

IT 002 – SOBRETENSÕES EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Aula-02

Simulação de Linhas de Transmissão no ATP

Prof. Dr. José Pissolato Filho

Anderson Ricardo Justo de Araújo

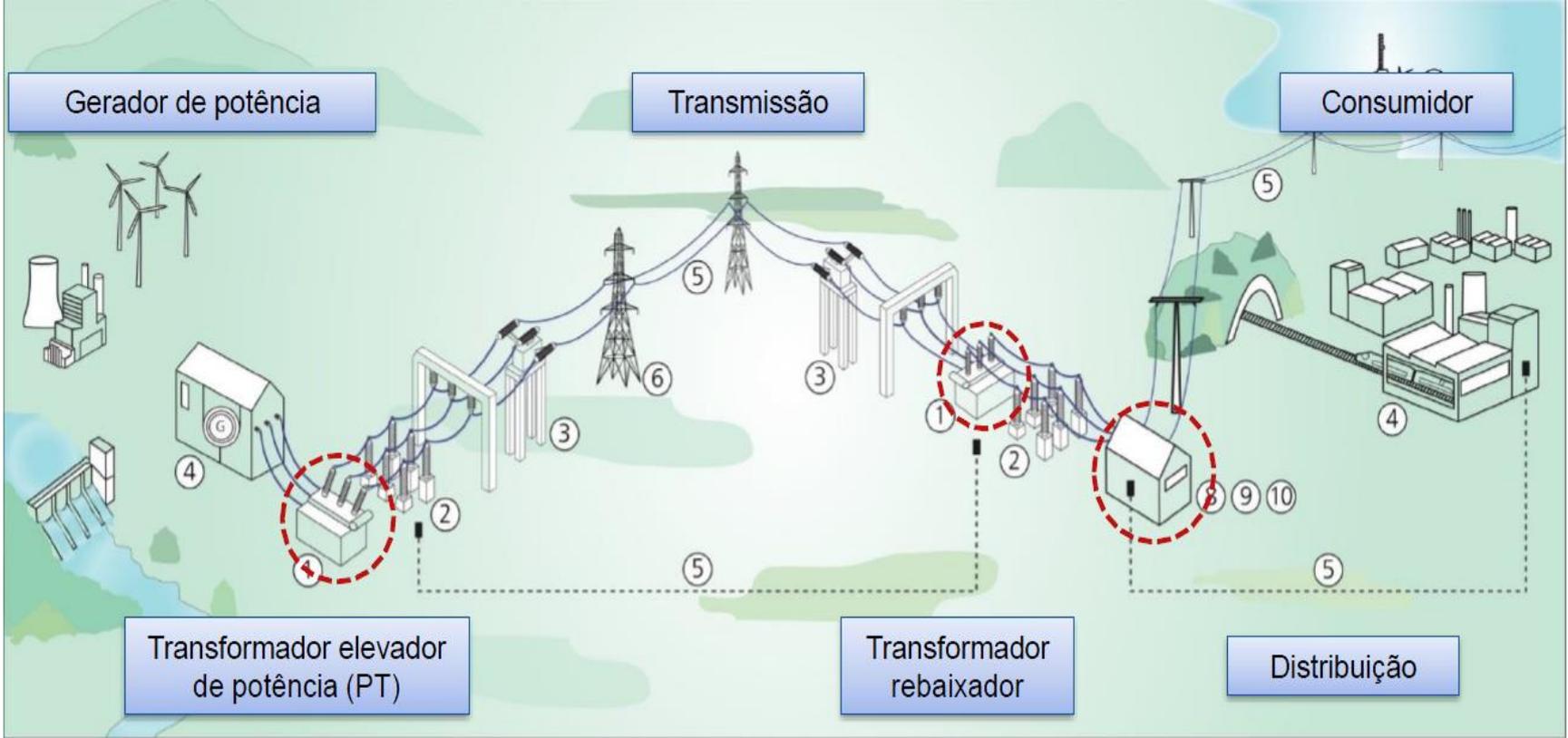
Jaimis Sajid Leon Colqui

Setembro 2022

Objetivos

- ❑ Simulação de Linhas de Transmissão no ATP

Introdução aos Transitórios Eletromagnéticos no SEP



O que é um transitório eletromagnético (TEM)?

Um transitório eletromagnético é uma manifestação ou resposta elétrica local ou adjacente ocasionada por alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema elétrico (SE);

Os SEs estão sujeitos a diversos fenômenos transitórios que compreendem desde variações eletromecânicas, caracterizados por baixas frequências, até as variações abruptas das tensões e correntes causadas por mudanças bruscas nas condições do estado de equilíbrio ¹.

Energização de um banco de 600 kVAr na tensão de 13,8 kV.

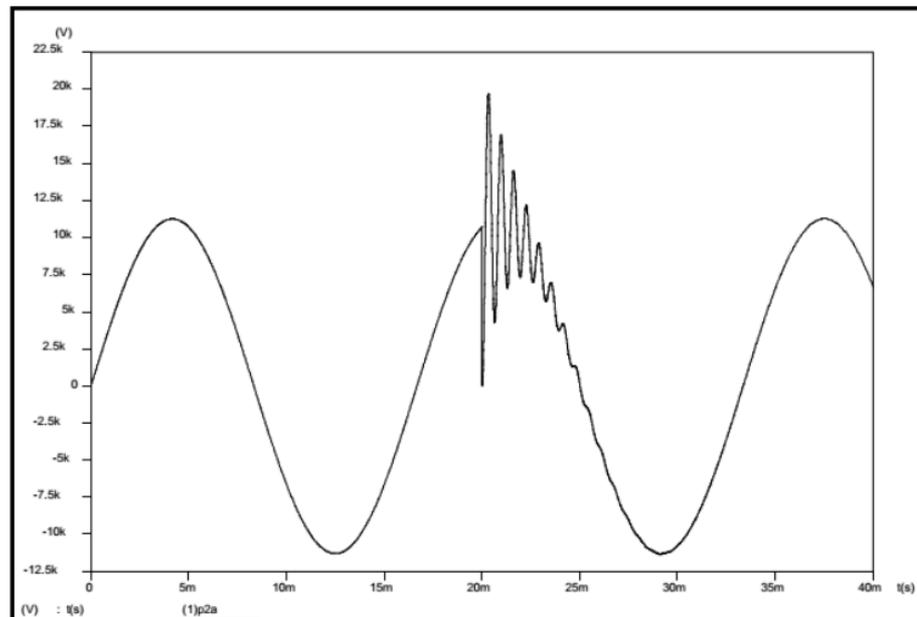
Estado 1
(Regime Permanente)

Distúrbio Elétrico

TEM



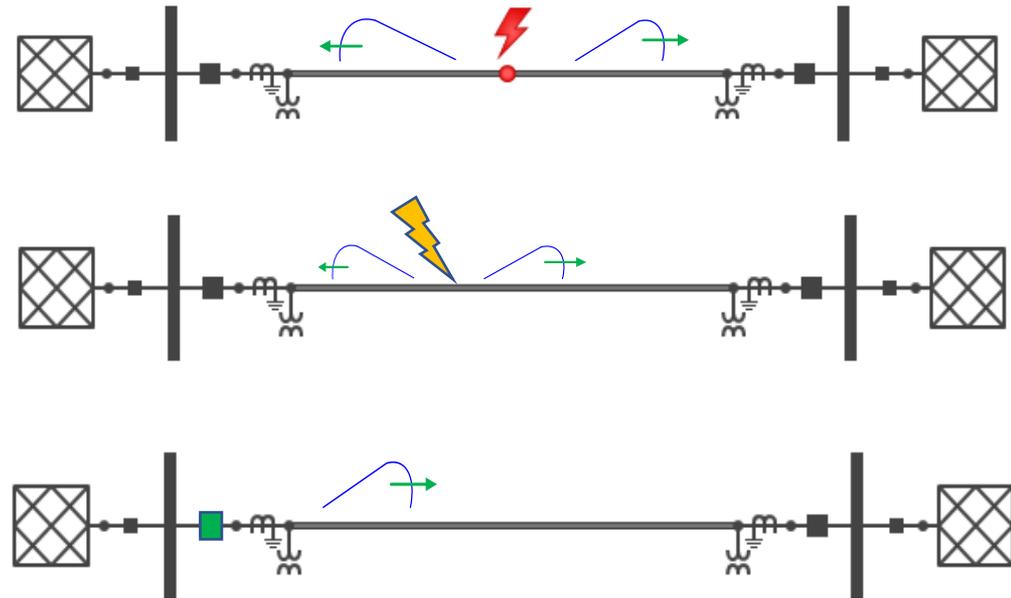
Estado 2
(Regime Permanente)



Introdução aos Transitórios Eletromagnéticos no SEP

❖ Fenômenos que originam os transitórios

- ❑ Falta na Linha de Transmissão
- ❑ Descargas atmosféricas
- ❑ Energização da Linha de Transmissão
- ❑ Energização de reator de potência
- ❑ Energizar um transformador de potência



Introdução aos Transitórios Eletromagnéticos no SEP

❖ Classificação dos fenômenos transitórios

Transitórios rápidos

Transitórios eletromagnéticos

Faixa de tempo [1 μ s – 0.1 s]

- Descargas atmosféricas
- Sobretensões de manobra
- Faltas

Transitórios de media duração

Transitórios eletromecânicos

Faixa de tempo [0.1 s – 10 s]

- Estabilidade transitória
- Ressonância subsíncrona
- Arranque de motores

Transitórios de longa duração

Fenômenos dinâmicos

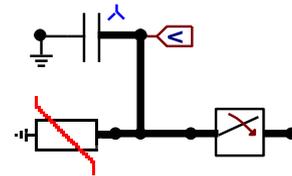
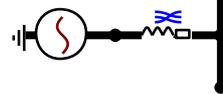
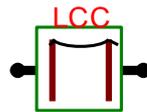
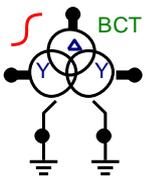
Faixa de tempo [0.5 s – min]

- Estabilidade dinâmica
- Controle de frequência
- Regulação de linhas

Instalação e uso do ATP/EMTP

❖ Vantagens do ATPDraw

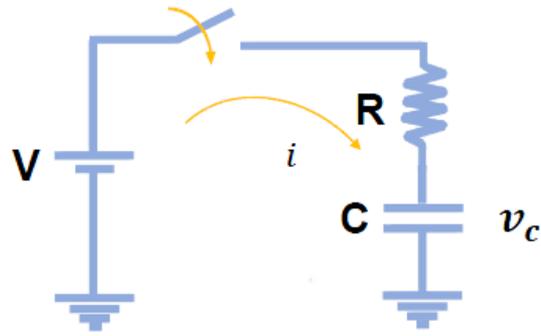
- ❑ É gratuito
- ❑ Ambiente de trabalho amigável.
- ❑ Integra todos os programas necessários para realizar uma simulação.
- ❑ Contém ajuda em janelas para a utilização dos diversos modelos.
- ❑ Integra varias rotinas auxiliares, facilitando seu uso
- ❑ Permite incorporar modelos de usuários



Exemplos -Simulação de circuitos elétricos RC, RL, LC e RLC

❖ Exemplo 1: Circuito Elétrico R-C

❑ Circuito básico



❑ O que sabemos?

$$V - v_c = R i$$

$$i = C \frac{dv_c}{dt}$$

❑ Desenvolvimento

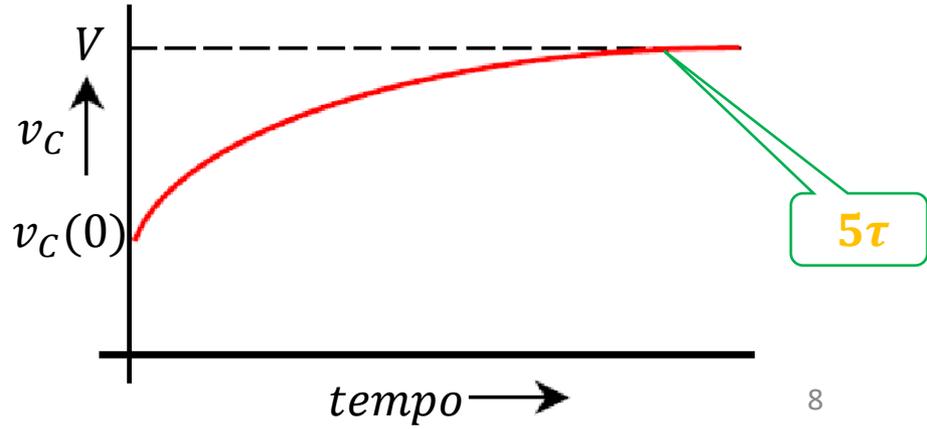
$$V - v_c = RC \frac{dv_c}{dt} \quad \longrightarrow \quad \int \frac{dv_c}{V - v_c} = \int \frac{1}{RC} dt$$

$$v_c(t) = V - Ae^{-t/RC} \quad v_c(t = 0) = V - A$$

$$v_c(t) = V - [V - v_c(0)]e^{-t/RC}$$

$$i(t) = \frac{1}{R} [V - v_c(0)]e^{-t/RC}$$

$$\tau = RC$$

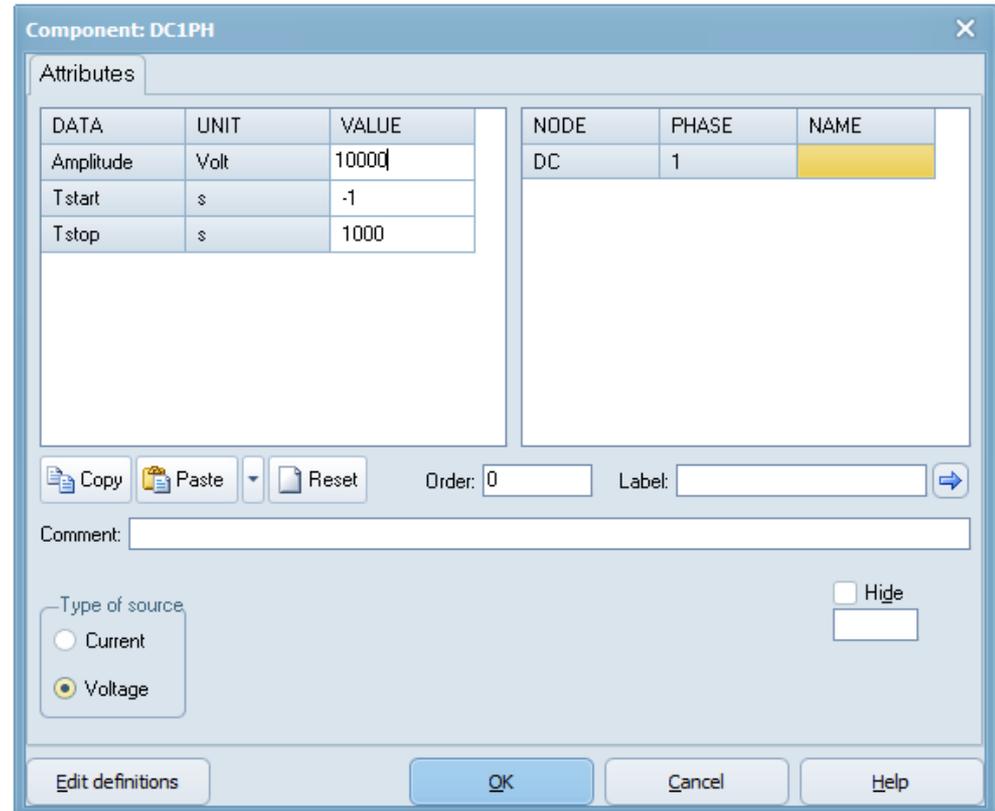
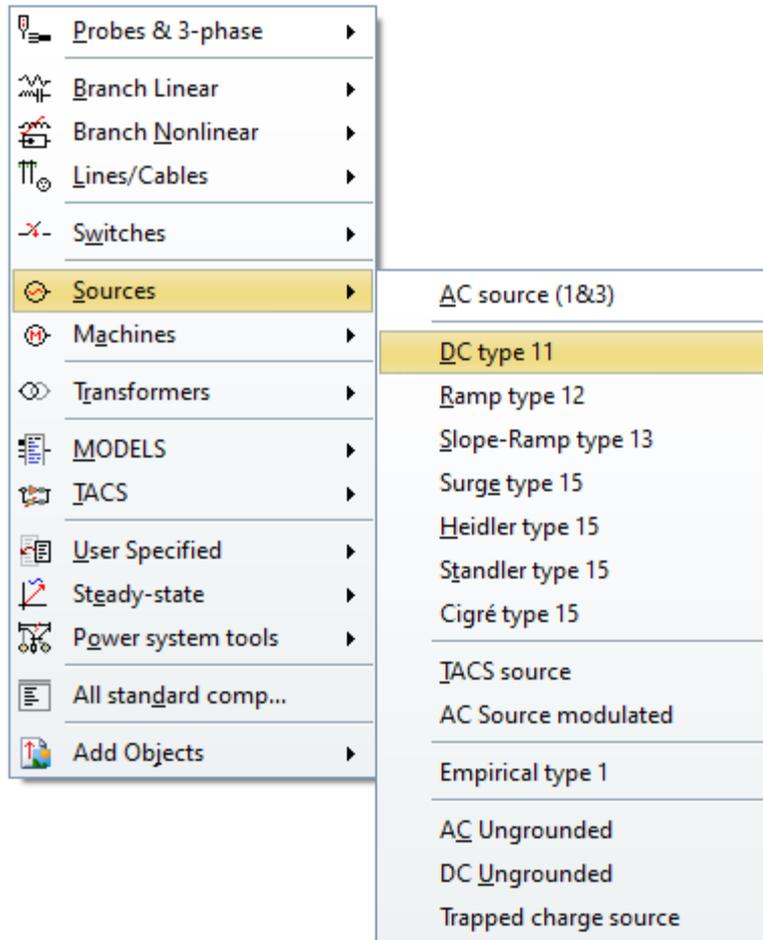


Construção do circuito

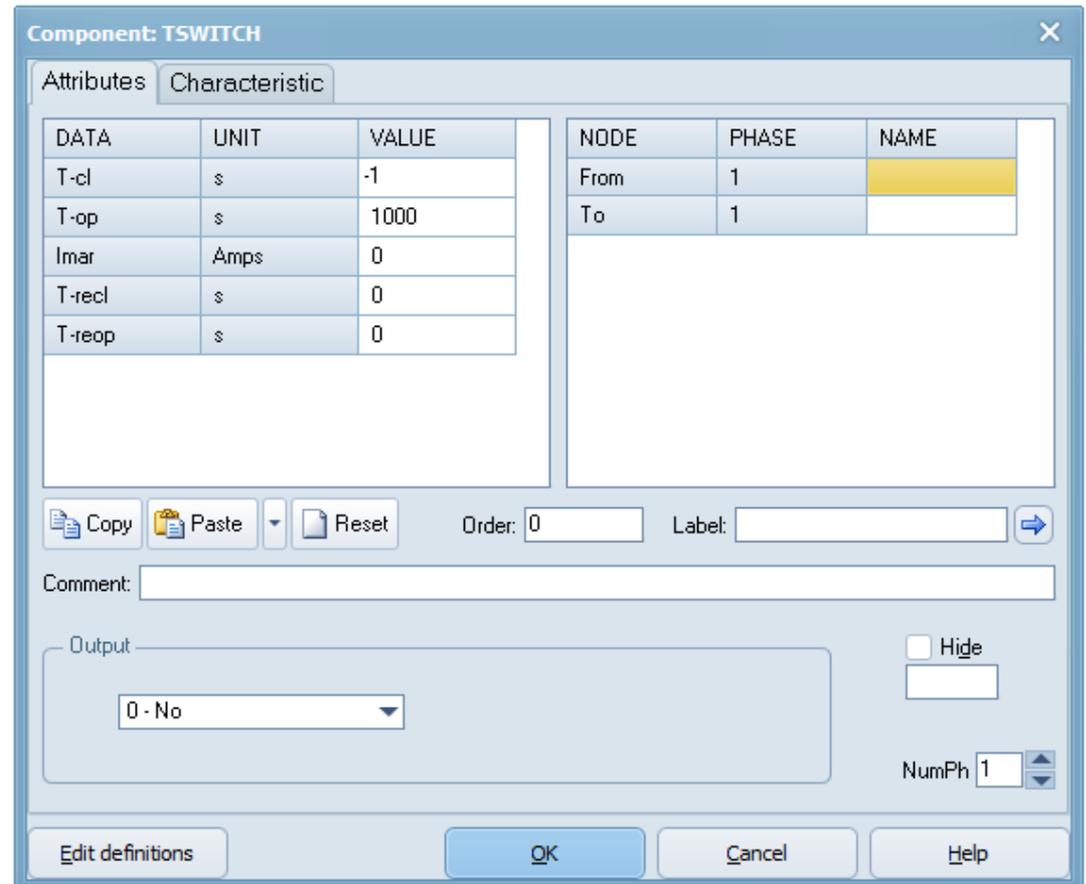
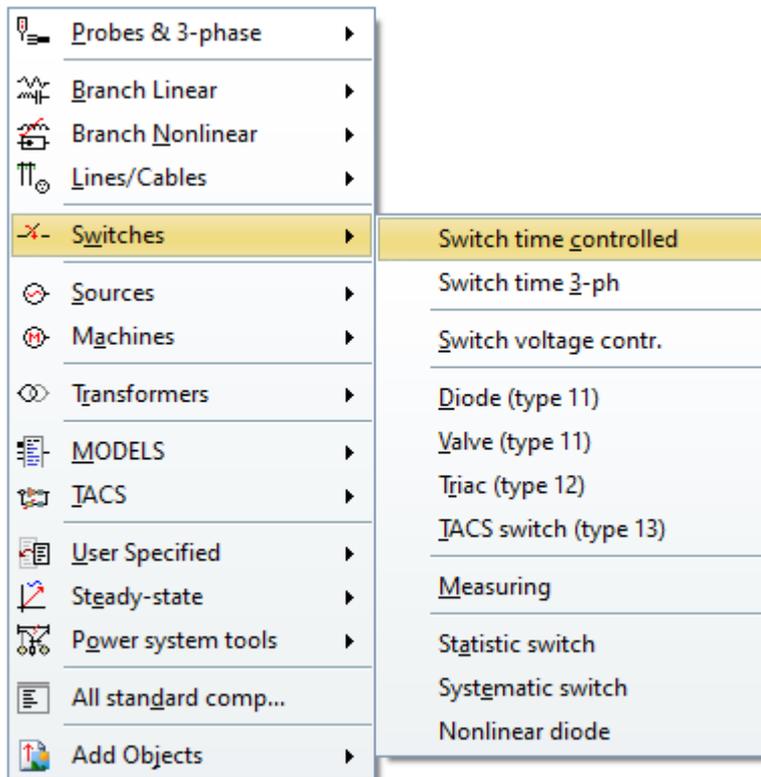
The image shows the ATPDraw software interface. The main window has a menu bar with File, Edit, View, ATP, Library, Tools, Windows, Web, and Help. A blue circle highlights the 'View' menu, and a blue arrow points to a smaller inset window showing the 'View' menu open. The 'View' menu includes options: Status Bar, Side Bar, Tool Bar, Zoom in (Num +), Zoom out (Num -), Centre circuit, Lock circuit, Refresh (Ctrl+Q), Set Circuit Font, and View Options... A blue arrow points from the 'View' menu to a callout box on the right. The callout box contains the text: 'Click com botão direito para buscar cada elemento de circuito'. The left sidebar contains simulation settings such as Simulation type (Time domain, Frequency scan, Harmonic (HFS)), delta T, Tmax, Xopt, Copt, Epsilon, Frequency, and checkboxes for Auto-detect ATP errors, Sorting by order, UM Automatic initialization, and UM Prediction method. A table at the bottom left shows columns for NAME and EXPRESSION.

Click com botão direito para buscar cada elemento de circuito

Fonte de tensão



Chave (Switch)



Resistor

The screenshot shows a software menu with the following items:

- Probes & 3-phase
- Branch Linear** (selected)
 - Resistor** (selected)
 - Capacitor
 - Inductor
 - RLC
 - R inf
- Branch Nonlinear
- Lines/Cables
- Switches
- Sources
- Machines
- Transformers
- MODELS
- IACS
- User Specified
- Steady-state
- Power system tools
- All standard comp...
- Add Objects

Component: RESISTOR

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R	Ohm	1000

NODE	PHASE	NAME
From	1	
To	1	

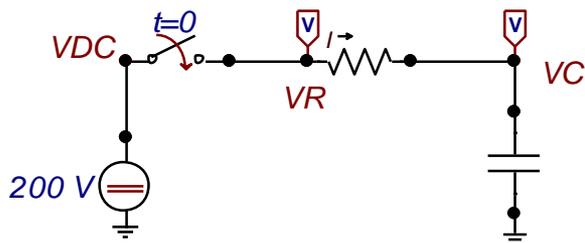
Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

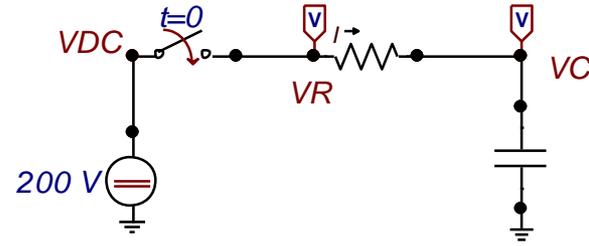
Output:

Hide
 \$Vintage.1
NumPh 1

Edit definitions OK Cancel Help



Capacitor



Probes & 3-phase

- Branch Linear
- Branch Nonlinear
- Lines/Cables
- Switches
- Sources
- Machines
- Transformers
- MODELS
- IACS
- User Specified
- Steady-state
- Power system tools
- All standard comp...
- Add Objects

Resistor

Capacitor

Inductor

RLC

R inf

PQU

Kizilcay F-Dependent

RLC 3-ph

RLC-Y 3-ph

RLC-D 3-ph

C: $U(0)$

L: $I(0)$

Component: CAP_RS

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
C	μF	1	From	1	
Ks	Damp 0.1-0.2	0	To	1	

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output:

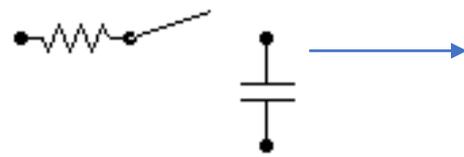
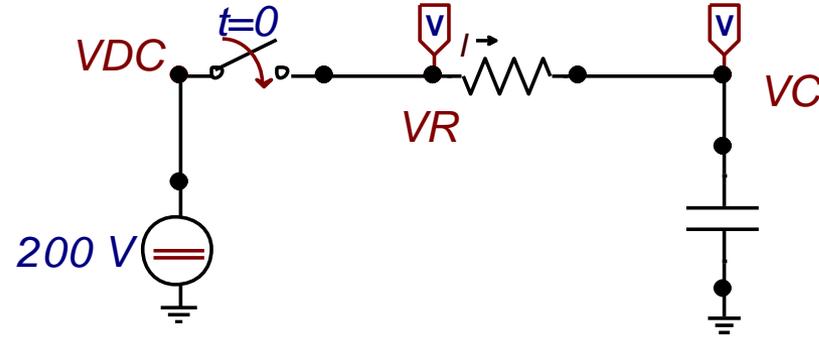
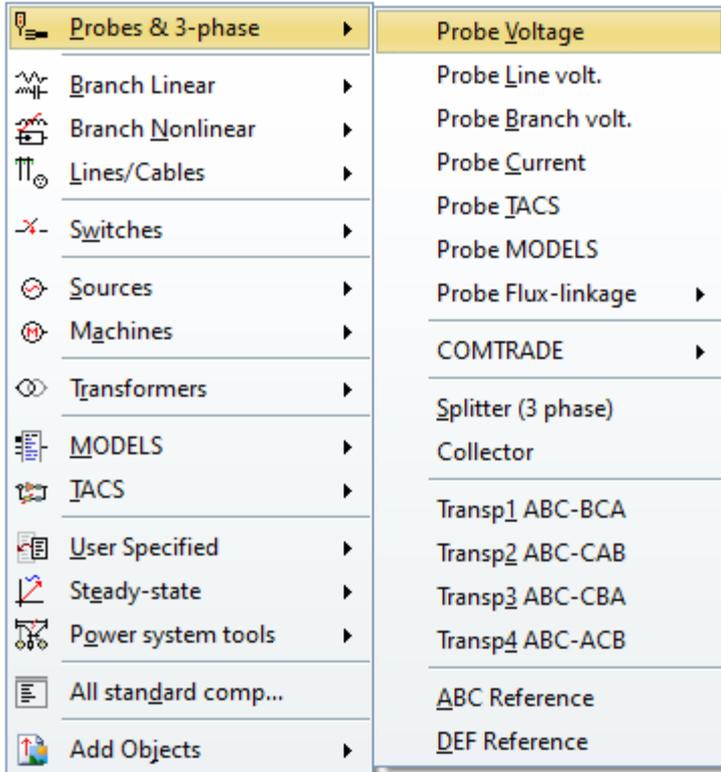
Hide

\$Vintage.1

NumPh 1

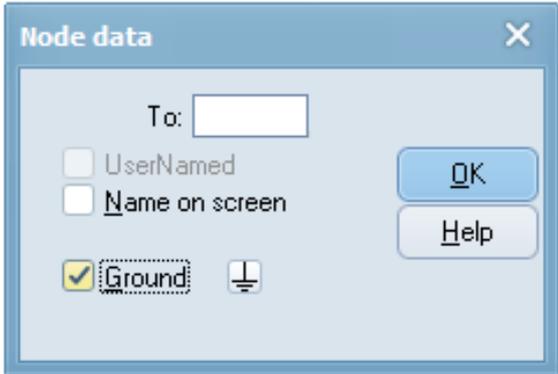
Edit definitions OK Cancel Help

Voltímetro/Amperímetro

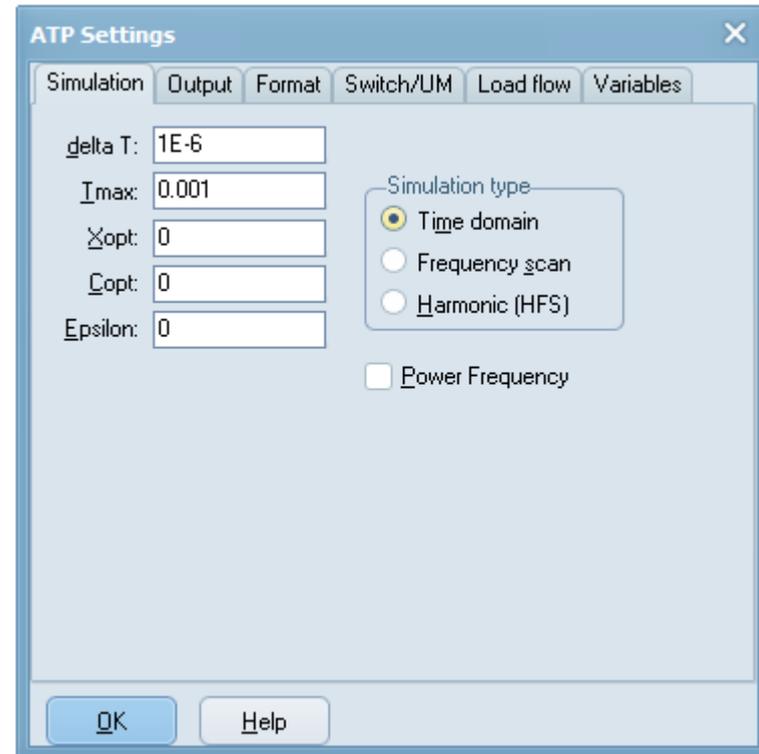
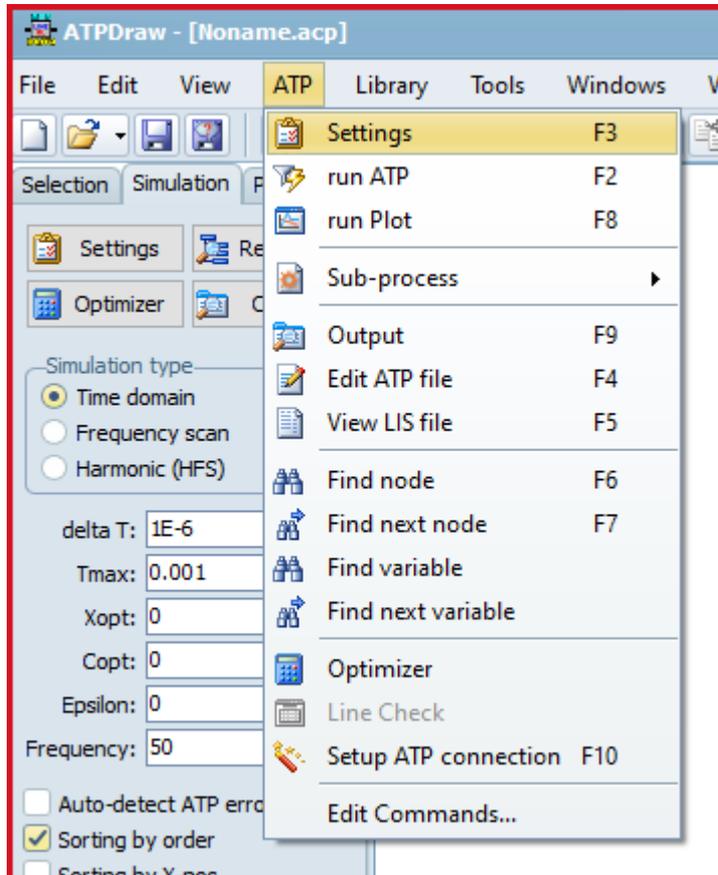


Conexão-Clicar em um terminal do componente e arrastar até terminal subsequente

Clicar no terminal e escolher Ground



Tempo de Simulação



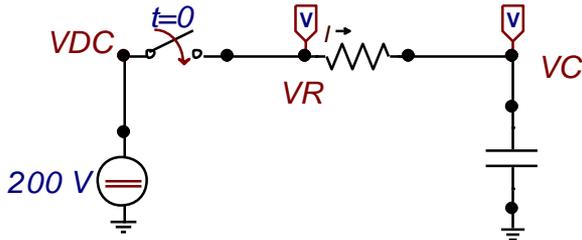
Simulação de circuitos elétricos RC, RL, LC e RLC

❖ Exemplo 1: Circuito Elétrico R-C

❑ Dados do circuito

- $R = 100 \text{ ohm}$
- $C = 1000 \text{ uF}$
- $v_c(0) = 0 \text{ V}$
- $V = 200 \text{ V}$

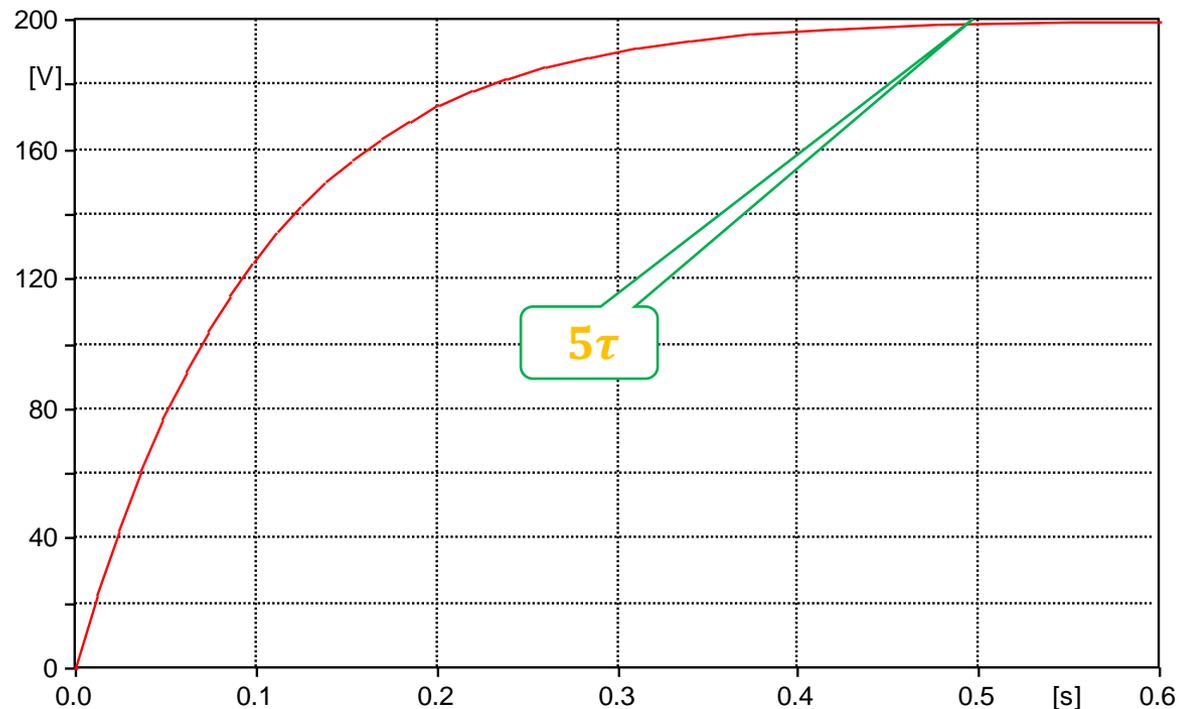
$$\tau = RC = 0.1 \text{ s}$$



$$\Delta T = 1E-5$$
$$T_{\text{max}} = 0.6$$

$$v_c(t) = V - [V - v_c(0)]e^{-t/RC}$$

$$v_c(t) = 200 - 200e^{-10t}$$



(file Exercise_01_RC_Circuit_Start.pl4; x-var t) v:VC

Tensão no condensador

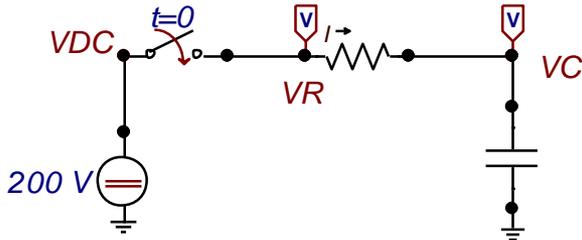
Simulação de circuitos elétricos RC, RL, LC e RLC

❖ Exemplo 1: Circuito Elétrico R-C

❑ Dados do circuito

- $R = 100 \text{ ohm}$
- $C = 1000 \text{ uF}$
- $v_c(0) = 0 \text{ V}$
- $V = 200 \text{ V}$

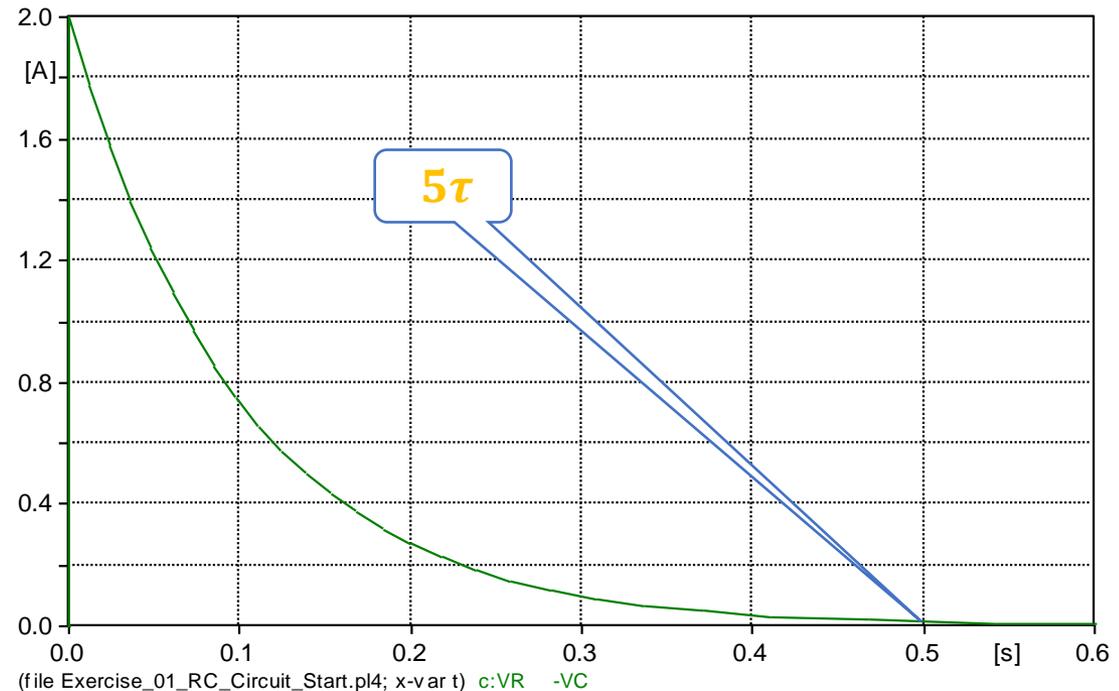
$$\tau = RC = 0.1 \text{ s}$$



$$\Delta T = 1\text{E-}5$$
$$T_{\text{max}} = 0.6$$

$$i(t) = \frac{1}{R} [V - v_c(0)] e^{-t/RC}$$

$$i(t) = 2e^{-10t}$$



Corrente no condensador

ATPDraw - [Noname 1]

File Edit View **ATP** Library Tools Windows Web

Settings F3
Run ATP F2
run Plot F8

MC's PlotXY - Data selection

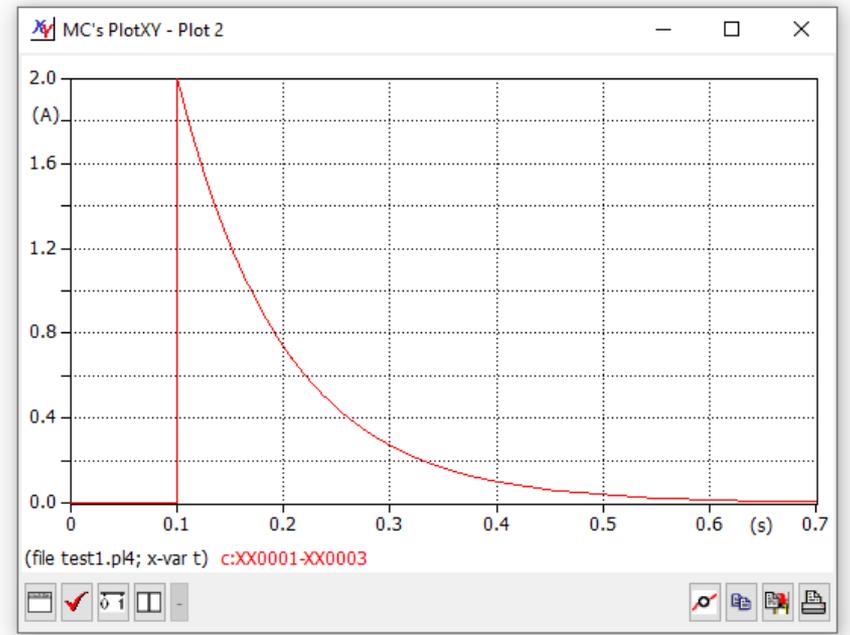
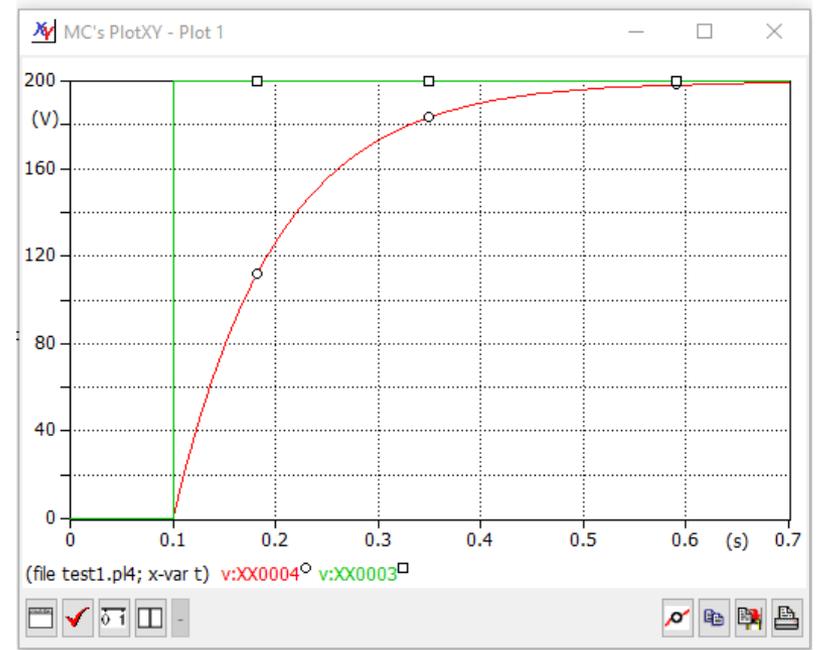
Load... Refresh

f	FileName	# of vars	# of Points	Tmax
x 1	test1.pl4	4	700001	0.7

1 t
2 v:XX0003
3 v:XX0004
4 c:XX0001-XX0003

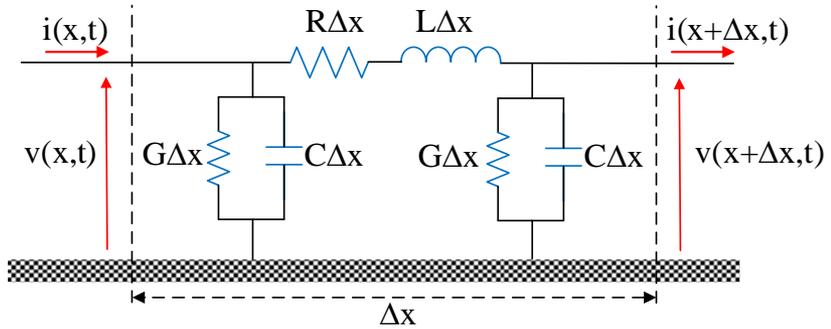
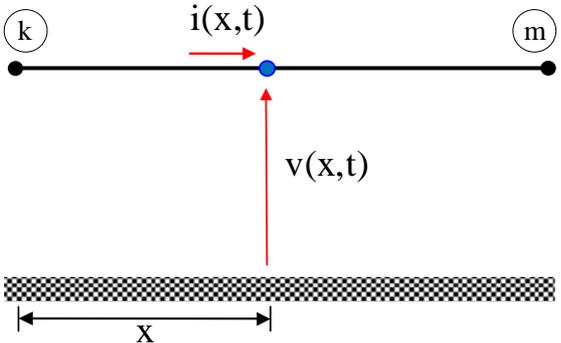
plot1	plot2	plot3	plot4
f #	Variable name		X
a 1	t		x

Fourier Plot
Save vars Reset
Equalise plot window sizes
 to Plot win 1 Equate
 to: Arrange



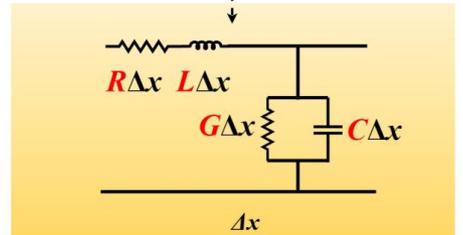
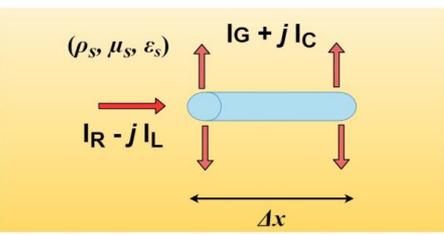
Revisão de linhas de transmissão.

❖ Linha de transmissão

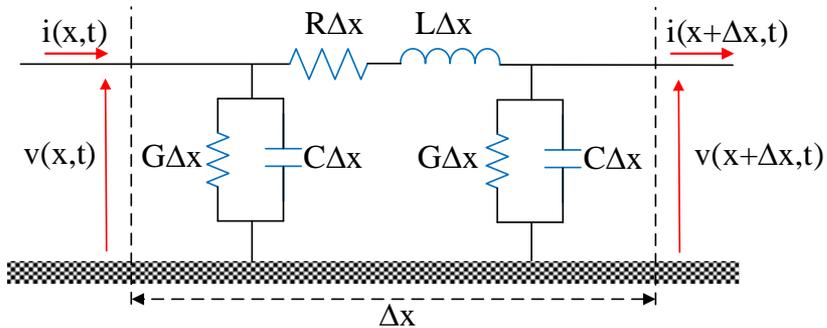


$$-\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = Ri(x,t) + L \frac{\partial i(x,t)}{\partial x}$$

$$-\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = Gv(x,t) + C \frac{\partial v(x,t)}{\partial x}$$



Revisão de linhas de transmissão.

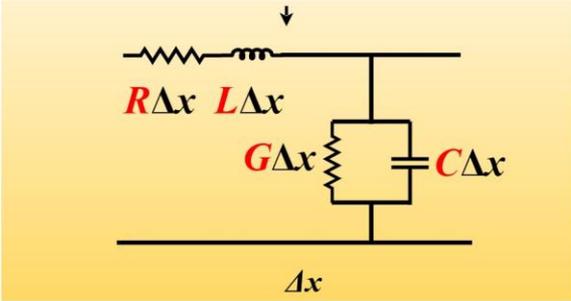
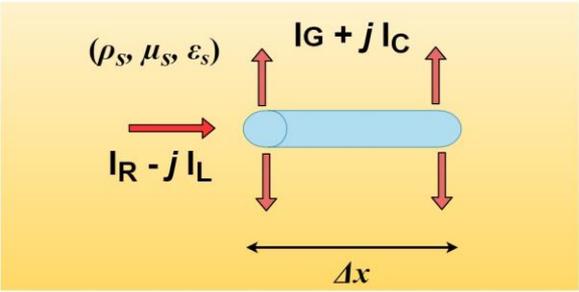
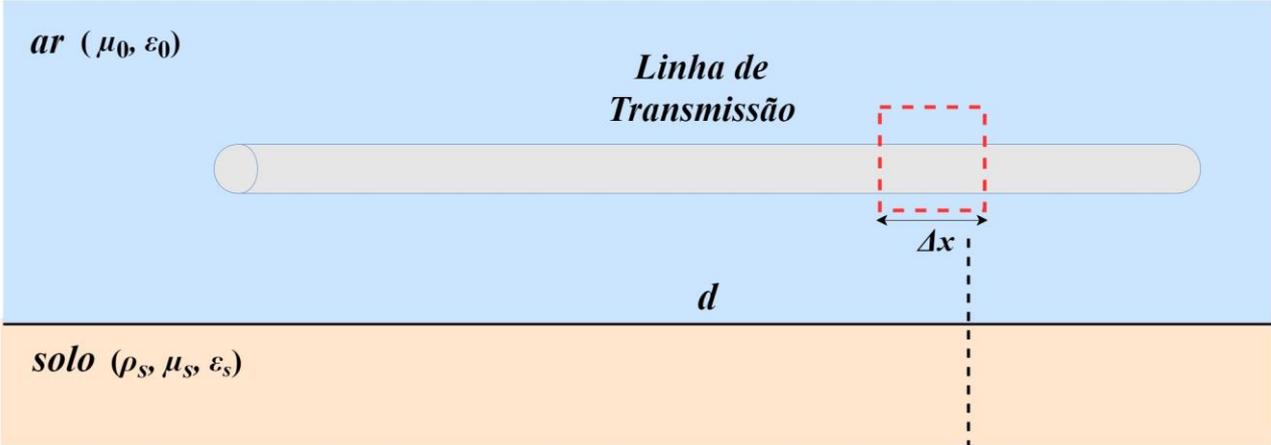


Modelo a parâmetros distribuído

As tensões e correntes se propagam entre os terminais de uma LT com uma dada velocidade (atraso). Dessa forma, as formas de ondas são afetadas pela impedância característica da LT, a velocidade de propagação e a carga conectada ao terminal receptor.

- ❑ Modelo que considera a velocidade de propagação das ondas
- ❑ É usado para estudos de transitórios nos quais uma frequência ou uma faixa de frequência seja de interesse.
 - Energização de Linhas meias e longas.
 - Análises de descargas atmosféricas
 - Faltas em Linhas de transmissão
 - Faltas em subestações

Linhas de transmissão.



Impedância característica

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

Velocidade de propagação

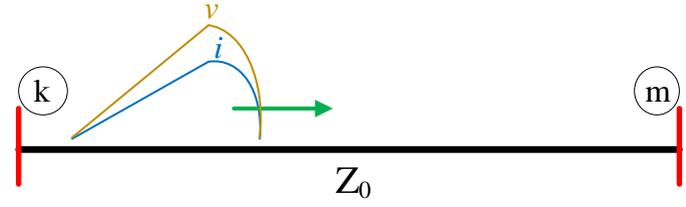
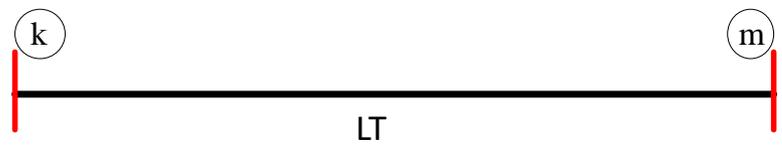
$$v = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Tempo de propagação

$$\tau = \frac{d}{v}$$

Linhas de transmissão.

❖ Linha de transmissão, propagação de ondas viajantes em uma linha ideal (sem perdas)



$$\frac{V}{i} = Z_0$$

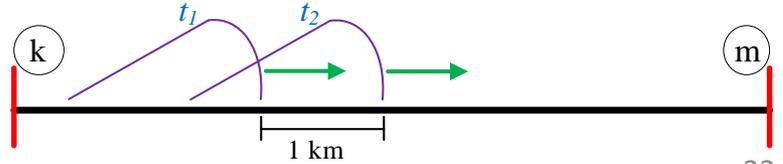
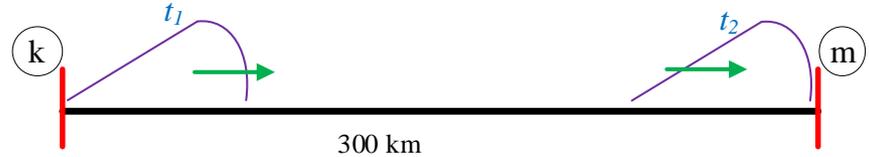
Onde:

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

Z₀ = 250 - 400 Ohm en Líneas aéreas.

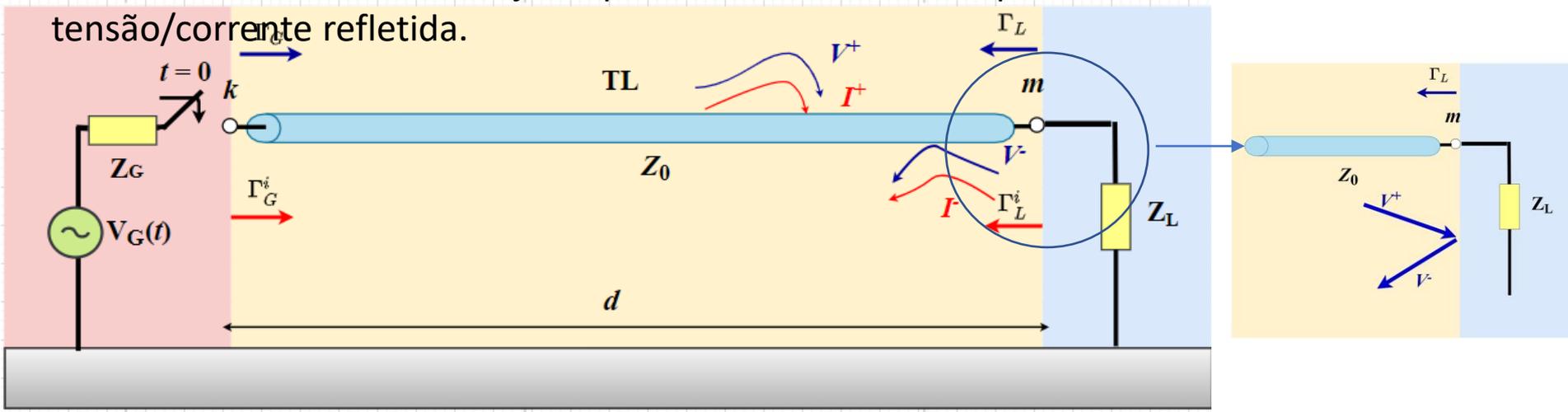
$$\text{Velocidad} = \sqrt{\frac{1}{LC}} = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}}$$

En Líneas aéreas: V = 300000 km/s o 300 km/ms o 3.34 us/km



Ondas Refletidas na LT e Diagrama de Lattice

Uma forma simples de ver as ondas refletidas é interpretar cada parte do circuito como um “meio” distinto, cuja impedância determinará a parcela de tensão/corrente refletida.



Coef. de reflexão para a tensão

$$\Gamma_L = \frac{V^-}{V^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

$$\Gamma_G = \frac{Z_G - Z_0}{Z_G + Z_0}$$

Coef. de reflexão para a corrente

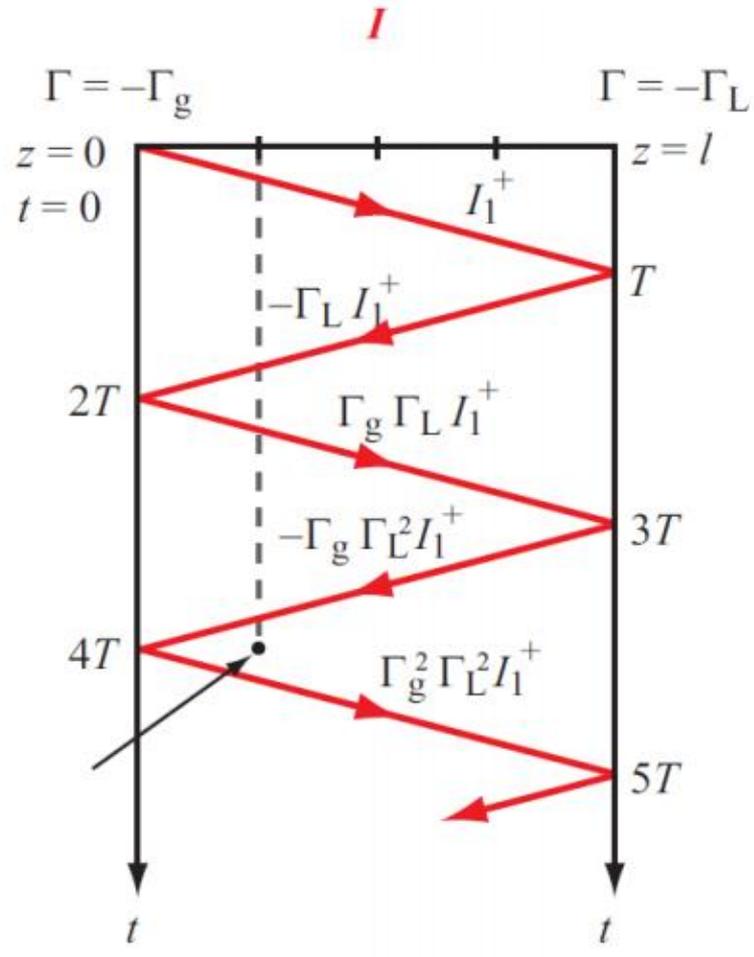
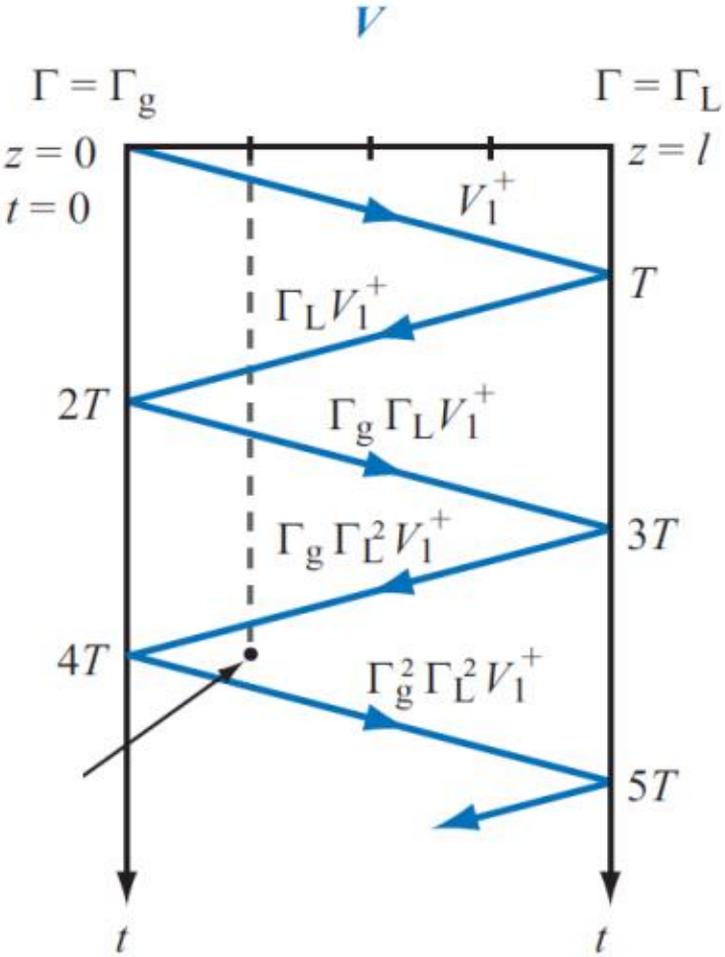
$$\Gamma_L^i = \frac{Z_0 - Z_L}{Z_L + Z_0} = -\Gamma_L$$

$$\Gamma_G^i = \frac{Z_0 - Z_G}{Z_G + Z_0} = -\Gamma_G$$

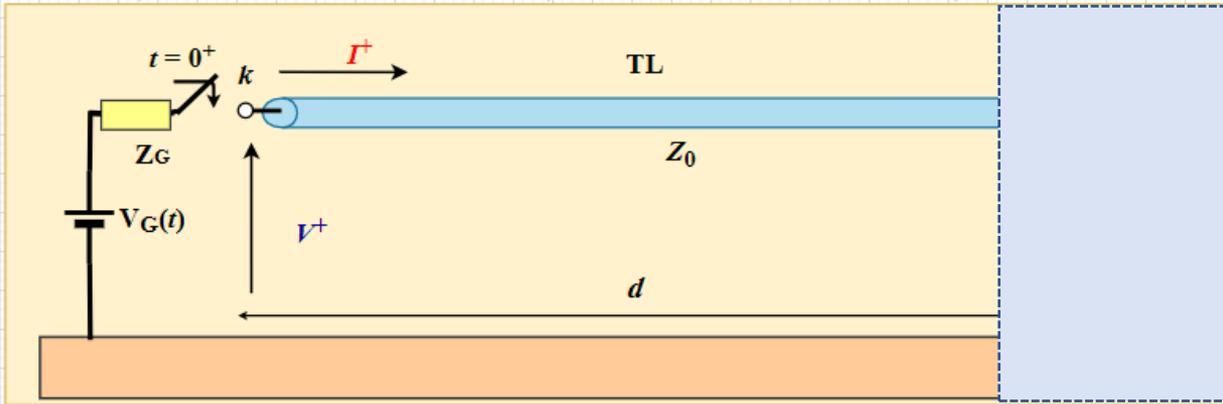
Coef. de transmissão tensão

$$\Gamma_t = \frac{2 * Z_L}{Z_L + Z_0}$$

Ondas Refletidas na LT e Diagrama de Lattice



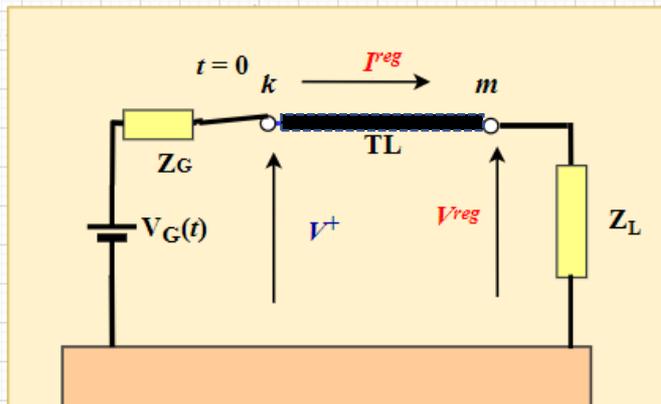
Valores iniciais e de regime



No transitório

$$I^+ = \frac{V_G}{Z_G + Z_0}$$

$$V^+ = \frac{Z_0}{Z_G + Z_0} V_G$$



No regime permanente

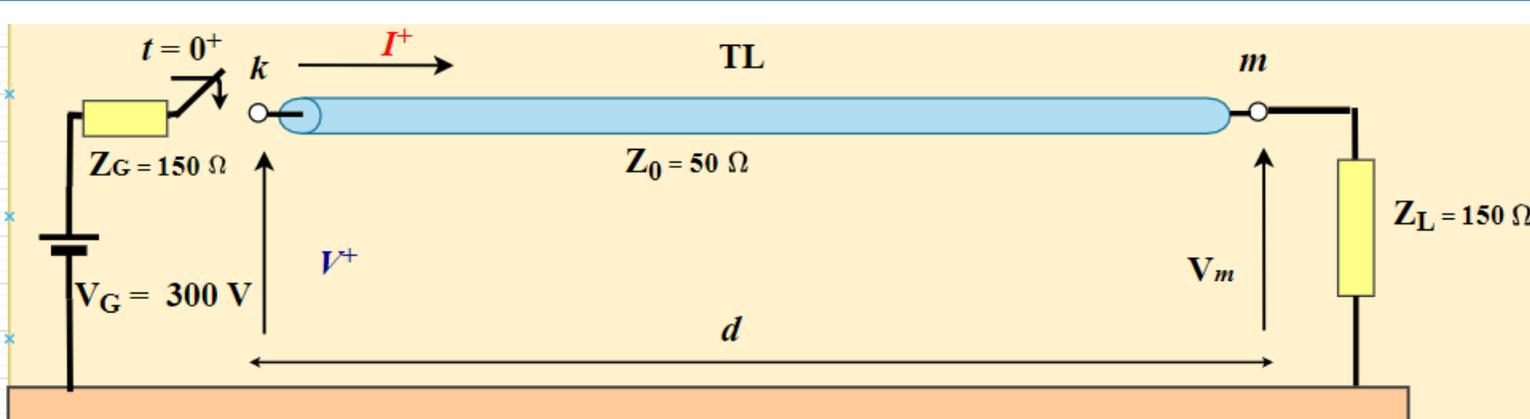
$$I^{reg} = \frac{V_G}{Z_G + Z_L}$$

$$V^{reg} = \frac{Z_L}{Z_G + Z_L} V_G$$

Lembrete: LT ideal
($R = G = 0$)

Se LT real, deve-se calcular a queda de tensão entre k e m

Exemplo 1- Exércicio da Aula 02



$$\Gamma_L = \frac{150 - 50}{150 + 50} = 0.5$$

$$I^+ = \frac{V_G}{Z_G + Z_0} = \frac{300}{150 + 50} = 1,50\text{ A}$$

$$\Gamma_G = \frac{150 - 50}{150 + 50} = 0.5$$

$$V^+ = \frac{Z_0}{Z_G + Z_0} V_G = \frac{50}{150 + 50} 300 = 75\text{ V}$$

Exemplo 1- Diagrama de Lattice (Tensão)

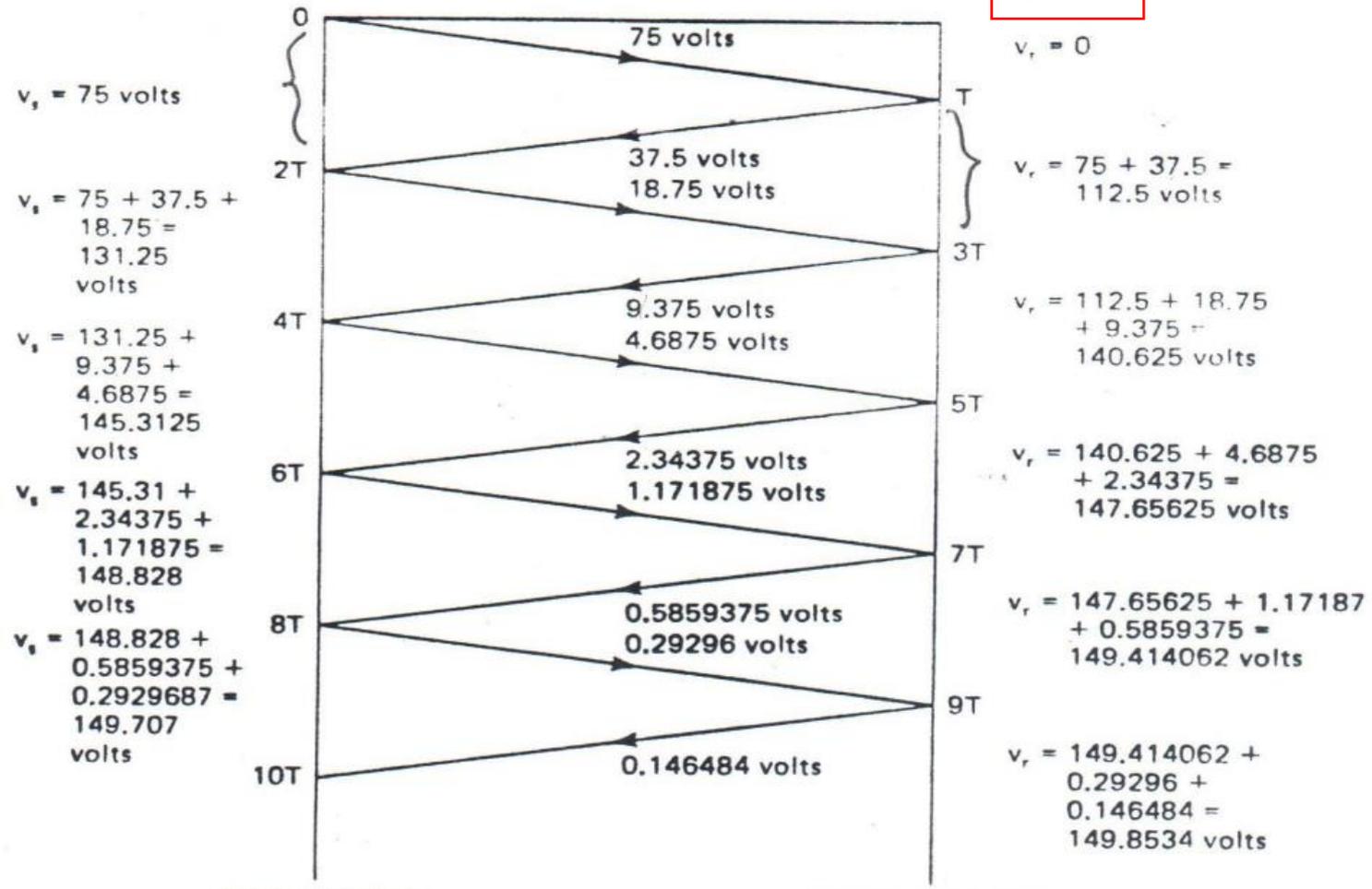
V_k

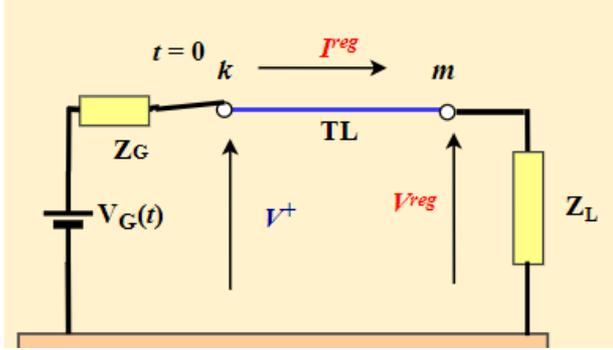
V_m

exemplo da aula anterior

$\Gamma_s = 0.5$

$\Gamma_r = 0.5$



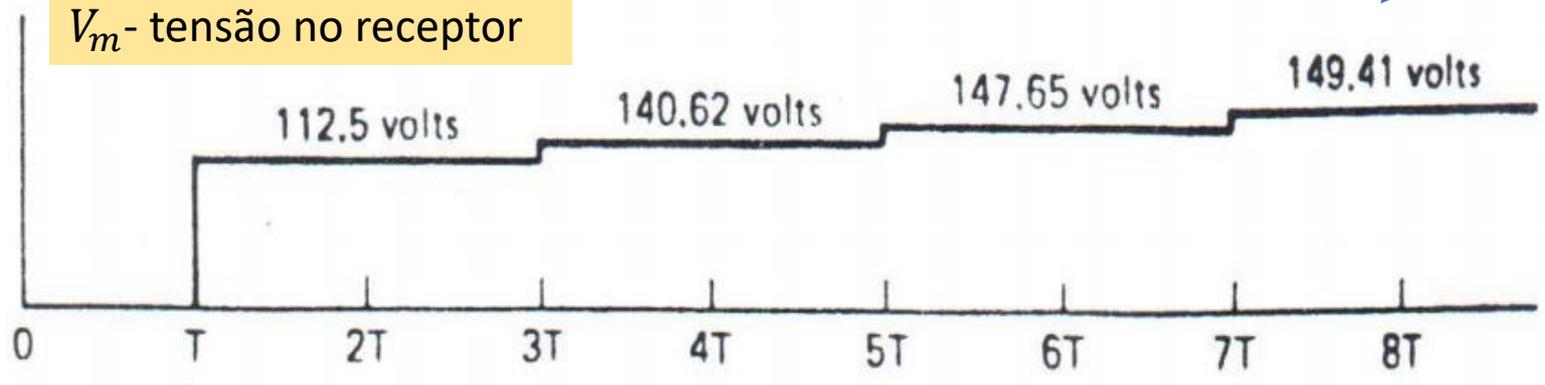


$$V^{reg} = \frac{Z_L}{Z_G + Z_L} V_G$$

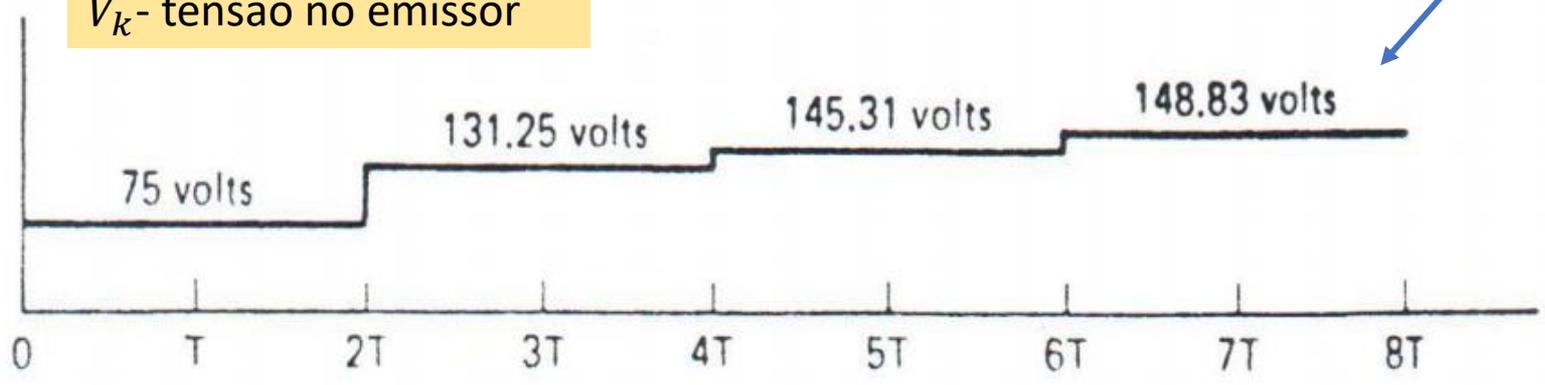
$$V^{reg} = \frac{150}{150 + 150} 300 = 150 \text{ V}$$



V_m - tensão no receptor



V_k - tensão no emissor



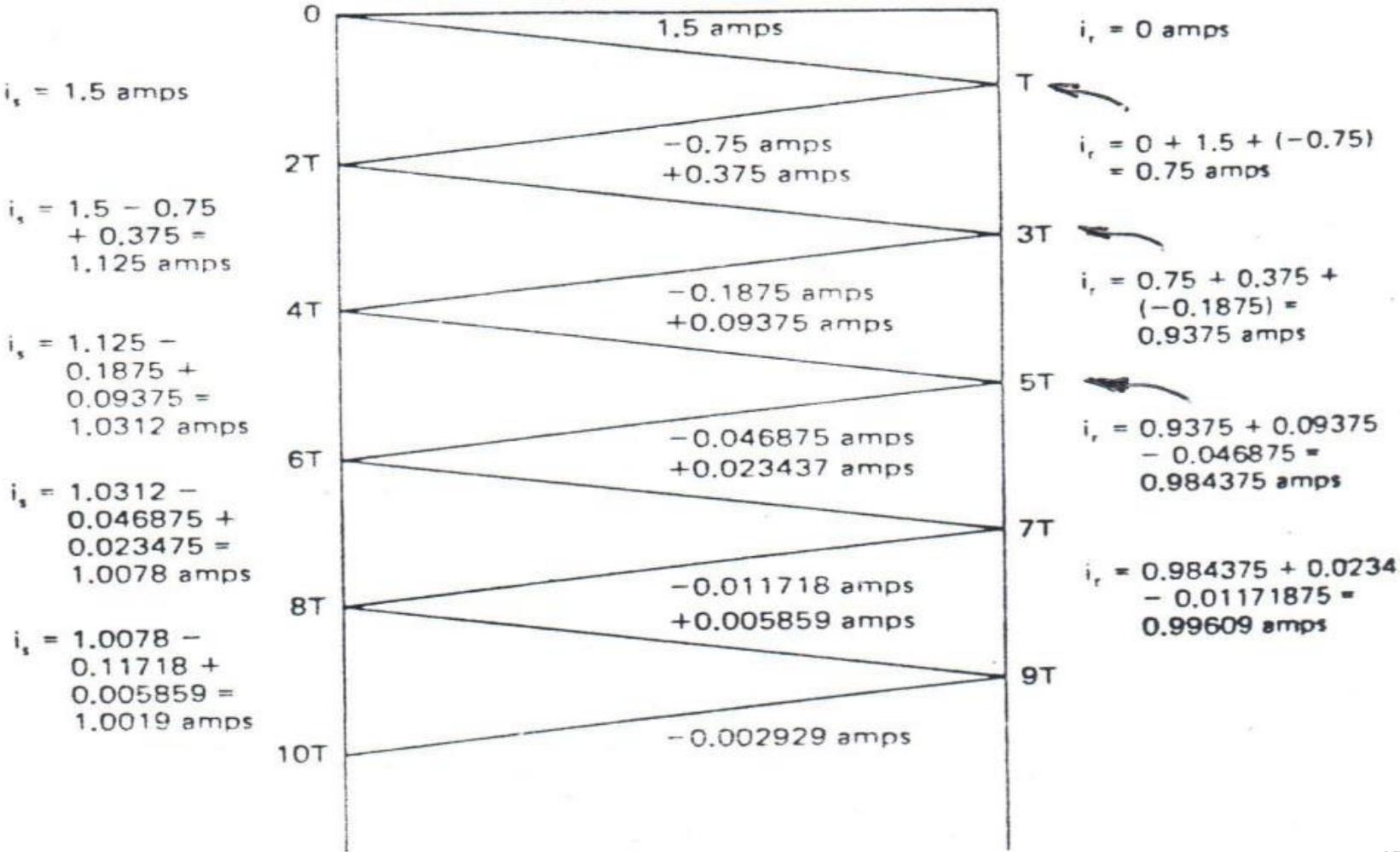
Exemplo 1- Diagrama de Lattice (Corrente)

$$\Gamma_G^i = \frac{Z_0 - Z_G}{Z_G + Z_0} = -\Gamma_G = -0.5$$

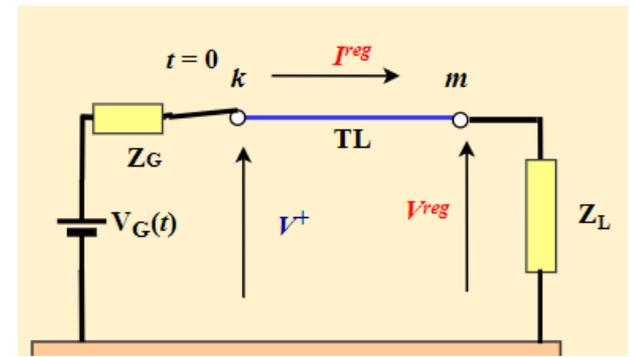
V_k

V_m

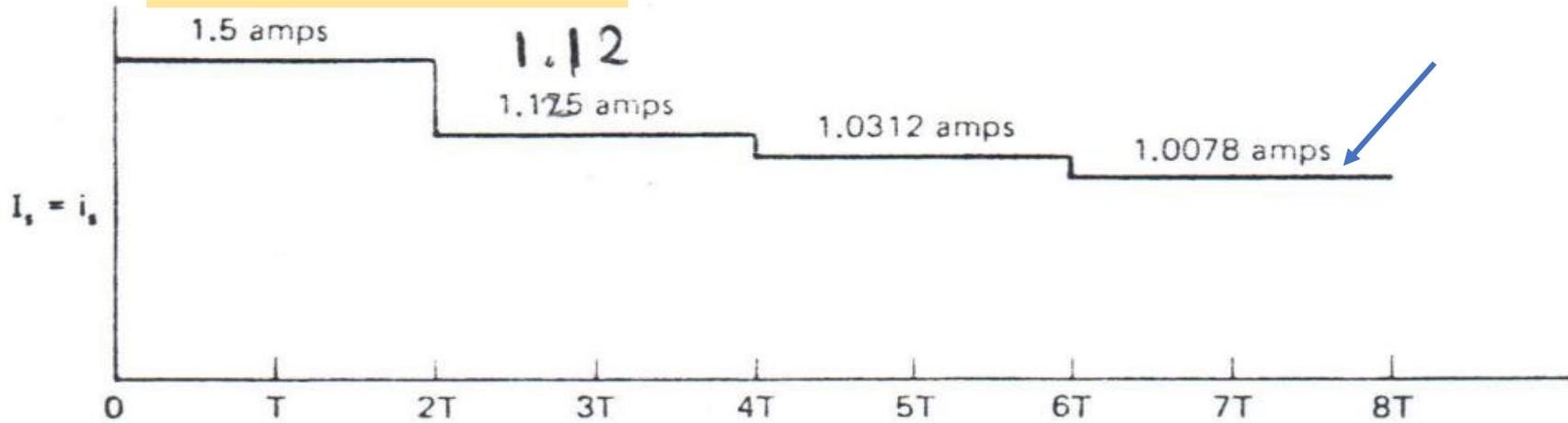
$$\Gamma_L^i = \frac{Z_0 - Z_L}{Z_L + Z_0} = -\Gamma_L = -0.5$$



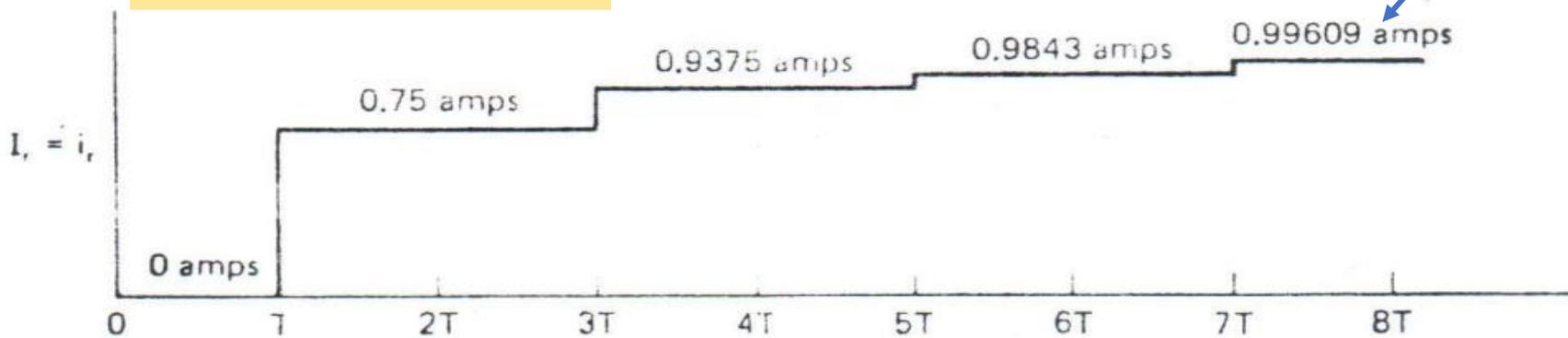
$$I^{reg} = \frac{V_G}{Z_G + Z_L} = \frac{300}{150 + 150} = 1 \text{ A}$$



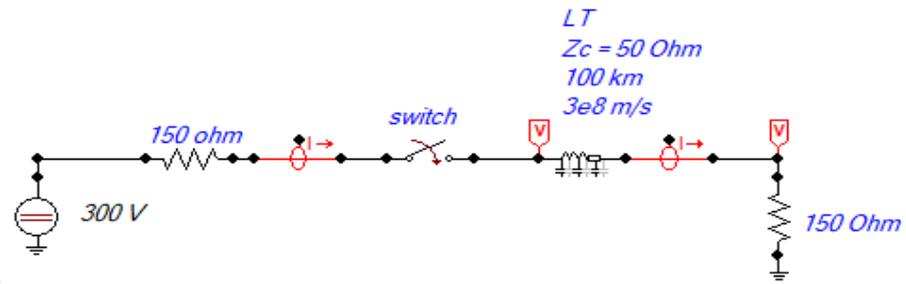
I_k - corrente no emissor



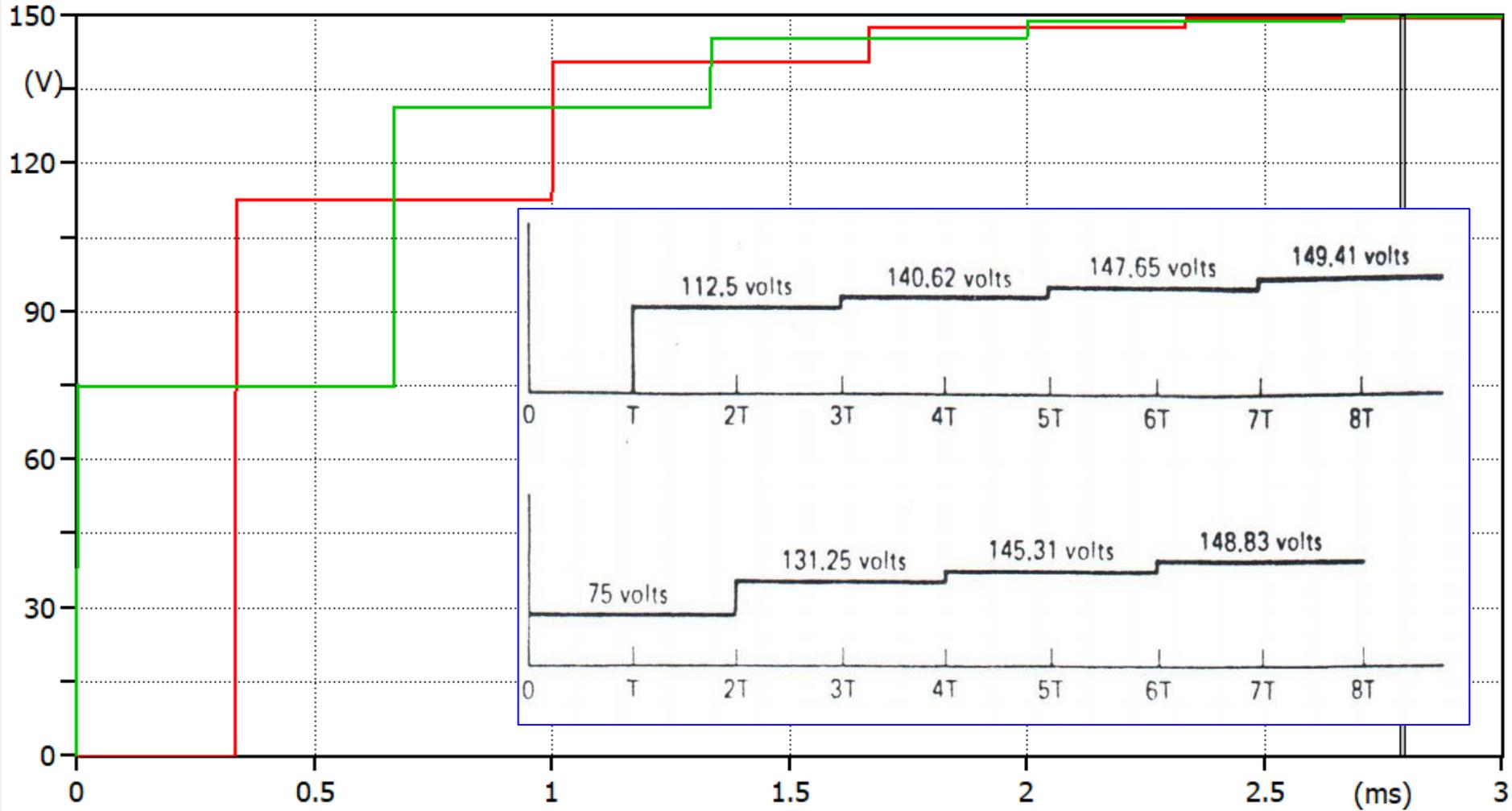
I_m - corretor no receptor



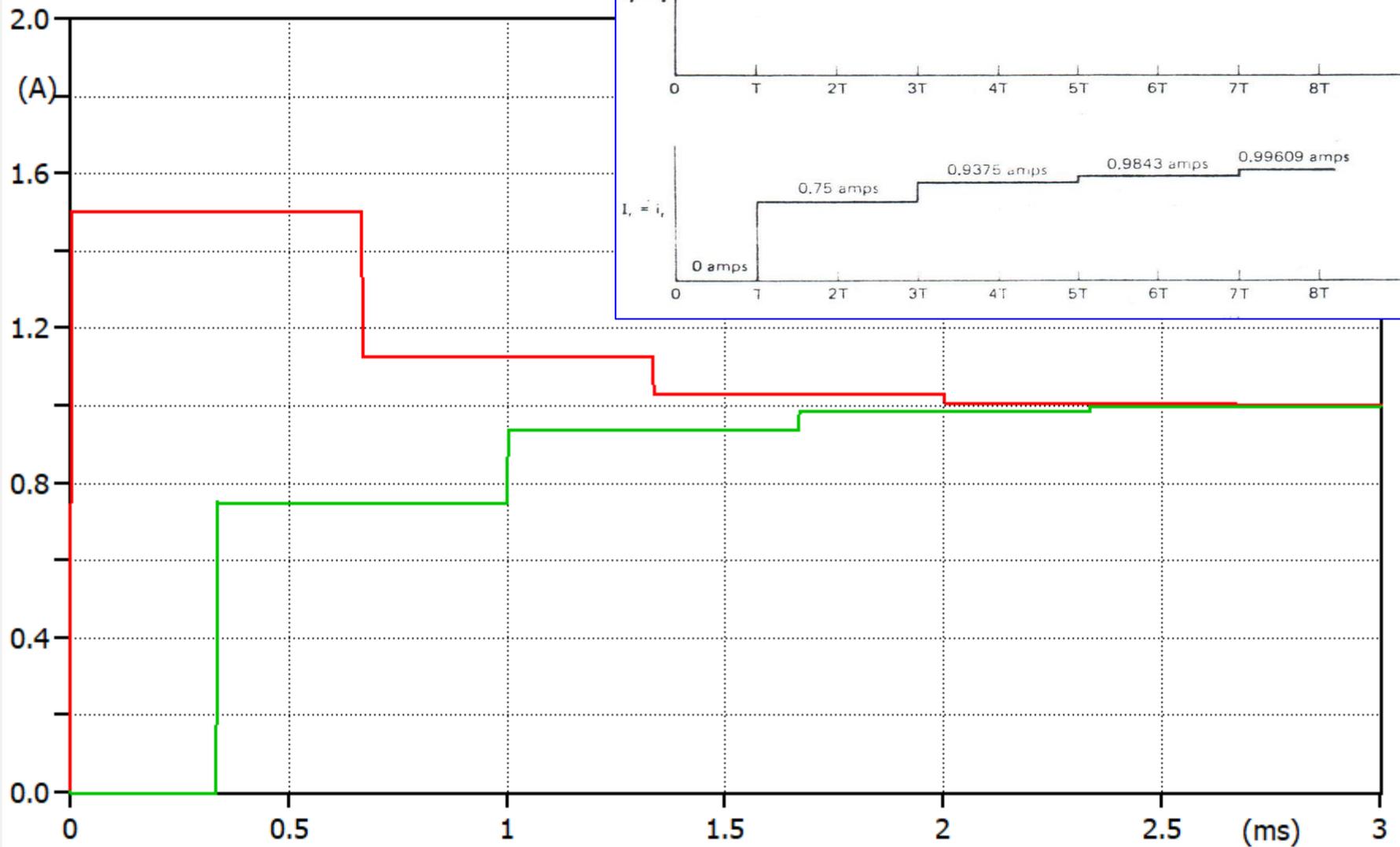
Comparação com o ATP



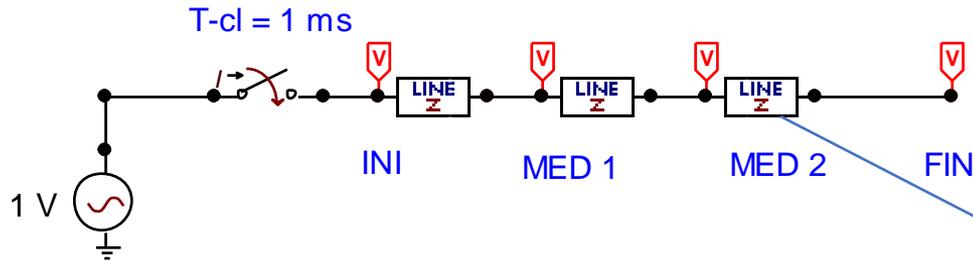
MC's PlotXY - Plot 1



(file exemplo_aula.pl4; x-var t) v:XX0004 v:XX0003



(file exemplo_aula.pl4; x-var t) c:XX0008-XX0005 c:XX0001-XX0007



Datos para las líneas:
 $R/L = 0 \text{ ohm/m}$
 $Z_c = 500 \text{ ohm}$
 $v = 300000000 \text{ m/s}$
 $L = 100 \text{ km}$

- Probes & 3-phase
- Branch Linear
- Branch Nonlinear
- Lines/Cables**
- Switches
- Sources
- Machines
- Transformers
- MODELS
- IACS
- User Specified
- Steady-state
- Power system tools
- All standard comp...
- Add Objects

- Lumped
- Distributed**
 - Transposed lines (Clarke)
 - 1 phase
 - Untransp. lines (KCLee)
 - 2 phase
- LCC template
- LCC section
- LCC EGM
- Read PCH file...

LINE: LINEZT_1

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R	Ohm/m	0
Z	ohm	500
v	m/s	300000000

NODE	PHASE	NAME
From	1	
To	1	

Order: 0 Label:

Comment:

Lines: Length [m] Output:

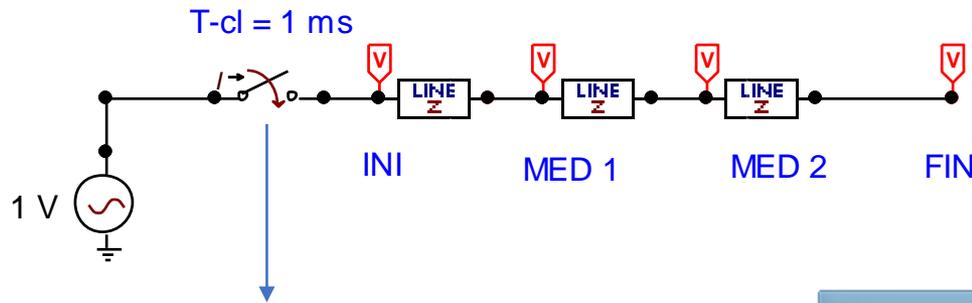
ILINE: L', C' Z, v Z, tau

Conductance: G=0 G=R*C/L

Hide \$Vintage,1

Edit definitions 33 Help

Verificar siempre as unidades



Datos para las líneas:
 $R/L = 0 \text{ ohm/m}$
 $Z_c = 500 \text{ ohm}$
 $v = 300000000 \text{ m/s}$
 $L = 100 \text{ km}$

- Probes & 3-phase
- Branch Linear
- Branch Nonlinear
- Lines/Cables
- Switches**
 - Switch time controlled
 - Switch time 3-ph
 - Switch voltage contr.
 - Diode (type 11)
 - Valve (type 11)
 - Triac (type 12)
 - IACS switch (type 13)
 - Measuring
 - Statistic switch
 - Systematic switch
 - Nonlinear diode
- Sources
- Machines
- Transformers
- MODELS
- IACS
- User Specified
- Steady-state
- Power system tools
- All standard comp...
- Add Objects



Component: TSWITCH

Attributes Characteristic

DATA	UNIT	VALUE
T-cl	s	0
T-op	s	-1
Imar	Amps	0
T-recl	s	0.001
T-reop	s	0

NODE	PHASE	NAME
From	1	
To	1	

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output: Hide

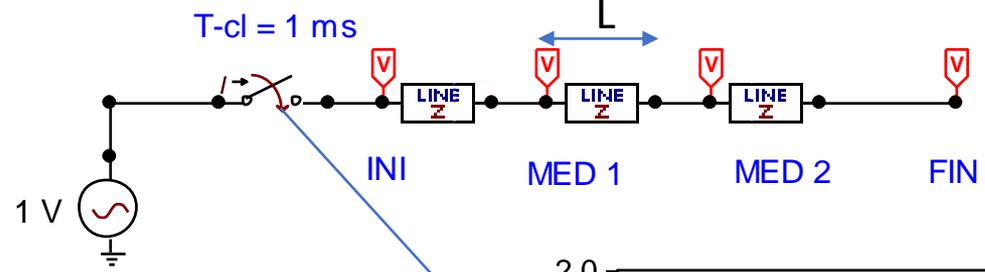
NumPh

Edit definitions OK Cancel Help

Simulação de manobras em linhas de transmissão

❖ Exemplo 5: Linha de transmissão, propagação de ondas viajantes

Cada bloco LINE Z tem



Datos para las líneas:
 R/L = 0 ohm/m
 Zc = 500 ohm
 v = 300000000 m/s
 L = 100 km

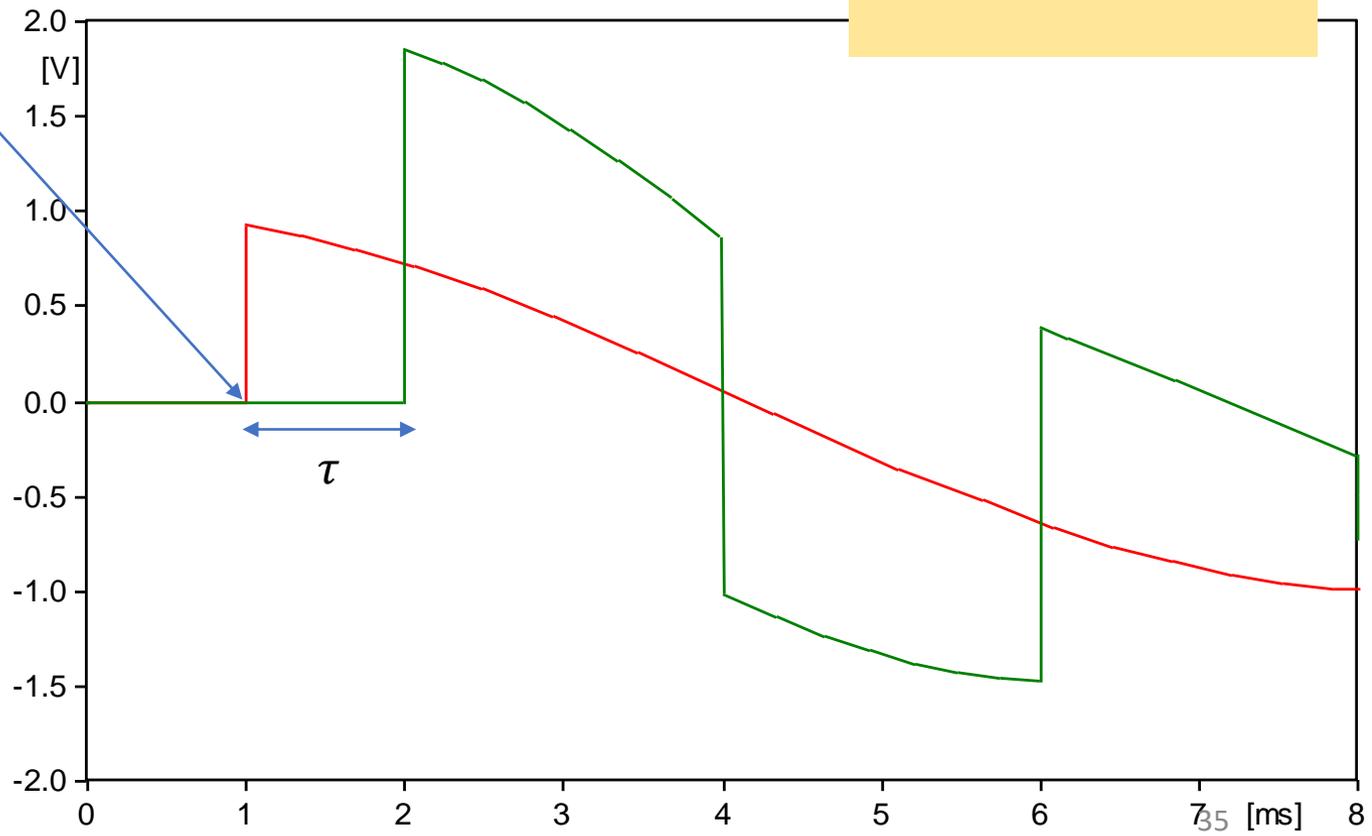
$$\tau' = \frac{L}{v} = 0,33 \text{ ms}$$

$$\tau = 3 \tau' \approx 1 \text{ ms}$$

Fonte AC
 1 V/60 Hz

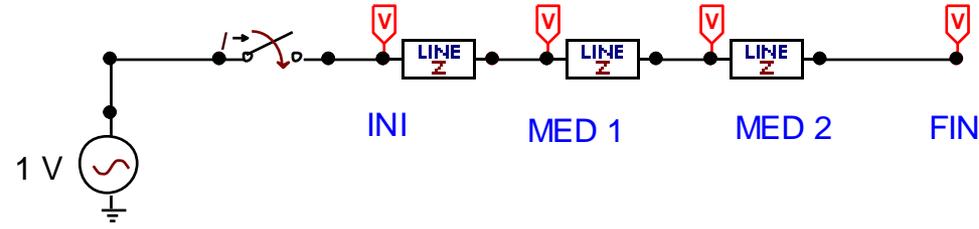
Component: ACSOURCE

DATA	UNIT	VALUE
AmplitudeA	Volt	1
Frequency	Hz	60
PhaseAngleA	degrees	0
StartA	sec	-1
StopA	sec	100



(file 03_OndasViajerasLinea1f_Jaimis.pl4; x-v ar t) v:INI v:FIN

$T_{cl} = 1 \text{ ms}$



Datos para las líneas:

$R/L = 0 \text{ ohm/m}$

$Z_c = 500 \text{ ohm}$

$v = 300000000 \text{ m/s}$

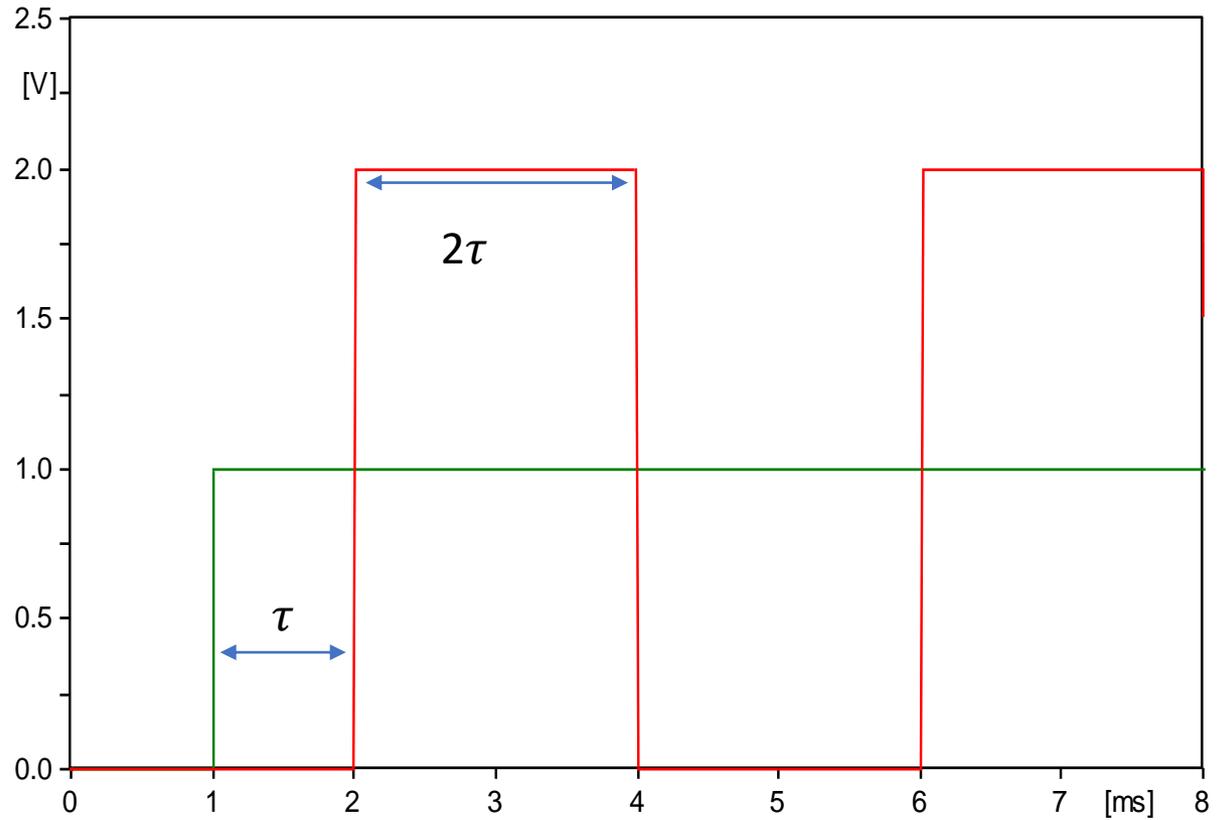
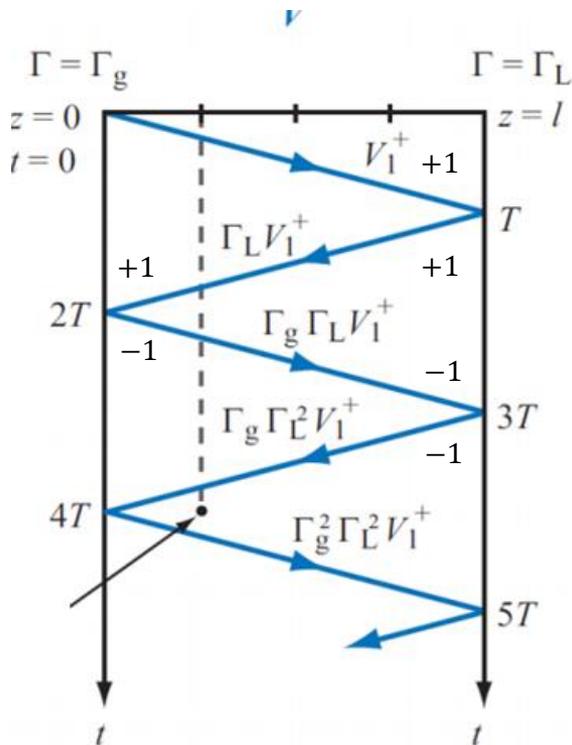
$L = 100 \text{ km}$

Fonte DC 1 V

LT em aberto no terminal receptor
($Z \rightarrow \infty$)
Gerador ideal

$$\Gamma_G = \frac{0 - 500}{0 + 500} = -1$$

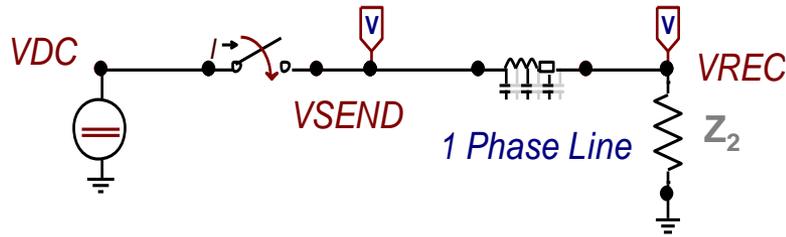
$$\Gamma_L = \frac{\infty - 500}{\infty + 500} = 1$$



(file 03_OndasViajerasLinea1f_Jaimis.pl4; x-var t) v:INI v:FIN

Simulação de manobras em linhas de transmissão.

❖ Energização de Linha de transmissão com diversas cargas resistivas



Dados para a LT
 $R' = 0 \text{ ohm/km}$
 $L' = 1 \text{ mH/km}$
 $C' = 11.5 \text{ nF/km}$
 $d = 100 \text{ km}$

$$v = \frac{1}{\sqrt{L'.C'}} \quad v = 2.95 \times 10^5 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

$$\tau = \frac{d}{v} \quad \tau = 3.3912 \times 10^{-4} \text{ s} \quad \approx 0.33 \text{ ms}$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad Z_c = 294.88 \text{ } \Omega \quad \approx 300 \text{ } \Omega$$

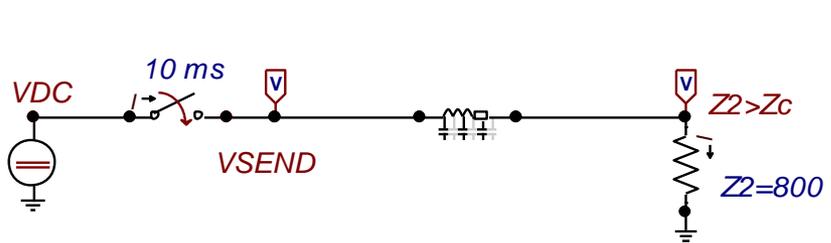
Vdc = 100 kV

❑ Casos de tensões a analisar:

- Tensão no receptor para o caso que $Z_2 > Z_c$
- Tensão no receptor para o caso que $Z_2 < Z_c$
- Tensão no receptor para o caso que $Z_2 = Z_c$

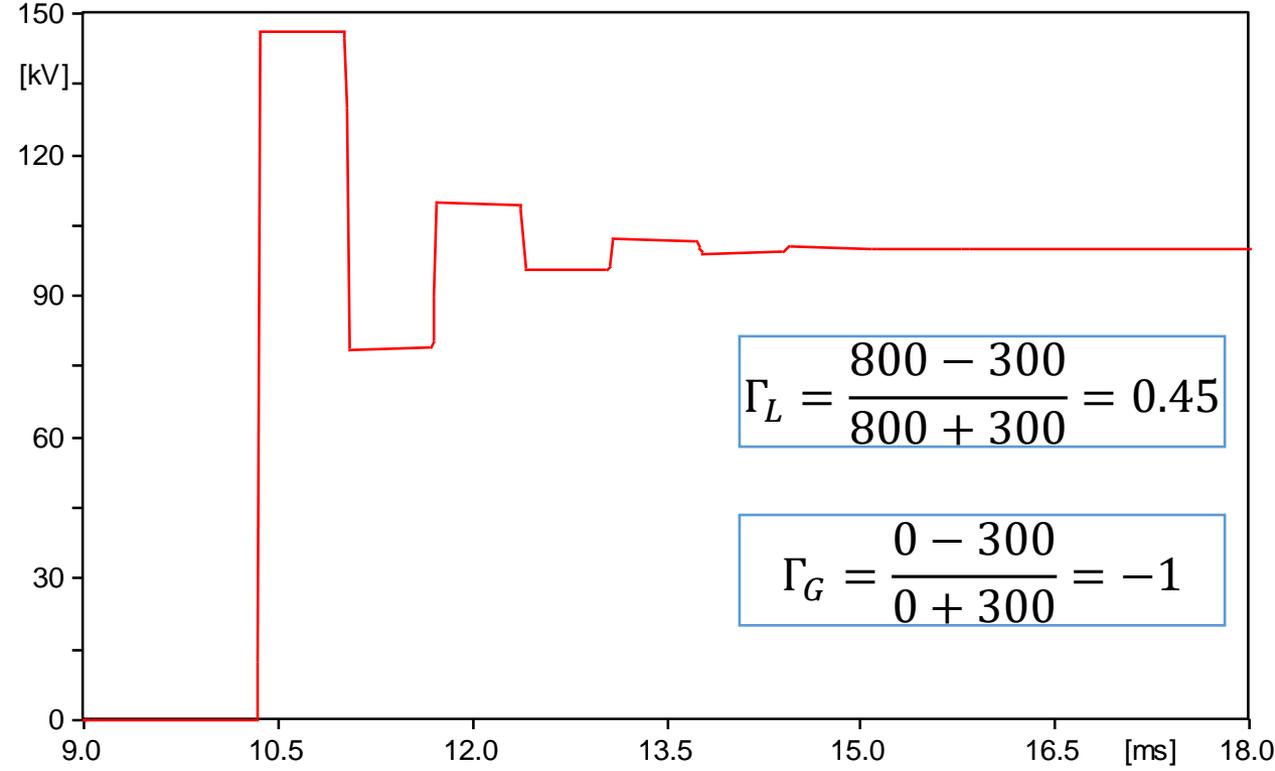
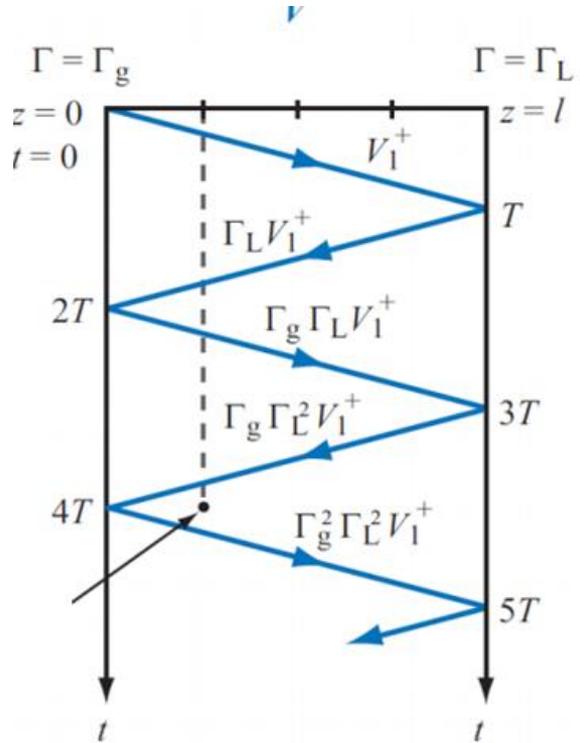
Simulação de manobras em linhas de transmissão.

❖ Exemplo 6: Linha de transmissão, comparação modelo de circuito PI e Bergeron



$Z_c = 294.88\Omega$

Tensão no receptor para o caso que $Z_2 > Z_C$

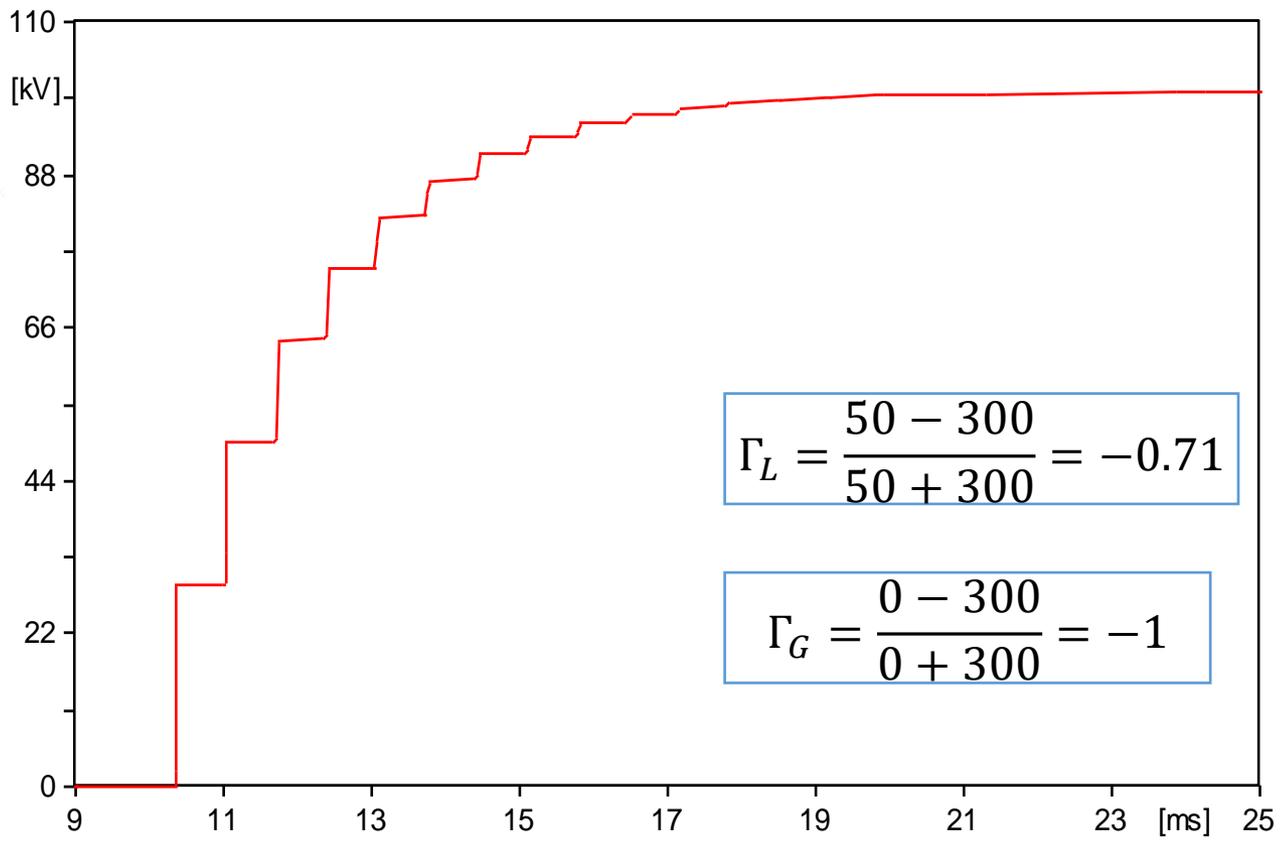
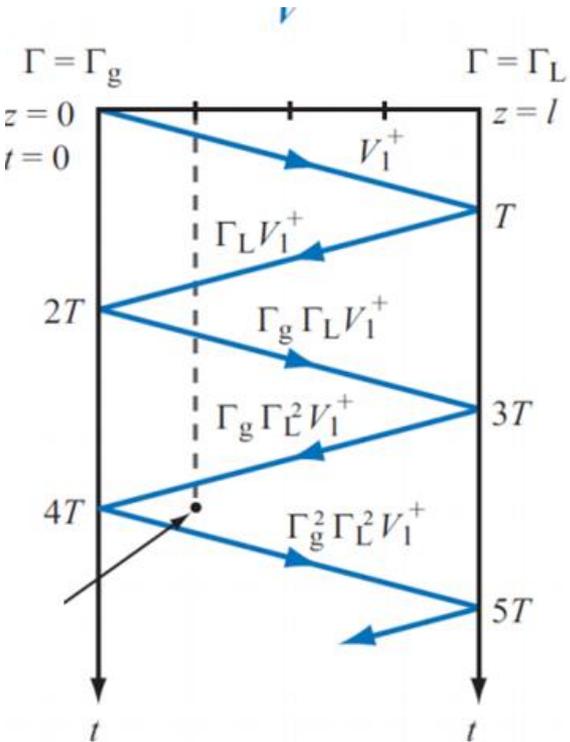
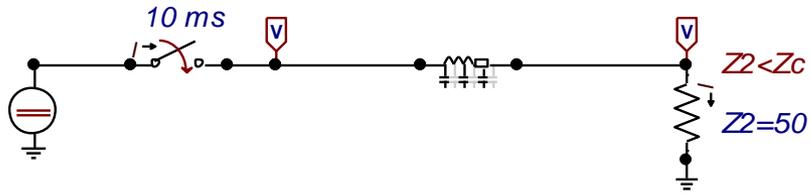


$$\Gamma_L = \frac{800 - 300}{800 + 300} = 0.45$$

$$\Gamma_G = \frac{0 - 300}{0 + 300} = -1$$

(file Exercise_3_Resistor.pl4; x-v ar t) v:VREC

Simulação de manobras em linhas de transmissão.



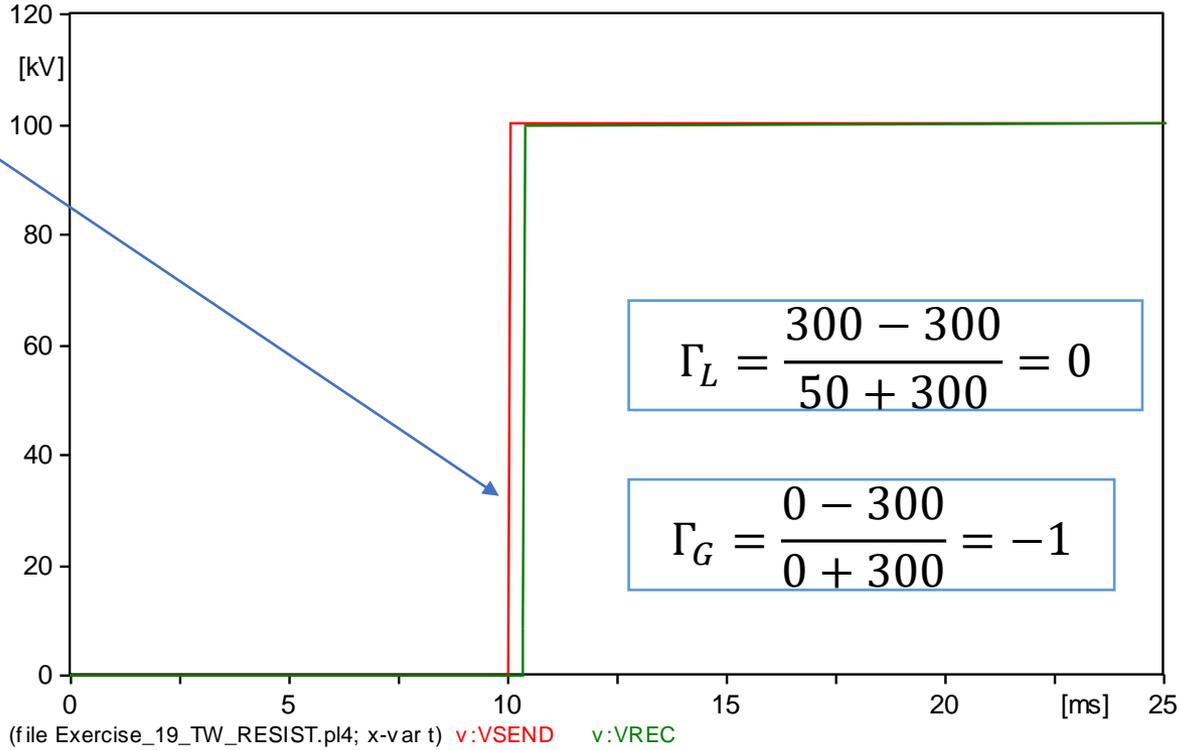
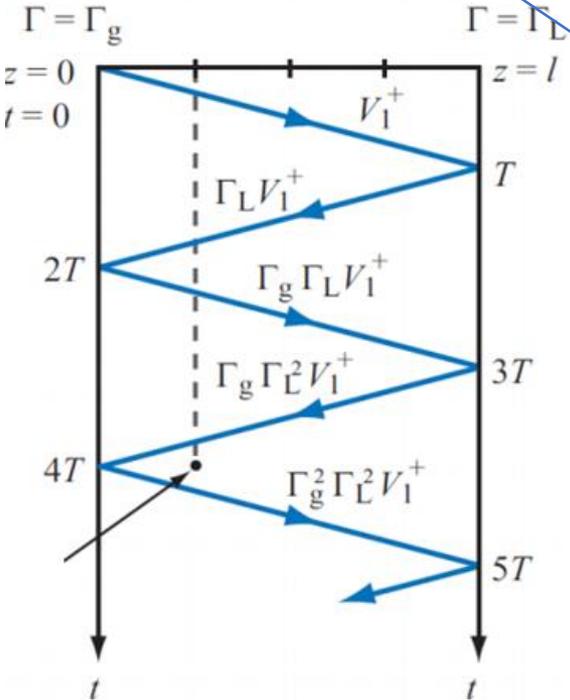
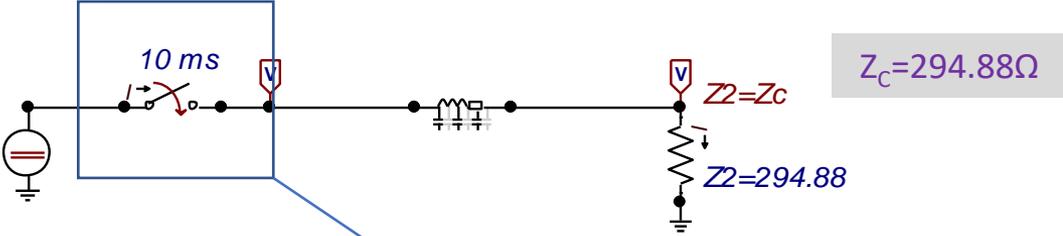
$$\Gamma_L = \frac{50 - 300}{50 + 300} = -0.71$$

$$\Gamma_G = \frac{0 - 300}{0 + 300} = -1$$

ile Exercise_3_Resistor.pl4; x-var t) v:VREC

Simulação de manobras em linhas de transmissão.

Exemplo 6: Linha de transmissão, comparação modelo de circuito PI e Bergeron



Tensão no receptor para o caso que $Z2 = Zc$

site

Acesso à Informação

BRASIL

[Ir para conteúdo](#) | [Ir para menu](#) | [Ir para rodapé](#) | [Contraste](#) | [Acessibilidade](#) | [Acesso à Informação](#) | [Portal da UFC](#)

Procurar...

Universidade Federal do Ceará
IMPrensa UNIVERSITÁRIA / EDIÇÕES UFC



EDIÇÕES
UFC



[Início](#)

[Sobre a Editora da UFC](#)

[Catálogo](#)

[Livros Digitais](#)

[Produtos de Venda Proibida](#)

[Livraria da UFC](#)

[Fale Conosco](#)

Você está aqui: [Home](#) > [Catálogo](#) > [Engenharia Elétrica](#) > [Transmissão de Energia Elétrica em Corrente Alternada](#)

Transmissão de Energia Elétrica em Corrente Alternada



Este livro tem enfoque computacional através do uso do programa Alternative Transient Program (ATPdraw), que é um programa de uso mundial. A quantidade de exercícios resolvidos, incluindo simulações computacionais com o ATPdraw e códigos fonte em linguagem MATLAB tornam a obra didática e de fácil assimilação, mesmo para aqueles que são iniciantes no assunto.

A matéria apresentada ao longo do texto tem como objetivo que o leitor adquira conhecimentos suficientes para analisar a operação de linhas de transmissão aéreas em regime permanente e em regime transitório, além de realizar um projeto elétrico de uma linha de transmissão aérea. O livro pode ser utilizado em cursos de graduação e de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

LIVRO DIGITAL: [Download gratuito da obra](#)

Dados da obra

Autores: **Ailson P. Moura, Adriano Aron F. Moura, Ednardo P. Rocha**

Numero de páginas: 353

ISBN: 978-85-7282-762-1

Ano: 2019

<http://www.editora.ufc.br/catalogo/76-engenharia-eletrica/979-transmissao-de-energia-eletrica-em-corrente-alternada>