Linhas de Transmissão

SEL 369 Micro-ondas

Tania Regina Tronco
Departamento de Engenharia Elétrica da EESC-USP

Conceitos Fundamentais

⇒ Propagação de Ondas Eletromagnéticas é descrita de forma completa pelas Equações de Maxwell. A energia pode se propagar de duas formas principais:

⇝ Ondas Guiadas (Guided Waves);
⇝ Ondas Não-Guiadas (Wireless);

⇒ Excluindo-se as situações em que o uso de ondas guiadas não é possível (Radar, Telemetria, Telefonia Móvel, Broadcasting, etc) as comunicações por ondas guiadas usualmente apresentam maior confiabilidade, com a contrapartida de maior custo de implementação e manutenção.

⇝ Na **Propagação Não-Guiada** predominam dois fenômenos ondulatórios denominados **Atenuação e Difração** em espaço livre.

⇝ A **Propagação Guiada** é capaz de compensar a difração (no sentido mais amplo da palavra), todavia introduz o fenômeno de **Dispersão temporal**.

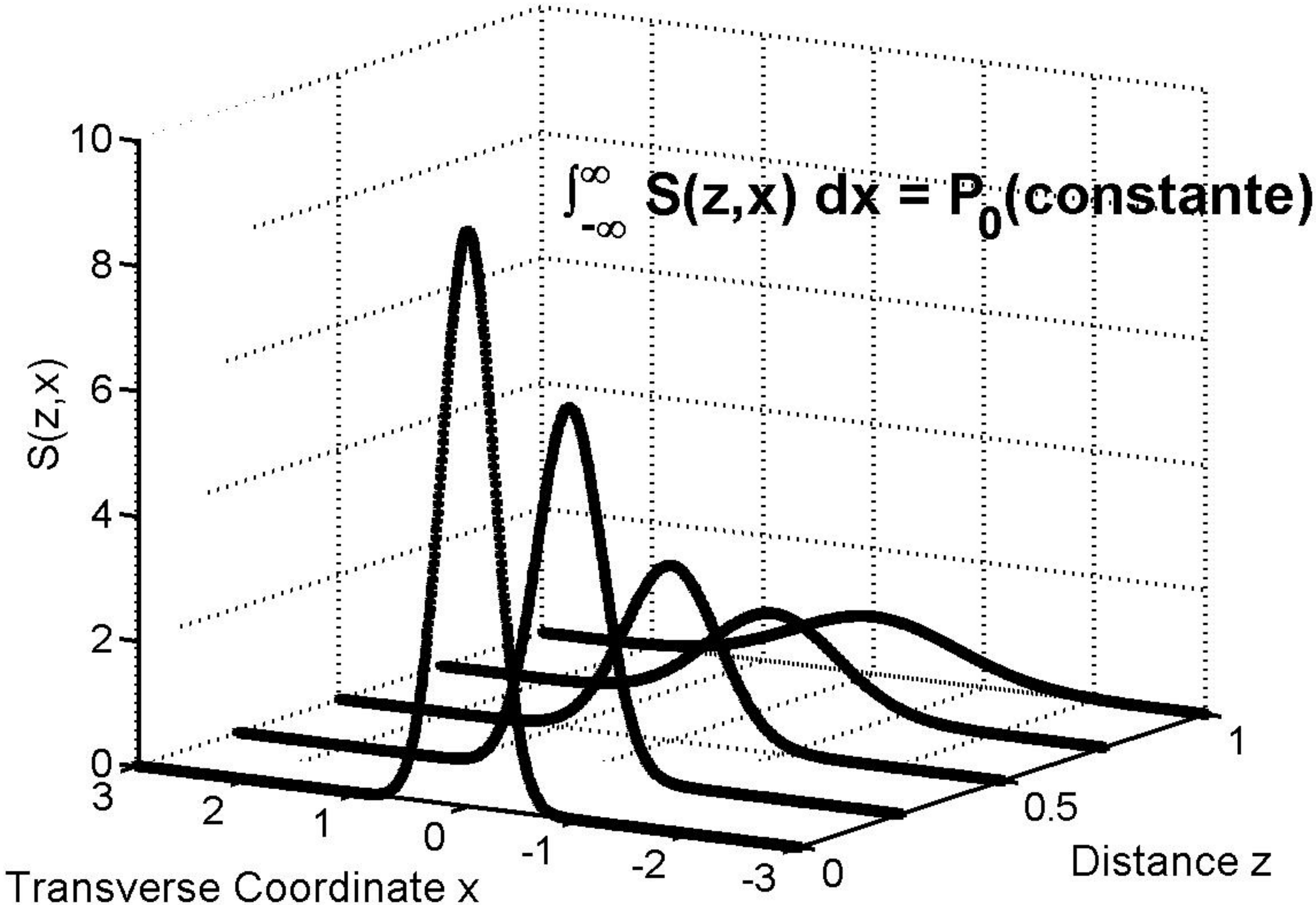
Fonte: http://www.eletrica.ufpr.br/cadartora/Documentos/TE053/02-Ondas_em_LT.pdf

Sistemas Não-Guiados

Propagação se dá em espaço "livre". Densidade de Potência varia na forma $S_r \propto 1/r^2$. Requer um sistema radiante (antenas). Apresenta inúmeras aplicações:

- Broadcasting de rádio e TV;
- Internet via rádio
- Telefonia Móvel Celular;
- Sistemas de Radar Civil e Militar, Sensoreamento remoto;
- Teleguiamento de objetos, aplicações militares;
- Comunicação via satélite, links de visada direta;
- Conexões locais wireless, etc;

Fonte: http://www.eletrica.ufpr.br/cadartora/Documentos/TE053/02-Ondas_em_LT.pdf



$\int_{-\infty}^{\infty} S(z,x)\,dx = P_0$(constante)
S(z,x)
10
8
6
4
2
0
3
2
1
0
-1
-2
-3
Transverse Coordinate x
0
0.5
1
Distance z

Sistemas Guiados

A onda é guiada através de um guia de ondas(linha de transmissão, cabo coaxial, fibra óptica).

- TV a cabo
- Internet banda larga via cabo;
- Telefonia e Transmissão de Dados;
- Comunicações Transoceânicas de altas taxas de transmissão por fibra óptica;
- Transmissão de Potência em 60Hz;
- Redes locais, Redes de longas distâncias;

Fonte: http://www.eletrica.ufpr.br/cadartora/Documentos/TE053/02-Ondas_em_LT.pdf

Dispersão

É um fenômeno que ocorre no domínio do tempo, caracterizado pelo alargamento e degradação temporal de um sinal qualquer. À medida que um pulso de largura inicial τ_0 se propaga, a largura temporal τ vai aumentando (pode diminuir em algumas circunstâncias), quando o meio é dispersivo. Velocidade de propagação da onda depende da frequência.

Sempre ocorre em sistemas guiados, onde a densidade de potência é constante ao longo da seção transversal do guia, desde que este não tenha perdas por atenuação. Pode ocorrer também em sistemas não-guiados quando o meio de transmissão apresenta características dependentes da frequência.

Somente ocorre com um grupo de ondas de frequências diferentes. Requer portanto que o sinal tenha uma largura de banda de frequências.

Fonte: http://www.eletrica.ufpr.br/cadartora/Documentos/TE053/02-Ondas_em_LT.pdf

Principais Tipos de Guias de Onda

Linha de Transmissão

- Muitos autores consideram as estruturas de LT como guias de ondas e outros preferem tratá-las em separado.

- A Linha de Transmissão deve ser constituída de pelo menos duas superfícies condutoras mantidas a uma diferença de potencial.

- Admite soluções TEM, o que a diferencia dos demais tipos de guias.

- Não apresentam frequência de corte. Idealmente poderiam operar deste o regime DC até frequência $f \to \infty$. Na prática as perdas em altas frequências limitam seu uso até o espectro de microondas.

- São exemplos típicos de LT as seguintes estruturas: i) par de condutores, ii) guia coaxial, iii) microstrip lines.

Fonte: http://www.eletrica.ufpr.br/cadartora/Documentos/TE053/02-Ondas_em_LT.pdf

Linhas de Transmissão Típicas

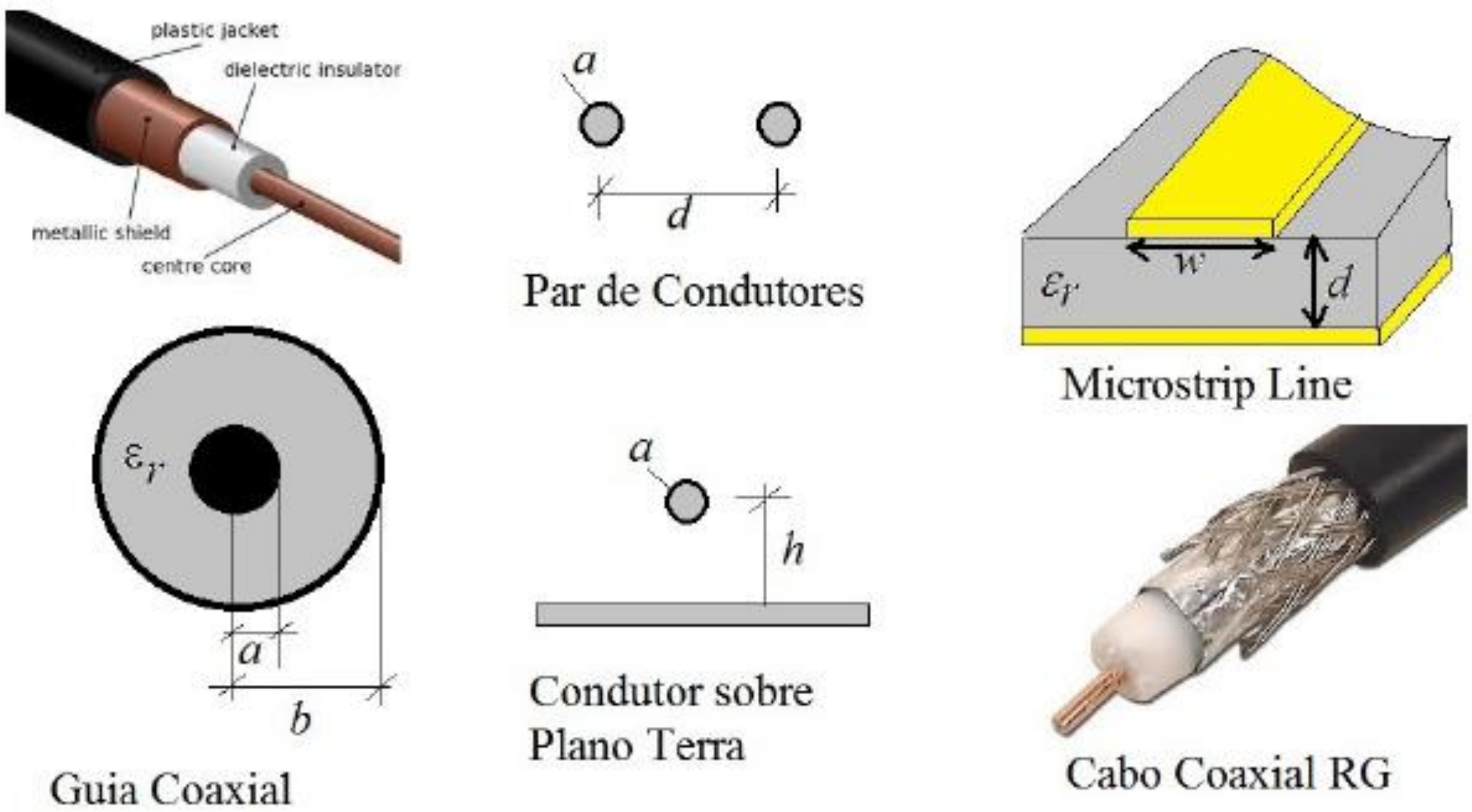


Figura 3: Linhas de Transmissão Típicas.

Fonte: http://www.eletrica.ufpr.br/cadartora/Documentos/TE053/02-Ondas_em_LT.pdf

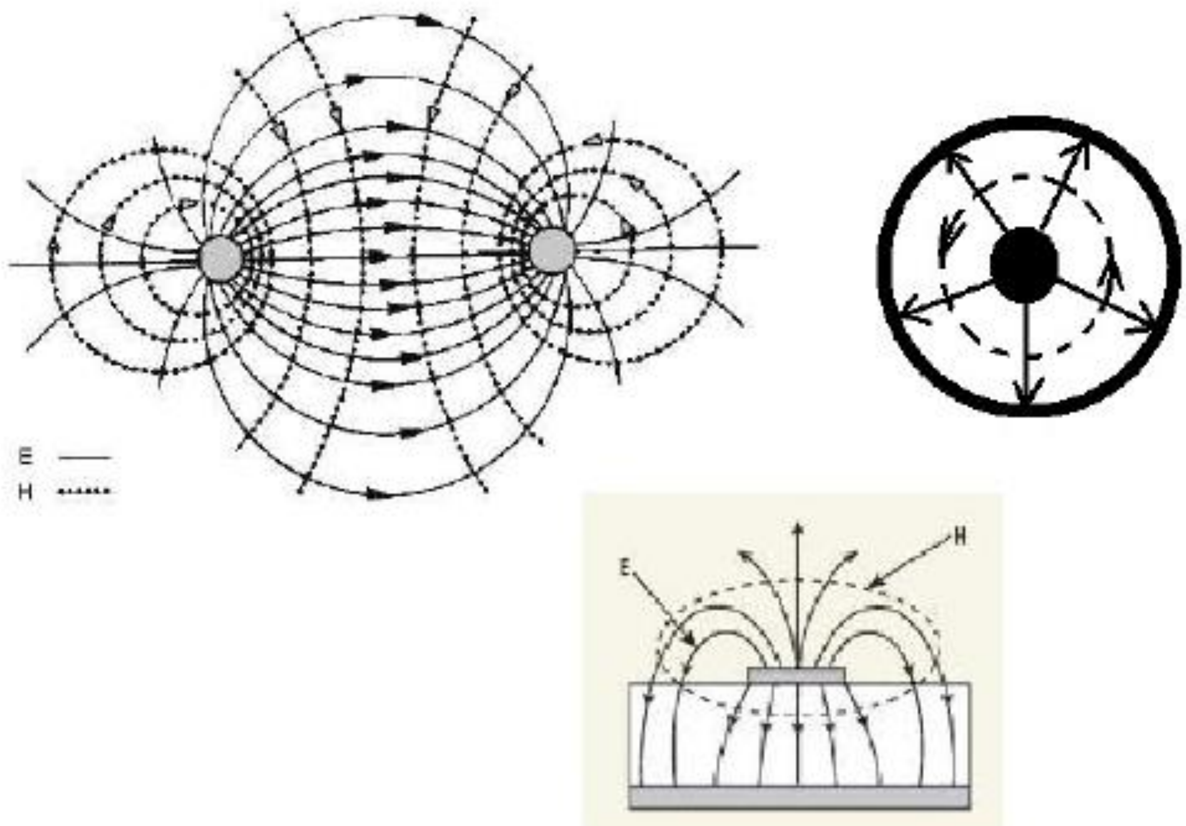


Figura 4: Formas do Campo nas Linhas de Transmissão Típicas.

Fonte: http://www.eletrica.ufpr.br/cadartora/Documentos/TE053/02-Ondas_em_LT.pdf

Guia de Ondas Metálicos

- São muito utilizados na faixa das microondas, pois as dimensões em frequências menores os tornam inviáveis.

- Não possuem modos TEM e apresentam frequência de corte f_c, abaixo da qual não operam. Essa frequência de corte depende essencialmente da geometria e das dimensões do guia, bem como do material dielétrico no interior do guia.

- As geometrias mais utilizadas são a retangular e a circular.

- Em geral são preenchidos de ar (ou vácuo, como primeira aproximação).

Fonte: http://www.eletrica.ufpr.br/cadartora/Documentos/TE053/02-Ondas_em_LT.pdf

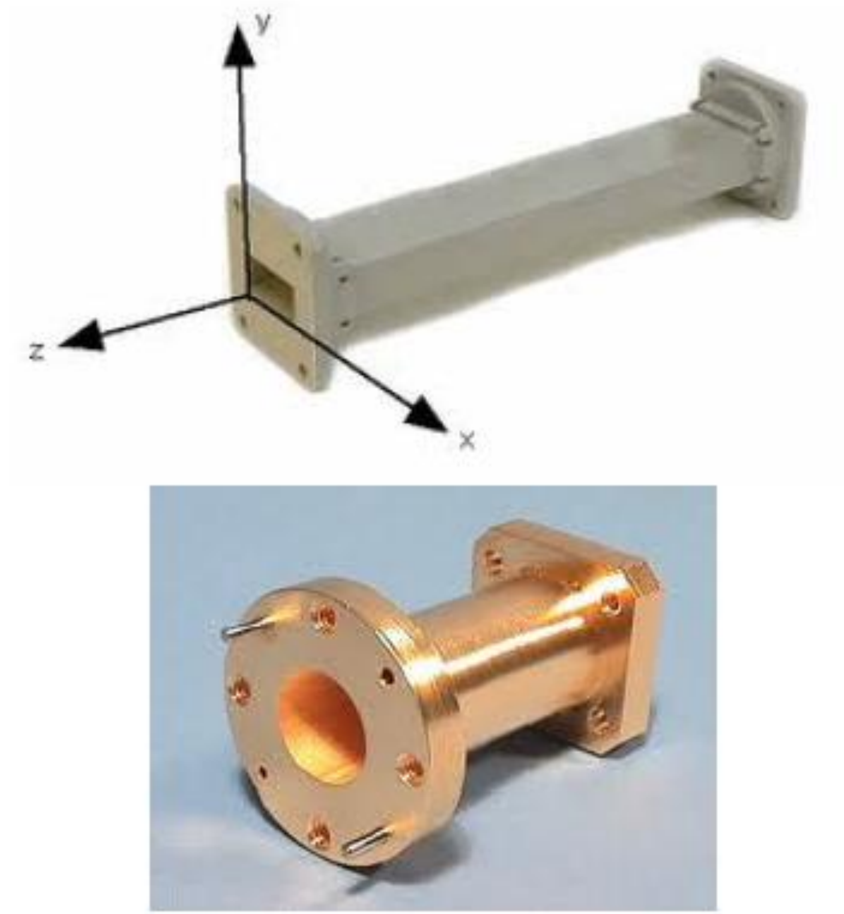


Figura 5: Guias de Onda Metálicos

Guias de Ondas Dielétricos e Fibras Ópticas

São estruturas capazes de confinar e guiar ondas eletromagnéticas através das condições de contorno impostas entre meios de natureza dielétrica. A Fibra Óptica é um caso particular de guia de ondas dielétricos.

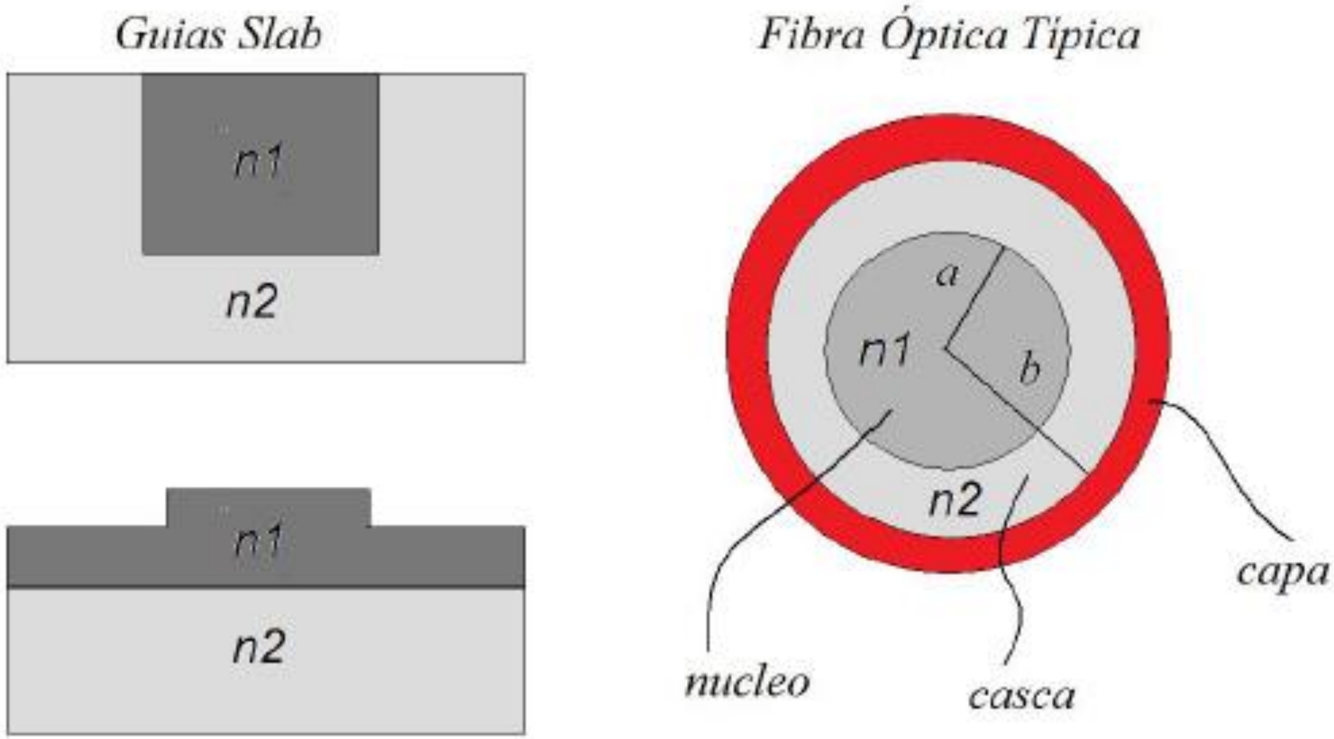


Figura 6: Guias Dielétricos Típicos.

EQUAÇÃO DAS ONDAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Modelo de Linha de Transmissão

Para modelar a linha de transmissão considera-se um trecho de linha $\Delta z <<$ λ no qual as leis de circuitos são válidas ainda:

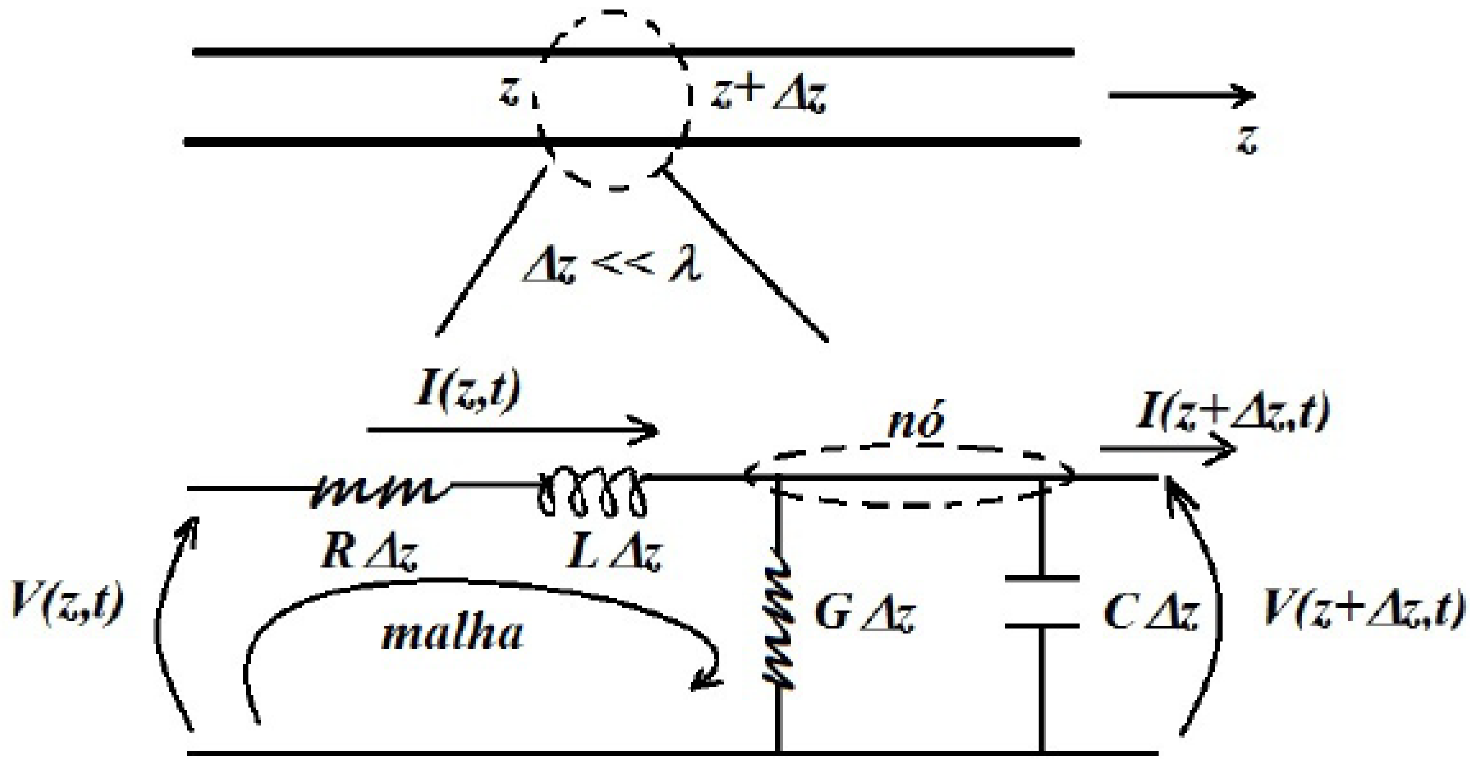


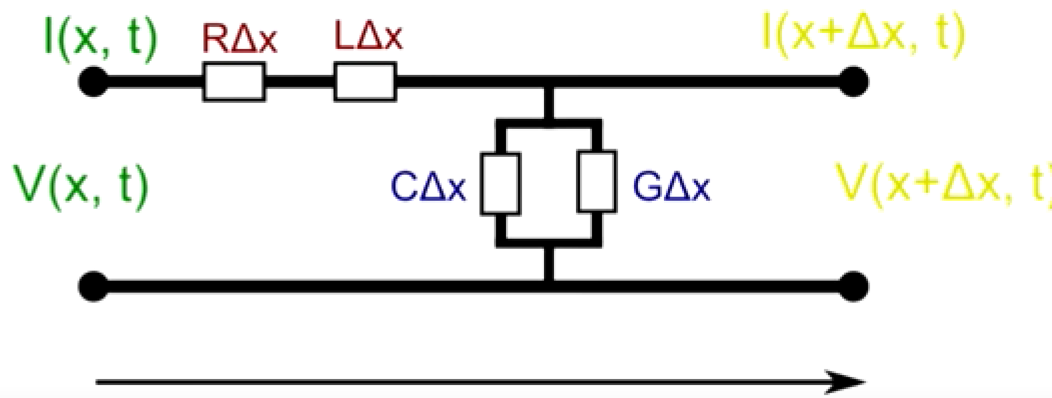
Figura 7: Modelo de Parâmetros Distribuídos da Linha de Transmissão.

Sejam os parâmetros:

- R - resistência série por unidade de comprimento [ohms/m] - representa perdas nos condutores ($\sigma < \infty$).
- G - condutância paralela por unidade de comprimento [siemens/m] - representa perdas no dielétrico ($\sigma > 0$).
- L - indutância por unidade de comprimento [F/m].
- C - capacitância por unidade de comprimento [H/m]

- Podemos aplicar a lei das malhas e nós no circuito mostrado na figura:

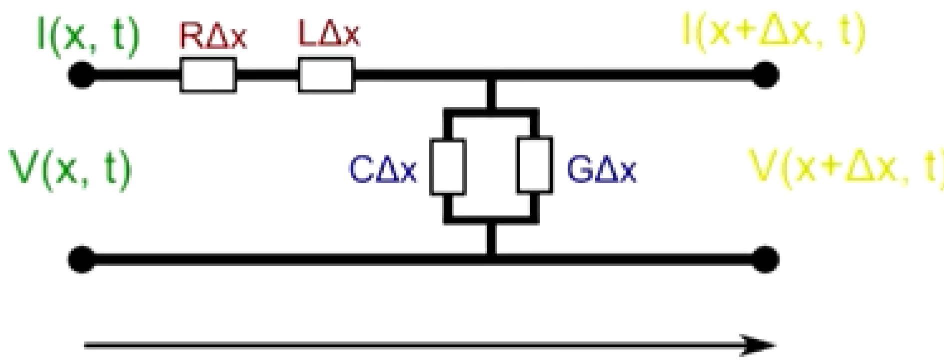
Fonte: http://www.eletrica.ufpr.br/cadartora/Documentos/TE053/02-Ondas_em_LT.pdf



Lembrando que:

$$V_R = RI$$
$$V_L = L\frac{\partial I}{\partial t}$$

Equação das Tensões

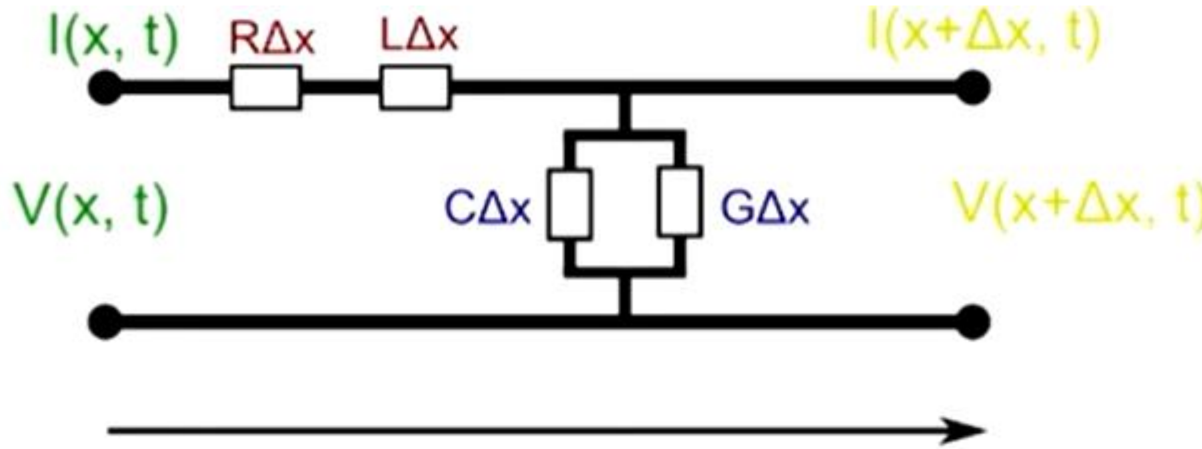


$$V_{(x,t)} - R\Delta x I_{(x,t)} - L\Delta x \frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial t} - V_{(x+\Delta x,t)} = 0$$

$$V_{(x,t)} = R\Delta x I_{(x,t)} + L\Delta x \frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial t} + V_{(x+\Delta x,t)}$$

$$V_{(x+\Delta x,t)} - V_{(x,t)} = -\left(L\Delta x \frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial t} + R\Delta x I_{(x,t)} \right)$$

Equação das Tensões

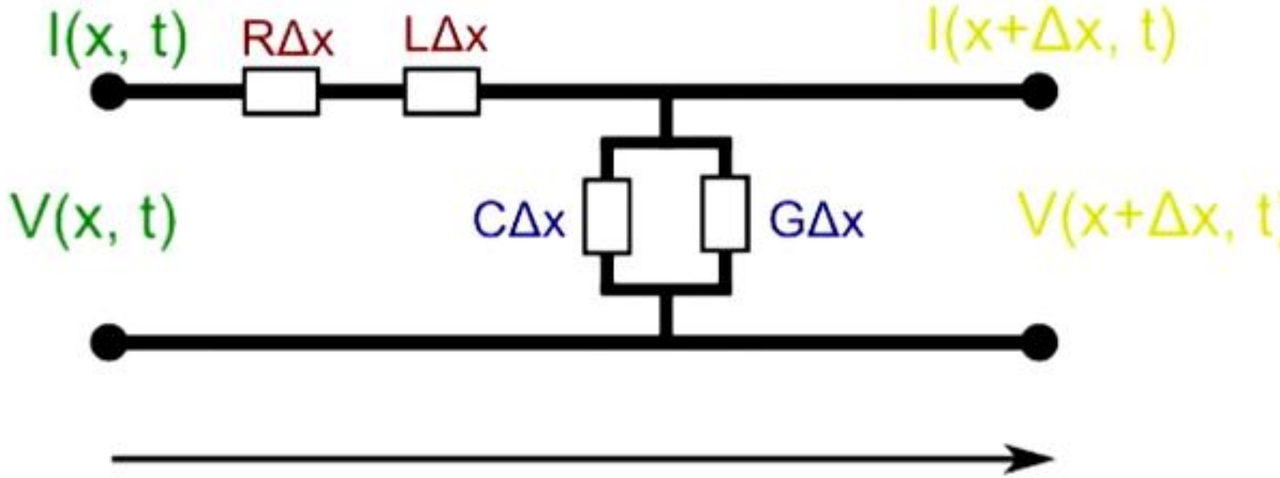


$$V_{(x+\Delta x,t)} - V_{(x,t)} = -\Delta x \left(L\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial t} + RI_{(x,t)} \right)$$

$$\frac{V_{(x+\Delta x,t)} - V_{(x,t)}}{\Delta x} = -\left(L\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial t} + RI_{(x,t)} \right)$$

$$\lim_{\Delta x \to 0}\left[\frac{V_{(x+\Delta x,t)} - V_{(x,t)}}{\Delta x} = -\left(L\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial t} + RI_{(x,t)} \right) \right]$$

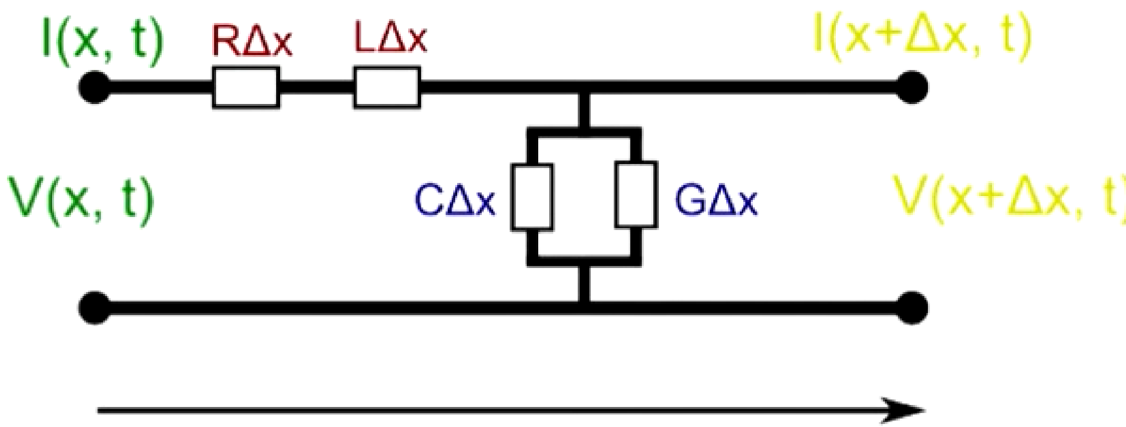
Equação das Tensões



$$\frac{\partial V_{(x,t)}}{\partial x} = -\left(L\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial t} + RI_{(x,t)}\right)$$

$$-\frac{\partial V_{(x,t)}}{\partial x} = L\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial t} + RI_{(x,t)}$$

Equação da Corrente

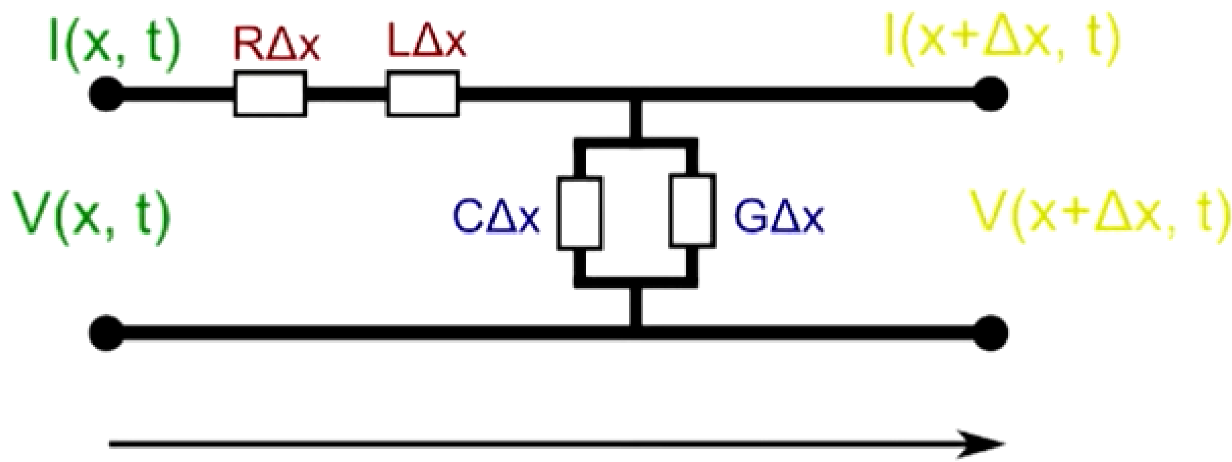


Vamos agora resolver utilizando a lei dos nós

Lembrando que:

$$I_G = GV$$
$$I_C = C\frac{\partial V}{\partial t}$$

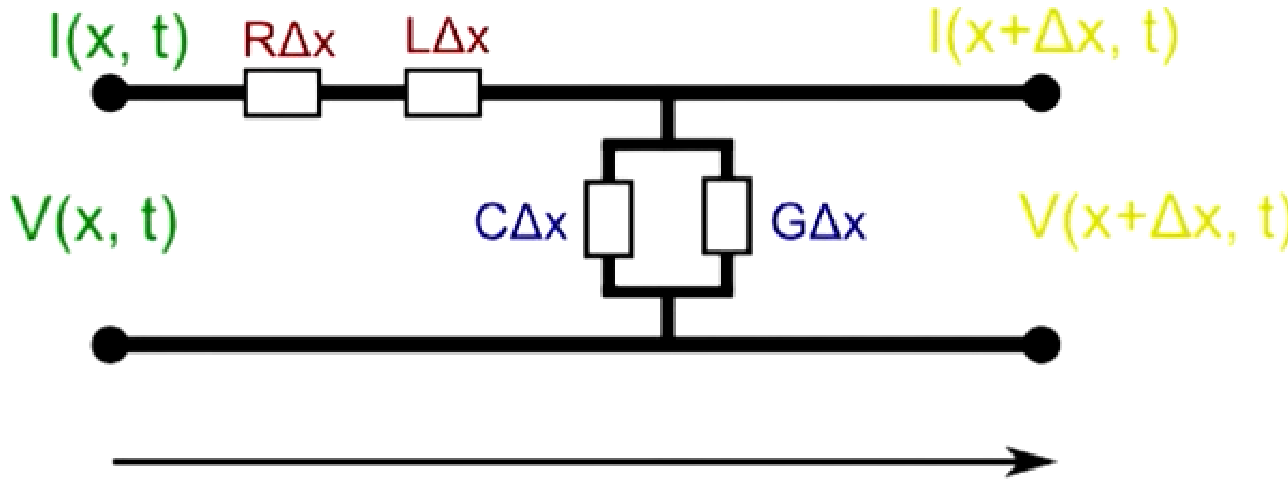
Equação da Corrente



$$I_{(x,t)} = I_{(x+\Delta x,t)} + C\Delta x \frac{\partial V_{(x+\Delta x,t)}}{\partial t} + G\Delta x V_{(x+\Delta x,t)}$$

$$I_{(x+\Delta x,t)} - I_{(x,t)} = -\left(C\Delta x \frac{\partial V_{(x+\Delta x,t)}}{\partial t} + G\Delta x V_{(x+\Delta x,t)} \right)$$

Equação da Corrente

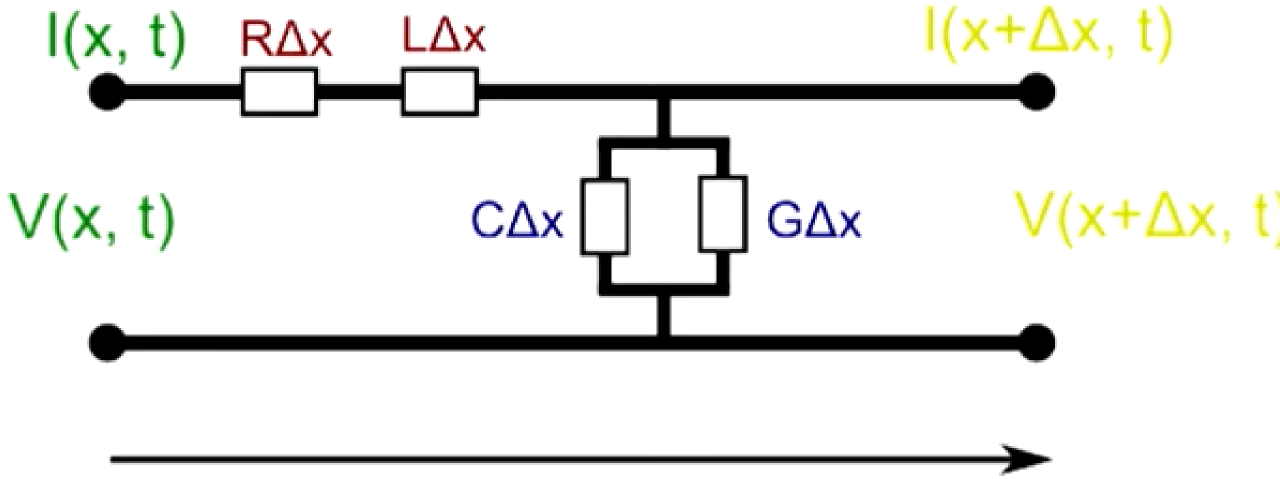


$$I_{(x+\Delta x,t)} - I_{(x,t)} = -\Delta x \left(C \frac{\partial V_{(x+\Delta x,t)}}{\partial t} + G V_{(x+\Delta x,t)} \right)$$

$$\frac{I_{(x+\Delta x,t)} - I_{(x,t)}}{\Delta x} = -\left(C \frac{\partial V_{(x+\Delta x,t)}}{\partial t} + G V_{(x+\Delta x,t)} \right)$$

$$\lim_{\Delta x \to 0} \left[\frac{I_{(x+\Delta x,t)} - I_{(x,t)}}{\Delta x} = -\left(C \frac{\partial V_{(x+\Delta x,t)}}{\partial t} + G V_{(x+\Delta x,t)} \right) \right]$$

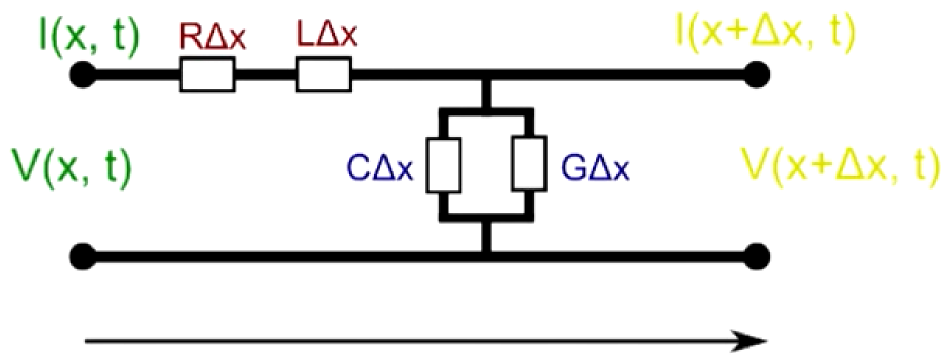
Equação da Corrente



$$\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial x} = -\left(C\frac{\partial V_{(x,t)}}{\partial t} + Gv_{(x,t)} \right)$$

$$-\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial x} = C\frac{\partial V_{(x,t)}}{\partial t} + GV_{(x,t)}$$

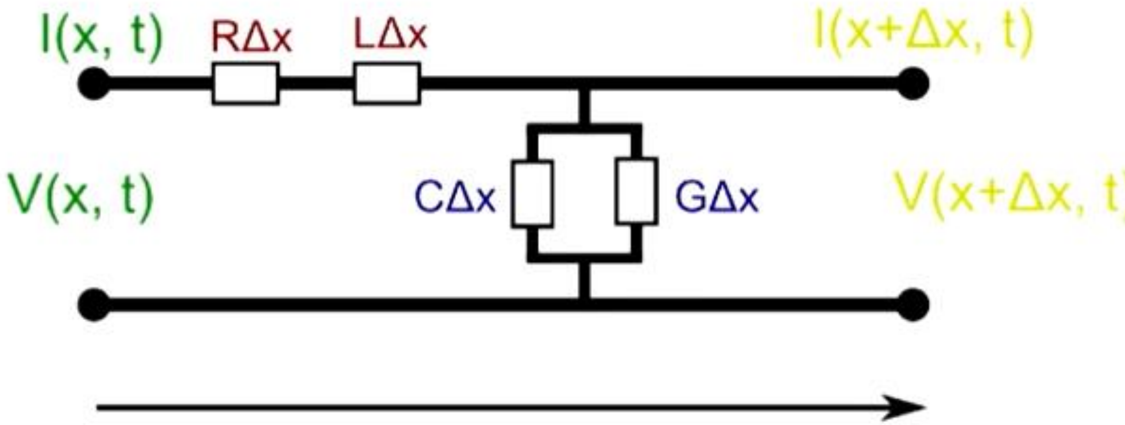
Equações da Linha de Transmissão



Essas duas equações são conhecidas como equações da linha de transmissão ou equações do telegrafista.

$$-\frac{\partial V_{(x,t)}}{\partial x} = L\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial t} + RI_{(x,t)} \tag{16}$$

$$-\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial x} = C\frac{\partial V_{(x,t)}}{\partial t} + GV_{(x,t)} \tag{17}$$



No entanto a equação para a tensão depende da corrente e vice-versa.

Vamos então isolar tensão e corrente em equações específicas

Partindo da equação da tensão:

$$-\frac{\partial V_{(x,t)}}{\partial x} = L\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial t} + RI_{(x,t)}$$

Derivamos novamente em relação a x:

$$-\frac{\partial^2 V_{(x,t)}}{\partial x^2} = L\frac{\partial^2 I_{(x,t)}}{\partial x \partial t} + R\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial x}$$

Partindo da equação da tensão:

$$-\frac{\partial V_{(x,t)}}{\partial x} = L\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial t} + RI_{(x,t)}$$

Derivamos novamente em relação a x:

$$-\frac{\partial^2 V_{(x,t)}}{\partial x^2} = L\frac{\partial^2 I_{(x,t)}}{\partial x \partial t} + R\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial x}$$

$$-\frac{\partial^2 V_{(x,t)}}{\partial x^2} = L\frac{\partial^2 I_{(x,t)}}{\partial x \partial t} + R\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial x}$$

Lembrando que :

$$-\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial x} = C\frac{\partial V_{(x,t)}}{\partial t} + GV_{(x,t)}$$

Substituimos na equação anterior:

$$-\frac{\partial^2 V_{(x,t)}}{\partial x^2} = -L\frac{\partial\left[C\frac{\partial V_{(x,t)}}{\partial t} + GV_{(x,t)}\right]}{\partial t} - R\left[C\frac{\partial V_{(x,t)}}{\partial t} + GV_{(x,t)}\right]$$

$$\frac{\partial^2 V_{(x,t)}}{\partial x^2} = LC\frac{\partial^2 V_{(x,t)}}{\partial t^2} + LG\frac{V_{(x,t)}}{\partial t} + RC\frac{\partial V_{(x,t)}}{\partial t} + RGV_{(x,t)}$$

Obtemos finalmente para a tensão, uma equação diferencial:

$$\frac{\partial^2 V_{(x,t)}}{\partial x^2} = LC\frac{\partial^2 V_{(x,t)}}{\partial t^2} + (LG + RC)\frac{V_{(x,t)}}{\partial t} + RGV_{(x,t)}$$

Realizando procedimento análogo para a corrente, obtemos:

$$\frac{\partial^2 I_{(x,t)}}{\partial x^2} = LC\frac{\partial^2 I_{(x,t)}}{\partial t^2} + (LG + RC)\frac{I_{(x,t)}}{\partial t} + RGI_{(x,t)}$$

Observando as equações, vê-se que a tensão e a corrente em uma Linha de Transmissão se propagam de forma idêntica. A partir dessas duas últimas equações diferenciais é possível calcular a propagação em uma LT tanto no regime transitório quanto no regime permanente.

Linhas de Transmissão sem Perdas

As linhas de transmissão disponíveis comercialmente possuem:

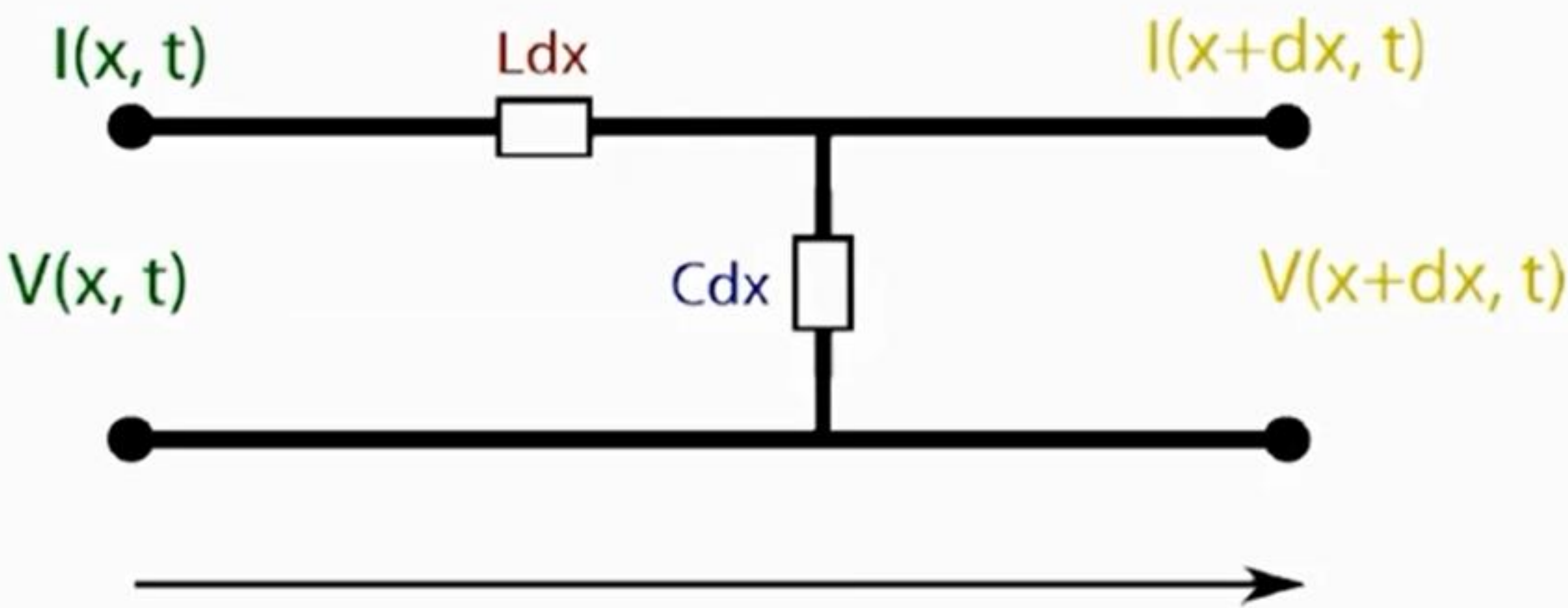
1. Bons Condutores
   - Dissipação pelo efeito resistivo é considerada despresível

$$R << X_L(WL) \tag{1}$$

2. Bons Dielétricos
   - Não há perdas no dielétrico

$$G << WC \tag{2}$$

Então, uma linha de transmissão é dita sem perdas quando não houver perdas de energia nos condutores e no material dielétrico, ou seja, $R = G = 0$.


I(x, t)
Ldx
I(x+dx, t)
V(x, t)
Cdx
V(x+dx, t)

$$-\frac{\partial V_{(x,t)}}{\partial x} = L\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial t} + RI_{(x,t)}$$

Considerando a linha sem perdas (R = G = 0), a equação anterior se resume a:

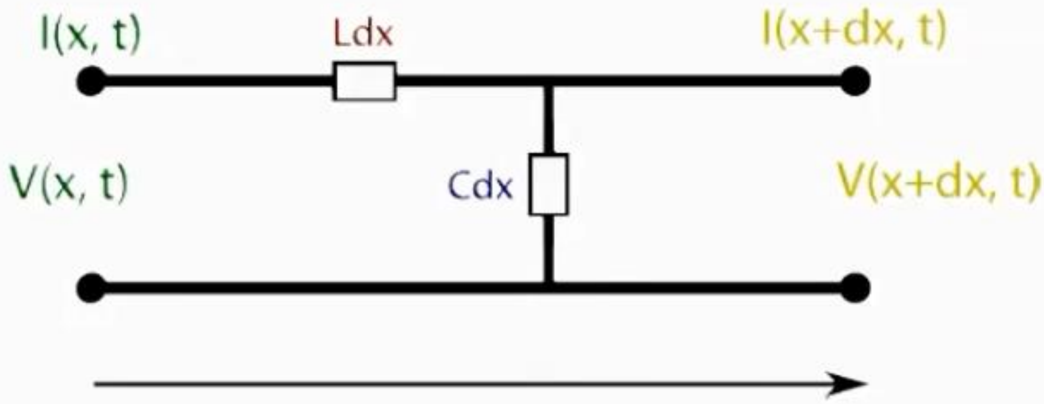
$$-\frac{\partial V_{(x,t)}}{\partial x} = L\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial t}$$

Equação da Corrente da LT sem perdas

$$-\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial x} = C\frac{\partial V_{(x,t)}}{\partial t} + GV_{(x,t)}$$

Para uma Linha de transmissão sem perdas a equação acima se resume a:

$$-\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial x} = C\frac{\partial V_{(x,t)}}{\partial t}$$



Essas duas equações são conhecidas como equações da linha de transmissão sem perdas.

$$-\frac{\partial V_{(x,t)}}{\partial x} = L\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial x} = C\frac{\partial V_{(x,t)}}{\partial t}$$

aula anterior encontramos 2 equações diferencias de segunda ordem. Uma representa a propagação da onda de tensão, a outra representa a propagação da onda de corrente na linha sendo essas dadas em função dos parâmetros tempo e comprimento da linha.

- Para a tensão

$$\frac{\partial^2 V_{(x,t)}}{\partial x^2} = LC\frac{\partial^2 V_{(x,t)}}{\partial t^2} + (LG + RC)\frac{V_{(x,t)}}{\partial t} + RGV_{(x,t)} \tag{11}$$

- para a corrente

$$\frac{\partial^2 I_{(x,t)}}{\partial x^2} = LC\frac{\partial^2 I_{(x,t)}}{\partial t^2} + (LG + RC)\frac{I_{(x,t)}}{\partial t} + RGI_{(x,t)} \tag{12}$$

OBS: As ondas de tensão e corrente se propagam de forma idêntica.

$$\frac{\partial^2 V_{(x,t)}}{\partial x^2} = LC\frac{\partial^2 V_{(x,t)}}{\partial t^2} + (LG + RC)\frac{V_{(x,t)}}{\partial t} + RGV_{(x,t)}$$

$$\frac{\partial^2 I_{(x,t)}}{\partial x^2} = LC\frac{\partial^2 I_{(x,t)}}{\partial t^2} + (LG + RC)\frac{I_{(x,t)}}{\partial t} + RGI_{(x,t)}$$

Considerando agora o caso sem perdas($R = G = 0$), as equações acima se resumem a:

$$\frac{\partial^2 V_{(x,t)}}{\partial x^2} = LC\frac{\partial^2 V_{(x,t)}}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 I_{(x,t)}}{\partial x^2} = LC\frac{\partial^2 I_{(x,t)}}{\partial t^2}$$

Resumo Eq. LT sem perdas

$$-\frac{\partial V_{(x,t)}}{\partial x} = L\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial I_{(x,t)}}{\partial x} = C\frac{\partial V_{(x,t)}}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 V_{(x,t)}}{\partial x^2} = LC\frac{\partial^2 V_{(x,t)}}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 I_{(x,t)}}{\partial x^2} = LC\frac{\partial^2 I_{(x,t)}}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 V_{(x,t)}}{\partial x^2} = LC\frac{\partial^2 V_{(x,t)}}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 I_{(x,t)}}{\partial x^2} = LC\frac{\partial^2 I_{(x,t)}}{\partial t^2}$$

E definindo

$$v = 1\sqrt{LC}$$

Sendo V a velocidade de progação das ondas de corrente e tensão ao longo da linha.

Reorganizando as equações, temos:

$$\frac{\partial^2 V_{(x,t)}}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 V_{(x,t)}}{\partial t^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 I_{(x,t)}}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 I_{(x,t)}}{\partial t^2} = 0$$

Reorganizando as esquações encontramos um formato de representação conveniente. Temos duas EDO's homogêneas.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) V_{(x,t)} = 0 \tag{26}$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) I_{(x,t)} = 0 \tag{27}$$

De posse das EDO's homogênias podemos estimar um formato de equações que representam as ondas se propagando na linha

$$V(x,t) = f_1(x - vt) + f_2(x + vt) + f_0 \tag{28}$$

$$I(x,t) = g_1(x - vt) + g_2(x + vt) + g_0 \tag{29}$$

- As funções f_1 e g_1 de argumentos $(x - vt)$ representam ondas que se propagam no sentido positivo de x $(x+)$
- As funções f_2 e g_2 de argumentos $(x - vt)$ representam ondas que se propagam no sentido negativo de x $(x-)$
- As funções f_0 e g_0 independem das variáveis x et e representam termos constantes cc.

Solução da equação de onda para tensão-1

$$\frac{\partial^2 v(z,t)}{\partial z^2} = LC\,\frac{\partial^2 v(z,t)}{\partial t^2}$$

$$v(z,t) = v^{+}\left(t - \frac{z}{v_f}\right) + v^{-}\left(t + \frac{z}{v_f}\right)$$

$$v_f = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Velocidade de propagação da onda (velocidade de fase)

Solução da equação de onda para tensão-2

$$v(z,t) = \underbrace{v^{+}\left(t - \frac{z}{v_f}\right)}_{\text{Onda propagando na direção positiva de } z} + \underbrace{v^{-}\left(t + \frac{z}{v_f}\right)}_{\text{Onda propagando na direção negativa de } z}$$

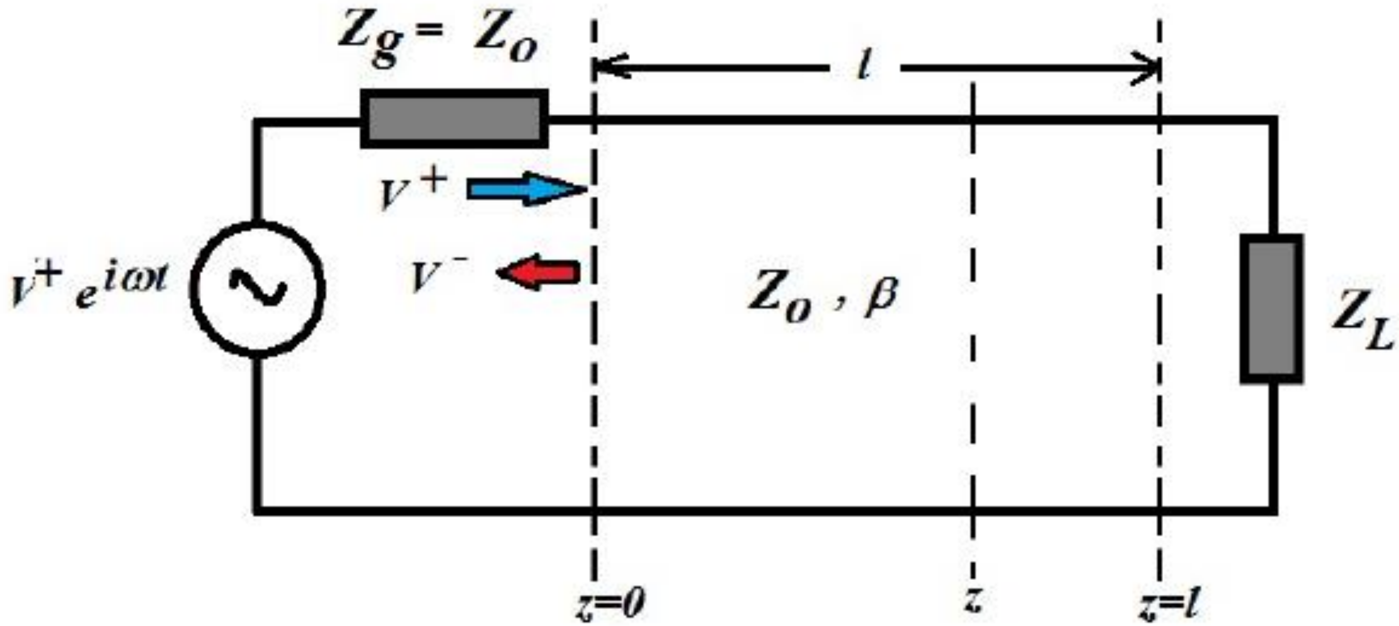


Figura 8: Linha de Transmissão Carregada com Carga Z_L. São parêmetros da linha o comprimento l, a impedância característica Z_0 e o valor de β na frequência de operação.

Solução da equação de onda

$$\frac{\partial^2 v(z,t)}{\partial z^2} = LC\,\frac{\partial^2 v(z,t)}{\partial t^2}$$

$$v(z,t) = V_0^+ \cos\ \omega t - k_z z + \phi^+ \ \ + V_0^- \cos\ \omega t + k_z z + \phi^-$$

$$v^+(z,t) = V_0^+ \cos\ \omega t - k_z z + \phi^+$$

Onda propagando na direção positiva de *z*

$$v^-(z,t) = V_0^- \cos\ \omega t + k_z z + \phi^-$$

Onda propagando na direção negativa de *z*

Representação complexa-1

$$v^+(z,t) = V_0^+ \cos\ \omega t - k_z z + \phi^+$$

$$v^+(z,t) = \mathrm{Re}\ \ V_0^+ \exp\ \ -jk_z z\ \ \exp\ \ j\phi^+\ \ \exp\ \ j\omega t$$

$$v^+(z,t) = \mathrm{Re}\ \ V_0^+ \exp\Big[j\ \ \omega t - k_z z + \phi^+\ \ \Big]$$

$$v^+(z,t) = \mathrm{Re}\ \ V_0^+ \Big[\cos\ \omega t - k_z z + \phi^+\ \ + j\mathrm{sen}\ \ \omega t - k_z z + \phi^+\ \ \Big]$$

Representação complexa-2

$$v^+(z,t) = V_0^+ \cos\ \omega t - k_z z + \phi^+$$

$$v^+(z,t) = \mathrm{Re}\ \underbrace{\underbrace{V_0^+ \exp\ -jk_z z\ \exp\ \phi^+}_{\text{fasor}}\ \exp\ j\omega t}_{\text{Representação complexa}}$$

$\Rightarrow$ A solução das equações em regime harmônico toma a forma a seguir:

$$V(z,t) = \left[V_0^+ e^{-i\beta z} + V_0^- e^{i\beta z}\right] e^{i\omega t} \tag{9}$$

$$I(z,t) = \frac{1}{Z_0}\left[V_0^+ e^{-i\beta z} - V_0^- e^{i\beta z}\right] e^{i\omega t} \tag{10}$$

onde V_0^+ é a amplitude da onda propagante (do gerador para a carga) na linha e V_0^- a amplitude da onda refletida pela carga(propaga-se de volta ao gerador), na frequência angular ω. Para linhas sem perdas temos:

$$\beta = \omega\sqrt{LC} = \frac{\omega}{v} \text{ e } Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{11}$$

onde β [rad/m] é a constante de propagação na linha e Z_0 a impedância característica da linha (não confundir com impedância do vácuo).

- A constante β se relaciona ao comprimento de ondas λ por:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}\,. \tag{12}$$

Coeficiente de Reflexão Γ

$\Rightarrow$ Em microondas é a medida mais usual, sendo a razão entre a amplitude da onda refletida e da onda propagante em um ponto da linha, definida como:

$$\Gamma(z) = \frac{V_0^- e^{i\beta z}}{V_0^+ e^{-i\beta z}} = \Gamma_0 e^{2i\beta z} \tag{13}$$

onde

$$\Gamma_0 = \Gamma(z=0) = \frac{V_0^-}{V_0^+}$$

.

$\Rightarrow$ Para linhas sem perdas o módulo do coeficiente de reflexão permanece constante ao longo da linha ao passo que a sua fase varia.

$\Rightarrow$ Podemos escrever V e I em termos de Γ, conforme segue:

$$V(z) = V_0^+ e^{i(\omega t - \beta z)}[1 + \Gamma(z)] \tag{14}$$

$$I(z) = \frac{1}{Z_0} V_0^+ e^{i(\omega t - \beta z)}[1 - \Gamma(z)] \tag{15}$$

Impedância de Entrada

⇒ É a impedância medida em algum ponto da linha e define-se como:

$$Z_{in}(z,t) = \frac{V(z,t)}{I(z,t)} \ .$$

Utilizando as equações (14) e (15) obtemos facilmente:

$$Z_{in}(z) = Z_0 \frac{1+\Gamma(z)}{1-\Gamma(z)} \tag{16}$$

• Pode-se facilmente inverter a equação acima para obter:

$$\Gamma(z) = \frac{Z_{in}(z) - Z_0}{Z_{in}(z) + Z_0} \tag{17}$$

⇒ O valor de Γ_0 é dependente do valor de carga Z_L conectada em $z = l$:

$$\Gamma(l) = \Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \tag{18}$$

onde Z_0 é a impedância característica da linha.

Aproximação para a impedância característica

$\omega \,/\, 2\pi > 100$ kHz

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

$$\omega L \gg R$$

$$\omega C \gg G$$

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

$\omega \,/\, 2\pi \simeq 1$ kHz

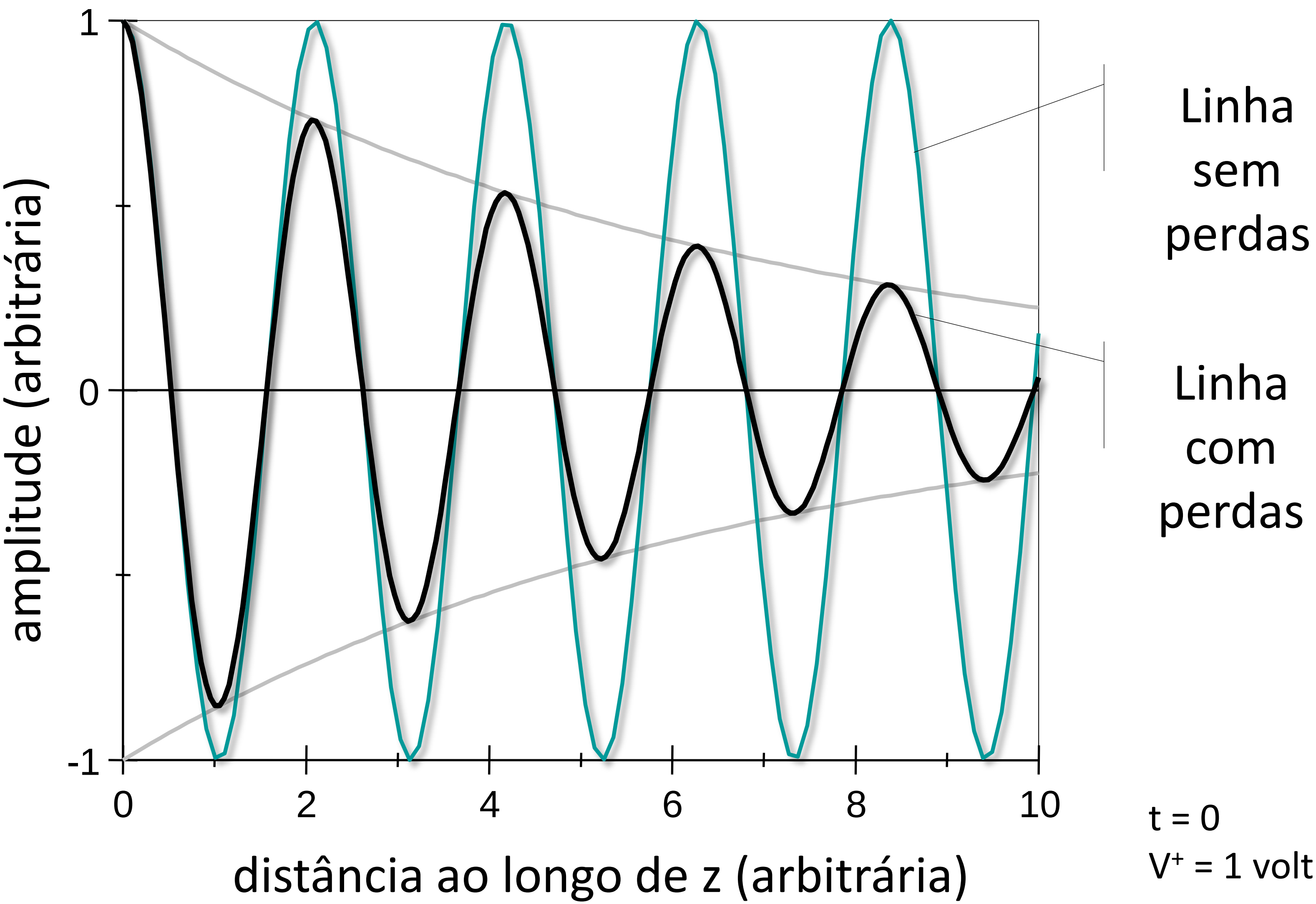
$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

$$\omega L \ll R$$

$$\omega C \ll G$$

$$Z_0 \approx \sqrt{\frac{R}{G}}$$

Solução das equações de onda-3



t = 0

V^+ = 1 volt

Índice

- A Carta de Smith
- Coeficiente de reflexão e impedância
- Impedância na Carta de Smith
- Admitância na Carta de Smith
- Relação de onda estacionária na Carta de Smith