



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

**ANÁLISE DE REDES IEEE 802.11AC EM AMBIENTES DO TIPO
RAYLEIGH, RICE E AWGN**

Área de Telecomunicações

por

Silas Silva Brasil

Rogério Moreira Lima Silva, Dr.
Orientador

São Luís (MA), **dia** de Agosto de 2016

ANÁLISE DE REDES IEEE 802.11AC EM AMBIENTES DO TIPO RAYLEIGH, RICE E AWGN

Área de Telecomunicações

por

Silas Silva Brasil

Relatório de monografia/dissertação apresentado
à Banca Examinadora do Curso de Engenharia de
Computação para análise e aprovação.
Orientador: Rogério Moreita L. Silva, Dr.

São Luís (MA), dia de Agosto de 2016

SUMÁRIO

LISTA DE ACRÔNIMOS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE EQUAÇÕES

RESUMO

ABSTRACT

AGRADECIMENTOS

1. INTRODUÇÃO

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3. PROJETO

4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

REFERÊNCIAS

GLOSSÁRIO

APÊNDICE

ANEXO

LISTA DE ACRÔNIMOS

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
AWGN	Additive White Guassian Noise
OFDM	Orthogonal Frenquey-divsion Multiplexing
MIMO	Multiples Input Multiples Output
AM	Amplitude Modulation
FM	Frequency Modulation
MSK	Minimum-Shift Keying
PSK	Phase-Shift Keying
FSK	Frequency-Shift Keying
EVM	Error Vector Magnitude
RSR	Relação Sinal-Ruído
OSI	Open System Interconection
ISO	Internatinal Organization of Standardization
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
BPSK	Binary Phase-shift Keying
QPSK	Quadrature Phase-shift Keying
FHSS	Frequency-hopping Spread Sprectrum
DSSS	Direct Sequence Spread Sprectrum
TS	Tempo de Símbolo
TU	Tempo Útil
TG	Tempo de Guarda
OFDMA	Orthogonal Frenquey-divsion Multiplexing Multiples Access
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ITU	International Telecommunication Union
ISM	Instrumental, Médica e Científica
4G	Quarta Geração
LTE	Long Term Evolution
PDP	Perfil de Atraso de Potência
DSP	Digital Signal Process

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Legenda (caso não seja de autoria própria citar e referenciar [2]).....	22
Figura 2. Legenda (caso não seja de autoria própria citar e referenciar)	23
Figura 3. Legenda (caso não seja de autoria própria citar e referenciar)	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Nome da tabela (caso não seja de autoria própria citar e referenciar).....	22
Tabela 2. Nome da tabela (caso não seja de autoria própria citar e referenciar).....	22

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	4
-----------------	---

RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo analisar o desempenho das redes IEEE 802.11ac no canais do tipo Rayleigh, Riciano e AWGN para as larguras de banda de 20MHz, 40MHz e 80MHz. A análise será feita baseado em simulação utilizando a ferramenta Simulink de Matlab. A técnica de transmissão utilizada no padrão 802.11ac é a OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) que traz um grande aumento na eficiência do uso do espectro, sua economia da largura de banda chega a 50%.

Palavras-chave: OFDM. 802.11ac. Rayleigh. Rice. AWGN.

ABSTRACT

[illegible]

Keywords: OFDM. 802.11ac. Rayleigh. Rice. AWGN.

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos principais são direcionados à Deus e Jesus Cristo que nos salvou da morte. Muitas pessoas foram importantes nesse trabalho, entre elas estão o Prof. Rogério Moreira Lima, Prof. Leonardo Gonsioroski, Thayanne Barros e claro em especial minha mãe Ana Lúcia, pai Antônio José e minha irmã Natália Brasil que me impulsionaram estudar desde criança.

Outros agradecimentos vão para CNPq por ter apoiado as pesquisas na área, e ao curso de Engenharia da Computação da Universidade Estadual do Maranhão.

1. INTRODUÇÃO

Na última década houve uma explosão da demanda por banda larga sem fio, devido ao barateamento de tecnologias como a microeletrônica, favorecendo o acesso de pessoas das classes C e D à internet, bem como aplicações do tipo backhaul. Essas mudanças profundas vêm ocorrendo de maneira acelerada nos últimos anos, culminando com a implantação de redes IEEE 802.11ac baseadas em beamforming que, por sua vez, trabalha com MIMO e gerencia a quantidade de energia utilizada na transmissão podendo, assim, alcançar até 6 Gbps.

Em todo sistema de comunicação as principais variáveis são: *potência, largura de banda e taxa de transferência*. Em [1] é colocado que um sistema de transmissão é formado basicamente por três componentes: *transmissor, o canal por onde será transmitida a informação e o receptor*. As suas funções são, em sua ideia mais original, bem simples, no entanto, há desafios muito interessantes para serem resolvidos no momento da implantação de um sistema de comunicação wireless. O transmissor tem o objetivo de fazer o sinal chegar ao receptor com uma satisfatória quantidade de informação e para isso ele conta com uma quantidade limitada de recursos como, por exemplo, energia e largura de banda. O canal é o meio pelo qual os sinais ou ondas irão passar para chegar até o receptor. Nos canais de comunicação wireless os sinais são afetados na maioria das vezes das seguintes formas: pela distorção no canal, natureza variável no tempo, interferência e ruído no receptor. Já na terceira componente do sistema de comunicação, o receptor, sua função é estimar qual sinal está sendo transmitido já que não se pode ter uma cópia exata do sinal que saiu do transmissor. Dessa forma, o receptor faz três tarefas, que são: sintonizar na frequência de transmissão, tentar corrigir os erros causados pelos canais e nos primeiros estágios da recepção e manter-se sincronizado.

Para um sistema de comunicação wireless, há algumas diferenças que devem ser ressaltadas. A primeira é como a informação é transmitida, pois o canal (o ar no geral) tem características bem diferentes dos cabos de cobre que são geralmente usados. Em sistemas cabeados a informação é transformada diretamente em alguma forma de onda quadrada Figura 1 ou em forma de ondas dos tipos $\text{sinc}(\frac{t}{T_d})$ Figura 2, onde T_d é o tempo de bit, esse último tipo de onda é conhecido como transmissão para canal de Nyquist. As diferentes formas de ondas que são transmitidas em um meio são chamadas de modulação. A transmissão em sistemas que não se usa uma portadora para transmitir o sinal modulado é conhecida como transmissão em *banda base*.

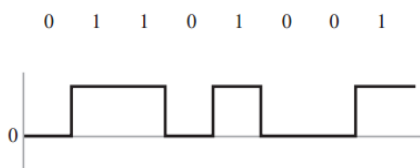


Figura 1 - Onda quadrada [2]

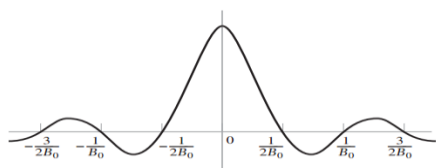


Figura 2 - Onda para o canal de Nyquist [2]

Em comunicação sem fio, que usa a transmissão em *banda passante*, a informação é colocada em uma onda, chamada de portadora (carrier), e depois que esta onda foi alterada (modulada) pela informação, ela então é enviada. As técnicas de modulação são bem abrangentes, as mais simples e conhecidas são AM e FM. Com o passar dos anos e o crescimento tecnológico e científico outras técnicas foram criadas e também empregadas nos sistemas wireless como, por exemplo, MSK, PSK, FSK e QAM. Técnicas de transmissão também foram desenvolvidas, elas variam na sua forma de transmitir os dados em vários aspectos. As mais populares são as técnicas de espalhamento espectral (Spread Spectrum) FHSS, DSSS e OFDM, das três citadas acima a com maior desempenho é a OFDM que, por sua vez, é utilizada nos mais atuais padrões de comunicação sem fio, uma de suas variantes é a OFDMA, utilizada em 4G - LTE.

Em praticamente todos os ambientes onde se utiliza redes sem fio o sinal que é transmitido sofre um espalhamento que é intrínseco de qualquer meio de transmissão, no entanto, os objetos presentes amplificam esse efeito, que é chamado de multipercurso. O multipercurso, nada mais é do que réplicas do sinal original que é formada por causa do fato da onda se propagar de forma espacial no ambiente. Desta forma, várias cópias do mesmo sinal chega na antena receptora causando, por sua vez, uma dificuldade no receptor na compreensão do sinal. Esse efeito de espalhamento é modelado matematicamente por principalmente duas funções de probabilidade a função de densidade *Rayleigh* e a de *Rice*. Assim, elas podem ser utilizadas em simulações, trazendo, portanto, uma imitação satisfatória do meio de propagação.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver um ferramenta de simulação para o planejamento e análise de redes sem fio em ambientes INDOOR (fechados) em canais do tipo AWGN, Rayleigh e Rice, contribuindo para futuros planejamentos em qualquer ambiente, dessa forma, a ferramenta será adaptável a outro modelos de propagação com característica suburbanas e rurais.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Observar o comportamento do padrão IEEE 802.11ac nos canais Rayleigh e Rice, juntamente com AWGN.

- Utilizar os conceitos de propagação para simular as características dos ambientes INDOOR;
- Estudar a adição do ruído gaussiano no sinal;
- Desenvolver uma ferramenta de simulação para análise dos sinais imersos nesses ambientes.

1.2. METODOLOGIA

No desenvolvimento deste trabalho será feita pesquisas bibliográfica com o intuito de fortalecer, solidificar e desenvolver mais os conceitos aprendidos até aqui. A análise sobre codificação de canal, modulação digital, espalhamento espectral, OFDM e modelos de canais de transmissão devem ser tratados com mais rigor matemático e as simulações tem como alvo descrever com maior exatidão possível a realidade.

Os padrões de comunicação IEEE 802.11 são um dos mais utilizados no mundo e também são referência para outros. Não obstante, analisar o mais novo modelo lançado, 802.11ac, é de suma importância para o projeto de redes sem fio da atualidade. Logo, depois das consolidações dos conceitos aprendidos a simulação será elaborada e a análise de taxa de transmissão, taxa de erro de bit, EVM, RSR, melhor modulação para as várias características dos canais. Com isso pode ser levanta conclusões e problema sobre o comportamento desse novo padrão.

Com os modelos de simulação prontos e examinados outras técnicas poderão ser analisadas e testadas com o intuito de obter melhoras no padrão 802.11ac. Existem várias técnicas utilizadas em outros sistemas que podem fornecer melhoras a taxa de transmissão e na disponibilidade. Por exemplos, os sistemas 4G LTE utiliza OFDMA com o objetivo de transmitir dados para vários usuários simultaneamente, assim, em locais em com alta densidade de usuários de WI-FI, como nos shoppings, pode-se ter um ganho na disponibilidade de informação.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este relatório está estruturado da forma como segue. No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica. O Capítulo 3 apresenta a desenvolvimento do trabalho. Finalmente no Capítulo 4 são apresentadas as conclusões e considerações finais.

[FIM DE SEÇÃO. Não remova esta quebra de seção]

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Diante da evolução das tecnologias e o crescimento da demanda de dados exponencial, as técnicas de transmissão cabeadas foram evoluindo e aumentando mais e mais as taxas de transmissão, não obstante, as redes sem fio tentam evoluir de forma a se comparar com as redes cabeadas, pois, além disso, as redes wireless dão uma gama de vantagens já que elas diminuem a utilização de cabos, fornecem uma maior mobilidade para os usuários.

A IEEE criou no final da década de 90 o grupo 802.11 que especifica os modelos de redes locais sem fio. Com sucesso dos modelos definidos pelo grupo, como nos padrões 802.11a, 802.11b e 802.11g a equipe continuou a pesquisar e desenvolver novas padronizações e culminou na criação do 802.11n e atualmente no 802.11ac. Esses padrões definem regras para as camadas Física e de Enlace do modelo OSI formado pela ISO Figura 3. A seguir são listados os padrões mais populares.

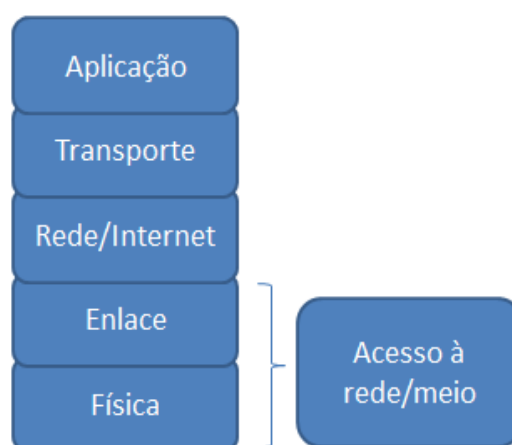


Figura 3 - Camadas do Modelo TCP/IP

- 802.11a: foi a primeira tentativa da IEEE a usar a banda de 5GHz, OFDM e modulação QAM, criado em 1999, alcançando taxa de até 54Mbps, mas incompatível com o 802.11b e 802.11g para clientes;
- 802.11b: também criado em 1999, taxa de transmissão de até 11Mbps operando da faixa de 2,4GHz utilizando as técnicas DSSS, FHSS e modulação DQPSK;
- 802.11g: estabelecida em 2003 com taxas de até 54MHz e compatível com o padrão b, citado acima, com técnica de transmissão OFDM, modulação QAM e operando na faixa de 2,4GHz;

- 802.11n: lançado em 2009, compatível com os padrões b e g, operando na faixa de 2,4 e 5GHz, utilizando MIMO (Múltipla Entrada e Múltipla Saídas), OFDM, atingindo taxa de até 300MHz e ainda opção para Beamforming.

2.1. IEEE 802.11AC

Com a evolução desses padrões, após o lançamento do 802.11n, foi criado mais um grupo com o objetivo de definir um novo modelo para que atingir taxas na faixa de Gbps, esse novo foi denominado 802.11ac. Muitas das tecnologias foram reaproveitadas como o MIMO e o Beamforming, mas agora operando apenas na faixa 5GHz, o fato de operar em uma faixa maior faz com que a largura de banda se torne maior e em consequência disso as bandas dos canais formam-se definidas para largura de 20, 40, 80 e 160MHz em contrapartida da faixa de 2,4GHz que dava suporte apenas largura de 20MHz. Dessa forma, a quantidade de subportadoras em uma banda é maior. Outra coisa, é que a quantidade de fluxo espacial, ou seja, a quantidade de antenas que transmitem simultaneamente os dados pode ser de até 8, e no mínimo 2 por Ponto de Acesso (Access Point), as múltiplas antenas dão suporte ao MIMO. A largura de banda e suas respectivas subportadoras são apresentadas na Tabela 1 e Figura 4.

Tabela 1 - Configurações de Subportadoras para 802.11ac [6]

Largura de Banda (MHz)	Número de Portadoras	Portadoras com Informação
20	64	-28 a -1 e 1 a 28
40	128	-58 a -2 e 2 a 58
80	256	-122 a -2 e 2 a 122
160	512	-250 a -130, -126 a -6, 6 a 126 e 130 a 250
80 + 80	256 para cada 80MHz	-122 a -2 e 2 a 122

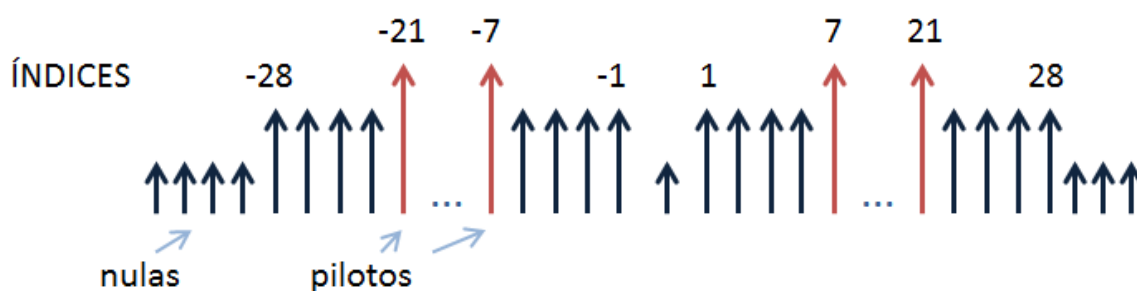


Figura 4 - Índices das subportadoras para 20MHz

A mudança na faixa de 2,4GHz para 5GHz utilizada foi inevitável, já que 2,4GHz é muito utilizada por várias outras tecnologias e em consequência disso há uma grande poluição nessa área do espectro. Outra vantagem é o fato de que agora é possível a utilização de larguras de banda maiores. Segue um esquema na Figura 5 dos canais para 5GHz. Tecnologias como Bluetooth, consoles de vídeo games, telefones sem fio e os micro-ondas que irradiam em grande potência na faixa de 2,450GHz, ou seja, exatamente dentro da faixa utilizada na maioria dos equipamentos wireless. Essas faixas, 2,4 e 5GHz, são amplamente utilizadas pelo

fato de serem não licenciadas permitindo o uso dessas de forma deliberada, com apenas algumas restrições nos níveis de potência fornecida. As normas brasileiras são especificadas pela ANATEL, no mundo a instituição responsável é ITU. As faixas não licenciadas são conhecidas como ISM e estão situadas nas bandas de 900MHz (902MHz - 928MHz), 2,4GHz (2400MHz - 2483,5MHz) e 5GHz (5150MHz - 5350MHz e 5470MHz - 5850MHz).

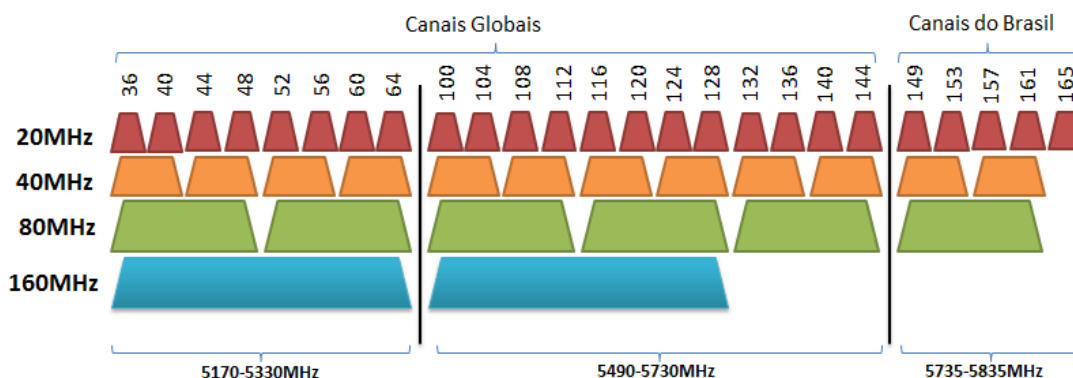


Figura 5 - Canalização para 5GHz [6]

2.2. MODULAÇÃO

Modulação é simplesmente a forma de colocar a informação em forma de energia para ser transmitida, pode ser diretamente no meio como em comunicação cabeadas, banda base, ou em ondas portadoras com em transmissão em banda passante. As técnicas mencionadas aqui são voltadas para transmissão digital wireless. Há basicamente dois processos de modulação, linear e não-linear. Para processo de modulação digital a fonte de informação é totalmente binária e esses bits são os responsáveis por alterar a onda portadora Figura 6.

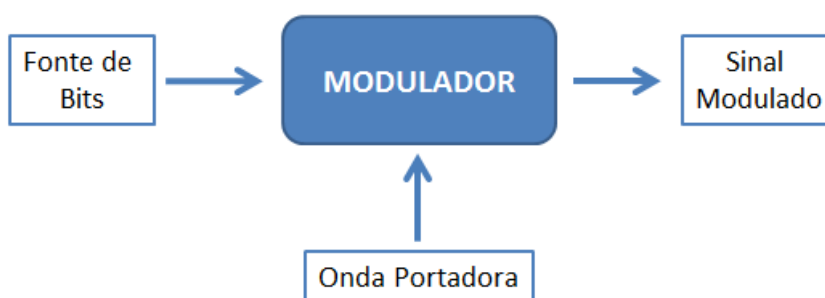


Figura 6 - Diagrama do processo de modulação

Os tipos de modulação digitais mais utilizadas nos padrões IEEE 802.11 são BPSK, QPSK e M-QAM, desta forma elas serão o foco principal neste trabalho. Sabe-se que as ondas têm três variáveis principais, amplitude, fase e frequência, essas características podem ser alteradas de forma que se possa criar um conjunto de ondas identicamente únicas, ou seja, é possível tem um grupo de ondas diferentes entre se e

identificar essas ondas como tipos diferentes de informação. Em comunicação digital os tipos de ondas são compostos da seguinte forma, chamada de forma canônica de um sinal em banda passante [1].

$$S(t) = s_I(t) \cos(2\pi f_c t) - s_Q(t) \sin(2\pi f_c t)$$

Equação 1: Onda Digital

Onde s_I é a componente que está em fase, e s_Q forma um ângulo de 90 graus com a componente em fase, assim, ela é chamada de componente em quadratura. Percebe-se que as componentes em fase e quadratura são ortogonais, semelhante a dois vetores ortogonais que forma uma base no R^2 . Assim, alterando o s_I e s_Q pode-se formar vários tipos de ondas. Para modulação QPSK os valores da Tabela 2 são aplicados para s_I e s_Q . A seguinte integral mostra a ortogonalidade das componentes em fase e quadratura,

$$\int_0^T s_I(t)s_Q(t)dt = 0$$

Equação 2: Ortogonalidade de ondas em fase e quadratura

em um espaço vetorial para que os vetores sejam ortogonais é necessário que o produto interno, ou produto escalar, deles seja igual a zero, semelhantemente o produto interno das funções deve ser iguais a zero.

Tabela 2 - Valores da modulação QPSK [1]

s_I	s_Q	Bits representados	Fase do Sinal Modulado
$+\sqrt{E}$	$-\sqrt{E}$	10	$7\pi/4$
$-\sqrt{E}$	$-\sqrt{E}$	11	$5\pi/4$
$-\sqrt{E}$	$+\sqrt{E}$	01	$3\pi/4$
$+\sqrt{E}$	$+\sqrt{E}$	00	$\pi/4$

A seguir é mostrado duas ondas moduladas, percebe-se que há variações na amplitude e na fase de uma onda em relação à outra.

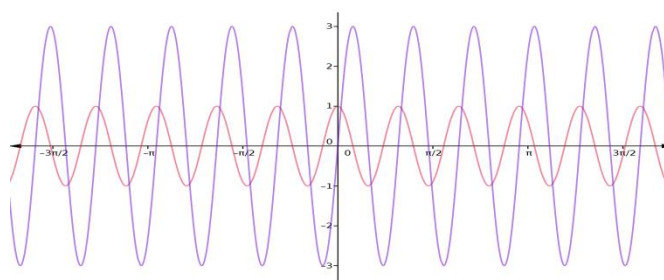


Figura 7 - Ondas modulas em Fase e Amplitude

Cada onda mostrada acima será uma subportadora da técnica de transmissão OFDM, a quantidade de subportadoras dependem do padrão que será utilizado, para o caso do padrão IEEE 802.11ac, o sinal terá, no mínimo, 64 subportadoras, todas elas serão somadas formando apenas uma onda resultante e cada onda estará em uma frequência diferente e múltipla uma da outra. O fato que uma onda está em uma frequência múltipla da outra faz com que não haja interferência de subcanal adjacente, pois ondas com frequências múltiplas uma das outras são ortogonais.

Uma das formas de representar uma onda modulada é utilizando coordenadas polares, chamada de constelação, que nada mais é do que representar uma onda utilizando a *fase* e *amplitude*. Cada ponto da constelação mostra a amplitude, que é distância da origem do eixo, e a fase que ângulo formado com o eixo horizontal. As sequências binárias são representadas por esses pontos. A amplitude dos sinais modulados em QPSK são definidos da seguinte forma,

$$A = \sqrt{\frac{2E}{T}}$$

Equação 3: Amplitude do sinal para QPSK

pois a energia é dada por $E = \frac{A^2}{2}T$, onde T é uma unidade de tempo das componentes s_I e s_Q da modulação QPSK podem ser formadas pelo arranjo dois a dois com repetição dos valores $\pm\sqrt{E}$ da seguinte forma: $(s_I = +\sqrt{E}, s_Q = +\sqrt{E})$, $(s_I = -\sqrt{E}, s_Q = +\sqrt{E})$, $(s_I = -\sqrt{E}, s_Q = -\sqrt{E})$ e $(s_I = +\sqrt{E}, s_Q = -\sqrt{E})$.

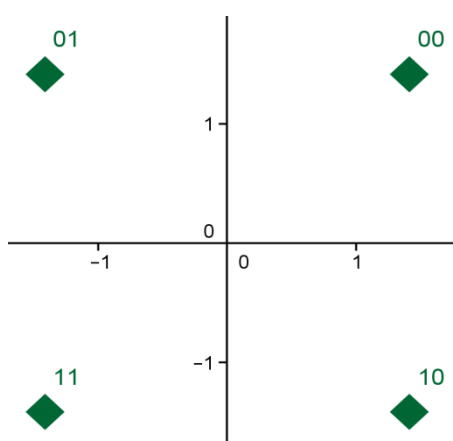


Figura 8 - Constelação QPSK

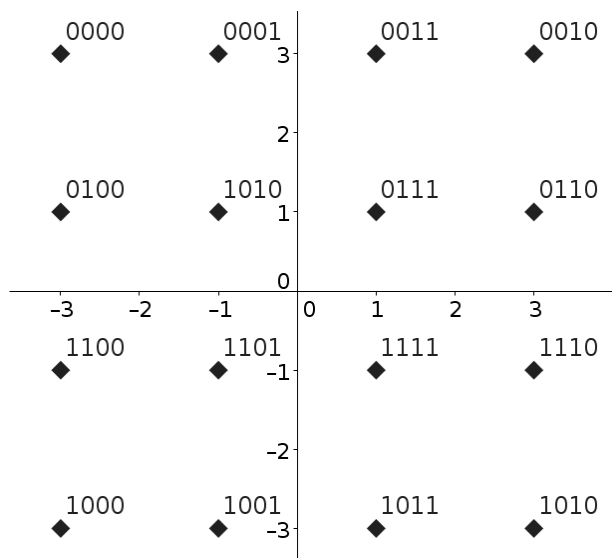


Figure 9 - Constelação 16 QAM

Na constelação 16-QAM (Modulação em Amplitude e Quadratura com 16 pontos) e os pontos são mais próximos, o que a torna mais sujeita a ruídos aditivos. Para outras modulações são necessários os cálculos das amplitudes de cada componente. Em [1] há mais detalhes sobre os cálculos das amplitudes e fases de cada método de modulação. Nesse trabalho iremos trabalhar com as modulações das constelações ilustradas na Figura 10.

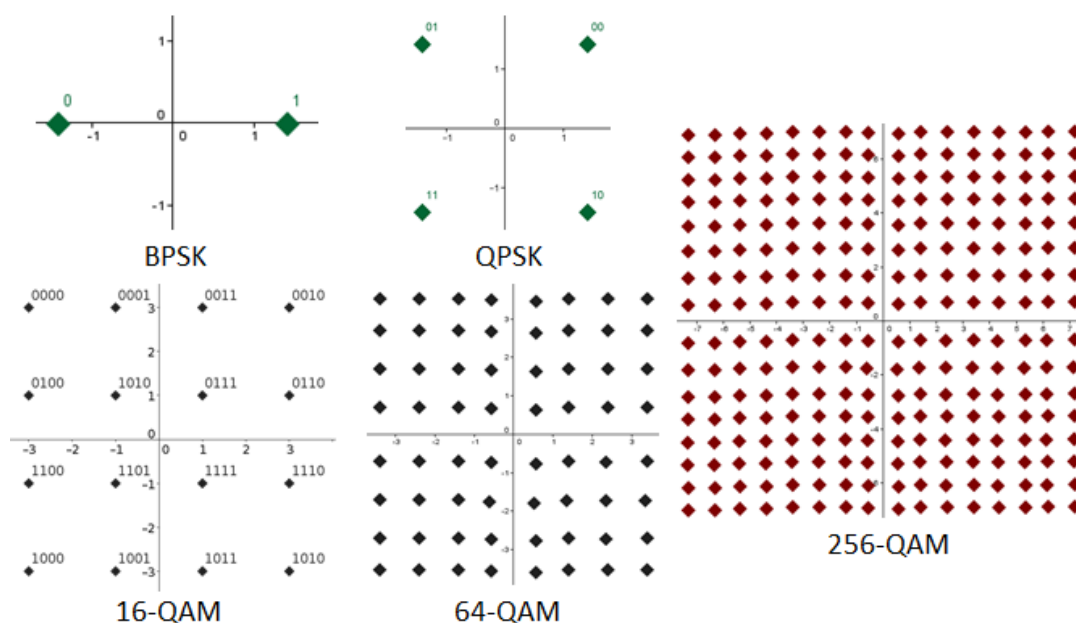


Figure 10 - Constelações utilizadas nesse trabalho

2.3. CANAIS DE PROPAGAÇÃO

Canais de propagação são o meio pelo qual os sinais com informação passam. Os canais mais utilizados nas telecomunicações são os cabos, por exemplo, cabo de cobre, par transado e fibras ópticas. Cada tipo de cabo tem uma determinada característica, elas podem ser imunidade a ruído, interferência de sinais em banda adjacente, interferência intersimbólica, atrasos, etc. Há, atualmente, uma crescente demanda por fibras ópticas, isso deve-se a vantagem de que a luz que passa na fibra tem um enorme largura de banda, de 400THz à 750THz (THz - Terahertz) outra vantagem é a de não sofrer de interferência de sinais externos e o fato de uma fibra poder alcançar longas distâncias sem necessidade um repetidor. No entanto, ainda sim é um serviço caro e elas são utilizadas com maior frequência em serviços com alta taxa de transmissão, mesmo assim há empresas que levam a fibra óptica até a casa dos clientes. Para as comunicações wireless os mesmos problemas são encontrados, no entanto, alguns outros são adicionados. Sabe-se que as ondas eletromagnéticas sofrem com três tipo básicos de fenômenos de propagação, eles são: Reflexão, Refração e Difração, devido as esses alguns desafios devem ser resolvidos para que se alcance taxas desejáveis de transmissão. Para canais com multipercurso são apresentados dois fenômenos adicionais, o Desvanecimento Lento (Low Fading) e Desvanecimento Rápido (Fast Fading) [1]. Uma das formas de caracterizar os canais com multipercurso é utilizando o Perfil de Atraso de Potência (PDP - do inglês, Power Delay Profile). PDP define uma tabela com os respectivos atrasos, atenuações e desvios em frequências por efeito Doppler [3].

Tabela 3 - Exemplo de PDP [3]

Atraso de Caminho [us]	Atenuação de Caminho (dB)	Desvio por efeito Doppler
0	1,00	0
10	0,25	0
15	0,75	5

2.3.1. AWGN

O canal mais comum é o AWGN e também é o mais simples de se resolver. No entanto, ele tem um inconveniente que é o fato de ser branco, ou seja, em analogia com a luz branca que tem todas as faixas do espectro visível, ele está presente em todas as faixas de frequência, até a luz sofre com esse tipo de ruído. Ele está presente por que esse tipo de ruído é causado por características intrínsecas do sistema, por exemplo, o movimento dos elétrons gera um ruído do tipo AWGN nos sinais estão propagando pelo cabo, o próprio aquecimento de um fio aumenta a amplitude do ruído AWGN. Em alguns casos, como nas transmissões sem fio, para que resolver esse problema é necessário aumentar a potência do sinal, com isso, tem-se uma nova RSR, essa medida é muito importante para todos os sistemas de comunicação. A função de **distribuição** para o ruído gaussiano com média *nula* e desvio padrão σ é dada na Equação 4, no geral, a média do ruído é dependente do meio de propagação [2].

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2}$$

Equação 4 – Função Distribuição de Probabilidade Gaussiana

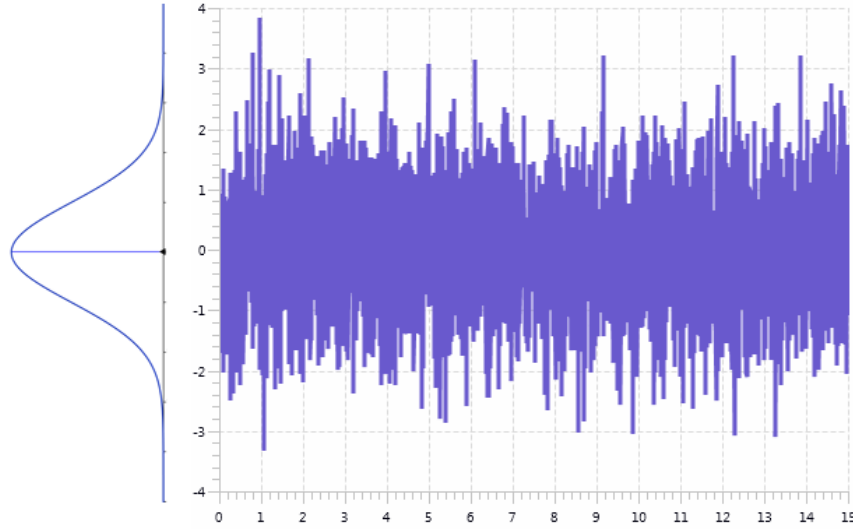


Figure 10 – Exemplo de ruído do tipo AWGN

2.3.2. Rayleigh

Em canais do tipo Rayleigh o sinal que é transmitido chega ao receptor totalmente por multipercurso, dessa forma o receptor receberá apenas cópias do sinal original, assim, há uma dificuldade em se interpretar qual sinal é o mais adequado para a obtenção dos dados. Há várias formas de evitar os efeitos do multipercurso, ou ainda, usar os vários sinais para melhorar a interpretação da informação, essa última técnica é uma das mais sofisticadas atualmente. Para o padrão 802.11ac é utilizado um intervalo de guarda para evitar uma interferência entre as várias cópias recebidas. Os vários sinais chegando por multipercurso são diferentes, basicamente, em fase e amplitude devido às distâncias percorridas serem diferentes. Um fator de fase complexo de N raios chegando devido a reflexão é dado da seguinte forma.

$$F = \sum_{n=1}^N E_n e^{j\theta_n} = Z_r + jZ_i, \quad \text{quando } N \rightarrow \infty$$

Equação 4: Fator de fase complexo

Se considerarmos apenas uma componente da Equação 4, E_n , podemos determinar o valor esperado, ou seja, a esperança de cada raio. Para isso, vamos escolher que a distribuição é uniforme.

$$E[E_n e^{j\theta_n}] = E[E_n]E[e^{j\theta_n}]$$

$$E[E_n e^{j\theta_n}] = E[E_n] \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{j\theta} d\theta$$

Equação 5: Média de uma componente multipercurso

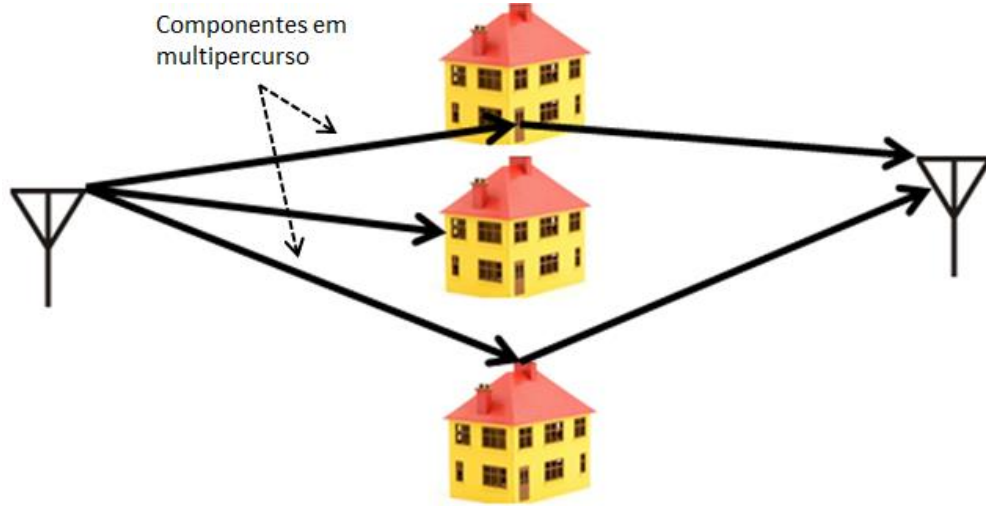


Figure 11 – Sinais em um canal Rayleigh

Temos que F é um fasor aleatório que representa o efeito multiplicativo das várias componentes multipercurso. E_n é a intensidade do campo de cada componente complexa e θ são suas respectivas fases. Pelo teorema central do limite sabe-se que as componentes reais e imaginárias do sinal tem distribuição gaussiana com média nula e com a amplitude do envoltório complexo dado por, $R = \sqrt{Z_r^2 + Z_i^2}$, teremos a função densidade de probabilidade da amplitude com segue,

$$f_R(r) = \frac{r}{\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{\sigma}\right)^2}$$

Equação 6

conhecida como *função de densidade de probabilidade de Rayleigh*, seu valor médio é dado por

$$E[R] = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}}$$

Equação 7

e o valor médio quadrático é dado por

$$E[R^2] = 2\sigma^2 = R_m r s^2$$

Equação 8

Com essas formulações podemos caracterizar um canal multipercurso sem visada baseado na média e no valor médio quadrático dos vários sinais [1].

2.3.3. Rice

Para um canal do tipo Rice, há vários sinais que chegam por multipercurso, no entanto, há também uma componente *especular*, que é um sinal que chega diretamente ao receptor, ou seja, em *linha de visada*.

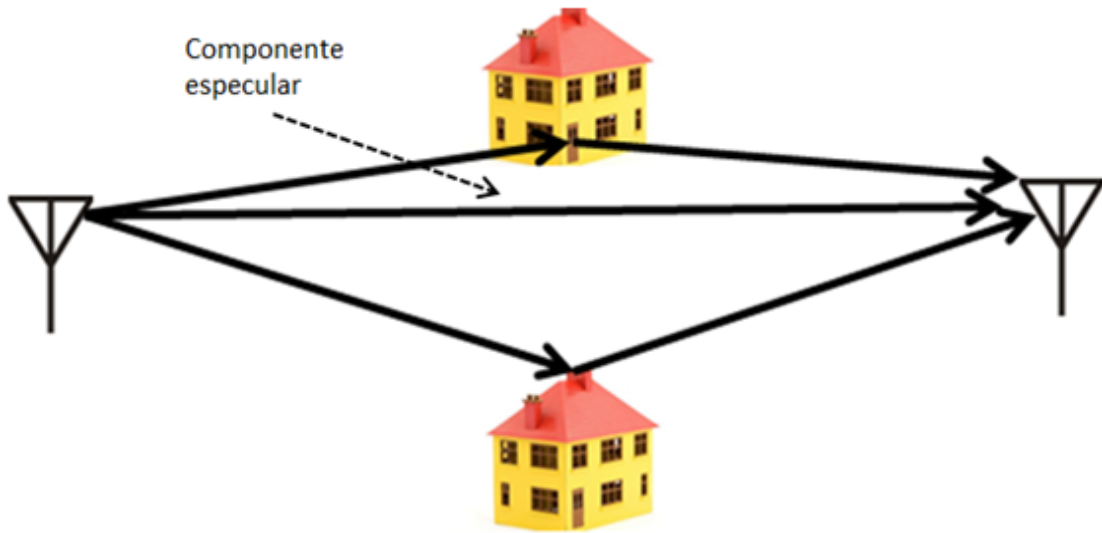


Figure 12 - Sinais em canal Riciano

Semelhantemente a análise feita para o canal do tipo Rayleigh, mas para o este temos um constante que é causada pela componente especular, assim o envoltório complexo é do tipo,

$$F = E_0 + \sum_{n=1}^N E_n e^{j\theta_n}$$

Equação 9

onde E_n é a componente especular citada. Há um fato importante na modelagem do canal *riciano*, ele é a razão entre a componente constante e os raios em multipercurso com segue chamado de *fator Riciano K*,

$$K = \frac{s^2}{\sum_{n=1}^N |E_n|^2}$$

Equação 10

O cálculo da função densidade de probabilidade rician é mais complexo que a de Rayleigh, e por isso é dado apenas o resultado,

$$f_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{1(r^2+s^2)}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{rs}{\sigma^2}\right)$$

Equação 11

Portanto, teremos assim uma modelagem bem interessante e com baixo custo, possibilitando a simulação e prevenção de alguns problemas futuros.

2.3.4. Modelos ITU-R

Com o intuito de modelar canais de sistemas de telecomunicações várias instituições se empenharam arduamente fazendo medições de campo. Como resultado disso, existem vários modelos de canais para dos mais variados tipos. Os parâmetros levantados por essas instituições ser de base para o projeto de desempenho de redes nos sistemas de telecomunicações [3].

Uma das instituições mais conhecidas e renomadas mundialmente é a ITU-R. Ela definiu alguns cenários para redes móveis IMT-2000 (*Internacional Mobile Telecommunication - 2000*). Os principais cenários de referências são:

- a. Interior de escritório;
- b. Exterior para interior de escritório;
- c. Pedestre;
- d. Veicular.

A partir desses cenários foram definidos quatro modelos de canais:

- a. ITU Pedestrian A Speed 3Km/h (PA3);
- b. ITU Pedestrian B Speed 3Km/h (PB3);
- c. ITU Vehicular A Speed 30Km/h (VA30);
- d. ITU Vehicular B Speed 120Km/h (VA120).

As velocidades mostradas nos modelos são necessárias para análise do Efeito Doppler, pois ele é responsável por deslocar a frequência do sinal em decorrência da velocidade do receptor em relação o transmissor. A equação mais geral que descreve o máximo deslocamento em frequência é

$$f_D = -\frac{f_0}{c} v \cos \psi$$

Equação 12

onde f_0 é a frequência central do sinal transmitido, ψ é o ângulo de chegada da onda e c é a velocidade da luz. Os modelos são definidos pelo perfil de atraso de potência (PDP) e tem as seguintes características,

Tabela 4 - Modelo PA3

Atraso de Caminho [us]	Atenuação de Caminho (dB)
0	0
110	-9,7
190	-19,2
410	-22,8

Tabela 5 - Modelo PB3

Atraso de Caminho [us]	Atenuação de Caminho (dB)
0	0
200	-0,9
800	-4,9
1200	-8,0
2300	-7,8
3700	-23,9

Tabela 6 - Modelo VA30 e VB120

Atraso de Caminho [us]	Atenuação de Caminho (dB)
0	0
310	-1,0
710	-9,0
1090	-10,0
1730	-15,0
2510	-20,0

2.4. OFDM

A técnica de transmissão OFDM é uma técnica de espalhamento espectral. Isso significa que ela usa toda a largura de banda do espectro que é fornecida, igual FHSS e DSSS. Erroneamente a OFDM é chamada

de técnica de modulação, por outro lado, ela admite que o sinal já esteja modulado com as modulações digitais QAM ou PSK. A técnica consiste em fatiar a faixa de frequência disponível em faixas menores múltiplas uma das outras e somar todas formando o sinal OFDM. Isso implica que o receptor deve ter uma sensibilidade em frequência maior e o sinal se torna mais sensível ao efeito multipercurso. Para resolver isso, é inserido prefixo cíclico no início do sinal, dessa forma, o tempo de símbolo TS será agora a soma do tempo útil TU do sinal com o tempo TG do intervalo de guarda [5]. A maior vantagem da OFDM é que ela fornece uma economia de aproximadamente 50% da largura de banda, ou seja, se em FHSS é utilizado 10MHz para transmitir 20Mbps, já em OFDM, é necessário apenas 5MHz para transmitir os mesmos 20Mbps.

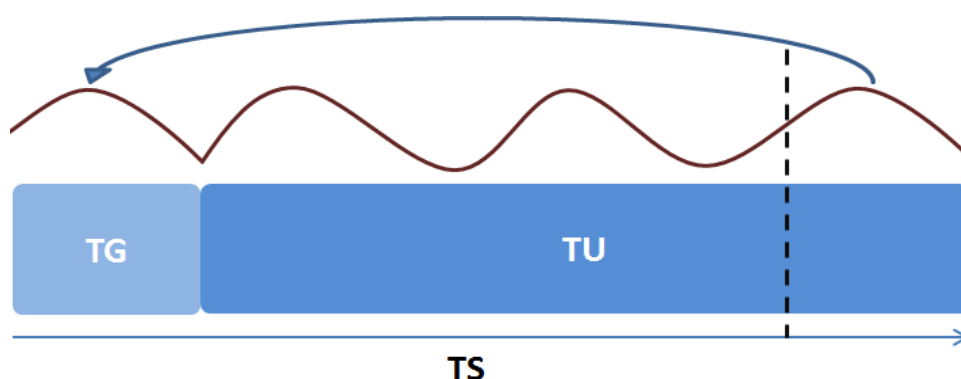


Figure 13 - Intervalo de Guarda para OFDM

De antemão, sabemos que o sinal é formado por duas componentes s_I em fase e s_Q em quadratura formando uma base canônica de um espaço. Isso sugere que podemos formar uma base complexa, como segue,

$$c = s_I + js_Q$$

Equação 13

onde cada componente real e imaginária é modulada como mostrado na figura 10.

A técnica OFDM foi proposta em 1968, e patenteada em 1970 pelos Estados Unidos [5]. No início, a implantação era dispendiosa pois com o aumento das subportadoras exigia uma maior quantidade de capacitores, tornando o projeto de alto custo. Com o desenvolvimento das técnicas de processamento de sinais digitais (DSP – Digital Signal Process) foi viabilizada a utilização da OFDM para altas quantidades de subportadoras possibilitando, assim, grandes taxas de transmissão.

2.4.1. Geração do Sinal OFDM

Portanto, para que seja gerado um sinal OFDM é necessário que cada informação esteja modulada e pronta para ser colocada em uma subportadora específica. Cada informação é modulada em série, em uma

frequência central do canal predeterminado e depois multiplexada para sua determinada subfaixa (subportadora) dentro da largura de banda do canal. Para que isso seja feito o sinal modulado na frequência central deve ser deslocada, isso sugere que podemos utilizar a propriedade da transformada de Fourier de deslocamento em frequência, assim

$$c_1 = ce^{2\pi f_1 t}$$

$$c_2 = ce^{2\pi f_2 t}$$

$$\vdots$$

$$c_n = ce^{2\pi f_n t}$$

Equação 14

depois cada componentes c_i é somada e o sinal fica da seguinte forma,

$$S_{ofdm} = \sum_{n=1}^N c_i e^{2\pi f_i t}$$

Equação 15

a equação acima mostra que o sinal OFDM é obtido fazendo uma transformada inversa de Fourier. Assim, percebe-se que para o processo de transmissão utilizando essa técnica será necessário utilizar o algoritmo de transformada de Fourier e, portanto, os algoritmos FFT e IFFT, pois eles são os mais rápidos algoritmos para tais fins. No entanto, tais algoritmos só trabalham com sinais com tamanho que podem ser do tipo 2^n . Por isso tudo, temos que a quantidade de subportadoras para o sinal OFDM nos padrão 802.11ac são 64, 128, 256 e 512.

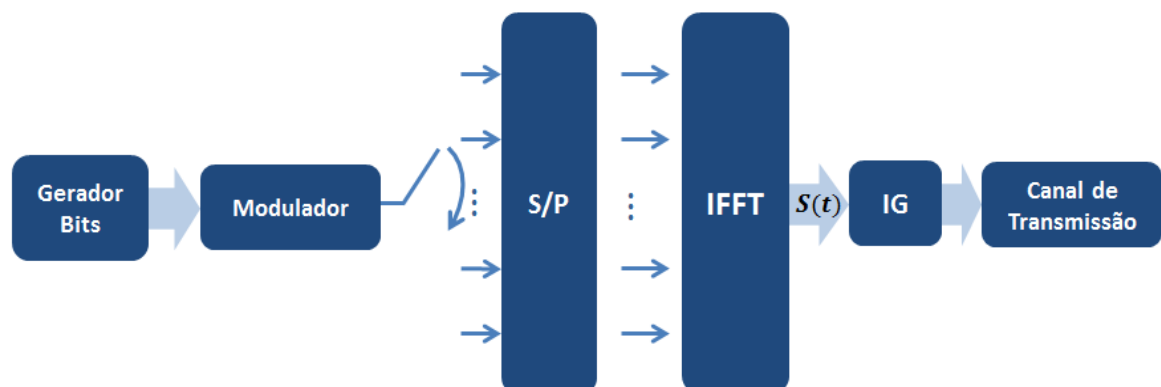


Figure 14 - Geração do sinal OFDM

2.5. CODIFICAÇÃO DE CANAL

Em 1948, Claude Shannon publicou um artigo que se tornou um clássico e anunciou os fundamentos matemáticos para comunicação. Nesse artigo ele definiu duas coisas que são de extrema importância para os sistemas de comunicações: a codificação eficiente de uma fonte de informação e a transmissão dessa informação por um canal ruidoso [1].

- Codificação eficiente de uma fonte de informação é, em termos básicos, criar código sem redundância ou retirar a redundância dos códigos já existentes. Essa área é conhecida como codificação de fonte.
- Na transmissão da informação por um canal ruidoso, a teoria de informação se importa em desenvolver códigos que sejam resistentes aos ruídos que se encontram no canal de transmissão, isso implica em adicionar informação redundante na palavra código. Essa área é conhecida como codificação de canal.

Então podemos considerar que existe uma dupla formada pela codificação de fonte e de canal, que executam tarefas inversas. A primeira tem como alvo reduzir a redundância da fonte para otimizar a utilização dos recursos da transmissão, como potência e largura de banda, e a segunda insere redundância no código vindo da fonte para obter um melhor desempenho sobre o canal de transmissão. Nesse trabalho iremos focar apenas na codificação de canal.

2.5.1. Quantidade de Informação e Entropia de uma Fonte

Antes de partirmos para a teoria de codificação de canal, deve-se ter um conhecimento prévio sobre teoria de informação, que é essencial para uma boa compreensão do assunto. Iniciaremos com um caso simples de uma fonte que emite símbolos sucessivos durante um intervalo de tempo, por exemplo, uma fonte binária que emitiu uma sequência com 100 bits durante 1 segundo. De forma mais geral, suponha um alfabeto finito fixo,

$$\Psi = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_{K-1}, \}$$

Equação 16

esse alfabeto tem variável aleatória S e probabilidade

$$P(S = s_k) = p_k, k = 1, 2, 3, \dots, k - 1$$

Equação 17

a probabilidade de todo o alfabeto (espaço amostral) é igual a 1 e cada símbolo é estatisticamente independente.

Podemos nos perguntar se é possível medir a quantidade de informação dessa fonte? Antes de termos a resposta dessa pergunta, deve-se definir o conceito de informação. Assim, o conceito de informação está relacionado com a quantidade de novidade que uma fonte de dados fornece, ou seja, a surpresa dado pelos dados emitidos pela fonte.

Considere que um evento da emissão de um símbolo $S = s_k$ tenha $p_k = 1$ e $p_i = 0$ para todo $i \neq k$, ou seja, a fonte sempre emitirá s_k e nunca s_i , então não há nenhuma surpresa, pois sabemos de antemão qual símbolo a fonte emitirá em qualquer momento. Entretanto, se os símbolos da fonte tiverem diferentes probabilidades com $p_k < 1$, teremos mais novidade, surpresa e, portanto, mais informação. Assim, podemos observar que a quantidade de informação está relacionada ao inverso da probabilidade de cada símbolo do alfabeto da fonte como segue,

$$I(s_k) \propto \frac{1}{p_k}$$

Equação 18

também vimos que para $p_k = 1$ a quantidade de informação é zero e, portanto, podemos definir a quantidade de informação da fonte da seguinte maneira

$$I(s_k) = \log_2 \left(\frac{1}{p_k} \right)$$

Equação 19

todos os detalhes e propriedades da Equação 19 estão em [4] capítulo 9.

Outro conceito importante para a compreensão desse assunto seguinte é o conceito de entropia de uma fonte. Ela é uma medida do conteúdo médio de informação por símbolo-fonte [4]. Assim temos que,

$$\begin{aligned} H(\Psi) &= E[I(s_k)] \\ &= \sum_{k=0}^{K-1} p_k I(s_k) \\ &= \sum_{k=0}^{K-1} p_k \log_2 \left(\frac{1}{p_k} \right) \end{aligned}$$

Equação 20

Agora temos em mãos duas ferramentas matemáticas para caracterizar as informações emitidas de uma fonte.

2.5.2. Teorema de Codificação de Canal

A transmissão de dados em um meio como caos, fibras ópticas, ar, água, etc. estão sempre sujeita a ruídos. Em um canal como o ar a probabilidade de erro na comunicação chega até 10^{-1} , ou seja, 1 em cada 10 bits são interpretados erroneamente.

O objetivo da codificação de canal é aumentar a resistência do sistema digital de transmissão aos ruídos encontrados no canal de transmissão, isso é feito inserindo símbolos redundantes de forma lógica na sequência vinda da fonte. Com a inserção de redundância no código, um novo código é gerado e esse é chamado de *código corretor de erro*. Um código corretor de erro é representado pelo tamanho da mensagem original k e o tamanho do código n gerado pelo codificador, assim, a taxa de codificação é definida como,

$$r = \frac{k}{n}$$

Equação 21

assim, quanto menor a taxa r maior é a eficiência de codificação do sistema.

Dessa forma pode-se ter a seguinte indagação: existe um esquema de codificação que possa diminuir a probabilidade de erro de um canal o tanto quanto se deseja? A resposta é categórica, sim. O segundo teorema de Shannon mostra isso em termos da capacidade do canal C . Imagine uma fonte com alfabeto Ψ e entropia $H(\Psi)$ e que a fonte emite símbolos uma vez a cada T_s segundos. Então a taxa de informação média da fonte é $\frac{H(\Psi)}{T_s}$ símbolos por segundo. Agora o canal tem a capacidade de C símbolos por utilização do canal e ele pode ser usado uma vez a cada T_c segundos. Então podemos dizer que a capacidade do canal por unidade de tempo é $\frac{C}{T_c}$ símbolos por segundo, assim, temos a capacidade máxima do canal dada por,

$$C_{max} = \frac{C}{T_c}$$

Equação 22

assim, a taxa de informação média da fonte deve seguir a seguinte restrição,

Equação 23

o termo $\frac{C}{T_c}$ é denominado taxa crítica e quando temos $\frac{H(\Psi)}{T_s} = \frac{C}{T_c}$ dizemos que o sistema está operando em taxa crítica. [Referência Simom Haykin]

Seguindo as condições impostas pelo segundo teorema de Shannon pode-se desenvolver códigos que diminua satisfatoriamente a taxa de erro de um canal de transmissão. Ainda podemos fazer duas observações sobre o segundo teorema de Shannon:

- O teorema nos mostra que existe bons códigos, no entanto, não diz nada sobre como construí-los.
- O teorema não fala sobre a probabilidade dos bits depois de serem codificados, apenas que ela tende a zero caso ainda satisfaça as condições da Equação 23.

2.5.3. SUBTÍTULO NÍVEL 3

Oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi
oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi.

2.5.3.1. SUBTÍTULO NÍVEL 4

Oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi
oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi.

2.5.3.1.1. SUBTÍTULO NÍVEL 5

Oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi
oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi.

Na Figura 1, oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi
oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi.

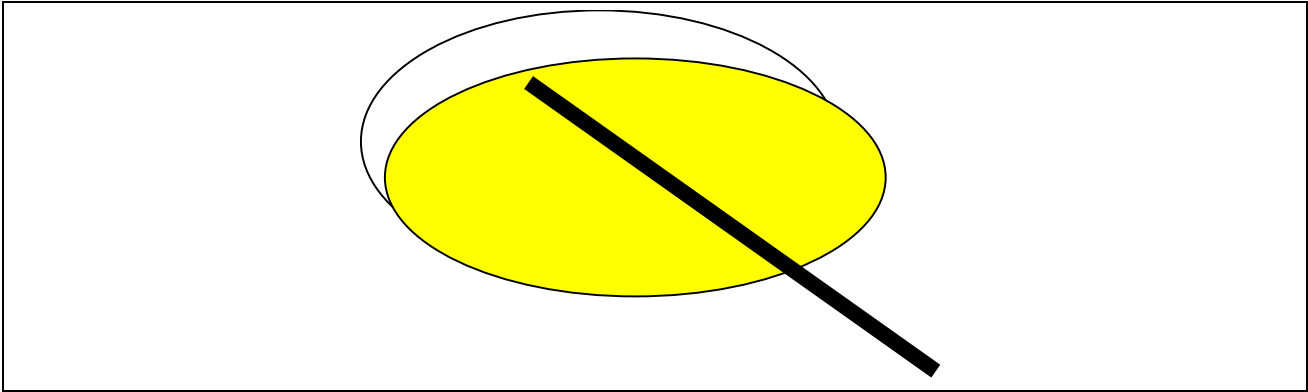


Figura 1. Legenda (caso não seja de autoria própria citar e referenciar [2])

Na Tabela 5, oi oioioio oioioio oioioi oioioioi oioioioio oioioioioio oioioioi oioioioioi oioioio oioio oioioi oioio oioioioi.

Tabela 5. Nome da tabela (caso não seja de autoria própria citar e referenciar)

Título da Coluna 1	Título da Coluna 2	Título da Coluna 3
Dado: Linha 1, Coluna 1	Dado: Linha 1, Coluna 2	Dado: Linha 1, Coluna 2
Dado: Linha 2, Coluna 1	Dado: Linha 2, Coluna 2	Dado: Linha 2, Coluna 2
Dado: Linha 3, Coluna 1	Dado: Linha 3, Coluna 2	Dado: Linha 3, Coluna 2

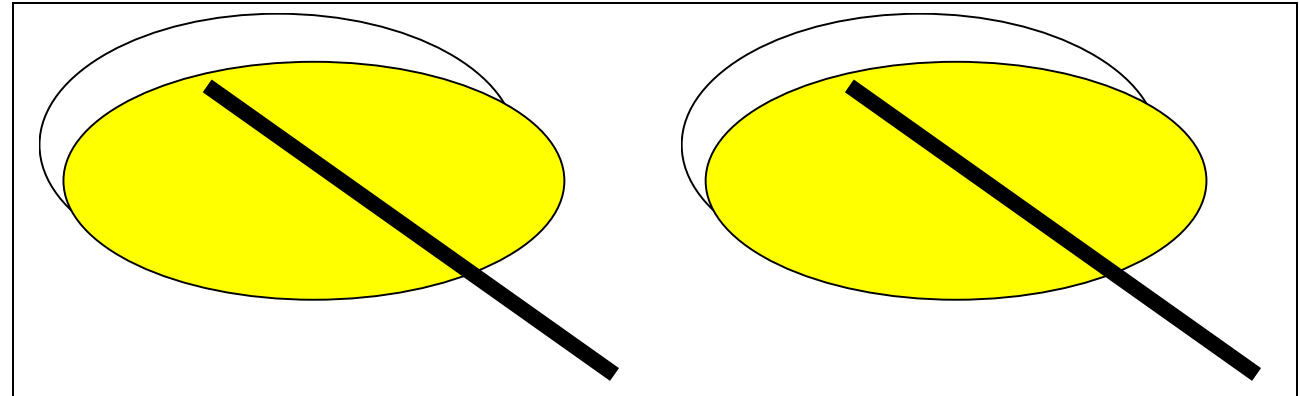
Na Tabela 6, oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi.

Tabela 6. Nome da tabela (caso não seja de autoria própria citar e referenciar)

Título da Coluna 1	Título da Coluna 2	Título da Coluna 3
Dado: Linha 1, Coluna 1	Dado: Linha 1, Coluna 2	Dado: Linha 1, Coluna 2
Dado: Linha 2, Coluna 1	Dado: Linha 2, Coluna 2	Dado: Linha 2, Coluna 2
Dado: Linha 3, Coluna 1	Dado: Linha 3, Coluna 2	Dado: Linha 3, Coluna 2

Na Figura 2, oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi.

Na Figura 3, oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oio.



(a)	(b)
-----	-----

Figura 2. Legenda (caso não seja de autoria própria citar e referenciar)

```
main:
lw $t0, 0($zero)
add $t1, $t0, $t0
sw $t1, 0($zero)
loop:
sub $s0, $t1, $t0
sub $s1, $t0, $t1
slt $t2, $s0, $s1
slt $t3, $s1, $s0
and $s2, $s0, $s1
or $s3, $s0, $s1
beq $t2, $zero, loop
```

Figura 3. Legenda (caso não seja de autoria própria citar e referenciar)

Na Equação 1, oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi.

$$A = B + C$$

Equação 1

[FIM DE SEÇÃO. Não remova esta quebra de seção]

4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi
oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi.

Oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi
oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi oioioi oioioioi.

[FIM DE SEÇÃO. Não remova esta quebra de seção]

- [FIM DE SEÇÃO. Não remova esta quebra de seção]

REFERÊNCIAS

- [1] HAYKIN, S.; MOHER, M. Sistemas Modernos de Comunicação Wireless. [S.l.]: Bookman, 2008.
- [2] HAYKIN, S.; MOHER, M. Introduction to Analog and Digital Communication. 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [3] NORONHA, T. B. Equalização Concorrente de Canal para Sistemas Monoportadora com Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência. Dissertação (Mestrado), 2012.
- [4] HAYKIN, S. Sistemas de Comunicação: *Analógicos e Digitais*. 4. ed. [S.l.: s.n.], 2004.
- [5] PINTO, E. L.; ALBUQUERQUE, C. P. d. A técnica de transmissão OFDM. 2002.
- [6] ROHDE&SCHWARZ. 802.11ac Technology Introduction. [S.l.], 2012.

[FIM DE SEÇÃO. Não remova esta quebra de seção]

APÊNDICE

Deverão ser incluídos, neste tópico, os elementos suplementares elaborados pelo(a) autor(a) da monografia, como organogramas, questionário de pesquisa, roteiro de entrevistas e outros que o acadêmico julgue importante para compreensão do estudo. O apêndice deve obrigatoriamente seguir as normas de formatação estabelecidas e suas abreviaturas, figuras e tabelas devem ser incluídas nas listas correspondentes. Os apêndices devem ser numerados em A, B, C, etc.

[FIM DE SEÇÃO. Não remova esta quebra de seção]

ANEXO

Deverão ser incluídos, neste tópico, os elementos suplementares **não elaborados** pelo(a) autor(a) da monografia, como leis, normas, esclarecimentos técnicos ou documentação, que o acadêmico julgue importante para compreensão do estudo, devendo ser citados no decorrer do trabalho. No anexo **não é obrigado** a seguir as normas de formatação estabelecidas e suas abreviaturas, figuras e tabelas **não devem ser** incluídas nas listas correspondentes. Os anexos devem ser numerados em I, II, III, etc.