

Nessa etapa você irá iniciar o contato com as expressões utilizadas na área de telecomunicações, ao mesmo tempo em que estará sendo preparado para as demais disciplinas a ela relacionadas.

Abordaremos os principais conceitos aplicados no estudo das telecomunicações, pois eles são de vital importância para a compreensão do princípio de funcionamento dos equipamentos usados nessa atividade profissional, entendimento da literatura técnica especializada, além dos próprios manuais dos equipamentos. Também devemos levar em conta que a grande maioria dos autores os tomam como pré-requisitos.

O objetivo dessa disciplina, portanto, é torná-lo apto a compreender a linguagem e as técnicas utilizadas, possibilitando assim um melhor aproveitamento na sequência dos estudos e a comunicação adequada com os profissionais da área.

Iniciaremos o curso com algumas definições sobre comunicações, necessárias ao entendimento do princípio de funcionamento dos equipamentos com os quais você terá contato em sua vida profissional. Depois, passaremos ao estudo da transmissão de sinais, analisando como esses mesmos equipamentos podem enviar e receber informações.

Posteriormente, desenvolveremos o estudo de relações entre potências, que é a forma como a intensidade dos sinais é medida, cujo conhecimento é de suma importância para a prática profissional. E, para finalizar, analisaremos as representações dos sinais utilizados em telecomunicações, levando o aluno a uma percepção gráfica dos tipos de sinais que são utilizados nos sistemas de comunicação, além das representações usadas para descrição de suas características.

Conceitos elementares

Iniciação às telecomunicações

Todo profissional das telecomunicações deve conhecer uma série de conceitos básicos de maneira firme e exata. É a demonstração do conhecimento destes conceitos que faz com que sua competência seja reconhecida pelos profissionais do setor e daqueles que necessitam dos seus serviços. Assim, iniciamos nosso estudo justamente com a abordagem de alguns conceitos básicos das telecomunicações, como, por exemplo, os relativos à conceituação de transmissores, receptores, informação e, principalmente, um estudo das ondas eletromagnéticas, tão amplamente utilizadas nas telecomunicações.

Em síntese, nesse capítulo você irá familiarizar-se com as nomenclaturas específicas da área de telecomunicações, saber de que modo funcionam os equipamentos que devem enviar e receber informações – os emissores e receptores, e compreender o uso e as principais características das ondas eletromagnéticas.

1.1. Emissores/Receptores/Informação

A finalidade das comunicações é transmitir uma informação de um lugar para outro, ou seja, a partir de uma fonte-origem, que chamamos de **emissor**, até um destino, que chamamos de **receptor**, utilizando alguma forma ou meio para a realização dessa tarefa.

Assim, um sistema de comunicações básico é formado por um emissor, um receptor e um meio para levar a informação de um até o outro, ou seja, um meio de transmissão.

Levando em conta as diferentes possibilidades de combinar esses três elementos, podemos citar alguns exemplos.

Na figura 1.1 ilustramos uma pessoa falando para outra.

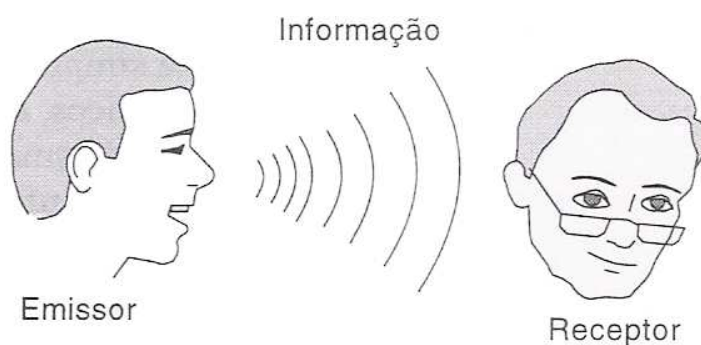


Figura 1.1 – Comunicação entre duas pessoas.

Nesse caso, a informação é enviada através da voz e o meio de transmissão são as ondas mecânicas que transmitem o som pelo ar. Essas ondas mecânicas necessitam de meios físicos para se propagarem e atingirem o receptor, sejam estes meios sólidos, líquidos ou gasosos. Uma prova disso é que não se pode conversar no vácuo (espaço), pois não existe meio (ar) para que a onda sonora se propague.

Outro exemplo que pode ser tomado é quando enviamos uma carta a alguém. O meio de transmissão será a escrita em papel.

Então, podemos genericamente representar qualquer sistema de comunicações da forma mostrada na figura 1.2.

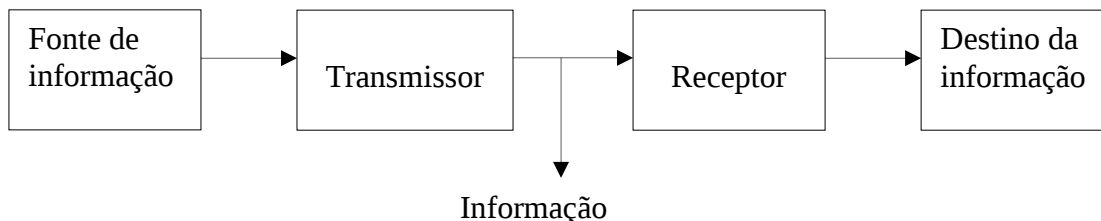


Figura 1.2 – Representação de um sistema de comunicação unidirecional.

Observe que no exemplo da figura 1.2 a informação viaja apenas em um sentido, ou seja, vai sempre do transmissor para o receptor. Um exemplo disso seria a comunicação de rádio e TV convencionais, onde temos as estações transmissoras e os telespectadores com seus receptores, e a informação sempre trafega no sentido das emissoras para os espectadores.

Podemos imaginar também em um sistema bilateral, onde cada lado possui um transmissor e um receptor (transmissor + receptor = transceptor). Com isso, teríamos um sistema de comunicação como mostrado na figura 1.3.

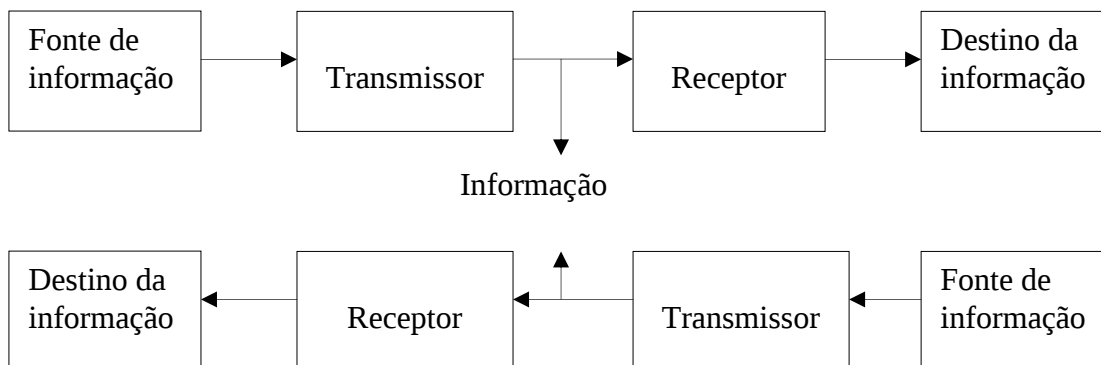


Figura 1.3 – Representação de uma comunicação bidirecional.

O exemplo da figura 1.1 se enquadra nesse caso mostrado na figura 1.3. Ambas as pessoas possuem fonte de informação (fala, linguagem) e um destino (cérebro, compreensão da fala). Possuem também transmissor (boca) e receptor (ouvido). Nesse caso, irão existir momentos em que uma pessoa transmite e a outra recebe, e momentos em que as funções se invertem, quando a outra pessoa transmite e a primeira recebe.

Pode-se imaginar o caso em que as duas pessoas falam ao mesmo tempo. Embora isso seja fisicamente possível, uma comunicação entre pessoas dessa forma (as duas falando ao mesmo tempo), ela não é nada prática, pois as pessoas não irão se entender.

Dentro desse contexto, em telecomunicações podemos definir três tipos de comunicação envolvendo receptores, transmissores e obviamente um meio: A comunicação **simplex**, a comunicação **half-duplex** e a comunicação **full-duplex**.

Uma comunicação é dita **simplex** quando permite comunicação apenas em um único sentido, tendo em uma extremidade um dispositivo apenas transmissor (*transmitter*) e do outro um dispositivo apenas receptor (*receiver*). Não há possibilidade do dispositivo receptor enviar informação de volta para o transmissor. Transmissões de rádio e televisão são exemplos de transmissão **simplex**, como dito anteriormente.

Uma comunicação é dita **half-duplex** (também chamada **semi-duplex**) quando existem em ambas as extremidades dispositivos que podem transmitir e receber informação, porém não ao mesmo tempo. Durante uma transmissão **half-duplex**, em determinado instante um dispositivo A será transmissor e o outro B será receptor, em outro momento os papéis podem se inverter, como no caso das duas pessoas conversando.

Uma transmissão é dita **full-duplex** (também chamada apenas duplex) quando dados podem ser transmitidos e recebidos simultaneamente em ambos os sentidos. Poderíamos entender uma linha **full-duplex** como funcionalmente equivalente a duas linhas simplex, uma em cada direção.

A figura 1.4 resume os três tipos de comunicações que acabamos de estudar. Note novamente que numa linha **simplex**, de um lado existe apenas o transmissor, e do outro apenas o receptor, ao contrário da comunicação **half-duplex** e **full-duplex** que possuem ambos (transceptores) em cada lado.

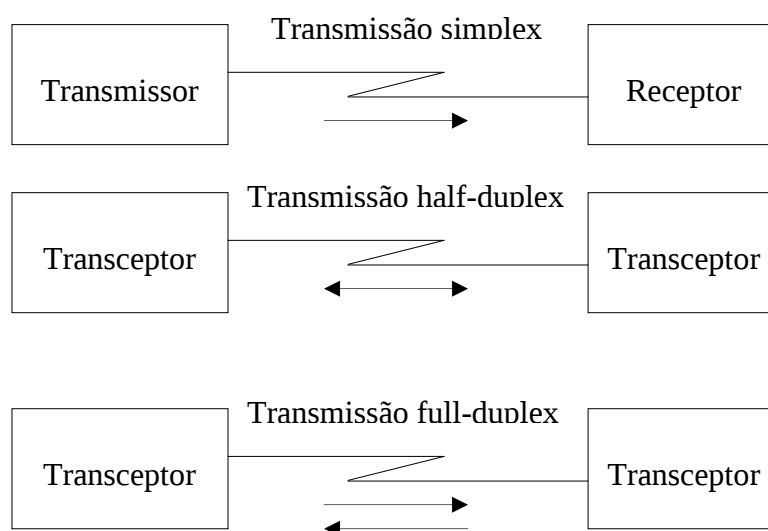


Figura 1.4 – Classificação dos tipos de comunicação.

Um exemplo de transmissão **half-duplex** seria dois seguranças em um *shopping* conversando em rádios portáteis conhecidos tecnicamente como HTs (do inglês *handle transmitter*, ou transmissor de mão) e conhecidos popularmente como *walkie-talk*. Os seguranças não podem falar ao mesmo tempo, pois um não ouvirá o outro. Isso deve-se ao fato de que quando o rádio (transceptor) está transmitindo o receptor é desligado. Quando a transmissão se encerra, o rádio passa a somente receber. Em outras palavras, os seguranças só podem transmitir ou receber, nunca os dois ao mesmo tempo. Isso caracteriza, como vimos antes, a transmissão **half-duplex**.

Um exemplo bastante comum hoje em dia da comunicação **full-duplex** é aquela realizada entre dois computadores. Para maior agilidade entre a troca de informações realizada pelos dois computadores, eles podem transmitir e receber ao mesmo tempo.

Diferentemente do exemplo passado dos seguranças, que podiam ou somente transmitir, ou somente receber.

De uma forma simples, para entendermos melhor como funcionam os sistemas básicos, continuaremos com o estudo dos princípios que envolvem um entendimento sólido nos princípios de telecomunicações. Para facilitar a compreensão, utilizaremos alguns exemplos de sistemas *simplex*, embora esses sistemas também possam ser imaginados como sendo *half-duplex* ou *full-duplex*.

Com o andar do curso, esses conceitos irão se consolidando. Sempre que pensar em um sistema que se comunica com outro, se pergunte como ele opera. *Simplex*? *Half-duplex*? *Full-duplex*?

Faremos agora alguns exercícios, e em seguida daremos continuidade com um estudo sobre as propriedades básicas das ondas sonoras (acústica) e das ondas eletromagnéticas.

Exercícios

1 – Escreva o que você entende sobre o significado da palavra telecomunicação. (Sugestão: Pesquise no Google ou em um dicionário)

2 – Quais os elementos básicos necessários para que ocorra uma comunicação? Desenhe o esquema em blocos dessa comunicação mostrando esses elementos

3 – Quais os elementos constituintes e como funciona uma comunicação *simplex*? Cite dois exemplos e desenhe o esquema em blocos desse tipo de comunicação.

4 – Quais os elementos constituintes e como funciona uma comunicação *half-duplex*? Cite pelo menos um exemplo e desenhe o esquema em blocos desse tipo de comunicação.

5 – Quais os elementos constituintes e como funciona uma comunicação *full-duplex* ? Cite pelo menos um exemplo e desenhe o esquema em blocos desse tipo de comunicação.

6 – O que é um transceptor?

7 – Relacione de acordo com o tipo de comunicação realizada:

- 1 – Existe um transceptor de cada lado, mas eles somente podem transmitir ou receber, nunca os dois simultaneamente.
- 2 – Existe de um lado um receptor e do outro lado um transmissor.
- 3 – Existe um transceptor de cada lado, e eles podem transmitir e receber ao mesmo tempo.

- () *Full duplex*
 - () *Simplex*
 - () *Half-duplex*
-
-

1.2. Ondas eletromagnéticas

O sistema que tomamos como exemplo no item anterior, em que uma pessoa fala para outra, usa ondas sonoras, ou seja, ondas mecânicas que necessitam de um meio material para se propagar (o ar). No entanto, a tecnologia moderna possibilita o envio de informações, incluindo a voz, através de outros tipos de ondas. Uma delas é justamente a representada pelas ondas eletromagnéticas, que possuem uma faixa de frequências que nos permite defini-las como ondas de rádio.

Isso nos leva a um sistema de comunicações que faz uso dessas ondas para transmitir a voz, ou seja, um sistema de rádio.

Através de recursos técnicos é possível captar a voz de uma pessoa e fazer com que a informação que ela contém, seja transmitida através de ondas eletromagnéticas até um receptor remoto, onde essa informação é recuperada e novamente convertida em voz.

As características das ondas eletromagnéticas permitem que a informação possa ser levada a grandes distâncias com grande eficiência e sem a necessidade de um meio físico, ou seja, elas podem se propagar no vácuo.

Quando usamos a voz para nos comunicar com outra pessoa, o som que é emitido pelo nosso aparelho vocal é captado pelo aparelho auditivo da outra pessoa. Nossa boca funciona como uma espécie de órgão capaz de transferir as vibrações para o ar, e, o ouvido, com sua forma de concha, capta essas ondas dirigindo-as para os elementos que podem recebê-las e processá-las (cérebro).

No caso das ondas eletromagnéticas, também precisamos de elementos equivalentes para transferir a informação para o espaço, criando as ondas que transportam a informação. Para captar essas ondas, e extrair a informação, deve existir um dispositivo semelhante ao ouvido (receptor) que transfere a informação para quem pode processá-la.

Assim, para que seja possível a transmissão usando ondas eletromagnéticas, temos que incluir antenas em nosso sistema de comunicações, tanto no emissor como no receptor. A figura 1.5 mostra um exemplo de radiocomunicação.

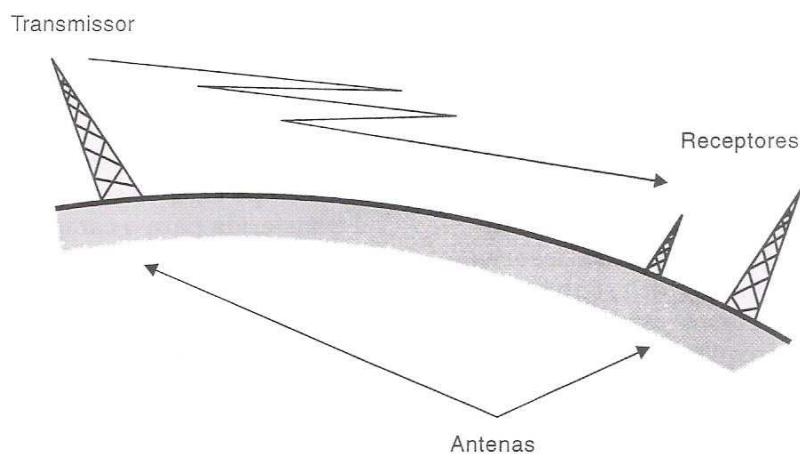


Figura 1.5 – Comunicação via radiofrequência.

A função da **antena transmissora** no sistema é converter sinais elétricos vindos do rádio em ondas eletromagnéticas, enquanto a função da **antena receptora** é transformar as ondas eletromagnéticas captadas em sinais elétricos (tensão ou corrente).

Em eletrônica o termo **transdutor** é dado ao dispositivo capaz de converter um tipo de energia em outra, ou ainda traduzir um tipo de grandeza para outro tipo. Exemplos clássicos de transdutores são os microfones e os auto-falantes. Os microfones convertem energia sonora em um sinal elétrico análogo (idêntico eletricamente). De forma semelhante, o auto-falante converte um sinal elétrico em uma onda sonora análoga.

Dessa maneira, temos que uma antena é um transdutor que converte sinais elétricos em eletromagnéticos e vice-versa.

Voltando para os sistemas de rádio, um transmissor tem uma função muito importante, que é a de preparar o sinal sonoro ou outro tipo de informação para ser transmitido através das ondas eletromagnéticas. Essa operação recebe o nome de **modulação**. Mais adiante, falaremos melhor sobre as técnicas de modulação. Por hora, entenda que a modulação é o processo pelo qual uma informação (voz ou dados) é embutida em uma onda eletromagnética.

A função do receptor é **demodular** o sinal, ou seja, extrair a informação da onda eletromagnética e transformá-la novamente na forma original do sinal transmitido, com a máxima fidelidade possível.

É importante observar que o tipo de modulação que o transmissor usará dependerá do tipo de informação que se deseja transmitir. Estudaremos mais adiante as técnicas de modulação mais utilizadas para transporte de voz, que são o AM e o FM. Quando a informação a ser transmitida se trata de dados, outros tipos de modulação são utilizadas, como veremos ao longo do curso.

Vale a pena também saber que esta transmissão de sinais através de ondas eletromagnéticas recebe o nome de transmissão por **radiofrequência** ou ainda, **RF**.

Observe que, em geral, quando um transmissor produz seus sinais, ele se propaga em diversas direções que dependem da antena usada, e diversos receptores podem captá-los ao mesmo tempo.

Uma outra característica importante das ondas é que elas podem se cruzar ou estar presentes ao mesmo tempo no espaço, sem que uma interfira na outra.

A condição para que as ondas transmitidas por uma não interfiram nas ondas emitidas por outra é que transmissores trabalhem em frequências diferentes e os receptores tenham recursos para separar as ondas das diversas frequências, conforme a estação que se deseja captar. É o caso das estações de rádio AM e FM comerciais. Diversas estações podem está transmitindo, ao mesmo tempo, num mesmo local, e diversos receptores captando, cada um deles uma estação, sem que isso dê origem a qualquer problema.

Para entender exatamente como funciona um sistema de comunicações que use ondas eletromagnéticas, devemos começar por estudar a própria natureza dessas ondas.

Imaginemos uma estação de rádio transmitido em uma determinada frequência, como mostra a figura 1.6.

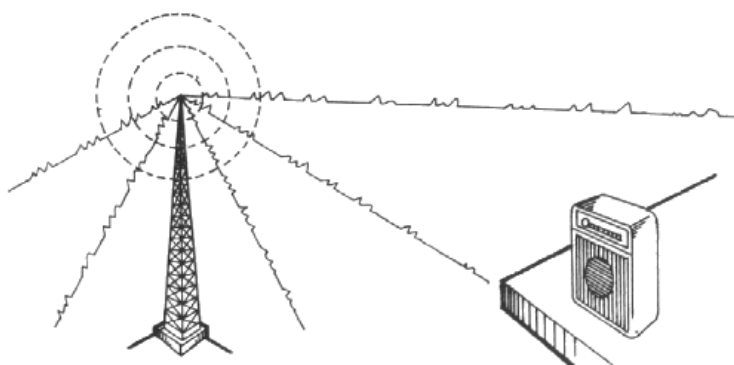


Figura 1.6 – Estação transmissora e receptora.

Nas extremidades da antena transmissora existe uma linha de transmissão (fio ou cabo coaxial) que liga os dois elementos dessa antena ao aparelho transmissor. A figura 1.7 mostra a antena ligada ao rádio, que aqui chamamos de **fonte** ou **gerador**.

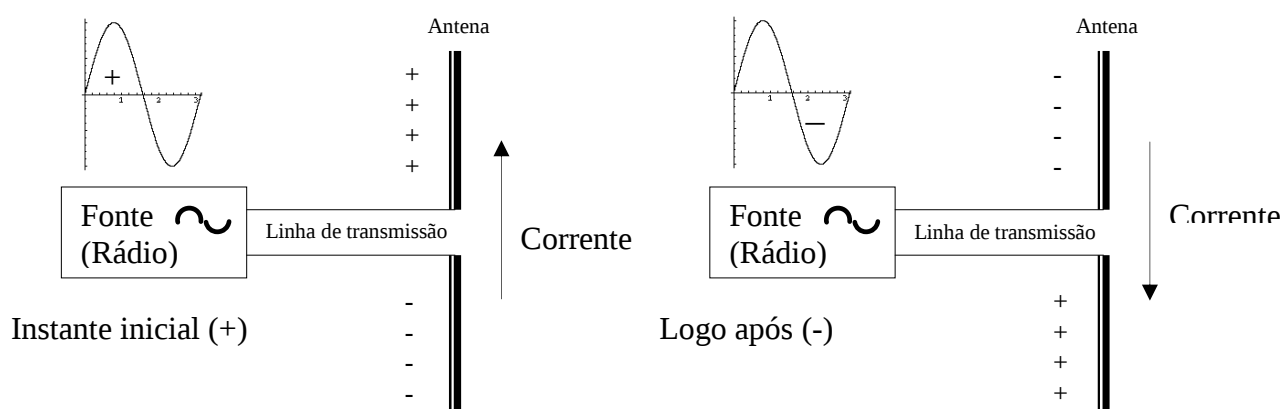


Figura 1.7 – Geração de uma onda eletromagnética.

Como mostra a figura 1.7, todo rádio possui em sua saída uma tensão alternada. Isso é, a corrente muda de sentido periodicamente de acordo com a frequência que o transmissor gera.

O pré-requisito básico para que uma onda eletromagnética seja gerada é que o sinal fornecido pelo gerador (rádio) seja alterado. Se o sinal for puramente contínuo (DC), não é possível gerar uma onda eletromagnética.

Quando essa tensão alternada alcança a antena, existirá então um campo elétrico alternado na antena, que por sua vez dá origem a um campo magnético, que por sua vez gera outro campo elétrico variável e o processo se repete sucessivamente.

Essa sucessão de campos elétricos e magnéticos dá origem a uma onda eletromagnética que se propaga no vácuo à velocidade da luz (300.000 km/s).

Não existe sentido em se falar de “onda elétrica” ou “onda magnética”. Uma onda de rádio possui tanto a componente elétrica quanto a componente magnética que se encontram perpendiculares entre si, dando origem a uma **onda eletromagnética..**

A figura 1.8 mostra o aspecto de uma onda eletromagnética sendo gerada

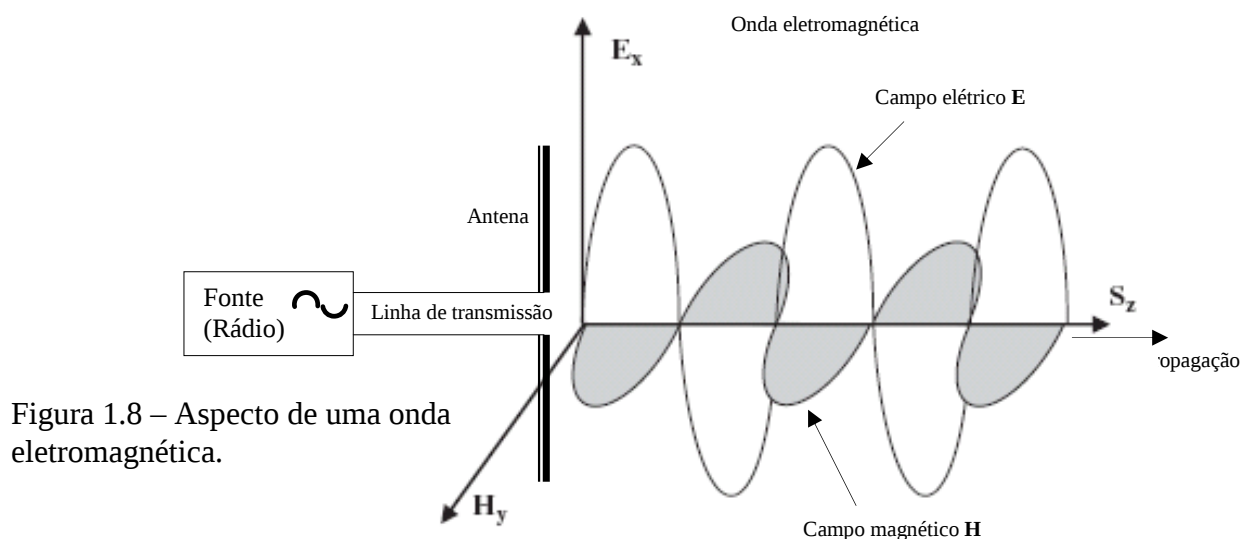


Figura 1.8 – Aspecto de uma onda eletromagnética.

Na figura 1.8 é importante observar a existência dos dois campos já citados: O campo magnético, representado pela letra **H**, e o campo elétrico representado pela letra **E**, de forma que eles se encontram em dois planos distintos 90° um do outro (perpendiculares). A onda se propaga na direção **S** na velocidade da luz ou bem próximo disso, como dito anteriormente.

É de fundamental importância o conhecimento do aspecto de uma onda eletromagnética por parte do profissional de telecomunicações. O campo elétrico **E** é o mais importante, pois, é quem transporta consigo a informação que desejamos transmitir via rádio. Além do mais, o sentido do campo elétrico indica a **polarização** da onda, outra característica importante.

A informação que uma onda eletromagnética carrega está contida no campo elétrico **E** dessa onda. No exemplo da figura 8 temos que o campo elétrico **E** se encontra no plano vertical. Com isso, dizemos que essa onda eletromagnética está polarizada **verticalmente**.

Se agente girasse 90° a figura 1.8, e deixássemos o campo elétrico **E** no plano horizontal, diríamos que essa onda fora polarizada **horizontalmente**.

Aprenderemos mais sobre como as ondas se propagam no espaço um pouco adiante na disciplina de **Propagação**. Por hora, basta saber que o campo elétrico **E** é quem transporta a energia necessária para que a antena receptora capte os sinais. E que a orientação do campo elétrico **E** é quem define a polarização da antena, que pode basicamente ser **vertical** ou **horizontal**, embora existam outras.

Obviamente, não é possível para o ser humano visualizar a formação dos campos eletromagnéticos de uma onda de rádio. Entretanto, para que o profissional de telecomunicações tenha noção da intensidade desses campos, existem diversos aparelhos que o auxiliarão. Um deles é o **medidor de campo**, ou **medidor de intensidade de campo**.

Um medidor de intensidade de campo é o aparelho que tem a capacidade de medir a força dos campos elétricos em uma onda eletromagnética. Diversos são os modelos e fabricantes desses aparelhos. O preço desse tipo de equipamento varia de acordo com aplicação (a que se destina) e com a frequência. Quanto maior a frequência que o medidor consegue trabalhar, maior é seu custo.

A figura 1.9 mostra um medidor de intensidade de campo do fabricante *Rhode & Schwarz*, que além disso tem outras funções.



Figura 1.9 – Medidor de potência de sinais de radiofrequência.

As ondas eletromagnéticas possuem características que devem ser conhecidas não só pelos profissionais das telecomunicações, como por qualquer profissional que trabalhe com eletrônica. Uma das propriedades nós já vimos, que foi a polarização.

Faremos alguns exercícios, e em seguida, daremos continuidade com o estudo das propriedades das ondas eletromagnéticas.

Exercícios

8 – Diferencie uma onda mecânica (sonora) de uma onda eletromagnética.

9 – Qual a função das antenas transmissoras e das antenas receptoras?

10 – O que é um transdutor? Cite três exemplos.

11 – Qual a função de um transmissor em um sistema de comunicação via RF?

12 – Quais as condições para que um sinal de rádio não interfira em outro?

13 – Qual o pré-requisito básico para que uma onda eletromagnética seja gerada?

14 – Existe sentido em falar-se em “onda elétrica” ou “onda magnética” no estudo de transmissão via rádio? Justifique.

15 – Qual a importância do campo elétrico em uma onda eletromagnética?

16 – O que é polarização?

17 – O que é um medidor de intensidade de campo? Como ele auxilia o profissional de telecomunicações?

1.3. Características das ondas eletromagnéticas.

Como dito anteriormente, o profissional deve ter em mente algumas propriedades importantes das ondas eletromagnéticas. Veremos aqui mais algumas dessas propriedades, embora nós as estudemos mais a fundo na disciplina Propagação e Antenas.

1.3.1. Frequência e período.

Associamos à quantidade de ondas que é produzida em cada segundo um valor que denominamos **frequência** e que é medido em Hertz (Hz). Hertz pode ser entendido também como sendo **ciclos por segundo**.

Em outras palavras, significa dizer que uma onda tem 1 Hz se ele completar um ciclo de oscilação em um segundo. Se uma onda completa 2 ciclos em 1 segundo, sua

freqüência vale 2 Hz. Se uma onda completa 1000 ciclos em um intervalo de tempo de 1 segundo, ela possui 1000 Hz ou 1 kHz.

A figura 1.10 mostra uma onda, que é também chamada de senóide. A figura ilustra as principais características de uma onda, que pode ser sonora ou eletromagnética.

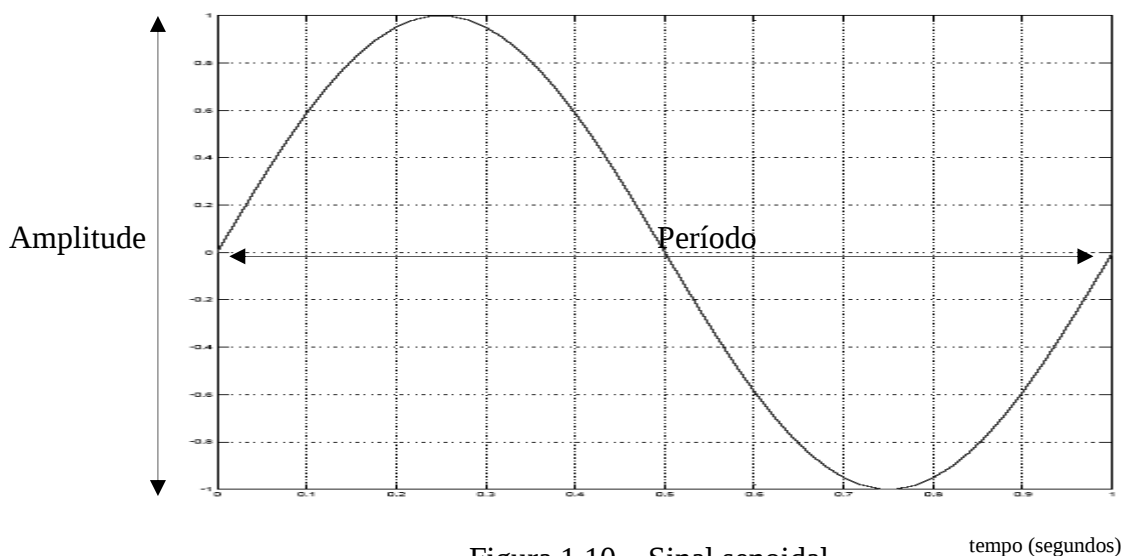


Figura 1.10 – Sinal senoidal.

O período de uma onda é o tempo que ela leva para completar um ciclo. Portanto, o período é o inverso da freqüência, e se relacionam matematicamente por:

$$f = \frac{1}{T} \text{ (Hz)} \quad (1-1)$$

Com isso, se imaginarmos na figura 1.10 como sendo o período de 1 segundo, essa onda terá 1 Hz. Ou seja, 1 ciclo por segundo.

Para expressar freqüências muito altas, como as usadas em telecomunicações, é comum empregarmos múltiplos do Hertz, como:

- Quilohertz (kHz) = 1.000 Hz
- Megahertz (MHz) = 1.000.000 Hz
- Gigahertz (GHz) = 1.000.000.000 Hz

O inverso da freqüência, ou seja, o tempo que demora para que um ciclo inteiro da oscilação seja completado é o **período**, como dissemos anteriormente.

A unidade usada para expressar o período é o segundo (s), mas, para tempos muito curtos, como os encontrados nas freqüências elevadas, usamos seus submúltiplos:

- Milissegundo (ms) = 0,001 s
- Microsegundo (μs) = 0,000.001 s
- Nanossegundo (ns) = 0,000.000.001 s

1.3.2. Comprimento de onda.

Tão logo uma perturbação ou onda eletromagnética comece a ser produzida pela antena, já tem início sua propagação pelo espaço. Assim, quando a oscilação completa um ciclo, já terá percorrido uma certa distância, que denominamos **comprimento de onda** e representamos pela letra grega λ . A figura 1.11 mostra o que acontece.

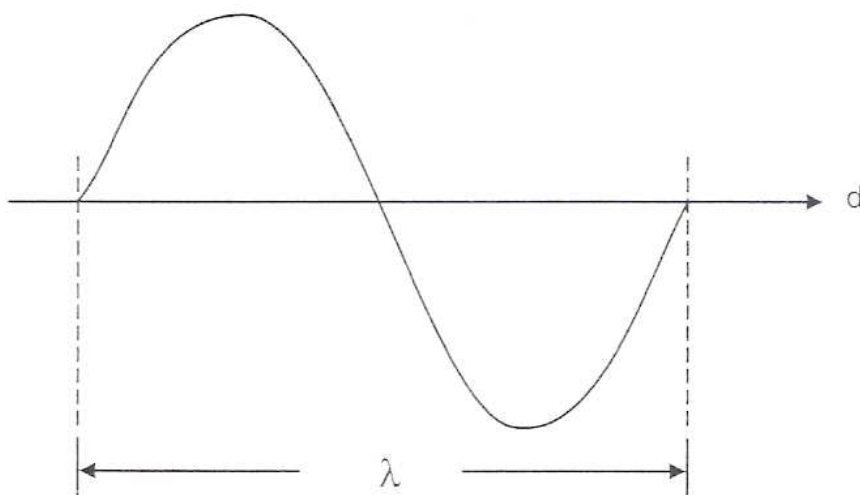


Figura 1.11 – Representação do comprimento de onda em uma senóide.

O comprimento de onda de uma onda qualquer é função de sua frequência e velocidade de propagação, podendo ser calculado através da seguinte fórmula:

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ (metros)} \quad (1-2)$$

Onde:

c é a velocidade da luz no vácuo ($3 \cdot 10^8 \text{ m / s}$)

f é a frequência do sinal emitido

Observe que, sendo a velocidade da luz dada em metros por segundo e a frequência dada em Hertz, o comprimento de onda é sempre dado em metros. Observe também, que quanto maior a frequência, menor será o comprimento de onda.

Exemplos

1 – Qual a frequência de uma onda cujo período é de 0.5 segundos?

Resposta:

$$f = \frac{1}{T}$$

$$f = \frac{1}{0.5}$$

$$f = 2 \text{ Hz}$$

2 – Em um intervalo de tempo de 1 segundo foram analisados duas ondas em um osciloscópio. Uma onda realizou 100 ciclos nesse intervalo, enquanto a outra realizou apenas 10. Qual a frequência dos dois sinais?

Resposta:

Como frequência é definida com o número de ciclos realizados em um intervalo de 1 segundo, a primeira onda possui 100 Hz enquanto que a segunda possui 10 Hz.

3 – Qual o período de uma onda senoidal de 60 Hz ?

Resposta:

$$f = \frac{1}{T}$$

$$60 = \frac{1}{T}$$

$$T = 0,016667 \text{ segundos}$$

Ou ainda 16,667 milissegundos.

4 – Qual o período de uma onda senoidal de 2.4 GHz

Resposta:

$$f = \frac{1}{T}$$

$$2.4 \cdot 10^9 = \frac{1}{T}$$

$$T = 4,1667 \cdot 10^{-10} \text{ segundos}$$

Ou ainda 0,41667 nanosegundos.

5 – Qual o comprimento de onda de um sinal de 100 MHz (100.000.000 Hz) ? Calcule também o período desse sinal.

Resposta:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{10^8}$$

$$\lambda = 3 \text{ metros}$$

Calculando o período:

$$f = \frac{1}{T}$$

$$10^8 = \frac{1}{T}$$

$$T = 10^{-8} \text{ segundos}$$

Ou ainda, 10 nanossegundos.

6 – Qual o comprimento de onda gerado na antena da rádio Cabugi AM 640 kHz ?

Resposta:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{640 \cdot 10^3}$$

$$\lambda = 468,75 \text{ metros}$$

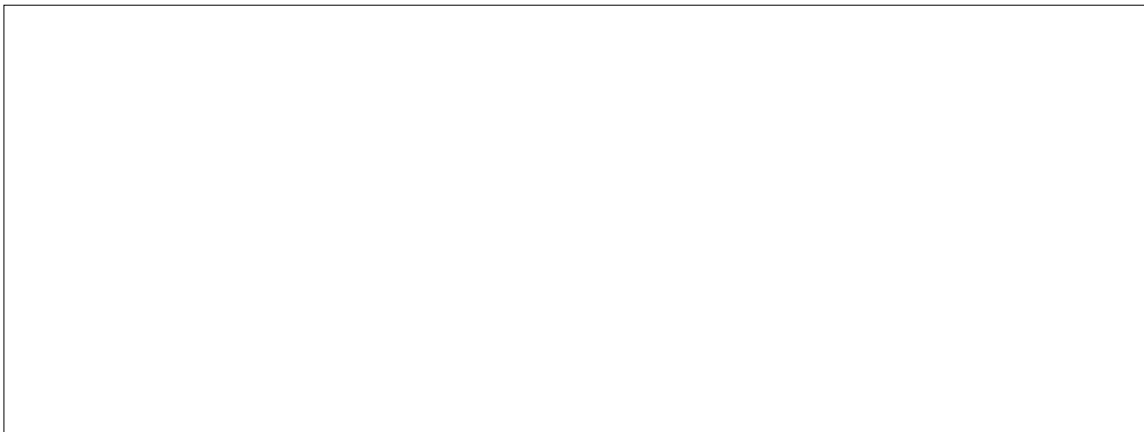
Exercícios

18 – Defina frequência e período

19 – Calcule a frequência para os vários períodos abaixo:

a) 0,001 s b) 0,5 s c) 1 s d) 0,000005 s

20 – Calcule o comprimento de onda para as frequências encontradas no problema anterior.



1.4. Propriedade das ondas eletromagnéticas.

Quando uma onda eletromagnética se propaga, o seu comportamento é determinado por uma série de propriedades que os profissionais das telecomunicações devem conhecer. Elas influenciam no modo como essas ondas se propagam num determinado meio e dependem de fatores como: **a natureza do meio e a frequência dessa onda.**

1.4.1. Direção e velocidade.

As ondas eletromagnéticas se propagam em linha reta e no vácuo, com uma velocidade de aproximadamente 300.000 quilômetros por segundo ou 300.000.000 metros por segundo. Nos meios materiais mais densos, a velocidade é um pouco menor, mas, para efeito de cálculos, principalmente relacionados às telecomunicações, adota-se esse valor.

1.4.2. Reflexão.

Quando uma onda eletromagnética incide numa superfície condutora, pode ocorrer sua reflexão. O sinal refletido não tem a mesma intensidade do sinal incidente, pois sempre ocorrem absorções de energia que dependem justamente da natureza do material onde ele se reflete.

Uma propriedade importante associada à reflexão é que, quando uma onda eletromagnética incide em uma superfície plana, o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão.

Esses ângulos (de incidência e de reflexão) normalmente são tomados em relação a uma reta perpendicular à superfície (90°) onde a onda reflete, denominada de **retal normal**. A figura 1.12 mostra o fenômeno da reflexão de uma onda eletromagnética.

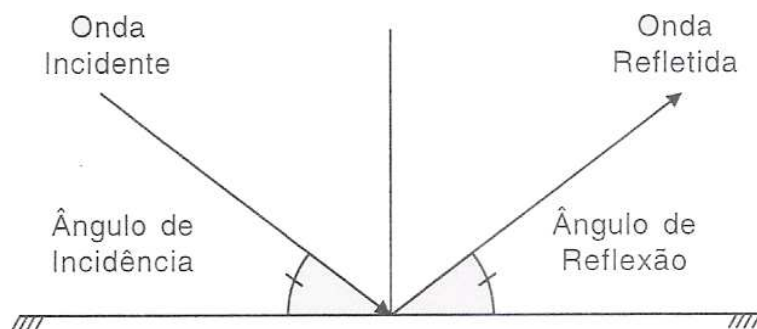


Figura 1.12 – Fenômeno da reflexão.

Em torno da Terra, numa altitude que varia entre 80 km e 400 km, existe uma camada da atmosfera em que os átomos estão fortemente ionizados pelas radiações pelas radiações que vêm do espaço.

Essa camada é denominada **Ionosfera**, e manifesta a propriedade de refletir as ondas eletromagnéticas de determinados comprimentos de onda.

A reflexão ionosférica é muito utilizada em transmissões a longa distância, em frequências abaixo de 3 MHz, sendo aproveitada tanto no solo como na camada Ionosférica.

Conforme mostra a figura 1.13, as ondas emitidas por um transmissor podem sofrer reflexões sucessivas na Ionosfera e na Terra, propagando-se assim por distâncias muito grandes.

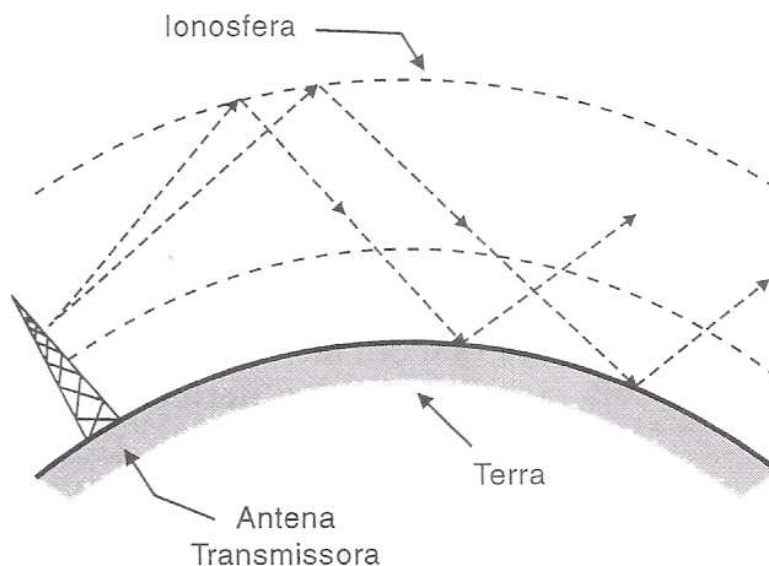


Figura 1.13 – Fenômeno da reflexão ionosférica.

Quando conseguimos, em um rádio, sintonizar uma estação muito distante, de frequência menor que 3 MHz (faixa denominada de Ondas Tropicais ou OT), seus sinais chegam até nós após sucessivas reflexões da forma indicada na figura 1.13.

O fenômeno da reflexão também é aproveitado no radar, que emite as ondas que se refletem em obstáculos, voltando para a estação que capta o “eco” por uma antena

receptora. Pela intensidade desse sinal captado de volta, e o tempo que leva para ir e voltar, é possível ter uma idéia do tamanho e distância do objeto detectado.

1.4.3. Refração.

Para frequências entre 3 MHz e 30 MHz, a Ionosfera poderá ser utilizada, porém não ocorrerá uma reflexão, e sim um outro fenômeno, ao qual chamamos de **refração**.

A refração ocorre quando uma onda eletromagnética passa de um meio para outro e estes meios têm características físicas diferentes.

Essa característica diferente é chamada de índice de refração. É o que ocorre com um raio de luz que se curva ao penetrar na água. O raio de luz sai de um meio menos refrativo (ar) para um mais refrativo (água).

No caso das ondas de rádio, a onda incidente (que chega do transmissor) irá penetrar na camada ionosférica, porém sofrerá sucessivos desvios de sua trajetória, curvando-se de volta a Terra.

Vale salientar que a ionosfera, por sofrer a incidência direta de raios solares durante o dia, tem suas características físicas alteradas e com isso as trajetórias das ondas no período da manhã e da noite são diferentes.

A figura 1.14 mostra como as ondas são curvadas de volta a Terra na ionosfera devido ao fenômeno da **refração ionosférica**.

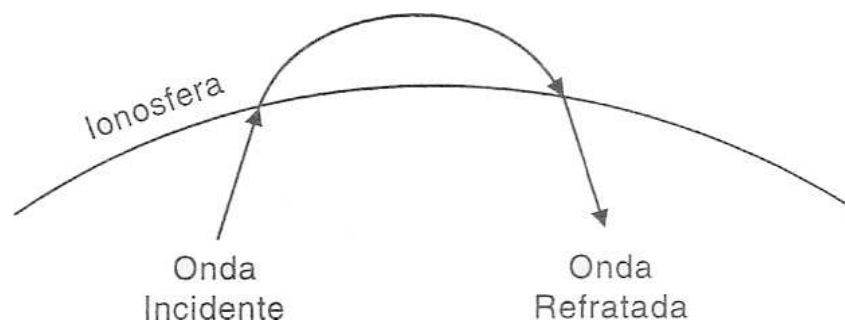


Figura 1.14 – Refração ionosférica.

1.4.4. Difração.

A difração é um fenômeno de grande utilidade na transmissão de sinais. Ocorre quando a onda atinge um obstáculo de dimensões iguais ou menores que seu comprimento de onda. Lembra do comprimento de onda que estudamos no item passado?

Em outras palavras, a difração é a capacidade que possui uma onda eletromagnética ou sonora de contornar obstáculos que se encontram no caminho entre o transmissor e o receptor. A difração ocorre quando esses obstáculos são da mesma ordem de grandeza do comprimento de onda λ que estudamos agora no item anterior.

Nesse caso, a onda irá alterar a sua direção, contornando o obstáculo. O ponto em que a onda incide no objeto passa a atuar como uma fonte emissora secundária do sinal, emitindo-o com menor intensidade (existe uma perda por absorção).

A figura 1.15 abaixo ilustra um feixe eletromagnético incidindo em um obstáculo, ocasionando o fenômeno da **difração**.

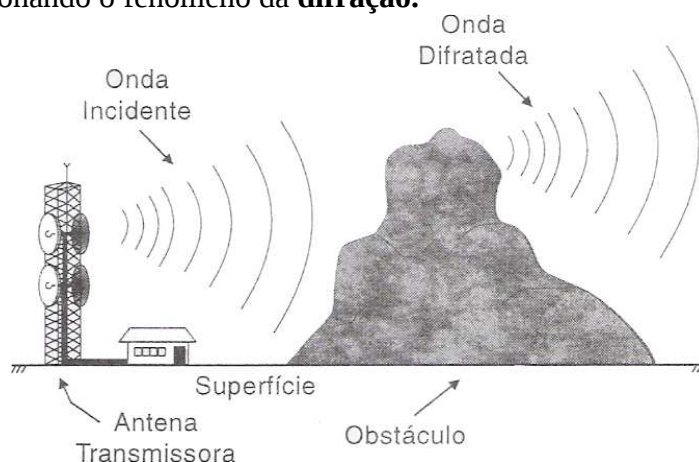


Figura 1.15 – O fenômeno da difração.

Esse fenômeno é aproveitado de forma bastante prática, quando orientamos as antenas de TV para as quinas de prédios ou bordas de montanhas, para captar as estações que ficam por trás desses obstáculos.

É de fundamental importância para o profissional de telecomunicações conhecer os fenômenos associados à propagação das ondas eletromagnéticas. Uma informação muito importante que esse profissional deve guardar é que a luz é uma onda eletromagnética, assim como as ondas de rádio.

Sabendo dessa informação, poderemos mais adiante associar vários fenômenos de propagação de ondas de rádio aos fenômenos cotidianos relacionados à luz visível. Só para citar um exemplo, podemos fazer uma comparação entre uma lanterna, que foca a luz em uma determinada região, com uma antena parabólica, que concentra os feixes eletromagnéticos em uma determinada região desejada.

Exercícios

21 – Qual a velocidade de propagação de uma onda no vácuo?

22 – Como ocorre a reflexão de uma onda eletromagnética? Desenhe um diagrama ilustrando o fenômeno.

23 – O que é ionosfera? Como a ionosfera está relacionada com o fenômeno da reflexão?

24 – O que é refração ionosférica?

25 – O que é difração?

26 – Uma onda eletromagnética vinda de um transmissor trabalhando em 144 MHz encontra um obstáculo de 2 metros no caminho. É possível o fenômeno da difração? Justifique. (Sugestão: Calcule o comprimento de onda em 144 MHz e compare com a dimensão do obstáculo)

27 – Quais semelhanças existiriam entre uma antena parabólica e uma simples lanterna?

1.5. Princípios de propagação.

O comportamento das ondas eletromagnéticas, ao se propagarem através de um determinado meio, depende tanto desse meio (existência de obstáculos), como principalmente da frequência desse sinal.

Todo profissional de telecomunicações deve ter a tabela 1.1 mostrada a seguir em mente. Com ela, esse profissional será capaz de distinguir o comportamento das diversas faixas de onda, e saber o que ocorre.

Frequência:	Modo de propagação:
< 3 MHz	Ondas terrestres
entre 3 MHz e 30 MHz	Ondas ionosféricas e/ou ondas diretas
> 30 MHz	Ondas diretas

Tabela 1.1 – Frequências e modos de propagação

Os três modos de propagação contidos nessa tabela é o que será explicado agora. Na verdade, todos os modos ocorrem para todas as frequências, mas com intensidades que variam.

1.5.1. Ondas terrestres ou de superfície.

Nessa modalidade de propagação as ondas aproveitam a condutividade da superfície terrestre (solo) ou mar. Utiliza-se esse modo de propagação para comunicações com alcance médio de 1.000 km, empregando-se transmissores de alta potência.

A atenuação desse sinal é baixa, permitindo uma transmissão confiável. Deve-se entender por atenuação como o grau de degradação ou ainda a perda de intensidade que qualquer sinal de RF sofre ao longo de sua propagação.

Esse é o modo de propagação utilizado na transmissão da faixa de AM comercial que compreende um intervalo de frequência entre 525 a 1705 kHz. Ou seja, encontra-se abaixo de 3 MHz, por isso, de acordo com a tabela 1, a radiofrequência (RF) nessa faixa se propaga através de ondas terrestres.

1.5.2. Ondas ionosféricas ou espaciais.

Nesse modo de propagação, tanto a superfície terrestre quanto a ionosfera são usadas. As ondas se propagam com reflexões sucessivas na Terra e na ionosfera, alcançando grandes distâncias.

Esse é o modo de propagação utilizado na transmissão das rádios de ondas tropicais (3.2 a 5.06 MHz) e ondas curtas (5.95 a 26.1 MHz).

1.5.3. Ondas diretas.

Como dissemos anteriormente, à medida que aumentamos a frequência de um sinal de rádio, ele se comporta cada vez mais como feixes luminosos, que são ondas eletromagnéticas também, só que de frequência muito elevada.

No caso das ondas de rádio ditas **diretas**, essas se propagam em linha reta, mas a presença de obstáculos pode impedir sua propagação. Assim como um anteparo na frente de uma lâmpada causará uma região de sombra.

É comum afirmar-se que nessa modalidade de comunicação a antena transmissora precisa “ver” a antena receptora e vice-versa, ou seja, estar na linha de visada da outra. Essa é a principal característica desse modo de propagação.

As ondas diretas desempenham um papel vital nas telecomunicações. Toda comunicação de dados sem fio, redes de transporte da telefonia fixa, telefonia celular entre outros se encontra nessa faixa, e se propaga em linha de visada como acabamos de ver.

Faremos agora alguns exercícios sobre os conceitos que acabamos de aprender e em seguida daremos continuidade ao nosso trabalho, estudando os problemas que ocorrem na transmissão de sinais através das ondas eletromagnéticas.

Exercícios

28 – Quais os modos de propagação existentes e quais suas faixas de frequência?

29 – Como se propagam as ondas terrestres? Cite exemplos de utilização dessa faixa nas telecomunicações.

30 – Como se propagam as ondas ionosféricas? Cite exemplos de utilização dessa faixa nas telecomunicações.

31 – Como se propagam as ondas diretas? Cite exemplos de utilização dessa faixa nas telecomunicações. Por que ela é tão importante hoje em dia?

32 – Relacione a utilização das frequências em diversas tecnologias com o modo de propagação da onda.

(a) – Onda terrestre (b) – Onda ionosférica (c) – Onda direta

- () – Comunicação celular em 800 MHz.**
 - () – Internet sem fio em 2.4 GHz**
 - () – Emissões em AM 830 Khz**
 - () – PX faixa do cidadão em 27 MHz**
 - () – Radioamadorismo na faixa de 7 MHz**
 - () – Enlaces de troncos telefônicos trabalhando em 10 GHz**
 - () – Radioamadorismo na faixa de 144 MHz**
 - () – Faixa de FM entre 88 e 108 MHz**
-
-

1.6. Problemas na transmissão de ondas eletromagnéticas.

A propagação dos sinais de uma antena transmissora até uma antena receptora não está livre de problemas.

Os dois principais problemas que ocorrem quando utilizamos ondas de rádio nas comunicações são o ruído e a interferência.

1.6.1. Ruído.

O ruído é um sinal sem padrão definido (aleatório) que se espalha por todo o espectro (conjunto de frequências) das ondas eletromagnéticas de maneira mais ou menos uniforme.

Sua principal origem é a própria natureza, sendo gerado por descargas estáticas na atmosfera como, por exemplo, raios.

Uma fonte muito importante de ruído nos equipamentos de transmissão é a própria agitação dos átomos nos componentes dos circuitos desses equipamentos. Essa agitação torna-se maior quando a temperatura se eleva.

Outra fonte de ruídos são máquinas e motores elétricos cujos comutadores, ao estabelecer e interromper a corrente no circuito, geram um sinal sem um padrão de frequência definida.

O ruído é responsável por distorções no sinal transmitido, conforme mostra a figura 1.16.

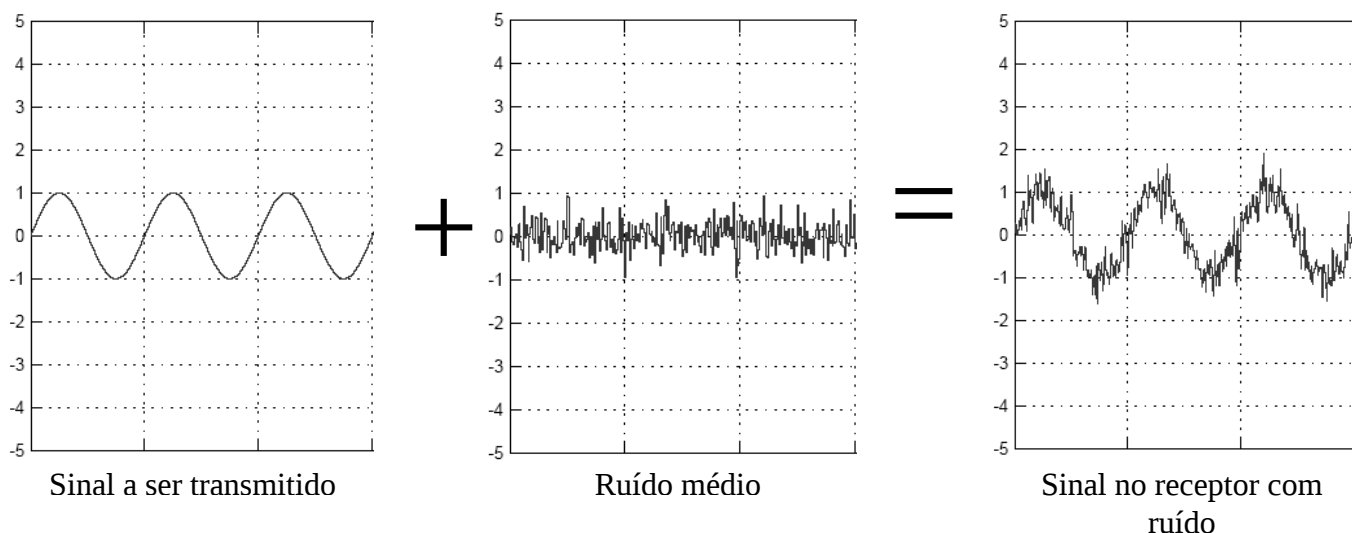


Figura 1.16 – Ruído médio.

O ruído será mais prejudicial quanto maior for sua potência. Em telecomunicações utilizamos o termo **relação sinal-ruído** para designar o quanto o sinal é maior que o ruído. Mais adiante, ainda nessa disciplina, aprenderemos a calcular a relação sinal-ruído em sua unidade apropriada.

Se a potência do sinal a ser transmitido é muito pequena, o ruído pode se sobressair, dificultando assim a recepção da informação. No caso do rádio, por exemplo, as emissoras que possuem transmissores mais potentes, ou estão mais próximas, são sempre captadas com mais qualidade de som.

Na figura 1.17, vamos o que acontece quando o nível de ruído é muito alto.

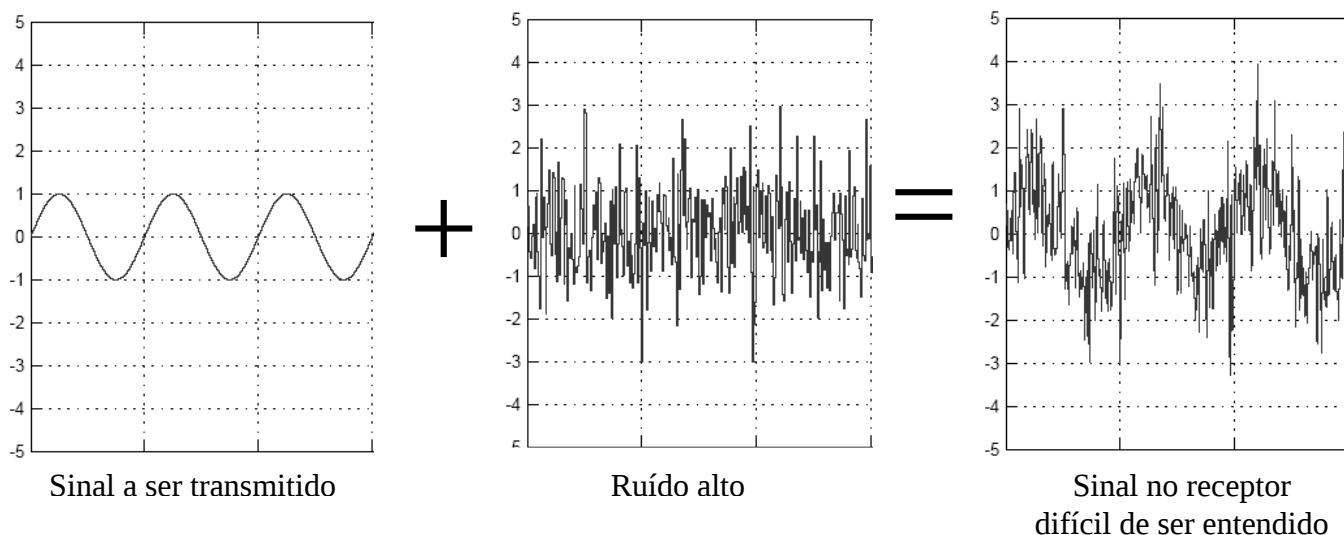


Figura 1.17 – Ruído forte.

Nesse caso, temos uma **relação sinal-ruído** menor do que no exemplo da figura 1.16. A **relação sinal-ruído** nesse caso é menor, pois, a potência do ruído aumentou e a potência do sinal ficou constante nos dois exemplos das figuras 1.16 e 1.17.

1.6.2. Interferência

A interferência ocorre quando dois sinais de mesma frequência se sobrepõem, misturando-se e não permitindo uma boa recepção, pois um irá agir sobre o outro, tornando-se impossível a separação dos sinais.

Grande parte das interferências tem origem em equipamentos fabricados pelo próprio homem, como, por exemplo, outros transmissores ou mesmo equipamentos industriais e de uso médio, que geram sinais de altas frequências.

A interferência deve ser entendida pelos profissionais de telecomunicações, pois é um ponto crítico no planejamento de alguns sistemas. Tomemos como exemplo a telefonia celular. Nesses sistemas, temos várias torres de transmissão chamadas **Estações Rádio Base (ERB)** distribuídas geograficamente com a finalidade de fazer a cobertura de determinada área geográfica.

A figura 1.18 mostra o princípio de funcionamento dos sistemas celulares, fazendo cobertura de uma determinada região em uma cidade. Cada **Estação Rádio Base** é representada aqui por uma letra (A, B, C, etc.) cobrindo uma área de um pequeno círculo (célula). Cada **ERB** que possui a mesma letra transmite na mesma frequência.

Essas **ERBs** que transmitem na mesma frequência devem ser geograficamente distribuídas de forma que nunca estarão muito próximas ou vizinhas umas das outras, para evitar o fenômeno da interferência.

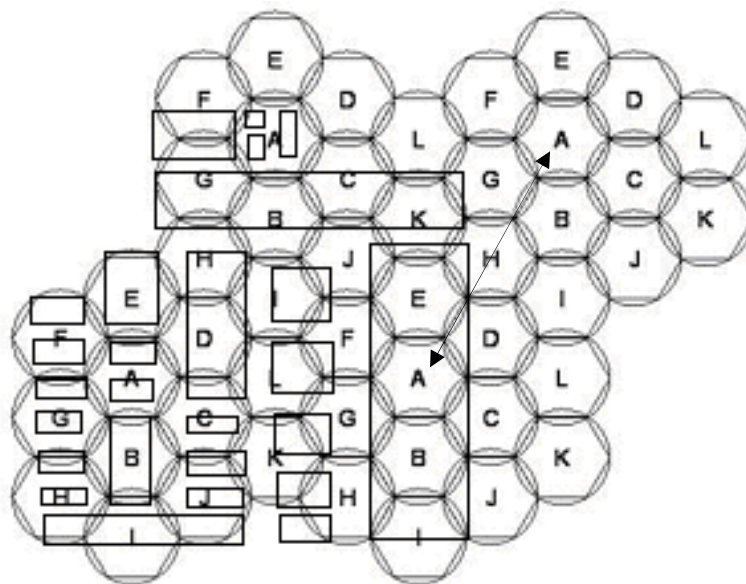


Figura 1.18 – Representação de um sistema celular.

Para exemplificar isso, tomemos a **ERB** que transmite na frequência **A**. Se você olhar em volta de qualquer **ERB A**, verá que não haverá nenhuma outra **ERB A** em sua vizinhança. E assim, para qualquer outra **ERB** desse sistema celular.

Então, para evitar interferências, um sistema de comunicação celular deve ser bem planejado a fim de evitar interferências entre **Estações Rádio Base** que transmitem na mesma frequência. Esse planejamento, em sistemas celulares, chama-se **reuso de frequências**.

Exercícios

33 – Defina o conceito de ruído.

34 – Cite as possíveis fontes causadoras de ruído.

35 – O que é relação sinal-ruído?

37 – O que é interferência?

38 – Por que o estudo da interferência é importante no planejamento de cobertura celular?

39 – O que significa reuso de frequências nos sistemas celulares?

1.7. Princípios de acústica (voz e audição).

A primeira informação telecomunicada via rádio pelo homem foi a voz ou tons audíveis como o código Morse, por exemplo. Até hoje, a voz ou sons são amplamente difundidos através das telecomunicações (TV, Rádio, Telefonia, VoIP, etc.). Por isso, o profissional da área deve conhecer suas propriedades básicas.

O som é sensação causada no sistema nervoso pela vibração de delicadas membranas no ouvido, como resultado da vibração de corpos rígidos ou semi-rígidos, tais como diapásão, auto falante ou uma campainha. O som é uma forma de energia mecânica, necessitando de um meio material para propagar, diferentemente da energia eletromagnética que se propaga no vácuo.

O ar constitui um meio do qual o som pode ser transmitido. Entretanto, outros meios, quer sólidos ou líquidos, podem servir para sua propagação. A propagação dos sons ocorre melhor nos sólidos do que no ar.

1.7.1. Audição

O aparelho auditivo é o responsável por captar essas ondas sonoras através da orelha, passando pelas vibrações nos tímpanos até chegar no ouvido interno e ser compreendido pelo cérebro. A figura 1.19 mostra o aspecto do aparelho auditivo.

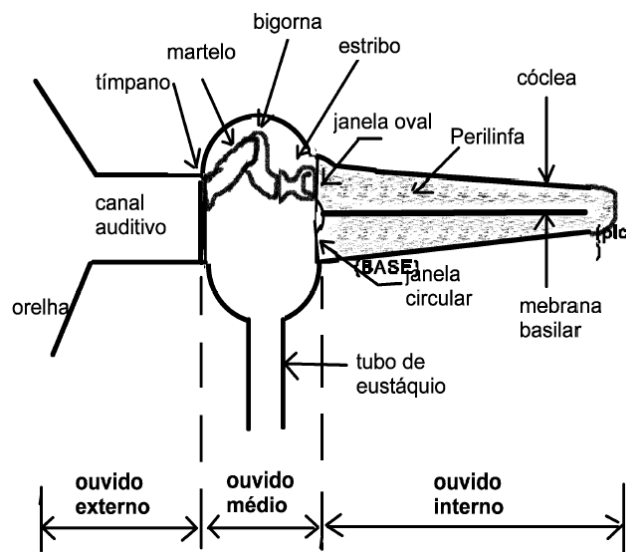


Figura 1.19 – Aparelho auditivo.

As frequências audíveis vão desde **20 Hz a 20kHz**, sendo que o limite superior varia de pessoa para pessoa e decresce com a idade.

Para que o som possa ser percebido pelos órgãos auditivos deve existir uma intensidade mínima, que corresponde ao limite inferior de audibilidade, chamado umbral de audibilidade. Este limite varia com a frequência. Da mesma forma, existe

também um limite superior de intensidade chamado limiar da dor. A partir desse limite, o som começa a incomodar e causar a sensação de dor no aparelho auditivo.

O ouvido humano tem uma sensibilidade maior para as frequências de aproximadamente 3 kHz (frequências médias).

As principais características do ouvido humano são:

- **Recepção:** Vibração do tímpano.
- **Faixa de frequência:** 20 Hz a 20 kHz.
- **Faixa de maior intensidade:** Na frequência de aproximadamente 3 kHz.
- **Resposta:** Não linear.

A figura 1.20 mostra um gráfico da resposta em frequência do ouvido humano.

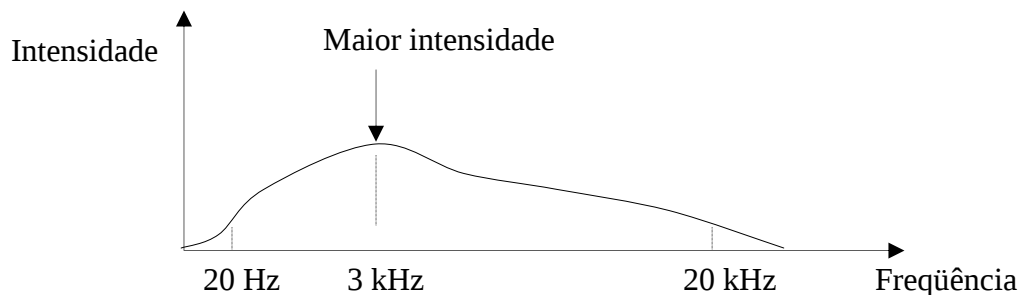


Figura 1.20 – Resposta em frequência do ouvido humano.

1.7.2. Voz

Por outro lado, a voz humana produz vibração sonora dentro de uma faixa de frequências de 100 Hz a 10 kHz. Cada som emitido é composto, simultaneamente, de diversas frequências. As frequências dos sons vocais são harmônicas de uma certa frequência fundamental das cordas vocais, razão principal da diferença entre a voz masculina (125 Hz, mais grave) e a voz feminina (250 Hz, mais aguda).

A potência média da voz de diversas pessoas pode variar dentro de amplos limites, sendo, no entanto de um valor muito baixo; uma pessoa falando baixo produz 0,001 microwatt, falando normalmente 10 microwatts, e gritando 1 a 2 miliwatts. As principais características da voz humana são:

- **Emissão:** Vibração das cordas vocais.
- **Faixa de frequência:** 20 Hz a 10 kHz.
- **Faixa de maior intensidade:** 100 Hz a 1,5 kHz.

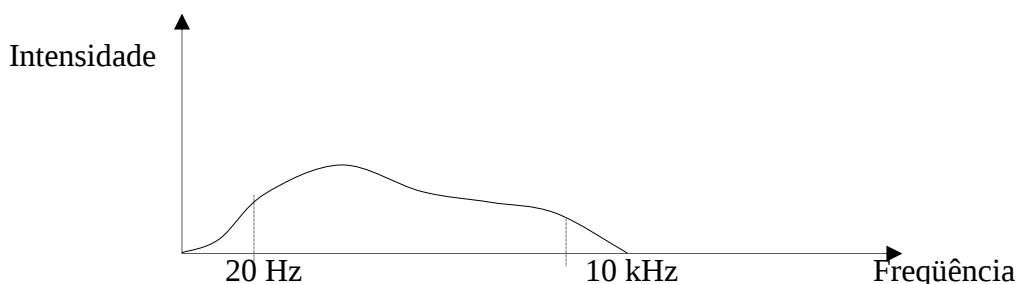


Figura 1.21 – Resposta em frequência da voz humana.

1.7.3. Inteligibilidade.

Diversos estudos foram realizados para determinar qual a faixa de frequência audível mais apropriada, sob o ponto de vista econômico e de qualidade, para as telecomunicações.

Na transmissão de voz (telefonía), foram basicamente levados em conta os seguintes fatores, resultantes das características da voz e do ouvido humano: **inteligibilidade e energia da voz.**

A inteligibilidade é definida como o percentual de palavras perfeitamente reconhecidas numa conversação. Verificou-se que na faixa de 100 a 1,5 KHz estava concentrada 90% da energia da voz humana, enquanto que na faixa acima de 1,5 KHz estava concentrada 70% da inteligibilidade das palavras.

Baseado num compromisso entre estes dois valores, **foi escolhida a faixa de voz entre 300 Hz e 3,4 KHz para comunicações telefônicas.**

Por esse motivo, nota-se uma qualidade menor no áudio transmitido por um telefone. Isso se deve ao fato de uma parte da faixa audível (acima de 3,4 kHz) ser filtrada propositalmente nos aparelhos ou na central telefônica.

Uma faixa de transmissão (largura de banda) entre 300 Hz e 3,4 kHz garante 85% de inteligibilidade e 68% de energia da voz recebida pelo ouvinte.

Para transmissão de música, no entanto, é necessária uma faixa bem maior, de 50 Hz a 10 KHz.

Como dito anteriormente, a inteligibilidade na telefonia é de 85 %, com uma faixa disponível entre 300 Hz e 3,4 kHz. Em outras palavras, isso significa dizer que ao falar no telefone, estatisticamente, 85% das suas palavras serão entendidas e 15% terão de ser repetidas.

Mais adiante, quando estudarmos modulação, entenderemos melhor do porque de não se transmitir o som em telefonia com toda a qualidade possível (20 Hz a 20 kHz), mas apenas uma faixa que vai de 300 Hz a 3,4 kHz.

1.7.4. Transformação de energia acústica em sinais elétricos.

A energia acústica produzida pela voz é transformada em energia elétrica por intermédio de um microfone, também conhecido como transdutor.

Nos aparelhos telefônicos, o microfone é, geralmente, uma cápsula de carvão, constituída basicamente de grânulos de carvão, limitados por uma membrana, onde é aplicada uma diferença de potencial que faz circular uma corrente DC.

A figura 1.22 mostra o princípio de funcionamento do microfone. Quando as vibrações sonoras incidem sobre a membrana, fazendo-a vibrar, este movimento comprime mais ou menos os grânulos, diminuindo ou aumentando a resistência (R_1), com uma correspondente variação na corrente I_2 no mesmo ritmo das vibrações sonoras.

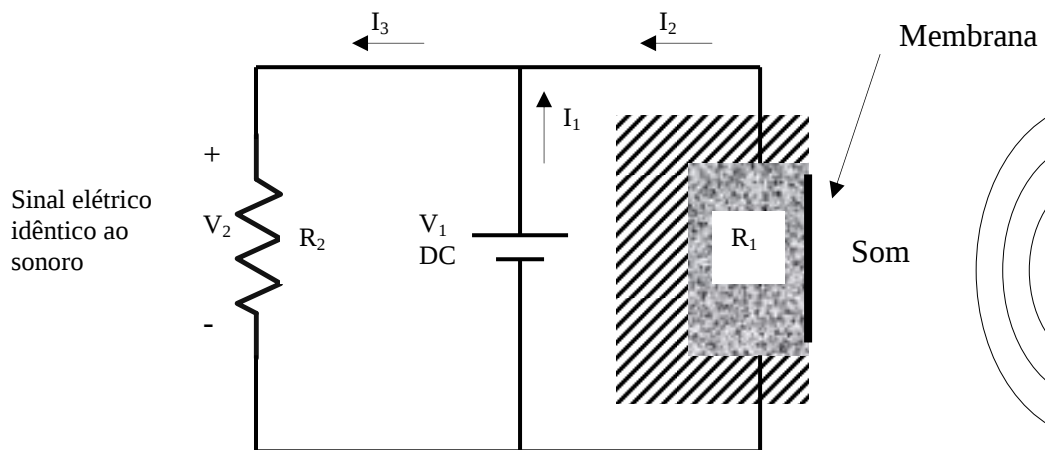


Figura 1.22 – Conversão de sinais sonoros em sinais elétricos por um microfone.

Pela análise do simples circuito temos que I_2 mais I_1 é igual a I_3 . Com isso, a corrente vibratória I_2 se soma com a corrente DC I_1 gerando uma outra corrente vibratória que passa no resistor R_2 . Quando essa corrente vibratória passa pelo resistor R_2 , gera-se então uma tensão V_2 que é uma cópia da informação sonora.

Se colocarmos um osciloscópio (figura 1.23) em cima do resistor R_2 , veremos a forma de onda de tensão que corresponde à onda sonora falada no microfone.

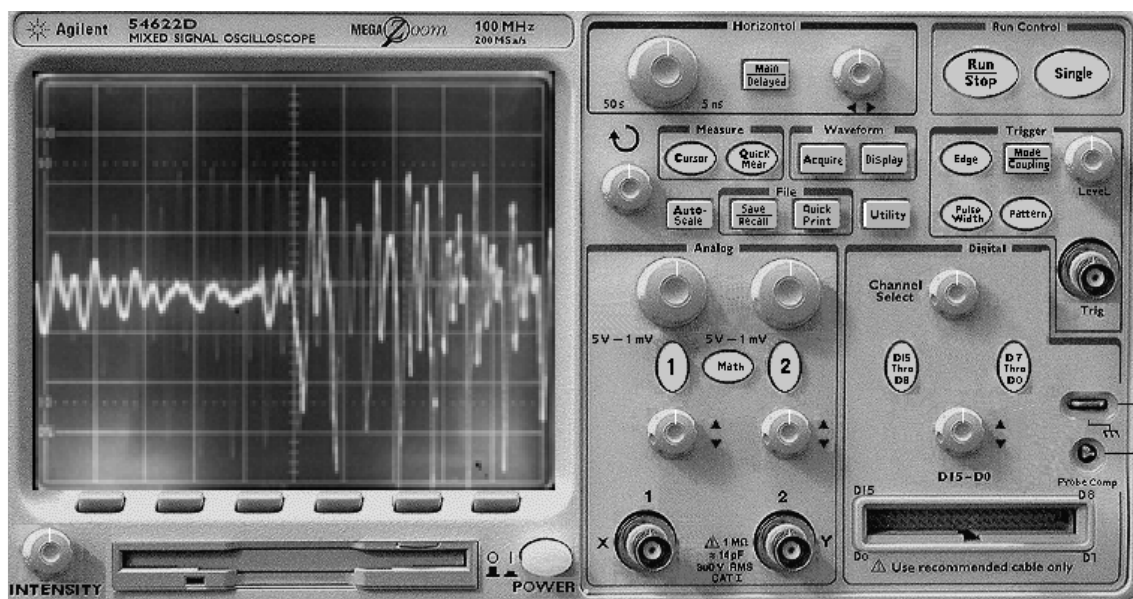


Figura 1.23 – Forma de onda de um trecho de conversação.

Você deve ter notado que uma forma de onda como a voz humana é mais complexa do que uma simples função seno ou cosseno. Isso por que a voz humana, e a maioria dos sons é formado pela soma de várias funções senos e cossenos. Mais adiante, nesse curso, estudaremos melhor as formas de ondas mais complexas.

São vários os tipos de microfones, que variam de acordo com sua aplicação. Mas todos se baseiam no princípio mostrado na figura 1.22.

1.7.5. Transformação de sinais elétricos em energia acústica.

Aqui, o processo inverso é realizado por outro transdutor chamado de auto falante.

No alto falante ocorre a transformação contrária àquela do microfone: a corrente elétrica é transformada em vibrações mecânicas do ar, reconstituindo o som inicial.

Para tanto, é necessário basicamente o uso de uma bobina, um diafragma (membrana móvel que produzirá o som) e um ímã permanente (ou um eletroímã)

A figura 1.24 ilustra um auto falante e seus principais componentes.

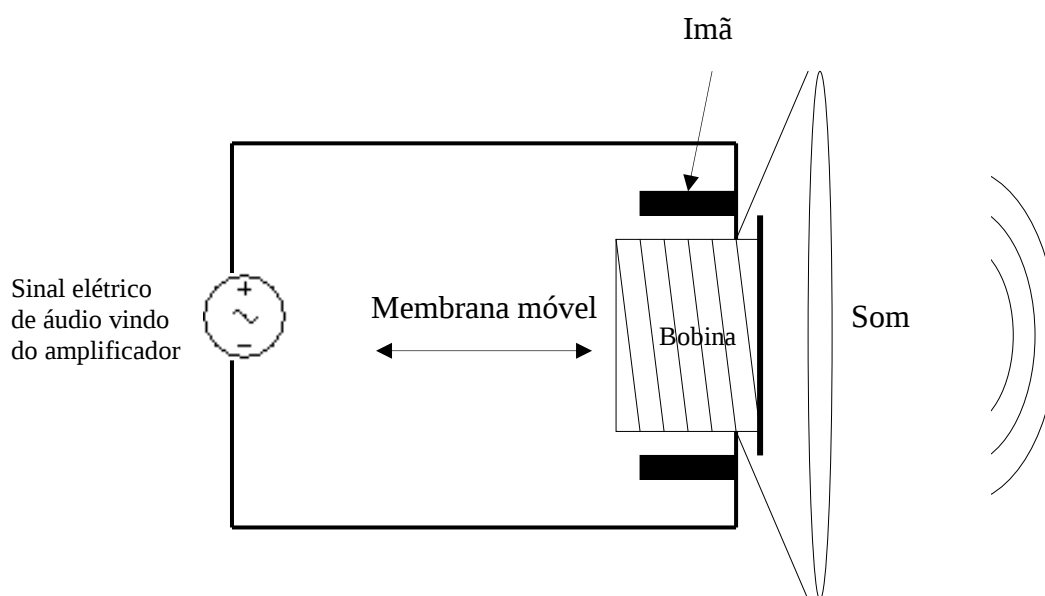


Figura 1.24 - Conversão de sinais elétricos em energia acústica por um auto falante.

A qualidade de um auto falante é medida por sua capacidade de reproduzir com fidelidade as várias frequências que conseguimos ouvir (20 Hz a 20 kHz). Existem alguns auto falantes que reproduzem melhor as frequências mais baixas (graves). Outros são melhores nos médios e agudos. Existem também os auto falantes que reproduzem bem toda a faixa de frequência audível (graves, médios e agudos).

Exercícios

40 – O que é som e qual a faixa de frequências audíveis?

41 – Quais as principais características do ouvido humano?

42 – Identifique as principais características da voz humana.

43 – O que é inteligibilidade? Qual a faixa de frequências audíveis usada na telefonia? Por que a qualidade da voz no telefone é mais baixa que o normal?

44 – Como ocorre a transformação da energia acústica em sinais elétricos?

45 – Como ocorre a transformação de sinais elétricos em energia acústica?

Iniciação às telecomunicações.

Toda a engenharia que nos permite projetar e utilizar equipamentos que fazem uso de sinais elétricos, se deve ao fato de podermos medir todas as características desses sinais e, através de fórmulas, projetar circuitos que os produzam ou recebam. Assim, um aspecto muito importante desse capítulo é o quantitativo, ou seja, aquele que trata das medidas (quantidades) dessas ondas e sinais. Uma delas é justamente a **potência de um sinal**.

Medir uma grandeza é compará-la com outra de mesma espécie, preestabelecida e chamada **unidade**. A **unidade de medida** deve ser escolhida de maneira que os resultados de diversas medidas sejam números fáceis de serem manuseados. Por exemplo: para a grandeza comprimento, as estradas são medidas em quilômetros, enquanto o alfaiate usa uma fita graduada em centímetros. Seria matematicamente exato, mas pouco prático, dizer-se que uma estrada tem 40.000.000 centímetros, ou um pedaço de tecido tem 0.00002 quilômetros.

Ocorre, entretanto, que as intensidades dos sinais com que trabalhamos em telecomunicações cobrem uma faixa extremamente ampla de valores. Os sinais mais fortes podem ser trilhões de vezes mais intensos que os mais fracos. Isso significa que o uso de uma **escala linear**, ou seja, em que os valores são igualmente separados, como em uma régua, **não se aplica quando tratamos de grandezas como as intensidades de ondas eletromagnéticas**. Assim, para estudar as relações de potência dos sinais precisaremos usar uma escala **logarítmica** chamada **decibel** ou **dB**.

Nesse capítulo, portanto, compreenderemos o uso e as aplicações das relações de potência através da **unidade logarítmica decibel** e conhecer as unidades derivadas do dB, como o dBW; dBm; dBV e dBμ.

2.1. Quadripolo.

Um quadripolo é um dispositivo, como o próprio nome diz, que possui quatro polos, sendo dois de entrada e dois de saída que serve para representar elementos de um sistema de comunicação (cabos, conectores, amplificadores, antenas, etc.).

Quando uma informação é enviada de um ponto a outro em um sistema de comunicação, os sinais elétricos passam através de diversos circuitos que compõem o sistema de transmissão, tal como rádio, amplificadores, cabos coaxiais, antenas, conectores, atenuadores e assim por diante.

Cada um desses elementos, ou mesmo parte deles, pode ser representado por um **quadripolo** que tem a possibilidade de **atenuar** (diminuir) o sinal, ou **amplificá-lo**.

A figura 2.1 mostra a representação gráfica de um quadripolo.

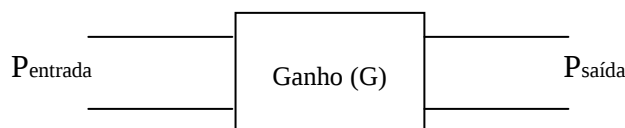


Figura 2.1 – Representação de um quadripolo.

Como dito anteriormente, o quadripolo pode atenuar o sinal (potência), ou seja, torná-lo menor do que quando entrou nele. O quadripolo pode também amplificar o sinal, ou seja, torná-lo maior na saída do que na entrada.

Dentro desse contexto, surge o conceito de **ganho do quadripolo** (representado pela letra G), que será explicado primeiramente em **escala linear**, para posteriormente, entendermos bem o significado de ganho em **escala logarítmica** e suas unidades decorrentes como o **dB, dBm, dBi**, etc.

2.2. Ganho do quadripolo em escala linear.

Escala linear quer dizer que as unidades de medidas encontram-se em sua forma natural, ou seja, potência é medida em watts (W), tensão em volts (V), corrente em ampéres (A) e assim por diante. É importante saber manipular as unidades em escalas lineares, pois elas são grandezas nas quais estamos mais habituados. Depois passaremos para as escalas logarítmicas, que são as utilizadas em telecomunicações.

Faz-se necessário primeiramente conhecer os submúltiplos das unidades. A tabela 2-1 apresenta os submúltiplos da unidade de potência watt (W).

Múltiplo (acima)	Nome	Símbolo	Múltiplo (abaixo)	Nome	Símbolo
10^0	watt	W	-	-	-
10^1	decawatt	daW	10^{-1}	deciwatt	dW
10^2	hectowatt	hW	10^{-2}	centiwatt	cW
10^3	quilowatt	kW	10^{-3}	miliwatt	mW
10^6	megawatt	MW	10^{-6}	microwatt	μW
10^9	gigawatt	GW	10^{-9}	nanowatt	nW

Tabela 2.1 – Submúltiplos da unidade de potência watt

Agora que conhecemos os principais submúltiplos do watt, vamos voltar ao conceito de ganho do quadripolo.

Define-se ganho do quadripolo em escala linear como sendo a razão entre a potência de saída e a potência de entrada (ver figura 2.1):

$$G = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \quad (2-1)$$

Se o valor do ganho G (equação 2-1) for **maior que um**, diz-se que o quadripolo é **amplificador**. Se o valor do ganho G for **menor que um**, diz-se que o quadripolo é **atenuador**. Caso o valor do ganho seja igual a um, significa que potência de entrada é igual a de saída e o quadripolo é dito **transparente**.

Outra observação importante é que o ganho G é uma grandeza adimensional já que estamos dividindo potência por potência.

Exemplos

8 – Calcule o ganho em escala linear dos quadripolos abaixo e diga se é amplificador, atenuador ou transparente:



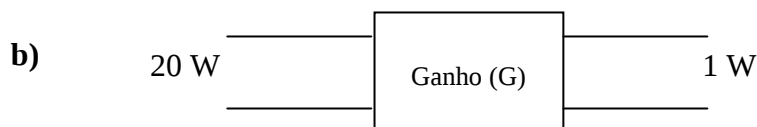
Resposta:

$$G = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}}$$

$$G = \frac{2W}{1W}$$

$$G = 2$$

Ou seja, o sinal de entrada foi multiplicado por 2. O quadripolo é amplificador.



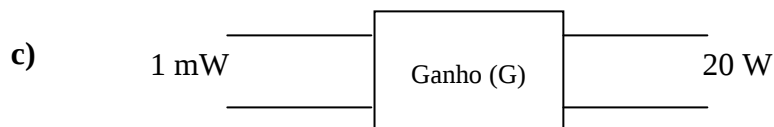
Resposta:

$$G = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}}$$

$$G = \frac{1W}{20W}$$

$$G = 0.05$$

Ou seja, o sinal de entrada foi dividido por 20 (multiplicado por 0.05). O quadripolo é atenuador.



Resposta:

$$G = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}}$$

$$G = \frac{20W}{0.001W}$$

$$G = 20000$$

Ou seja, o sinal de entrada foi multiplicado por 20000. O quadripolo é amplificador.

Note que nesse exemplo deve-se converter o valor da potência de entrada de miliwatt para watt. Sempre as potências de saída e de entrada devem estar no mesmo submúltiplo da unidade watt.

Como dito anteriormente, o quadripolo representa elementos da cadeia de transmissão como rádio, cabo, conector, antena, etc. Como esses elementos estão ligados em série, devemos entender o conceito de cascadeamento de quadripolos.

Imaginemos uma situação comum num sistema de transmissão, onde temos uma placa *wireless* conectada a uma antena através de um cabo, como mostra a figura 2.2.



Figura 2.2 – Placa wireless conectada a uma antena por cabo coaxial.

Como os elementos da cadeia de transmissão (multiplexadores, amplificadores, cabos, rádios, etc.) estão ligados em série, a representação desse sistema será feita através de vários quadripolos em cascata, como mostra a figura 2.3.

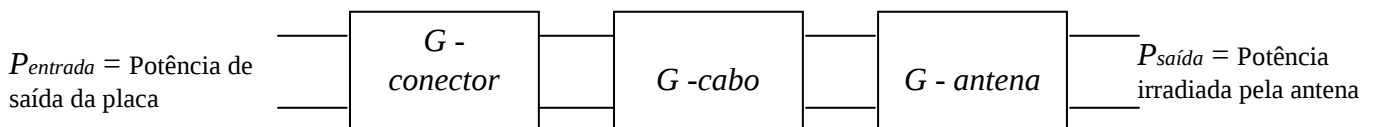


Figura 2.3 – Sistema *wireless* representado por quadripolos.

Note que a potência de entrada do sistema é a potência que a placa *wireless* aplica no cabo através do conector. Note também que a placa não é representada por um quadripolo, pois é o elemento que gera potência no sistema. Em outras palavras, o rádio (placa) é o ponto de partida.

Elementos como os **conectores e cabos sempre diminuem (atenuam)** o sinal que por eles passam. As antenas têm a propriedade de concentrar as ondas em determinadas regiões. Por isso, **as antenas são consideradas como elementos que aumentam o sinal (amplificam)**.

Existe uma maneira de transformar vários quadripolos cascadeados em série em um sistema simplificado, com um quadripolo apenas, como o da figura 2.1.

Uma forma de simplificar vários quadripolos cascadeados em escala linear é multiplicar todos os ganhos G de cada estágio (conector, cabo e antena), e gerar um ganho equivalente, chamado aqui de *Gequivalente*. Logo:

$$Gequivalente = (G_{conector}) \cdot (G_{cabo}) \cdot (G_{antena}) \quad (2-2)$$

Com isso, o conector, o cabo e a antena foram embutidos em um único ganho G . O sistema *wireless* em quadripolo agora ficou simplificado como mostra a figura 2.4.

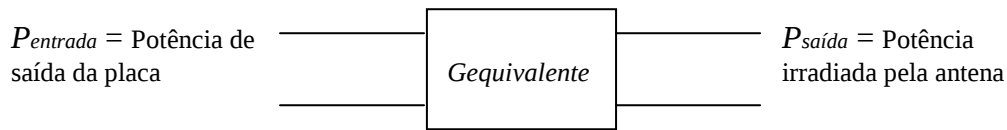


Figura 2.4 – Quadripolo equivalente do sistema mostrado na figura 2.5

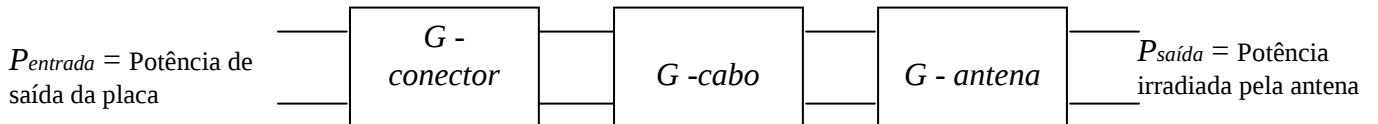
Façamos um exemplo sobre ganho em escala linear com vários quadripolos em cascata.

Exemplos

9 – Calcule o ganho equivalente em escala linear de um sistema de transmissão *wireless* com os seguintes dados:

- $G_{conector} = 0.85$
- $G_{cabo} = 0.65$
- $G_{antena} = 10$

Resposta:



O ganho equivalente em escala linear é o produto dos ganhos como dissemos anteriormente. Logo:

$$Gequivalente = (G_{conector}) \cdot (G_{cabo}) \cdot (G_{antena})$$

$$Gequivalente = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}}$$

$$Gequivalente = 0.85 \cdot 0.65 \cdot 10$$

$$Gequivalente = 5.25$$

10 – Tomando por base o exemplo anterior, se a potência de entrada for 100 mW, qual será potência de saída ?

Resposta:

$$Gequivalente = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}}$$

$$Gequivalente = 5.25$$

$$\frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = 5.25$$

$$P_{saída} = 5.25 \cdot 100$$

$$P_{saída} = 525 \text{ mW}$$

2.3. Ganho do quadripolo em escala logarítmica (dB).

Agora que aprendemos como trabalharmos com ganhos (atenuações ou ampliações) em escala linear, vamos conhecer a escala logarítmica e seus derivados.

O **dB** (decibel) foi inventado nos laboratórios da Bell para simplificar as operações com as unidades de potência e de ganho nos quadripolos. O **dB** é uma unidade logarítmica muito usada em telecomunicações, por pelo menos dois motivos:

- 1) O ouvido humano tem resposta logarítmica (sensação auditiva versus potência acústica).
- 2) Em telecomunicações, se usam números extremamente grandes ou pequenos, como dito no início do capítulo.

O uso de logaritmos torna estes números pequenos e fáceis de manipular, e transforma produtos em somas e divisões em subtrações. O dB é um número relativo e permite representar relações entre duas grandezas de mesmo tipo, como relações de potências, tensões, correntes, etc. Portanto, permite definir ganhos e atenuações, relação sinal/ruído, etc.

A definição de dB a partir de um quadripolo e sua relação de potência de saída com potência de entrada é definida pela equação 2-3 abaixo:

$$G(\text{dB}) = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{saída}}{P_{entrada}}\right) \quad (2-3)$$

ou ainda:

$$G(\text{dB}) = 10 \cdot \log(G)$$

Ou seja, o ganho em decibéis (dB) é igual a dez vezes o logaritmo natural de **G**, onde **G** é o ganho em escala linear, como visto no item anterior.

Quando trabalhamos com **escala logarítmica**, um **quadripolo é dito amplificador quando possui seu valor em dB positivo**. Quando um **quadripolo possuir valor negativo em dB**, esse é dito **atenuador**. Isso se deve ao fato da propriedade do logaritmo, onde o log de um número entre 0 e 1 é negativo. Quando um quadripolo é transparente (ganho linear igual 1), o ganho em dB desse quadripolo vale 0 dB.

Vejamos alguns exemplos:

Exemplos

11 – Calcule o ganho em escala logarítmica (dB) dos quadripolos abaixo e diga se é amplificador, atenuador ou transparente:



Resposta:

$$G = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}}$$

$$G = \frac{2W}{1W}$$

$$G = 2$$

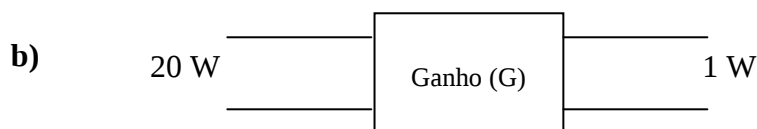
$$G(dB) = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{saída}}{P_{entrada}}\right)$$

$$G(dB) = 10 \cdot \log(G)$$

$$G(dB) = 10 \cdot \log(2)$$

$$G(dB) = 3dB$$

Ou seja, dobrar a potência de um sinal equivale a aumentar 3 dB. Valor positivo em dB mostra que o quadripolo é amplificador.



Resposta:

$$G = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}}$$

$$G = \frac{1W}{20W}$$

$$G = 0.05$$

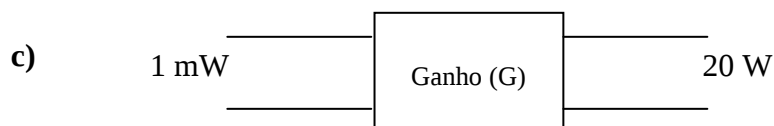
$$G(dB) = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{saída}}{P_{entrada}}\right)$$

$$G(dB) = 10 \cdot \log(G)$$

$$G(dB) = 10 \cdot \log(0.05)$$

$$G(dB) = -13dB$$

Ou seja, o sinal de entrada foi dividido por 20 (multiplicado por 0.05). Em escala logarítmica significa diminuir 13 dB nesse sinal. O sinal negativo mostra que é um atenuador.



Resposta:

$$G = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}}$$

$$G = \frac{20W}{0.001W}$$

$$G = 20000$$

$$G(dB) = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{saída}}{P_{entrada}}\right)$$

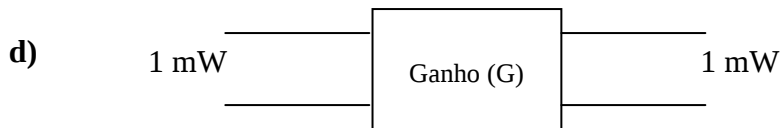
$$G(dB) = 10 \cdot \log(G)$$

$$G(dB) = 10 \cdot \log(20000)$$

$$G(dB) = 43dB$$

Ou seja, multiplicar por 20000 a potência de um sinal, significa aumentar 43 dB. Veja como 43 é um número menor e mais fácil de trabalhar que 20000. Essa é a função

do dB, tornar o manuseio dos números mais fácil. Como o valor em dB é positivo (43 dB), o quadripolo é amplificador.



Resposta:

$$G = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}}$$

$$G = \frac{1mW}{1mW}$$

$$G = 1$$

$$G(dB) = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{saída}}{P_{entrada}}\right)$$

$$G(dB) = 10 \cdot \log(G)$$

$$G(dB) = 10 \cdot \log(1)$$

$$G(dB) = 0dB$$

Ou seja, multiplicar por 1 a potência de um sinal, significa aumentar 0 dB. Nesse caso, nada aconteceu em termos de potência com o sinal. O quadripolo é dito transparente.

2.4. Potência de sinais em escala logarítmica (dBm).

O **dBm** é uma abreviação para a taxa de potência em decibel de uma potência medida referenciada a **1 mW**. O **dBm** é similar ao **dB**, exceto que o dB mede ganho e atenuações sofridos por uma potência. Essa potência é medida em dBm.

Fazendo uma comparação entre o salário que um trabalhador recebe todo mês e um sistema de transmissão, teríamos que o dinheiro ganho pelo trabalhador da sua empresa seria medido em dBm (potência), e todos os gastos ou ganhos adicionais (dinheiro ganho em uma aposta, por exemplo) que o trabalhador teve, seria medido em dB (amplificações ou atenuações). Pode-se dizer que o dBm é responsável por gerar potência no sistema, enquanto dB é responsável por retirar ou aumentar ainda mais essa potência gerada em dBm.

Quando o **valor de potência de um sinal medido em dBm for negativo**, significa que esse sinal é menor que 1 mW (**não confundir com potência negativa, que não existe fisicamente**). Se esse sinal em dBm **for maior que 0 dBm significa que esse sinal é maior que 1 mW**.

Dessa forma, podemos converter potência na forma decimal (*W ou mW*) para dBm de acordo com a equação 2-5 abaixo:

$$P(dBm) = 10 \cdot \log[P(mW)] \quad (2-4)$$

É importante observar que a potência $P(mW)$ é justamente a potência que se quer converter já em mW. Vejamos alguns exemplos:

Exemplos

12 – Encontre os valores de potência em dBm para as várias potências dadas em escala linear.

a) 100 mW

Resposta:

Da equação 2-4 temos que:

$$P(dBm) = 10 \cdot \log[P(mW)]$$

Logo:

$$\begin{aligned} P(dBm) &= 10 \cdot \log(100) \\ P(dBm) &= 20dBm \end{aligned}$$

b) 1 W

Resposta:

Primeiramente devemos converter o valor de 1 W para mW. Onde 1 W equivale a 1000 mW. Com isso:

$$P(dBm) = 10 \cdot \log[P(mW)]$$

Logo:

$$\begin{aligned} P(dBm) &= 10 \cdot \log(1000) \\ P(dBm) &= 30dBm \end{aligned}$$

c) 0.0001 W

Primeiramente devemos converter o valor de 0.0001 W para mW. Onde 0.0001 W equivale a 0.1 mW. Com isso:

$$P(dBm) = 10 \cdot \log[P(mW)]$$

Logo:

$$\begin{aligned} P(dBm) &= 10 \cdot \log(0.1) \\ P(dBm) &= -10dBm \end{aligned}$$

Como dissemos anteriormente, um valor de potência em escala linear entre 0 e 1 mW resultará em um valor negativo em dBm.

d) 20 μW

Primeiramente, devemos converter o valor de 20 μW para mW. Da tabela 2.1, temos que 20 μW valem 0.02 mW. Com isso:

$$P(\text{dBm}) = 10 \cdot \log[P(\text{mW})]$$

$$P(\text{dBm}) = 10 \cdot \log(0.02)$$

$$P(\text{dBm}) = -16,98 \text{ dBm}$$

Novamente, como temos um valor menor do que 1 mW (20 μW), o valor em dBm foi negativo.

e) 1 mW

$$P(\text{dBm}) = 10 \cdot \log[P(\text{mW})]$$

$$P(\text{dBm}) = 10 \cdot \log(1)$$

$$P(\text{dBm}) = 0 \text{ dBm}$$

2.5. Operações matemáticas entre dB e dBm.

No item 2.2 nós aprendemos a trabalhar com a potência e o ganho do quadripolo em escala linear, que é pouco prático de se trabalhar em telecomunicações.

Nesse item, utilizaremos todos os conceitos aprendidos sobre escala logarítmica para calcular potência e atenuações em quadripolos, e veremos qual a verdadeira vantagem em se usar escala logarítmica ao invés de usar escala decimal.

O logaritmo transforma uma multiplicação de unidades decimais em soma de logaritmos, o que torna mais fácil a manipulação das unidades.

Considere o quadripolo da figura 2.5 abaixo:

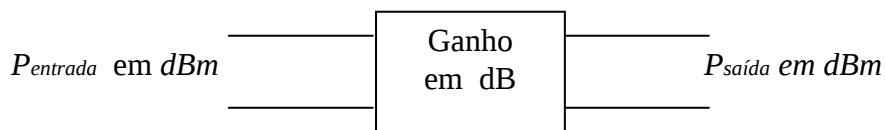


Figura 2.5 – Quadripolo com unidades logarítmicas.

Do explicado até agora, sabemos que a potência de saída de um quadripolo em escala linear é igual a potência de entrada vezes o ganho G também em escala linear.

Quando nos deparamos com um quadripolo com as unidades de ganho em dB e potência em dBm, temos que a **potência de saída será igual a potência de entrada mais o ganho do quadripolo**, como mostra a equação 2-5 logo abaixo:

$$P_{saída}(\text{dBm}) = P_{entrada}(\text{dBm}) + \text{Ganho}(\text{dB}) \quad (2-5)$$

Ou seja, o que era um produto em escala linear virou uma soma em escala logarítmica mais fácil de se trabalhar.

Um resumo das operações entre dBm e dB é feito abaixo:

- Quando somamos ou subtraímos dB com dBm o resultado é sempre em dBm (estamos amplificando ou atenuando a potência de um sinal).
- Quando subtraímos dBm com dBm o resultado é sempre em dB.
- Nunca podemos somar, multiplicar ou dividir dois valores em dBm.
- Nunca podemos multiplicar ou dividir dois valores em dB.
- Nunca se deve operar diretamente valores em mW com valores em dB.

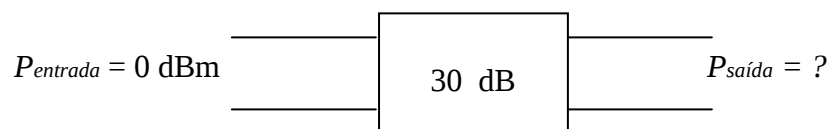
Vejamos alguns exemplos do que acabamos de estudar:

Exemplos

13 - Calcule a potência de saída em dBm de um quadripolo onde a potência de entrada é 0 dBm e o ganho do quadripolo é 30 dB.

Resposta:

Observando o quadripolo da figura 2.5, temos que:



Da equação 2-5 sabemos que:

$$P_{saída}(\text{dBm}) = P_{entrada}(\text{dBm}) + \text{Ganho}(\text{dB})$$

Então:

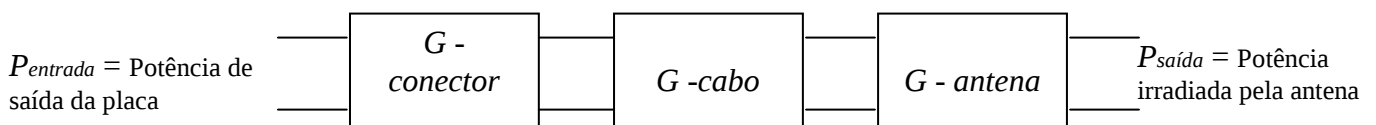
$$P_{saída}(\text{dBm}) = 0 \text{ dBm} + 30 \text{ dB}$$

$$P_{saída}(\text{dBm}) = 30 \text{ dBm}$$

14 – Calcule o ganho equivalente (Gequivalente) em dB de um sistema de transmissão wireless cujo os dados estão em escalas lineares:

- $G_{conector} = 0.85$
- $G_{cabo} = 0.65$
- $G_{antena} = 10$

Resposta:



Primeiramente, temos que converter os ganhos em escala linear para escala logarítmica:

- $G_{\text{conector}} = 0.85$:

$$G(\text{dB}) = 10 \cdot \log(G)$$

$$G(\text{dB}) = 10 \cdot \log(0.85)$$

$$G(\text{dB}) = -0.7 \text{ dB}$$

- $G_{\text{cabo}} = 0.65$

$$G(\text{dB}) = 10 \cdot \log(G)$$

$$G(\text{dB}) = 10 \cdot \log(0.65)$$

$$G(\text{dB}) = -1.87 \text{ dB}$$

- $G_{\text{antena}} = 10$

$$G(\text{dB}) = 10 \cdot \log(G)$$

$$G(\text{dB}) = 10 \cdot \log(10)$$

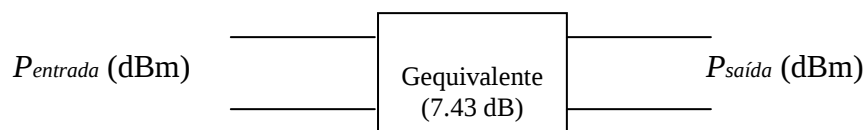
$$G(\text{dB}) = 10 \text{ dB}$$

O ganho equivalente ($G_{\text{equivalente}}$) em dB será a soma de todos os ganhos também em dB

$$G_{\text{equivalente}}(\text{dB}) = G_{\text{conector}}(\text{dB}) + G_{\text{cabo}}(\text{dB}) + G_{\text{antena}}(\text{dB})$$

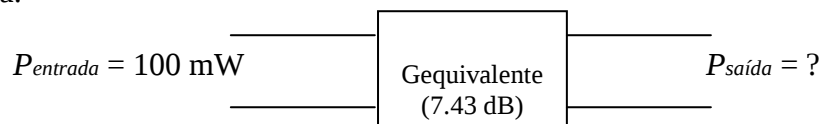
$$G_{\text{equivalente}}(\text{dB}) = -0.7 - 1.87 + 10 \text{ dB}$$

$$G_{\text{equivalente}}(\text{dB}) = 7.43 \text{ dB}$$



15 – Se no exemplo anterior, a potência de entrada (P_{entrada}) for 100 mW, qual será a potência de saída ($P_{\text{saída}}$) em dBm?

Resposta:



Primeiramente devemos converter 100 mW para dBm:

$$P(\text{dBm}) = 10 \cdot \log[P(\text{mW})]$$

$$P(\text{dBm}) = 10 \cdot \log(100)$$

$$P(\text{dBm}) = 20 \text{ dBm}$$

Pela equação 2-5, sabemos que:

$$P_{\text{saída}}(\text{dBm}) = P_{\text{entrada}}(\text{dBm}) + \text{Ganho}(\text{dB})$$

$$P_{\text{saída}}(\text{dBm}) = 20 \text{ dBm} + 7.43 \text{ dB}$$

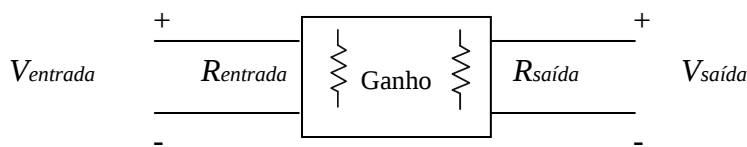
$$P_{\text{saída}}(\text{dBm}) = 27.43 \text{ dBm}$$

2.6. Relações entre tensões em escala logarítmica.

Dos cursos de análise de circuitos, sabemos que a potência pode ser expressa por:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad \text{Watts} \quad 2-6$$

Todo quadripolo possui uma resistência de entrada e uma resistência de saída, também conhecida por impedância. A figura 2.6 mostra um quadripolo ressaltando as impedâncias e tensões de entrada e de saída.



Com isso, temos que:

$$P_{\text{entrada}} = \frac{V_{\text{entrada}}^2}{R_{\text{entrada}}} \quad \text{Watts} \quad 2-7$$

$$P_{\text{saída}} = \frac{V_{\text{saída}}^2}{R_{\text{saída}}} \quad \text{Watts} \quad 2-8$$

Sabemos que o ganho do quadripolo é:

$$G(\text{dB}) = 10 \cdot \log\left(\frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{entrada}}}\right), \text{ com isso temos que:}$$

$$G(\text{dB}) = 10 \cdot \log\left(\frac{\frac{V_{\text{saída}}^2}{R_{\text{saída}}}}{\frac{V_{\text{entrada}}^2}{R_{\text{entrada}}}}\right)$$

Pela propriedade dos logaritmos, temos que: 0

$$G(\text{dB}) = 10 \cdot \log\left(\frac{V_{\text{saída}}^2}{V_{\text{entrada}}^2}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{R_{\text{entrada}}}{R_{\text{saída}}}\right)$$

Em telecomunicações, a tendência é que a impedância de entrada dos equipamentos seja igual à impedância de saída. Como o $\log(1)$ é igual a 0, o segundo termo $10 \cdot \log\left(\frac{R_{entrada}}{R_{saída}}\right)$ vale zero

Com isso, temos que o ganho de tensão do quadripolo é dado por:

$$G(dB) = 20 \cdot \log\left(\frac{V_{saída}}{V_{entrada}}\right) \quad 2-9$$

Note a diferença entre o ganho do quadripolo quando medimos **tensão** e quando medimos **potência**. Quando medimos **potência**, usamos 10 vezes o logaritmo da potência de saída pela potência de entrada. Quando medimos **tensão**, usamos 20 vezes o logaritmo da tensão de saída pela tensão de entrada.

2.7. Outras unidades logarítmicas (dBV, dBW, dBμ).

De forma análoga ao dBm, podemos expressar uma tensão em escala logarítmica. Existem duas unidades logarítmicas de tensões que são mais usadas: o **dBV** e o **dBμ**.

O **dBV** é uma unidade de tensão referenciada a 1 V, de tal forma que:

$$V(dBV) = 20 \cdot \log(V) \quad (2-10)$$

Onde V é a tensão em Volts. Se tivermos um valor menor que 1 Volt, teremos um valor em dBV negativo. Se tivermos 1 Volt, teremos 0 dBV

O **dBμ** segue o mesmo raciocínio e é uma unidade para medir tensões muito pequenas, referenciadas a 1 microvolt (0.000001 Volt). Um exemplo de tensões dessa ordem de grandeza são aquelas produzidas pelos campos elétricos em uma antena receptora.

Uma tensão em dBμ pode ser encontrada usando a fórmula abaixo:

$$V(dB\mu) = 20 \cdot \log(\mu V) \quad (2-11)$$

Onde μV é a tensão em microvolts. Se tivermos um valor menor que 1 μV , teremos um valor em dBμ negativo. Se tivermos 1 μV , teremos 0 dBμ.

Outra unidade logarítmica é o **dBW**. O **dBW** é uma unidade de potência semelhante ao dBm com a diferença que usamos a potência de 1 W como referência.

Podemos calcular uma potência em dBW pela seguinte equação:

$$P(dBW) = 10 \cdot \log[P(W)] \quad (2-12)$$

Onde P(W) é a potência em Watts. Se tivermos um valor de potência menor que 1 W, teremos um valor negativo em dBW. Se tivermos 1 W, teremos 0 dBW.

Todas essas outras unidades (dBW, dBμ e dBV) se relacionam com o dB da mesma forma que vimos com o dBm. Vejamos agora alguns exemplos dessas outras unidades logarítmicas:

Exemplos

16 – Encontre o ganho de tensão em dB de um amplificador sabendo que a tensão entrada é 1 Volt, e a tensão de saída é 15 Volts.

Resposta:

Pela equação 2-9, temos que:

$$G(dB) = 20 \cdot \log\left(\frac{V_{saída}}{V_{entrada}}\right), \text{ logo:}$$

$$G(dB) = 20 \cdot \log\left(\frac{15}{1}\right)$$

$$G(dB) = 23.52 \text{ dB}$$

17 – Encontre o ganho de tensão em dB de um cabo sabendo que a tensão entrada é 20 Volts, e a tensão de saída é 12 Volts.

$$G(dB) = 20 \cdot \log\left(\frac{V_{saída}}{V_{entrada}}\right), \text{ logo:}$$

$$G(dB) = 20 \cdot \log\left(\frac{12}{20}\right)$$

$$G(dB) = -4.43 \text{ dB}$$

18 – Converta os seguintes valores de tensão para dBV:

a) 0.5 V

Resposta:

Pela equação 2-10, temos que:

$$V(dBV) = 20 \cdot \log(V)$$

$$V(dBV) = 20 \cdot \log(0.5)$$

$$V(dBV) = -6 \text{ dBV}$$

b) 20 V

Resposta:

$$V(dBV) = 20 \cdot \log(V)$$

$$V(dBV) = 20 \cdot \log(20)$$

$$V(dBV) = 26 \text{ dBV}$$

c) 1 V

Resposta:

$$V(dBV) = 20 \cdot \log(V)$$

$$V(dBV) = 20 \cdot \log(1)$$

$$V(dBV) = 0 \text{ dBV}$$

19 – Converta os seguintes valores de tensão para dBμ:

a) 15 μV

Resposta:

Pela equação 2-11, temos que:

$$V(dB\mu) = 20 \cdot \log(\mu V)$$

$$V(dB\mu) = 20 \cdot \log(15)$$

$$V(dB\mu) = 23.52 \text{ dB}\mu$$

b) 1 mV

Resposta:

Como 1mV vale 1000 μV, temos:

$$V(dB\mu) = 20 \cdot \log(\mu V)$$

$$V(dB\mu) = 20 \cdot \log(1000)$$

$$V(dB\mu) = 60 \text{ dB}\mu$$

c) 0.0000001 V

Resposta

Como 0.0000001 V vale 1 μV, temos:

$$V(dB\mu) = 20 \cdot \log(\mu V)$$

$$V(dB\mu) = 20 \cdot \log(1)$$

$$V(dB\mu) = 0 \text{ dB}\mu$$

2.8. Conversão de unidades logarítmicas para unidades lineares.

Vimos até agora como converter para escala logarítmica as unidades lineares de ganho, potência e tensão. Veremos agora como fazer o processo inverso, ou seja, converter uma unidade logarítmica de volta em uma unidade linear.

A tabela 2.2 abaixo resume as formulas necessárias para converter de volta em escala linear as unidades logarítmicas que estudamos nesse capítulo.

Unidade logarítmica	Unidade linear
dB	$G = 10^{\frac{G(dB)}{10}}$
dBm	$P(mW) = 10^{\frac{P(dBm)}{10}}$
dBV	$V(Volts) = 10^{\frac{V(dBV)}{20}}$
dBW	$P(W) = 10^{\frac{P(dBW)}{10}}$
dBμ	$V(\mu Volts) = 10^{\frac{V(dB\mu)}{20}}$

Tabela 2.2 – Resumo das operações de escala logarítmica para escala linear.

Exemplos

20 – Converta os seguintes valores em dB para escala linear.

a) 3 dB

Resposta:

$$G = 10^{\frac{G(dB)}{10}}$$

$$G = 10^{\frac{3}{10}}$$

$$G = 2$$

Ou seja, aumentar 3 dB na potência de um sinal, significa dobrar essa potência.

b) -3 dB

$$G = 10^{\frac{G(dB)}{10}}$$

$$G = 10^{\frac{-3}{10}}$$

$$G = 0.5$$

Ou seja, diminuir 3 dB na potência de um sinal, significa dividir essa potência por 2.

c) 100 dB

Respostas:

$$G = 10^{\frac{G(dB)}{10}}$$

$$G = 10^{\frac{100}{10}}$$

$$G = 10000000000$$

Ou seja, aumentar 100 dB um sinal, significa multiplicá-lo por 10 bilhões.

21 – Converta os seguintes valores de potência em dBm para escala linear.

a) 0 dBm

Resposta:

$$P(mW) = 10^{\frac{P(dBm)}{10}}$$

$$P(mW) = 10^{\frac{0}{10}}$$

$$P(mW) = 1 \text{ mW}$$

b) 30 dBm

Resposta:

$$P(mW) = 10^{\frac{P(dBm)}{10}}$$

$$P(mW) = 10^{\frac{30}{10}}$$

$$P(mW) = 1000 \text{ mW}$$

Ou seja, 1 W.

c) -10 dBm

$$P(mW) = 10^{\frac{P(dBm)}{10}}$$

$$P(mW) = 10^{\frac{-10}{10}}$$

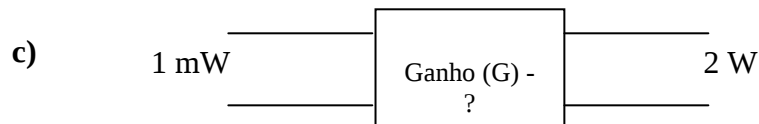
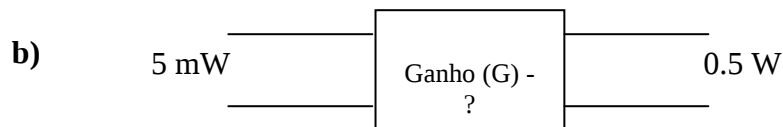
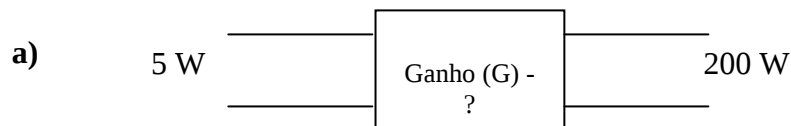
$$P(mW) = 0.1 \text{ mW}$$

Exercícios

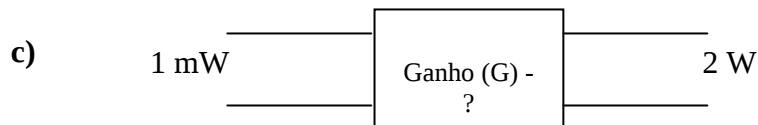
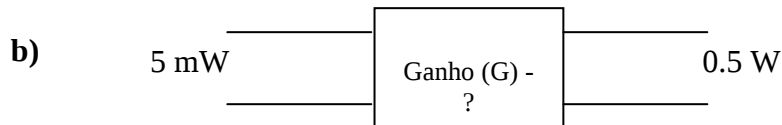
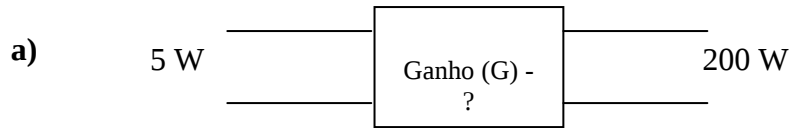
46 – Qual a importância da unidade logarítmica em telecomunicações?

47 – O que é um quadripolo e qual sua função no estudo de telecomunicações?

48– Calcule o ganho G em escala linear dos quadripolos abaixo e diga se é amplificador, atenuador ou transparente (lembre-se de colocar as potências de saída e entrada no mesmo submúltiplo) :

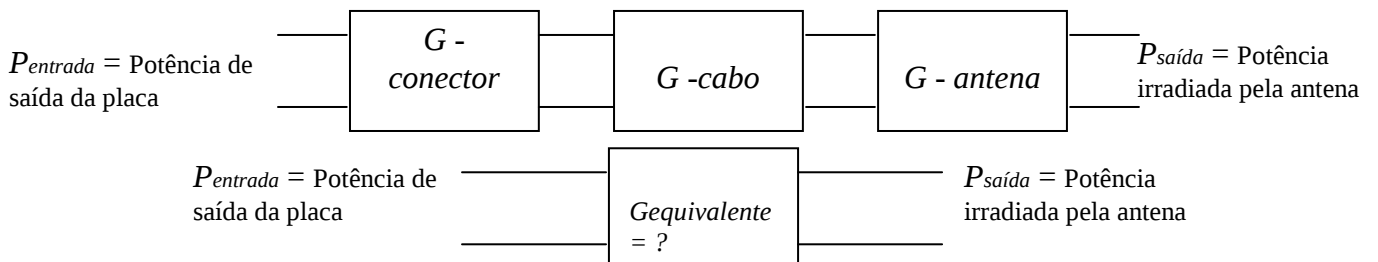


49– Calcule mesmo ganho G em escala logarítmica dos quadripolos abaixo e diga se é amplificador, atenuador ou transparente (lembre-se de colocar as potências de saída e entrada no mesmo submúltiplo quando preciso) :



50 – Calcule o ganho equivalente em escala linear de um sistema de transmissão *wireless* com os seguintes dados:

- $G_{\text{conector}} = 0.9$
- $G_{\text{cabo}} = 0.7$
- $G_{\text{antena}} = 15$



51 – Do exercício anterior, se a potência de entrada for 400 mW, qual será a potência de saída em mW ?

52 – Defina o conceito de dBm. Como se calcula uma potência em dBm?

53 - Encontre os valores de potência em dBm para as várias potências dadas em escala linear.

a) 200 mW

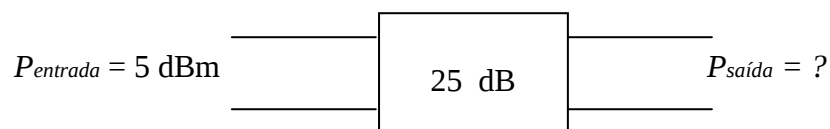
b) 2 W

c) 0.0005 W

d) 50 μ W

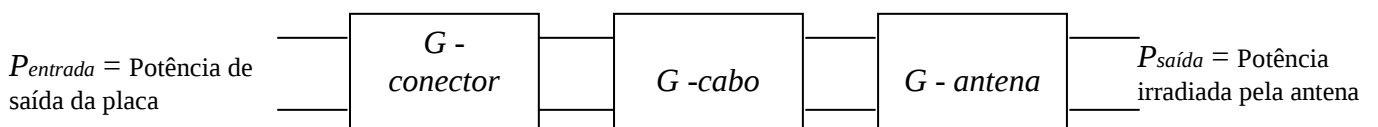
e) 1 mW

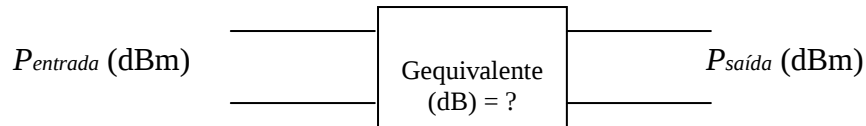
54 - Calcule a potência de saída em dBm de um quadripolo onde a potência de entrada é 5 dBm e o ganho do quadripolo é 25 dB.



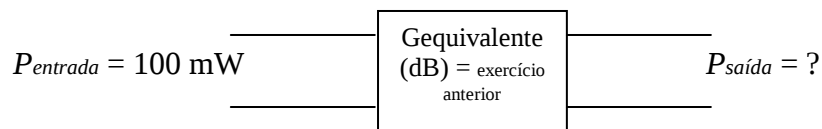
55 – Calcule o ganho equivalente (Gequivalente) em dB de um sistema de transmissão *wireless* cujo os dados estão em escalas lineares:

- $G_{conector} = 0.95$
- $G_{cabo} = 0.87$
- $G_{antena} = 25$

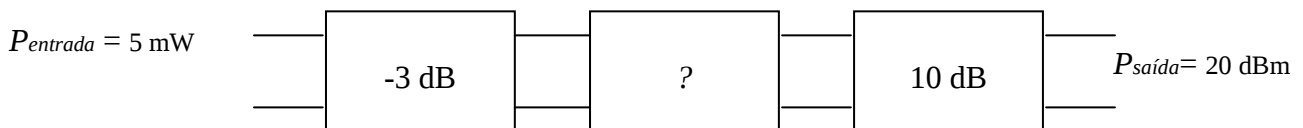




56 – Se no exercício anterior, a potência de entrada ($P_{entrada}$) for 100 mW, qual será a potência de saída (P_{saida}) em dBm?



57 – No quadripolo abaixo, encontre o valor do ganho que falta em dB.



58 – Encontre o ganho de tensão em dB de um amplificador sabendo que a tensão entrada é 5 Volt, e a tensão de saída é 10 Volts.

59 – Encontre o ganho de tensão em dB de um cabo sabendo que a tensão entrada é 6 Volts, e a tensão de saída é 1 Volts.

60 – Converta os seguintes valores de tensão para dBV:

a) 0.8 V

b) 14 V

c) 1 V

61 – Converta os seguintes valores de tensão para dBμ:

a) 26 μV

b) 1 mV

c) 0.0000007 V

62 – Converta os seguintes valores de ganho em dB para escala linear.

a) 6 dB

b) -3 dB

c) 15 dB

63 – Converta os seguintes valores de potência em dBm para mW.

a) 0 dBm

b) 26 dBm

c) -5 dBm

Análise de sinais

Iniciação às telecomunicações

A utilização de representações gráficas para os sinais elétricos é muito importante em telecomunicações, pois permite dar uma visão mais ampla dos fenômenos que ocorrem nos sistemas. Da mesma forma, essas representações gráficas possibilitam a realização de operações como adição e multiplicação de sinais, que serve para diversos tipos de previsões sobre o que ocorre em um sistema de comunicação.

Nesse capítulo, aprenderemos a representar os sinais elétricos por meio da técnica dos **espectros de amplitudes** e o resultado das adições e multiplicações de sinais quando se utiliza essa nova forma de representação.

3.1. Espectro de sinais.

Até agora, em todo o estudo de eletrônica, você se acostumou a representar a maioria das grandezas (tensão ou corrente) através gráficos vistos no domínio do tempo como uma senóide vista em um osciloscópio, por exemplo

Também aprendeu a utilizar representações gráficas envolvendo as relações entre correntes e tensões, o que levava às chamadas curvas características de muitos componentes e circuitos.

Entretanto, também podemos representar uma grandeza elétrica que varie no tempo em função **de sua frequência f** ou de sua **velocidade angular ω** . Esse tipo de representação será extremamente útil nos estudos de telecomunicações, principalmente na parte de modulação, que será vista mais adiante.

3.1.1. Sinais senoidais ou cosseoidais.

Imagine um sinal que tenha uma forma de onda senoidal de frequência f . Podemos representar essa senóide ou cossenóide em função do tempo, como estamos mais comumente habituados. A figura 3.1 mostra um seno de 1 V_p, 20 Hz visto no domínio do tempo.

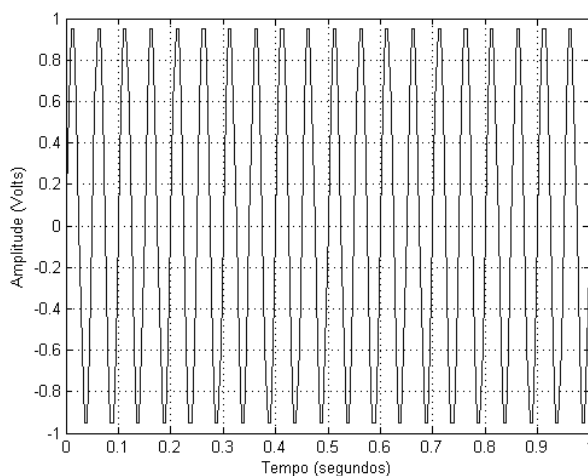


Figura 3.1 – Seno de 20 Hz visto no domínio do tempo.

Como sabemos, a frequência é o inverso do tempo (período), tal que $f = \frac{1}{T}$.

Com isso, podemos representar a função seno anterior, vista no domínio da frequência (espectro de amplitudes) como mostra a figura 3.2.

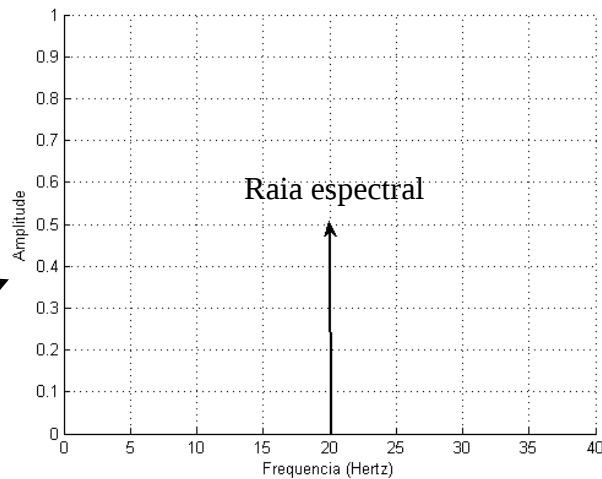


Figura 3.2 – Função seno mostrada no domínio da frequência.

Para melhor entendermos de onde vem a representação no domínio da frequência, imaginamos tridimensionalmente as grandezas frequência, tempo e amplitude.

Dessa forma percebe-se que o sinal seno (senóide) é representado **por uma seta chamada de raia espectral** marcando a frequência desse sinal. A figura 3.3 mostra o domínio do tempo e da frequência.

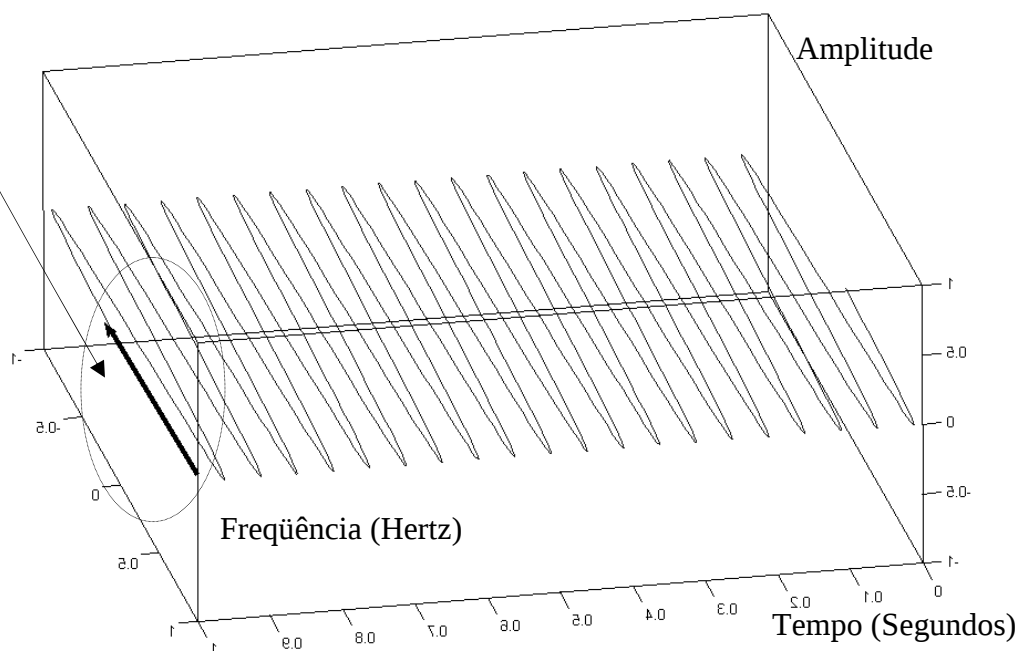


Figura 3.3 – Domínio do tempo, da frequência e amplitude do sinal.

A diferença matemática entre uma **função seno e cosseno**, ambas com mesma frequência, é que uma está 90° atrasada da outra. Nessas condições, a representação no domínio da frequência de um seno é igual a de um cosseno. Ambos terão a mesma frequência, porém defasados no tempo.

A figura 3.4 mostra um seno e um cosseno de mesma frequência novamente no plano tridimensional.

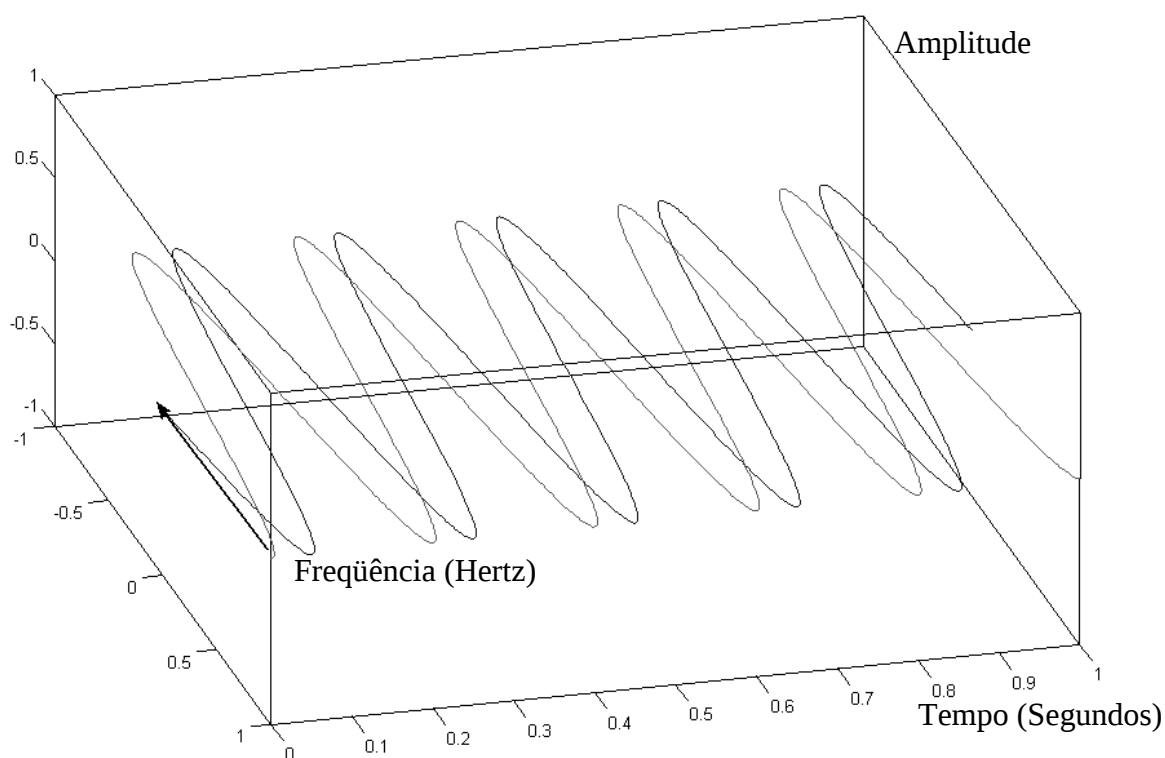


Figura 3.4 – Representação tridimensional de um seno e um cosseno com mesma frequência..

O grande matemático francês **Jean Baptiste Fourier** foi um dos principais estudiosos de funções no domínio da frequência. **Ele provou que qualquer forma de onda poderia ser decomposta em um somatório de senos e cossenos de diferentes amplitudes e diferentes frequências.**

O teorema de Fourier foi um grande legado, pois nem sempre é fácil perceber certas propriedades de um sinal observando-o no domínio do tempo por um osciloscópio.

Por isso, em telecomunicações outro instrumento crucial no dia-a-dia profissional é o **Analizador de Espectro**. Esse instrumento se baseia no teorema de Fourier e mostra em uma tela as componentes de frequência que compõem um certo sinal.

Vejamos como funciona um analisador de espectro. Vamos pegar uma fonte senoidal e colocá-la em um osciloscópio e um analisador de espectro ao mesmo tempo e veremos o que acontece. A figura 3.5 mostra os dois instrumentos e a fonte senoidal.

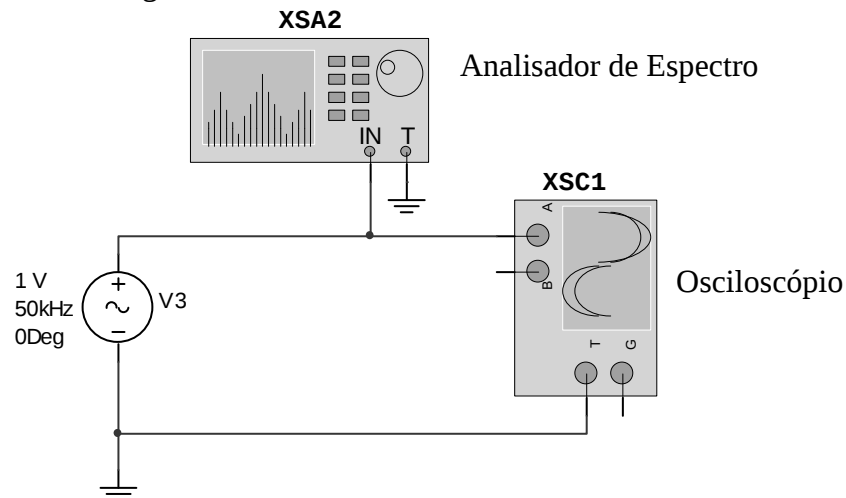


Figura 3.5 – Osciloscópio e analisador de espectro.

Vamos imaginar uma senóide de 50 kHz. Vista por um osciloscópio, esse seno é como mostrado na figura 3.6. Utilizaremos o programa *Multisim*® para simular o circuito e os instrumentos.

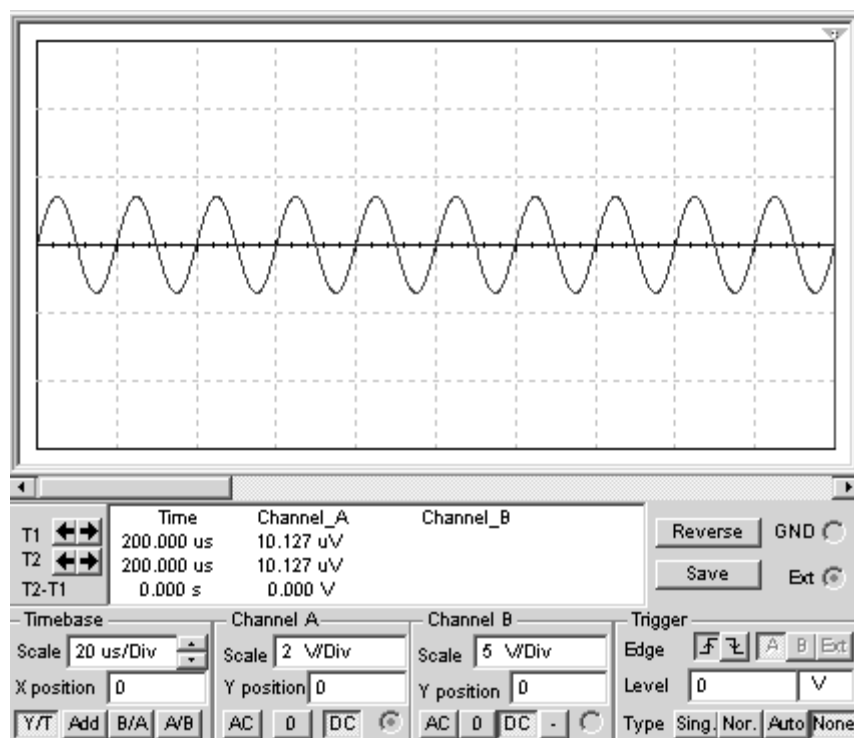


Figura 3.6 – Tela do osciloscópio e seno de 50 kHz no *Multisim*®.

Perceba que no software *Multisim*® encontramos todas as funcionalidades de um osciloscópio real.

Acabamos de ver que a representação matemática de um seno no domínio da frequência é feita por uma seta (raia espectral) em cima da frequência desse seno.

No analisador de espectro a representação da senóide de 50 kHz é bastante semelhante e é mostrada na figura 3.7 logo abaixo.

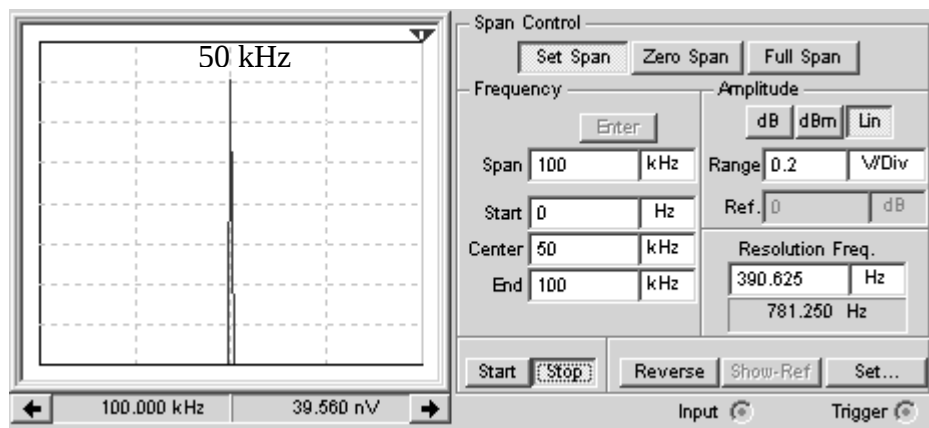


Figura 3.7 – Tela do analisador de espectro com o seno de 50 kHz no *Multisim*®.

Vejamos agora o que acontece quando temos a soma de duas funções cossenóides.

3.1.2. Sinal composto de dois senos ou cossenos.

Quando vemos mais do que uma raia espectral no domínio da frequência, o sinal no domínio do tempo e a soma de cossenóides em cada frequência assinalada no espectro.

Tomemos como exemplo o sinal visto no domínio do tempo mostrado na figura 3.8 abaixo. Nota-se pela figura que não se trata de um sinal seno ou cosseno puro.

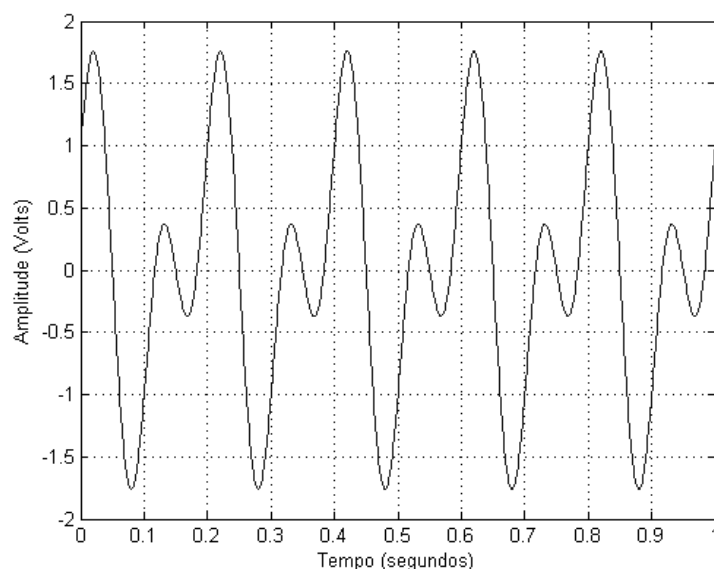


Figura 3.8 – Sinal composto mostrado no domínio do tempo.

Olhando para o sinal da figura 3.8 acima, é difícil de dizer quais as frequências que compõem esse sinal. Para isso, vamos utilizar o auxílio do analisador de espectro, que irá decompor esse sinal como mostra a figura 3.9.

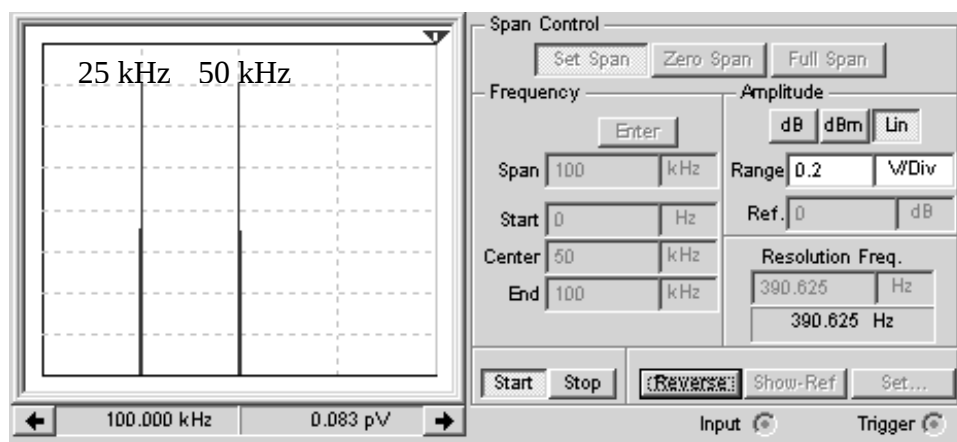


Figura 3.9 – Analisador de espectro decompondo o sinal da figura 3.8.

Com isso, percebemos que o sinal da figura 3.8 é formado pela composição de duas senóides, sendo uma de 25 kHz e a outra de 50 kHz.

Essa é a função do analisador de espectro: decompor sinais complexos (não-senoidais) em uma soma de senos e cossenos, de acordo com o teorema de Fourier. A operação que o analisador de espectro realiza em um sinal é chamada **transformada de Fourier**. Vejamos agora algumas propriedades matemáticas dos sinais.

3.2. Outras formas de representação de espectro de frequências.

Como dito anteriormente, **Fourier** foi quem primeiro afirmou que qualquer tipo de sinal pode ser decomposto em sinais senoidais de frequências múltiplas ou **harmônicas**. Isso significa que podemos representar qualquer tipo de sinal, independente de sua forma, por um conjunto de sinais senoidais de frequências múltiplas.

Como vimos anteriormente, podemos representar um espectro em função da frequência f ou da velocidade angular ω conforme a seguinte relação:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (3-1)$$

Assim, um mesmo sinal pode ser representado pelas formas indicadas na figura 3.10a e 3.10b.

Tomemos como exemplo um sinal seno de 50 Hz. Pela equação 3-1, a velocidade angular de um sinal com 50 Hz é $2 \cdot \pi \cdot 50$ que vale 314.15 radianos/segundo.

Lembrando que a unidade de velocidade angular é dada em radianos por segundo.

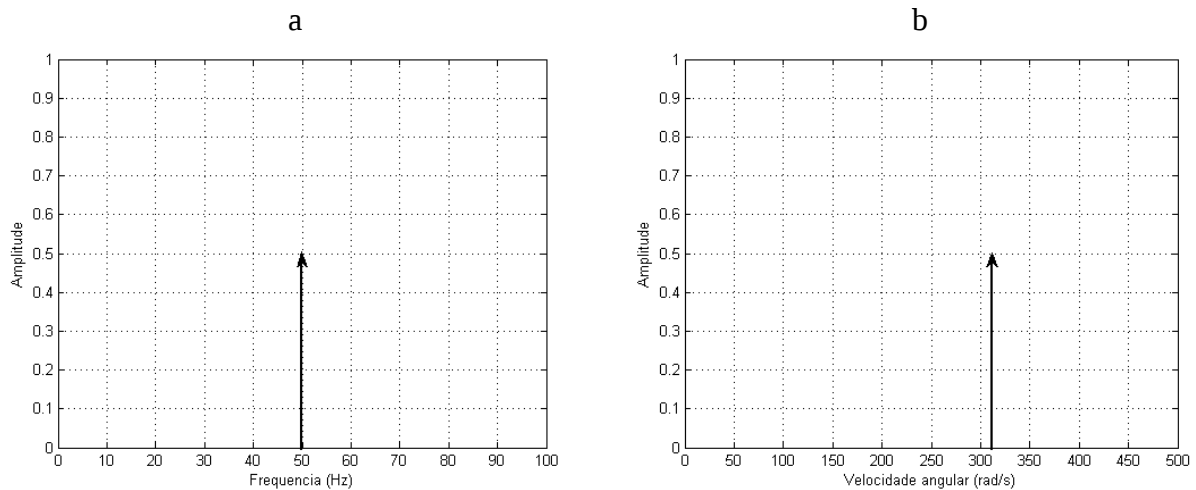


Figura 3.10 – Representação no domínio da freqüência (f) e da velocidade angular (ω).

Também é comum encontrar espectros como o visto na figura 3.11. Esse tipo de representação mostra sinais em uma faixa contínua de freqüências, como os sinais sonoros.

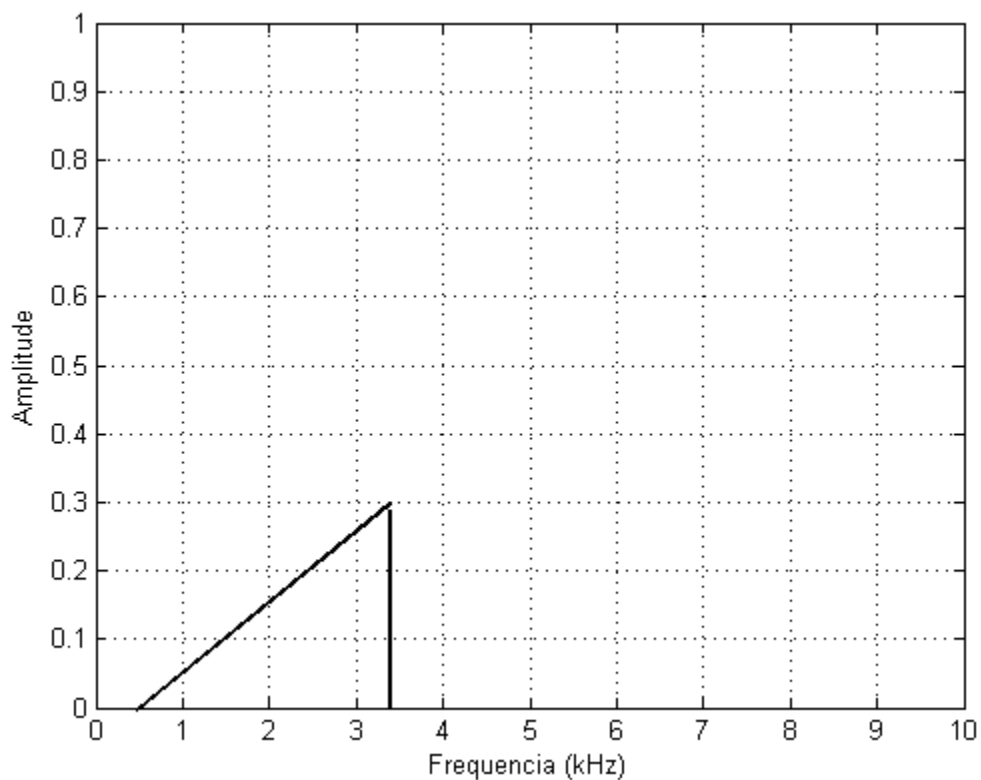


Figura 3.11 – Representação de uma faixa no espectro.

Isso significa que a cada instante poderemos ter um ou mais sinais, e que as freqüências desses sinais estão compreendida entre as freqüências limite, que estão indicadas na figura acima entre 0.3 e 3.4 kHz, por exemplo.

Esse intervalo de frequências mostrado na figura 3.11 ilustra as possíveis frequências que podem trafegar em um canal telefônico que tem largura de banda entre 0.3 e 3.4 kHz. Lembra do capítulo 1 quando falamos de inteligibilidade?

Se ao invés disso, representássemos agora a faixa espectral que o nosso ouvido pode captar, essa representação seria entre 0.2 a 20 kHz e seria como mostrado na figura 3.12.

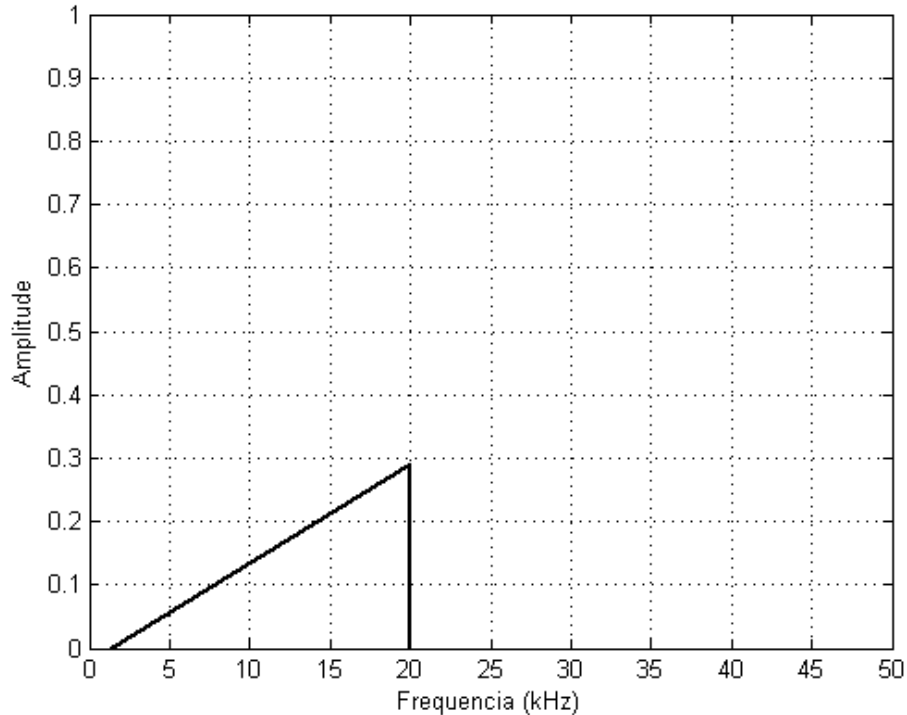


Figura 3.12 – Representação espectral da faixa audível.

Essa representação que acabamos de ver é bastante útil quando estamos analisando o espectro de sinais sonoros, por exemplo.

O Winamp possui a opção de mostrar o sinal sonoro (música) no domínio do tempo (osciloscópio) e no domínio da frequência (analisador de espectro).

A figura 3.13a mostra o Winamp no modo osciloscópio. A figura 3.13b mostra a música e suas componentes de frequência em instantes diferentes, mas sempre variando de 0.2 a 20 kHz como no exemplo da figura 3.12.

a – Domínio do tempo



b – Domínio da frequência 0.2 20 kHz

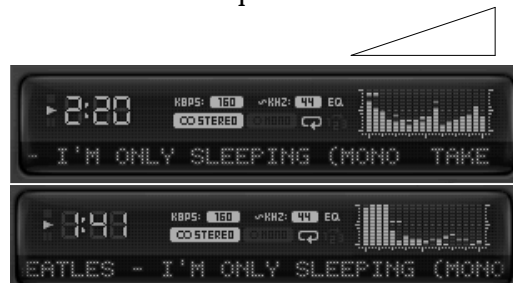


Figura 3.13 – Representação espectral a faixa audível através do Winamp®.

Perceba pela figura que mesmo em instantes diferentes, todas as frequências que a música contém se encontram na faixa entre 0.2 e 20 kHz.. Cada barra vertical no analisador de espectro do *Winamp*® é similar a **seta** que usamos pra representar senóides no domínio da frequência.

3.3. Representação matemática de sinais.

É possível obter a expressão matemática de um sinal a partir do espectro de amplitudes desse sinal. Tomemos como exemplo o sinal visto no domínio da frequência da figura 3.14.

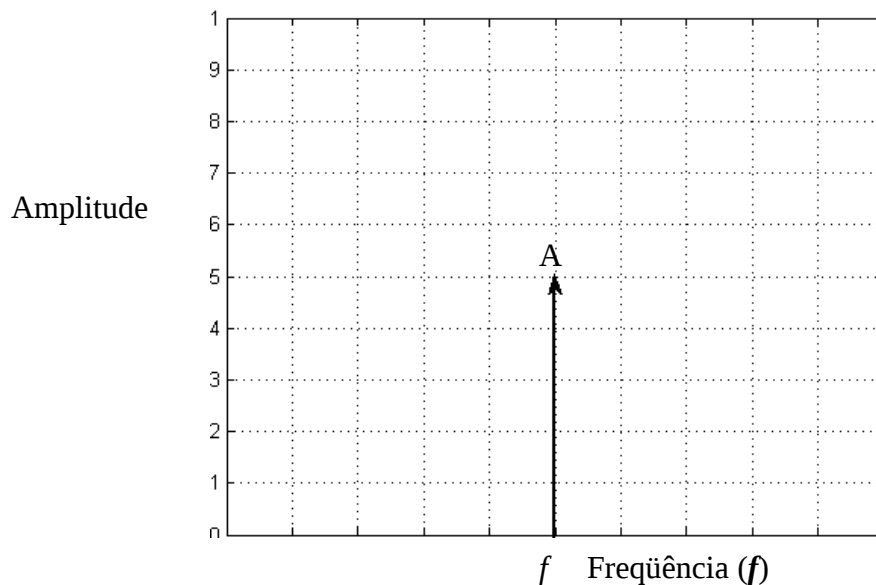


Figura 3.14 – Representação de um sinal senoidal no domínio da frequência.

Para esse sinal acima, podemos escrever a seguinte expressão em função da sua frequência ou de sua velocidade angular.

$$e(t) = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (3-2)$$

Ou ainda:

$$e(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

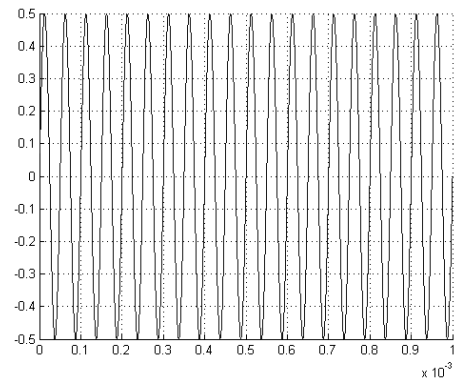
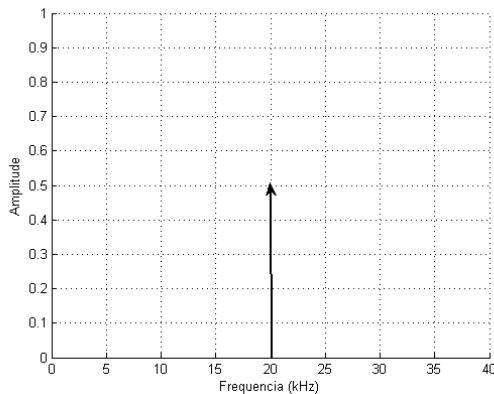
Onde A é amplitude do sinal, f é a frequência em Hz e ω é a velocidade angular em radianos por segundo.

Da mesma forma, a partir da expressão de um sinal, é possível obtermos o seu espectro de frequências. Vejamos alguns exemplos:

Exemplos

19 – Dado o sinal no domínio da frequência, escreva sua expressão matemática no domínio do tempo. Observe ao lado direito o comportamento do sinal do domínio do tempo.

a)



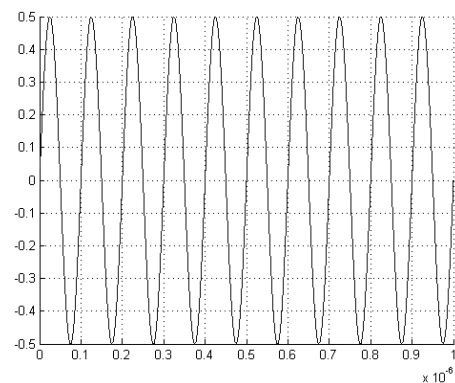
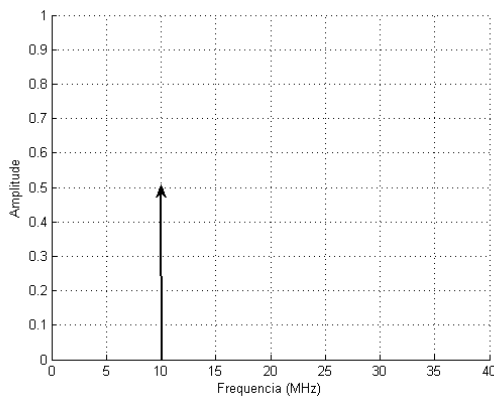
Resposta:

Pela figura, percebe-se que temos um seno puro de 20 kHz e amplitude 0.5 Volts. Com isso, pela equação 3-2, temos que:

$$e(t) = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

$$e(t) = 0.5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 20000 \cdot t)$$

b)



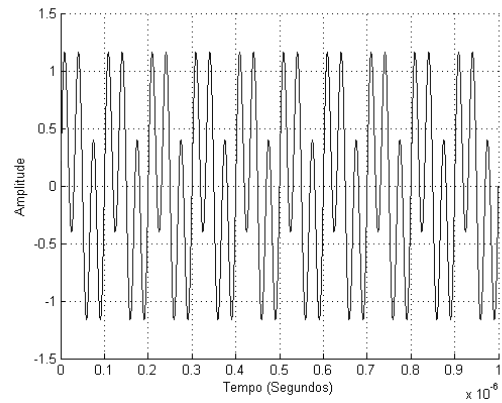
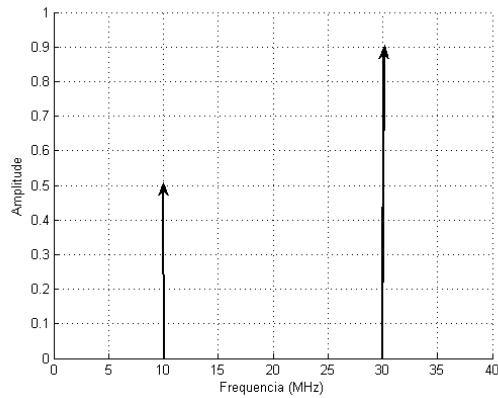
Resposta:

Pela figura, percebe-se que temos um seno puro de 10 MHz e amplitude 0.5 Volts. Com isso, pela equação 3-2, temos que:

$$e(t) = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$$

$$e(t) = 0.5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 10000000 \cdot t)$$

c)

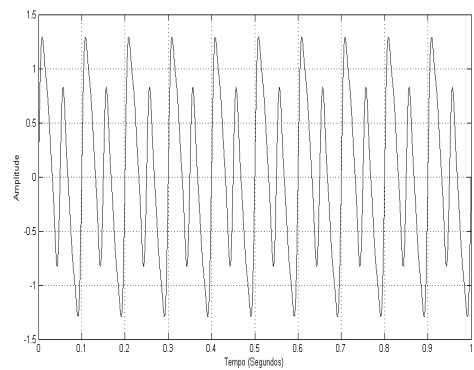
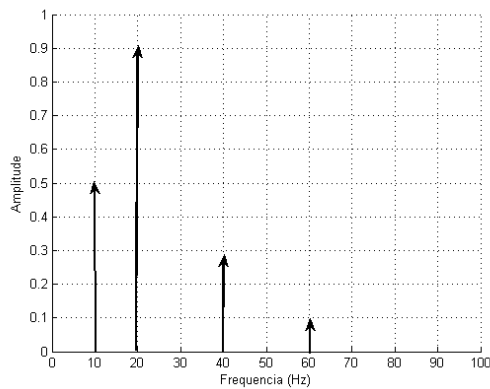


Resposta:

Pela figura, percebe-se que temos um seno puro de 10 MHz e amplitude 0.5 Volts somado com outro seno de 30 MHz e 0.9 Volts de amplitude. Com isso, pela equação 3-2, temos que:

$$e(t) = 0.5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 10000000 \cdot t) + 0.9 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 30000000 \cdot t)$$

d)

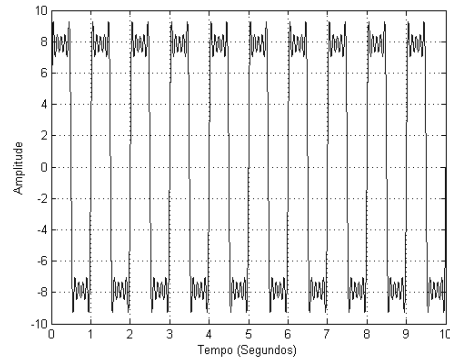
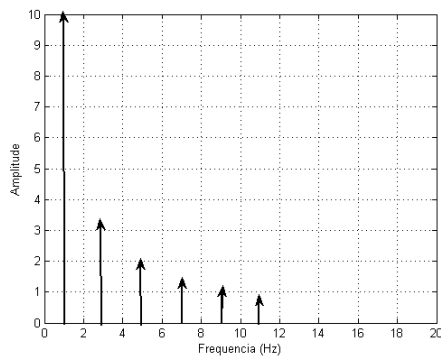


Resposta:

Pela figura, temos uma soma de quatro senos com amplitudes e frequências diferentes, tal que:

$$e(t) = 0.5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot t) + 0.9 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 20 \cdot t) + 0.3 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 40 \cdot t) + 0.1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot t)$$

e)



Pela figura, temos a frequência fundamental em 1 Hz e mais 5 componentes harmônicas. Logo, temos a expressão da onda quadrada com 5 harmônicos.

$$e(t) = 10 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot t) + 3.33 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot t) + 2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot t) + 1.4 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 7 \cdot t) + 1.1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 9 \cdot t) + 0.9 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 11 \cdot t)$$

3.4. Adição de sinais.

A representação de operações matemáticas (soma e produto) feita por blocos é muito importante em telecomunicações, pois possibilita uma visão melhor do que ocorre nos circuitos de transmissão. Para entender o processo de **modulação**, precisamos entender a matemática dos sinais realizada através de blocos.

Quando aplicamos dois sinais a um bloco somador estaremos somando as amplitudes dos sinais a cada instante de tempo. Do ponto de vista espectral, somaremos as várias raia espectrais que os sinais possam ter.

A figura 3.15 mostra o bloco somador operando entre dois sinais $e_1(t)$ e $e_2(t)$, resultando em um sinal chamado $e(t)$.

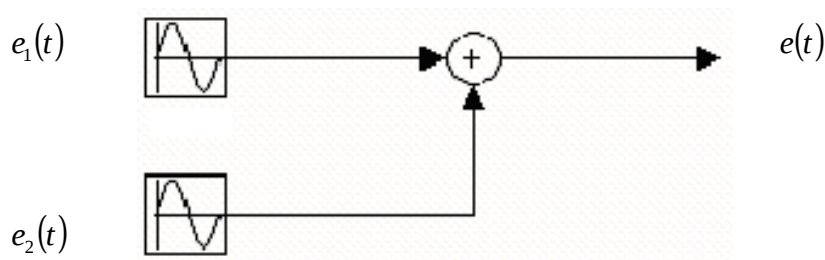


Figura 3.15 – Bloco somador de dois sinais.

Como os exemplos que vimos até agora sugeriram, quando temos a soma de dois sinais o resultado será a soma de todas as raia espectrais desses dois sinais.

Com isso, temos no bloco somador a seguinte relação matemática.

$$e(t) = e_1(t) + e_2(t) \quad (3-3)$$

Seja $e_1(t) = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t)$, e $e_2(t) = B \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot t)$, já vimos por exemplos anteriores que o resultado será $e(t) = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t) + B \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot t)$ e a análise no domínio da frequência é como mostrada na figura 3.16 abaixo, como já discutimos antes.

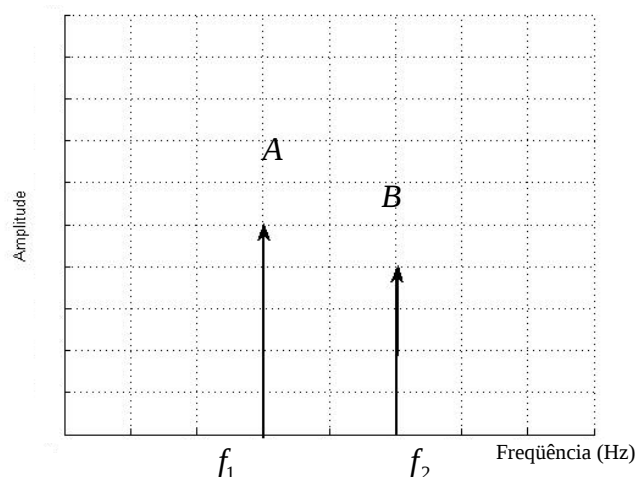


Figura 3.16 – Soma de dois senos no domínio da frequência.

3.5. Multiplicação ou batimento de sinais.

Quando dois sinais de frequências diferentes se encontram em um bloco multiplicador, ocorre um fenômeno importante chamado **batimento**. Nesse fenômeno os sinais se combinam de tal forma que ocorre uma multiplicação entre eles, como mostra a figura 3.17.

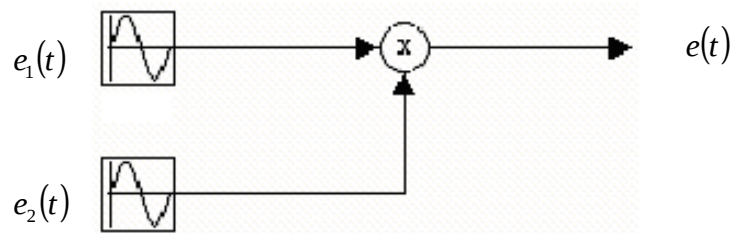


Figura 3.17 – Multiplicação de sinais.

O resultado final dessa multiplicação é o aparecimento no domínio da frequência de dois novos sinais: um que corresponde à soma das frequências e outro que corresponde à diferença dos sinais combinados.

Isso ocorre pela propriedade matemática de produto das funções seno e cosseno. Vejamos o exemplo do produto de dois cossenos com frequências diferentes f_1 e f_2 . Da trigonometria, sabemos que $A \cos(a) \cdot B \cos(b) = \frac{A \cdot B}{2} \cos(a - b) + \frac{A \cdot B}{2} \cos(a + b)$.

Seja $e_1(t) = A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t)$, e $e_2(t) = B \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot t)$. O produto de $e_1(t)$ por $e_2(t)$ no bloco multiplicador da figura 3.17 resulta em :

$$e(t) = \frac{A \cdot B}{2} \cos(2 \cdot \pi \cdot t \cdot (f_1 - f_2)) + \frac{A \cdot B}{2} \cos(2 \cdot \pi \cdot t \cdot (f_1 + f_2)) \quad (3-4)$$

Com isso, a análise no domínio da frequência para um produto de dois cossenos é dado pela figura 3.18.

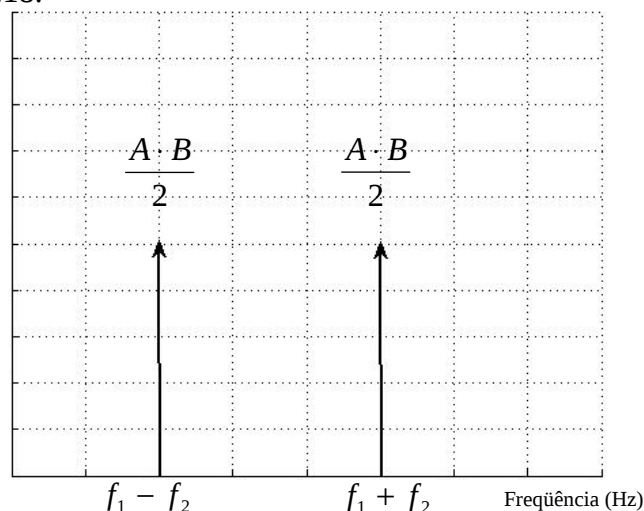


Figura 3.18 – Produto de dois cossenos no domínio da frequência.

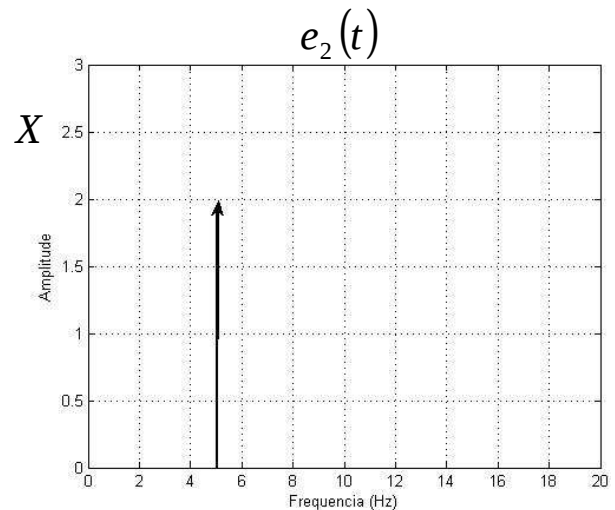
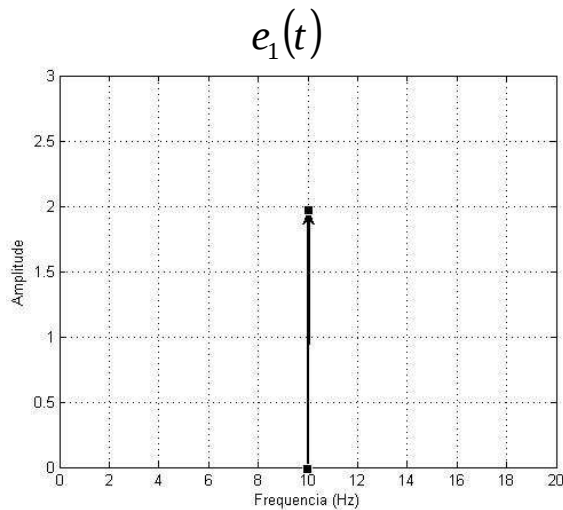
Exemplos

20 – Dado dois sinais no domínio do tempo, desenhe o espectro do produto desse dois sinais.

a) $e_1(t) = 2 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot t)$, e $e_2(t) = 2 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot t)$

Resposta:

No domínio da frequência, esses sinais $e_1(t)$ e $e_2(t)$ são representados respectivamente por:

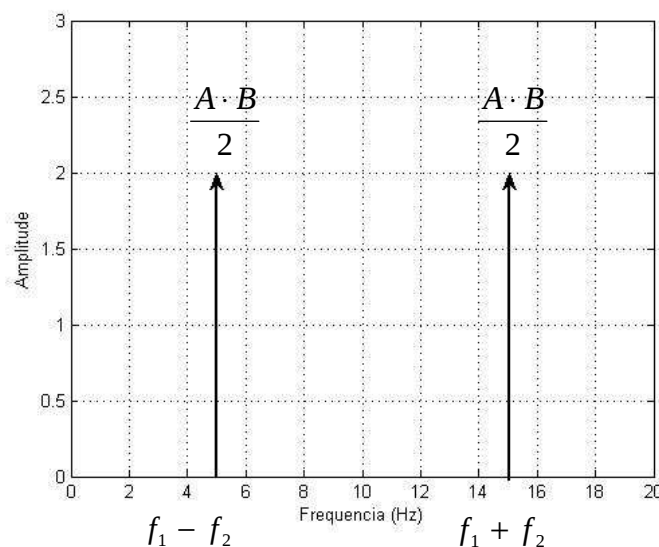


Pela fórmula 3-4 temos que:

$$e(t) = \frac{A \cdot B}{2} \cos(2 \cdot \pi \cdot t \cdot (f_1 - f_2)) + \frac{A \cdot B}{2} \cos(2 \cdot \pi \cdot t \cdot (f_1 + f_2))$$

$$e(t) = \frac{2 \cdot 2}{2} \cos(2 \cdot \pi \cdot t \cdot (10 - 5)) + \frac{2 \cdot 2}{2} \cos(2 \cdot \pi \cdot t \cdot (10 + 5))$$

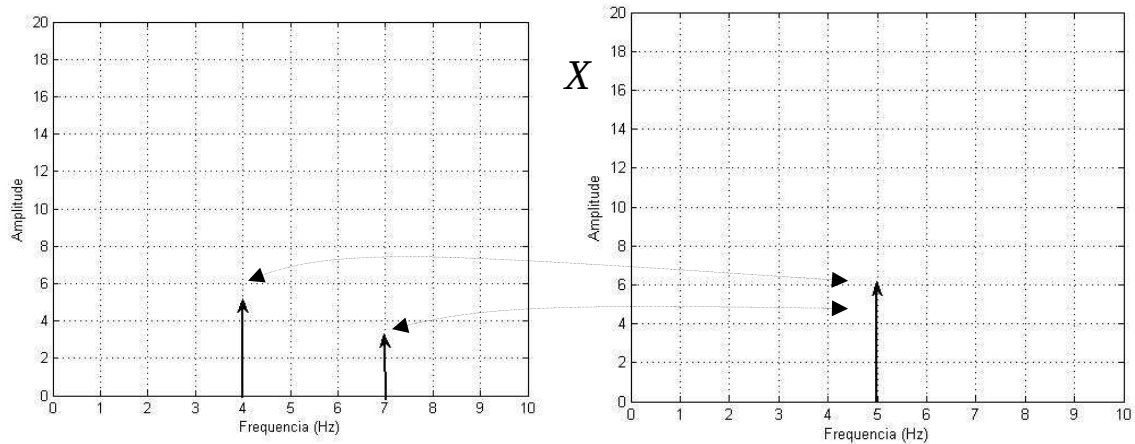
Logo, o espectro de $e(t)$ (produto do dois sinais) é representado por:



b) $e_1(t) = 5 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot t) + 3 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 7 \cdot t)$, e $e_2(t) = 2 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot t)$

Resposta:

No domínio da frequência, esses sinais $e_1(t)$ e $e_2(t)$ são representados respectivamente:



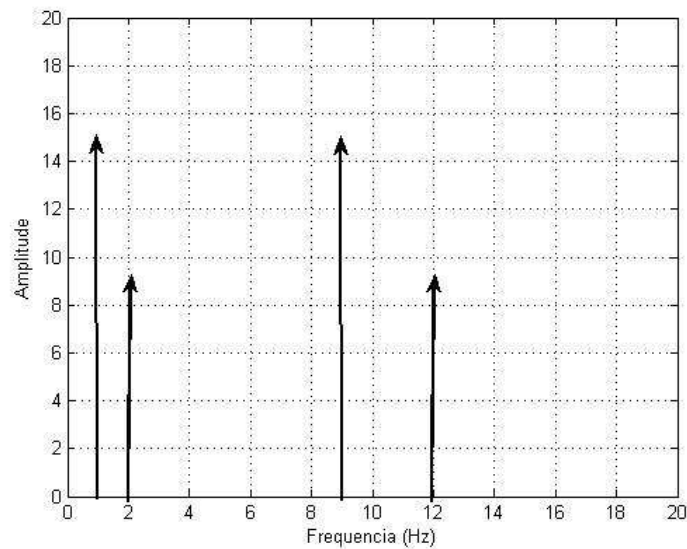
Pela fórmula 3-4 temos que:

$$e(t) = \frac{A \cdot B}{2} \cos(2 \cdot \pi \cdot t \cdot (f_1 - f_2)) + \frac{A \cdot B}{2} \cos(2 \cdot \pi \cdot t \cdot (f_1 + f_2))$$

A operação é feita nesse caso, uma raia de cada vez como no exemplo anterior:

$$\begin{aligned} e(t) &= \frac{5 \cdot 6}{2} \cos(2 \cdot \pi \cdot t \cdot (5 - 4)) + \frac{3 \cdot 6}{2} \cos(2 \cdot \pi \cdot t \cdot (7 - 5)) + \frac{5 \cdot 6}{2} \cos(2 \cdot \pi \cdot t \cdot (5 + 4)) \\ &+ \frac{3 \cdot 6}{2} \cos(2 \cdot \pi \cdot t \cdot (7 + 5)) \\ e(t) &= 15 \cos(2 \cdot \pi \cdot t \cdot 1) + 9 \cos(2 \cdot \pi \cdot t \cdot 2) + 15 \cos(2 \cdot \pi \cdot t \cdot 9) \\ &+ 9 \cos(2 \cdot \pi \cdot t \cdot 12) \end{aligned}$$

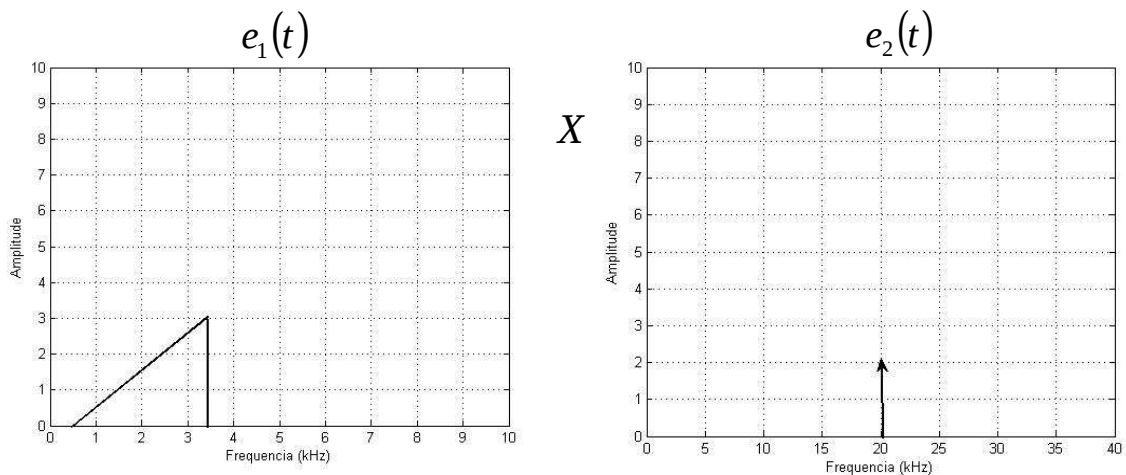
Com isso, o espectro de $e_1(t) \cdot e_2(t)$ é dado abaixo.



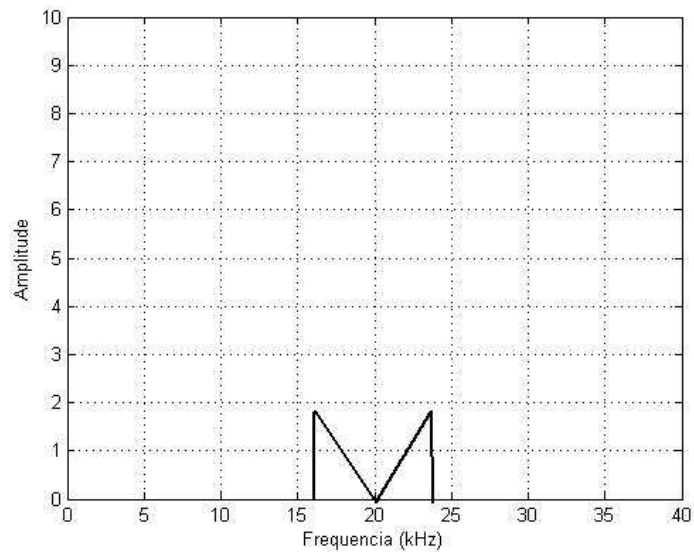
c) $e_1(t)$ = Sinal de voz limitado entre 0.3 e 4 kHz (usado em telefonia), e $e_2(t) = 2 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 20000 \cdot t)$

Resposta:

Como $e_1(t)$ é um sinal que pode possuir várias raia dentro da faixa entre 0.3 e 3.4 kHz, temos sua representação feita através de faixas contínuas. Onde $e_2(t)$ é um sinal cossenoidal puro de 20 kHz. A representação dos dois é feita respectivamente assim:



O produto dos dois sinais será obtido de forma semelhante aos exemplos anteriores, e teremos:



Ou seja, duas cópias do sinal sonoro foram deslocadas na frequência, ficando uma cópia antes e outra cópia depois de 20 kHz.

O conceito de batimento ou produto de dois sinais é muito importante, pois é nele que se baseia os fundamentos da **modulação**. A modulação será estudada mais adiante, e consiste basicamente em multiplicar uma informação por um sinal responsável por transportar essa informação através de uma onda eletromagnética, por exemplo.

Exercícios

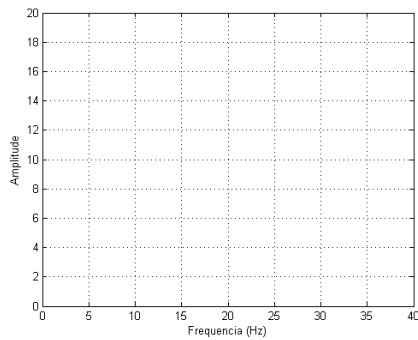
64 – Por que é importante a representação de sinais no domínio da frequência?

65 – O que é um analisador de espectro e no que se baseia o teorema de Fourier?

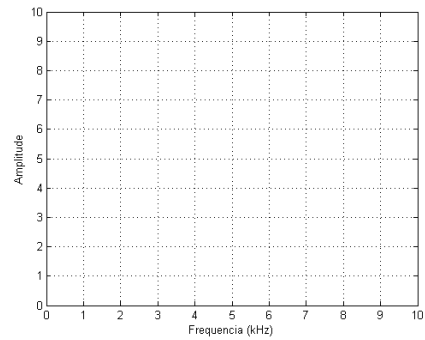
66 – Qual a forma de se representar um seno ou cosseno puro no domínio da frequência?

67 – Represente as várias funções senoidais no domínio da frequência, dada sua frequência e amplitude .

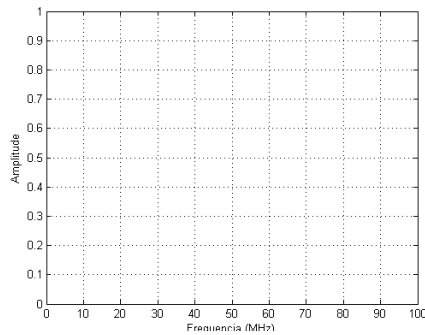
a) Amplitude 10 V, frequência 20 Hz



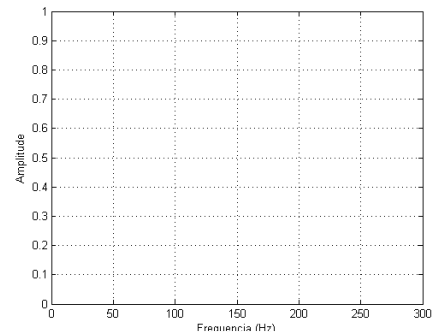
b) Amplitude 3 V, frequência 1 kHz



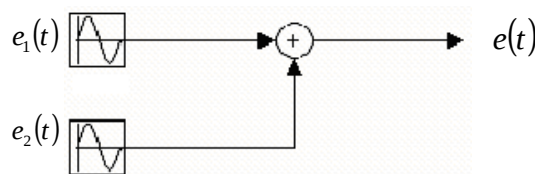
c) Amplitude 0.5 V, frequência 50 MHz



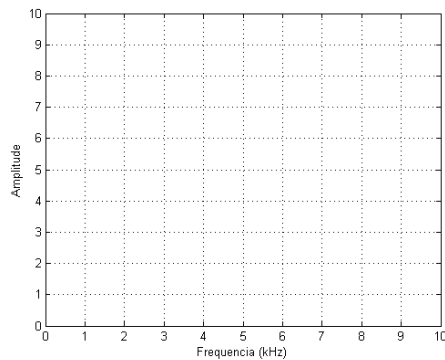
d) Amplitude 1 V, frequência 100 Hz



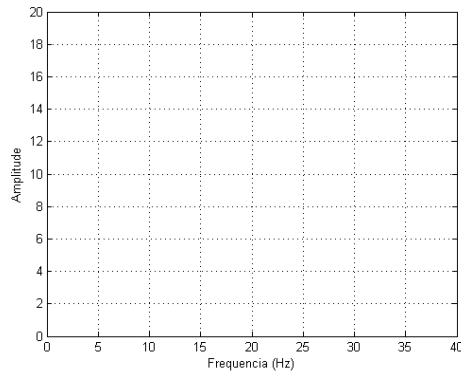
68 – Represente no domínio da frequência a soma de dois sinais senoidais, dada a expressão matemática desses dois sinais ($e_1(t)$ e $e_2(t)$) no domínio do tempo.



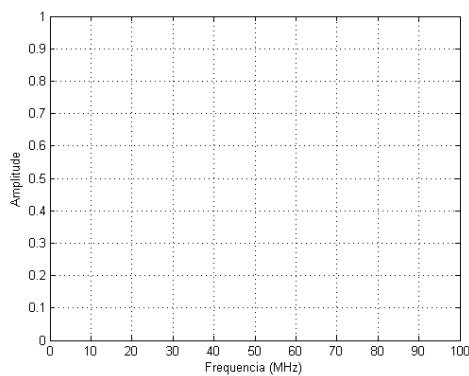
a) $e_1(t) = 5 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 2000 \cdot t)$, e $e_2(t) = 2 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot t)$



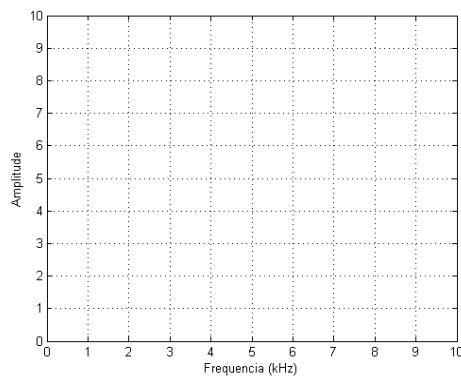
b) $e_1(t) = 10 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot t)$, e $e_2(t) = 14 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 25 \cdot t)$



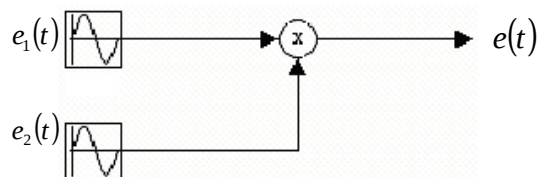
c) $e_1(t) = 1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 20 \cdot 10^6 \cdot t)$, e $e_2(t) = 0.4 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 10^6 \cdot t)$



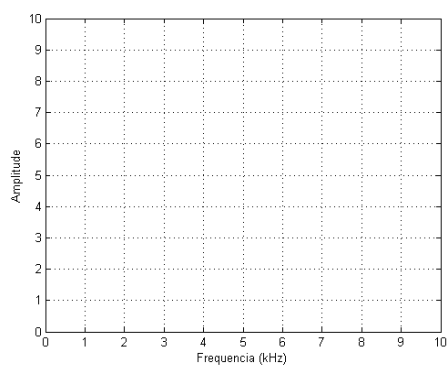
d) $e_1(t) = 8 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 10^3 \cdot t) + 5 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot t)$,
e $e_2(t) = 7 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot t)$



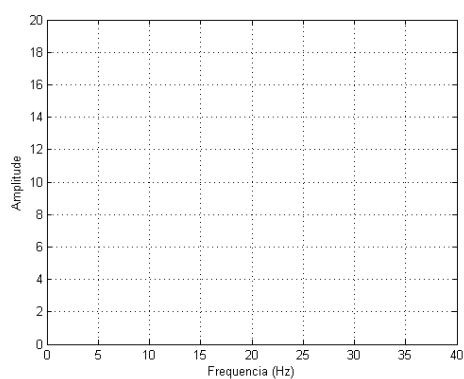
69 – Represente no domínio da frequência o produto de dois sinais senoidais, dada a expressão matemática desses dois sinais ($e_1(t)$ e $e_2(t)$) no domínio do tempo.



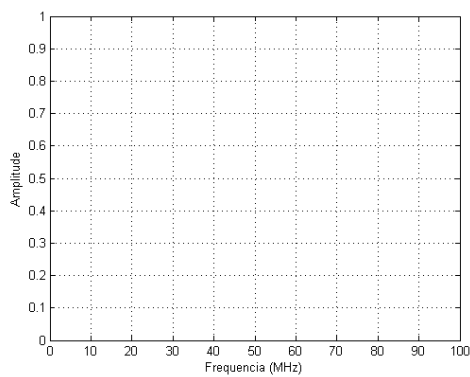
a) $e_1(t) = 5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 2000 \cdot t)$, e $e_2(t) = 2 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot t)$



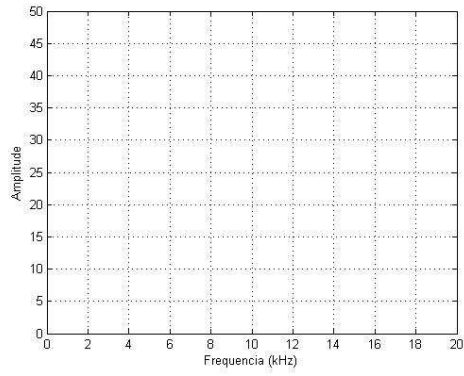
b) $e_1(t) = 10 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot t)$, e $e_2(t) = 14 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 25 \cdot t)$



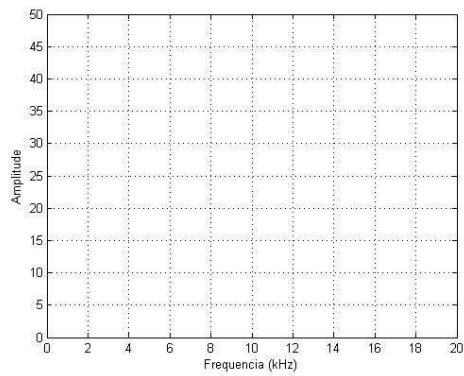
c) $e_1(t) = 1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 20 \cdot 10^6 \cdot t)$, e $e_2(t) = 0.4 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 10^6 \cdot t)$



d) $e_1(t) = 8 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot 10^3 \cdot t) + 5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot t)$,
e $e_2(t) = 7 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot t)$



e) $e_1(t)$ = Sinal de voz entre 0.3 e 3.4 kHz, e $e_2(t) = 1 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot t)$ (ignore os valores das amplitudes, faça apenas o desenho para esse item)



Filtros de sinais

Iniciação às telecomunicações

Nos capítulos anteriores estudamos alguns conceitos importantes sobre a produção e propagação das ondas eletromagnéticas, além de analisarmos a constituição de um sistema básico de comunicações. Vimos também como medir e trabalhar com sinais, representando-os tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência através de suas amplitudes.

Todos esses conhecimentos são fundamentais para que você possa avançar no curso, estudando agora o **que são e como funcionam os filtros de sinais**. Estes importantes blocos dos circuitos de comunicações estão presentes em todos os equipamentos e, por este motivo, devem ser conhecidos de todos os profissionais da área.

Nesse capítulo, portanto, você irá compreender o uso e a aplicação dos filtros de sinais, analisar o princípio de funcionamento dos filtros ativos e passivos, além de adquirir noções de cálculos básicos envolvendo esses circuitos.

4.1. Conhecendo os filtros de sinais.

Filtros são tipos de circuitos cujo ganho depende da frequência do sinal a eles aplicados. Essa característica permite que eles sejam utilizados para **selecionar** uma determinada faixa de frequências, ou para **eliminar** sinais indesejáveis, tais como ruídos.

Uma antena de rádio capta todos os sinais que estão presentes naquele local, naquele instante. Cada um dos sinais carrega sua própria informação ou simplesmente ruído.

Se não tivermos um meio de separar apenas o sinal da estação que desejamos ouvir, o receptor ficará confuso e não conseguirá captar a informação transmitida. Com isso, para separar o sinal da estação que desejamos captar, filtros são utilizados no circuito de recepção.

De uma forma geral pode-se afirmar que existem quatro tipos de filtros:

- **Filtro passa-baixas:** Permite que os sinais com frequência abaixo de uma frequência determinada passem para a saída, eliminando todos os sinais com frequências superiores.
- **Filtro passa-altas:** Funciona de maneira inversa ao passa-baixas. Deixando passar para a saída apenas os sinais cujas frequências estejam acima de um certo valor.
- **Filtro passa-faixa:** Permite a seleção de apenas uma faixa de frequências, ou seja, apenas essa faixa (intervalo) selecionada passará para a saída do filtro.
- **Filtro rejeita-faixa:** Atua de forma inversa ao filtro passa-faixa, eliminando os sinais contidos em um determinado intervalo de frequências definido.

Um filtro ideal seria aquele que permitisse um ganho constante diferente de zero para qualquer sinal com frequência dentro da faixa de atuação do filtro, e que para todas as outras frequências o ganho seria nulo. Porém na prática, o filtro ideal é impossível de se obter.

Além da separação dos diversos tipos de filtros segundo as frequências ou faixas que podem deixar passar ou bloquear, também podemos dividir os filtros em dois grupos: **filtros passivos** e **filtros ativos**.

Os **filtros passivos** são aqueles que utilizam apenas resistores, capacitores ou indutores. Nesse filtros, o sinal selecionado não sofre ampliações.

Os **filtros ativos**, conforme o nome sugere, usam elementos ativos como amplificadores operacionais, transistores, etc. Desse modo, ao passar por eles, o sinal selecionado pode ser amplificado, aparecendo na saída maior do que na entrada (ganho positivo).

Para que se tenha uma melhor idéia de como cada filtro funciona, é interessante estudar seus comportamentos através de **gráficos que relacionam frequência e ganho**, chamados **Diagramas de Bode**. Nesses gráficos a linha contínua representa o comportamento do filtro real, enquanto a linha tracejada representa o comportamento de um filtro ideal.

4.1.1. Filtro passa-baixas.

Na figura 4.1 representamos a curva de resposta de um filtro passa-baixas. Como dissemos anteriormente, esse filtro apenas deixa passar sinais com frequência abaixo da frequência de corte f_c . Observe que para o filtro real, as frequências acima da frequência de corte f_c não são rejeitadas imediatamente, mas vão encontrando uma dificuldade cada vez maior a medida que a frequência se eleva.

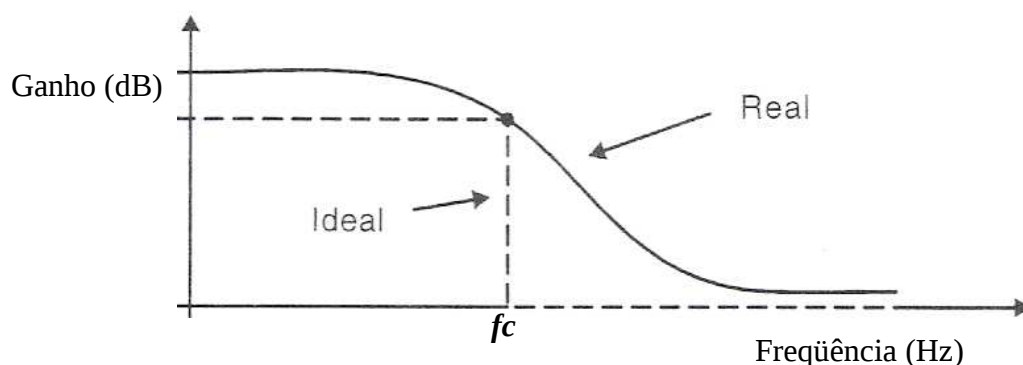


Figura 4.1 – Resposta em frequência (diagrama de Bode) do filtro passa-baixas.

4.1.2. Filtro passa-altas.

De forma semelhante, temos na figura 4.2 a curva que representa o comportamento de um filtro passa-altas. Veja que, nesse caso também, a comparação entre o filtro ideal e real. O filtro ideal deixa passar imediatamente as frequências acima da frequência de corte f_c , enquanto que o filtro real não atua imediatamente.

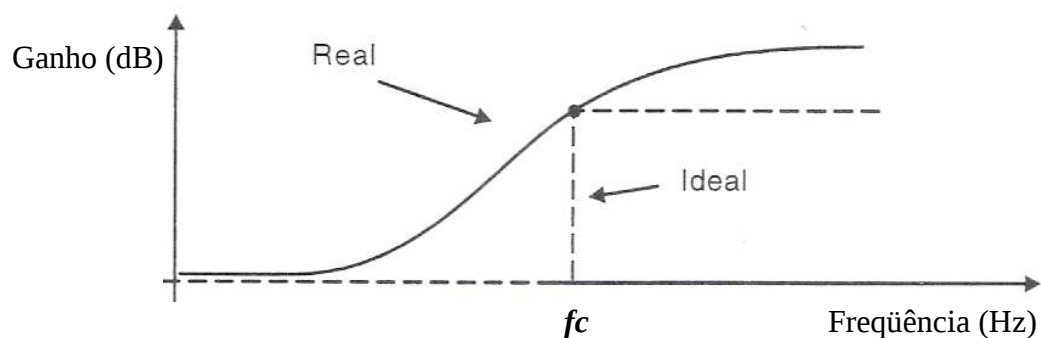


Figura 4.2 – Resposta em frequência (diagrama de Bode) do filtro passa-altas.

4.1.3. Filtro passa-faixa.

Como foi dito no início do capítulo, temos na figura 4.3 a curva que mostra o comportamento de um filtro passa-faixa. Esse filtro deixa passar apenas uma certa faixa de frequências entre dois valores $fc1$ e $fc2$.

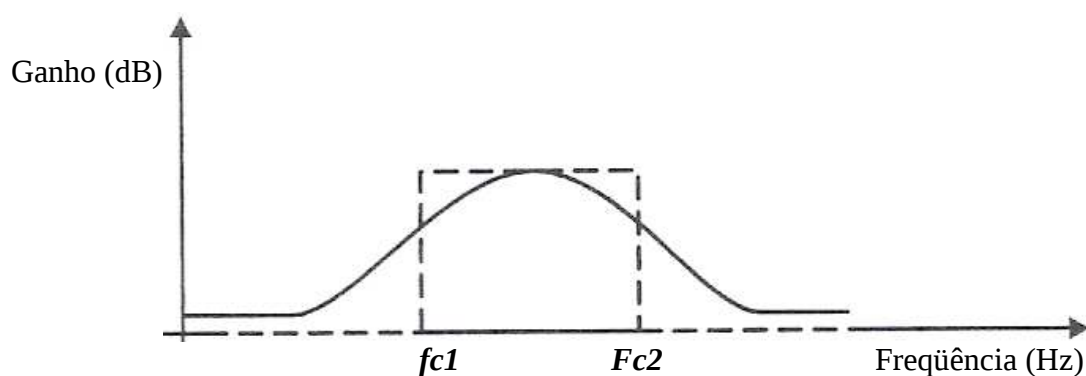


Figura 4.3 – Resposta em frequência do filtro passa-faixa.

4.1.4. Filtro rejeita-faixa.

Esse filtro rejeita uma determinada faixa de frequências entre $fc1$ e $fc2$, ao contrário do filtro passa-faixa. Observa-se também nesse caso, a diferença entre a ação real do filtro e a ação ideal, mostrada na figura 4.4 abaixo.

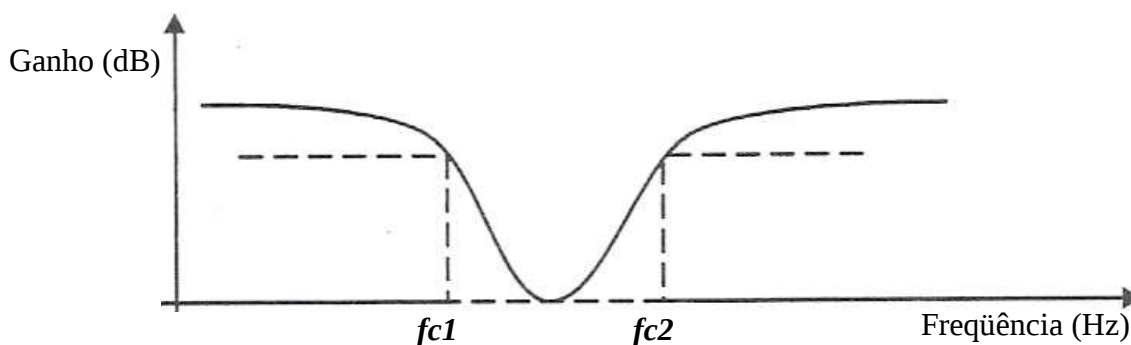


Figura 4.4 – Resposta em frequência do filtro passa-faixa.

4.2. Filtros passa-faixa passivos.

Esses filtros se baseiam no fenômeno da ressonância que ocorre em circuitos LC, ou seja, formados por indutor e um capacitor.

Na figura 4.5 temos a configuração básica para esse tipo de filtro, também conhecido como circuito ressonante série:

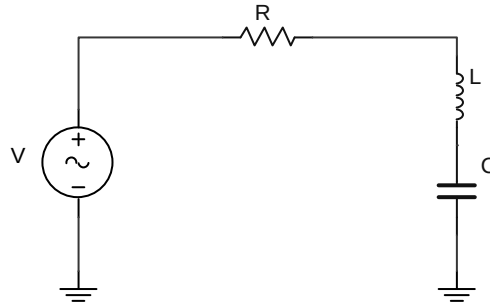


Figura 4.5 – Filtro passa-faixa passivo em série.

Nesse circuito sempre existe uma frequência, na qual as reatâncias capacitiva (X_C) e indutiva (X_L) são iguais. Quando isso ocorre, dizemos que o circuito está em ressonância, e a essa frequência chamamos de **frequência ressonante**.

Quando submetido a essa frequência, o circuito terá ganho máximo se medimos a tensão no resistor R.

Sabemos que a impedância equivalente dos três componentes (resistor, indutor e capacitor) pode ser expressa pela seguinte equação:

$$Z_{EQ} = R + Z_L + Z_C \quad (4-1)$$

$$Z_{EQ} = R + j \cdot \omega \cdot L - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C}$$

Quando ocorre a ressonância:

$$\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$\omega^2 = \frac{1}{L \cdot C}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$2 \cdot \pi \cdot f = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$$

Com isso, temos que a **frequência de ressonância** do circuito da figura 4.5 é dada por:

$$fr = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (4-2)$$

Como as impedâncias capacitiva e indutiva têm ângulos opostos, no momento em que as duas assumem o mesmo valor em módulo elas se anulam no circuito, fazendo com que a impedância total seja a mínima, e o ganho seja máximo.

4.2.1 Banda passante do filtro.

Conforme vimos, um filtro real tem uma característica tal que, quando nos aproximamos de sua frequência de operação, há uma transição lenta de suas características.

Assim, na prática, é importante definir exatamente o momento em que suas características de filtro se tornam atuantes, ou seja, o nível de sinal que passa ou deixa de passar.

A frequência de corte (ou as frequências de corte) de um filtro é definida como sendo aquela cujo sinal sofre uma atenuação de 3 dB (70% do sinal de entrada) na saída.

No caso do filtro passa-faixa, as duas frequências de corte são definidas como sendo aquelas ao redor da frequência central (ressonância) onde temos atenuação de 3 dB. A figura 4.7 mostra como se define a frequência de corte no filtro passa-faixa.

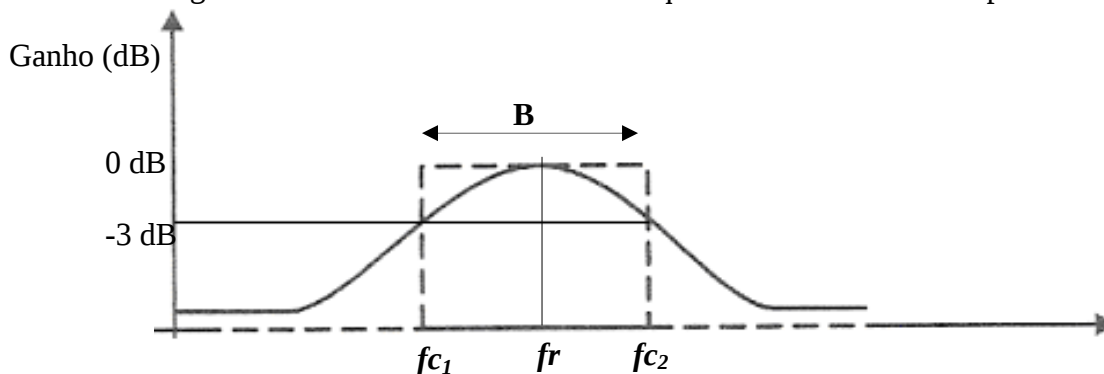


Figura 4.7 – Filtro passa-faixa e suas frequências de corte

A **banda passante B** de um filtro, como o nome sugere, é a faixa de frequências na qual o filtro atua, ou seja, é a faixa de frequência que o filtro permitirá que sinais passem para a saída (no caso do filtro passa-faixa) com uma atenuação menor que 3 dB

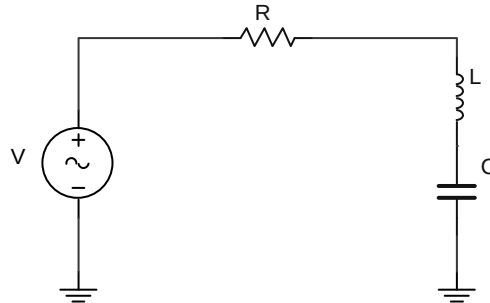
A banda passante B de um filtro passa-faixa pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$B = fc_2 - fc_1 \quad (4-3)$$

Com o auxílio do *software* Multisim®, calcularemos a largura de banda ou banda passante do circuito série ressonante.

Exemplos

21 – Dado o filtro passa-faixa abaixo, faça:



- a) Calcule de ressonância
- b) Usando o Multisim®, determine as frequências de corte f_{c1} e f_{c2} bem como a largura de banda do filtro.

Dados:

$R = 150 \, \Omega$
 $L = 1 \, \text{mH}$
 $C = 100 \, \text{nF}$

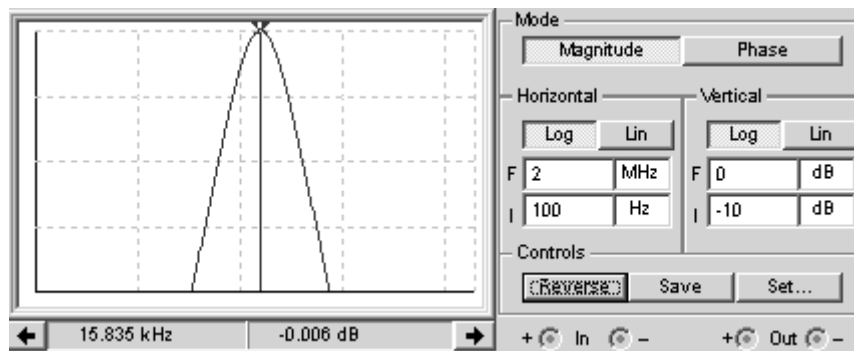
Resposta:

- a) Pela fórmula 4-2 da ressonância, temos que:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$
$$f_r = \frac{1}{2 \cdot 3.1415 \cdot \sqrt{10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-9}}}$$
$$f_r = 15.923 \, \text{kHz}$$

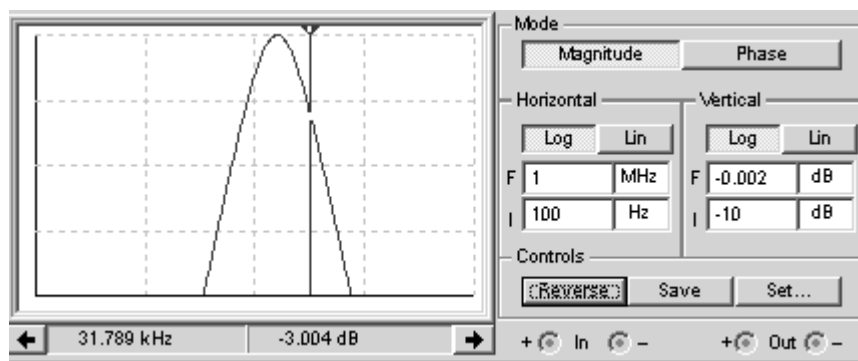
- b) Usando a ferramenta *Bode Plotter* do Multisim®, desenha-se o circuito e posiciona-se a ferramenta no circuito. Essa ferramenta (bloco) do simulador permite traçarmos o diagrama frequencial do circuito, também conhecido por diagramas de Bode.

As figuras abaixo mostram a tela do *Bode Plotter* que se assemelham bastante com a tela de um analisador de espectro.



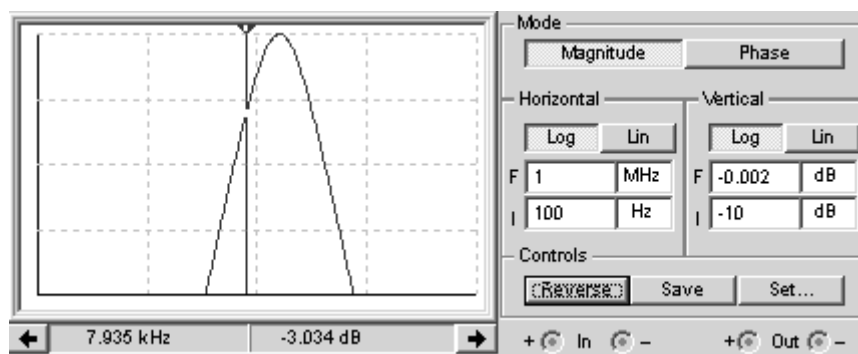
Pela figura acima, temos que a frequência de ressonância (0 dB), onde temos teremos a menor impedância do circuito foi de 15.825 kHz, ou seja, bem próximo do que fora calculado no item anterior.

Para acharmos a frequência de corte superior (f_{c2}), andamos com o marcador para a direita até termos um ganho de -3 dB, como mostra a figura abaixo.



Com isso, temos que f_{c2} é aproximadamente 32 kHz.

Para acharmos a frequência de corte inferior (f_{c1}), andamos com o marcador para a esquerda até termos uma ganho de -3 dB, como mostra a figura abaixo.



Com isso, temos que f_{c1} é aproximadamente 8 kHz.

Pela expressão da largura de banda (4-3) temos que:

$$B = f_{c2} - f_{c1}$$

$$B = 32 - 8$$

$$B = 24 \text{ kHz}, \text{ que é a largura de banda do filtro passa-faixa.}$$

4.3. Filtros passa-baixas passivo.

Como já foi dito, esses filtros permitem que os sinais com frequência abaixo da frequência de corte passem para a saída.

A figura 4.8 mostra o exemplo onde temos um sinal de entrada $e(t)$ cuja análise em espectro resulta em frequência fundamental e algumas harmônicas até 5 kHz. Se passarmos esse sinal em um filtro passa-baixas ideal, poderemos eliminar alguns harmônicos indesejados, onde esse mesmo princípio se aplica também aos outros filtros

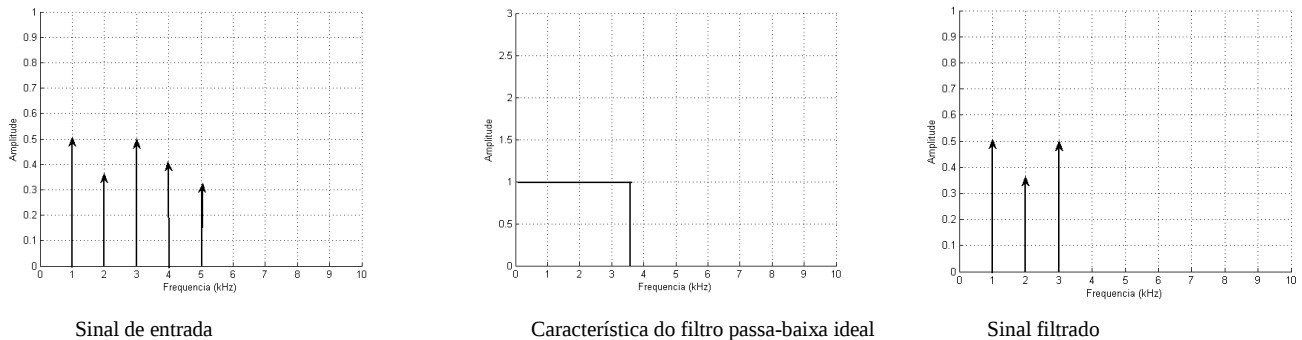


Figura 4.8 – Sinal sendo filtrado por um filtro passa-baixa

Nesse caso, tivemos um sinal que tinha largura de banda de 5 kHz que passou por um filtro passa-baixas ideal de 3.5 kHz, e duas componentes harmônicas foram filtradas. Esse mesmo princípio é válido para os outros tipos de filtros que vimos no início do capítulo.

Para elaborar um filtro passa-baixas elementar com componentes passivos, a forma mais comum é utilizar um circuito RC como mostra a figura 4.9

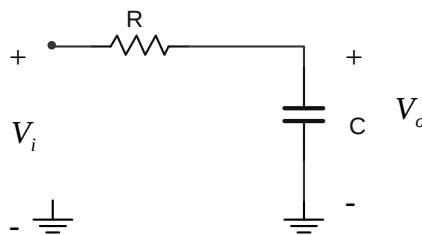


Figura 4.8 – Filtro passa-baixas passivo RC.

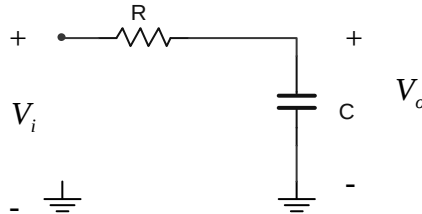
Podemos calcular a frequência de corte do filtro passa-baixas passivo da figura 4.8 pela seguinte expressão:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (4-4)$$

Onde f_c é a frequência de corte em Hertz, R é a resistência em ohms e C a capacitância em Farads.

Exemplos

22 - Dado o filtro passa-baixa abaixo, faça:



- a) Calcule a frequência de corte.
b) Usando o Multisim®, verifique a frequência de corte e compare com a frequência calculada do item anterior.

Dados:

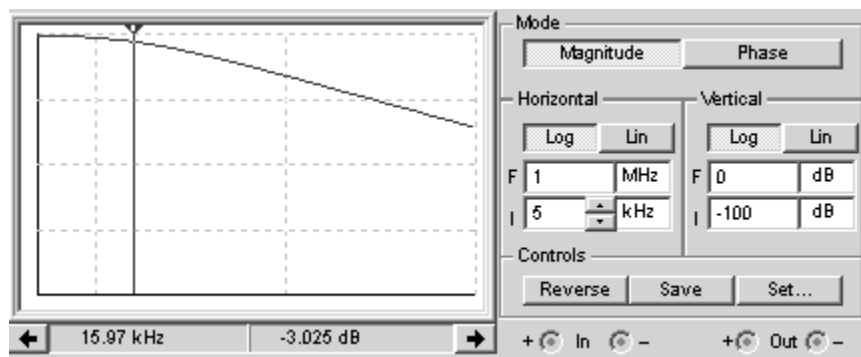
$$R = 100 \, \Omega$$
$$C = 100 \, \text{nF}$$

Resposta:

- a) Pela expressão 4-4 do cálculo da frequência de corte, temos que:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$
$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 100 \cdot 10^{-9}}$$
$$f_c = 15.915 \, \text{kHz}$$

- b) Usando a ferramenta *Bode Plot* do Multisim, temos que a frequência de corte é aquela observada quando há uma queda de 3 dB no sinal (70% do sinal de entrada na saída):



Com isso, observou-se uma frequência medida no Multisim igual ao calculado no item a.

4.4. Filtro passa-altas passivo.

Os filtros passa-altas são exatamente o oposto dos filtros passa-baixas. Eles permitem que os sinais com frequência acima da frequência de corte passem para a saída sem encontrar oposição.

Na figura 4.9 temos o filtro passa-altas ideal agindo em um sinal composto de alguns harmônicos.

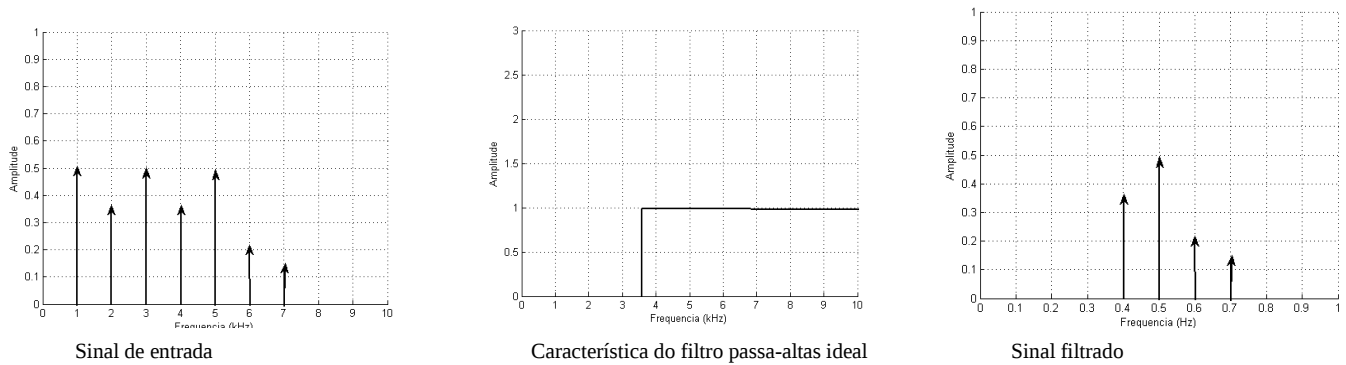


Figura 4.9 – Sinal sendo filtrado por um filtro passa-altas.

Novamente, para se elaborar um filtro passa-altas elementar, utiliza-se um circuito RC como mostrado na figura 4.10. Observe que a posição dos elementos passivos é ao contrário em relação ao filtro passa-baixas que vimos no item passado.

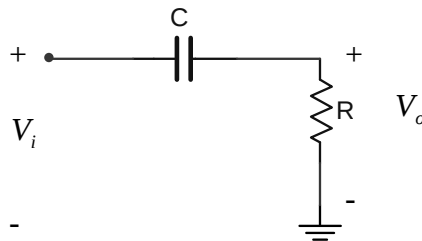


Figura 4.10 – Filtro passa-altas passivo RC.

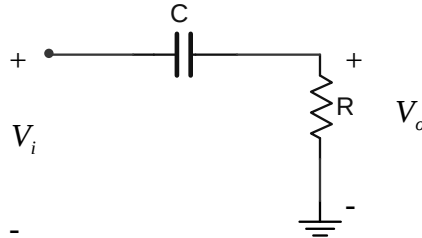
Podemos calcular a frequência de corte do filtro passa-altas passivo pela seguinte expressão, idêntica ao do filtro passa-baixas.

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (4-5)$$

Onde f_c é a frequência de corte em Hertz, R é a resistência em ohms e C a capacitância em Farads.

Exemplos

23 - Dado o filtro passa-altas abaixo, faça:



- Calcule a frequência de corte.
- Usando o Multisim®, verifique a frequência de corte e compare com a frequência calculada do item anterior.

Dados:

$$R = 150 \, \Omega$$

$$C = 27 \, \text{nF}$$

Resposta:

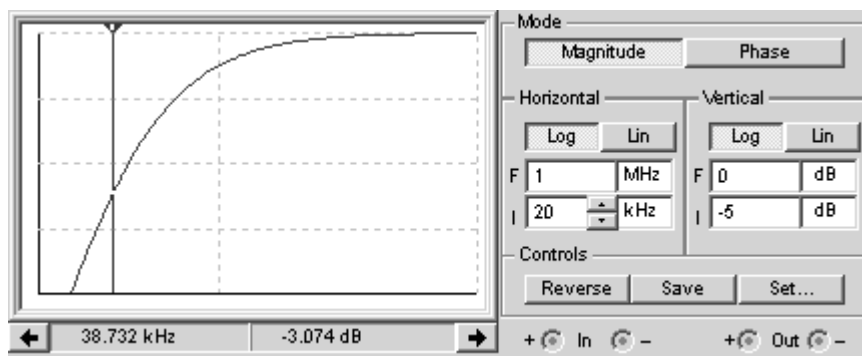
- Pela expressão 4-5 do cálculo da frequência de corte, temos que:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 150 \cdot 27 \cdot 10^{-9}}$$

$$f_c = 39.298 \, \text{kHz}$$

- Usando a ferramenta *Bode Plot* do Multisim, temos que a frequência de corte é aquela observada quando há uma queda de 3 dB no sinal (70% do sinal de entrada na saída):



Com isso, observou-se uma frequência medida no Multisim bem próxima do calculado no item a.

4.5. Filtros ativos.

Os **filtros ativos** são circuitos que reúnem, em um mesmo bloco, as redes responsáveis pela filtragem e amplificação. O resultado é um efeito de amplificação para as frequências selecionadas, o que significa que eles possuem ganhos maiores que 1 (maiores que 0 dB), ao contrário dos filtros passivos.

Na prática, são usados principalmente amplificadores operacionais como elemento ativo, mas existem outras possibilidades, como por exemplo, transistores, FETs, válvulas, etc.

Os filtros ativos de segunda ordem ou de ordem superior se aproximam mais do filtro ideal, ou seja, eles possuem uma ação mais rígida em rejeitar ou deixar passar os sinais desejados.

Os filtros passivos de primeira ordem que vimos anteriormente nem sempre se aplicam em telecomunicações, pois às vezes deseja-se filtrar sinais que se encontram muito próximos, e uma ação mais rígida do filtro deve ser tomada.

Vejamos agora alguns exemplos de filtros ativos **Sallen-Key** de segunda ordem. Sallen e Key foram cientistas que estudaram filtros ativos na década de 50 e desenvolveram algumas fórmulas rápidas para obtenção dos principais tipos de filtros que vimos aqui nesse capítulo.

4.5.1. Filtro passa-baixas ativo.

A figura 4.11 mostra a configuração utilizada por Sallen-Key para obtenção de forma simples de um filtro passa-baixas ativo de segunda ordem.

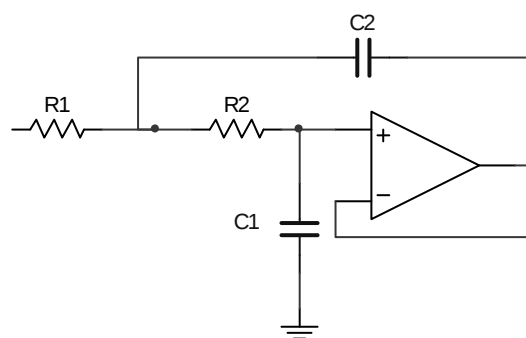


Figura 4.11 – Filtro passa-baixas ativo de segunda ordem.

Para essa configuração Sallen-Key, temos que a frequência de corte é calculada por:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}} \quad (4-6)$$

4.5.2. Filtro passa-altas ativo.

A figura 4.12 mostra a configuração utilizada por Sallen-Key para obtenção de forma simples de um filtro passa-altas ativo de segunda ordem.

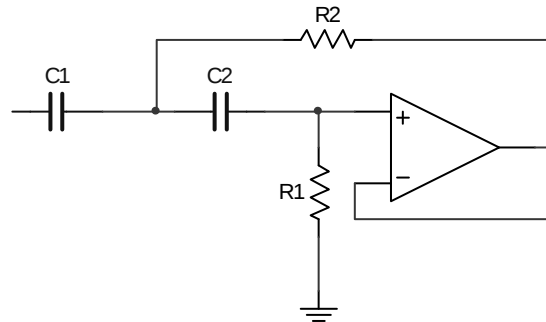


Figura 4.12 – Filtro passa-altas ativo de segunda ordem.

Para essa configuração Sallen-Key, temos que a frequência de corte é calculada por:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}} \quad (4-7)$$

4.5.3. Filtro passa-faixa ativo.

A figura 4.13 mostra a configuração utilizada por Sallen-Key para obtenção de forma simples de um filtro passa-faixa ativo de segunda ordem. Perceba que esse filtro é uma combinação dos filtros passa-baixas e passa-altas.

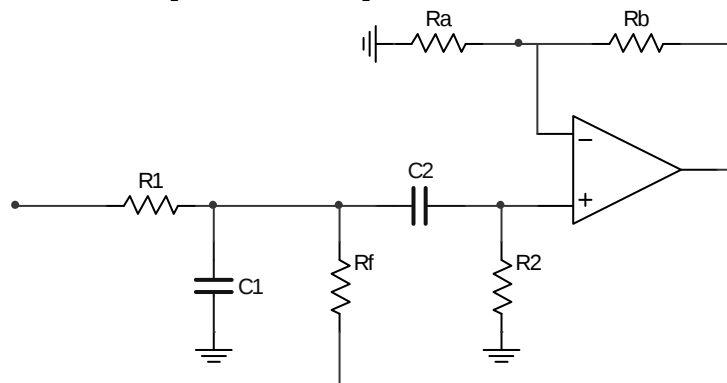


Figura 4.13 – Filtro passa-faixa ativo de segunda ordem.

Para essa configuração Sallen-Key, temos que a frequência de ressonância é calculada por:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{R_f + R_1}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot R_f}} \quad (4-8)$$

O ganho em dB na frequência de ressonância é dado por:

$$G(\text{dB}) = 20 \cdot \log\left(1 + \frac{R_b}{R_a}\right) \quad (4-9)$$

Para esse filtro, aconselha-se que:

$$C_1 = C_2$$

$$R_2 = 2 \cdot R_1$$

4.6. Ordem de um filtro.

Às vezes se faz necessário que o filtro tenha um comportamento próximo do ideal de forma que um filtro passivo de primeira ordem que vimos nos itens anteriores não consiga filtrar totalmente o sinal.

Vejamos o exemplo de um sinal composto de vários harmônicos mostrado na figura 4.10.

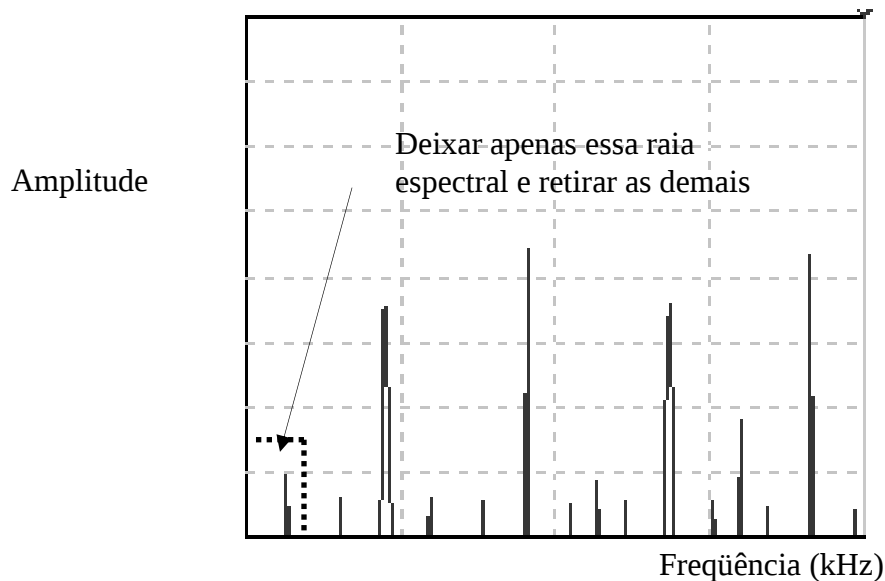


Figura 4.14 – Sinal composto de vários harmônicos que precisa ser filtrado.

A intenção nesse exemplo é selecionar apenas a primeira raia espectral mostrada dentro das linhas pontilhadas na figura acima, e rejeitar as outras restantes. Nesse exemplo, essa primeira raia espectral se encontra dentro de uma faixa de 0 até 4 kHz, de forma que deveremos projetar um filtro passa-baixas de 4 kHz para filtrarmos esse sinal

A tabela 4.1 compara vários tipos de filtros passa-baixa com $f_c = 4\text{KHz}$, de acordo com sua ordem, resposta em frequência, e mostra sua capacidade de retirar os harmônicos existentes acima de 4 KHz

Perceba que quando a ordem do filtro aumenta, a inclinação no diagrama de Bode também aumenta (coluna 1), e o sinal vai sendo melhor filtrado (coluna 3). No filtro de 6ª ordem temos uma eliminação de todos os harmônicos indesejados.

Tabela 4.1 – Comparação entre filtros passa-baixa de frequência de corte $f_c = 4 \text{ KHz}$ de diferentes ordens.

Ordem do filtro	Resposta em frequência (Diagrama de Bode)	Circuito	Espectro do sinal de saída
1ª			
2ª			
4ª			
6ª			

4.6.1. Utilizando o *software* FilterLab® para projeto de filtros.

Nem sempre projetar filtros é uma tarefa matematicamente simples, de forma que devemos conhecer a teoria dos filtros e procurar na maioria das vezes o auxílio de alguma ferramenta computacional para o cálculo dos parâmetros.

A empresa Microchip® distribui gratuitamente na Internet um software chamado **FilterLab®** que se destina ao cálculo de forma rápida de filtros do tipo passa-baixa, passa-alta e passa-faixa. Esse *software* possui a capacidade de retornar ao usuário o circuito desejado para a frequência escolhida, bem como mostra o diagrama de Bode do filtro.

A figura 4.11 mostra a tela principal do programa FilterLab®.

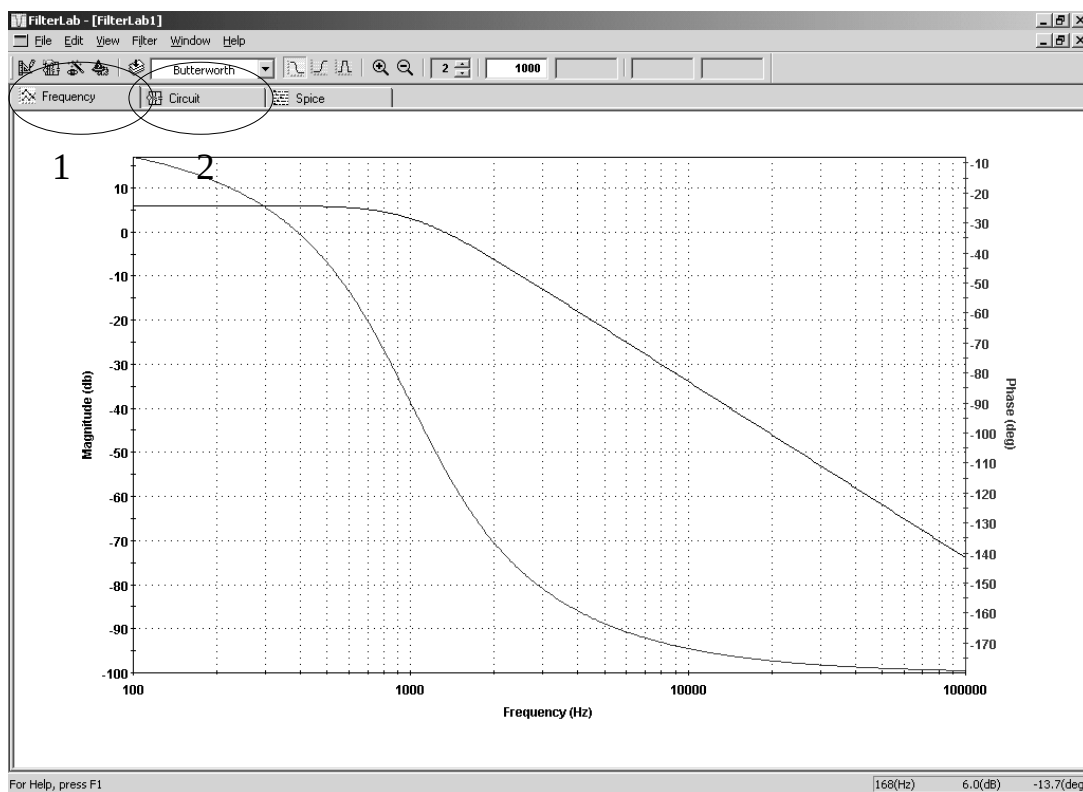


Figura 4.15 – Tela principal do FilterLab®.

Na tela principal identifica-se as partes mais importantes indicadas por 1 e 2 na figura 4.15 acima. São elas respectivamente “**Frequency**” que mostra o diagrama freqüencial do filtro, e “**Circuit**” que mostra o circuito ativo equivalente do filtro.

Para projetar um filtro, escolha a opção **“Filter”** e em seguida selecione **“Design”**, como mostra a figura 4.16 abaixo.



Figura 4.16 – Projetando um filtro no FilterLab®.

Depois disso uma tela aparecerá como mostra a figura 4.17.

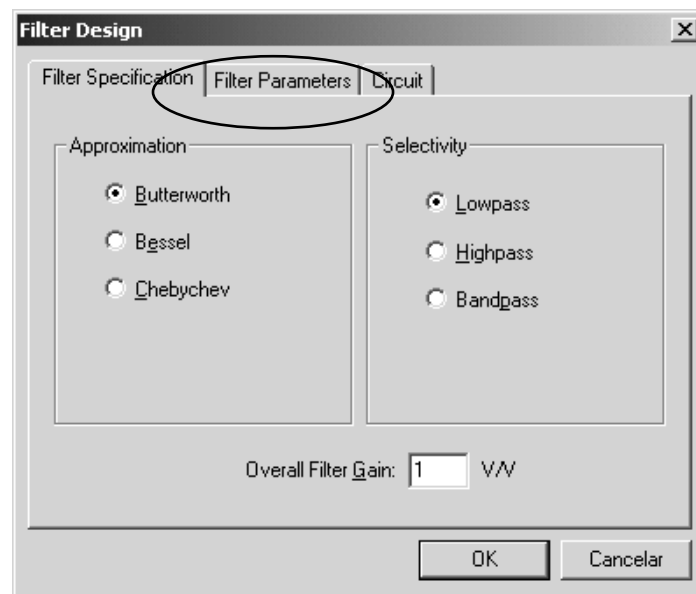


Figura 4.17 – Escolhendo o tipo de filtro no FilterLab®.

Para o projeto de um filtro passa-baixa de 8 kHz por exemplo, devemos selecionar a opção “**Butterworth**” e selecionar “**Lowpass**”. Para filtros passa-altas utiliza-se “**Highpass**” e para filtros passa-faixa utiliza-se “**Bandpass**” como opção. A opção “**Overall Filter Gain**” designa o ganho do filtro na banda passante. Nesse exemplo, foi escolhido o valor 1, que equivale a um ganho de 0 dB.

As opções “**Bessel**” e “**Chebychev**” também produzirão filtros semelhantes, mas com outra forma de calcular e outras configurações de circuitos.

Depois disso, seleciona-se a aba “**Filter Parameters**”, e com isso temos uma janela como indicado na figura 4.18 onde podemos escolher a frequência de corte e a ordem do filtro.

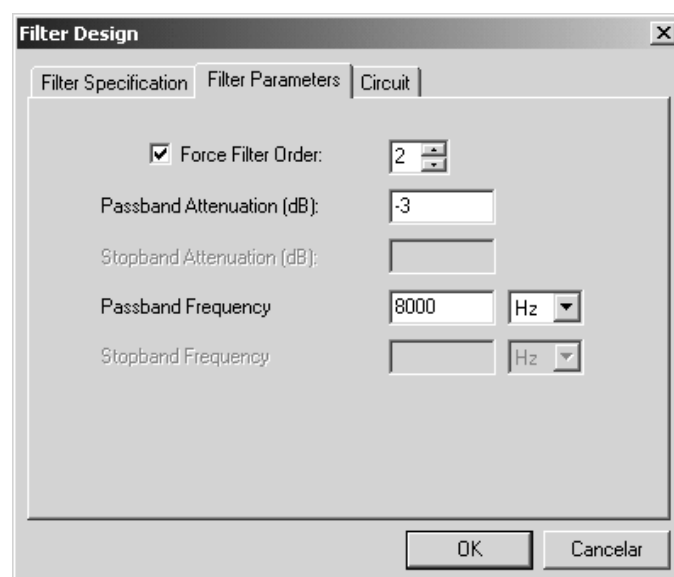


Figura 4.18 – Definindo a frequência e a ordem do filtro.

Na aba “**Circuit**”, selecionamos a topologia desejada, que no caso foi a “**Sallen-Key**”, como mostra a figura 4.19.

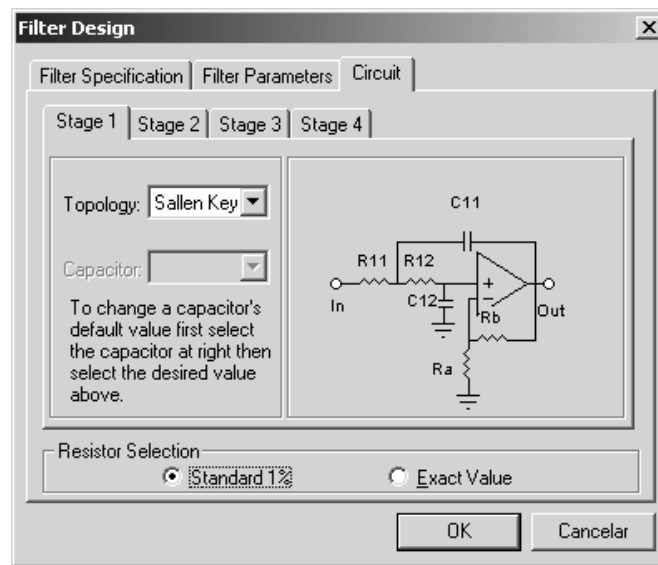


Figura 4.19 – Escolhendo a topologia dos componentes.

Feito isso, selecionamos “**OK**”, e o programa gera o diagrama de Bode do filtro bem como fornece o circuito equivalente do filtro.

Perceba na figura 4.20 abaixo, o diagrama em frequência (Bode) marcando a frequência de corte do filtro.

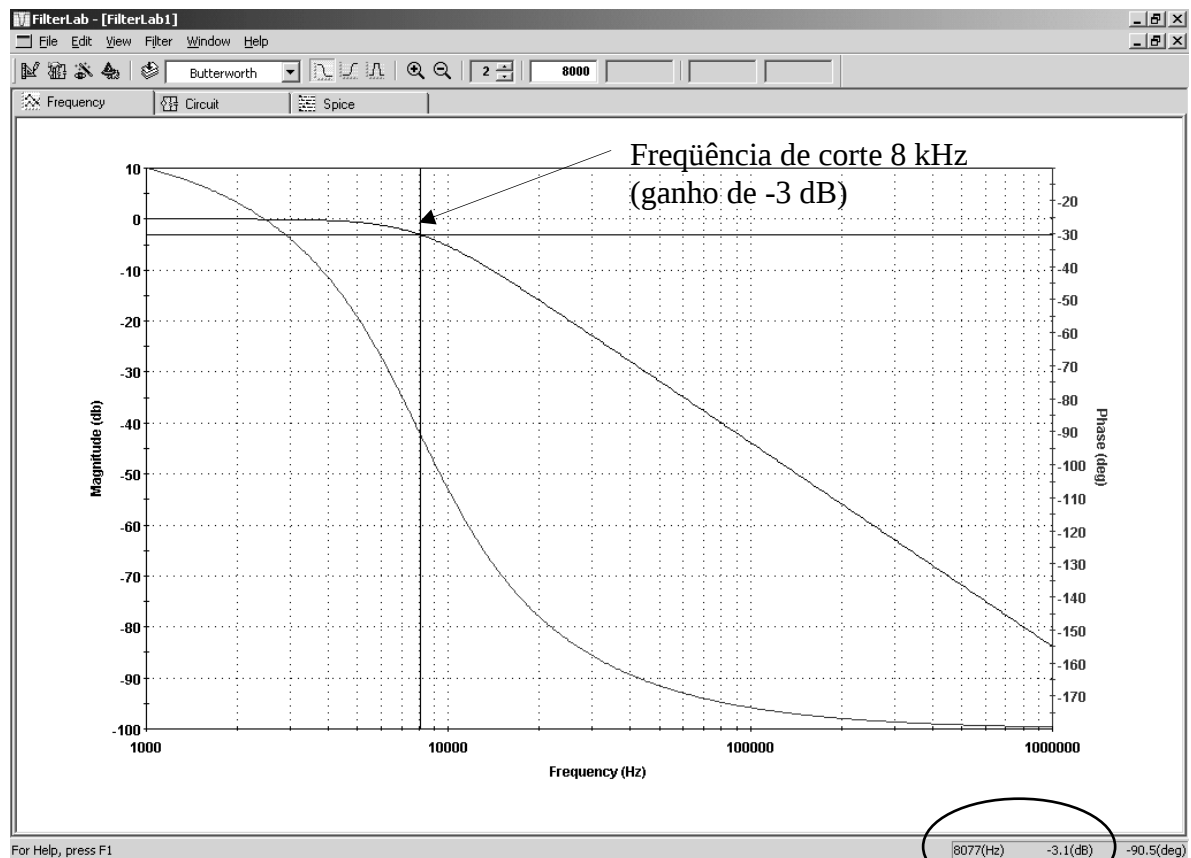


Figura 4.20 – Resposta em frequência do filtro.

E por fim, o *software* fornece o circuito pronto para ser implementado, como mostra a figura 4.21.

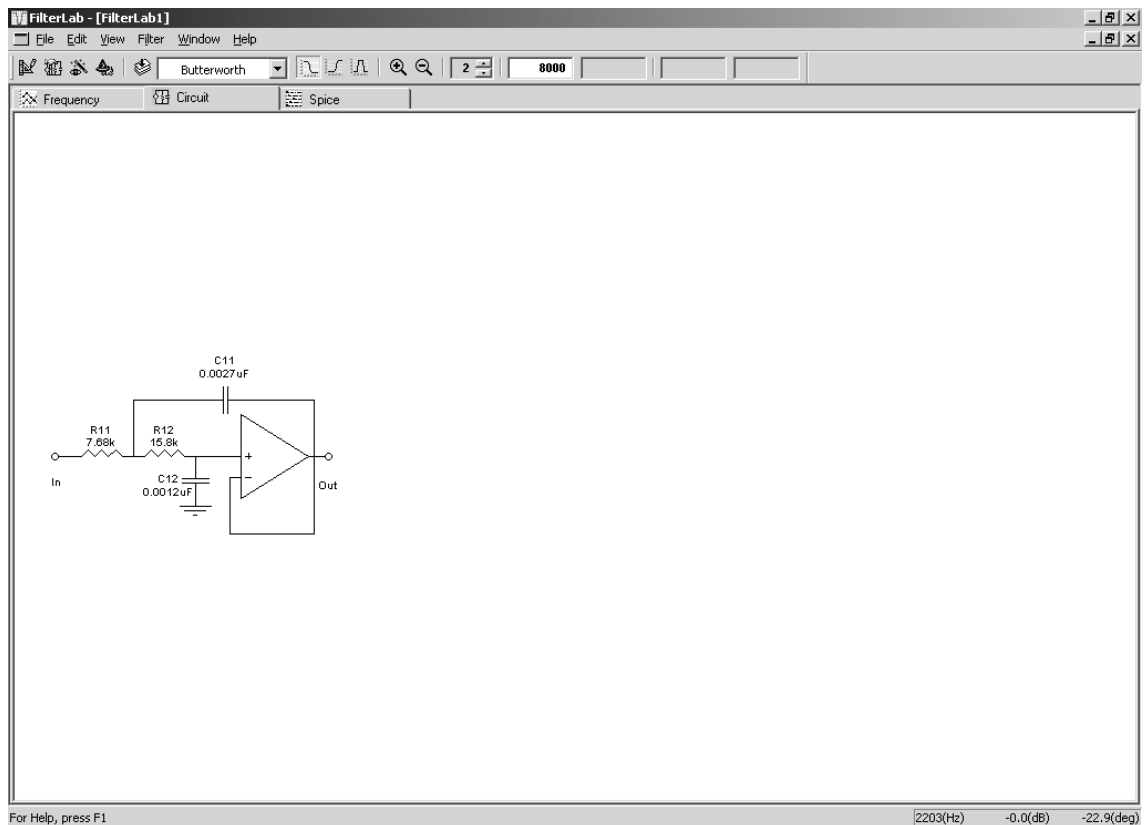


Figura 4.21 – Circuito do filtro passa-baixas de 8 kHz projetado.

Exercícios

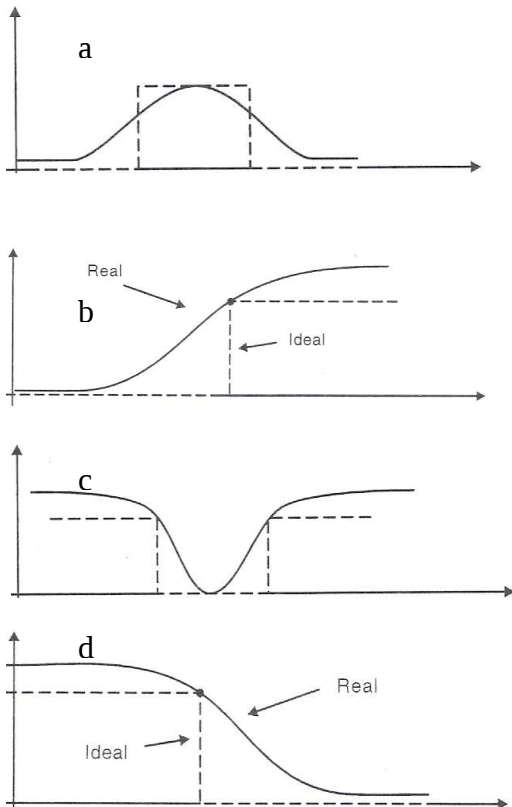
65 – O que são e para que servem os filtros de sinais?

66 – Quais os principais tipos de filtros existentes?

67 – O que é um filtro ideal?

68 – Qual a diferença entre filtro ativo e filtro passivo?

69 – Relacione o diagrama de Bode com o tipo de filtro.



Passa-baixas () Passa-altas () Passa-faixa () Rejeita-faixa ()

70 – Utilizando o FilterLab, projete um filtro passa-baixas com frequência de corte de 3.5 kHz de segunda ordem. Simule esse filtro no MultiSim®

Modulação AM

Iniciação às telecomunicações

Uma das primeiras técnicas de transmissão de sons utilizadas na radiodifusão é a que faz uso da **modulação em amplitude** (*amplitude modulation*). Até hoje, partes das emissoras de radiodifusão fazem uso dessa técnica. Além disso, a **modulação em amplitude** ou **AM** também é usada para a transmissão de outros tipos de informação, como, por exemplo, a TV analógica.

Abordaremos nesse capítulo os conceitos que envolvem as técnicas de modulação dos sinais para radiodifusão, bem como analisaremos a estrutura de um modulador e de um receptor que se destina à recuperação dos sinais modulados dessa forma.

5.1. A modulação AM.

Uma forma de se transmitir informações através de uma onda de rádio consiste em alterar algumas das características dessa onda, de modo que essas alterações correspondam à informação que se deseja transmitir.

O processo de **modulação AM** consiste em multiplicar um sinal de baixa frequência denominado **sinal modulante** ou **informação** por um sinal de alta frequência (onda de rádio) chamado de **portadora**, cuja função é simplesmente carregar a informação de um ponto a outro.

A figura 5.1 ilustra um diagrama de blocos simplificado de um sistema AM operando em 830 kHz, onde a informação é proveniente de sinais de áudio.

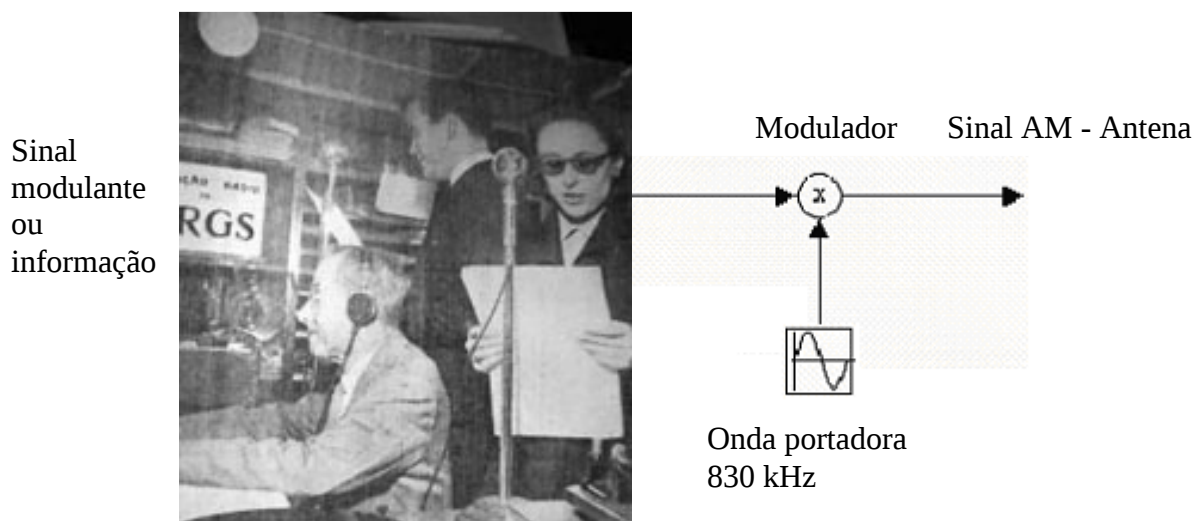


Figura 5.1 – Diagrama esquemático de uma transmissão de áudio por AM.

Se pegássemos os sinais elétricos captados pelos microfones, os amplificássemos e os jogássemos diretamente na antena, teríamos que esses sinais estariam variando em uma faixa de frequência entre 20 Hz e 20 kHz, que é a faixa audível. A faixa audível não gera ondas eletromagnéticas de grande penetração, sendo

necessária uma alta potência para fazer com que esses sinais cheguem a distâncias relativamente curtas.

Portanto, **o objetivo da modulação AM** é deslocar os sinais audíveis para uma frequência mais elevada (portadora) onde é mais fácil a transmissão e as ondas conseguem chegar a distâncias maiores. Por fim, no receptor, essa informação será **recuperada** ou **demodulada**.

Existem vários tipos de modulação AM, bem como várias formas de se gerar esses sinais. Estudaremos nesse capítulo a modulação AM-DSB que significa **Modulação em Amplitude com Faixa Lateral Dupla**.

5.2. A expressão matemática do sinal AM.

Veremos agora como se processa a operação matemática entre a informação (sinal modulante) e a portadora de forma que se obtenha um sinal AM pronto para ser transmitido.

Para simplificar a demonstração, adotaremos como sinal modulante (informação) um sinal **senoidal puro**, embora a teoria seja a mesma para um sinal mais complexo como um sinal de voz, por exemplo.

A expressão do sinal AM é obtida multiplicando-se um sinal senoidal puro de alta frequência chamado **portadora** por um sinal de frequência menor chamado de sinal **modulante** ou **informação**, sendo esse último somado a um nível DC.

Considerando o sinal **modulante** como sendo uma senóide pura, temos que a expressão do sinal AM é dada por:

$$e_{AM}(t) = \underbrace{[E_0]}_{\text{Nível DC}} + \underbrace{E_m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot t)}_{\text{Informação}} \cdot \underbrace{\cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t)}_{\text{Portadora}} \quad (5-1)$$

Onde:

E_0 é um nível DC que representa a máxima amplitude da portadora;

$E_m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot t)$ é o sinal modulante ou informação que possui amplitude máxima E_m e frequência f_m ;

Por fim, $\cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t)$ é a onda portadora, que possui amplitude máxima igual a E_0 e frequência igual a f_0 .

Se colocarmos E_0 em evidência na equação 5-1, teremos:

$$e_{AM}(t) = \left[1 + \frac{E_m}{E_0} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot t) \right] \cdot E_0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t)$$

Se chamarmos o termo $\frac{E_m}{E_0}$ de m , teremos:

$$e_{AM}(t) = [1 + m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot t)] \cdot E_0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t)$$

Fazendo agora o produto da onda portadora pelos valores dentro dos colchetes, teremos:

$$e_{AM}(t) = E_0 \cdot m \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot t) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t) + E_0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t)$$

Pela trigonometria, sabemos que:

$$A \cos(a) \cdot B \cos(b) = \frac{A \cdot B}{2} \cos(a - b) + \frac{A \cdot B}{2} \cos(a + b)$$

Com isso, a expressão final de um sinal AM é dada por:

$$e_{AM}(t) = E_0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t) + \frac{E_0 \cdot m}{2} \cdot \cos(2\pi(f_0 + f_m)) + \frac{E_0 \cdot m}{2} \cos(2\pi(f_0 - f_m)) \quad (5-2)$$

$\downarrow$
Portadora

$\downarrow$
Frequência lateral superior

$\downarrow$
Frequência lateral inferior

A equação 5-2 mostra que a expressão final do sinal AM é composta pela soma de três sinais sendo eles **a onda portadora**, uma faixa de frequência chamada **frequência lateral superior** e outra chamada **frequência lateral inferior**.

A análise no domínio da frequência do sinal AM é observada na figura 5.2. O nome “**Modulação em Amplitude com Dupla Faixa Lateral**” vem justamente do fato de existirem **duas cópias iguais da informação** ao redor da frequência f_0 da portadora.

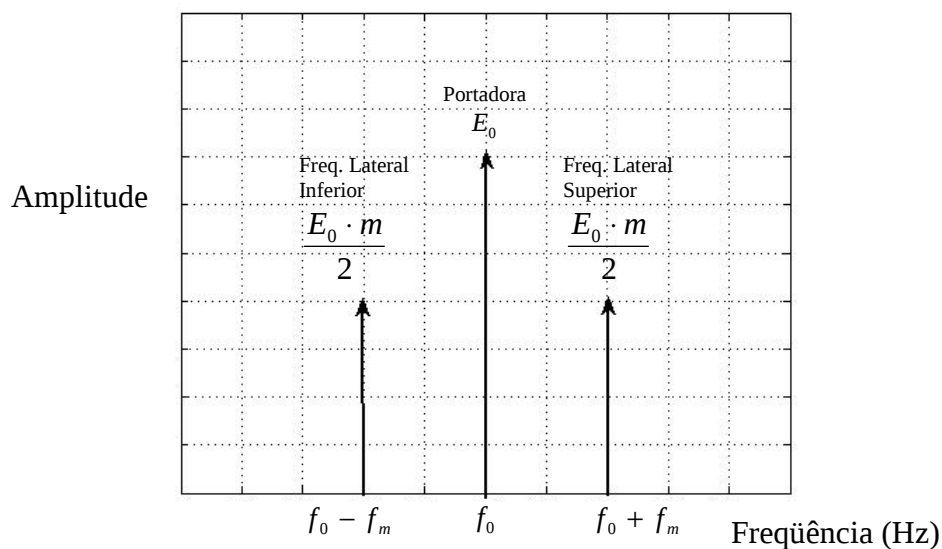


Figura 5.2 – Espectro do sinal AM.

Se ao invés do espectro, analisarmos agora os sinais no domínio do tempo, a modulação AM envolve os seguintes sinais vistos em um osciloscópio como mostra a figura 5.3.

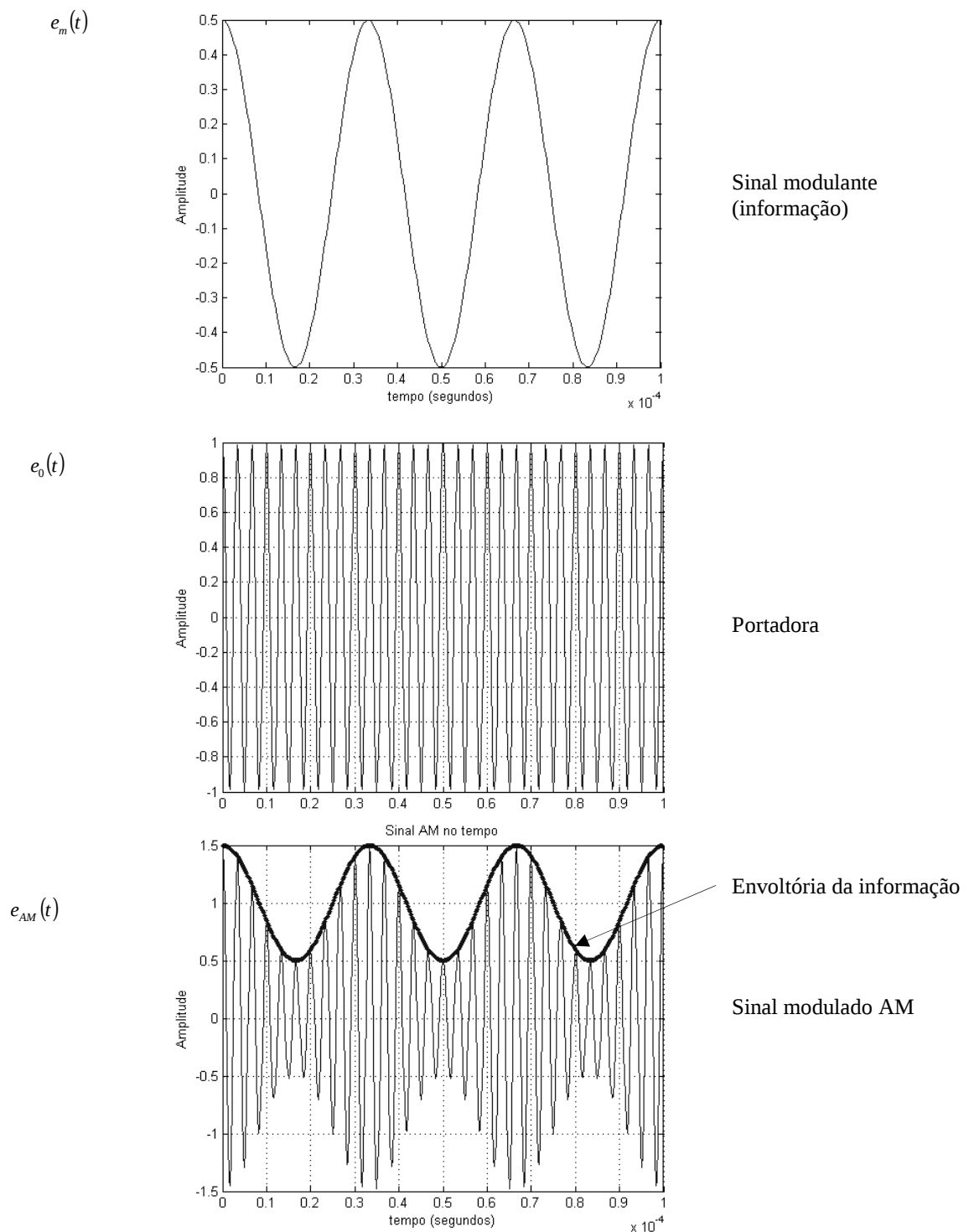


Figura 5.3 – Sinais da modulação AM vistos no domínio do tempo.

Da figura acima, percebemos claramente o que ocorre no processo da modulação AM, onde o sinal modulante desenha sua forma na onda portadora, o que é conhecido como **envoltória da informação**.

5.3. Índice de modulação em amplitude.

O **índice de modulação em amplitude** é a relação entre a máxima amplitude do sinal modulante E_m e a máxima amplitude da portadora E_0 , e é denotado pela letra m :

$$m = \frac{E_m}{E_0} \cdot 100(\%) \quad (5-3)$$

Para medir quanto de modulação existe em um sinal AM, usamos o **índice de modulação**. Esse índice tem que ser sempre menor que 100%. Se aplicarmos um sinal modulador a uma portadora com intensidade muito grande, ocorre o que denominamos de **sobremodulação**, e o resultado é uma perda na informação transmitida e o índice de modulação é maior que 100%.

Se o sinal que corresponde à informação tiver uma amplitude muito menor do que a da portadora, é evidente que as variações da amplitude que ele pode provocar serão muito pequenas. Dizemos, nessas condições, que o índice de modulação é muito pequeno.

A figura 5.4 mostra como o índice de modulação influencia no sinal AM, onde temos exemplos para vários valores de m .

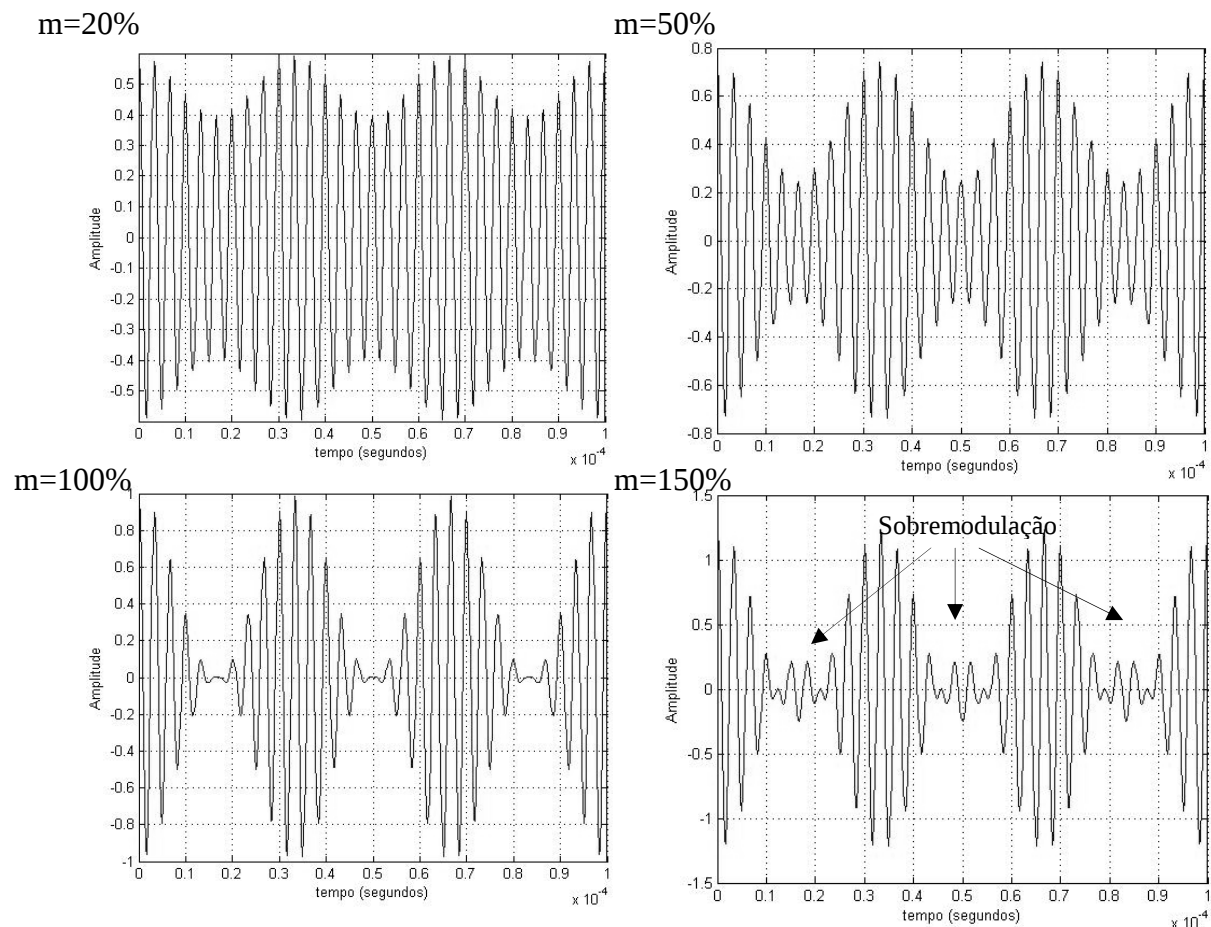


Figura 5.4 – Influência do índice de modulação no sinal AM.

O **índice de modulação** m pode ser calculado graficamente através do sinal AM no tempo pela seguinte fórmula:

$$m = \frac{(B - A)}{(B + A)} \quad (5-4)$$

Onde B é a máxima amplitude do sinal e A é amplitude mínima do sinal, como mostra a figura 5.5

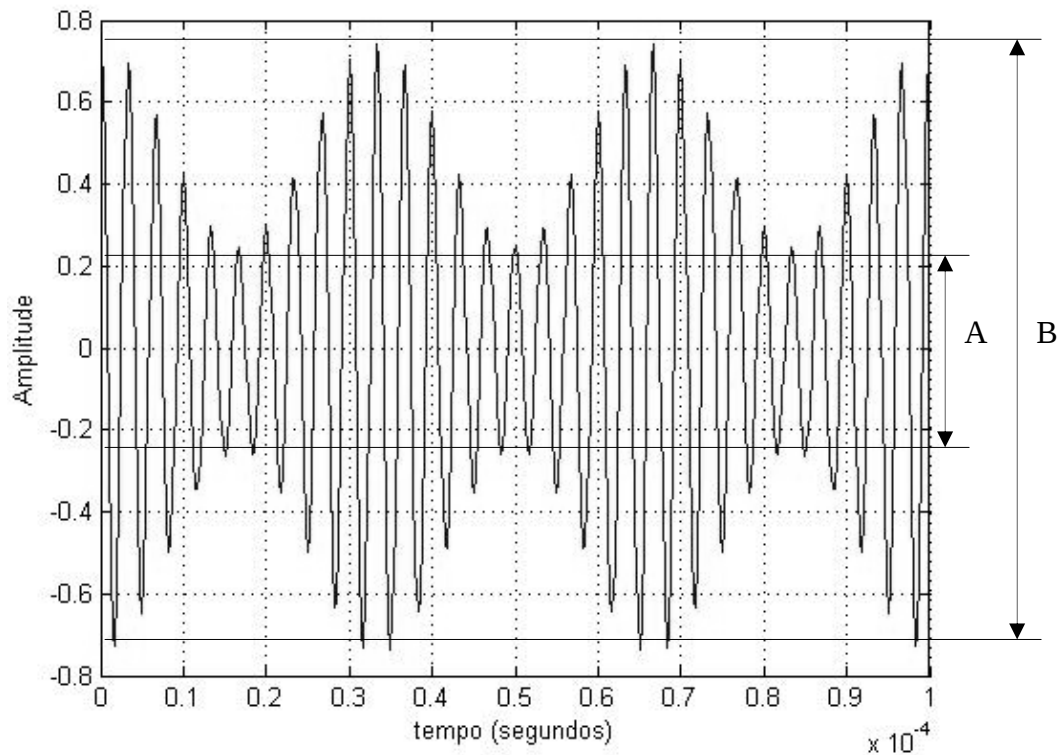


Figura 5.5 – Cálculo gráfico do índice de modulação.

Observe que quando A vale zero, temos um índice de modulação de 100%. No domínio da frequência, quando temos um índice de modulação maior que 100%, as bandas laterais terão amplitude maior que a metade da amplitude da portadora.

Exemplos

24 – Dado os seguintes dados, calcule o índice de modulação e esboce o espectro do sinal AM.

Dados:

$$E_0 = 2\text{Volts}$$

$$E_m = 1\text{Volt}$$

$$f_0 = 600\text{kHz}$$

$$f_m = 10\text{kHz}$$

Resposta:

Sabemos que o índice de modulação m é igual a:

$$m = \frac{E_m}{E_0}$$

$$m = \frac{1}{2}$$

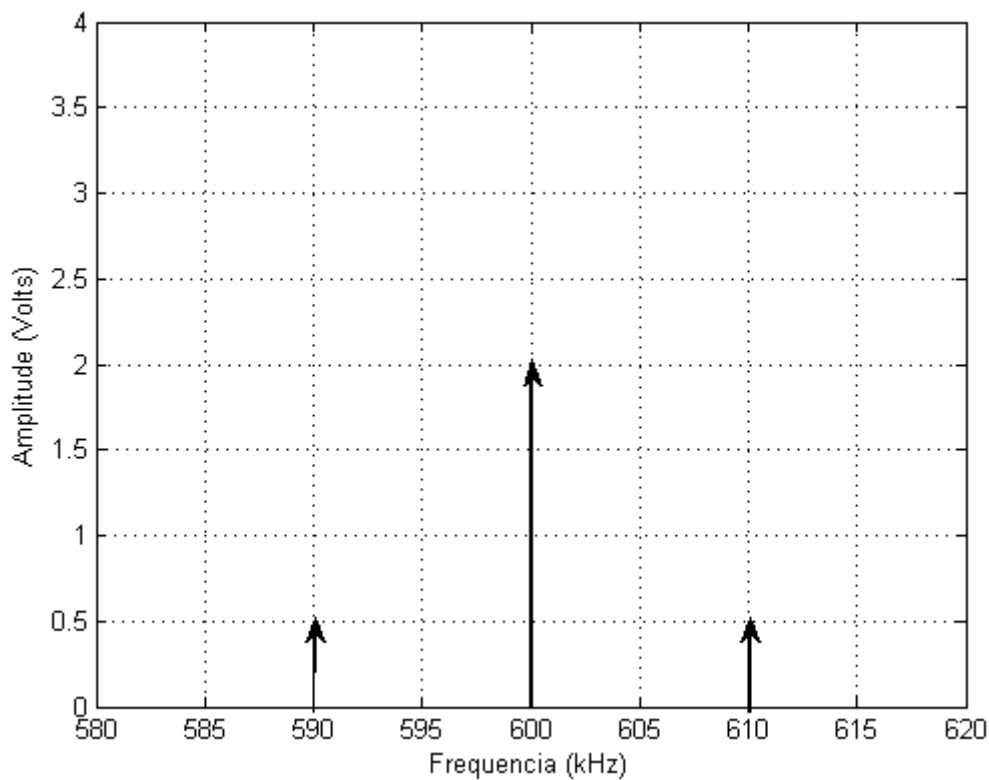
$$m = 0.5$$

Pela expressão do sinal AM, temos que:

$$e_{AM}(t) = E_0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t) + \frac{E_0 \cdot m}{2} \cdot \cos(2\pi(f_0 + f_m)) + \frac{E_0 \cdot m}{2} \cos(2\pi(f_0 - f_m))$$

$$e_{AM}(t) = 2 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 600 \cdot 10^3 \cdot t) + \frac{2 \cdot 0.5}{2} \cdot \cos(2\pi \cdot 610 \cdot 10^3 \cdot t) + \frac{2 \cdot 0.5}{2} \cos(2\pi \cdot 590 \cdot 10^3 \cdot t)$$

O espectro desse sinal é dado por:



25 – Dado os seguintes dados, calcule o índice de modulação e esboce o espectro do sinal AM.

Dados:

- Portadora:

$$E_0 = 2\text{Volts}$$

$$f_0 = 600\text{kHz}$$

- Sinal modulante:

O sinal modulante é um sinal de áudio entre 20 Hz e 20 kHz cuja máxima amplitude da máxima componente de frequência é igual a 1 Volt.

Ou seja, $E_m = 1\text{Volt}$

Resposta:

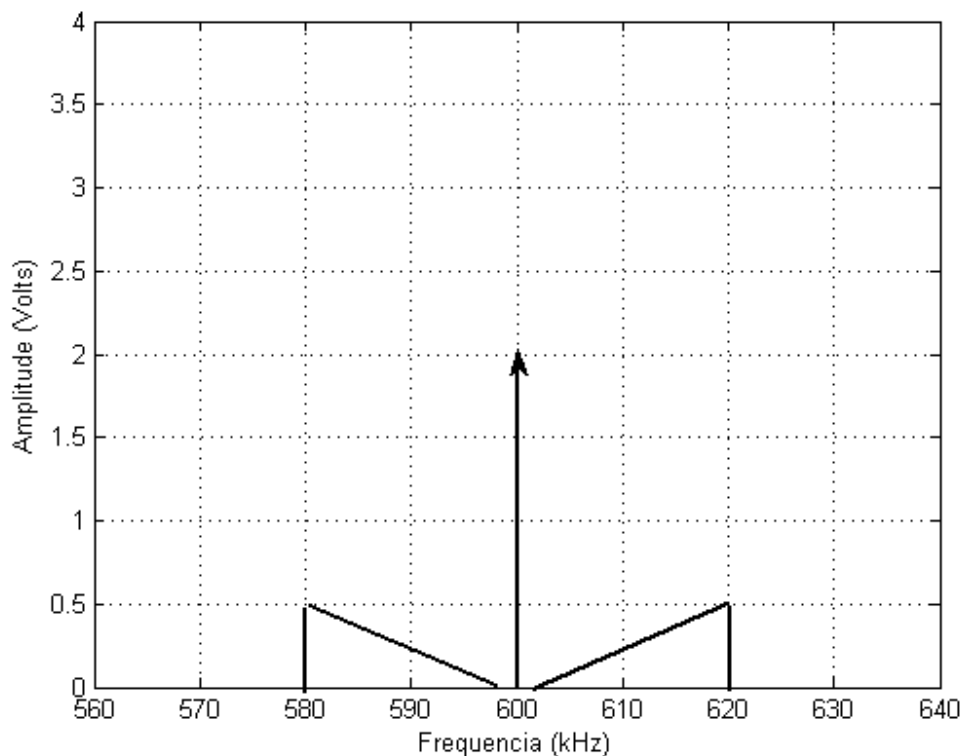
Sabemos que o índice de modulação m é igual a:

$$m = \frac{E_m}{E_0}$$

$$m = \frac{1}{2}$$

$$m = 0.5$$

Quando o sinal modulante não uma senóide e sim um sinal complexo como o de áudio (20 Hz a 20 kHz), o calculo do sinal torna-se mais complicado, mas a representação do sinal AM é feita da seguinte forma:



5.4. Circuito modulador AM síncrono a diodo.

Analisaremos agora o funcionamento de um modulador AM-DSB simples mas que fornece uma boa idéia do processo eletrônico de obtenção de sinais AM. Na verdade esse circuito não possui uma aplicação prática, mas sua configuração auxilia a entender o funcionamento dos moduladores atuais, que são variações mais sofisticadas.

A figura 5.6 mostra o circuito onde o elemento chave é um diodo semicondutor cuja função é fazer o produto da **portadora** com a **informação**.

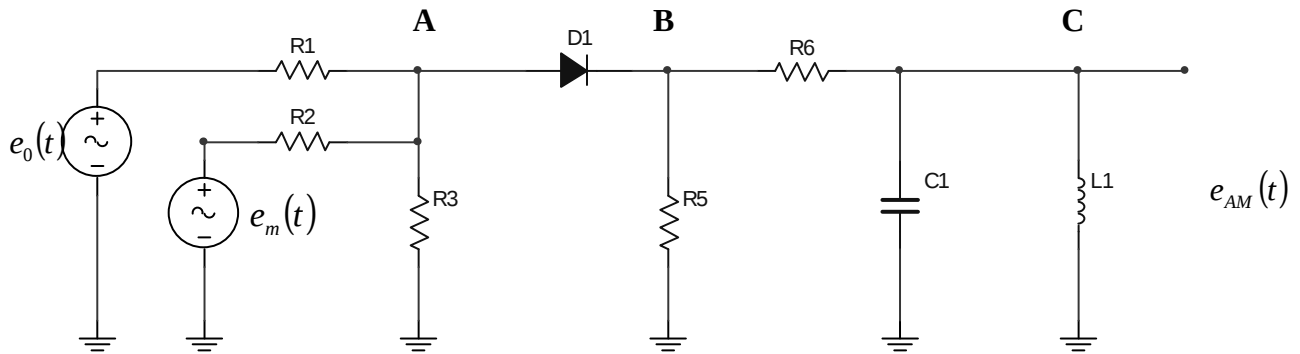


Figura 5.6 – Circuito modulador síncrono a diodo com 3 estágios.

Analisemos individualmente os três estágios do circuito nos pontos **A**, **B** e **C** (ver figura 5.6).

5.4.1. Ponto A.

No ponto **A** temos um somador analógico formado pelos resistores $R1$, $R2$ e $R3$ que soma a **portadora** à **informação** (sinal senoidal puro), onde $R1, R2$ e $R3$ são iguais. A forma de onda nesse ponto é mostrada na figura 5.7 através de uma simulação do circuito no Multisim®.

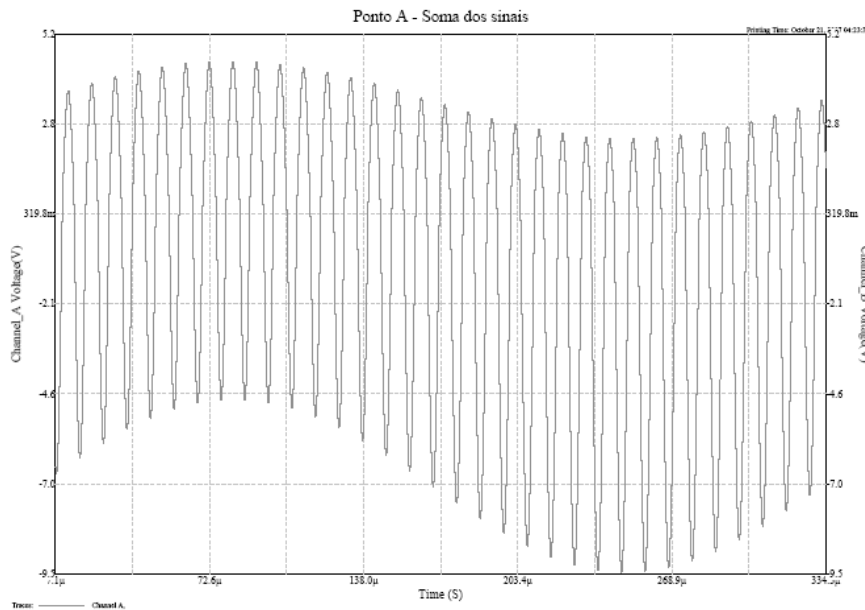


Figura 5.7 – Soma do sinal modulante com a portadora no tempo.

Note que no ponto **A** ainda não temos um sinal AM pois a portadora e o sinal modulante não foram multiplicados, e sim somados.

5.4.2. Ponto B.

No ponto **B** o diodo faz o produto do sinal modulante com a portadora, **porém esse produto não é perfeito**. Duas cópias do sinal AM são geradas nesse ponto, onde apenas uma cópia deve ser selecionada, e a outra descartada, pois é constituída de harmônicos indesejados. A figura 5.8 mostra o sinal no domínio do tempo em uma simulação do circuito no Multisim®.

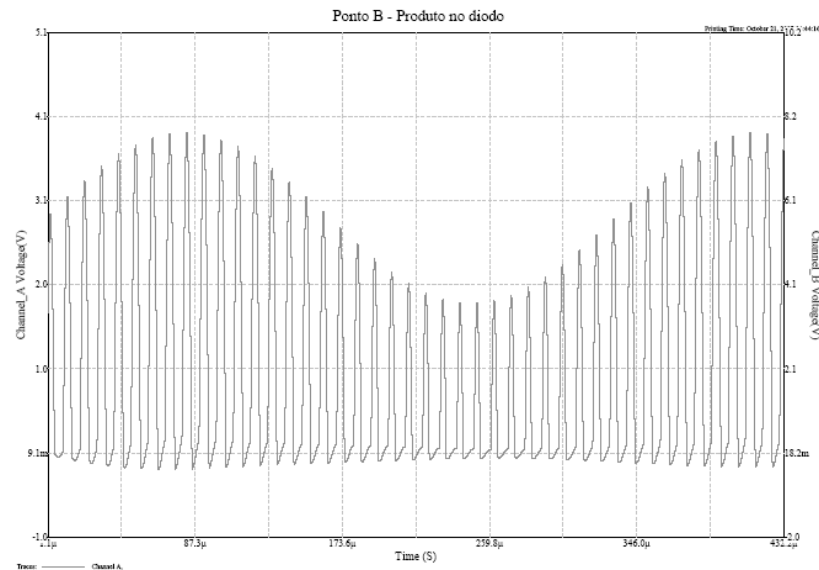


Figura 5.8 – Produto dos dois sinais pelo diodo no tempo.

Vendo o ponto **B** no domínio da frequência, vemos as duas cópias do sinal AM. Uma deve ser selecionada, e a outra constituída de harmônicos deve ser filtrada. A figura 5.9 mostra a simulação do espectro em frequência no ponto **B**.

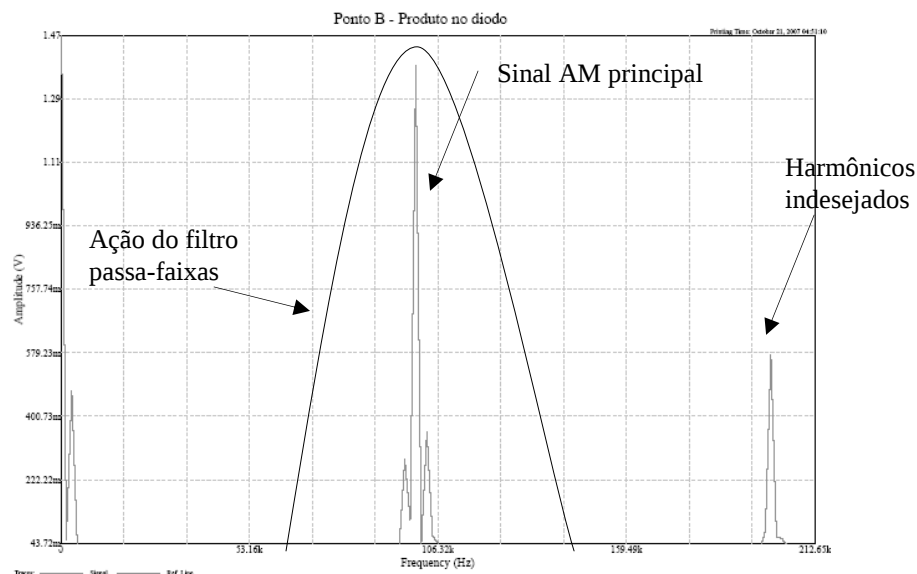


Figura 5.9 – Produto dos dois sinais pelo diodo na frequência.

Note que devemos passar agora esse sinal em um filtro passa-faixas selecionando apenas o sinal principal. Isso será feito no ponto C por um filtro LC.

5.4.3. Ponto C.

Nesse ponto do circuito temos um filtro passa-faixa LC formado por L1 e C1 cuja frequência de ressonância é $f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$. Dessa forma, temos que projetar esse filtro para que a frequência de ressonância seja igual a da portadora, como mostrou a figura 5.9 anteriormente.

A figura 5.10 ilustra a simulação no Multisim® do filtro passa-faixa LC mostrando o diagrama de Bode desse filtro.

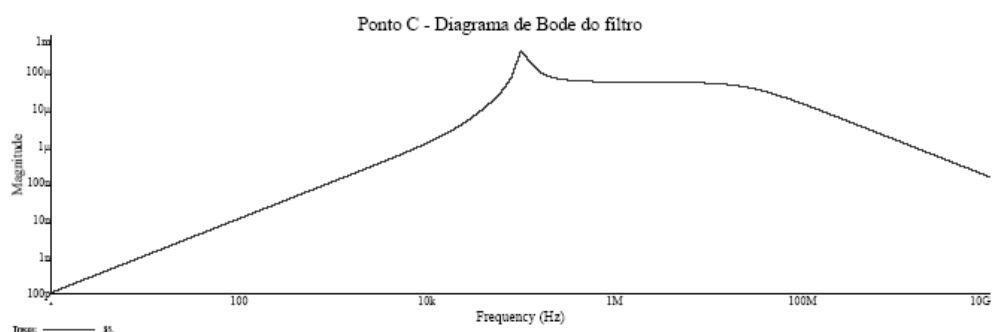


Figura 5.10 – Diagrama de Bode do filtro passa-faixa LC.

Com isso, o filtro passa-faixa seleciona o sinal AM desejado, e temos um sinal modulado em amplitude na saída do modulador, como mostra a figura 5.11.

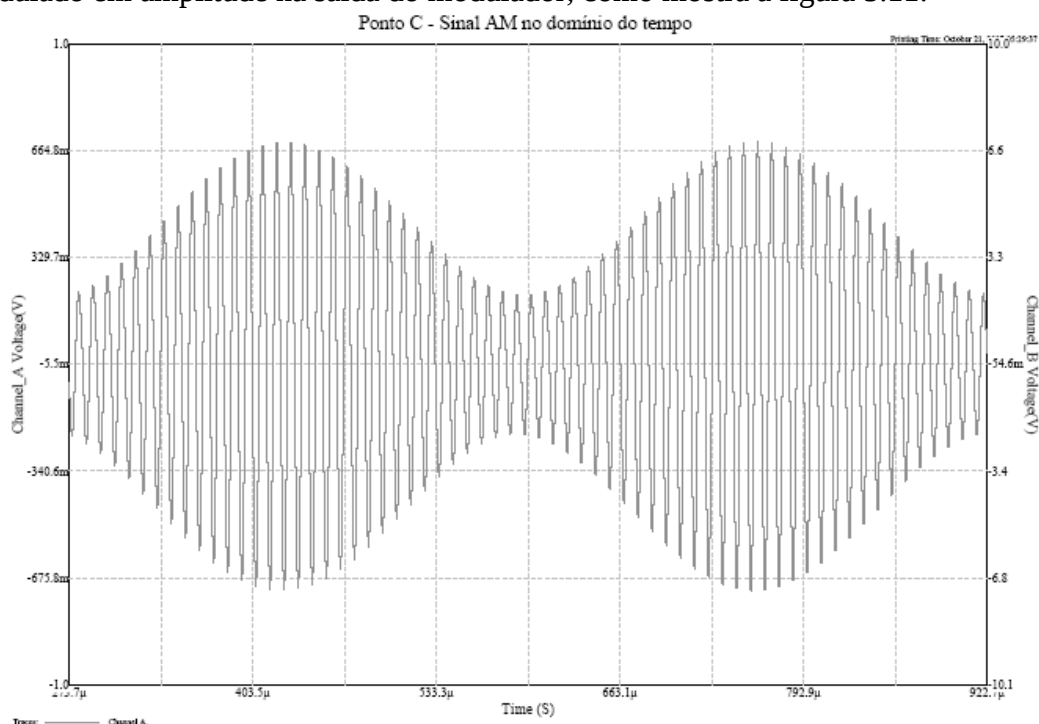


Figura 5.11 – Sinal modulado em amplitude na saída do circuito.

Utilizando mais uma vez o analisador de espectro do Multisim®, vemos que o filtro passa-faixa selecionou apenas o sinal AM desejado que se encontra pronto para ser transmitido, como mostra a figura 5.12.

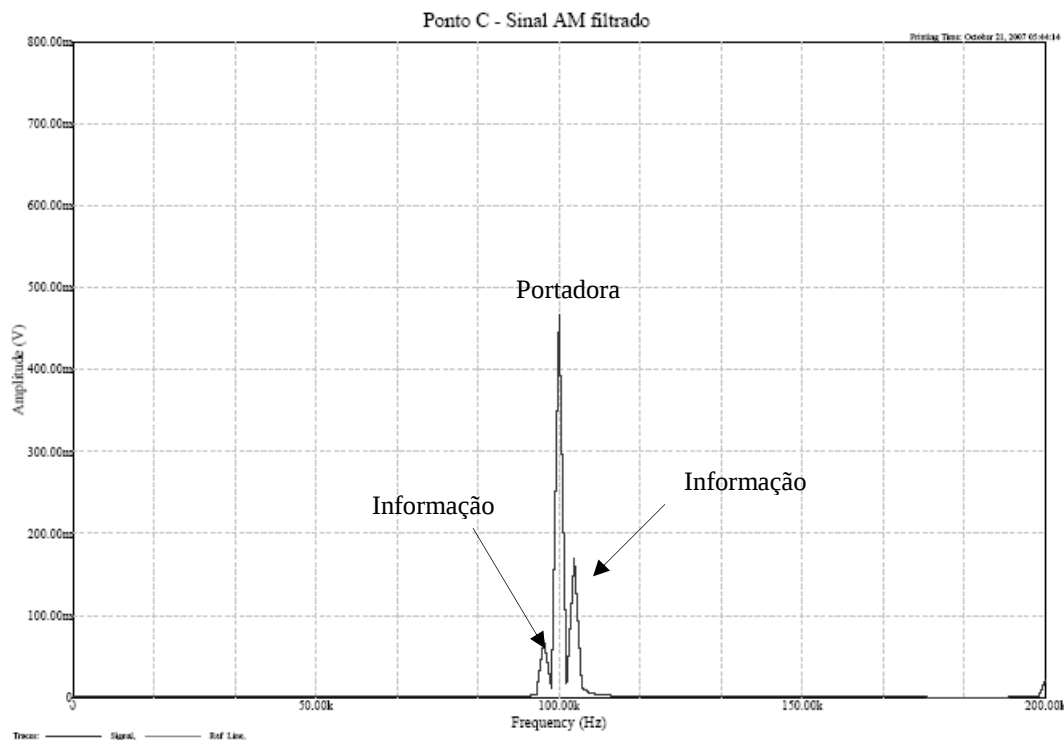


Figura 5.12 – Espectro do sinal AM na saída do circuito

Com isso, vimos como funciona passo-a-passo um circuito capaz de gerar sinais AM. Vejamos agora o circuito que faz o processo inverso, ou seja, o circuito que demodula o sinal AM extraindo a informação.

5.5. Circuito demodulador AM - detector de envoltória.

No receptor, a função do **demodulador é extrair a informação que a portadora transporta**. Em um sinal AM-DSB, o sinal da informação é sempre igual ao sinal que envolve a portadora (envoltória da informação), como mostra figura 5.13.

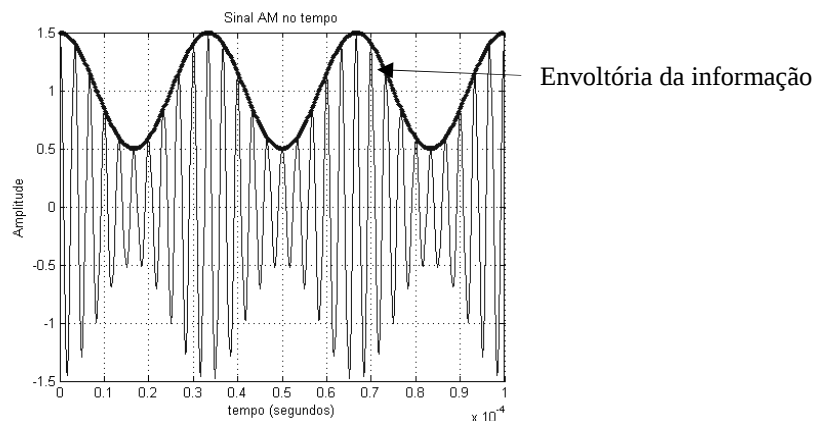


Figura 5.13 – Sinal AM e a envoltória que deve ser extraída

Portanto, se criarmos um circuito que consiga extrair a envoltória da portadora a partir do sinal modulado recebido, teremos recuperado a informação.

A figura 5.14 mostra um circuito detector de envoltória também composto de três estágios onde na entrada teremos o sinal AM e na saída teremos o sinal modulante, ou informação recuperada.

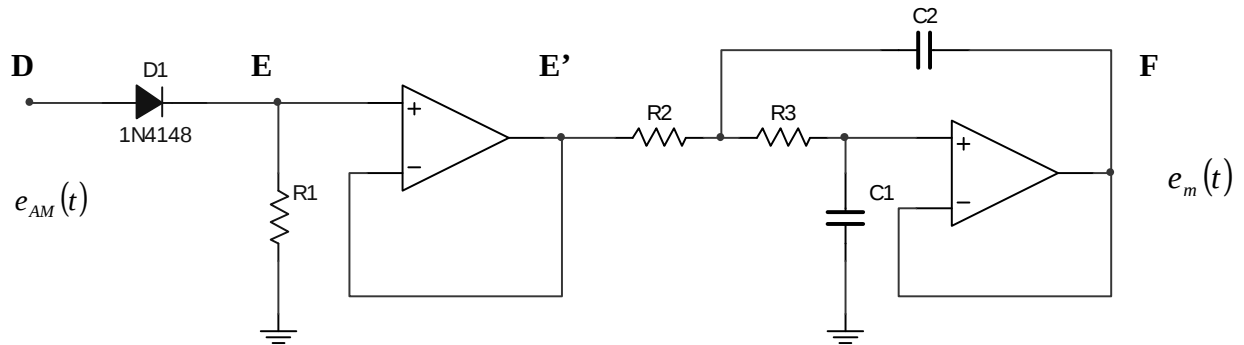


Figura 5.14 – Circuito demodulador AM detector de envoltória.

O circuito é composto de um retificador no primeiro estágio, um *buffer* isolador e por fim um filtro passa-baixa de segunda ordem. Analisemos individualmente os três estágios do circuito acima nos pontos **D**, **E** e **F** (ver figura 5.14).

5.5.1 – Ponto D.

Nesse ponto (entrada do circuito) temos o sinal AM já conhecido que fora selecionado por um circuito sintonizador ligado a uma antena. As formas de onda no domínio do tempo e no domínio da frequência no ponto D são novamente mostradas nas figuras 5.15 e 5.16 respectivamente.

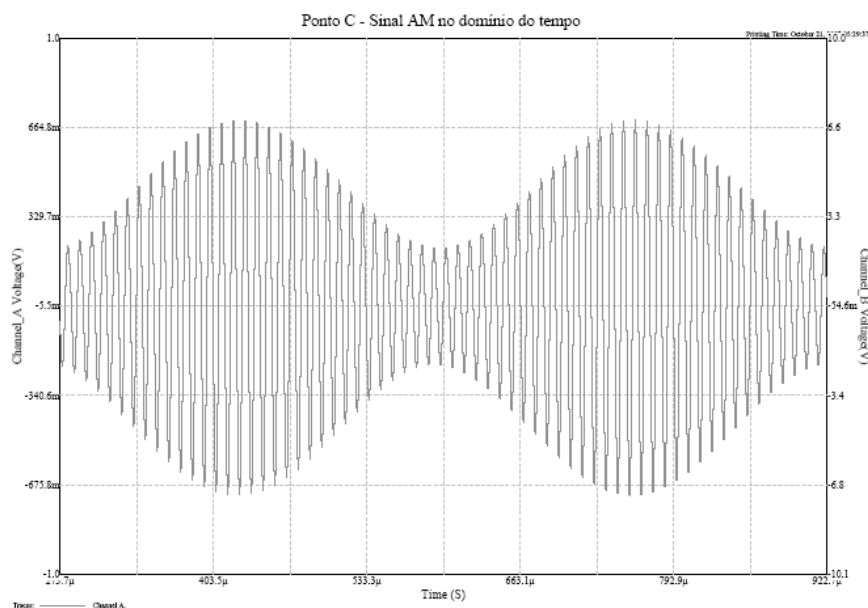


Figura 5.15 - Sinal AM de entrada visto no tempo a ser demodulado.

Novamente, como já conhecemos, mostramos na figura 5.16 o sinal AM no domínio da frequência aplicado na entrada do circuito demodulador.

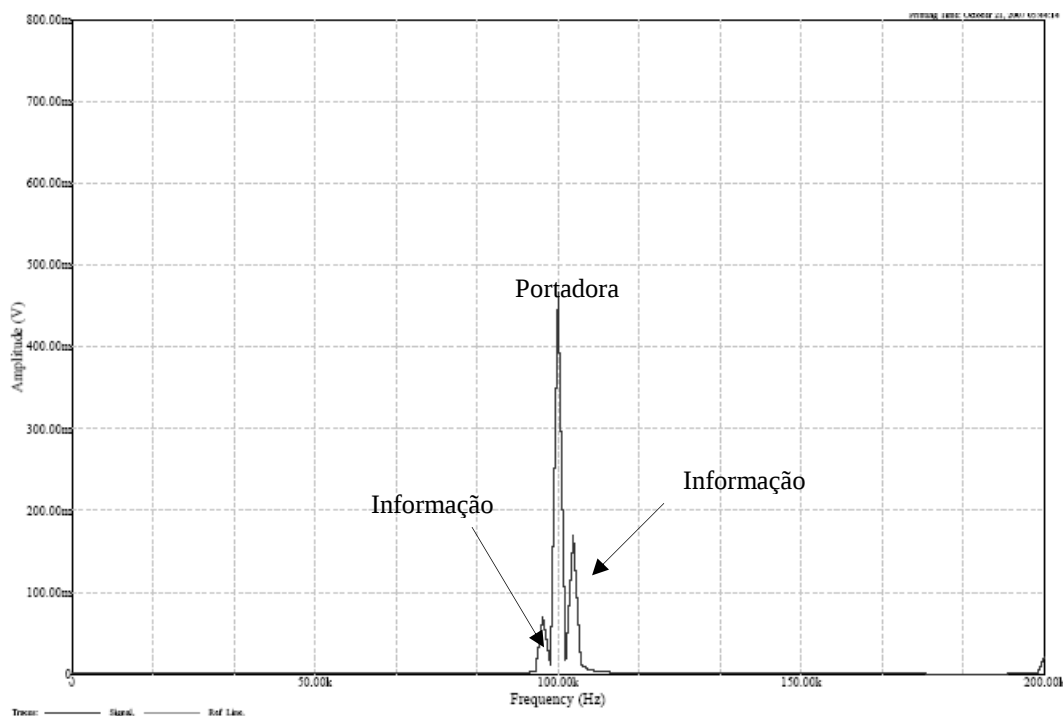


Figura 5.16 - Sinal AM de entrada visto na frequência a ser demodulado.

5.5.2 – Ponto E.

No ponto **E** temos o sinal AM retificado pelo diodo D1, ou seja, apenas os semi-ciclos positivos são selecionados e irão para carga R1. A figura 5.17 abaixo mostra o sinal retificado pelo diodo no ponto **E** visto no domínio do tempo por um osciloscópio. Note que os ciclos negativos do sinal AM foram ceifados pelo diodo.

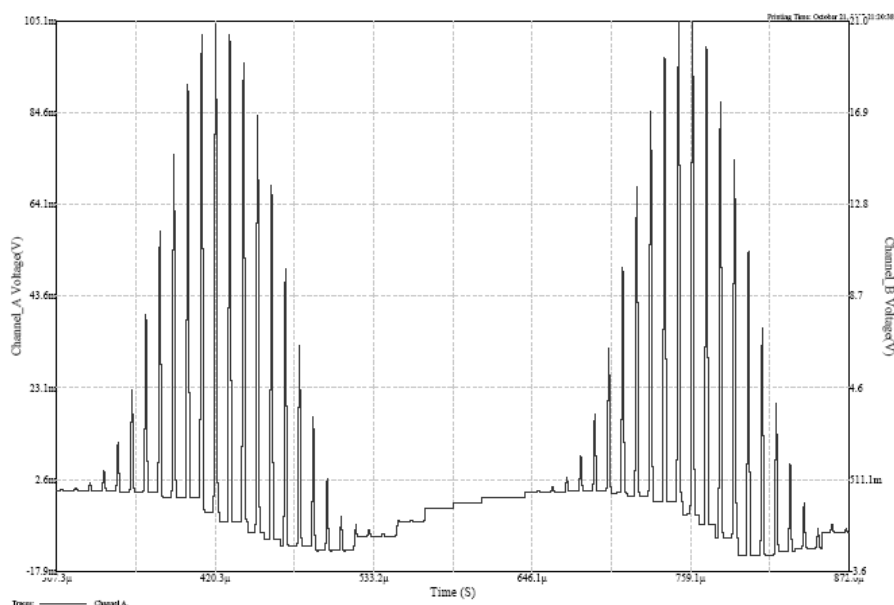


Figura 5.17 – Sinal AM retificado pelo diodo visto no ponto E no domínio do tempo.

Quando o sinal atinge o diodo e é retificado ocorre o fenômeno de **batimento** que faz com que a informação retorne para uma frequência mais baixa como mostra a figura 5.18.

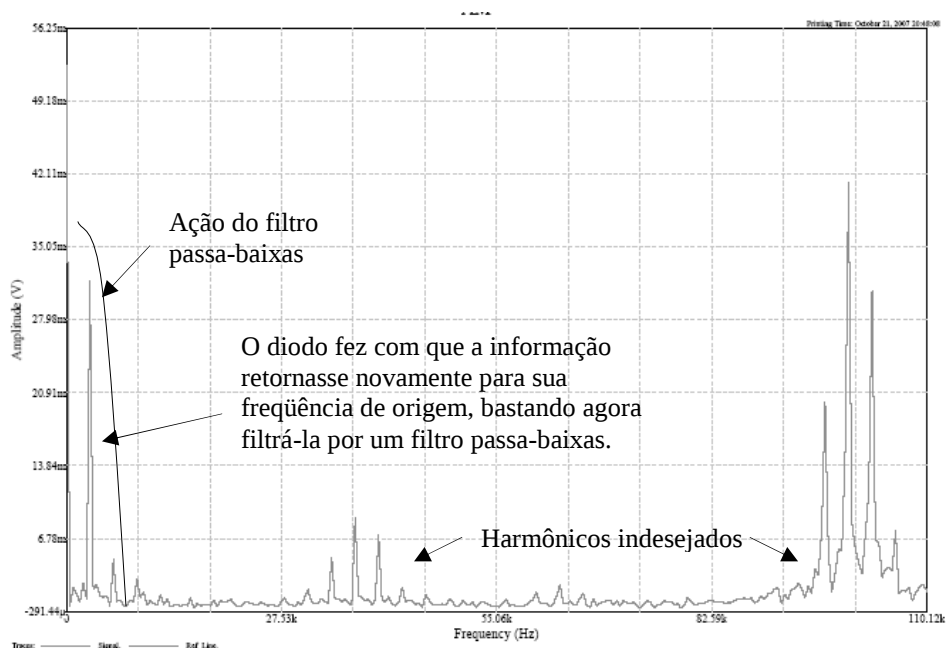


Figura 5.18 – Espectro do sinal AM retificado pelo diodo visto no ponto E.

A figura 5.18 acima mostra que o diodo magicamente **fez com que a informação retornasse para sua frequência de origem**, bastando apenas filtrar esse sinal dos harmônicos indesejados usando um filtro passa-baixas.

No ponto E' temos um sinal idêntico ao ponto E onde foi utilizado um isolador para que R1 não interfira na frequência de corte do filtro passa-baixas.

5.5.2 – Ponto F.

Nesse ponto, teremos a informação que fora filtrada por um filtro passa-baixas com frequência de corte um pouco maior do que a máxima frequência da informação modulada.

Na figura 5.19 temos o diagrama de Bode do filtro passa-baixas responsável por filtrar o sinal modulante ou informação.



Figura 5.19 – Diagrama de Bode do filtro passa-baixa do circuito demodulador AM.

Como a informação original que foi modulada era um seno puro, na saída do demodulador deveremos ter um sinal o mais próximo possível desse seno.

A figura 5.20 compara o sinal senoidal que foi demodulado com a informação original transmitida.

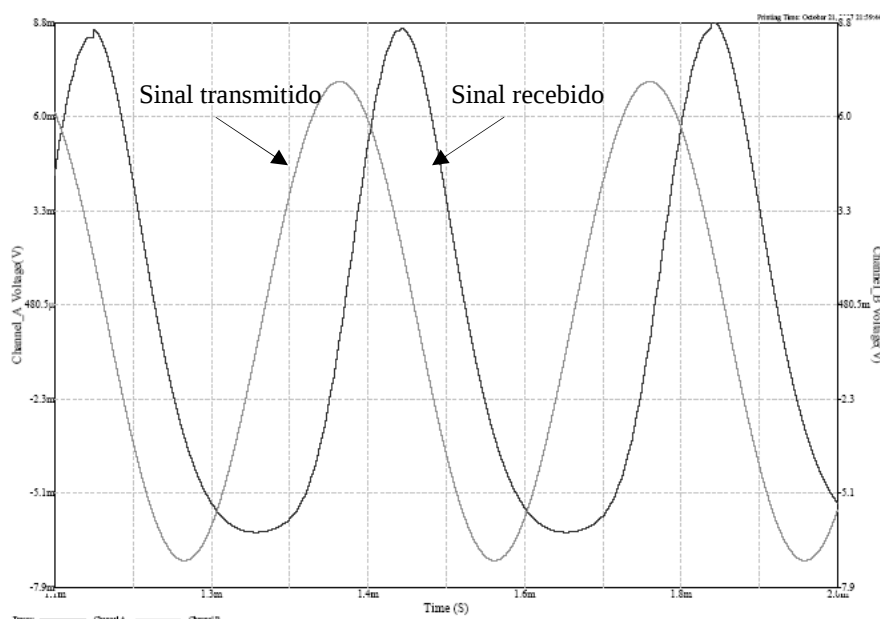


Figura 5.20 – Comparação entre sinal transmitido (modulado) e sinal recebido (demodulado)

Pela figura acima, percebemos que o sinal recebido é praticamente idêntico ao sinal transmitido, com a diferença que se encontra defasado aproximadamente 90° e somado a um nível DC, o que não representa nenhum problema.

A partir desse ponto, o sinal recebido (informação) poderá ser melhor amplificado para que possa alimentar um auto-falante.

5.6. O receptor super-heteródino.

O circuito demodulador que vimos anteriormente é apenas parte de um circuito mais sofisticado capaz de sintonizar e demodular sinais AM. Atualmente, na maioria das aplicações comerciais como, por exemplo, os rádios AM comuns, equipamentos de telecomunicações de serviços públicos, particulares, radioamadores, a tecnologia usada para receber os sinais é a do **receptor super-heteródino**.

Para analisar o funcionamento de um receptor desse tipo, visto na figura 5.21, será importante analisarmos as funções realizadas por cada bloco do receptor.

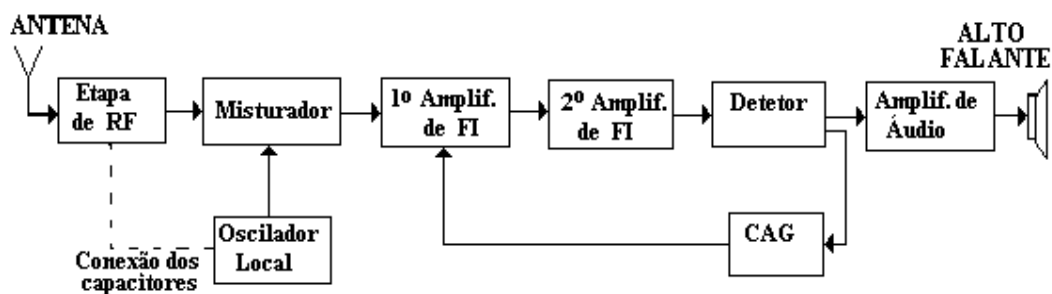


Figura 5.21 – Diagrama de blocos do receptor super-heteródino.

A **grande vantagem desse tipo de receptor** com relação a outros mais simples é a de transformar o sinal selecionado (estação) para uma frequência intermediária (FI) mais baixa e constante, independente da frequência da emissora selecionada.

Com isso, teremos uma amplificação de melhor qualidade nos blocos posteriores. Além disso, não precisaremos sintonizar todos os circuitos do receptor para cada estação que desejamos sintonizar.

Vejamos agora análise de cada bloco do sistema. Primeiramente, é válido lembrar que a antena irá interceptar todos os sinais de ondas eletromagnéticas presentes no ambiente, convertendo-os em corrente, que será enviada para o primeiro bloco.

5.6.1. Etapa de RF.

O bloco etapa de RF tem a função de sintonizar apenas uma estação, portanto, possui um amplificador com um filtro na entrada, com a frequência de operação variável.

Essa sintonia normalmente é feita com capacitores variáveis. Variando-se o valor da capacitância no filtro, iremos variar a frequência de ressonância do filtro, selecionando apenas a emissora desejada.

Em receptores mais modernos, essa sintonia pode ser feita por dispositivos de estado sólido, como os diodos varicap, o que possibilita o processo de seleção digital de estações.

O sinal obtido na saída dessa etapa será aplicado ao misturador.

5.6.2. Conjunto oscilador local-misturador.

Como já foi dito, no estágio de FI (frequência intermediária) temos um amplificador sintonizado em uma frequência fixa, porém, o receptor pode receber sinais de várias emissoras diferentes, cada uma com uma frequência de portadora diferente.

O conjunto **oscilador local-misturador**, portanto, irá funcionar de forma a obtermos em sua saída, um sinal de frequência fixa para qualquer que seja a emissora selecionada. Essa frequência é chamada de **frequência intermediária** ou **FI**, e é padronizada em 455 kHz para os receptores modernos de AM. Em receptores mais antigos, podemos encontrar outras frequências, como, por exemplo, 915 kHz nos modelos usados em aeronaves.

A função da FI é trocar a frequência da portadora por uma frequência fixa de 455 kHz para facilitar a amplificação e detecção desse sinal posteriormente. O sinal de frequência intermediária fixa é obtido através do **batimento** (produto) entre o sinal selecionado na etapa de RF por um sinal produzido pelo oscilador local

O **oscilador local** irá operar em uma frequência diferente para cada emissora que estiver sendo selecionada, de forma a produzir a transformação do sinal selecionado para uma frequência intermediária de 455 kHz.

Para que isso ocorra, o mesmo capacitor variável que sintoniza a emissora desejada irá agir no oscilador local, fazendo com que ele oscile em frequências diferentes, conforme seja feito o ajuste.

Nos receptores super-heteródinos, encontramos capacitores variáveis duplos, com uma seção controlando o circuito de sintonia e outra controlando a frequência do oscilador local, de forma que a diferença entre o oscilador local e a portadora da emissora seja fixa e igual a 455 kHz.

A tabela 5.1 mostra alguns exemplos dos valores da frequência da portadora e do oscilador local.

Tabela 5.1 – Exemplos de frequências da portadora e do oscilador local.

Frequência da Emissora (Portadora)	Frequência do oscilador local	Frequência FI. (Oscilador – Portadora)
830 kHz	1285 kHz	455 kHz
1400 kHz	1855 kHz	455 kHz
540 kHz	995 kHz	455 kHz
1000 kHz	1455 kHz	455 kHz

A figura 5.22 mostra o exemplo do que acontece na etapa de FI quando a estação selecionada se encontra em 830 kHz, por exemplo e o sinal modulante é um sinal de voz filtrado em 5 kHz.

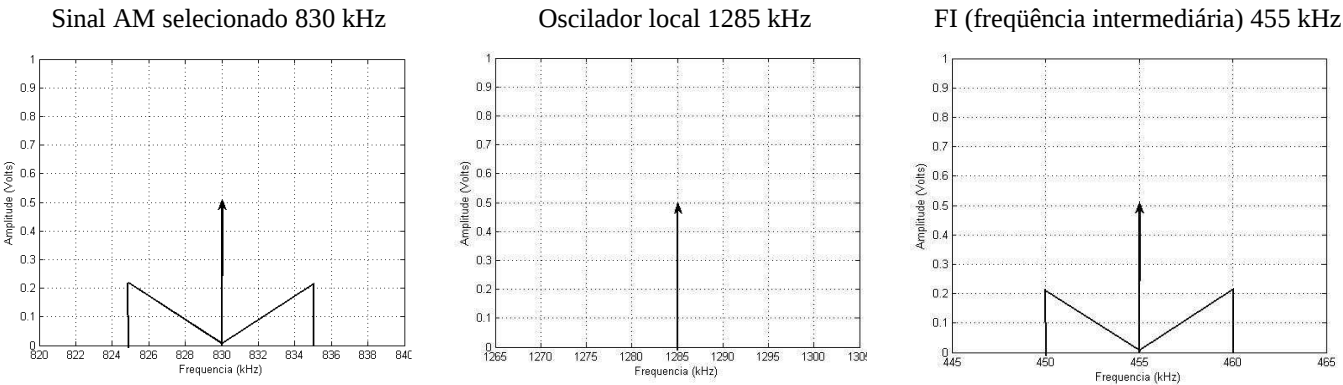


Figura 5.22 – Representação do que ocorre na etapa de FI visto no domínio da frequência.

Perceba pela figura acima que a informação desceu de uma frequência de 830 kHz para uma frequência intermediária FI padrão e constante de 455 kHz e que a frequência do oscilador local foi de 1285 kHz.

5.6.3. Estágio de amplificação de FI.

Até o estágio de FI, o sinal ainda chega muito fraco. Para que possa ser utilizado pelas etapas seguintes, esse sinal é filtrado e amplificado por um filtro passa-faixa sintonizado em 455 kHz.

O alto ganho desse estágio é obtido a partir de amplificadores sintonizados sucessivos, o que permite uma alta seletividade. Em outras palavras, apenas o que realmente interessa e que foi selecionado pelo estágio de RF será amplificado, diminuindo a presença de ruídos ou interferências.

5.6.4. Detector de envoltória.

Nesse estágio, um circuito idêntico ao que já vimos anteriormente retifica o sinal AM vindo da FI e aplica esse sinal retificado no controle automático de ganho, que irá filtrá-lo e tentar manter o volume do áudio constante.

5.6.5. Controle automático de ganho (CAG).

Os sinais que chegam à antena receptora não possuem amplitude constante, e isso ocorre devido a três fatores:

- A potência de transmissão dos sinais para cada emissora não é constante: existem emissoras que possuem transmissores mais potentes, portanto, mais caros que outras.
- A distância entre antena transmissora e o receptor é variável. Cada emissora tem sua antena em um local e, além disso, ao comprar um receptor, você poderá utilizá-lo em qualquer local, e possivelmente transportá-lo de um local a outro.
- Como os sinais são transmitidos por ondas eletromagnéticas, o meio de propagação afetará sensivelmente a amplitude do sinal, e até mudanças nas condições atmosféricas poderão provocar alterações das condições do meio de propagação e variações na intensidade do sinal.

Portanto, caso não tivéssemos o estágio de controle automático de ganho, poderíamos ter variações no volume do sinal recebido ao mudarmos a seleção da estação em um receptor AM-DSB.

O circuito do bloco CAG é composto por um filtro passa-baixas que irá recuperar o valor médio do sinal resultante após a detecção pelo diodo, e aplicá-lo ao primeiro amplificador de FI, mudando sua polarização, e com isso, alterando seu ganho.

Quanto menor for a amplitude do sinal após o detector, menor será seu nível DC, fazendo com que o primeiro amplificador de FI aumente seu ganho, produzindo um aumento na amplitude do sinal após o detector. Isso ocorrerá sucessivamente até o sistema encontrar uma estabilidade.

Da mesma maneira, caso uma variação das condições gerais faça com que a amplitude de saída do detector aumente, o CAG agirá no primeiro amplificador de FI de maneira a abaixar o ganho.

5.6.6. Amplificador de Áudio.

Como o sinal agora já foi demodulado e já está em uma frequência baixa, podemos utilizar qualquer tipo de amplificador de sinais de baixa frequência nesse estágio, de forma a produzir um bom sinal para ser aplicado ao alto-falante.

A qualidade do som final reproduzido dependerá fundamentalmente da potência e fidelidade desse amplificador final, dos alto-falantes utilizados e da filtragem na etapa de FI.

Com isso, encerramos esse capítulo. Façamos agora alguns exercícios.

Exercícios

71 – No que consiste o processo de modulação AM? Que tipo de informação essa modulação mais comumente transporta?

72 – Qual o objetivo da modulação AM?

73 - Dado os seguintes dados, calcule o índice de modulação e esboce o espectro do sinal AM. (Veja exemplo 24)

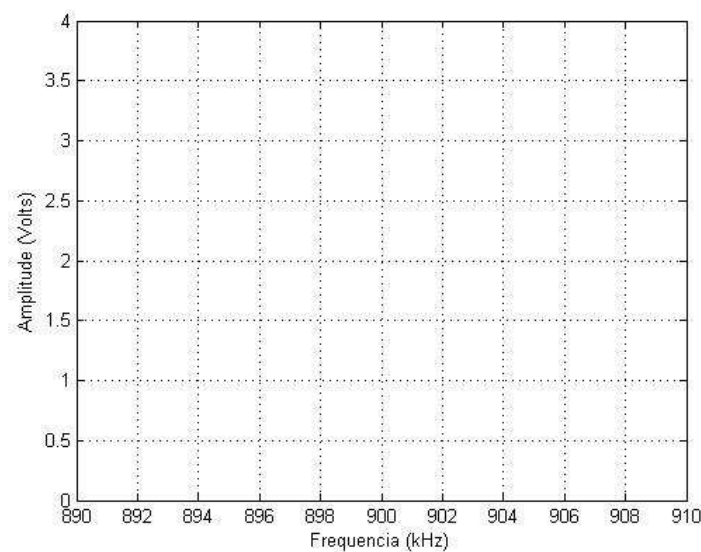
Dados:

$$E_0 = 2\text{Volts}$$

$$E_m = 2\text{Volt}$$

$$f_0 = 900\text{kHz}$$

$$f_m = 5\text{kHz}$$



74 – Dado os seguintes dados, calcule o índice de modulação e esboce o espectro do sinal AM. (Veja exemplo 25).

Dados:

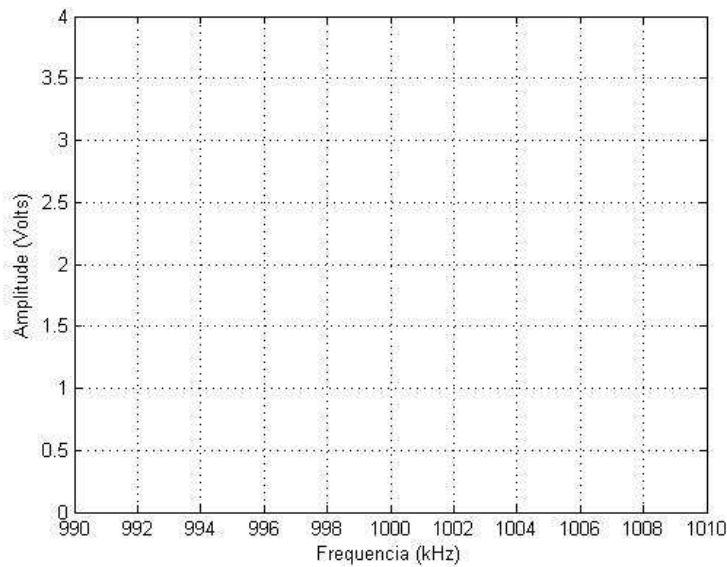
- Portadora:

$$E_0 = 2\text{Volts}$$

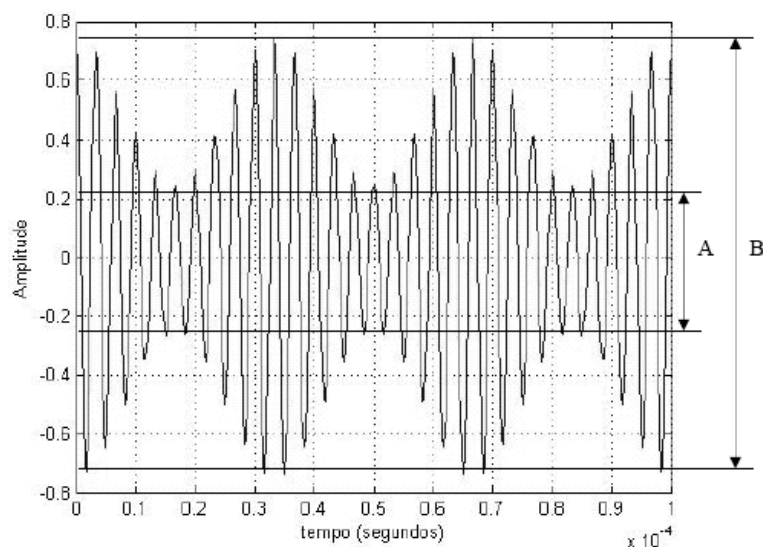
$$f_0 = 1000\text{kHz}$$

- Sinal modulante:

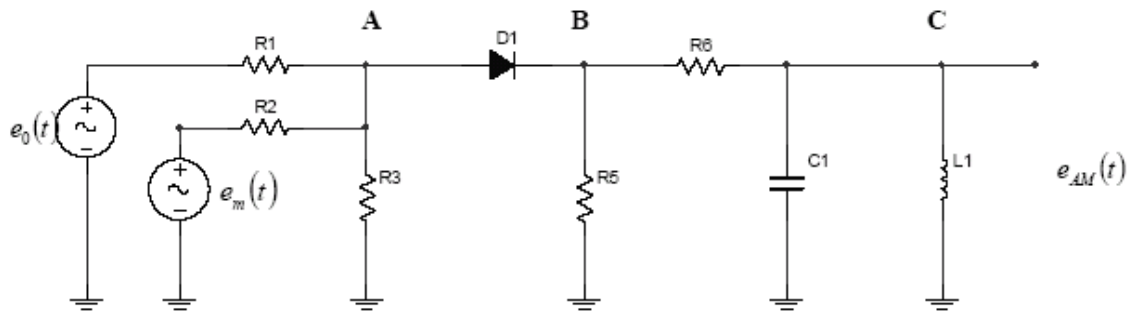
O sinal modulante é um sinal de áudio entre 20 Hz e 5 kHz cuja máxima amplitude da máxima componente de frequência é igual a 1 Volt. Ou seja, $E_m = 1\text{Volt}$



75 – Calcule graficamente o índice de modulação do seguinte sinal modulado em amplitude (veja equação 5-4):



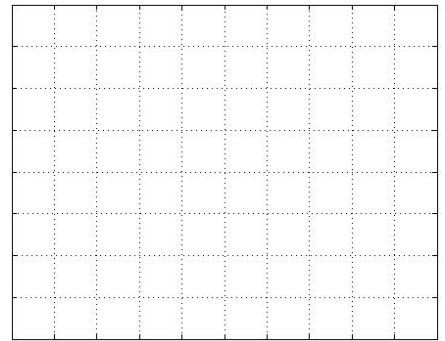
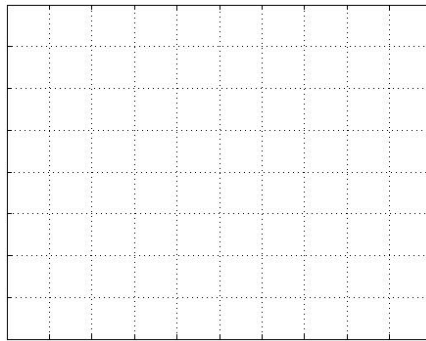
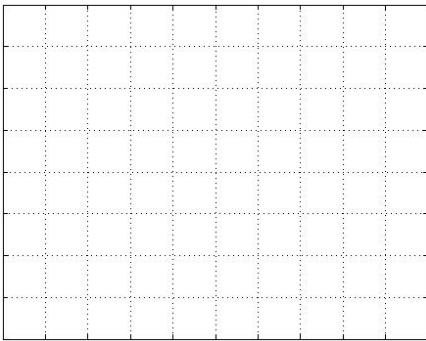
76 – No circuito modulador síncrono abaixo, faça o que se pede:



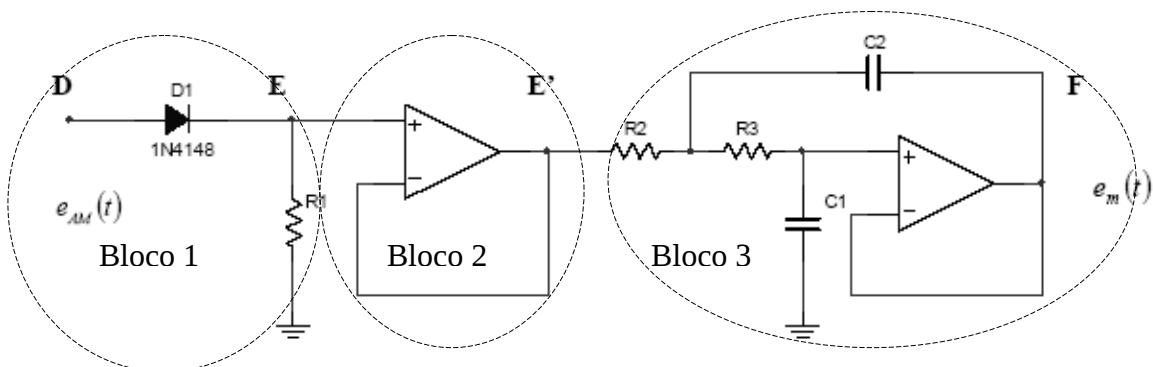
a) Relacione a função ao ponto indicado no circuito.

- () – Filtro passa-faixas.
- () – Somador passivo.
- () – Batimento (multiplicação dos sinais)

b) Esboce as formas de onda nos pontos A, B e C do circuito modulador.

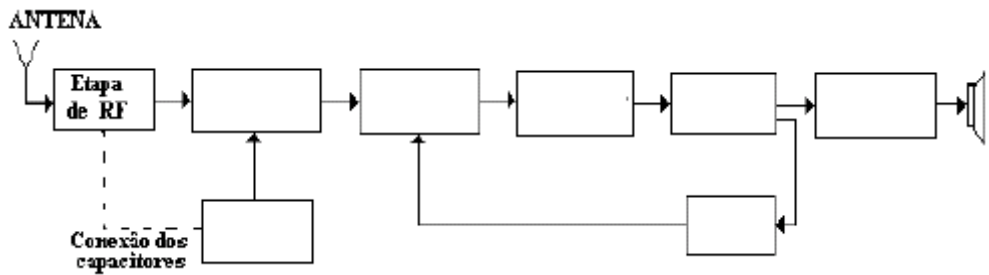


77 – No circuito demodulador detector de envoltória mostrado abaixo, identifique a função de cada bloco.



78 – Qual a vantagem de se usar receptores super-heteródinos?

79 – Dado o circuito do receptor AM super-heteródino mostrado na figura abaixo, complete o nome dos blocos que estão faltando.



80 – Faça um resumo dos blocos que constituem o receptor super-heteródino ressaltando o papel de cada um no receptor.

Modulação FM

Iniciação às telecomunicações

Uma outra forma de modulação muito empregada em serviços de radiodifusão, além de outras aplicações, é a modulação em **frequência ou FM**.

As estações de radiodifusão que transmitem principalmente música, pelas características dessa modalidade de transmissão, fazem seu uso com vantagens para obter maior fidelidade e maior imunidade às interferências e ruídos.

Nesse capítulo você irá se familiarizar com o processo de modulação em frequência, conhecer os princípios utilizados nos circuitos, saber em que tipos de transmissões são usados os sinais de FM.

6.1. A modulação FM.

Vimos no capítulo passado que podemos alterar a amplitude de uma onda portadora através das variações de amplitude do sinal modulante (informação) gerando sinais AM. A modulação FM faz com que a **frequência da onda portadora** se altere de acordo com as variações de amplitude do sinal modulante.

Já estudamos os motivos pelos quais precisamos de uma portadora de alta frequência para transportar informações que correspondem a sinais de baixa frequência. Os mesmos conceitos básicos sobre a necessidade de se modular um sinal de alta frequência são válidos para a modulação em frequência.

A sigla FM significa **modulação em frequência**, que também pode ser chamada de modulação angular, pois uma alteração de frequência também está ligada a uma mudança de ângulo de fase do sinal modulado.

Um modulador FM é um circuito que tem a capacidade de transformar as variações de amplitude do sinal modulante (informação) em variações de frequência na onda portadora constituindo um **oscilador controlado por tensão ou VCO**.

A figura 6.1 abaixo ilustra o funcionamento de um VCO (Oscilador Controlado por Tensão). A frequência desse oscilador determina a frequência da portadora ($e_0(t)$) e é modificada pela amplitude do sinal modulante ($e_m(t)$) a cada instante de tempo, à medida que o sinal modulante varia.

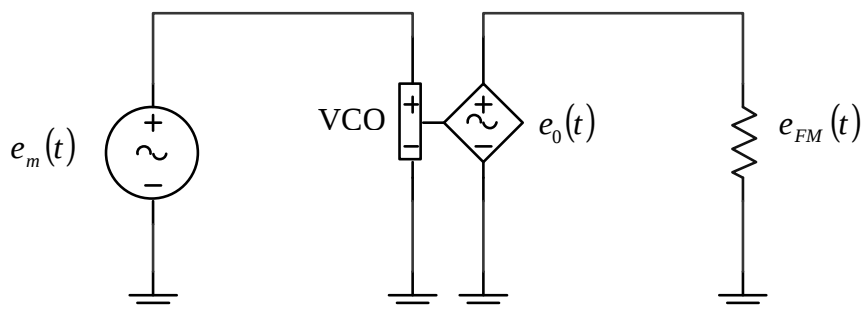


Figura 6.1 – Modulação FM através de um VCO.

Portanto, a saída do circuito VCO da figura 6.1 gera um sinal modulado em frequência chamado $e_{FM}(t)$.

A informação $e_m(t)$ normalmente é um sinal de voz ou uma música, ou seja, um sinal bastante complexo, com vários harmônicos e cuja amplitude está variando no tempo.

A figura 6.2 mostra os sinais envolvidos no processo de modulação FM, considerando que o sinal modulante é um seno puro para simplificar o entendimento.

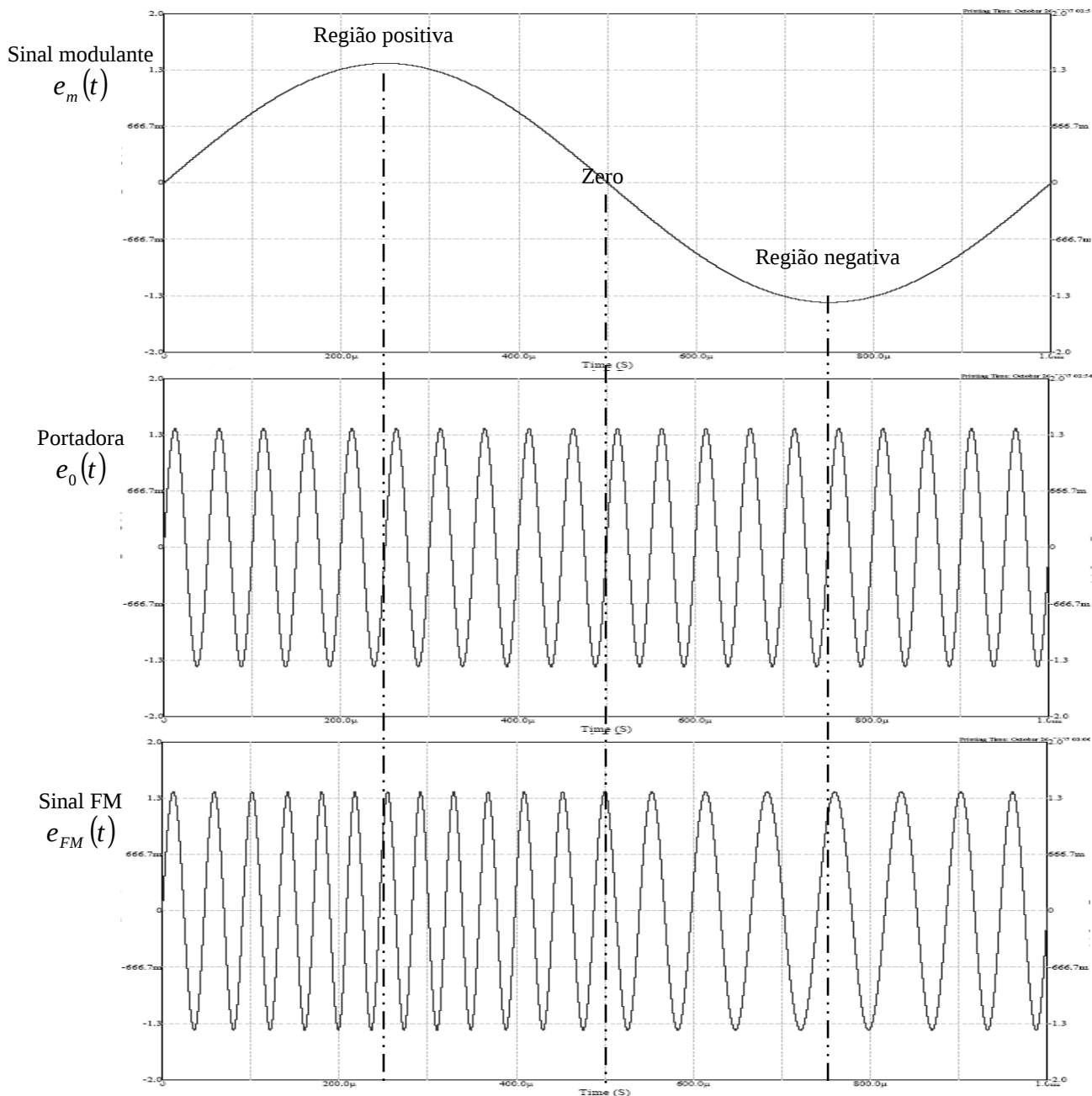


Figura 6.2 – Os sinais envolvidos no processo de modulação FM.

Observe que a amplitude do sinal FM $e_{FM}(t)$ se mantém constante o tempo inteiro. O que varia é a sua frequência, que aumentará quando o sinal modulante for

positivo e diminuirá quando o sinal modulante for negativo. Essa variação ocorre dentro de uma faixa, acompanhando a mudança da intensidade do sinal modulante $e_m(t)$. Note também que quando o sinal modulante é zero, a frequência do sinal FM é igual a frequência da portadora.

A grandeza que mede a variação da frequência da portadora pelo sinal modulante é chamada de **desvio de frequência** e representa a máxima variação possível para a frequência instantânea de um sinal FM ao redor da frequência da portadora.

6.2. A expressão matemática do sinal FM.

Vejamos agora como se processa a operação matemática entre a informação (sinal modulante) e a portadora de forma que se obtenha um sinal FM.

Para simplificar, adotaremos como sinal modulante (informação) um **sinal senoidal puro**, embora a teoria seja a mesma para um sinal mais complexo como um sinal de voz, por exemplo.

A expressão do sinal FM é obtida através da alteração da frequência de uma onda portadora através das variações de amplitudes do sinal modulante. Considerando o sinal modulante como sendo uma senóide pura, temos que a expressão matemática do sinal FM é dada por:

$$e_{FM}(t) = E_0 \cdot \sin\left[\underbrace{(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t)}_{\text{Frequência da portadora}} - \underbrace{\beta \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot t)}_{\text{Argumento (sinal modulante)}}\right] \quad (6-1)$$

Matematicamente, o sinal FM é um seno (portadora) cuja frequência é variada em torno de um valor central f_0 de acordo com a amplitude do sinal modulante e que depende também do **índice de modulação FM chamado de β** .

A decomposição desse sinal em séries de Fourier é um tanto complexa e foge do objetivo do curso, portanto adotaremos algumas regras práticas para determinar o espectro de um sinal FM, bem como a ajuda de *softwares* de simulação.

6.2.1. Desvio de frequência.

O desvio de frequência que ocorre quando modulamos um sinal em frequência, determina a **profundidade de modulação** ou **índice de modulação β** . Define-se matematicamente o índice de modulação β pela seguinte expressão:

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_m} \quad (6-2)$$

Onde Δf é chamado de **desvio máximo de frequência** em relação a frequência da portadora, e f_m é a máxima frequência do sinal modulante.

A grandeza Δf representa a máxima variação possível para a frequência instantânea de um sinal FM, a partir da frequência da portadora f_0 .

Esse desvio de frequência teoricamente poderia ser infinito, entretanto, como o espectro é um **recurso escasso**, os transmissores de radiodifusão usam um desvio de **frequência limitado** e padronizado, como veremos mais adiante.

A figura 6.3 abaixo ilustra onde se encontrarão as raiais espectrais de um sinal FM de acordo com o desvio de frequência Δf .

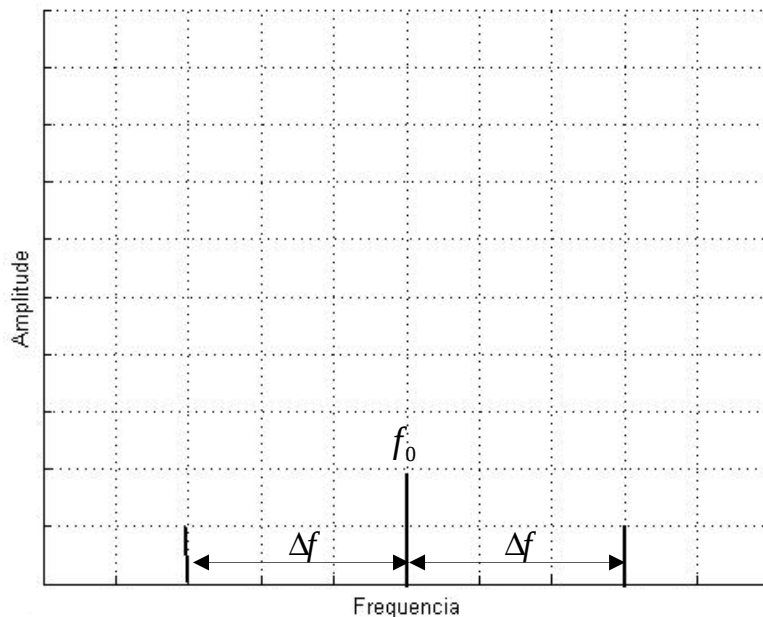


Figura 6.3 – Desvio de frequência mostrando como o sinal FM se espalha em torno da frequência da portadora.

Lembrando que a figura acima não mostra as raiais espectrais do sinal FM, e sim, apenas o lugar aproximado de onde elas se localizarão em torno da frequência da portadora. Posteriormente, veremos quantas raiais existirão e quais suas amplitudes e frequências para um sinal modulante senoidal puro.

6.3. Largura de banda do sinal FM.

A largura de banda B em Hz ocupada por um canal FM depende da máxima frequência do sinal modulante e do índice de modulação β de acordo com a regra de Carson e é dada pela equação abaixo:

$$B = 2 \cdot (\beta + 1) \cdot f_m \quad (6-2)$$

Com isso, veremos agora os dois tipos de sinais FM que são classificados de acordo com o índice de modulação.

6.3.1. FM faixa estreita.

Para pequenos valores do índice de modulação ($\beta \ll 1$), o sinal FM assume a forma de **faixa estreita** (NBFM), onde seu espectro se assemelha bastante com o do sinal AM. Portanto, teremos no espectro do sinal FM a frequência da portadora f_0 e duas bandas laterais ao redor dessa frequência.

A figura 6.4 mostra o espectro de um sinal FM faixa estreita cujo índice de modulação β é igual a 0.2. Observe sua semelhança com o espectro de um sinal AM.

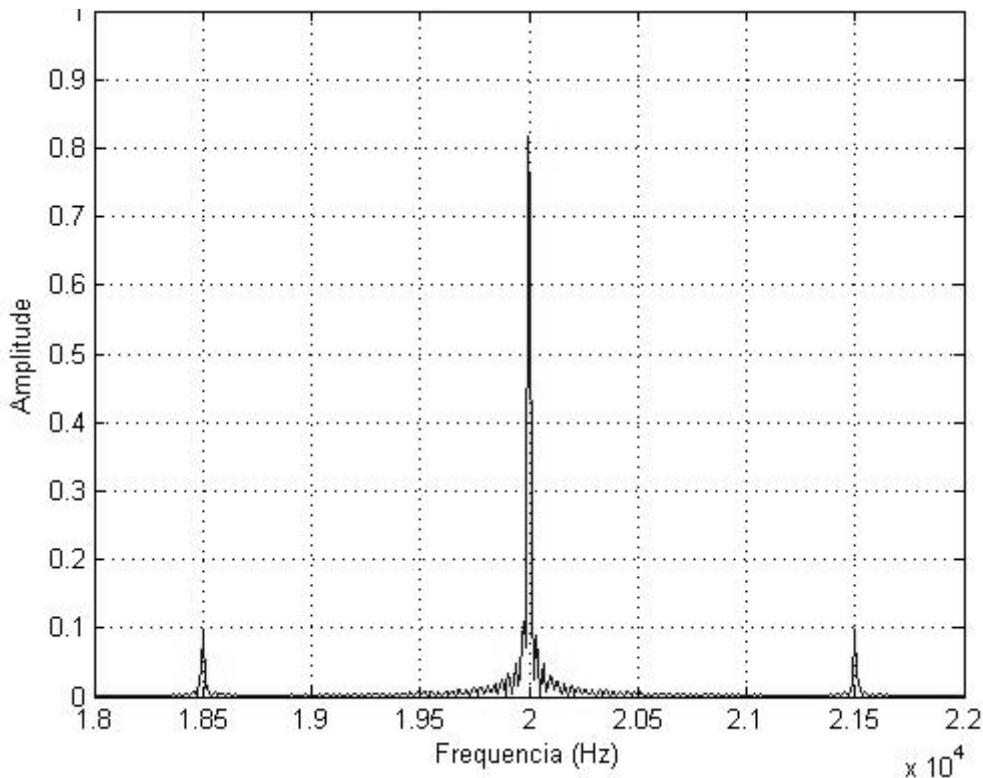


Figura 6.4 – Espectro do sinal FM faixa estreita com β igual a 0.2.

O exemplo da figura acima foi gerado a partir de uma portadora de 20 kHz sendo modulada por um sinal senoidal de 1.5 kHz onde o desvio de frequência Δf é de 300 Hz, e com isso β vale 0.2.

6.3.2. FM faixa larga.

Para valores maiores do índice de modulação β ($\beta > 0.2$ aproximadamente), o espectro do sinal FM contém a portadora e um número infinito de componentes de frequência, localizados simetricamente em torno da portadora de frequência f_0 . **Um sinal FM com essa característica é chamado de FM faixa larga ou WBFM.**

Com isso, não podemos assumir no sinal FM faixa larga, apenas um par de faixas laterais, como no caso do FM faixa estreita. Na realidade, temos vários pares de amplitudes diferentes, entretanto, para simplificar, podemos ignorar as raia espectrais com amplitudes muito pequenas.

A figura 6.5 mostra o espectro de um sinal FM faixa larga para vários índices de modulação β quando a informação e portadora são senóides de 1 V e $f_0 \gg f_m$.

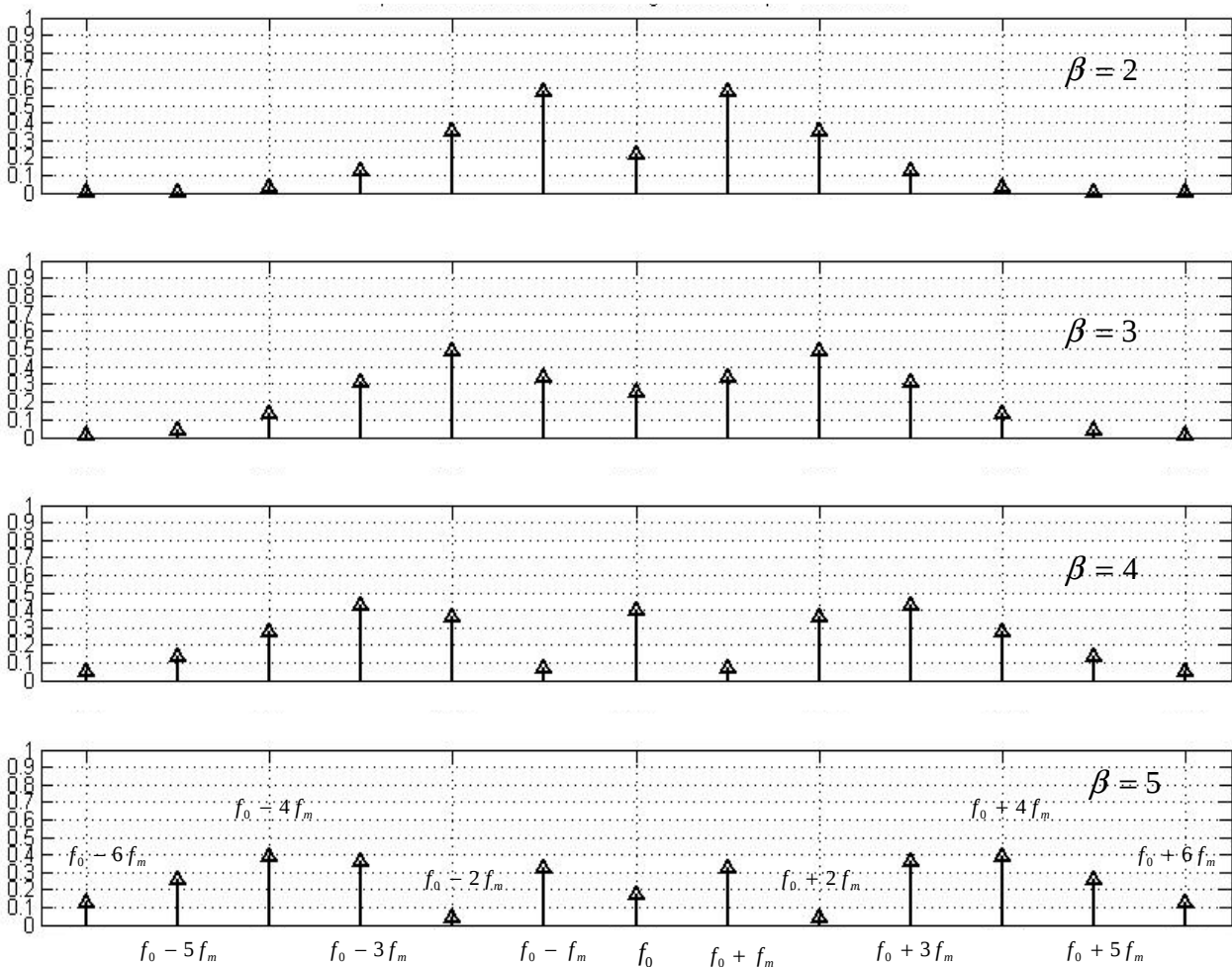


Figura 6.5 – Espectro do sinal FM para vários índices de modulação β .

Nos transmissores comerciais utilizados em FM o desvio de frequência Δf é 75 kHz. A máxima frequência do sinal modulante (informação) é de 15 kHz. Com isso, pela equação 6-2 temos que β vale 5.

Com isso, se injetarmos um tom senoidal em um transmissor FM comercial, deveremos ter seu espectro de RF semelhante ao da figura 6.5 ($\beta = 5$).

6.4. Demodulação de sinais FM.

6.4.1. Discriminador de Inclinação.

Esse é o método mais simples para detecção de sinais modulados em frequência, aproveitando a inclinação praticamente linear na região não-ressonante do circuito sintonizado. Em outras palavras, esse método aproveita a banda de guarda praticamente linear de filtros sintonizados.

Para simplificar o entendimento, podemos dizer que o circuito (ou filtro) sintonizado **converte a variação de frequência do sinal modulado em variações de amplitude.**

A envoltória assim gerada é detectada de forma convencional (como no AM) por meio da utilização de um detector a diodo.

Na figura 6.6 temos um exemplo simplificado desse tipo de circuito, com sua curva de resposta.

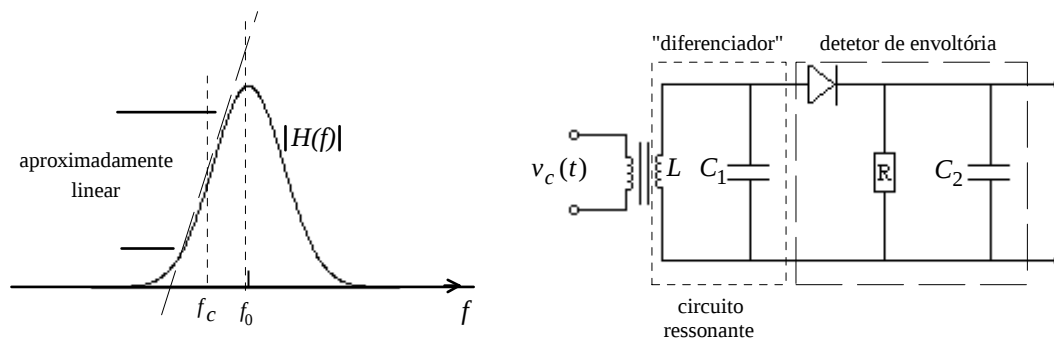


Figura 6.6 – Discriminador de inclinação simples.

A simplicidade reduz o custo do projeto, mas apresenta algumas desvantagens:

- O desvio de frequência deve ser pequeno para aproveitar a estreita região linear da curva.
- Para aumentar a região linear, pode-se diminuir o fator de qualidade do circuito, porém, o ganho em amplitude cairá.
- A região dita linear introduz uma distorção razoável por não ser realmente linear.

6.4.2. Discriminador de Inclinação Balanceado.

Uma idéia para se minimizar as desvantagens do discriminador de inclinação é utilizar dois discriminadores, projetados de forma a melhorar mutuamente as características da inclinação da região não-ressonante.

Na figura 6.7 temos sua característica de funcionamento um circuito simplificado desse tipo de discriminador, com.

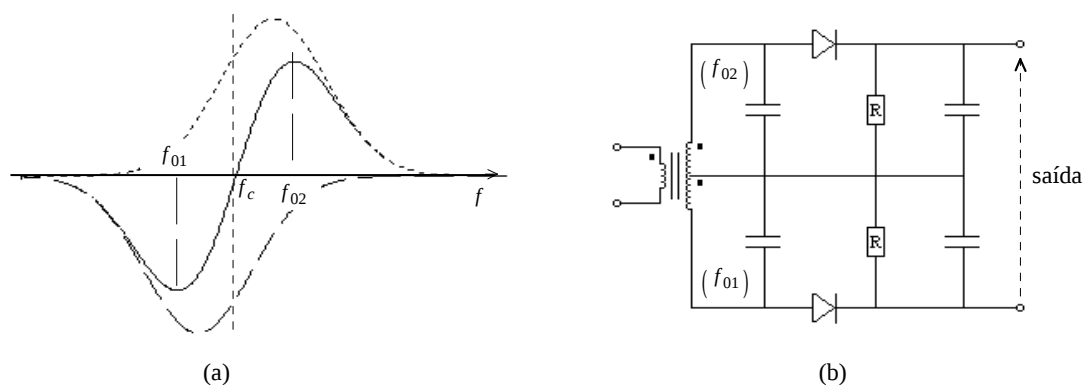


Figura 6.7 – Discriminador de inclinação balanceado.

6.5. FM Estéreo

Até 1961 todas as transmissões FM eram monofônicas, a partir dessa época, passaram a ser autorizadas as transmissões FM comerciais. Usando transmissões FM, era possível dividir o sinal de áudio espacialmente em dois sinais, de 50Hz a 15kHz.

Sons originados no lado esquerdo seriam reproduzidos no lado esquerdo, e sons produzidos no lado direito eram reproduzidos no lado direito.

6.5.1. Transmissor estéreo.

O principal problema em introduzir transmissões estereofônicas, era a compatibilidade com os receptores monofônicos. Para resolver esse problema resolveu-se que na primeira faixa de 50Hz a 15kHz seria transmitido a soma dos sinais L (esquerdo) e R (direito). Para poder separar o sinal L e R, seria então necessário que se adicionasse alguma outra informação em uma faixa superior.

Para isso, poderia ser transmitido o sinal L logo após o sinal L + R, e então para recuperar o sinal R bastaria inverter o sinal L, somar ao sinal L + R e obter o sinal R.

No entanto uma solução mais elegante foi encontrada. Ao invés de transmitir o sinal L, resolveu-se transmitir o sinal L - R, então para obter o sinal L, ou R respectivamente, bastaria somar, ou subtrair os sinais L + R e L - R, obtendo então 2L e 2R, que são os sinais L e R amplificados duas vezes.

A figura 6.8 mostra o espectro do sinal FM estéreo.

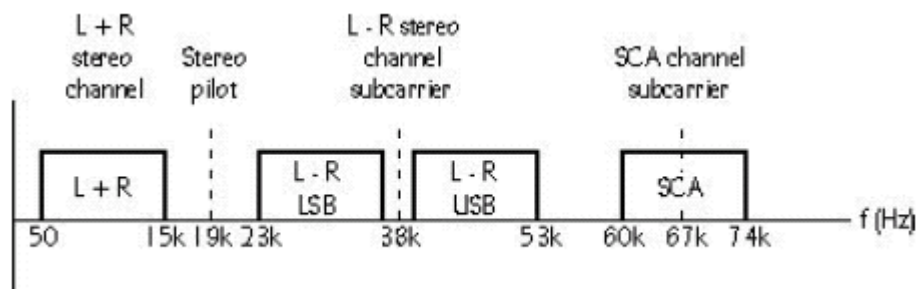


Figura 6.8 – Espectro do sinal estéreo em banda básica.

Como o sinal L + R ocupa a faixa de 50Hz a 15kHz, é necessário uma forma de colocar o sinal L - R em alguma faixa maior. Uma forma de fazer isso é modular o sinal L - R em amplitude usando uma frequência maior, e esta foi a forma utilizada. O sinal L - R passou a ser modulado em AM-DSB com uma sub-portadora de 38kHz, gerando bandas laterais de 38-15 kHz a 38+15 kHz.

Além desses dois sinais, ainda é enviado, na faixa de 19kHz, uma onda piloto, gerada a partir da metade da frequência da onda usada para modular em AM o sinal L - R. Também é possível a existência de uma outra faixa, chamada de SCA (Subsidiary Communications Authorization), que pode ser usada para transmitir informações adicionais, de dados ou áudio e ocupa a faixa de 60-74 kHz. O espectro de um sinal FM estéreo pode ser visto novamente na Figura 6.8

Ao receber uma onda modulada em FM estéreo, um receptor mono, demodula a banda básica e alimenta o amplificador com a faixa de 50Hz a 15kHz, correspondente ao sinal L + R. Receptores estéreo, por sua vez, devem também demodular a faixa de

23-53 KHz que contém o sinal L - R, separar o canal esquerdo e direito de áudio e então alimentar os respectivos auto-falantes. O processo de multiplexação de dois sinais de áudio é mostrado na Figura 6.9.

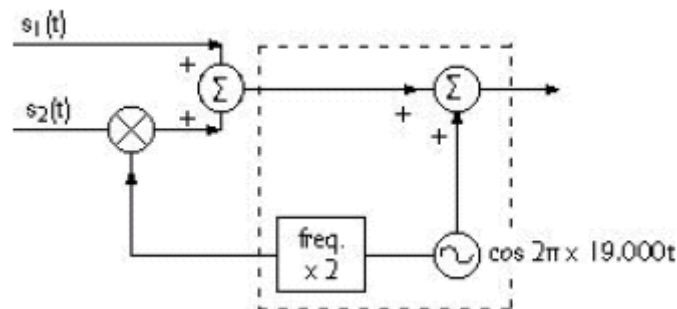


Figura 6.9 – Multiplexação dos canais L e R.

6.5.2. Receptor estéreo.

Quando um sinal FM estéreo é recebido, ele é demodulado, e se torna um sinal de acordo com o descrito no início. Na Figura 6.10, podemos observar o diagrama de blocos de um receptor que possui saídas mono e estéreo.

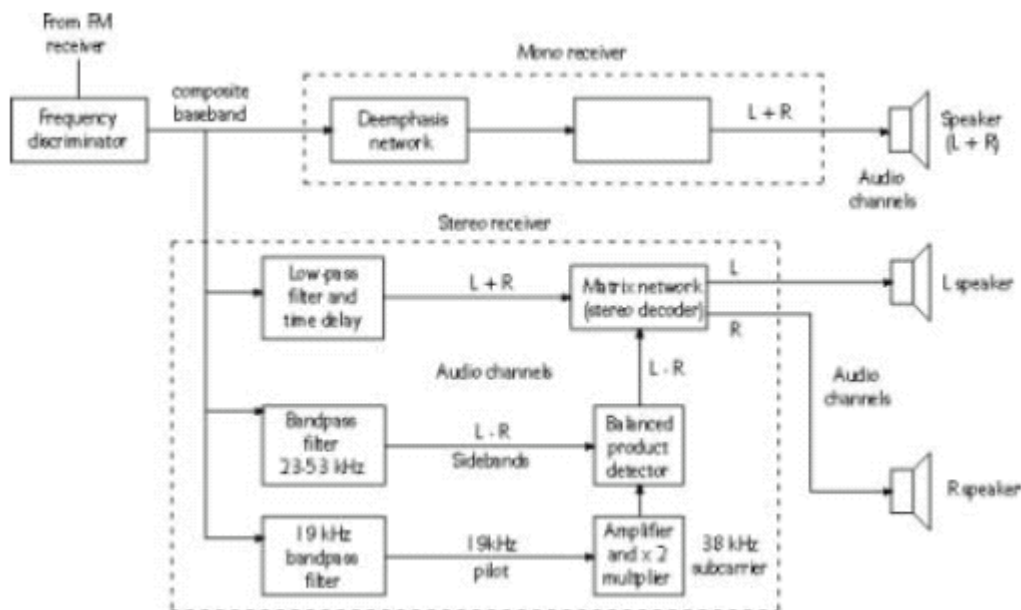


Figura 6.10 – Diagrama de blocos do receptor FM mono e estéreo.

Na seção mono do processador de sinais, o canal L + R contendo toda informação original dos canais L e R é simplesmente filtrado e amplificado para alimentar ambos os auto-falantes. Na seção estéreo, o sinal alimenta um demodulador estéreo onde os canais L e R são separados e direcionados aos seus respectivos auto-falantes.

O canal $L + R$ e $L - R$ e o piloto de 19kHz, são separados do sinal composto usando filtros. O sinal $L + R$ é filtrado usando um filtro passa baixa com frequência de corte de 15kHz. O piloto de 19kHz é separado usando um filtro passa faixa, que então é multiplicado por 2, amplificado e usado no demodulador do sinal $L - R$. O sinal $L - R$ por sua vez, é separado com um filtro passa faixa e então é demodulado, utilizando a portadora de 38kHz recuperada, gerando o sinal $L - R$ de informação de áudio. Os sinais $L + R$ e $L - R$ são então combinados de forma a separar os sinais de áudio L e R, que são usados para alimentar seus respectivos auto-falantes.

Exercícios

81 – No que consiste o processo de modulação FM ? Que tipo de informação normalmente é transportada pelo FM?

82 – No que consiste e como funciona um VCO?

83 – Qual a expressão matemática do sinal FM e o que ela significa?

84 – Defina desvio de frequência e índice de modulação de um sinal FM.

85 – Do que depende e como é calculada a largura de banda B de um sinal FM?

86 – Diferencie um sinal FM faixa estreita de um faixa larga.

87 – O que é um circuito discriminador?

88 – Descreva de forma sucinta o processo de modulação e demodulação FM estéreo.
