MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CAMPUS SÃO JOSÉ – SANTA CATARINA

ANT – Antenas e Propagação

Prof. Ramon Mayor Martins, MEng.

ramon.mayor@ifsc.edu.br / mayor@linuxmail.org

PARTE 3: Ondas Eletromagnéticas
Disponível em: http://goo.gl/kzvSbd

3. – Ondas Eletromagnéticas

3.1 - Introdução
3.2 - Formas de Obtenção de Ondas Eletromagnéticas
3.3 - Geração de ondas eletromagnéticas por processo eletrônico
3.4 - Equações de Maxwell
3.5 - Parâmetros:

- -Campo Magnético
- -Campo Elétrico
- -Permissividade
- -Permeabilidade
- -Equação da onda
- -Velocidade da onda eletromagnética
- -Energia da onda eletromagnética
- -Frente de onda
- -Princípio de Huygens-Fresnel
- -Impedância da onda
- -Parâmetros clássicos da ondulatória
- -Polarização

3 – Ondas Eletromagnéticas

3.1 – Introdução:

Em 1865, James Clark Maxwell, baseado em trabalhos de Coulomb, Ampere e Faraday, estabeleceu que qualquer carga elétrica oscilando gera 2 campos: um elétrico **E** e outro magnético **B**

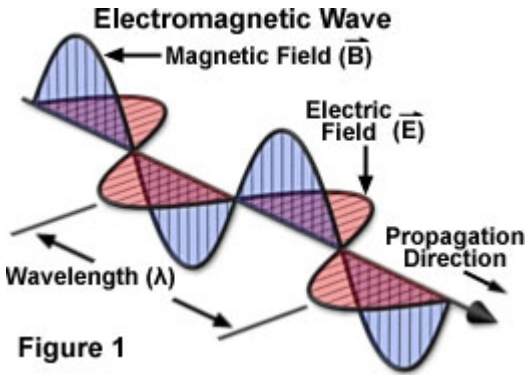
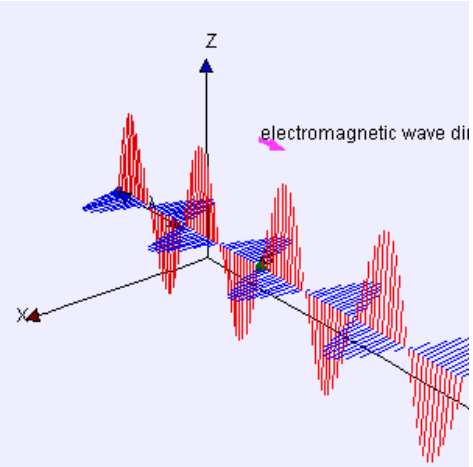


Figure 1



Estes campos são perpendiculares entre si e à direção de propagação, constituindo uma onda, chamada **onda eletromagnética**

3 – Ondas Eletromagnéticas

3.2 – Formas de obtenção de ondas eletromagnéticas:

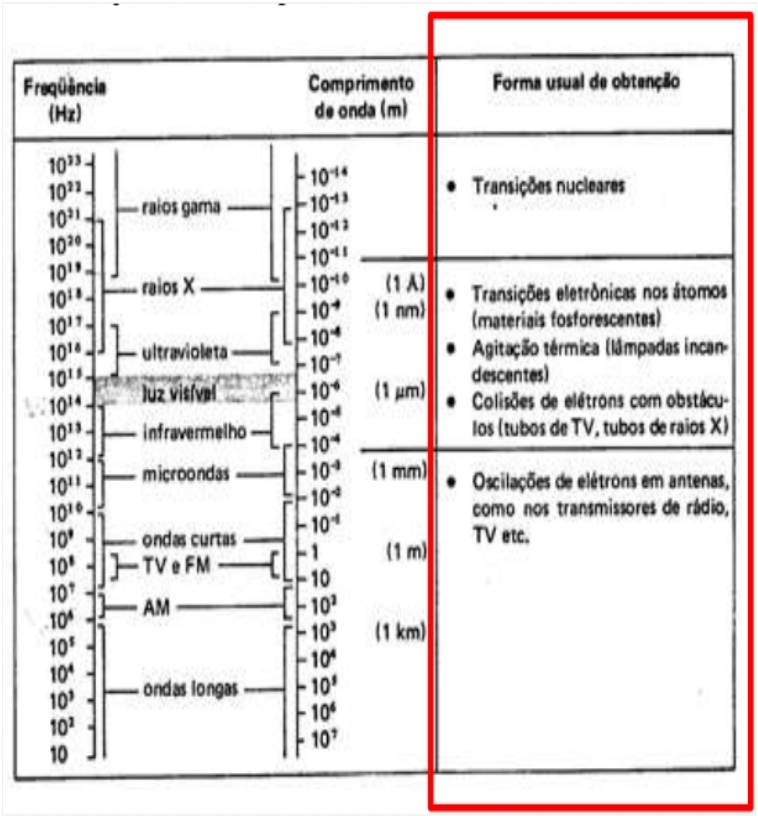
• Formas de emissões, como raios gama, são originados de forma espontânea pelos núcleos de átomos radioativos, como urânio, rádio e outros materiais.

• Moléculas e átomos excitados tambem emitem energia eletromagnética em uma faixa enorme de frequências. Ex: Aquecimento do hidrogênio em uma temperatura muito alta faz com que os dois átomos de suas moléculas entrem em vibração, adquirindo movimento harmônico.

•Também podem ser geradas através de transições de elétrons entre níveis de energia dos átomos. Quando os elétrons caem de um estado de energia mais alto para um nível inferior, a correspondente diferença é irradiada sob a forma de onda eletromagnética.

• Irradiações causadas pelas vibrações de elétrons mais internos dos átomos ou, mais comumente, pelo impacto de elétrons dotados de altas velocidades em um anteparo metálico

•As ondas eletromagnéticas podem ser geradas por processos eletrônicos como (osciladores) – e emitidas a partir de um dispositivo de irradiação (radiodifusão, comunicações micro-ondas, televisão, radares)



3 – Ondas Eletromagnéticas

3.3 – Geração de ondas eletromagnéticas por processo eletrônico:

Inicialmente é construído um circuito eletrônico para gerar um sinal repetitivo, uma função senoidal.

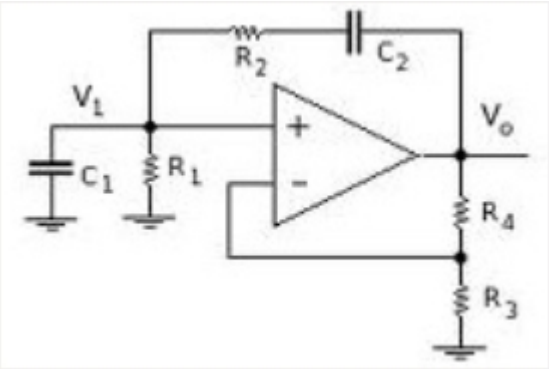
Para esse fim são utilizados osciladores.

Existe vários tipos de osciladores, dependendo da aplicação, sendo os principais:

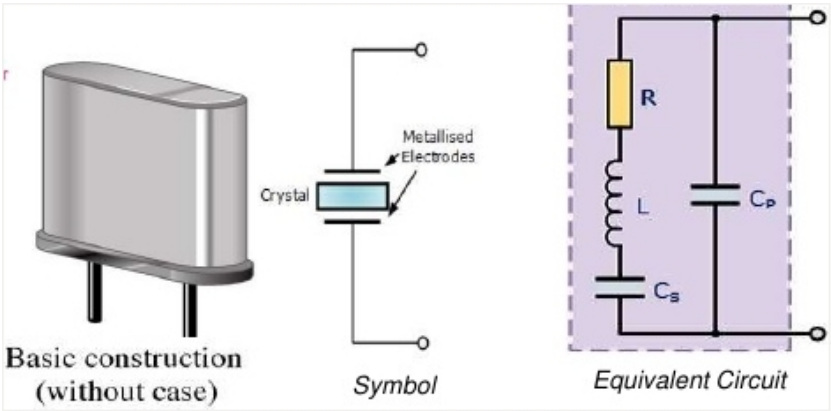
- Oscilador RC - frequencias baixas (fixas e variaveis)
Tipos: Colpitts/Hartley/Clapp

- Oscilador LC - frequencias elevadas (fixas e variaveis)
Tipos: Colpitts/Hartley/Clapp

- Dispositivo piezoeletrico / cristal – frequencia elevada (fixas e estaveis)



Oscilador RC



Oscilador a cristal

3 – Ondas Eletromagnéticas

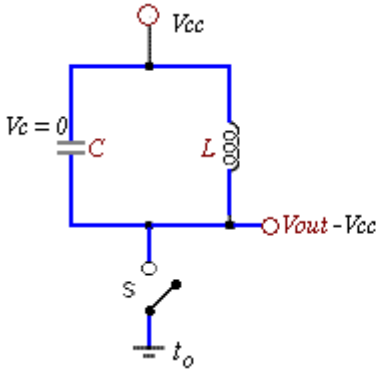
3.3 – Geração de ondas eletromagnéticas por processo eletrônico: Oscilador LC

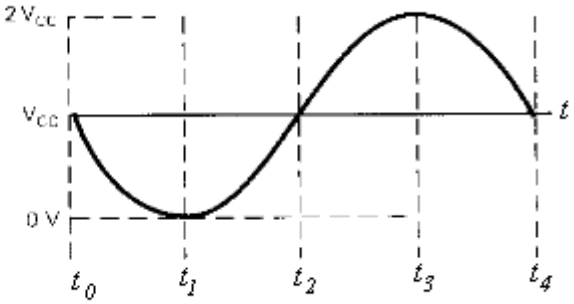
Os osciladores RC são limitados a frequências inferiores a 1 MHz

Frequencias mais altas requerem a utilização de abordagens distintas para a construção do oscilador.

Circuitos indutivos e capacitivos (LC) podem ser empregados para projetar osciladores capazes de operar em freq da ordem de centenas de MHz

Redes LC são chamadas **circuito tanque**





3 – Ondas Eletromagnéticas

3.3 – Geração de ondas eletromagnéticas por processo eletrônico: Oscilador LC

-Um capacitor carregado, descarrega através do indutor

-o campo magnético no indutor aumenta.

Após a descarga completa do capacitor, o campo começa a ser reduzido, de modo que a corrente continua a circular

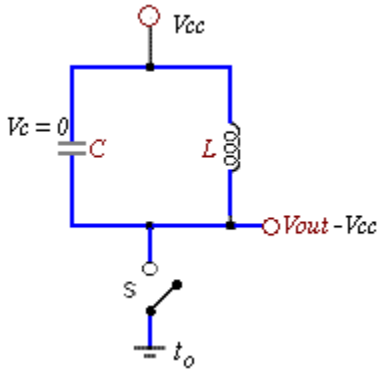
O capacitor agora é carregado com polaridade oposta.

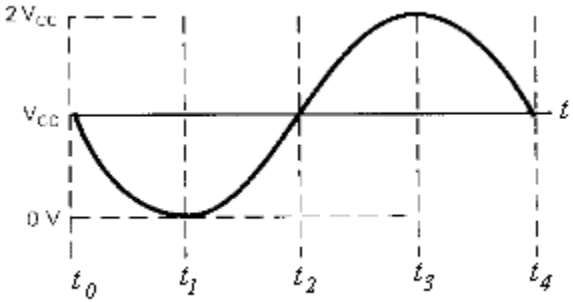
Após a extinção do campo, o capacitor passa a atuar novamente como fonte.

-Assim a corrente circula em sentido oposto

-O indutor então atua como fonte e carregando o capacitor com a polaridade original

-Esse ciclo se repete continuamente.





3 – Ondas Eletromagnéticas

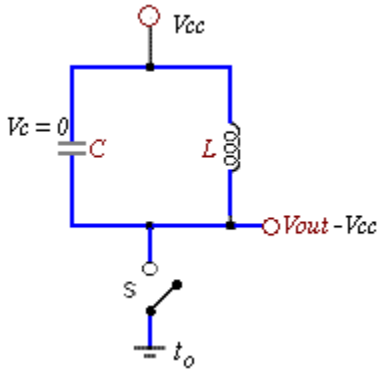
3.3 – Geração de ondas eletromagnéticas por processo eletrônico: Oscilador LC

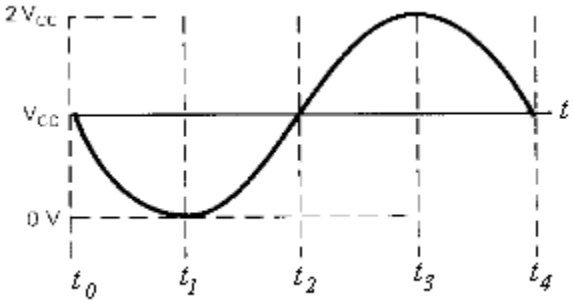
Ele oscilará em uma frequencia que depende dos valores do indutor e do capacitor:

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Deve se variar um dos elementos reativos da rede de realimentação (L ou C)

Essa variação pode ser manual ou utilizando um VCO (Oscilador Controlado por Tensão)



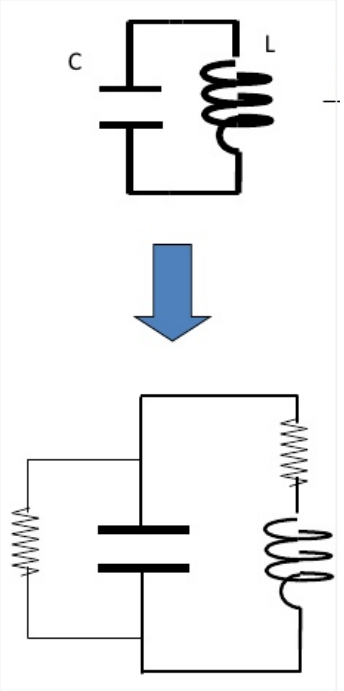


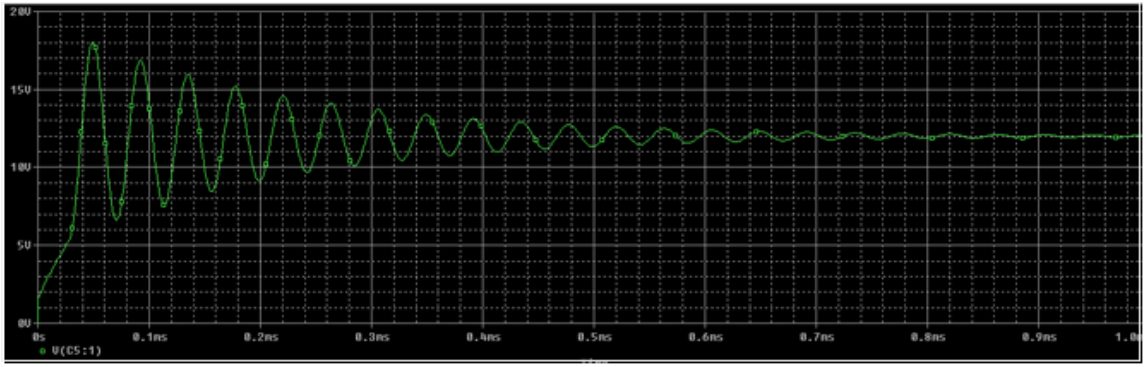
3 – Ondas Eletromagnéticas

3.3 – Geração de ondas eletromagnéticas por processo eletrônico: Oscilador LC

Circuitos tanque práticos possuem uma resistência além da capacitância e da indutância

Essa resistência provocará a redução das oscilações no circuito tanque com o passar do tempo





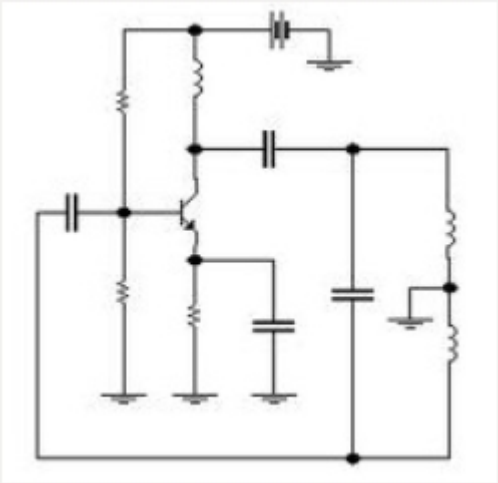
Oscilação a partir de um LC

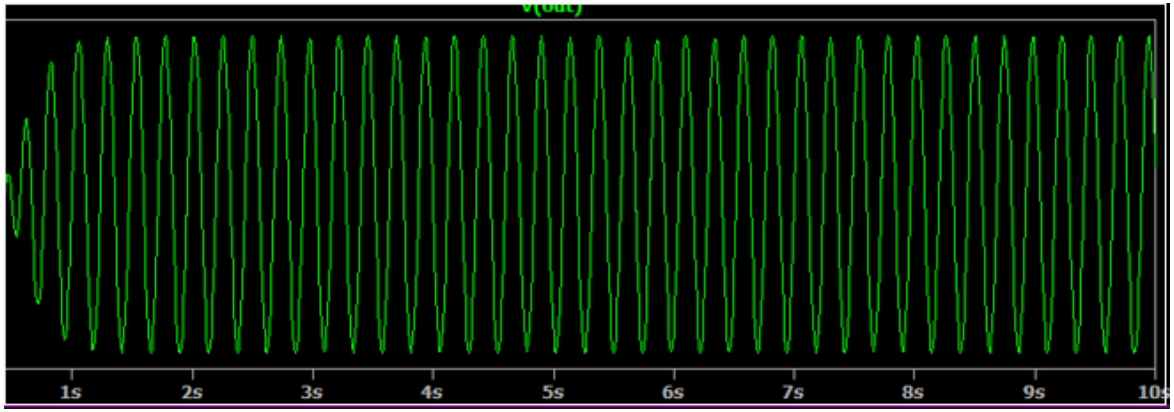
3 – Ondas Eletromagnéticas

3.3 – Geração de ondas eletromagnéticas por processo eletrônico: Oscilador LC

Para implementar um oscilador LC pratico, deve-se empregar um amplificador

O ganho do amplificador compensará as perdas resistivas, d modo q um a onda senoidal com amplitude constante pode ser gerada





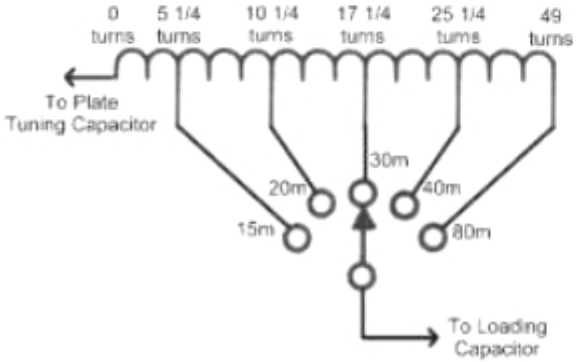
-Oscilador LC Hartley
-com amplificador,
-3 impedâncias (Utiliza Z1 e Z2 como indutância e Z3 como capacitância)

3 – Ondas Eletromagnéticas

3.3 – Geração de ondas eletromagnéticas por processo eletrônico: Radiotransmissor

Em um Radiotransmissor, há indutores e capacitores para determinadas frequências:

49 turns of #20 enameled magnet wire close wound
on a 1.25 inch diameter coil form 2 inches long



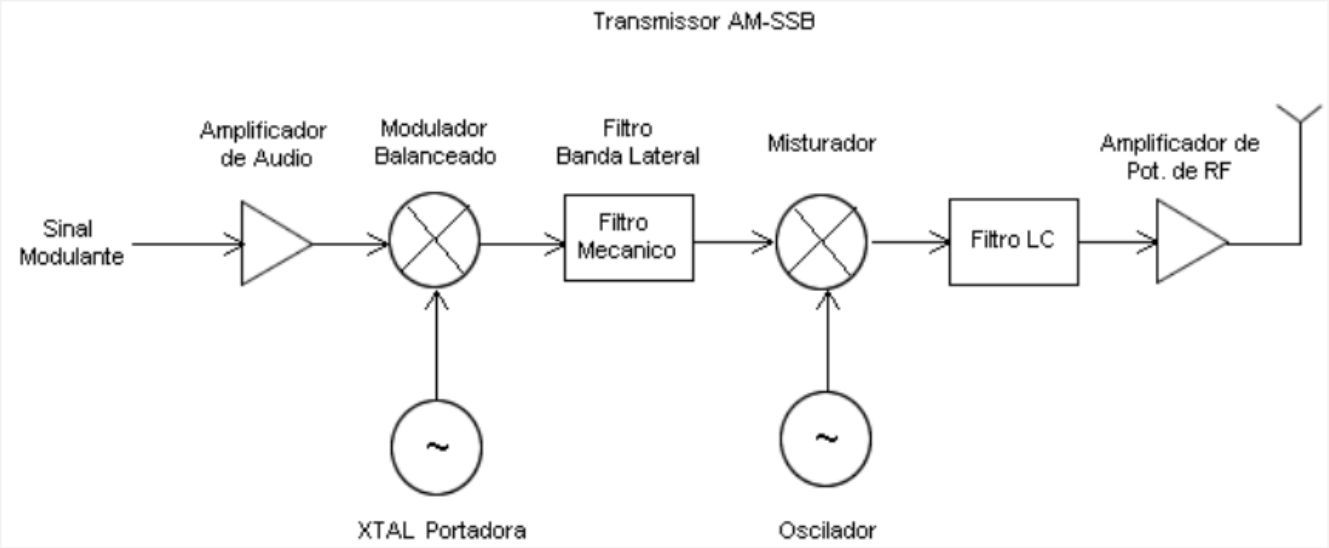
3 – Ondas Eletromagnéticas

3.3 – Geração de ondas eletromagnéticas por processo eletrônico: Radiotransmissor

O sinal gerado por um oscilador é modulado a partir de um sinal modulante (informação)

Esse sinal passa por diversos tratamentos como: filtragem e amplificação

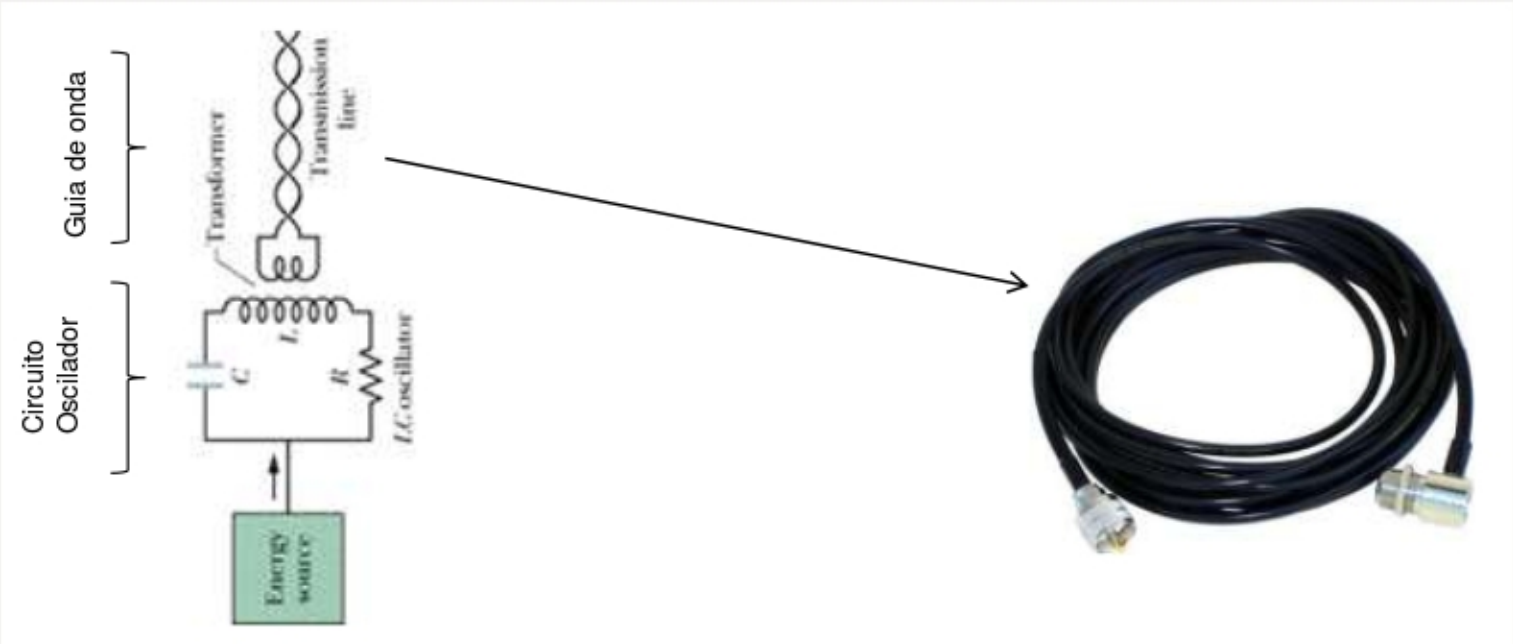
O estágio final é uma conversão de frequência para operação.



3 – Ondas Eletromagnéticas

3.3 – Geração de ondas eletromagnéticas por processo eletrônico: Linha de Transmissão

A corrente gerada pelo Oscilador (RLC) é guiada por uma linha de transmissão (guia de onda) até um sistema para converter essa energia eletromagnética em energia eletromagnética irradiada.



3 – Ondas Eletromagnéticas

3.3 – Geração de ondas eletromagnéticas por processo eletrônico: Linha de Transmissão

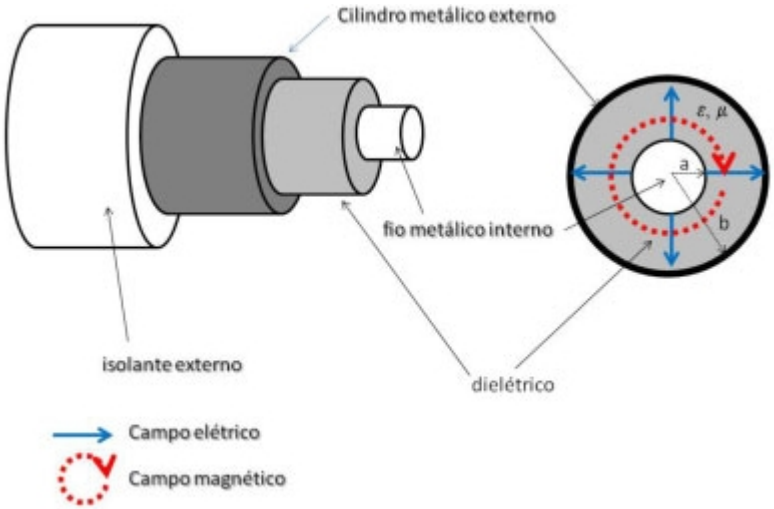
Em uma linha de transmissão (coaxial) – os campos elétrico e magnético estão contidos

A proximidade dos condutores mantem o campo elétrico concentrado principalmente no dielétrico da linha de transmissão

Os campos magnéticos em geral cancelam um ao outro

No coaxial, as linhas do campo elétrico são totalmente contidas pela blindagem, de modo que não há irradiação

O campo magnético entre o condutor interno e a blindagem, se cancelam



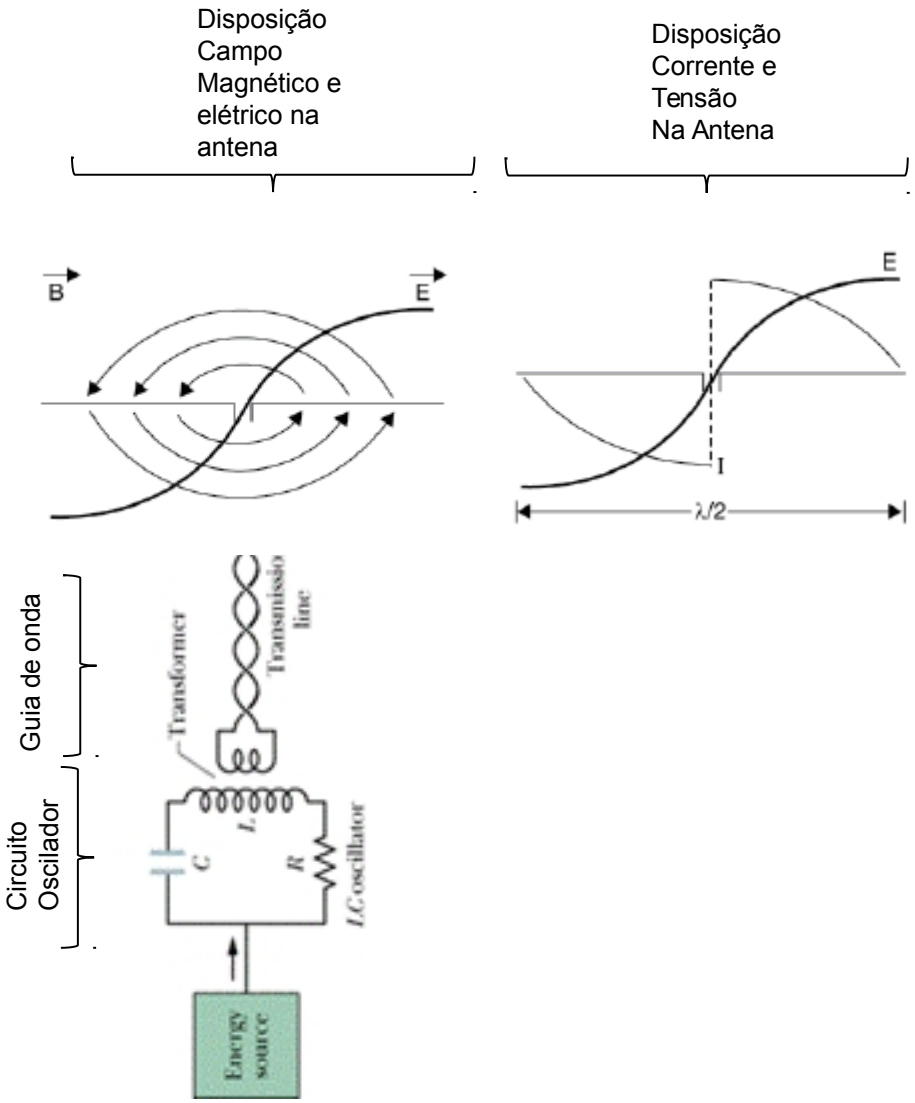
3 – Ondas Eletromagnéticas

3.3 – Geração de ondas eletromagnéticas por processo eletrônico: Transmissão

Quando a corrente entra na antena, ela cria um campo magnético ao seu redor.

O campo magnético cria um campo elétrico em outro fio colocado próximo ao transmissor.

A amplitude e o sentido dos campos magnético e elétrico variam de forma senoidal dependendo da frequência do sinal gerado pelo processo eletrônico



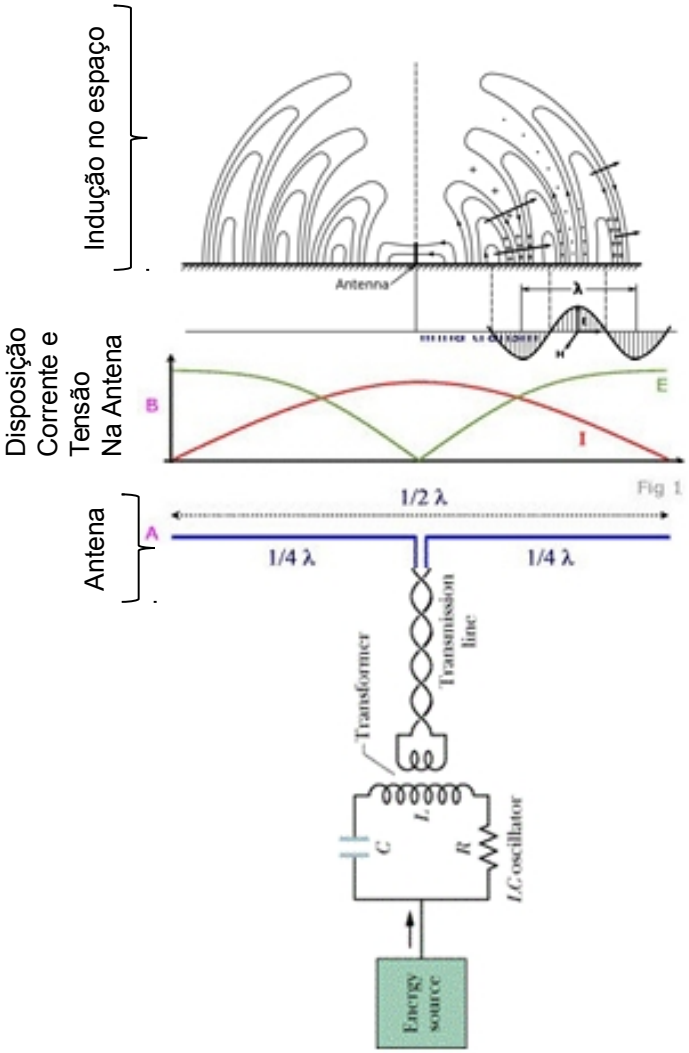
3 – Ondas Eletromagnéticas

3.3 – Geração de ondas eletromagnéticas por processo eletrônico: Transmissão

No espaço, o campo magnético criado pela antena induz um campo elétrico no espaço.

Este campo elétrico, por sua vez, induz um outro campo magnético no espaço, que induz um outro campo elétrico, que induz um outro campo magnético, e assim por diante, na velocidade da luz.

A indução no meio é o responsável pela propagação das ondas eletromagnéticas.



3 – Ondas Eletromagnéticas

3.4 – Equações de Maxwell:

A teoria das ondas eletromagnéticas que envolve a presença de um campo elétrico e um campo magnético variáveis no tempo, se relacionam por meio de um conjunto de leis físicas descritas pelas Equações de Maxwell

$$\text{Faraday} \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}\vec{B}$$

$$\text{Ampère} \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{J} \qquad \text{Maxwell}$$

$$\text{Gauss} \quad \begin{aligned} \nabla.\vec{D} &= \rho \\ \nabla.\vec{B} &= 0 \end{aligned}$$

$\vec{E} \rightarrow$ intensidade de campo elétrico (V/m)

$\vec{H} \rightarrow$ intensidade de campo magnético (A/m)

$\vec{D} \rightarrow$ densidade de fluxo elétrico (C/m^2)

$\vec{B} \rightarrow$ densidade de fluxo magnético (T=Wb/m^2)

$\rho \rightarrow$ densidade de carga elétrica (C/m^3)

$\vec{J} \rightarrow$ densidade de corrente elétrica (A/m^2)

3 – Ondas Eletromagnéticas

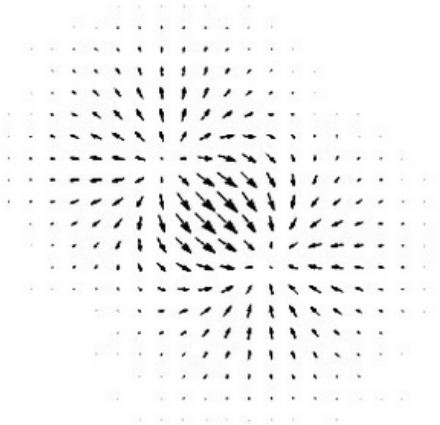
3.4 – Equações de Maxwell:

$$\hat{x},\ \hat{y},\ \hat{z} \rightarrow \text{vetores unitários dos eixos x, y e z}$$

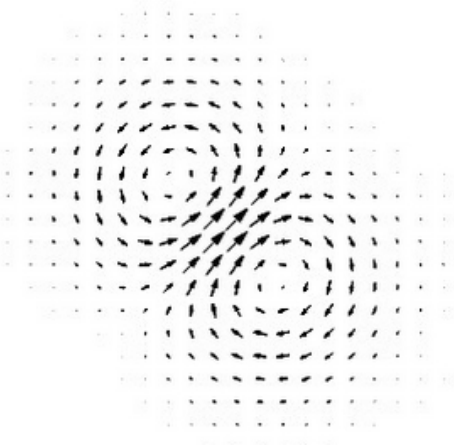
$$\vec{E}(x,y,z) = \hat{x}\,E_x(x,y,z) + \hat{y}\,E_y(x,y,z) + \hat{z}\,E_z(x,y,z)$$
$$\rightarrow \text{campo elétrico}$$

$$\vec{B}(x,y,z) = \hat{x}\,B_x(x,y,z) + \hat{y}\,B_y(x,y,z) + \hat{z}\,B_z(x,y,z)$$
$$\rightarrow \text{densidade de fluxo magnético}$$

$$\nabla = \hat{x}\frac{\partial}{\partial x} + \hat{y}\frac{\partial}{\partial y} + \hat{z}\frac{\partial}{\partial z} \rightarrow \text{operador del}$$



<u>Divergente</u>:
-Operador nabla aplicado a um campo vetorial
-O resultado é um campo escalar
-Divergência das linhas de campo



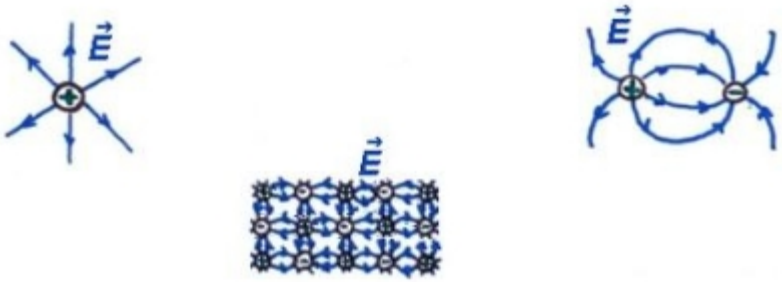
<u>Rotacional</u>:
-Operador nabla aplicado a um campo vetorial
-O resultado é um campo vetorial
-Formação de laços nas linhas de campo

3 – Ondas Eletromagnéticas

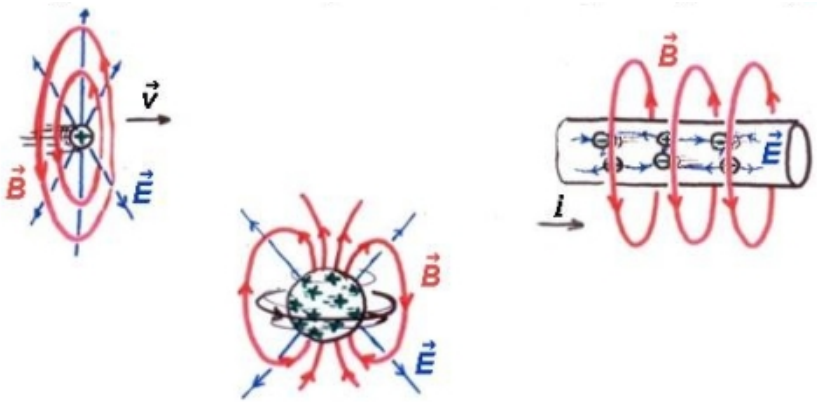
3.4 – Equações de Maxwell: Criação de ondas eletromagnéticas

•Carga cria campo

Carga parada (cria apenas campo elétrico, E)



Carga em movimento (cria tambem campo magnetico, B)

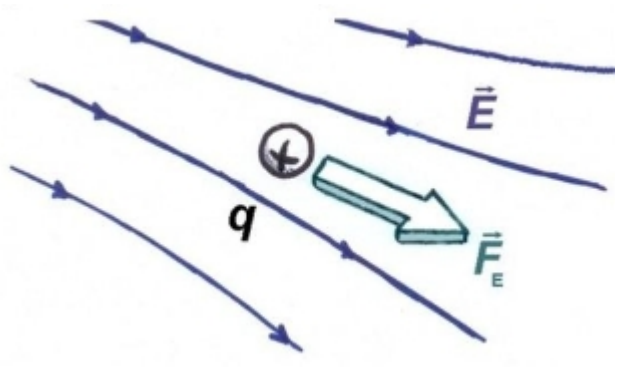


3 – Ondas Eletromagnéticas

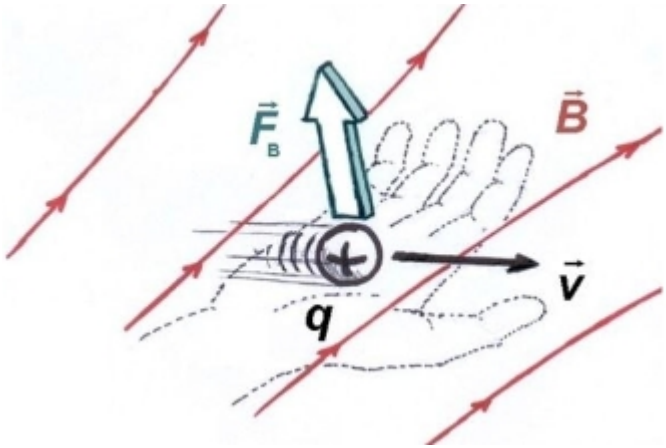
3.4 – Equações de Maxwell: Criação de ondas eletromagnéticas

•Carga sente campo

Carga sente campo elétrico, E



Carga em movimento sente campo



3 – Ondas Eletromagnéticas

3.4 – Equações de Maxwell:

- Partindo da Lei de Ampere, conclui-se que a presença de uma corrente elétrica ou a variação de um campo elétrico no tempo dará origem a um campo magnético induzido.

- Simetricamente, a Lei de Faraday, indica que quando houver um campo magnético variando no tempo, surgirá um campo elétrico induzido.

Faraday	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}\vec{B}$	
Ampère	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$	Maxwell
Gauss	$\nabla . \vec{D} = \rho$	
	$\nabla . \vec{B} = 0$	

$\vec{E}$ → intensidade de campo elétrico (V/m)
$\vec{H}$ → intensidade de campo magnético (A/m)
$\vec{D}$ → densidade de fluxo elétrico (C/m^2)
$\vec{B}$ → densidade de fluxo magnético ($T=Wb/m^2$)
ρ → densidade de carga elétrica (C/m^3)
$\vec{J}$ → densidade de corrente elétrica (A/m^2)

3 – Ondas Eletromagnéticas

3.4 – Equações de Maxwell:

•Desta maneira, a presença de um campo magnético variável implica em um campo elétrico variável no tempo

•Este induzirá um campo magnético, que novamente ocasionará um campo elétrico variável, e assim indefinidamente.

•A partir do momento em que uma dessas grandezas variar no tempo, ter-se-á a outra originada por indução.

•O resultado é uma sucessão de campos elétrico e magnético que se induzem mutuamente e afastam-se da origem, constituindo a **onda eletromagnética**

Faraday	$\nabla \times \vec{E}$	$=$	$-\frac{\partial}{\partial t}\vec{B}$	
Ampère	$\nabla \times \vec{H}$	$=$	$\vec{J}$	Maxwell
Gauss	$\nabla.\vec{D}$	$=$	ρ	
	$\nabla.\vec{B}$	$=$	0	

$\vec{E}$ → intensidade de campo elétrico (V/m)
$\vec{H}$ → intensidade de campo magnético (A/m)
$\vec{D}$ → densidade de fluxo elétrico (C/m^2)
$\vec{B}$ → densidade de fluxo magnético ($T=Wb/m^2$)
ρ → densidade de carga elétrica (C/m^3)
$\vec{J}$ → densidade de corrente elétrica (A/m^2)

3 – Ondas Eletromagnéticas

3.4 – Equações de Maxwell:

Essa onda pode ter direções preferenciais de deslocamento, dependendo das características de sua fonte das propriedades do meio.

O seu deslocamento é conhecido como **propagação** e garante a transferência de energia eletromagnética de um ponto para outro através do meio.

Faraday $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}\vec{B}$

Ampère $\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$ Maxwell

Gauss $\nabla . \vec{D} = \rho$

$\nabla . \vec{B} = 0$

$\vec{E} \rightarrow$ intensidade de campo elétrico (V/m)

$\vec{H} \rightarrow$ intensidade de campo magnético (A/m)

$\vec{D} \rightarrow$ densidade de fluxo elétrico (C/m^2)

$\vec{B} \rightarrow$ densidade de fluxo magnético ($T=Wb/m^2$)

$\rho \rightarrow$ densidade de carga elétrica (C/m^3)

$\vec{J} \rightarrow$ densidade de corrente elétrica (A/m^2)

3 – Ondas Eletromagnéticas

3.4 – Equações de Maxwell:

•Desta maneira, a presença de um campo magnético variável implica em um campo elétrico variável no tempo

•Este induzirá um campo magnético, que novamente ocasionará um campo elétrico variável, e assim indefinidamente.

•A partir do momento em que uma dessas grandezas variar no tempo, ter-se-á a outra originada por indução.

•O resultado é uma sucessão de campos elétrico e magnético que se induzem mutuamente e afastam-se da origem, constituindo a **onda eletromagnética**

Faraday	$\nabla \times \vec{E}$	$=$	$-\frac{\partial}{\partial t}\vec{B}$	
Ampère	$\nabla \times \vec{H}$	$=$	$\vec{J}$	Maxwell
Gauss	$\nabla.\vec{D}$	$=$	ρ	
	$\nabla.\vec{B}$	$=$	0	

$\vec{E}$ → intensidade de campo elétrico (V/m)
$\vec{H}$ → intensidade de campo magnético (A/m)
$\vec{D}$ → densidade de fluxo elétrico (C/m^2)
$\vec{B}$ → densidade de fluxo magnético ($T=Wb/m^2$)
ρ → densidade de carga elétrica (C/m^3)
$\vec{J}$ → densidade de corrente elétrica (A/m^2)

3 – Ondas Eletromagnéticas

3.4 – Equações de Maxwell:

As equações de Maxwell mostram que o início do processo pode ser produzido por uma corrente elétrica que esteja variando no tempo.

Por exemplo, a corrente vinda de uma fonte alternada e circulando através de um condutor qualquer

A onda eletromagnética gerada terá a mesma frequência da corrente da fonte que a produziu.

É a situação típica da **irradiação produzida por uma antena** que recebe o sinal vindo de circuitos eletrônicos.

Faraday $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}\vec{B}$

Ampère $\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$ Maxwell

Gauss $\nabla . \vec{D} = \rho$

$\nabla . \vec{B} = 0$

$\vec{E} \rightarrow$ intensidade de campo elétrico (V/m)

$\vec{H} \rightarrow$ intensidade de campo magnético (A/m)

$\vec{D} \rightarrow$ densidade de fluxo elétrico (C/m^2)

$\vec{B} \rightarrow$ densidade de fluxo magnético (T=Wb/m^2)

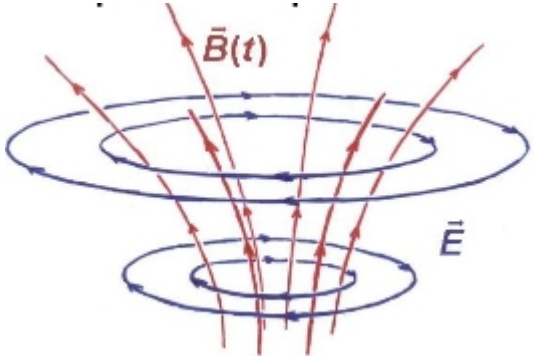
$\rho \rightarrow$ densidade de carga elétrica (C/m^3)

$\vec{J} \rightarrow$ densidade de corrente elétrica (A/m^2)

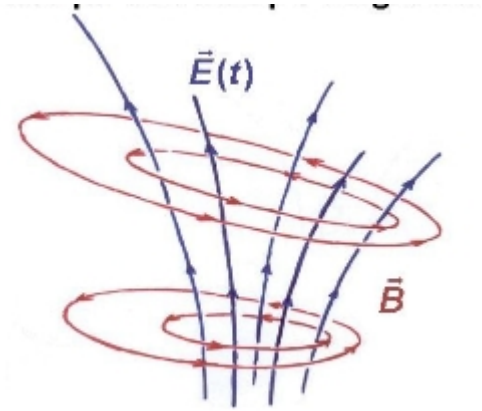
3 – Ondas Eletromagnéticas

3.4 – Equações de Maxwell: Campos Elétrico e Magnético Induzido (Campo cria campo)

- Campo magnético variando no tempo cria campo elétrico

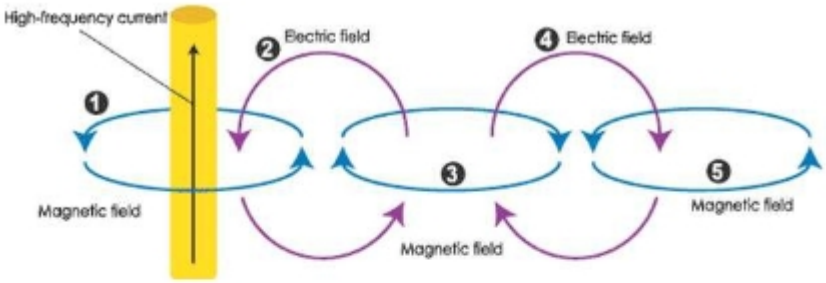


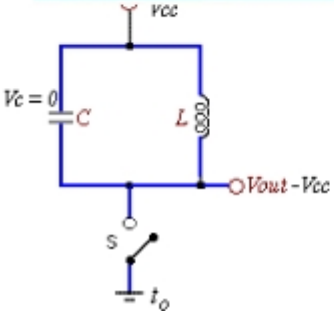
- Campo elétrico variando no tempo cria campo magnético

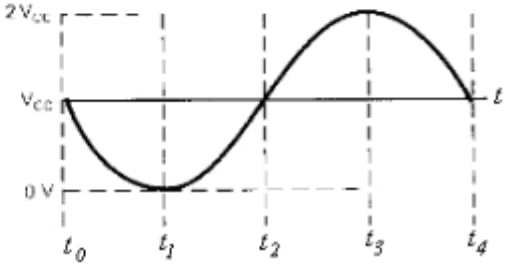


3 – Ondas Eletromagnéticas

Resumo







3 – Ondas Eletromagnéticas

3.5 – Parâmetros: Campo Magnético

Um campo magnético é gerado em torno de um condutor quando a corrente flui através dele.

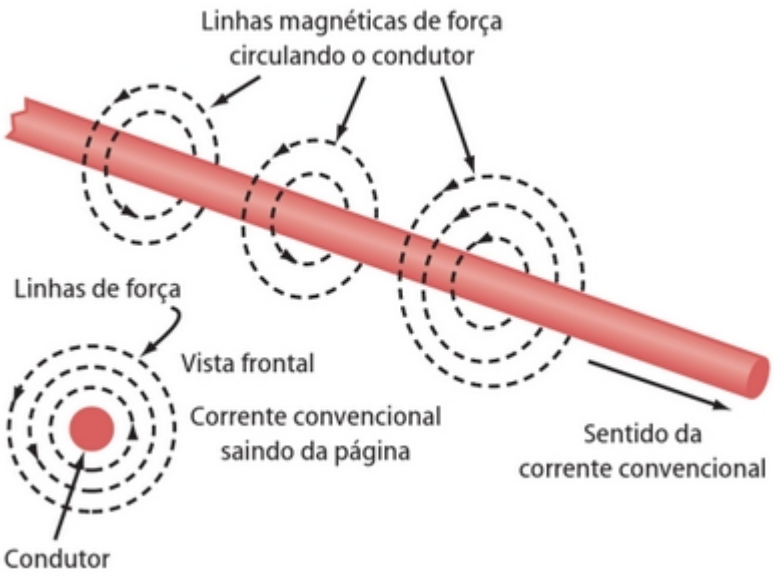
A força e o sentido do campo magnético dependem da intensidade e sentido da corrente

A intensidade de um campo magnético H produzido por uma antena de fio é expressa por:

$$H = \frac{I}{2\pi d}$$

onde:
I = corrente elétrica (A)
d = comprimento do condutor (m)

A unidade SI de força do campo magnético é ampère por metro



3 – Ondas Eletromagnéticas

3.5 – Parâmetros: Campo Elétrico

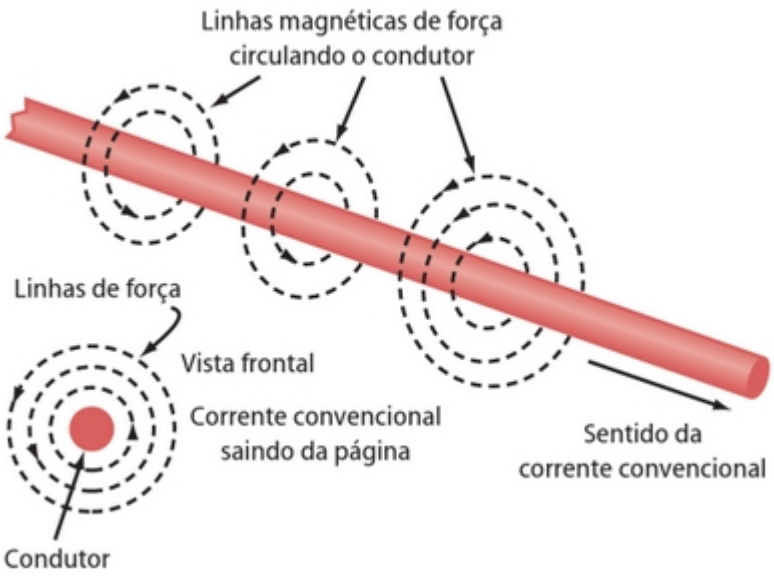
Um campo elétrico é produzido pela diferença de potencial entre dois condutores.

A força de um campo elétrico é expressa por:

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon d^2}$$

onde q = carga entre os dois pontos, C
ε = permissividade
d = distância entre condutores, m

A unidade SI de força do campo elétrico é volts por metro



3 – Ondas Eletromagnéticas

3.5 – Parâmetros: Permissividade

Constante dielétrica do material entre os dois condutores (geralmente o ar ou o espaço livre).

Como um campo elétrico afeta e é afetado por um meio

A permissividade no vácuo é dada por:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{c^2 \mu_0} = 8.8541878176\ldots \times 10^{-12}\ \mathrm{F/m}$$

Onde: c = velocidade da luz e μ0 = a permeabilidade magnética

A permissividade elétrica também pode ser calculada para alguns materiais a partir da permissividade no vácuo:

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 = (1 + \chi_e)\varepsilon_0$$

Onde: ε = permissividade absoluta, εr = permissividade relativa (constante dielétrica) e χ = susceptibilidade elétrica no material

A susceptibilidade elétrica, é a medida de quão facilmente ele se polariza em resposta a um campo elétrico

A permissividade em alguns materiais:

Material	ε (pF/m)	**Material**	ε (pF/m)
Óleo mineral	19,5	Látex	de 20 a 50
Acetona	191	Madeira	de 10 a 60
Ar	8,84	Papelão	49,5
Água destilada	707	PVC	de 30 a 40
Baquelita	de 50 a 80	Vidro	de 40 a 60

3 – Ondas Eletromagnéticas

3.5 – Parâmetros: Permeabilidade

Mensura o campo magnético no interior de um material

$$\mu = \frac{B}{H}$$

onde: μ = permeabilidade absoluta, H = intensidade de campo magnético e B = campo magnético (densidade de fluxo magnético)

A permeabilidade magnética no vácuo é:

$$\mu_0 = \frac{1}{\varepsilon_0 c^2}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{N{\cdot}A^{-2}}.$$

Onde: ε0 é a constante de permissividade do vácuo e c a velocidade da luz.

3 – Ondas Eletromagnéticas

3.5 – Parâmetros: Equação da onda (Equacoes de Helmhotz)

Das equações de Maxwell:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$
$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

Em termos de ondas progressivas planas senoidais, direções dos campos elétricos e magnéticos ortogonais um ao outro e à direção do deslocamento, e com os dois campos em fase:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$
$$\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2}$$

3 – Ondas Eletromagnéticas

3.5 – Parâmetros: Velocidade da onda eletromagnética

Matematicamente, Maxwell previu que essa onda se propagaria no vácuo com uma velocidade **c** dada por:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{N{\cdot}A^{-2}}$.

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{c^2 \mu_0} = 8.8541878176\ldots \times 10^{-12}\ \mathrm{F/m}$$

A partir desses valores, obtem-se a velocidade de propagação da onda eletromagnética.

c = 300.000 km/s

uma perturbação eletromagnética propaga-se através do espaço com a velocidade igual à velocidade de luz

3 – Ondas Eletromagnéticas

3.5 – Parâmetros: Energia da onda eletromagnética

Campo elétrico variável gera campo magnético variável, fenômeno que se repete sucessivamente

Esses campos não necessitam de material para se propagar

Conjunto de campos magnético e elétrico variáveis, perpendiculares entre si, que criam um ao outro, formando uma perturbação autossustentável que se propaga pelo espaço

As ondas eletromagnéticas transportam energia de um local para outro

A energia de uma onda eletromagnética está distribuída entre os campos elétrico e magnético

3 – Ondas Eletromagnéticas

3.5 – Parâmetros: Energia da onda eletromagnética

Ao se propagar, a energia da onda oscila entre a energia do campo elétrico e a energia do campo magnético

qualquer região do espaço onde existem os campos elétricos e magnéticos contém certa quantidade de densidade de energia igual a:

Energy density due to an electric field: $u = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2$

Energy density due to a magnetic field: $u = \frac{1}{2\mu_0} B^2$

Energy density for an EM wave: $u = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2$

but $E = cB = \frac{B}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$

$$u = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0}\varepsilon_0 \mu_0 E^2$$

$$u = \varepsilon_0 E^2$$

Energy density equally split between E, B fields

Quanto maior for o valor do campo elétrico, isto é, quanto maior for a perturbação, maior será a energia média por volume

3 – Ondas Eletromagnéticas

3.5 – Parâmetros: Energia da onda eletromagnética

Muitos efeitos envolvendo a irradiação eletromagnética são explicados ao considerá-la como uma onda, por exemplo: polarização, difração e interferência

Outros fatores são bem interpretado somente se as irradiações eletromagnéticas forem consideradas pacotes de energia. Caso dos fenômenos associados à: geração de luz, à emissão e absorção de energia por átomos e moléculas, às interações em níveis microscópicos com partículas do meio, tais como elétrons, pósitrons e táuons

A interpretação como um pacote de energia implica em associar a onda eletromagnética o comportamento de uma partícula em movimento, deslocando-se com a velocidade da onda eletromagnética no meio.

Trata-se do princípio da dualidade Onda-Partícula (1924 – Louis de Broglie)

3 – Ondas Eletromagnéticas

3.5 – Parâmetros: Energia da onda eletromagnética

A quantidade de energia de uma irradiação eletromagnética é sempre múltipla de um valor fundamental denominado quantum.

Se a frequência do campo eletromagnético estiver na faixa das irradiações luminosas, o quantum de energia é denominado fóton - Teoria de fótons

Segundo a Lei de Planck – o quantum de energia é diretamente proporcional à frequência da irradiação eletromagnética

$$E = h \cdot f = \frac{hc}{\lambda} =$$

Onde: h é a constante de Planck = $h = 6{,}626 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s}$, também observada em eV

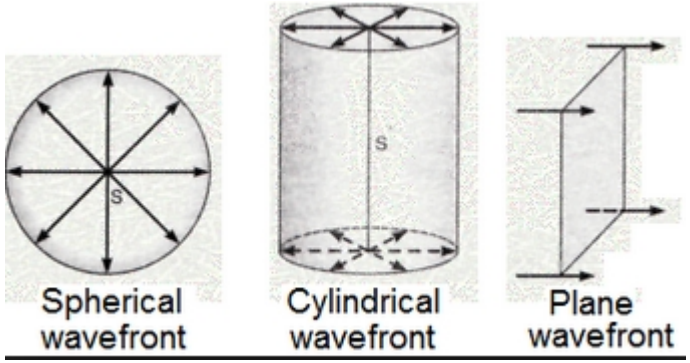
3 – Ondas Eletromagnéticas

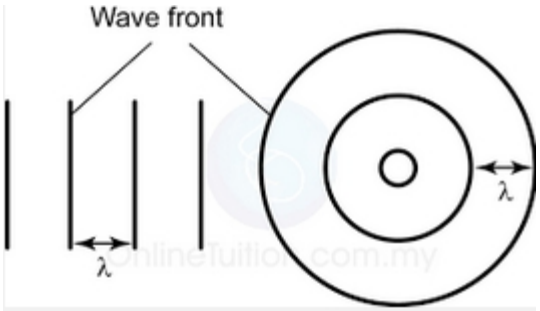
3.5 – Parâmetros: Frente de Onda

é a região do espaço que reúne todos os pontos da onda que estão em fase e a um mesmo número de comprimentos de onda da fonte.

As frentes de onda podem ser chamadas de superfícies de onda.

A forma geométrica da frente de onda depende diretamente do elemento irradiante utilizado, no caso da antena isotrópica a frente de onda é esférica, já um fio condutor apresenta frente de onda cilíndrica.



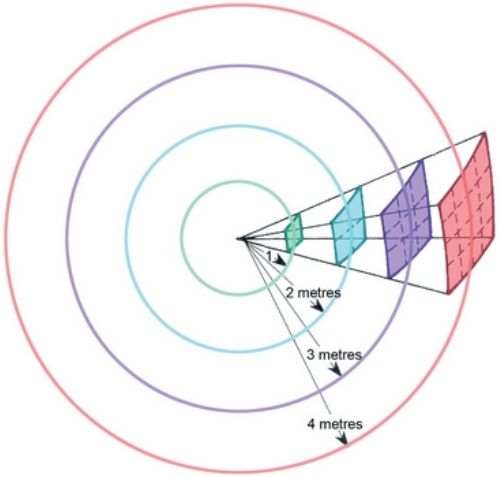


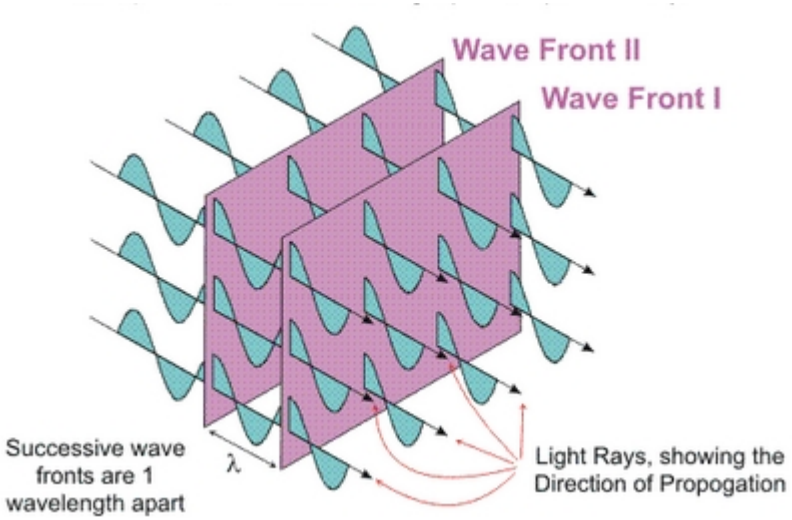
3 – Ondas Eletromagnéticas

3.5 – Parâmetros: Frente de Onda

Distante da fonte, a esfera é tão grande que uma pequena área parece ser plana em vez de curva.

A maioria das análises é feita considerando uma superfície plana de radiação com os campos elétricos e magnéticos perpendiculares entre si.





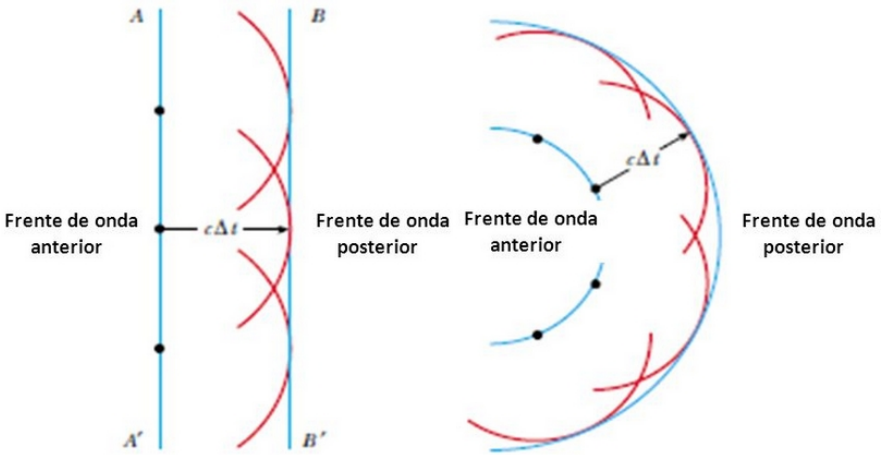
3 – Ondas Eletromagnéticas

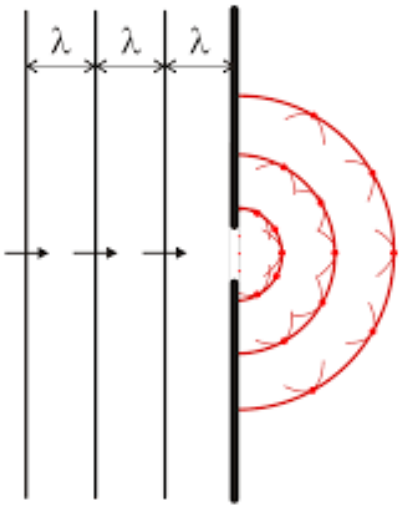
3.5 – Parâmetros: Princípio de Huygens-Fresnel

Em 1678, Christiaan Huygens propôs que cada ponto de uma frente de onda possui a funcionalidade de uma nova fonte pontual

Cada ponto localizado na frente de onda se comporta como uma nova fonte pontual de emissão de novas ondas esféricas, que ao se somarem formarão uma nova frente de onda e assim consecutivamente.

Veremos a posteriori, que o princípio de Huygens explica o fenômeno da Difração.





Cada ponto da frente de onda que atravessa a fenda comporta-se como uma fonte de ondas secundárias

3 – Ondas Eletromagnéticas

3.5 – Parâmetros: Impedância da onda

A taxa de relação entre as intensidades de campos elétrico e magnético é uma constante dada por:

$$\frac{E_x}{H_y} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$$

A razão entre as duas grandezas, ambas variando no tempo e no espaço, é constante em todos os lugares a qualquer instante

Essa razão é conhecida como Impedancia Intrínseca, definida como:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (\Omega)$$

A qual, no espaço livre, possui valor característico de:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377\ \Omega = 120\pi\ \Omega$$

Ref: http://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/images/e/ea/ELM20704_-_Onda_Planar_Uniforme_%28Espa%C3%A7o_Livre%29.pdf

3 – Ondas Eletromagnéticas

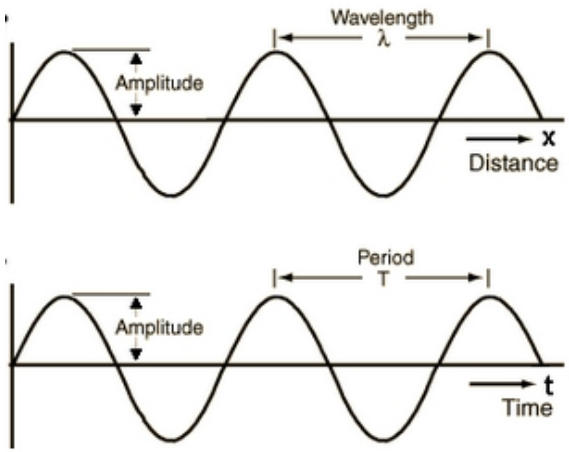
3.5 – Parâmetros: parâmetros clássicos da ondulatória

Comprimento de Onda:
O comprimento de onda λ de uma onda eletromagnética é a distância entre dois pontos consecutivos nos quais o vetor E (ou B) tem mesmo módulo e mesmo sentido.
Simplesmente, λ é distância entre dois máximos ou mínimos consecutivos da onda.

Período:
O período T da onda eletromagnética é o intervalo de tempo necessário para a onda caminhar uma distância que corresponde a um comprimento de onda. Como a velocidade de propagação é c, vale: $c = \lambda/T$

Frequência:
A frequência f de uma onda eletromagnética é o inverso do período. Ela representa o número de períodos existente em unidade de tempo: $T= 1/f$

Amplitude:
A amplitude de uma onda eletromagnética, usualmente se considera a amplitude do seu campo elétrico E.



3 – Ondas Eletromagnéticas

3.5 – Parâmetros: Polarização da onda eletromagnética

A polarização de uma antena indica como a onda eletromagnética, irradiada pela antena, se comporta no espaço.

A polarização é definida pela direção de oscilação do campo elétrico

Na polarização vertical o campo elétrico está perpendicular a terra e na horizontal esta paralelo a terra.

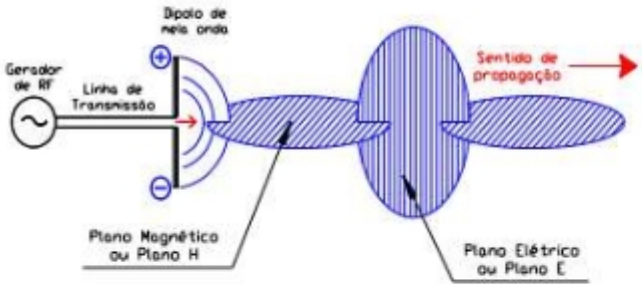
Existem outros tipos de polarização como a circular e a elíptica, onde a direção do campo elétrico no espaço esta constantemente mudando de direção em relação ao solo, descrevendo uma circunferência ou uma elipse.

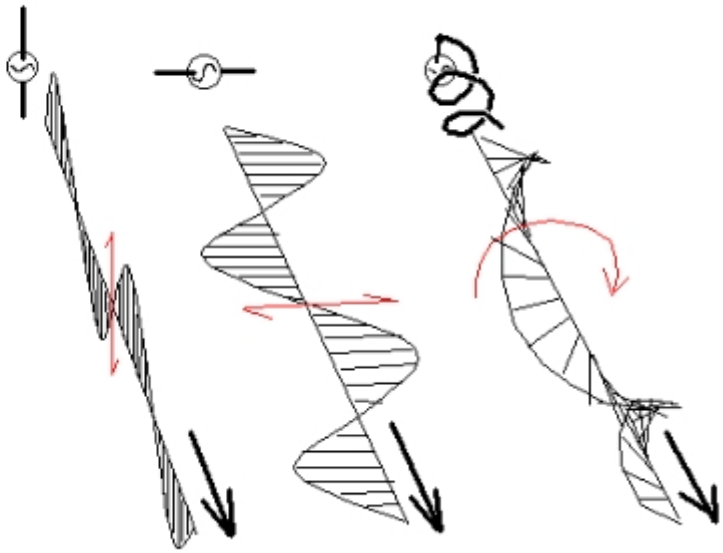
Numa ligação entre antenas é importante que as antenas Tx e Rx tenham polarizações compatíveis, evitando, assim, perdas por incompatibilidade de polarização.

Polarizacao : em HF e VHF, SSB , se prefere polarização horizontal, em VHF -FM , polarização vertical

3 – Ondas Eletromagnéticas

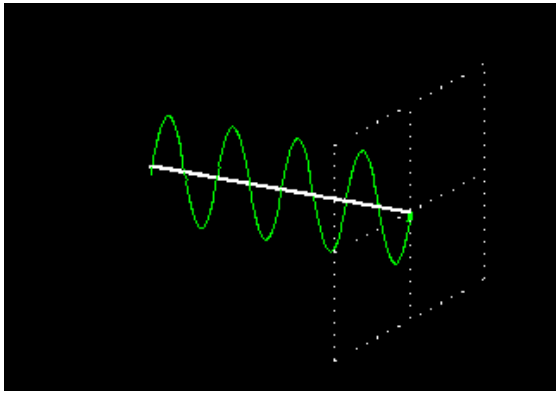
3.5 – Parâmetros: Polarização da onda eletromagnética



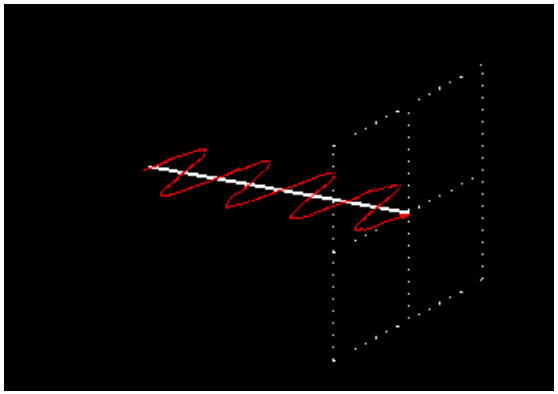


3 – Ondas Eletromagnéticas

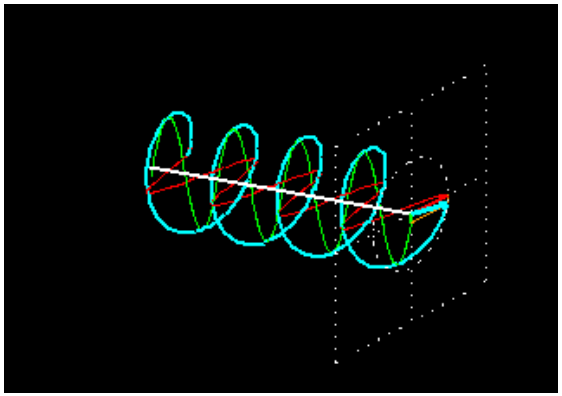
3.5 – Parâmetros: Polarização da onda eletromagnética



Polarização linear vertical: mostrando apenas o vetor do campo elétrico(o magnético está sempre presente e a 90 graus físicos)



Polarização linear horizontal: mostrando apenas o vetor do campo elétrico (o magnético está sempre presente e a 90 graus físicos):



Polarização Circular: o campo elétrico (e magnético) permanecem constantes em magnitude, mas giram ao redor da direção de propagação.