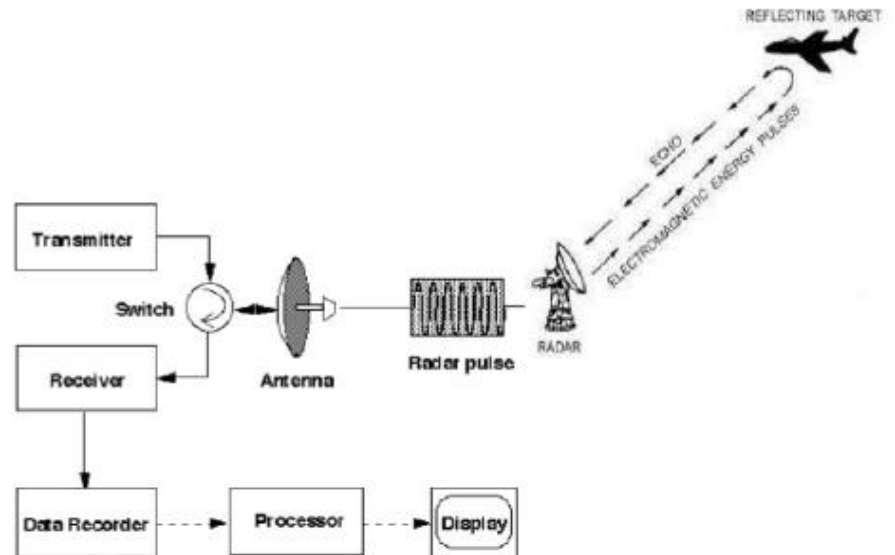
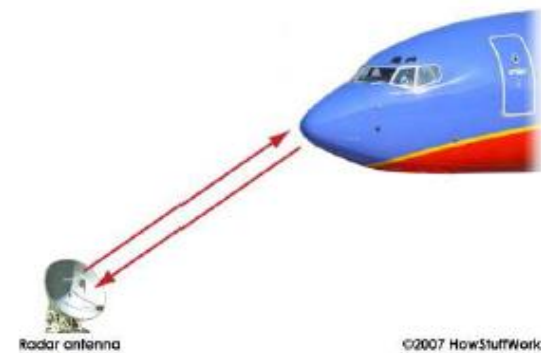


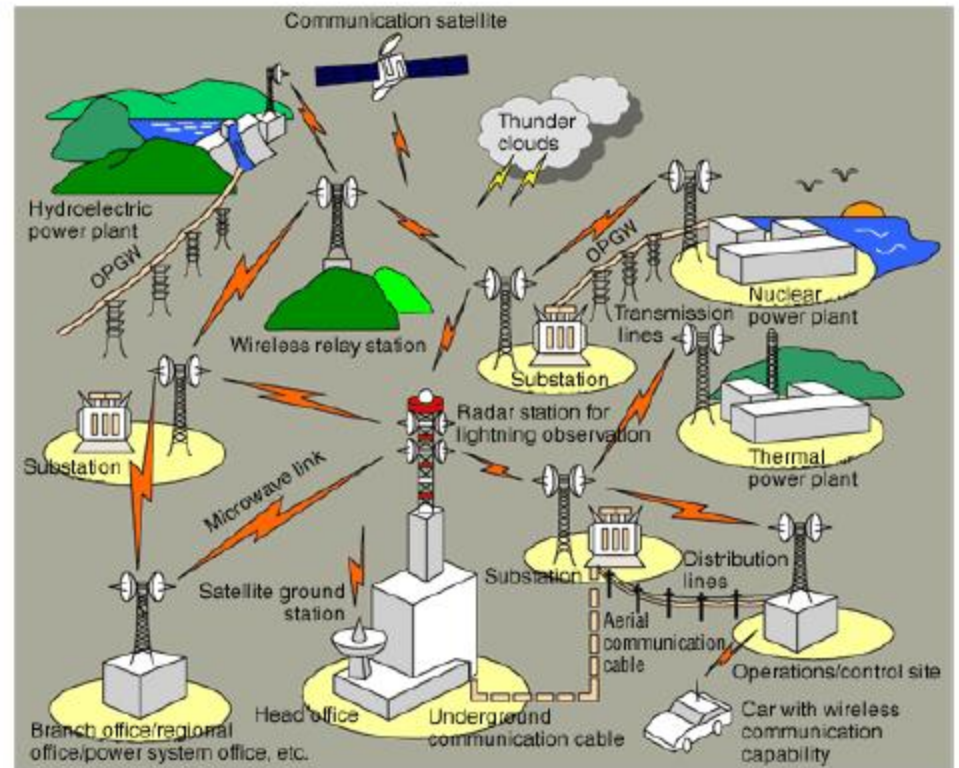
Aplicacoes de Micro-ondas

➤ Sistemas de Radar (*radio detection and ranging – detecção e localização*)



- <http://science.howstuffworks.com/question89.htm>
- <http://www.engadget.com/2013/02/14/uk-thales-passive-radar/>
- http://www.ig.utexas.edu/research/projects/mars/education/radar_works.htm
- <http://pt.slideshare.net/umerbreaker/microwaves-applications>

➤ Sistemas de Telecomunicações



Rede de comunicação de um sistema elétrico de potência

➤ **Aquecimento industrial**



Secagem de materiais e alimentos

<http://www.rufouz.com/industrial-machines.html>

➤ Aplicações médicas

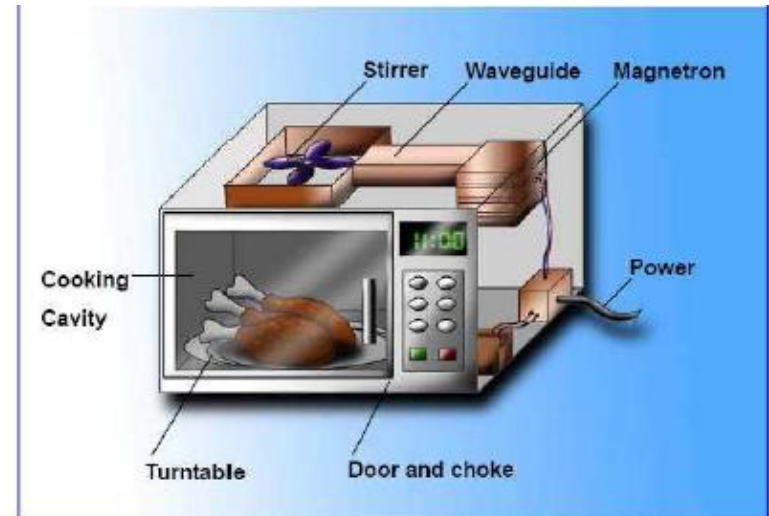
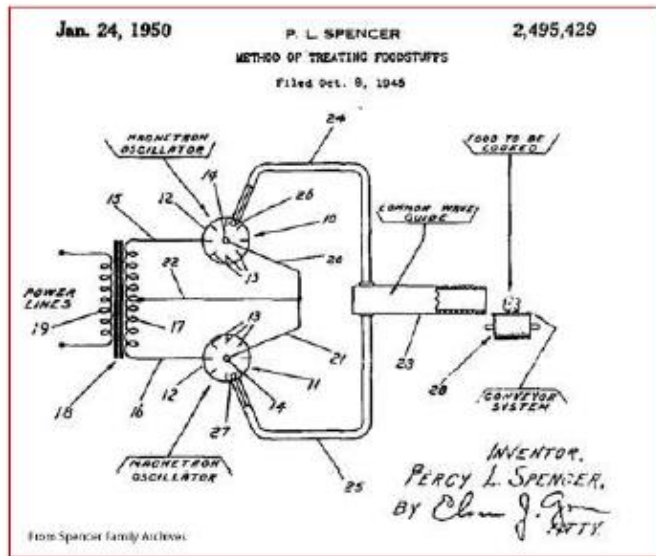


Diatermia por micro-ondas: tratamento de inflamações, tumores, infecções, arritmias cardíacas, etc...

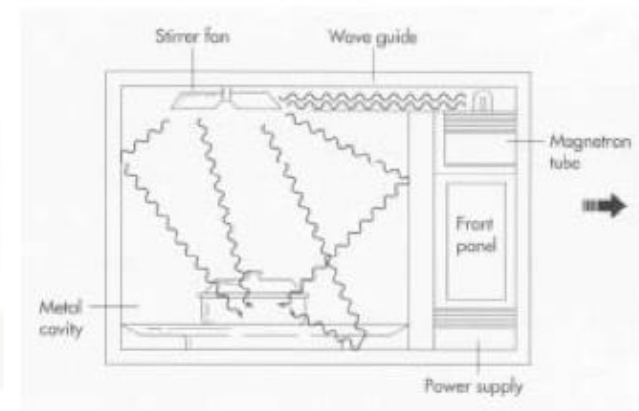


- <http://electrotherapyforphysio.blogspot.com.br/2012/11/microwave-diathermy-mwd.html>
- <http://www.biotechindia.net/physiotherapy-rehabilitation/product/microwave-therapy.html>

➤ Aplicações domésticas

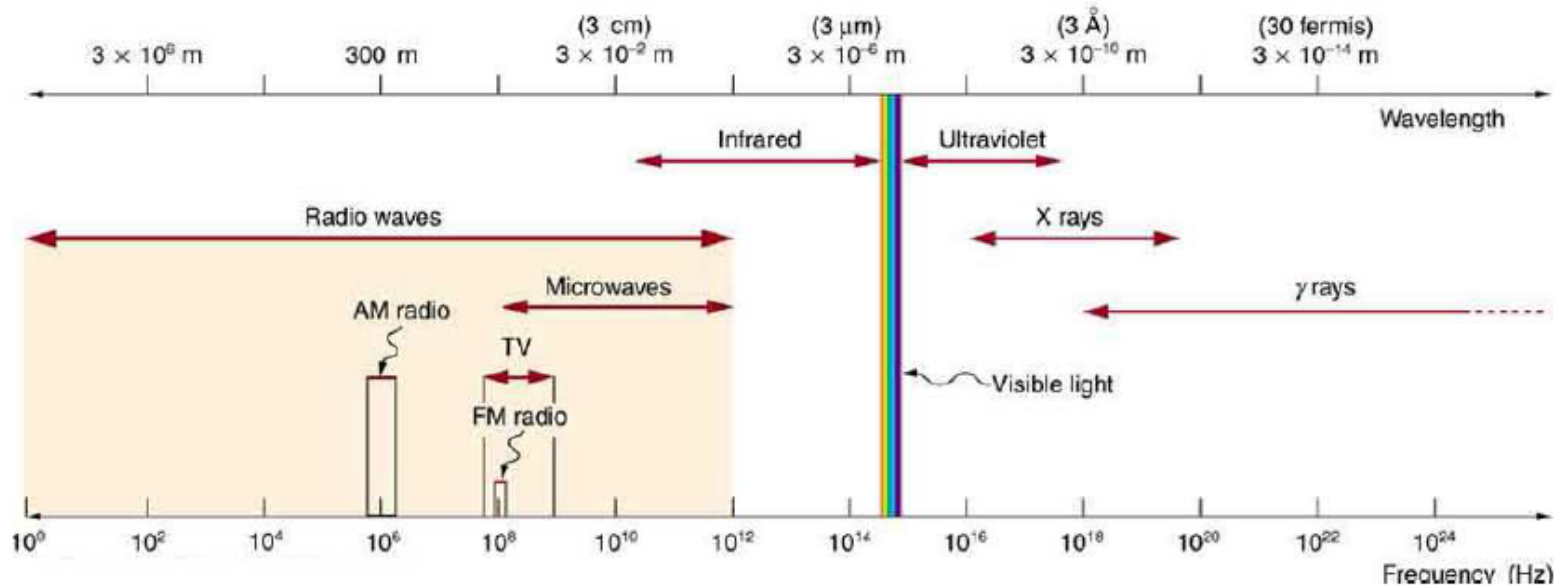


800W



- http://www.smecc.org/microwave_oven.htm
- <http://www.tlbox.com/category/appliances/small-appliances/microwave-ovens/>
- <http://tobyzerner.com/microwaves/>

O que são as Micro-ondas?

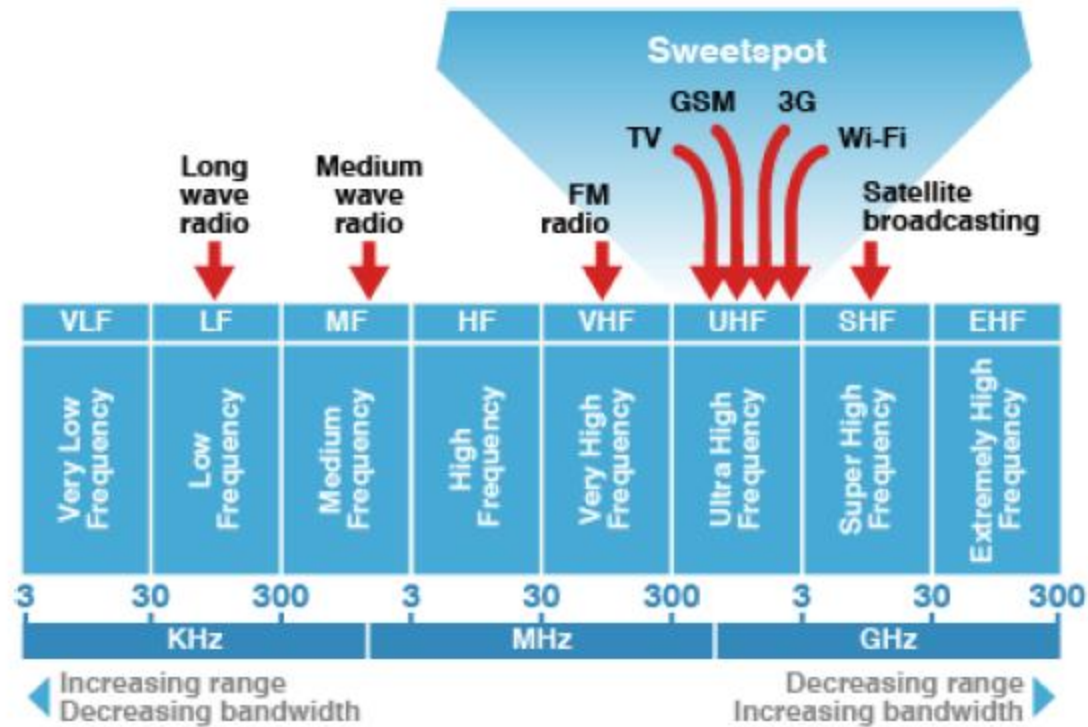


$$\lambda = \frac{c}{f}$$

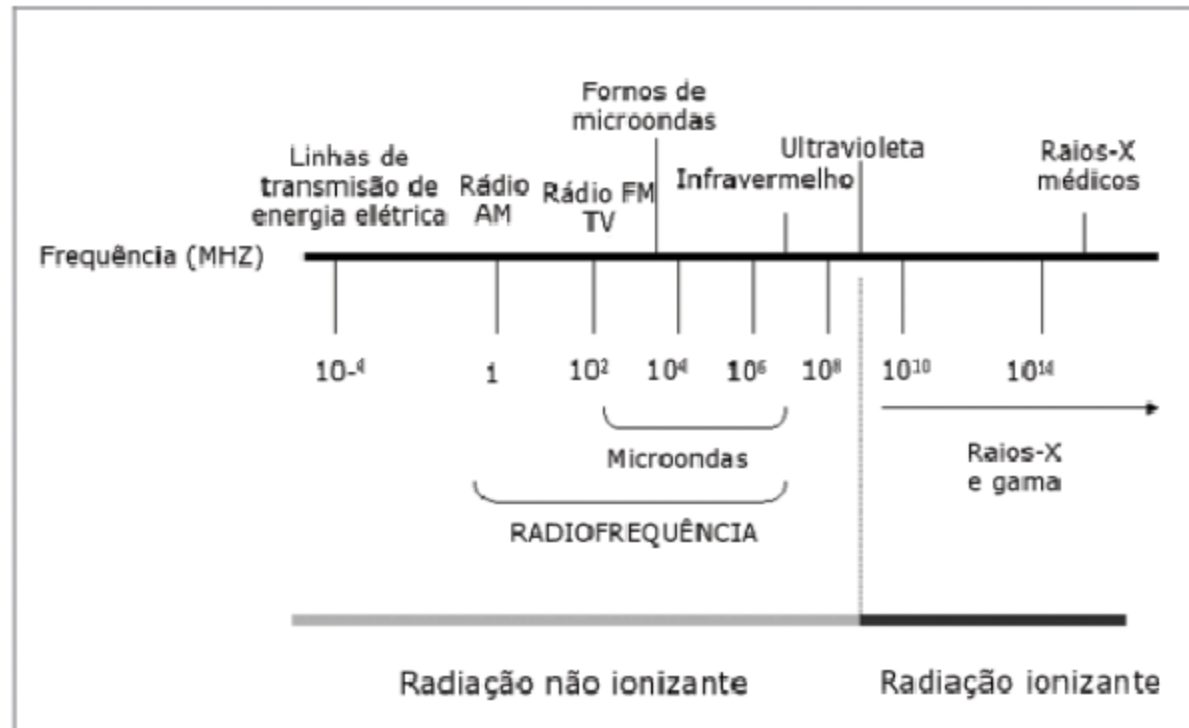
Várias definições

Por exemplo: faixa de **300MHz** ($\lambda=1\text{m}$, $T=3\text{ns}$) a **300GHz**
($\lambda=1\text{mm}$, $T=3\text{ps}$) no vácuo com $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Rádiofrequências



Radiações ionizantes e não-ionizantes



Faixas de Frequência em Micro-ondas

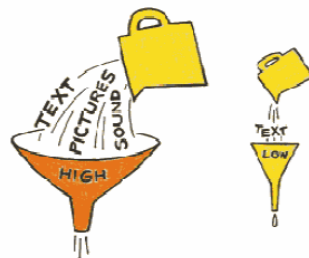
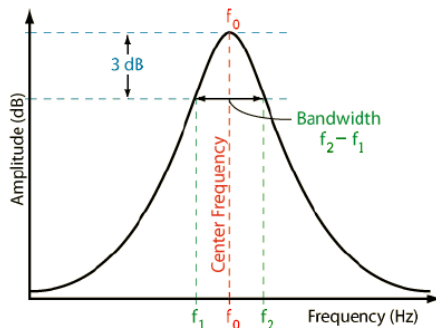
Standard Radar Frequency Letter-Band Nomenclature(IEEE Standard 521-1984)

Band Designator	Frequency (GHz)	Wavelength in Free Space (centimeters)
L band	1 to 2	30.0 to 15.0
S band	2 to 4	15 to 7.5
C band	4 to 8	7.5 to 3.8
X band	8 to 12	3.8 to 2.5
Ku band	12 to 18	2.5 to 1.7
K band	18 to 27	1.7 to 1.1
Ka band	27 to 40	1.1 to 0.75
V band	40 to 75	0.75 to 0.40
W band	75 to 110	0.40 to 0.27

Por que Micro-ondas?

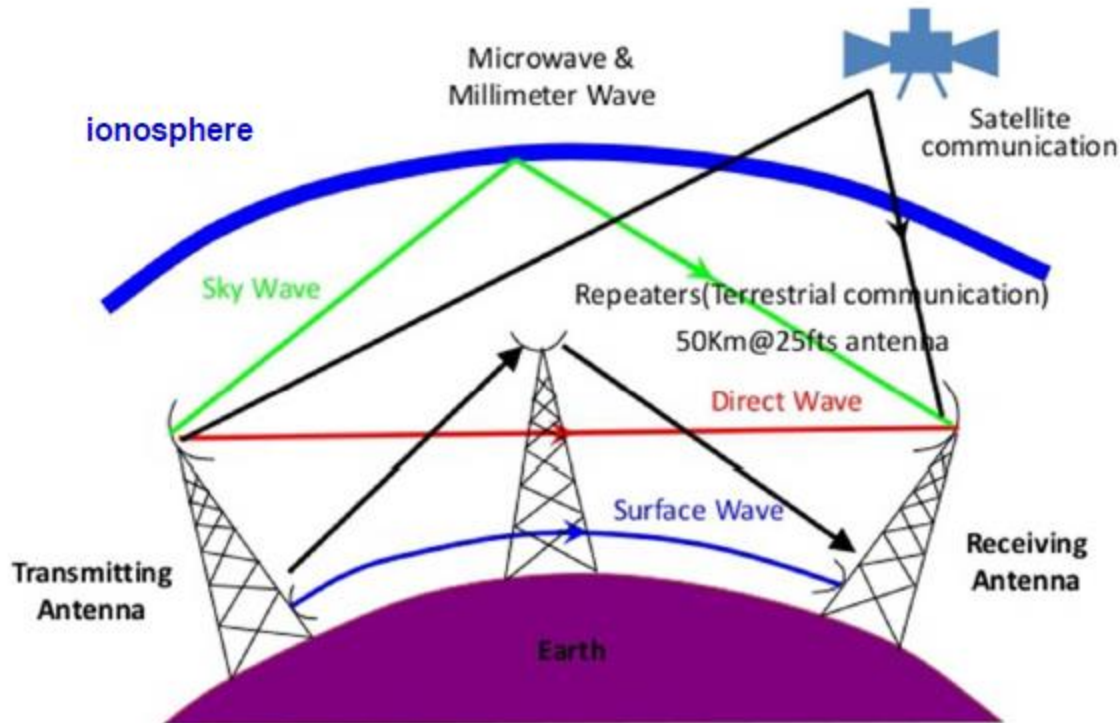
- Tamanho (relativamente pequeno) para ganho e diretividade (grandes) das antenas → exatidão na localização de objetos e na transmissão de informação.
- Não há reflexão na ionosfera como ocorre com HF → possibilidade das comunicações por satélite
- Grande quantidade de informação (capacidade de comunicação, largura de faixa) a ser transferida pela mesma portadora: 1% banda em 600MHz = 6MHz (1 canal de TV); em 60GHz: 600MHz = 100 canais de TV.

Banda de passagem (largura de faixa)



$$BW(\%) = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \times 100$$

Propagação de Micro-ondas



Conceito LOS – line of sight
(Visada direta)

Micro-ondas e o Universo

- **1965** : Arno Penzias e Robert Wilson descobriram a **radiação cósmica de micro-ondas**, proveniente do Big Bang e propagando-se no espaço por 15 bilhões de anos (160.2 GHz)

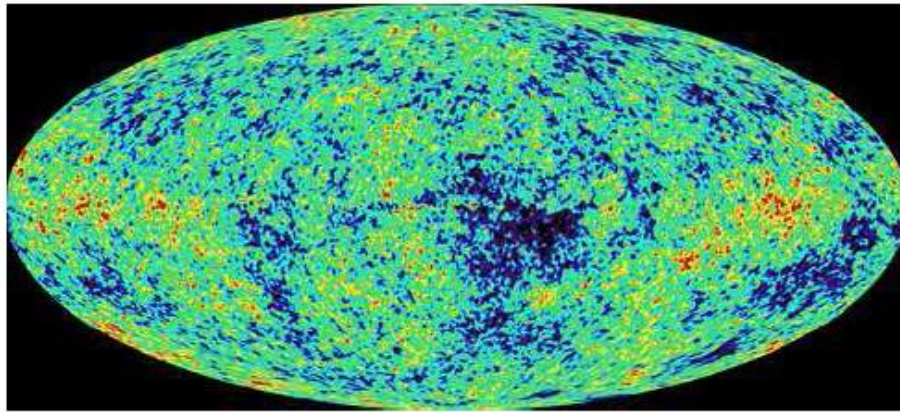
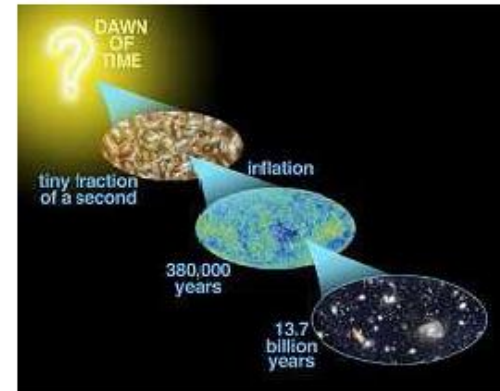


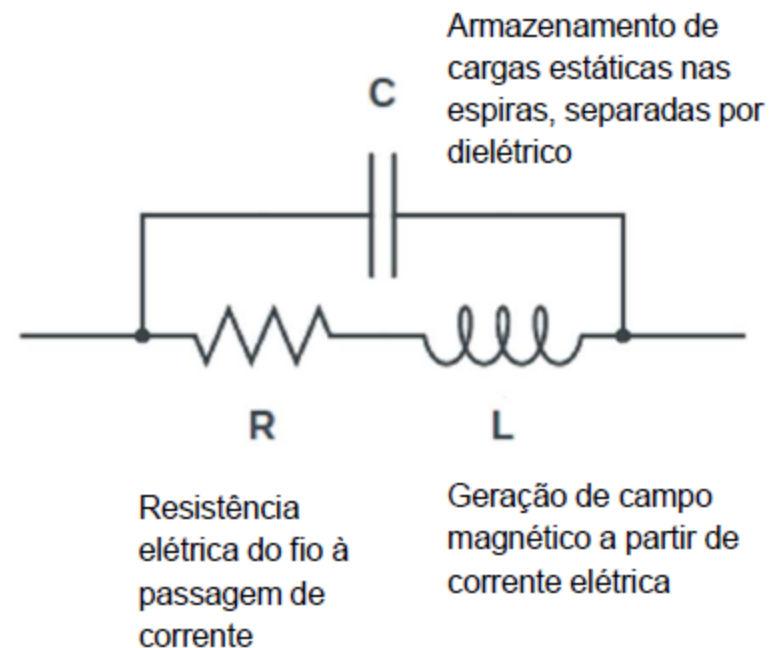
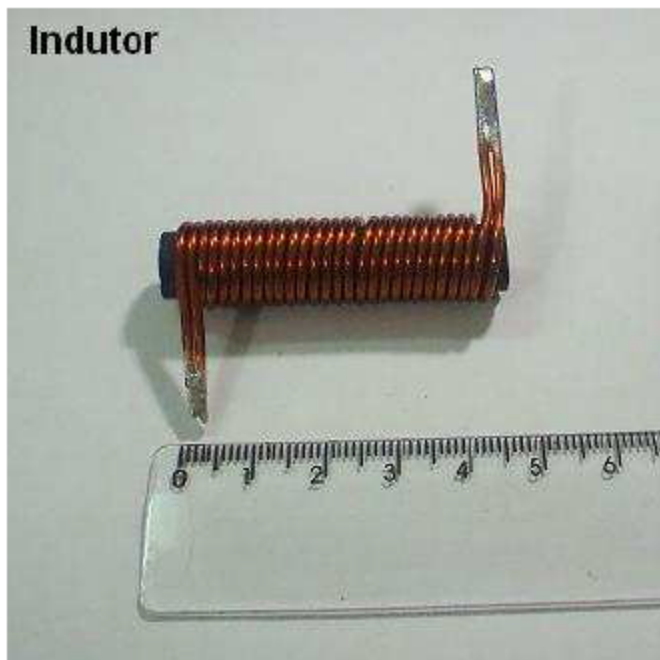
Imagem do universo há 13,7 bilhões de anos, recriada através de dados coletados pela *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)*. Mostra flutuações de temperatura com resolução de milionésimos de grau.



http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_microwave_background
http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2003/11feb_map

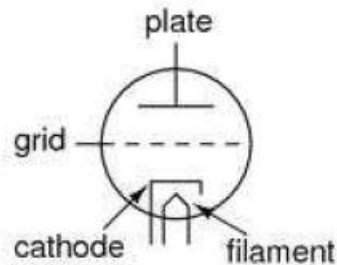
Peculiaridades das Micro-ondas

- Os **componentes passivos concentrados** (resistor, indutor e capacitor) deverão ter dimensões bem menores que o comprimento de onda. Normalmente apresentam vários **efeitos “parasitas”** na faixa de micro-ondas.

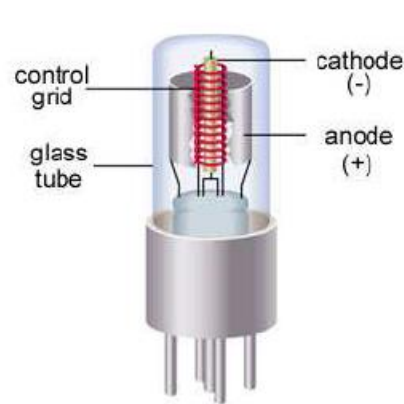


Peculiaridades das Micro-ondas

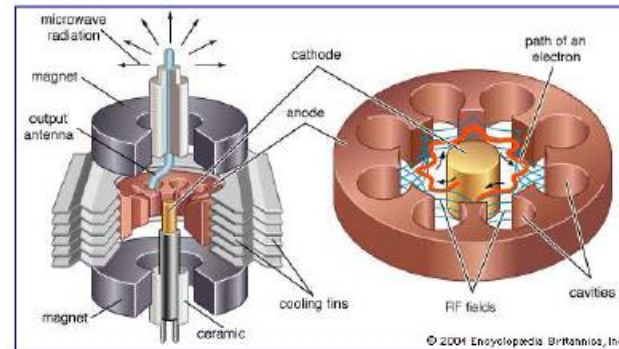
- As **válvulas de micro-ondas** (como o klystron, TWT e magnetron) operam com base em princípios diferentes das **válvulas de baixa frequência**, pois o tempo de trânsito dos elétrons entre o catodo e o anodo seria da ordem de grandeza do período dos sinais.



Válvula de baixa frequência



http://www.privateline.com/mt_dailynotes/2003/11/the_triode_does_not_amplify_it.html



Magnetron

http://microwavetubes.iwarp.com/How_Magnetron_Work.html

Peculiaridades das Micro-ondas

- Os **dispositivos semicondutores** (Ex: transistores) devem ter dimensões reduzidas (baixa potência de sinal) e seus terminais poderão atuar como **linhas de transmissão** (necessidade de casamento de impedâncias).
- Materiais com maior mobilidade de portadores de carga (menor tempo de trânsito) (Ex: **GaAs**, ao invés de Si e Ge) devem ser utilizados para se atingir frequências mais altas.
- Projetos de **novos dispositivos**: transistores a efeito de campo, diodos Gunn, varactores, etc...

Elementos concentrados e distribuídos

➤ Elementos discretos e circuitos

Dimensão $\lll \lambda$

Parâmetros Concentrados →
Teoria de Circuitos



➤ Elementos distribuídos e linhas de transmissão

*Dimensão da ordem
de grandeza de λ*

Parâmetros Distribuídos →
Teoria das ondas



Teoria Clássica de Eletromagnetismo

Equações de Maxwell

Leis que relacionam campos elétricos e magnéticos

grandezas vetoriais

Solução por Métodos Numéricos → aproximações

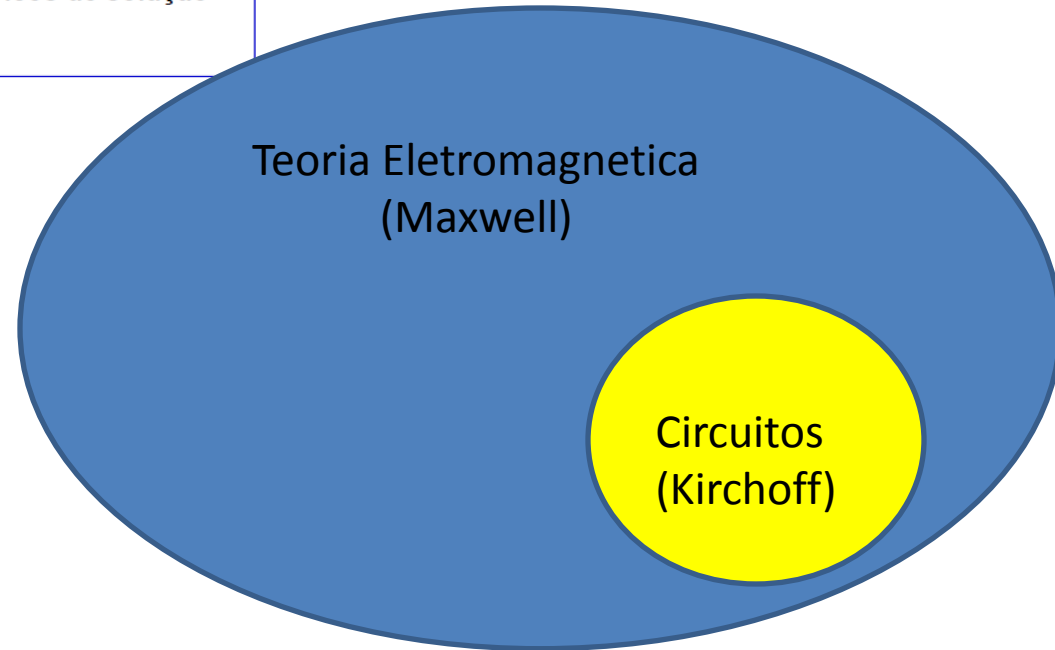
Teoria Clássica de Circuitos

Leis de Kirchhoff

Relações entre tensões e correntes em elementos R,L,C

grandezas escalares

Métodos algébricos de solução



Leis de Kirchoff são uma simplificação da teoria eletromagnética (bem mais complexa).

Exemplos



a) Rede de distribuição de energia

Elétrica: 60 Hz

5ª harmônica: 300 Hz

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{300} = 10^6 \text{ metros}$$

Sistema contido em um raio de 10 km



Vale a Teoria dos Circuitos

b) Receptor FM: 100 MHz

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

$\lambda/4 = 0,75 \text{ m}$

Dimensões do circuito $\ll 75 \text{ cm}$



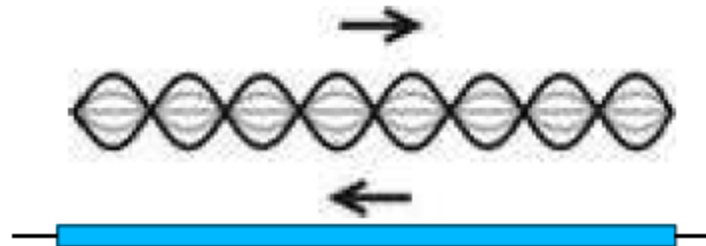
Comportamento de um fio ou cabo

Baixas frequências



- Comprimentos de onda \gg comprimento do fio
- Corrente e tensão não dependem da posição no fio onde são medidas (sempre os mesmos valores)
- “curto-circuito”

Altas frequências

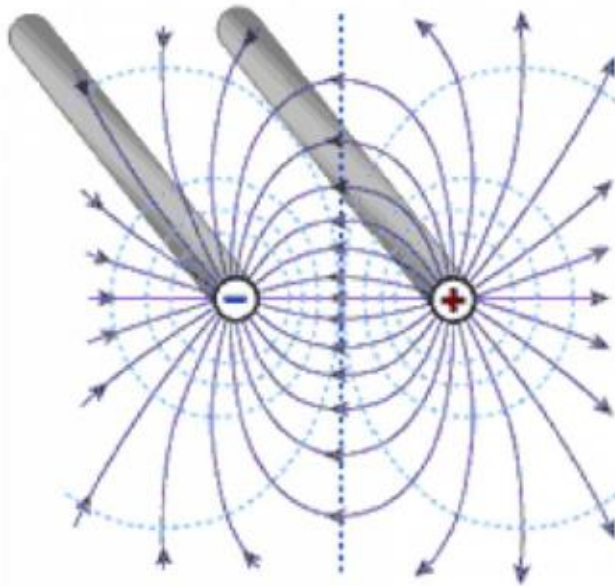


- Comprimentos de onda \approx ou \ll comprimento do cabo
- Valores de tensão e corrente dependem da posição ao longo do cabo (linha de transmissão).
- Importante o “casamento” de impedâncias para evitar reflexões e transmitir a máxima potência.

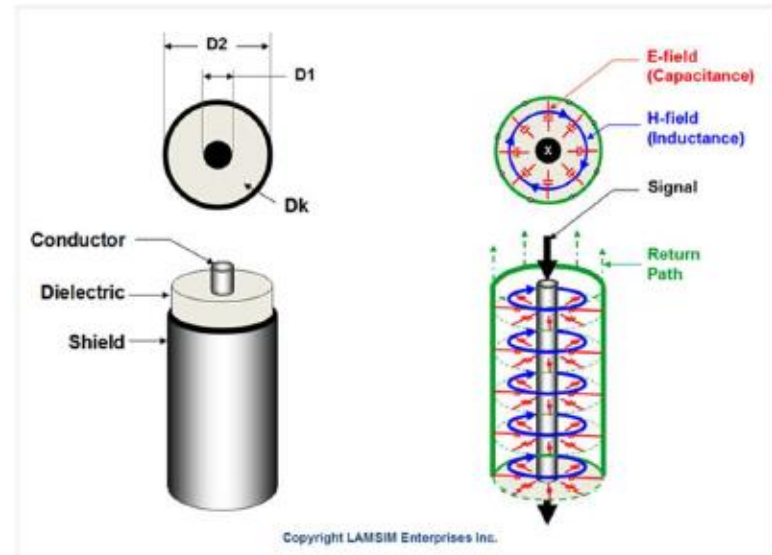
Linhas de Transmissão

Dois condutores (cobre, alumínio, latão,...) separados por um dielétrico (ar, vácuo, polietileno, poliestireno, PTFE,...) → propagação de onda **TEM – transversal eletromagnética** (ou quase-TEM).

Bifilar paralela

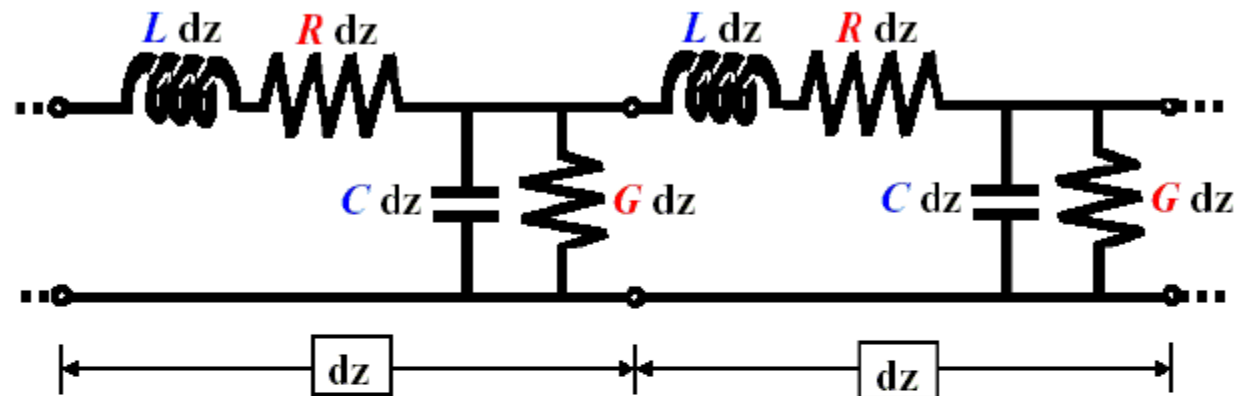


Coaxial



Parâmetros distribuídos de Linhas de Transmissão

Modelo com elementos concentrados:



Parâmetros distribuídos (por unidade de comprimento):

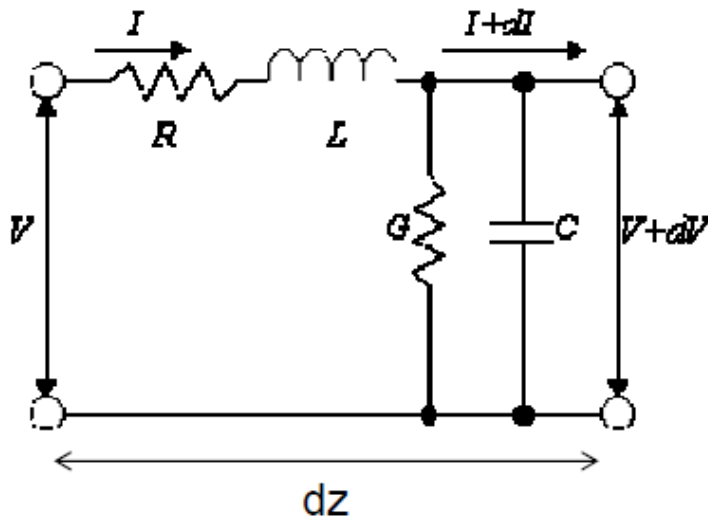
L (H/m) – indutância distribuída (efeito magnético da corrente que percorre os condutores)

C (F/m) – capacitância distribuída (efeito da tensão entre os condutores separados pelo dielétrico)

R (Ω/m) – Perdas no material condutor

G (S/m) - Perdas no material dielétrico (isolante)

Linhas de Transmissão – Equações dos telegrafistas



$$V = v(z, t)$$

$$I = i(z, t)$$

Hipótese:

- $dz \rightarrow 0$

Aplicando Leis de Kirchhoff:

$$\frac{\partial V}{\partial z} = -RI - L \frac{\partial I}{\partial t}$$

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -GV - C \frac{\partial V}{\partial t}$$

$$\left[\begin{aligned} \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} &= LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} + (RC + GL) \frac{\partial V}{\partial t} + GRV \\ \frac{\partial^2 I}{\partial z^2} &= LC \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} + (RC + GL) \frac{\partial I}{\partial t} + GRI \end{aligned} \right.$$

Soluções:

$$V = V_a \cdot e^{-\gamma z} + V_b \cdot e^{\gamma z}$$

$$I = I_a \cdot e^{-\gamma z} + I_b \cdot e^{\gamma z}$$

Linhas de Transmissão – Fator de Propagação

Soluções harmônicas (senoidais) das equações (regime permanente)

$$V = V_i \cdot e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) + V_r \cdot e^{\alpha z} \cos(\omega t + \beta z) \quad V_i, V_r, I_i, I_r$$

$$I = \underbrace{I_i \cdot e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z)}_{\text{sentido } z+} + \underbrace{I_r \cdot e^{\alpha z} \cos(\omega t + \beta z)}_{\text{sentido } z-}$$

complexos

Fator de Propagação (complexo):

$$\gamma = \sqrt{Z \cdot Y} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta$$

α = constante de atenuação (Np/m)

1Np=8,686dB

β = constante de fase (rad/m)

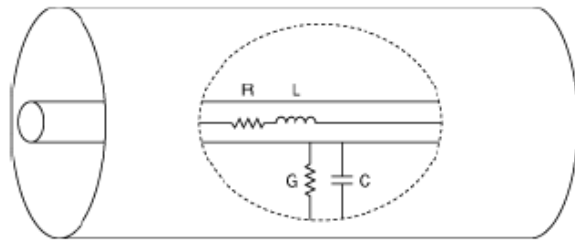
(variação de fase num comprimento de onda)

α e β variam com a frequência !

Para linha **sem perdas**:

$$\alpha = 0 \text{ e } \beta = \omega \sqrt{LC}$$

Linhas de Transmissão – Impedância Característica



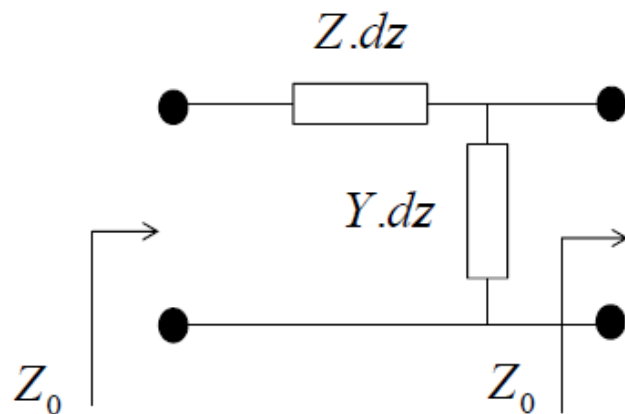
$$Z = R + j\omega L$$

$$Y = G + j\omega C$$

$$Z_0 = \frac{V_i}{I_i} = -\frac{V_r}{I_r} = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$$

Hipóteses:

$dz \rightarrow 0$ comprimento da linha $\rightarrow \infty$



Para linha sem perdas:

$$R = 0; \quad G = 0$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Independente da frequência !

Linhas de Transmissão – Velocidades de propagação

➤ **Velocidade de fase:** $v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\omega}{\text{Im}\left\{\sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}\right\}}$

Para linha sem perdas:

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\omega}{\omega\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Independente
da frequência !

➤ **Velocidade de grupo:** $v_g = \left[\frac{d\beta}{d\omega}\right]^{-1}$

Para linha sem perdas:

$$v_g = v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

➤ **Fator de velocidade:**

$$\eta = \frac{v_p}{c}$$

Valores comuns: entre 65% e 85%

Linhas de Transmissão sem distorção

➤ **Hipótese:**

$$\frac{R}{L} = \frac{G}{C}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R}{G}} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

➤ **Consequências:**

$$\gamma = \sqrt{RG} + j\omega\sqrt{LC} = \alpha + j\beta$$

β é função linear de ω

$$v_g = v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

➤ **Características:**

- α é constante, independente da frequência
- β varia linearmente com a frequência

- Na prática: aumenta-se o valor de L introduzindo-se bobinas na LT

Efeitos de distorção em linhas de transmissão



- **Sinais digitais (pulsados):** componentes harmônicas de várias frequências
- **Propagação em velocidades diferentes**
- **Efeito:** distorção dos pulsos; perda de informação

Linhas de Transmissão – Comprimento de onda guiado

- **Comprimento de onda:** distância correspondente a uma variação de fase igual a 2π rad (ou 360°)

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{v_p}{f}$$

Lembrando que:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

c =velocidade da luz no vácuo = $3 \cdot 10^8$ m/s

ϵ_0 =permissividade elétrica = $8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m

μ_0 =permeabilidade magnética = $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0}}$$

Considerando-se meio **não magnético** : $\mu_r = 1$

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

ϵ_r =permissividade relativa= **constante dielétrica**
 μ_r =permeabilidade relativa

E portanto:

$$\lambda_g = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r} f}$$

Linhas de Transmissão – Comprimento físico e Comprimento elétrico

- **Comprimento elétrico (θ , em graus ou rad) :** relação entre o comprimento físico (l) e o comprimento de onda guiado (λ_g)

$$\theta(\text{graus}) = \frac{l}{\lambda_g} \cdot 360^\circ = \beta l$$

$$\theta(\text{rad}) = \frac{l}{\lambda_g} \cdot 2\pi = \beta l$$

Lembrando que:

$$\lambda_g = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r} f}$$

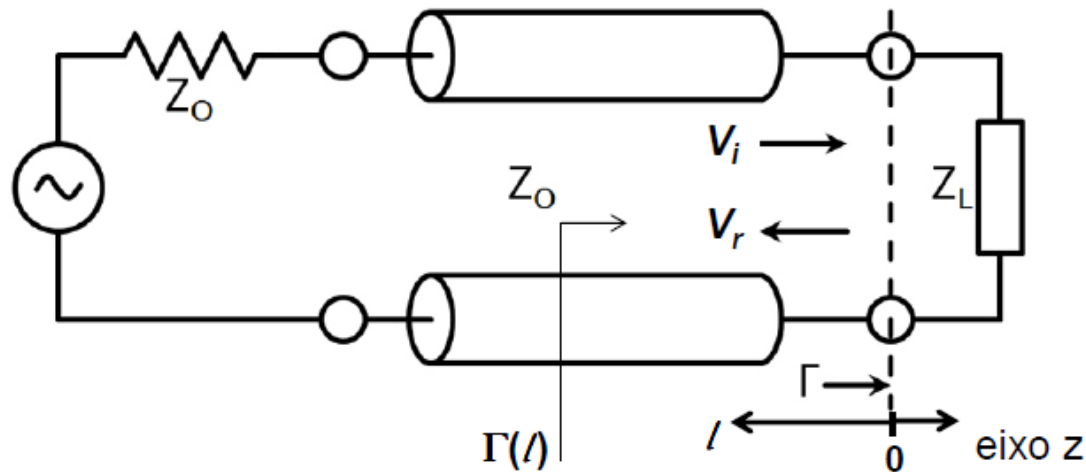
Depende da frequência !

Tem-se que:

$$\theta(\text{graus}) = \frac{360^\circ \cdot l \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon_r}}{c}$$

$$\theta(\text{rad}) = \frac{2\pi \cdot l \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon_r}}{c}$$

Reflexões em Linhas de Transmissão



$$\Gamma = \rho \angle \theta$$

Coeficiente de reflexão na carga:

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

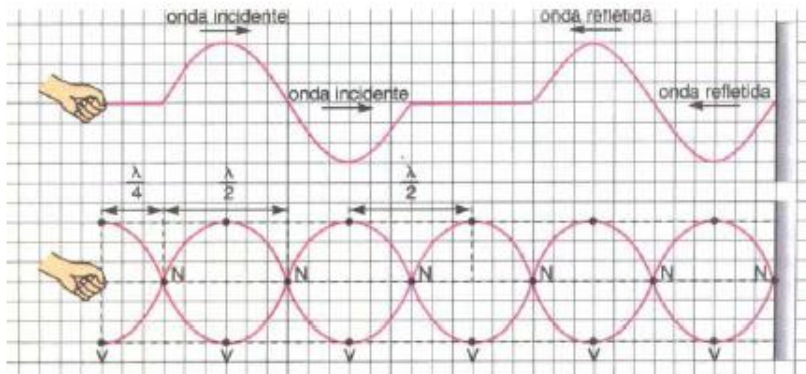
Coeficiente de reflexão em qualquer ponto da linha:

$$\Gamma(l) = \frac{V_r \cdot e^{-\gamma l}}{V_i \cdot e^{\gamma l}} = \Gamma \cdot e^{-2\gamma l}$$

Reflexões em Linhas de Transmissão

Ondas incidente e refletida e Ondas estacionárias em Linhas de Transmissão

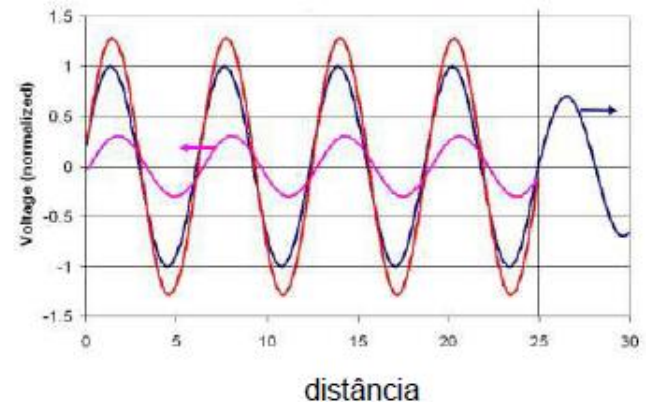
Analogia



Onda mecânica estacionária gerada numa corda com uma das extremidades fixas.

<http://dc373.4shared.com/doc/WiKSjz4/preview.html>

instante de tempo fixo- distribuição do espaço

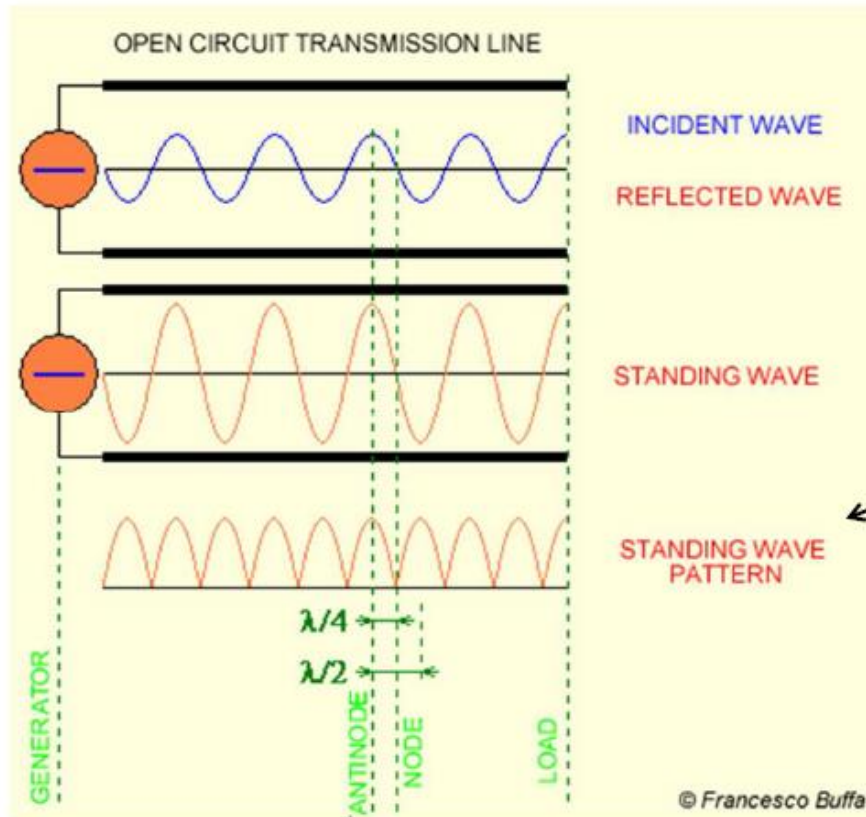


Onda incidente Onda refletida
Onda estacionária

Carga posicionada em $z=25$

<http://www.microwaves101.com/encyclopedia/vswr.cfm>

Onda estacionária em linha terminada em circuito aberto



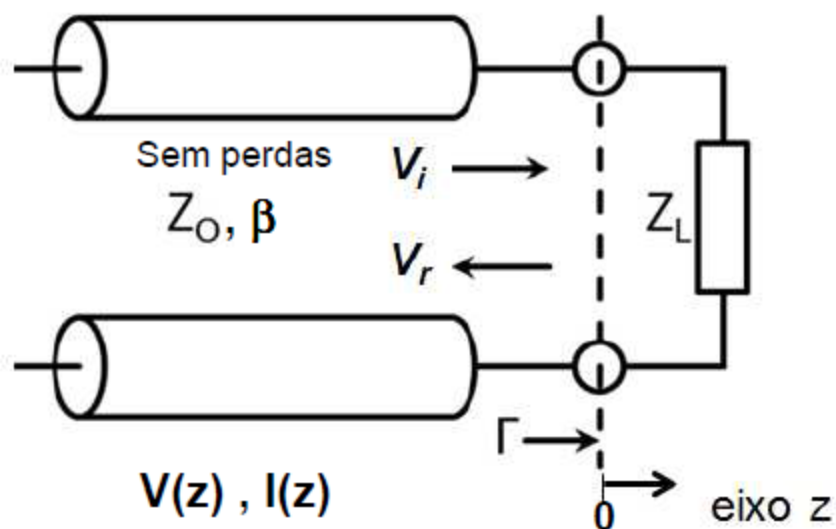
ondas incidente, refletida e estacionária:
senoidais

Diagrama de onda estacionária:
não-senoidal

Distância entre dois mínimos
(ou entre dois máximos) = $\lambda_g/2$

Distância entre um mínimo e
um máximo = $\lambda_g/4$

Tensão em Linhas com reflexão



$$V(z) = V_i \left[e^{-j\beta z} + \Gamma e^{j\beta z} \right]$$

$$|V(z)| = |V_i| \left| 1 + \Gamma e^{j2\beta z} \right|$$

$$|V(z)| = |V_i| \left| 1 + \rho e^{j(2\beta z + \theta)} \right|$$

$$\Gamma = \rho \angle \theta$$

$$V_{m\acute{a}x} = |V_i| |1 + \rho|$$

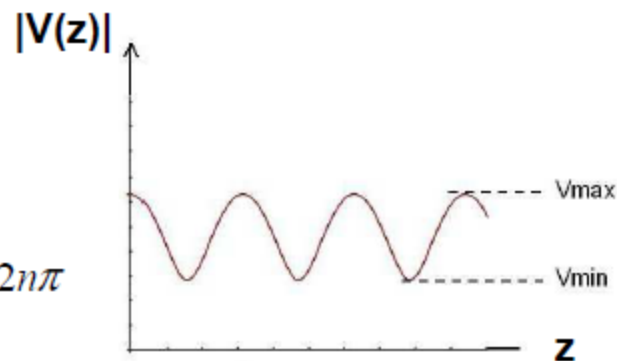
para $e^{j(2\beta z + \theta)} = 1$

$$2\beta z + \theta = \pm 2n\pi$$

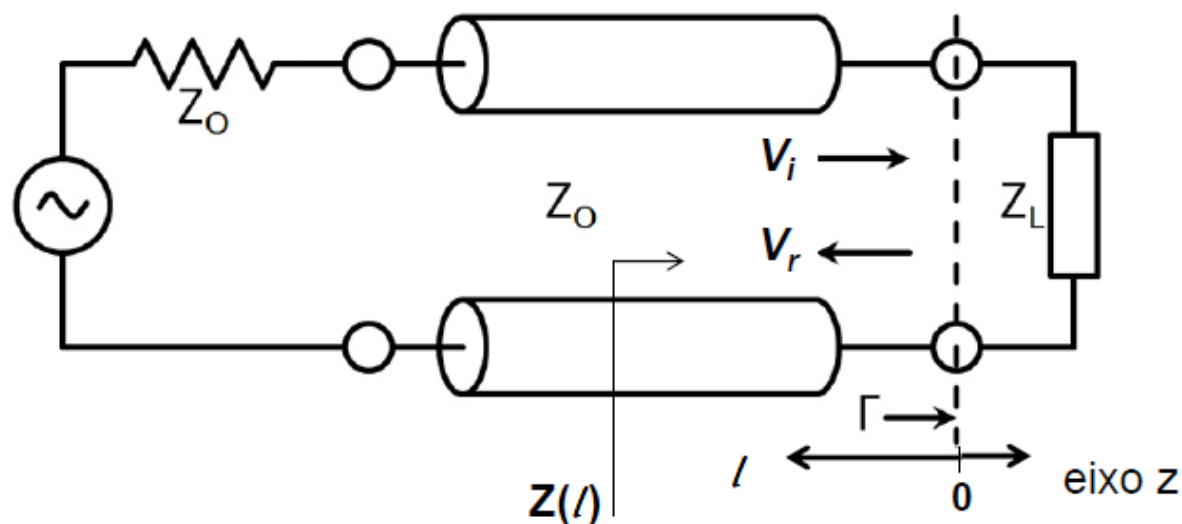
$$V_{m\acute{i}n} = |V_i| |1 - \rho|$$

para $e^{j(2\beta z + \theta)} = -1$

$$2\beta z + \theta = \pm 2(n+1)\pi$$



Reflexões em Linhas de Transmissão



Impedância em qualquer ponto da linha:

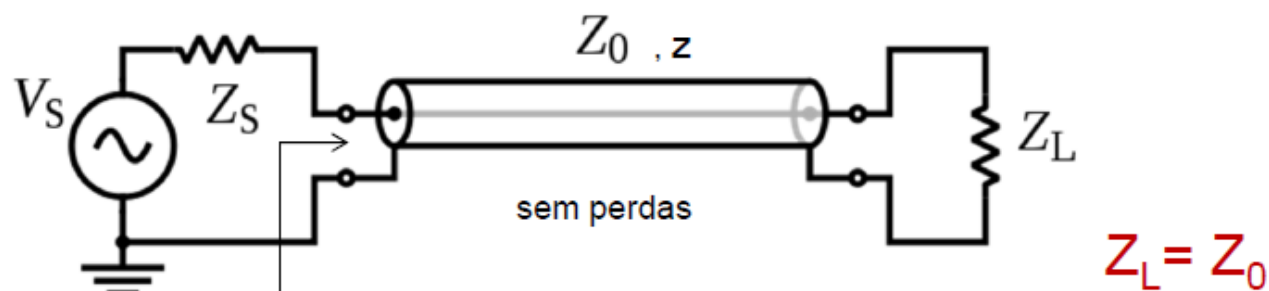
$$Z(l) = \frac{V(l)}{I(l)} = Z_0 \left[\frac{Z_L + Z_0 \operatorname{tgh} \gamma l}{Z_0 + Z_L \operatorname{tgh} \gamma l} \right]$$

Para linha **sem perdas**:

$$Z(l) = Z_0 \left[\frac{Z_L + jZ_0 \operatorname{tg} \beta l}{Z_0 + jZ_L \operatorname{tg} \beta l} \right]$$

Reflexões em Linhas de Transmissão – Casos Especiais

Linha terminada em carga casada (ou linha de comprimento ∞)



$$Z_{in} = Z_0$$

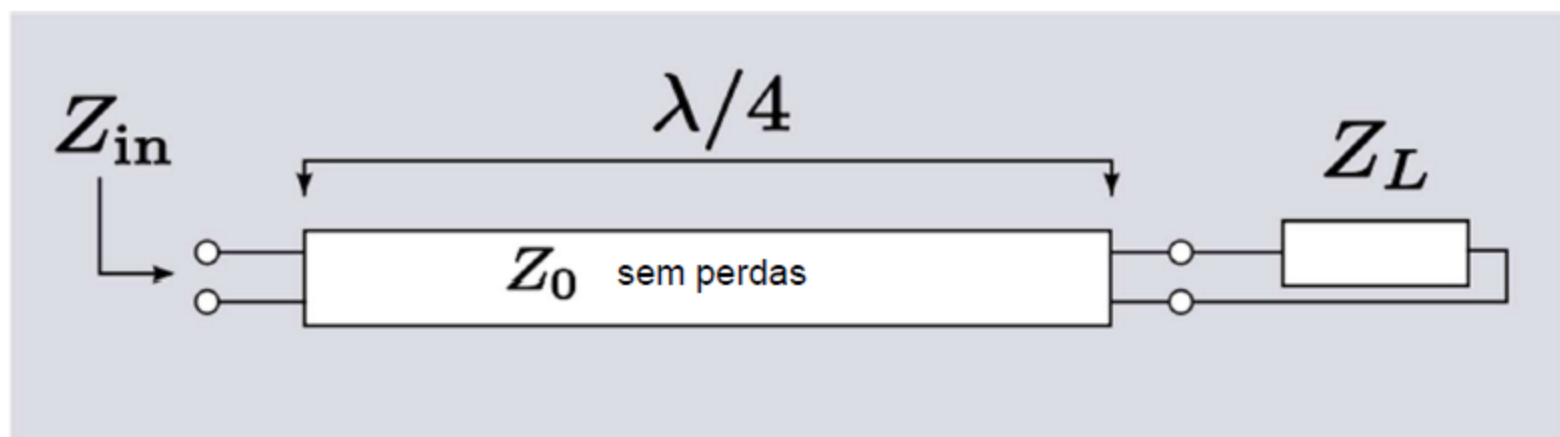
$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = 0 \Rightarrow V_r = 0$$

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = 0$$

- Não há onda refletida, somente incidente
- Não há onda estacionária

Reflexões em Linhas de Transmissão – Casos Especiais

Transformador de $\lambda/4$

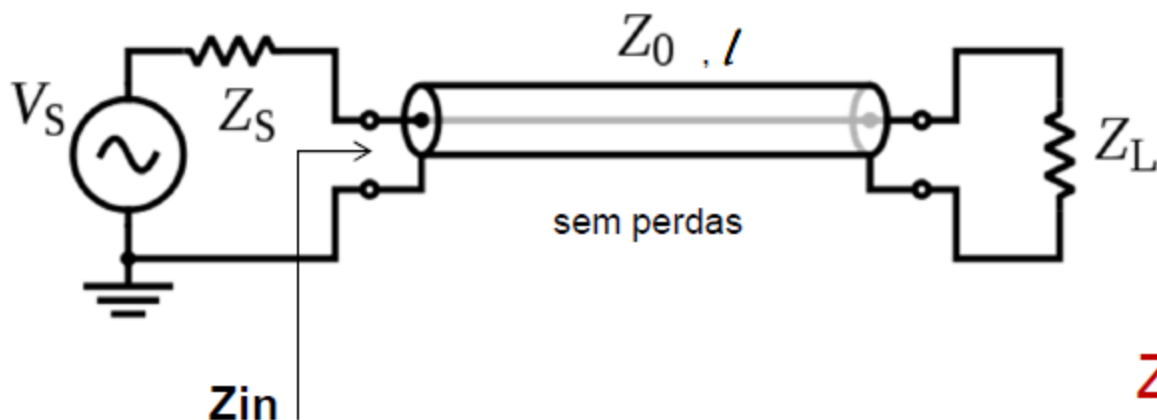


$$Z_{in} = Z_0 \left[\frac{Z_L + jZ_0 \operatorname{tg} \beta l}{Z_0 + jZ_L \operatorname{tg} \beta l} \right] = \frac{Z_0^2}{Z_L}$$

$$l = \lambda/4$$

Reflexões em Linhas de Transmissão – Casos Especiais

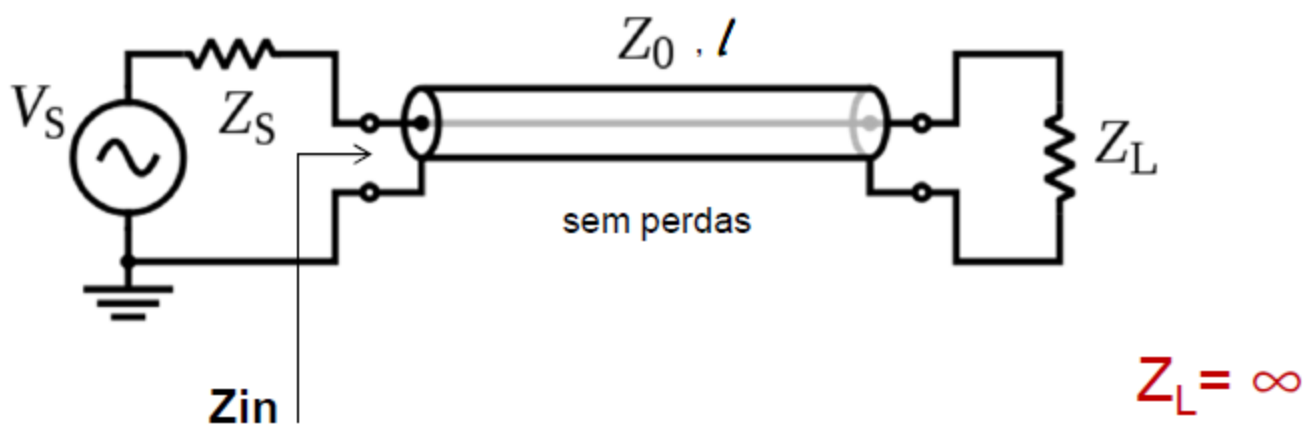
Linha terminada em curto circuito



$$Z_{in} = Z_0 \left[\frac{Z_L + jZ_0 \operatorname{tg} \beta l}{Z_0 + jZ_L \operatorname{tg} \beta l} \right] = jZ_0 \operatorname{tg} \beta l$$

Reflexões em Linhas de Transmissão – Casos Especiais

Linha terminada em circuito aberto



$$Z_{in} = Z_0 \left[\frac{Z_L + jZ_0 \operatorname{tg} \beta l}{Z_0 + jZ_L \operatorname{tg} \beta l} \right] = -jZ_0 \cot \beta l$$