

## B-2 Radiação Eletromagnética nas Comunicações

Neste subtema são tratados assuntos relacionados com a transmissão de informação. As limitações que existem ao transmitir sinais sonoros a longa distância são conhecidas, quando comparadas com a transmissão de sinais eletromagnéticos. Daí se aborde a necessidade de usar ondas eletromagnéticas para a transmissão de informação contida nos sinais sonoros. A modulação, quer de amplitude quer de frequência, é apresentada como um processo fundamental para se fazer a propagação de sinais. As vantagens e desvantagens da transmissão, usando sinais analógicos ou digitais, é também um tópico de grande interesse que se aborda.

### 1 Movimentos ondulatórios

O movimento ondulatório, ou movimento por ondas, é aquele que resulta da propagação de uma perturbação. Há múltiplos exemplos no dia a dia deste fenómeno, como por exemplo, uma onda que se propaga na água, o som que se propaga no ar, uma onda eletromagnética que se propaga no espaço.

#### 1.1 Ondas mecânicas e eletromagnéticas

##### Como se efetua a comunicação?

A comunicação entre pessoas faz-se essencialmente através de sinais sonoros. Contudo, quando se pretende comunicar a longa distância, através de sinais sonoros, existem limitações. As **ondas sonoras**, que são ondas mecânicas, necessitam de um suporte material para se propagarem. Ao longo da sua propagação, devido à interação com o meio, a energia é absorvida e verifica-se uma diminuição da intensidade do sinal sonoro, impedindo o sucesso da comunicação.

Em meados do século XIX, graças ao Eletromagnetismo, foi possível converter as ondas sonoras em ondas eletromagnéticas, melhorando drasticamente as comunicações.

Ao contrário das ondas sonoras, as **ondas eletromagnéticas** não necessitam de um suporte material para se propagarem e a sua velocidade de propagação é muito superior. Nos meios materiais o processo de propagação das ondas eletromagnéticas não é perfeitamente

eficiente. A quantidade de energia transferida para o meio depende da frequência e das características do meio. Uma parte dissipa-se como calor ou durante fenômenos de reflexão, refração e difração essenciais para a comunicação a longa distância. Porém, a absorção de energia e a diminuição da intensidade nas ondas eletromagnéticas é menor do que nas ondas sonoras.

A invenção do telégrafo, seguida do telefone, da rádio, da televisão, veio permitir que as mensagens percorressem, em segundos, grandes distâncias.

Atualmente, graças à Eletrônica, é possível comunicar, de forma quase instantânea, entre qualquer parte do mundo.

#### A saber:

*As ondas eletromagnéticas são mais rápidas e conseguem-se transmitir a maiores distâncias com menor perda de informação.*

### Questão resolvida

1. Comente a seguinte afirmação: “A comunicação a longa distância faz-se através de ondas eletromagnéticas porque através de sinais sonoros, existem limitações”.

#### Resolução:

1. A comunicação a longa distância tem que ser feita através de ondas eletromagnéticas porque as ondas sonoras são ondas mecânicas, que necessitam de um suporte material para se propagarem. A interação com o meio vai originar uma elevada absorção de energia ao longo da sua propagação, impedindo o sucesso da comunicação. Por sua vez, as ondas eletromagnéticas não necessitam de suporte material para se propagarem, e a energia absorvida durante a propagação é muito menor, quando comparada com a energia absorvida durante a propagação de uma onda sonora.

## 1.2 Produção e propagação de um sinal. Fenómenos ondulatórios

Em meados do século XIX, foi possível caracterizar as forças exercidas sobre uma carga elétrica sujeita a um campo elétrico criado por outras cargas ou as forças exercidas em fios percorridos por correntes elétricas sujeitos a um campo magnético.

Em 1864, o físico escocês James Clerk Maxwell, num conjunto de quatro equações, resumiu todo o conhecimento acumulado sobre fenômenos elétricos e magnéticos. A partir das suas equações, **Maxwell** concluiu que o **campo elétrico e o campo magnético se propagavam como ondas**. Estas, equações que ligam campos elétricos com magnéticos, são a base do nosso moderno sistema de telecomunicações.



James Clerk Maxwell (1831–1879)

### Como se pode criar uma onda eletromagnética?

Considere-se então que, através da oscilação de uma pequena carga em torno de uma posição, se emite para todos os pontos à sua volta uma onda de campo elétrico e uma onda de campo magnético com a mesma frequência, a de oscilação da carga.

A associação da onda elétrica com a onda magnética, designa-se por **onda eletromagnética**.

Estas têm por base o entrelaçamento existente entre o campo elétrico e o campo magnético. Através da indução mútua dos campos elétricos e magnéticos, a perturbação eletromagnética pode propagar-se até pontos distantes da região do espaço onde foi iniciada.

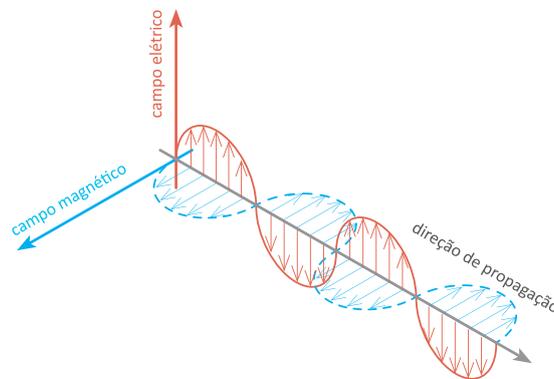


Figura 111 – Propagação de uma onda eletromagnética.

#### A saber:

*O campo elétrico e o campo magnético propagam-se, num plano que é perpendicular à direção de propagação - as ondas eletromagnéticas são ondas transversais.*

## 2 Transmissão de informação

### 2.1 Produção de ondas de rádio: trabalhos de Hertz e Marconi

Desde o primeiro telégrafo elétrico, construído por Henry, através do qual se conseguiu enviar uma mensagem codificada a uma milha de distância, ou da primeira mensagem codificada transmitida por Morse, a 16 km de distância, a era das telecomunicações faz parte integrante das nossas vidas. O telefone, a rádio, a televisão, os sistemas de radar, o fax, os telemóveis e as redes de comunicação de computadores são exemplos disso.



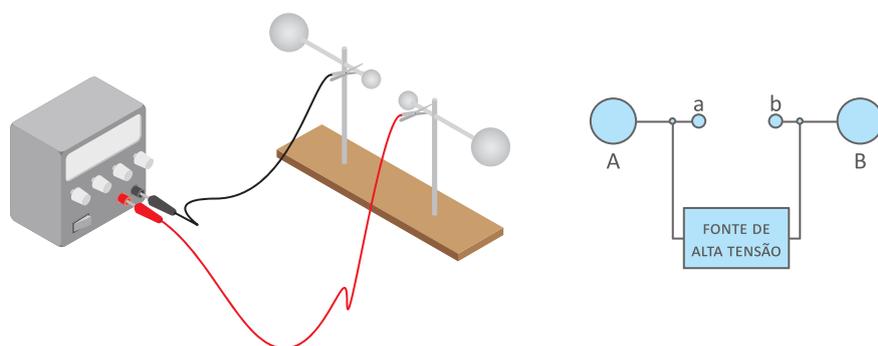
Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894)

### Como se pode gerar uma onda eletromagnética para transmitir informação?

Em 1887, Hertz, gerou a primeira onda de rádio, dando início à tecnologia da rádio e da televisão.

A sua experiência levou à compreensão de que as ondas de rádio, tal como a luz, são radiação eletromagnética com várias frequências, ocupando, portanto, zonas diferentes do espectro.

No trabalho de Hertz, duas esferas metálicas encontravam-se a uma certa distância uma da outra, colocadas na extremidade de duas barras ligadas por fios condutores a uma fonte de alta tensão, como se mostra na figura.

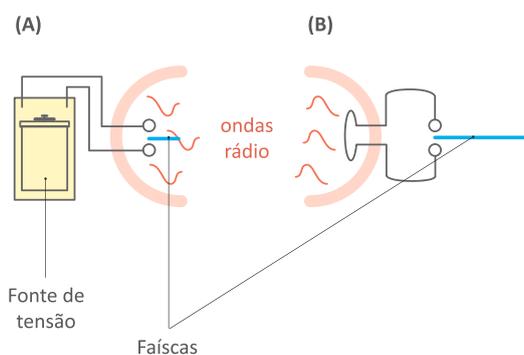


**Figura 112** – Equipamento utilizado por Hertz para emitir e receber ondas eletromagnéticas. Do lado direito está o respetivo esquema.

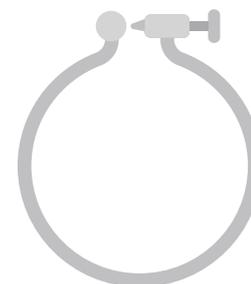
Podia-se então criar uma diferença de potencial elevada entre as esferas. O ar tornava-se, momentaneamente, condutor, fornecendo um meio de condução das cargas elétricas que assim, oscilavam entre as duas esferas. Devido a esta corrente elétrica variável, observavam-se faíscas entre as duas esferas. Estes impulsos elétricos oscilantes criavam um campo elétrico variável que gerava, nas vizinhanças, um campo magnético variável. Este, por sua vez, gerava, nas vizinhanças um campo elétrico variável e assim sucessivamente.

Hertz tinha assim, uma fonte geradora de impulsos elétricos.

A alguma distância da corrente variável, Hertz colocou um circuito idêntico ao do emissor, denominado ressonador de Hertz, sobre o qual, verificou, originar-se igualmente faíscas, com a mesma frequência dos impulsos originais, como se mostra na figura.



**Figura 114** – Representação esquemática da experiência de Hertz.



**Figura 113** – O ressonador de Hertz foi a primeira antena recetora de ondas eletromagnéticas.



Guglielmo Marconi (1874–1937)

O inventor italiano Guglielmo Marconi era ainda jovem quando patenteou um sistema de telegrafia sem fios. A conquista de Marconi foi ter produzido ondas de rádio e detetá-las a distâncias consideráveis. Ainda no século XIX estabeleceu a comunicação sem fios entre França e Inglaterra. Mais tarde, em 1909, foi galardoado com o Prémio Nobel da Física.

## 2.2 Transmissão de sinal

Grande parte das tecnologias presentes no nosso quotidiano, a rádio, a televisão, os telemóveis, os mais variados controlos remotos, os telefones sem fios, o GPS, etc., fazem uso de ondas eletromagnéticas. Tendo em conta a especificidade de cada aparelho, e o número crescente de tecnologias, foi necessário definir bandas de frequência.

A figura 115, mostra o espectro eletromagnético, com a inclusão de algumas dessas tecnologias.

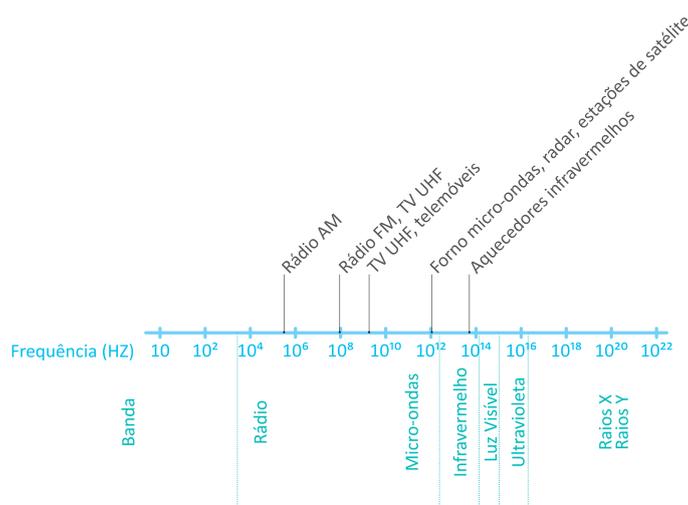


Figura 115 – Espectro eletromagnético.

Nas comunicações, a radiação emitida pelas antenas de televisão, de rádio, de telemóveis, etc., faz-se sobretudo na banda das ondas de rádio e micro-ondas. Utilizam-se frequências desde kHz ( $10^3$  Hz) até às centenas de GHz ( $10^{11}$  Hz). Este intervalo de frequências, que é utilizado nas comunicações, foi dividido, um tanto arbitrariamente, por acordos internacionais. A tabela 4 indica a designação das bandas de radiofrequências. As bandas de radiofrequências são conhecidas pelas iniciais das palavras em língua inglesa.

Nome em Português	Nome em Inglês	Sigla	Banda de frequências
Frequências muito baixas	Very low frequencies	VLF	3-30 kHz
Frequências baixas	Low frequencies	LF	30-300 kHz
Frequências médias	Medium frequencies	MF	300-3000 kHz
Frequências altas	High frequencies	HF	3-30 MHz
Frequências muito altas	Very high frequencies	VHF	30-300 MHz
Frequências ultra altas	Ultra high frequencies	UHF	300-3000 MHz
Frequências super altas	Super high frequencies	SHF	3-30 GHz
Frequências extra altas	Extra high frequencies	EHF	30-300 GHz

Tabela 4 – Gamas de frequências, usadas em comunicação.

### Questão resolvida

1. A voz humana mantém-se inteligível, numa faixa de frequências muito reduzida. É frequente limitá-la a uma banda de frequências compreendida entre os 300 e 3400 Hz. Calcule, no vazio, o comprimento de onda de radiações eletromagnéticas com as frequências limite para a voz humana ser reconhecida pelas pessoas que a ouvem.

**Resolução:**

$$1. \lambda_1 = \frac{c}{f_1} = \frac{3,0 \times 10^8}{300} = 1,0 \times 10^6 \text{ m}$$

$$\lambda_2 = \frac{c}{f_2} = \frac{3,0 \times 10^8}{3400} = 8,8 \times 10^4 \text{ m.}$$

### 2.3 Sinal analógico e sinal digital

As limitações na transmissão de sinais sonoros, ou de qualquer outro sinal, a longas distâncias implicaram a necessidade de utilizar as ondas eletromagnéticas, para conseguir transmitir a informação contida nesses sinais. Mas, para que a transmissão fosse possível, foi necessário converter os sinais sonoros em sinais elétricos, uma vez que todo o processo de comunicação se efetua através de sistemas elétricos.

Nos sistemas de comunicação modernos, utilizam-se dispositivos que efetuem a transformação de uma grandeza não elétrica numa grandeza elétrica, que se designam por **transdutores**. O microfone é um exemplo de um transdutor.

Dependendo das suas características, os sinais, podem ser classificados como **sinais analógicos** ou **sinais digitais**.

## O que são sinais analógicos e sinais digitais? Como se distinguem?

Num microfone, as variações de tensão elétrica refletem a frequência e a intensidade dos sons captados. Estes são fundamentalmente sons complexos, e a diferença de potencial gerada no circuito do microfone é variável. Na figura 116 ilustra-se uma sequência contínua de diferenças de potencial gerada num microfone, que pode ser vista num osciloscópio. Trata-se de um sinal analógico, que se caracteriza pela variação contínua com o tempo de uma dada grandeza física.

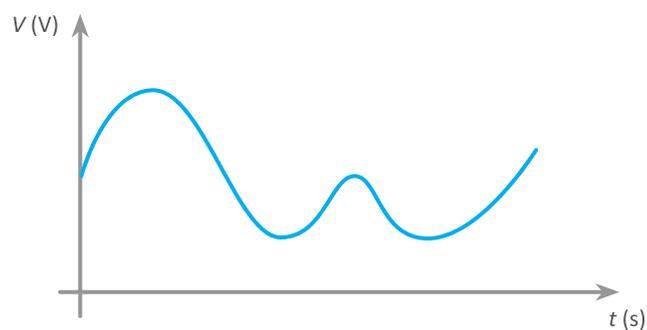


Figura 116 – Sinal analógico. Sequência contínua de tensão em função do tempo gerada num microfone.

Na última metade do século XX graças à Eletrónica, tornou-se possível converter o sinal analógico num sinal digital, isto é, fazer o processamento digital de informação. Trata-se de converter um sinal contínuo no tempo num sinal discreto. O dispositivo que o faz chama-se conversor analógico-digital. O contrário, isto é, converter um sinal digital num analógico é feito por um conversor digital-analógico.

Para se compreender o processo, é necessário recordar como se converte um número na base 10 para a base 2 e vice-versa. Na base 2 apenas se utilizam os algarismos 0 e 1. Na base 10 utilizam-se 10 algarismos diferentes. Considere-se um número na base 10, por exemplo 23. Então,  $23 = 2 \times 10^1 + 3 \times 10^0$ . O algarismo 2 tem peso  $10^1$ , ou seja tem o peso das dezenas. O algarismo 3 tem peso  $10^0$ , ou seja, tem o peso das unidades.

Considere-se agora um número escrito na base 2, por exemplo 1011. Analogamente,

$1011 = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0$ . Efetuando o cálculo obtém-se então, na base 10, o número 11.

## Questões resolvidas

1. Converta para a base 2 os números escritos na base 10:

1.1. 23

1.2. 14

**Resolução:**

1.1. 23 na base 10 é igual a 10111 na base 2, porque

$10111 = 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0$ . Calculando obtém-se 23.

1.2. 14 na base 10 é 1110 na base 2, porque

$1110 = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0$ . Calculando obtém-se 14.

2. Converta para a base 10, os números escritos na base 2:

2.1. 10101

2.2. 1011101

**Resolução:**

2.1.  $10101 = 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0$ . Calculando obtém-se 21.

2.2.  $1011101 = 1 \times 2^6 + 0 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0$ . Calculando obtém-se 93.

Considere-se um sinal analógico como o representado na figura 117. Para se converter num sinal digital, o primeiro passo é a **amostragem**. Trata-se de medir o sinal em determinados momentos. Por exemplo, no momento  $t_1$  é lido o valor 5, no momento  $t_2$  é lido 7, no momento  $t_3$  é lido 3, e assim sucessivamente. De notar que estes valores podem resultar de um arredondamento, que é feito num processo denominado **quantificação**.

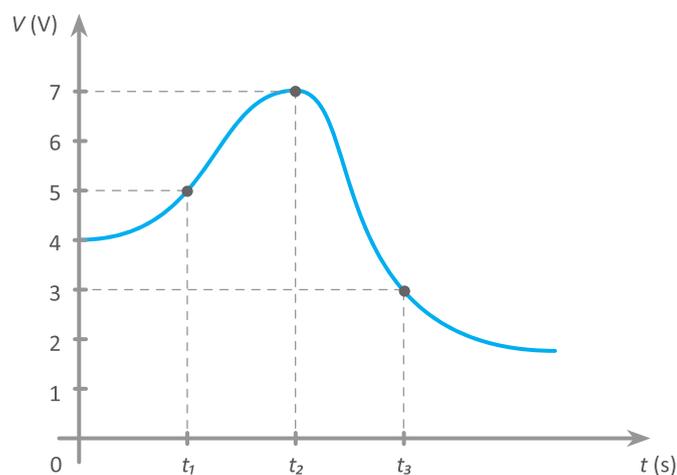


Figura 117 – Sinal analógico.

### A saber:

*Amostrar um sinal significa coletar amostras num determinado momento.*

*A periodicidade com que essas amostras são colhidas é denominada período de amostragem.*

*A periodicidade influencia na posterior recuperação do sinal amostrado.*

### A saber:

*Uma vez que o sinal original é arredondado para um nível de quantificação, é acrescentado um erro. Este erro é chamado de Erro de Quantificação.*

*Quanto maior o número de níveis, menor será o Erro de Quantificação.*

Finalmente é necessário fazer a codificação, isto é, passar os valores quantificados para a base 2. Assim a sequência lida, 5, 7, 3 converte-se em 101, 111, 011. Este sinal pode então ser transmitido e recuperado posteriormente, usando um conversor digital-analógico. Neste exemplo foram usados 3 dígitos binários, que se designam por *bit*, do inglês *Binary digit*.

#### A saber:

O sinal analógico caracteriza-se por uma função contínua.

O sinal digital caracteriza-se por uma função discreta.

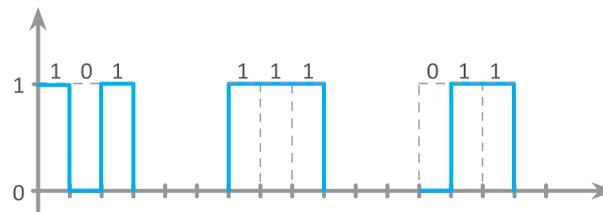


Figura 118 – Sinal digital correspondente aos momentos de amostragem da figura 117.

### Questão resolvida

1. O conversor analógico-digital ADC0804 é um circuito integrado, capaz de converter uma amostra analógica entre 0 e 5,00 V, num valor binário de 8 bits. Calcule a resolução deste conversor.

#### Resolução:

1. A resolução do conversor é o mínimo valor que ele consegue distinguir. Neste caso, o intervalo de 0 a 5,00 V, vai ser dividido por  $2^8$  possibilidades, uma vez o conversor ter 8 bits. Logo a resolução é

$$R = \frac{5}{2^8} = 0,0195 \text{ V.}$$

### Qual a vantagem em converter um sinal analógico num sinal digital?

Um dos maiores problemas da transmissão de informação deve-se à necessidade de **amplificar o sinal**. Nesse processo, normalmente, amplifica-se também parte do sinal que não corresponde a informação, isto é, o **ruído**.

Na transmissão de informação através de sinais analógicos, estes podem, sofrer distorções, alterando a sua forma, devido a transmissões imperfeitas através das antenas, de interferências, através da sobreposição com outros sinais ou ruído, e deformação devida a situações imprevisíveis, como as condições atmosféricas. A figura 119 ilustra o que pode acontecer a um sinal analógico quando é transmitido.

Contrariamente, na transmissão ou armazenamento de informação digital, a integridade do sinal é assegurada, utilizando bons conversores analógicos-digitais e digitais-analógicos. No processo de transmissão o sinal digital também é atenuado, mas na amplificação, só é tratada a informação, e não o ruído. Como se mostra na figura 120, não se perde informação no processamento digital do sinal. Mesmo com o ruído o número 101 não é alterado.

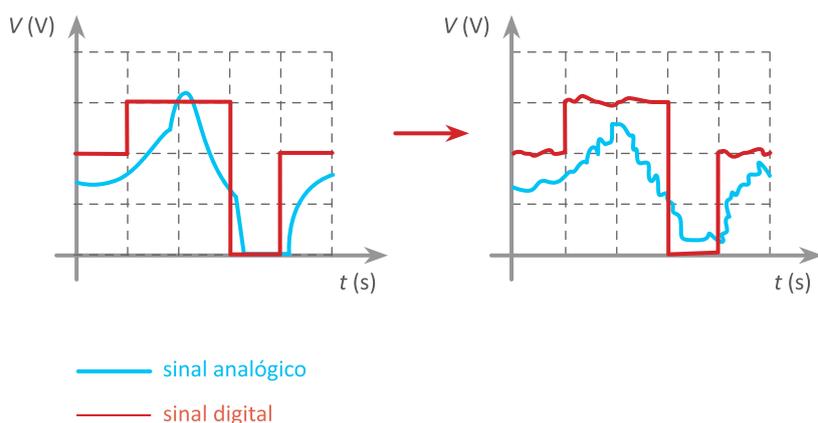


Figura 120 – O sinal digital é mais imune ao ruído do que o sinal analógico.

Uma outra vantagem da informação digital é o facto de ser facilmente encriptável. Este aspeto é cada vez mais importante sobretudo quando se enviam dados secretos pela Internet, números de contas bancárias ou de cartões de crédito, informação confidencial, etc.

## 2.4 Modulação de sinais analógicos: modulações AM e FM

A **modulação** é um processo no qual um sinal, normalmente de baixa frequência, é transformado, para depois ser transmitido a muito mais alta frequência, por ação de uma onda portadora. O sinal de voz, é modulado em torno de uma portadora de maior frequência, e assim transmitido. Na receção é necessário fazer a operação inversa, para recuperar o sinal inicial, usando a desmodulação.

### Porquê modular um sinal que se pretende transmitir?

Considere-se que duas pessoas estão a falar, transmitindo informação simultaneamente a um terceiro, como se mostra na figura 121.

Como se sabe, as fontes de informação vão sobrepor-se. A pessoa a quem se destinam não consegue ouvir simultaneamente os dois a falar.

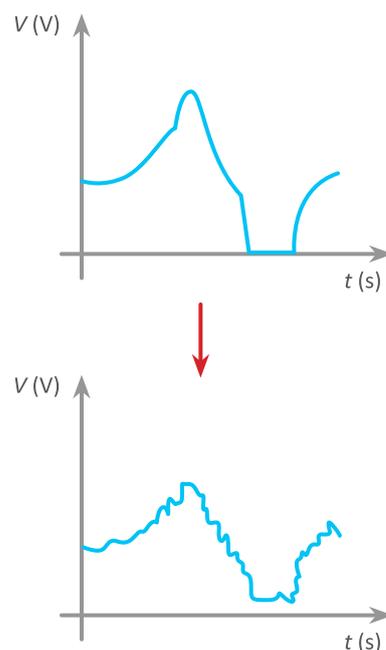


Figura 119 – O sinal recebido contém ruído.

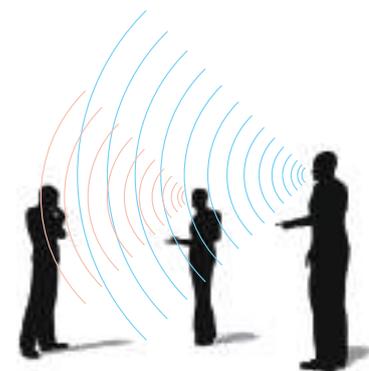
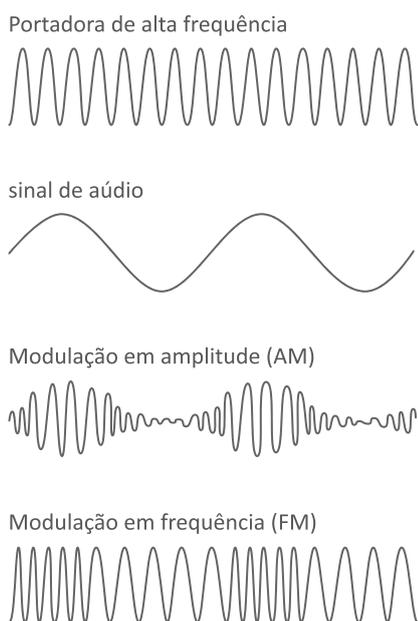


Figura 121 – O recetor não consegue distinguir a informação vinda de duas fontes.



**Figura 122** – Modulações em amplitude e frequência.

É necessário enviar as informações de modo a que na receção se possam recuperar, isto é, seja possível ouvir a voz das duas pessoas.

A modulação é o processo que permite que isto seja feito, enviando a informação com duas portadoras de frequências diferentes.

Outra das vantagens da modulação é que permite o uso de antenas mais pequenas. A antena dipolar, com comprimento de meio comprimento de onda, não é viável para sinais de baixa frequência, como o som audível pelo homem. Por exemplo, um sinal sonoro de 1 kHz, tem um comprimento de onda de 300 km! Com a modulação, usando portadoras de muita alta frequência, consegue-se ter antenas muito pequenas.

Há ainda outras vantagens, como o menor ruído e fácil encriptação.

Nos processos de modulação mais comuns, os sinais podem ser modulados em amplitude, AM (do inglês *Amplitude Modulation*), ou em frequência, FM (do inglês *Frequency Modulation*), para transportar informação.

Na **modulação em amplitude**, a amplitude da onda portadora é modificada pelo sinal correspondente à informação, permanecendo a frequência constante. A onda resultante é mais sensível a alterações durante a sua propagação, dado que a informação está na amplitude que pode ser afetada pelo ruído.

Na **modulação em frequência**, a frequência da onda portadora é modificada pelo sinal correspondente à informação. A amplitude da onda portadora permanece inalterada. A informação está na frequência, e por isso é insensível ao ruído na amplitude.

Note-se que, em AM, a amplitude da portadora varia de acordo com o sinal a modular, o sinal áudio de baixa frequência. Em FM, a amplitude da portadora é constante. No entanto, quando a amplitude do sinal de áudio aumenta, a frequência da portadora também aumenta e quando diminui há a correspondente diminuição da frequência da portadora.

As estações de rádio em FM utilizam portadoras entre cerca de 88 MHz e 108 MHz. Por exemplo, a Rádio Timor Leste, RTL, emite para Díli em 91,5 MHz, para Liquiçá em 99,5 MHz, para Baucau em 105,1 MHz. Quando utiliza modulação AM, a frequência da portadora é inferior, 684 kHz.

Os sinais de televisão ocupam faixas compreendidas entre aproximadamente 50 MHz (VHF) e 800 MHz (UHF). Curiosamente, o sinal de vídeo é modulado em amplitude e o sinal de áudio em frequência.

Os telemóveis usam normalmente frequências de 900 MHz e 1800 MHz, com um tipo de modulação mais sofisticado.

## APSA B-2.1: Produção de ondas rádio. Trabalhos de Hertz e Marconi

**Questão-problema:** Como foram os primórdios das telecomunicações?

**Objetivo:** Elaboração de uma pesquisa e de um debate sobre as experiências de Hertz e os trabalhos de Marconi.

**Recursos:**

- Manuais
- Computador com acesso à Internet

**Procedimento:**

Em 1888, Hertz publicou num jornal as suas experiências com circuitos oscilantes e um rapaz novo, adolescente, leu o artigo enquanto estava de férias nos Alpes. A descoberta de Hertz deu-lhe uma ideia: por que não utilizar as ondas geradas pelo oscilador de Hertz para transmitir sinais? O jovem italiano Guglielmo Marconi, notável inventor, era esse rapaz, e assim que voltou a Itália tentou pôr a sua ideia em prática.

1. Elabore um esquema legendado da experiência de Hertz.
2. Explique o aparecimento de corrente e faíscas no segundo circuito.
3. Descreva a ideia de Marconi.
4. Explique o motivo de ser obrigatório a presença de uma estação de rádio nos navios depois da divulgação dos trabalhos de Marconi.
5. Apresente o resultado da pesquisa aos colegas.