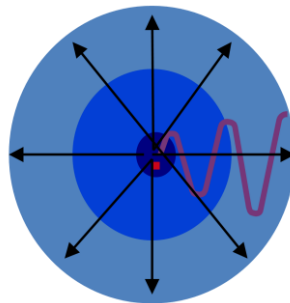




**Figura 1.22. Diagrama de irradiação polar**  
 Imagem obtida da Internet [ANTE01]

### **Antena Isotrópica.**

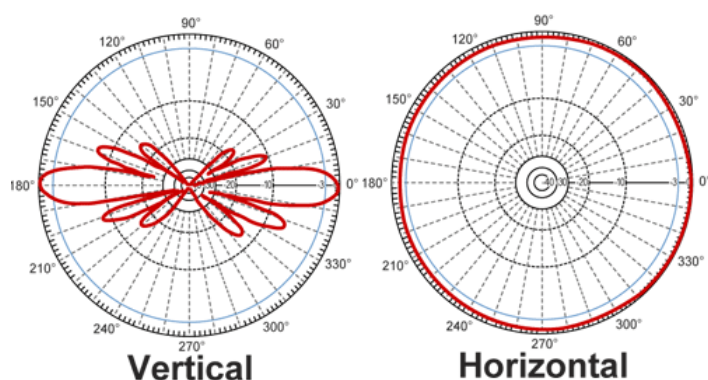
A antena isotrópica na prática não existe. Ela é um modelo matemático de um elemento puntiforme que irradia com a mesma potência em todas as direções, conforme mostra a Figura 1.23. Seus diagramas de irradiação vertical e horizontal são círculos perfeitos. O ganho da antena isotrópica serve de referencia para a escala dBi como sendo o zero dBi.



**Figura 1.23. Antena Isotrópica**

### **Antena Omnidirecional**

A antena omnidirecional se assemelha a antena isotrópica no plano horizontal, pois irradia com a mesma potência em 360°. Porém no plano vertical a sua irradiação não é uniforme conforme podemos constatar nos diagramas de irradiação mostrados na [Figura 1.24](#).



**Figura 1.24. Diagrama de irradiação antena omnidirecional.**

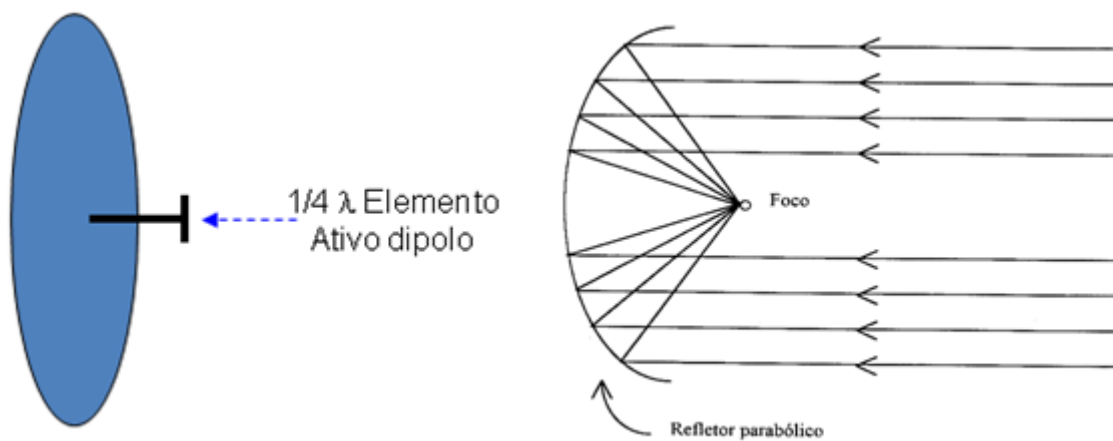
As antenas omnidirecionais se caracterizam por serem finas e compridas. O tamanho, altura, da antena está relacionada ao seu ganho. Abaixo temos a figura 1.25 é uma antena omnidirecional de 2.4GHz e com um ganho de 8dBi.



**Figura 1.25. Foto de uma antena omnidirecional 8dBi.**

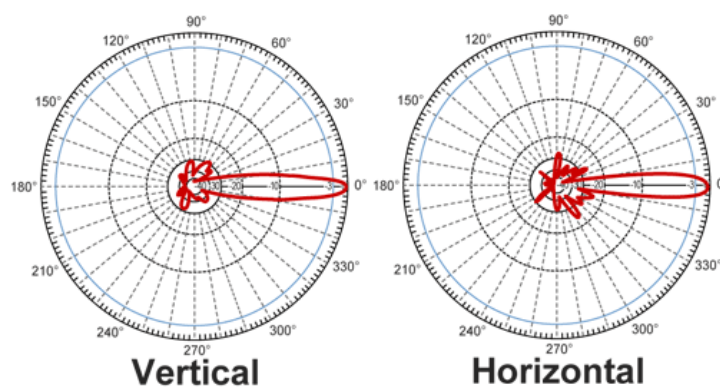
### **Antenas Parabólicas.**

A antena parabólica se caracteriza por ter uma boa diretividade, normalmente em torno de 3°. Ela é constituída de um dipolo de 1/4 do comprimento de onda que irradia e recebe irradiação através de uma parábola reflexiva, conforme ilustra a Figura 1.26.



**Figura 1.26. Antena parabólica**

Os diagramas de irradiação de uma antena parabólica tendem a ser semelhantes nos planos horizontal e vertical conforme podemos constatar na figura 1.27:



**Figura 1.27. Diagrama de irradiação parabólica.**

A Figura 1.28 é uma antena parabólica de 30 dBi.

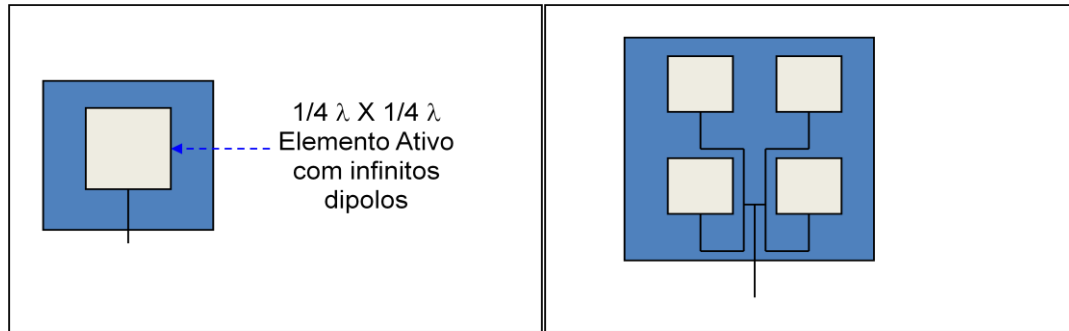


**Figura 1.28. Foto antena parabólica 30 dBi.**

### **Antenas setoriais ou semi-direcionais.**

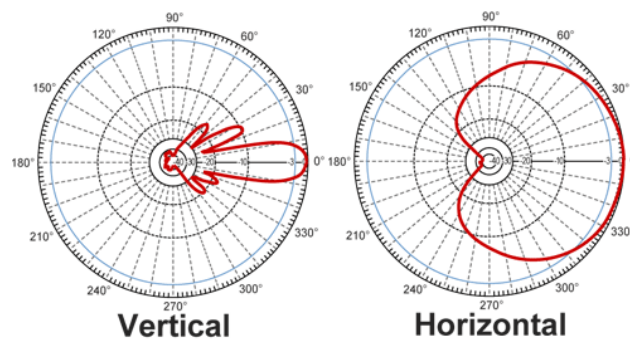
As antenas setoriais, também conhecidas por semi-direcionais, são caracterizadas por irradiar em uma abertura maior do que as parábolas e menor do que as omnidirecionais. As aberturas mais comuns para antenas setoriais são: 30°, 60°, 90° e 120°. Elas são

compostas por um elemento irradiante (Figura 1.29, à esquerda) ou conjuntos de elementos irradiantes (Figura 1.29, à direita). Este elemento irradiante funciona como infinitos dipolos ele é quadrado e a medida do seu lado é  $\frac{1}{4}$  do comprimento de onda. O número de elementos irradiantes define o ganho da antena: 1 elemento = 6dBi, 4 elementos = 12 dBi, 12 elementos = 17 dBi.



**Figura 1.29. Antena setorial.**

Um diagrama de irradiação de uma antena setorial com abertura de 90° pode ser visto na Figura 1.30:



**Figura 1.30. Diagrama de irradiação antena setorial.**

As antenas setoriais são muito utilizadas em estações radio base de telefonia celular (ERB), assim como em pontos de presença (POP) de provedores de internet via rádio. Na Figura 1.31 temos uma foto de uma antena setorial de 14 dBi.

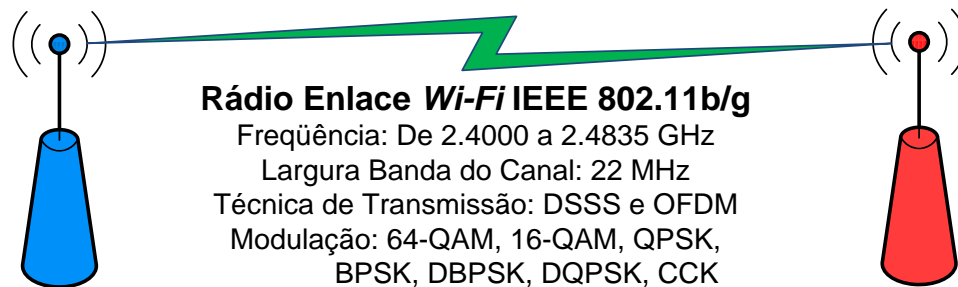


**Figura 1.31. Foto antena setorial.**

## 1.8. Estudo de caso

O objetivo deste estudo de caso é verificar como ocorrem as comunicações de dados através de rádio enlaces *Wi-Fi*, padrão IEEE 802.11. O foco do estudo é

para as diferenças físicas causadas no espectro eletromagnético com o uso de diferentes técnicas de transmissão, o OFDM e o DSSS. Os experimentos foram conduzidos considerando a transmissão IEEE 802.11 entre duas estações, como mostra a Figura 1.32. A análise espectral foi realizada utilizando-se um equipamento próprio para tal fim, conforme especificado abaixo.



**Figura 1.32. Enlace Wi-Fi.**

#### **Equipamentos utilizados:**

01 Analisador de Espectro FS300 – Rohde & Schwarz  
01 Antena setorial 14dBi 90° abertura  
02 Cartões miniPCI Ubiquiti XR2  
02 Placas *RouterBoard* 433AH  
02 Antenas TP-Link 2405C  
02 Fontes de alimentação 18V 2A  
Cabo Cellflex, pigtails e adaptadores

#### **Procedimentos de montagem, conforme Figura 1.33:**

Analisador de espectro:

- Instalação do analisador FS 300 na mesa
- Conexão de uma antena setorial ao analisador de espectro
- Gerenciamento remoto do analisador de espectro, através de conexão via USB a um laptop

Enlace:

- Instalação de cartão mini PCI em cada *RouterBoard*
  - Conexão do pigtail e da antena ao cartão
  - Configuração das *RouterBoards* com os endereços IP 192.168.100.1/24 e 192.168.100.2/24
- Preparamos uma configuração básica para os testes:

Foto dos equipamentos montados:



Figura 1.33. Set-up dos experimentos

### Procedimentos de análise:

O experimento foi baseado na configuração de um dos rádios em modo “AP bridge” e do outro como “station WDS”, o que simplifica o processo de obtenção e análise dos dados, pois o rádio configurado como “AP bridge” tem autoridade sobre o rádio configurado em modo “station WDS”. Então, o procedimento restringe-se a deixar o rádio “station WDS” com as suas configurações dinâmicas automáticas. Por outro lado, no “AP bridge”, pode-se modificar a frequência dos canais de comunicação, bem como a largura de banda dos canais e taxas nominais de transferência, como ilustrado na Figura 1.34. A questão relativa às taxas nominais de transferência é muito importante, pois é através da alteração dessas taxas que é possível limitar o rádio enlace a trabalhar em uma determinada técnica de transmissão ou técnica de modulação. As técnicas suportadas são apresentadas na Tabela 1.6.

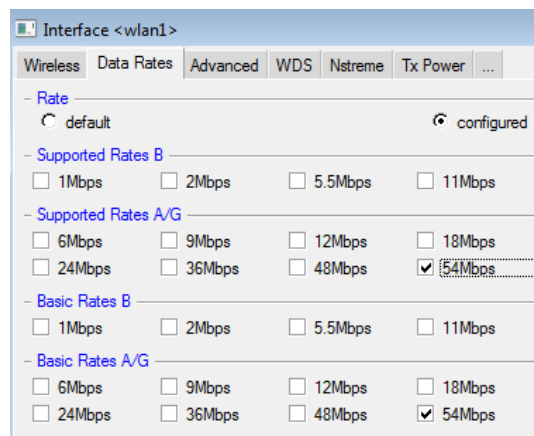


Figura 1.34. Tela de configuração de data-rates

**Tabela 1.6. Técnicas de transmissão, modulação e Data-Rates dos padrões IEEE 802.11b/g.**

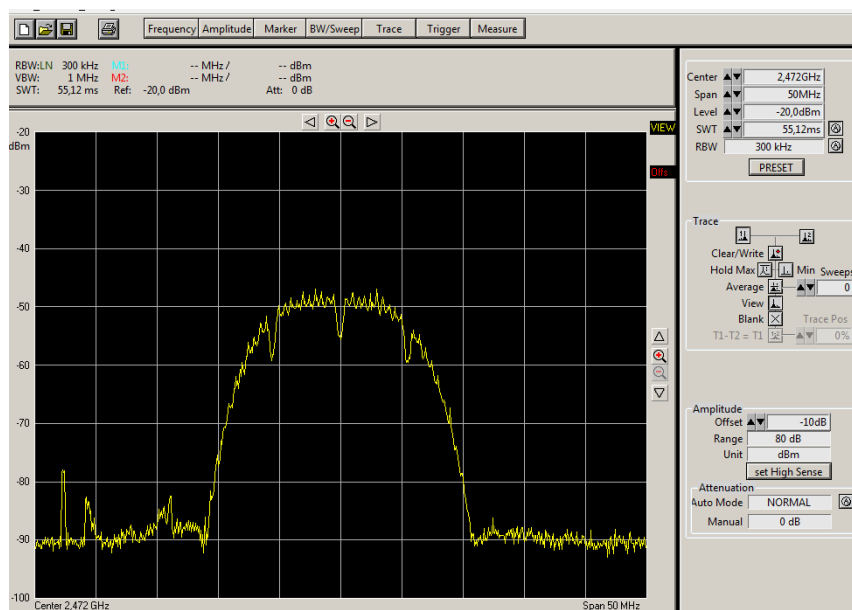
IEEE 802.11 b - DSSS		IEEE 802.11 g – OFDM	
Data-Rate	Modulação	Data-Rate	Modulação
1 Mbps	DBPSK	6 Mbps	BPSK
2 Mbps	DQPSK	12 Mbps	QPSK
5.5 Mbps	CCK	24 Mbps	16-QAM
11 Mbps	CCK	48 Mbps	64-QAM
		54 Mbps	64-QAM

## Resultados:

Com os equipamentos montados, foi possível visualizar, através do analisador de espectro, o comportamento de cada técnica de transmissão no espectro eletromagnético. A seguir, são discutidos os comportamentos do sinal considerando as técnicas de transmissão DSSS e OFDM, bem como variações no esquema de modulação empregado.

## DSSS

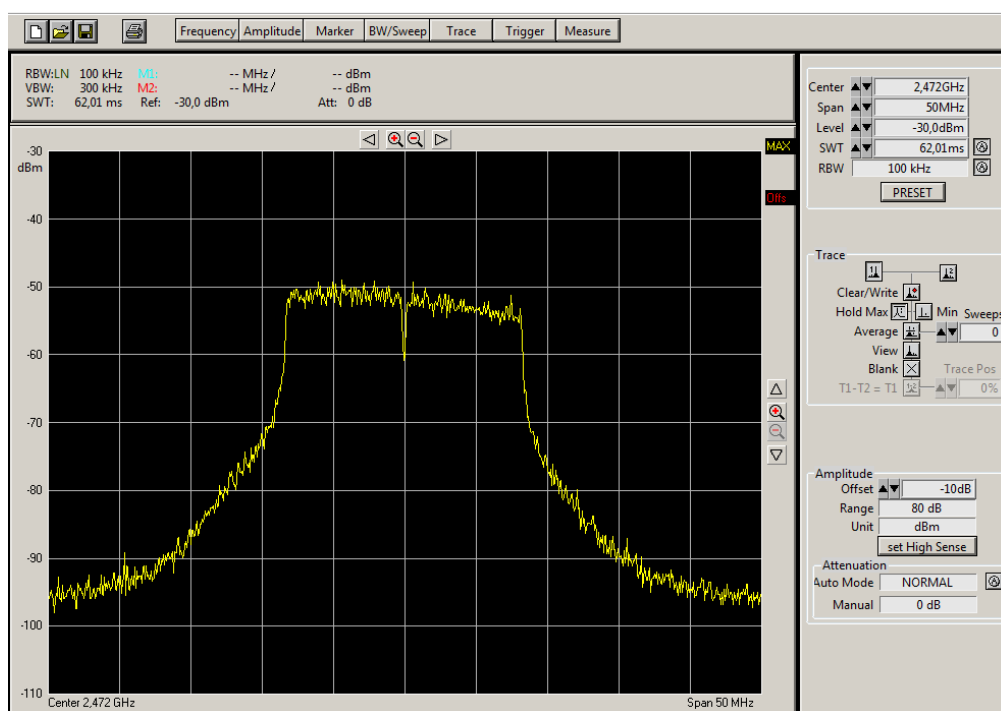
Na Figura 1.35, pode-se visualizar uma parte do espectro eletromagnético na faixa de frequência de 2.4GHz. Nesse caso, o analisador de espectro está configurado para considerar a faixa central de análise no canal 2.472GHz (Canal 13). Na figura em questão, cada faixa horizontal representa uma largura de banda de 5MHz. Cada linha vertical representa 10 dBm. A intensidade do sinal recebido é de aproximadamente -50dBm. O sinal passa da faixa de 20MHz, comprovando o subsidio teórico-normativo.



**Figura 1.35. DSSS no analisador de espectro.**

## OFDM

Na Figura 1.36 pode-se visualizar parte do espectro eletromagnético em 2.4GHz. Nesse cenário, o analisador de espectro também está centrado no canal 2.472GHz (Canal 13). Cada faixa horizontal representa uma largura de banda de 5MHz, enquanto cada linha vertical representa 10 dBm. A intensidade do sinal recebido é de aproximadamente -50dBm. E o sinal passa da faixa de 20MHz, novamente comprovando o subsidio teórico-normativo.

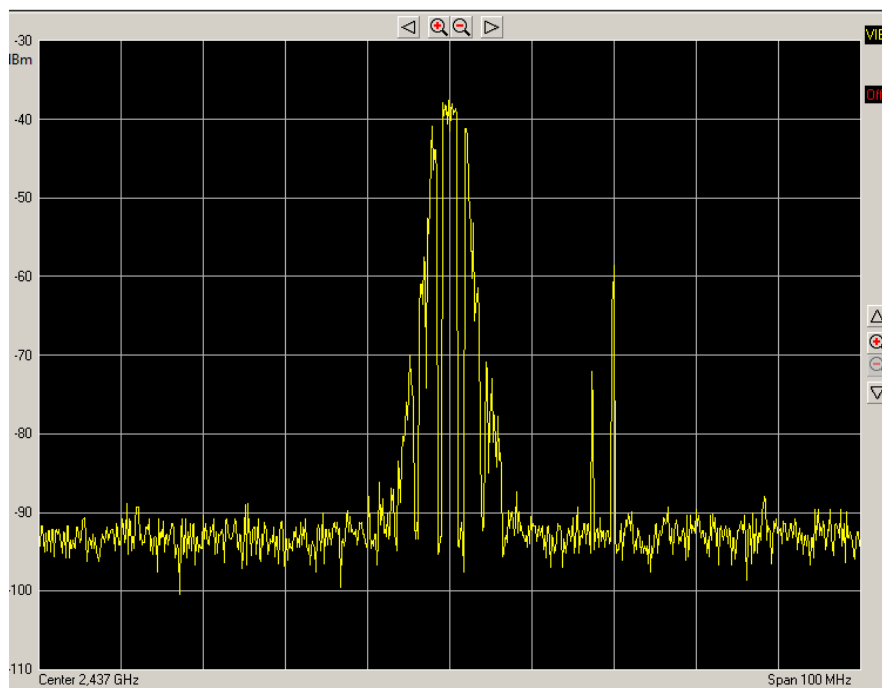


**Figura 1.36. OFDM no analisador de espectro.**

O cenário experimental foi utilizado ainda para realizar análises considerando outras canalizações, como: 5, 10 e 40 MHz. Essas canalizações são utilizadas por diferentes motivos. Canalizações pequenas ajudam a evitar alguns tipos de interferência, através da remoção da sobreposição entre os canais, conforme discutido anteriormente. Então, em locais onde o espectro eletromagnético é muito congestionado, pode-se utilizar canalizações menores. Conseqüentemente, tem-se menores taxas de transmissão, entretanto, isso é aceitável em situações em que o ambiente seja muito ruidoso, uma vez que será possível a conectividade a rede.

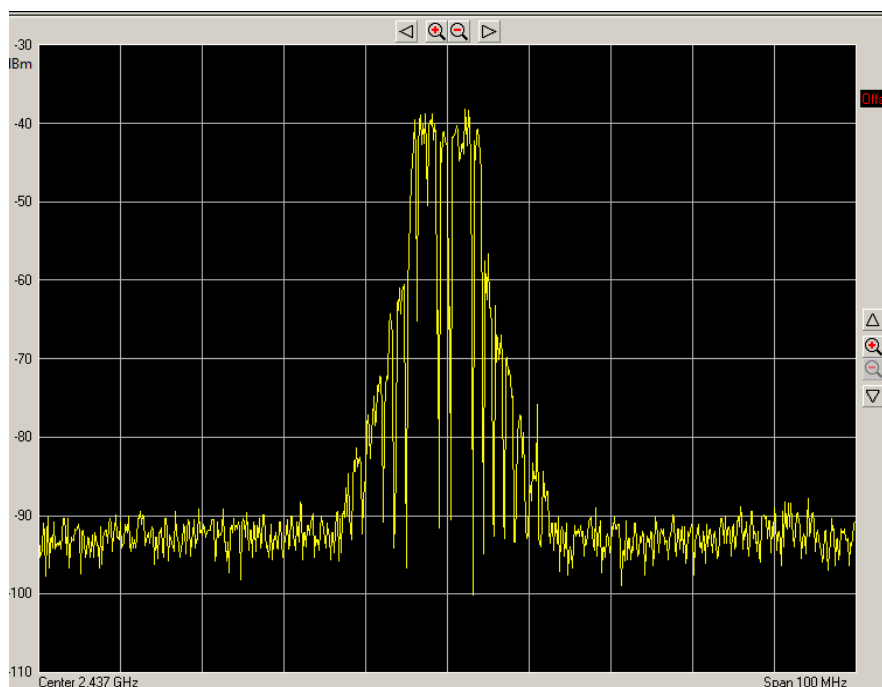
A Figura 1.37 permite verificar o comportamento do sinal no canal 2.437GHz (Canal 6). Nesse caso, é analisado um canal cuja largura de banda é de 5MHz. A intensidade do sinal recebido é de aproximadamente -40dBm.





**Figura 1.37. Canal 5MHz no analisador de espectro.**

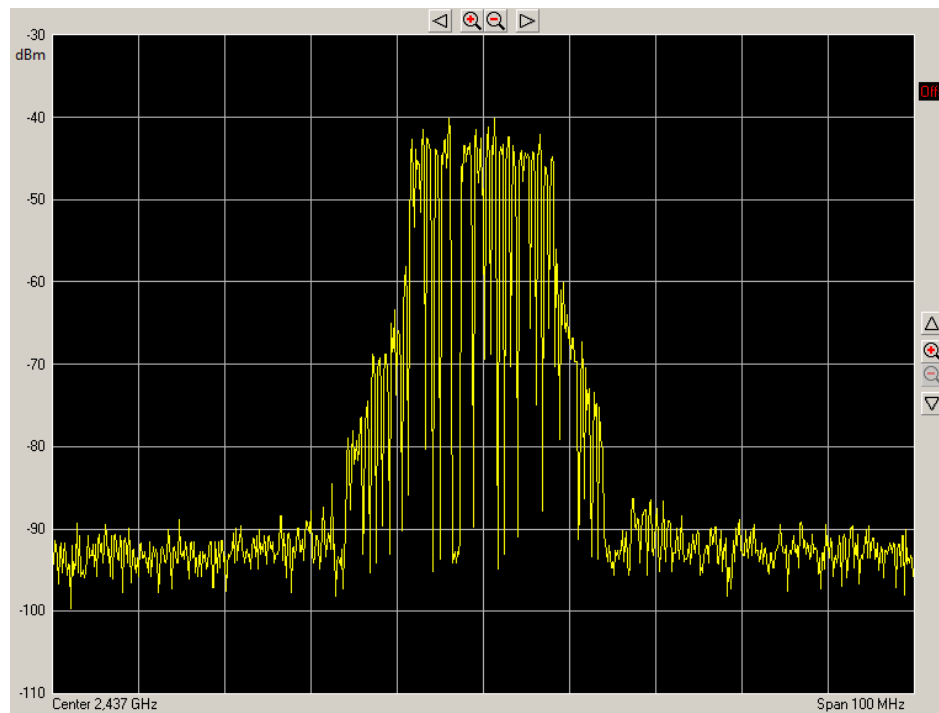
Análise semelhante é apresentada na Figura 1.38. Entretanto, nessa figura, a largura de banda do canal é reduzida para 5MHz. Com isso, pode-se verificar uma alteração no comportamento do sinal, causado pela redução da banda, bem como pela menor taxa de transmissão suportada nesse caso.



**Figura 1.38. Canal 10MHz no analisador de espectro.**

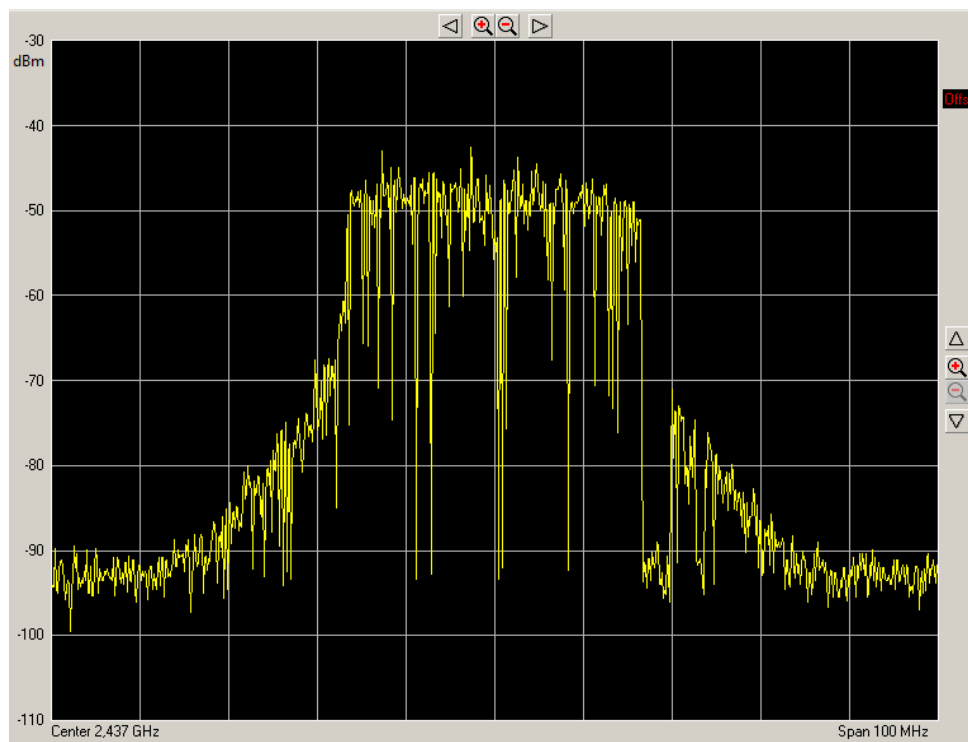
Na sequência, a Figura 1.39 mostra o comportamento do sinal quando a largura de banda do canal é de 20MHz. Nesse caso, percebe-se um aumento considerável na

ocupação do canal, causado pela maior taxa de transmissão de dados, quando o canal é saturado através da geração de tráfego entre os dispositivos sem fio.



**Figura 1.39. Canal 20MHz no analisador de espectro.**

Por fim, na Figura 1.40 pode-se verificar o comportamento do sinal em situações nas quais a largura de banda do canal é aumentada para 40MHz. Comercialmente esta canalização é conhecida por TurboG, 108Mbps, ou TurboMode. Nessa implementação proprietária, a largura de banda do canal é o dobro de um canal IEEE 802.11 padronizado. Sendo assim, são suportadas taxas mais altas de transmissão de dados. Entretanto, esse modo possui a limitação de somente poder ser empregado no canal 2.437GHz (Canal 6), o que muitas vezes impossibilita o uso desta tecnologia caso o espectro na região do enlace não permita o uso desta frequência.



**Figura 1.40. Canal 40MHz no analisador de espectro.**

## **1.8. Considerações Finais**

Neste trabalho, apresentou-se uma análise espectral de transmissões IEEE 802.11. Para tanto, foram realizadas variações na técnica de transmissão empregada, bem como nos esquemas de modulação suportados pelo padrão IEEE 802.11. Através dessas alterações, pode-se analisar o comportamento do sinal considerando diferentes taxas de transmissão de dados entre os dispositivos sem fio.

Além disso, analisou-se o comportamento do sinal no espectro de frequências quando é variada a largura de banda dos canais. No trabalho, foram analisadas larguras de bandas variáveis entre 5MHz e 20MHz, as quais são suportadas pelo padrão IEEE 802.11. Adicionalmente, o padrão proprietário TurboG também foi analisado, uma vez que permite transmissões com taxas nominais mais elevadas, através do uso de canais com largura de banda de 40MHz.

Conclui-se que este trabalho permite uma compreensão dos conceitos teóricos envolvidos com as transmissões IEEE 802.11. Além disso, é possível analisar e discutir o comportamento do sinal em diferentes taxas de transmissão.

## Referencias

IEEE 802.11. **IEEE 802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications**. IEEE, 2007.

HAYKIN, S.; MOHER, M.; **Sistemas modernos de comunicação wireless**. Porto Alegre: Bookman, 2008.

IZUN, H. **Radio wave propagation for telecommunication applications**. Berlin: Springer, 2005.

BALANIS, Constantine A. **Antenna theory: analysis and design**. 3rd. ed. Hoboken [Estados Unidos]: Wiley, 2005.

MIKROTIKLS SIA.; **User's Manual RouterBOARD 433 Series**

[http://www.routerboard.com/pricelist/download\\_file.php?file\\_id=137](http://www.routerboard.com/pricelist/download_file.php?file_id=137)

MIKROTIKLS SIA.; **Manual:Interface/Wireless**

<http://wiki.mikrotik.com/wiki/Manual:Interface/Wireless>

UBIQUITI NETWORKS, Inc.; **XTREMERange2 Datasheet**

[http://ubnt.com/downloads/xr2\\_datasheet.pdf](http://ubnt.com/downloads/xr2_datasheet.pdf)

ROHDE & SCHWARZ; **Operating manual Spectrum Analyzer with Tracking Generator R&S FS315** [http://www2.rohde-schwarz.com/file/FS315\\_BH\\_G.pdf](http://www2.rohde-schwarz.com/file/FS315_BH_G.pdf)

TP-LINK Technologies Co., Ltd.; **Specifications TL-ANT2405C**

<http://www.tplink.com/products/productDetails.asp?class=&content=spe&pmodel=TL%2DANT2405C>

**Memória Científica – Landell de Moura**, CD-ROM ; IHG-RS – Instituto Histórico e Geográfico do Rio Grande do Sul (Janeiro de 2005).

ESPEC01. **Espectro eletromagnético** ; em:

[http://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_eletromagn%C3%A9tico](http://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro_eletromagn%C3%A9tico), visitado em setembro de 2010.

WIFI01. **Wi-Fi Alliance** ; em: <http://www.wi-fi.org/>, visitado em setembro de 2010.

ANTE01. **L-COM** ; <http://www.l-com.com/category.aspx?id=2073/>, visitado em setembro de 2010.