

IT 002 – SOBRETENSÕES EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Aula-06

Simulação de Linhas de Transmissão no ATP Descargas Atmosféricas e LT trifásicas

Prof. Dr. José Pissolato Filho (Unicamp)

Anderson Ricardo Justo de Araújo (Unicamp)

Jaimis Sajid Leon Colqui (Unesp)

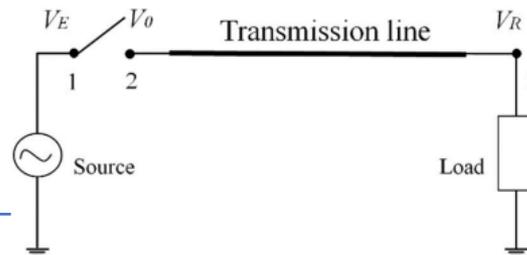
30 de abril de 2021

- ❑ Diagrama de Lattice para LT em curto
- ❑ Descargas atmosféricas no ATP
- ❑ Modelagem de fontes de corrente
- ❑ Linhas de Transmissão Trifásicas

Classificação dos fenômenos que originam TEM-Espectro de frequência

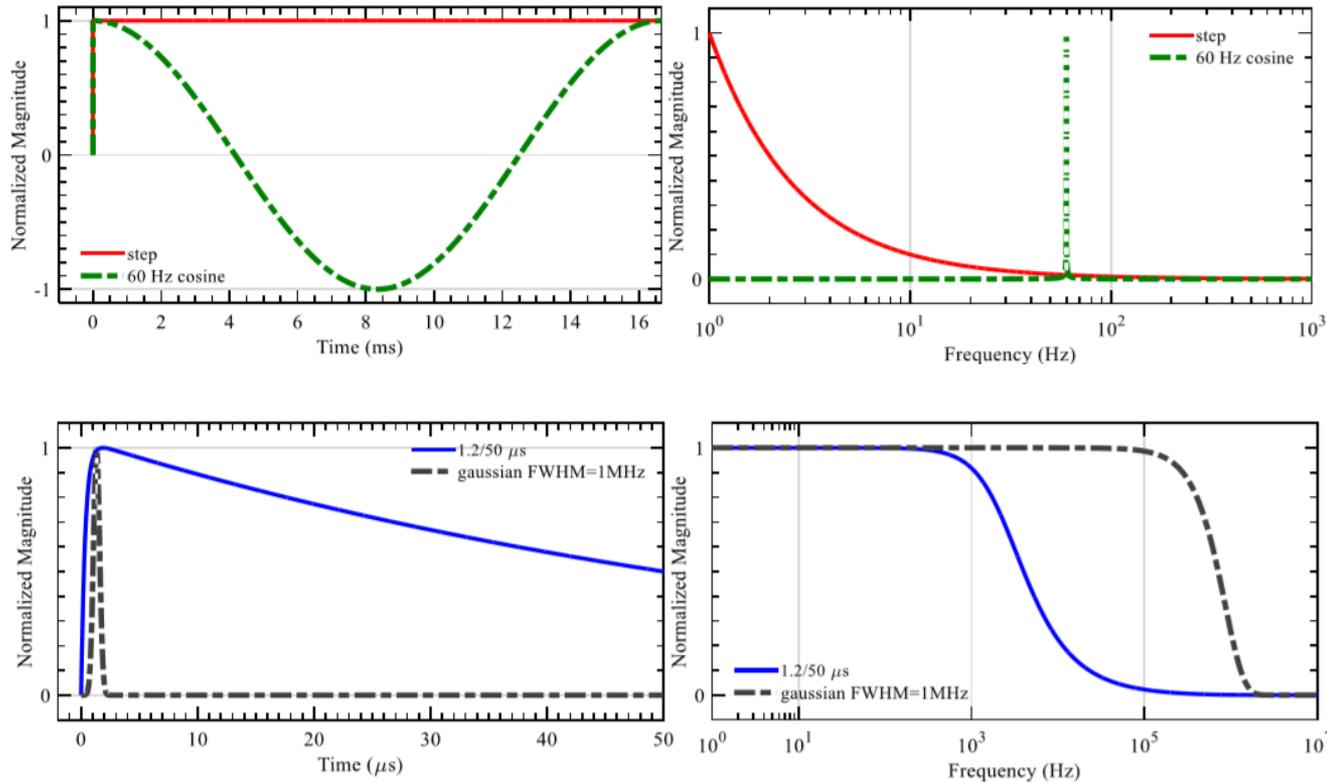
- Tabela Cigré¹

Origin	frequency range
Transformer energization ferroresonance	(DC) 0.1 Hz - 1 kHz
Load rejection	0.1 Hz - 3 kHz
Fault clearing	50/60 Hz - 3 kHz
Fault initiation	50/60 Hz - 20 kHz
Line energization	50/60 Hz - 20 kHz
Line reclosing	(DC)50/60Hz - 20 kHz
Transient recovery voltage	
Terminal faults	50/60 Hz - 20 kHz
Short line faults	50/60 Hz - 100 kHz
Multiple restrikes of circuit breaker	10 kHz - 1 MHz
Lightning surges, faults in substations	10 kHz - 3 MHz
Disconnecter switching (single restrike) and faults in GIS	100 kHz - 50 MHz



1-Adaptado de: Cigré 39. (1990). GUIDELINES FOR REPRESENTATION OF NETWORK ELEMENTS WHEN CALCULATING TRANSIENTS.

Espectro de frequência dos fenômenos que originam os TEMs¹



Sinal no domínio do tempo



Aplicação da Transformada de Laplace.



Sinal no domínio da Frequência

1-Adaptado de: Caballero, P. T. (2018). INCLUSÃO DO EFEITO DA FREQUÊNCIA NO MODELO DE BERGERON: REPRESENTAÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO CURTAS E LONGAS CONSIDERANDO TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS RESULTANTES DE OPERAÇÕES DE MANOBRAS E DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS. UNESP-Ilha Solteira (Tese).

Espectro da frequência de uma Descarga Atmosférica

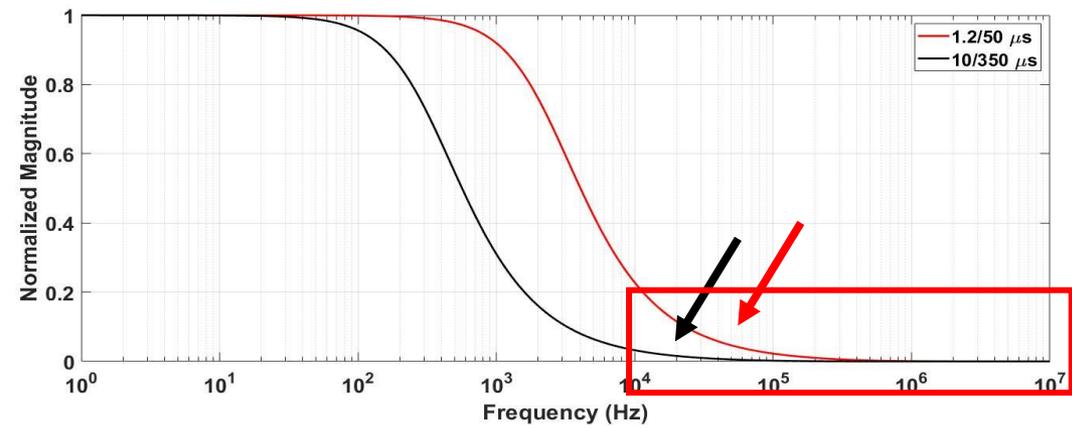
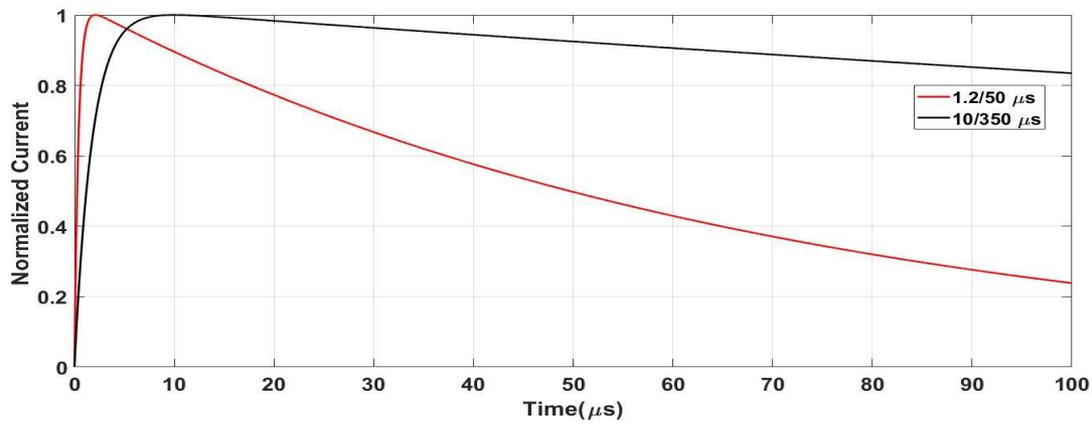
$$i(t) = \frac{I_0}{k} (e^{-at} - e^{bt})$$

Transformada de Laplace.

Sinal no domínio da Frequência

$$I(s) = \frac{I_0}{k} \left(\frac{1}{s+a} - \frac{1}{s+b} \right)$$

Os fatores mais importantes são amplitude e o tempo de frente

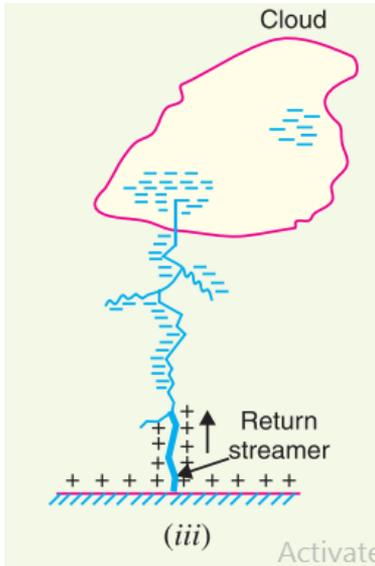


Alguns autores também usam o termo 'densidade espectral de energia'. Assim, 1.2/50 us tem maior energia nas altas frequências

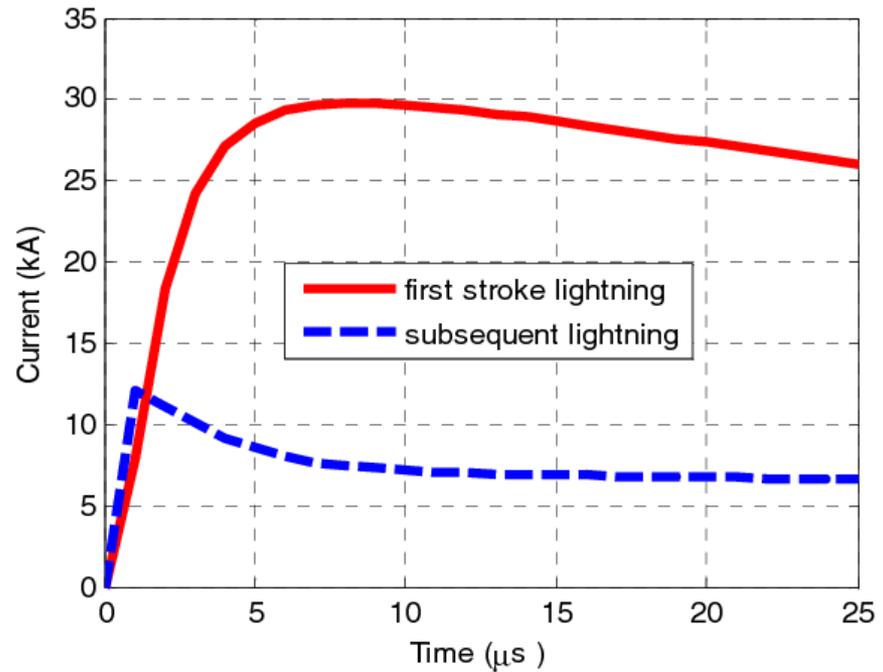
Função de Heidler

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} (e^{-t/\tau_2})$$

$$i(t) = \sum_1^N \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} (e^{-t/\tau_2})$$



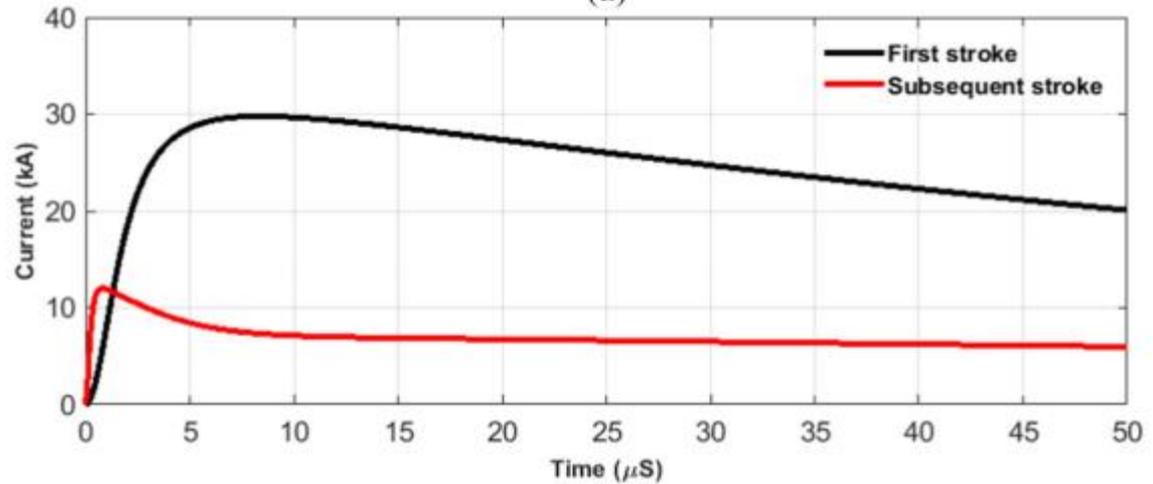
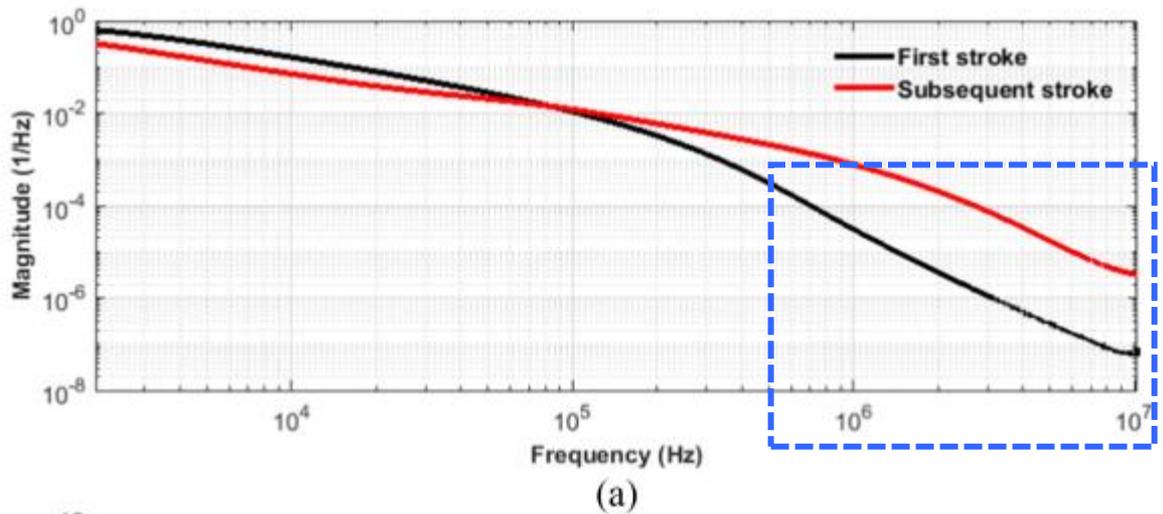
Parameters	I_0	τ_1	τ_2	n	I_0	τ_1	τ_2	n
First stroke	28	1.8	95	2	--	--	--	--
Subsequent stroke	10.7	0.25	2.5	2	6.5	2	230	2



$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} (e^{-t/\tau_2})$$

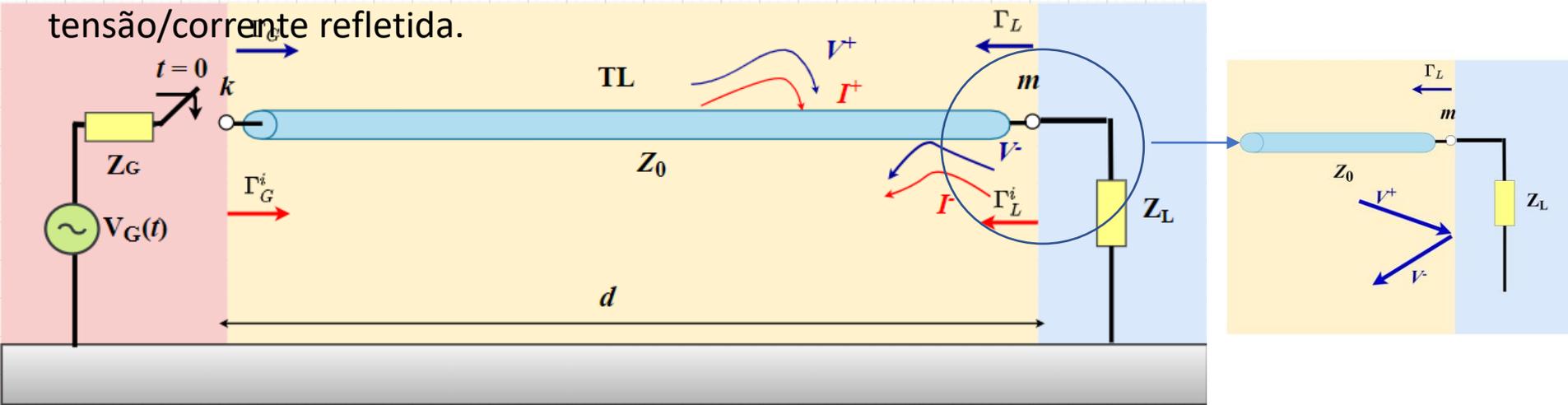
Transformada de Fourier

Sinal no domínio da Frequência



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

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

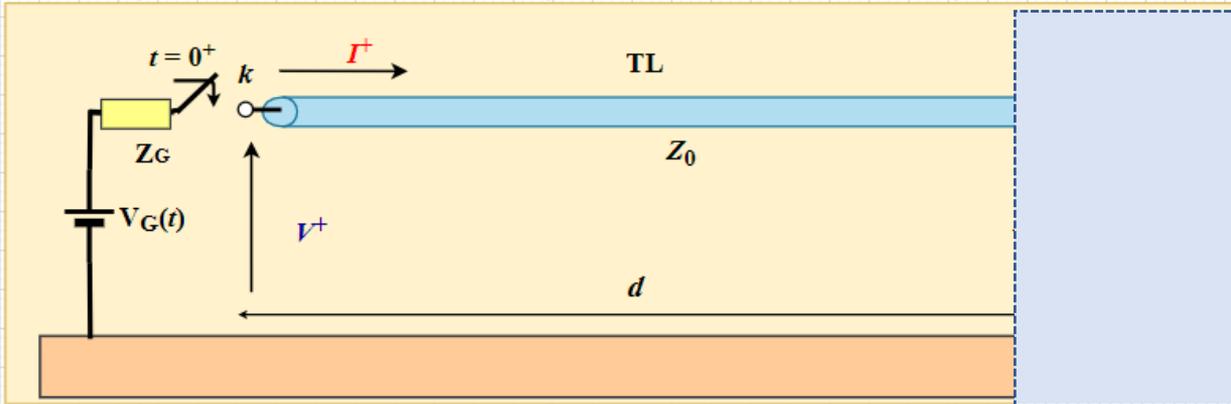
$$\Gamma_G = \frac{Z_G - Z_0}{Z_G + Z_0}$$

Coef. de reflexão para a corrente

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

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

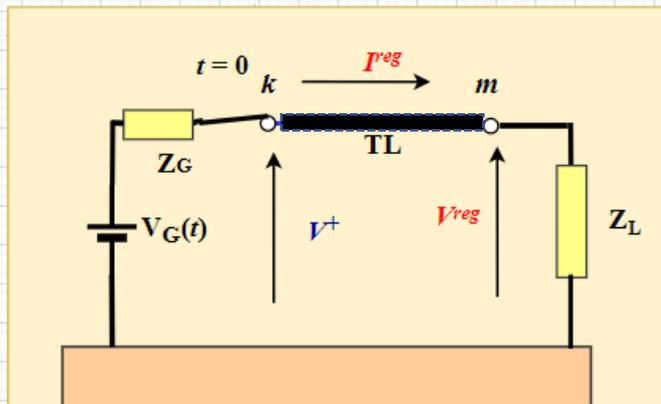
Valores iniciais e de regime



No transitório

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

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



No regime permanente

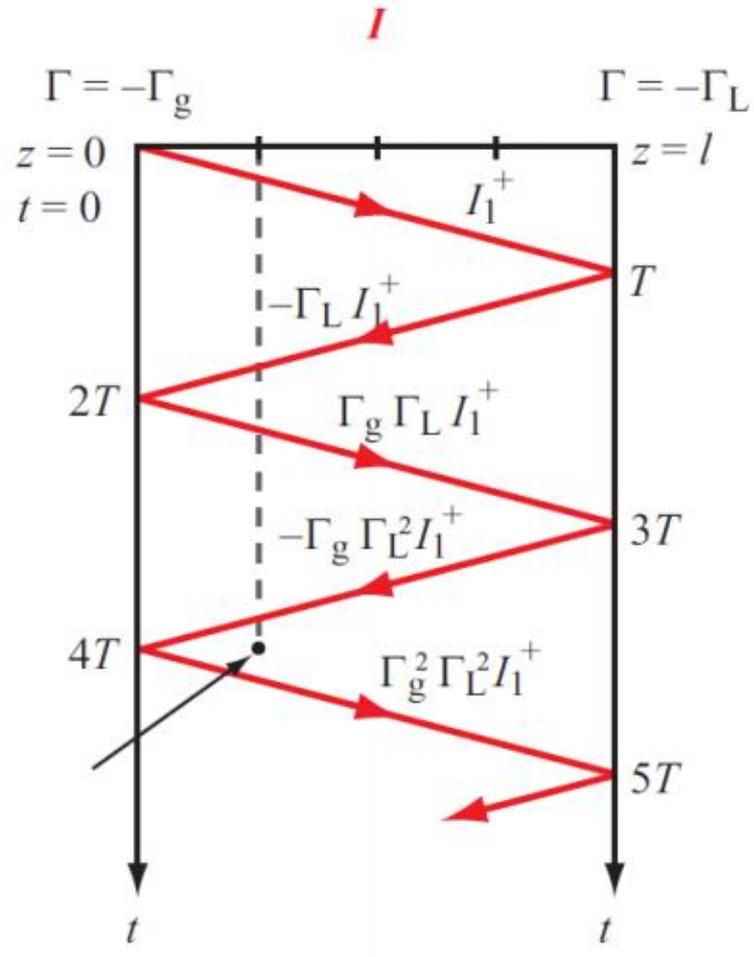
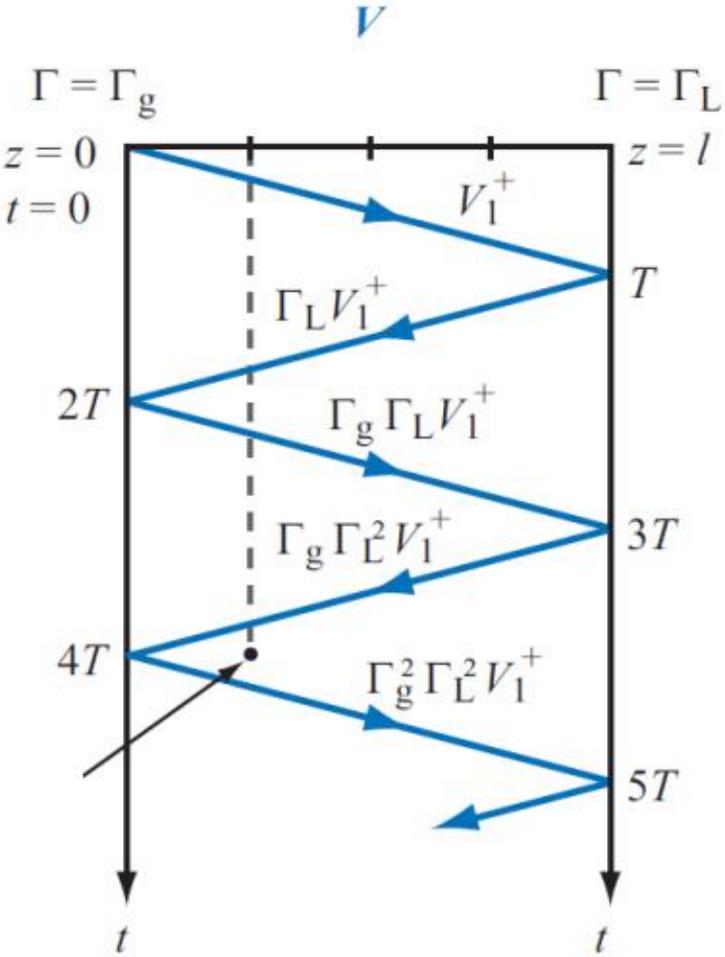
$$I^{reg} = \frac{V_G}{Z_G + Z_L}$$

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

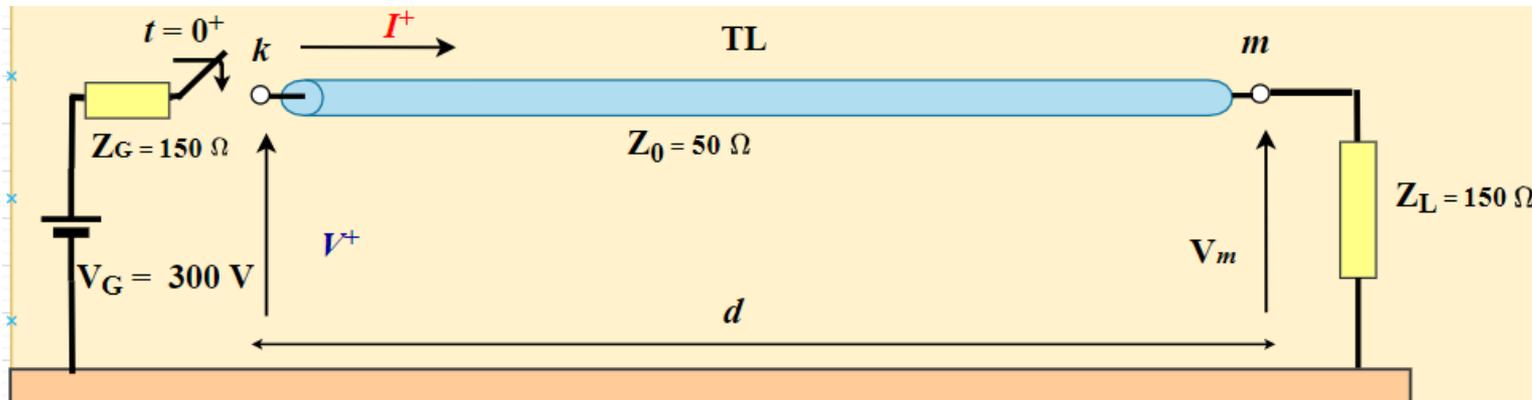
Lembrete: LT ideal
($R = G = 0$)

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

Ondas Refletidas na LT e Diagrama de Lattice



Exemplo 1- Ex ercio da Aula 02



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

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

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

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

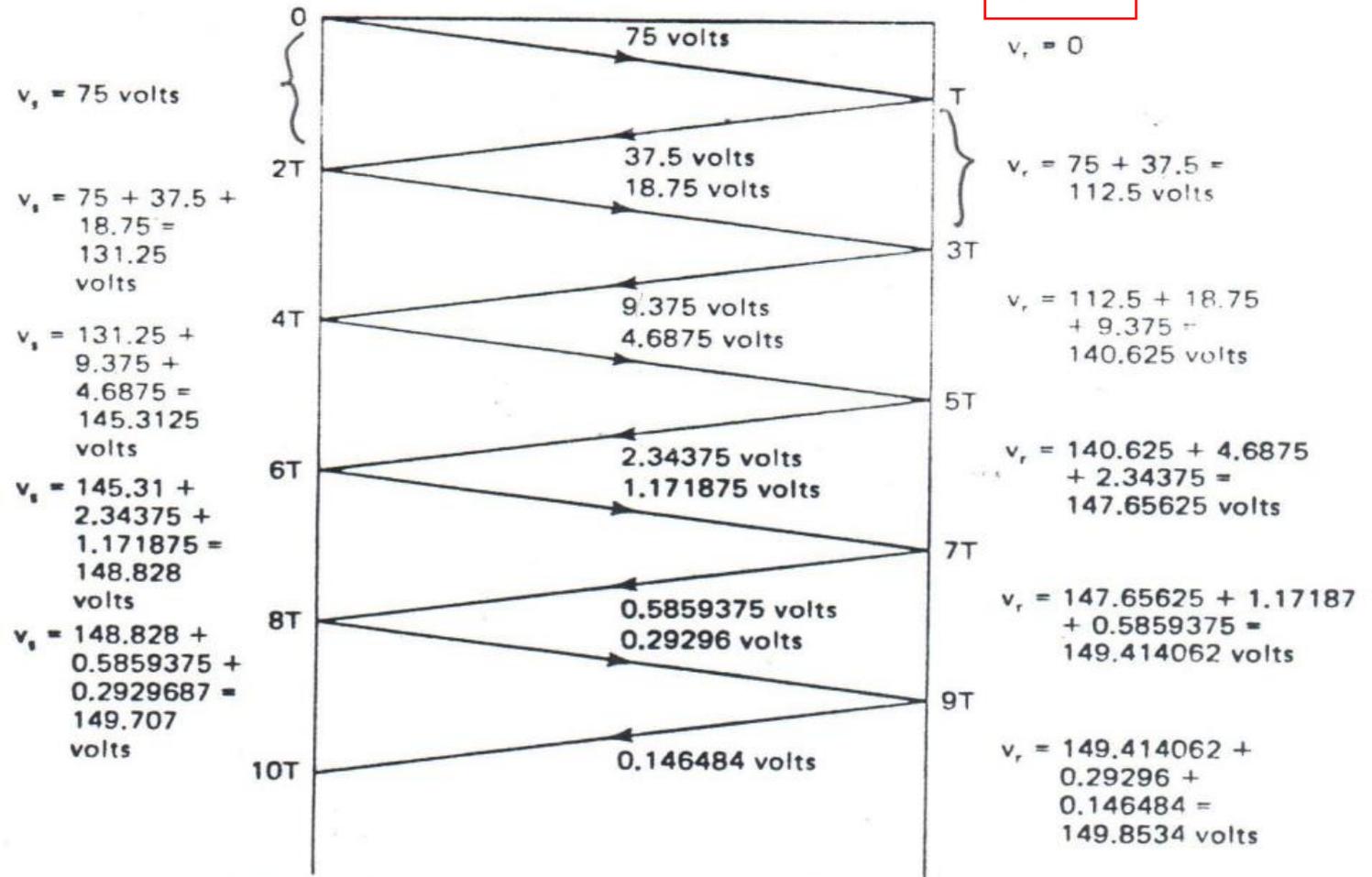
Exemplo 1- Diagrama de Lattice (Tensão)

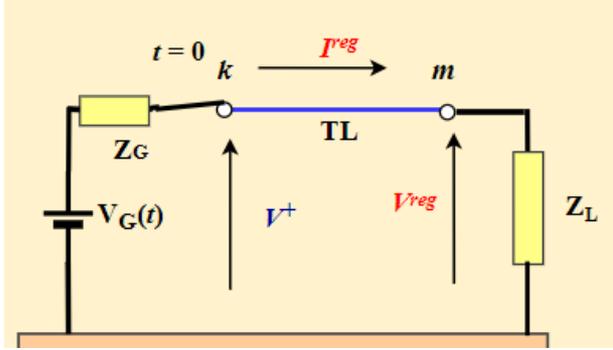
V_k

V_m

$\Gamma_s = 0.5$

$\Gamma_r = 0.5$



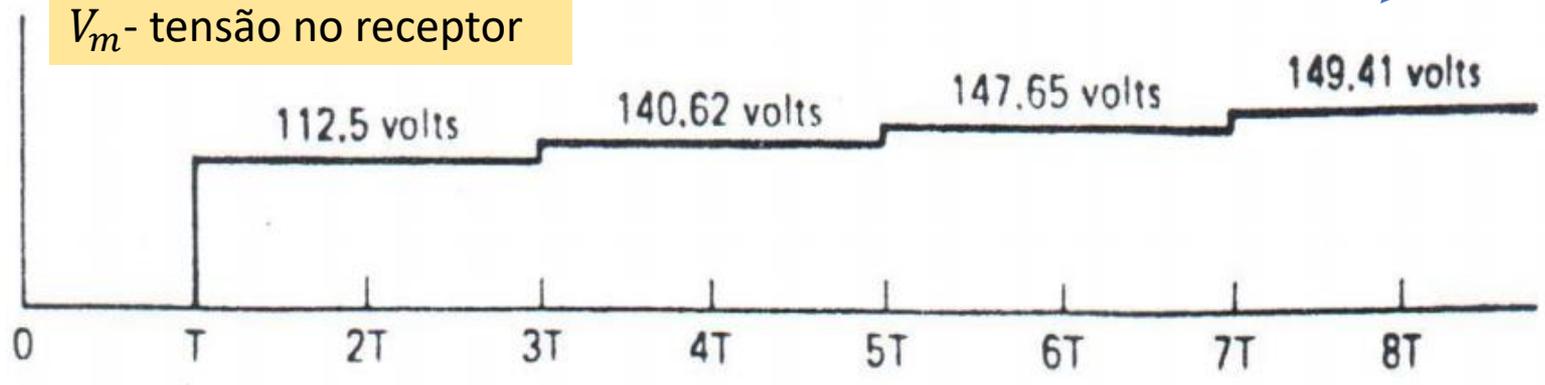


$$V^{reg} = \frac{Z_L}{Z_G + Z_L} V_G$$

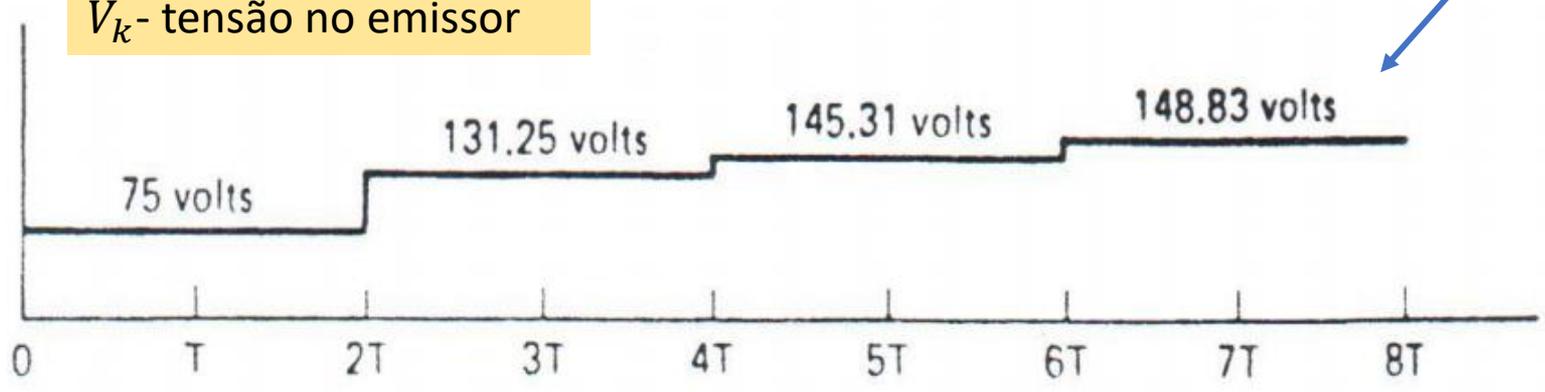
$$V^{reg} = \frac{150}{150 + 150} 300 = 150 \text{ V}$$



V_m - tensão no receptor



V_k - tensão no emissor



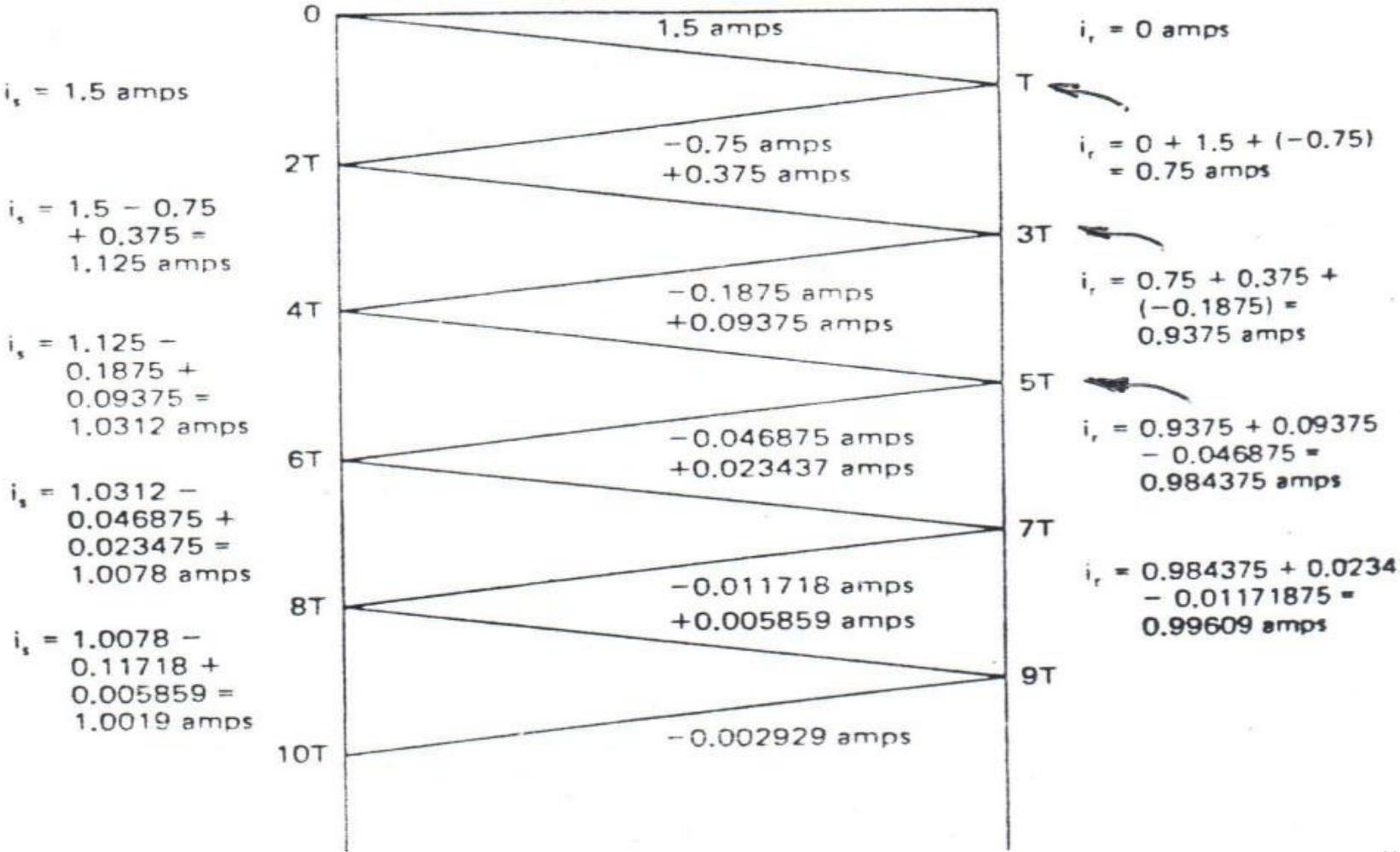
Exemplo 1- Diagrama de Lattice (Corrente)

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

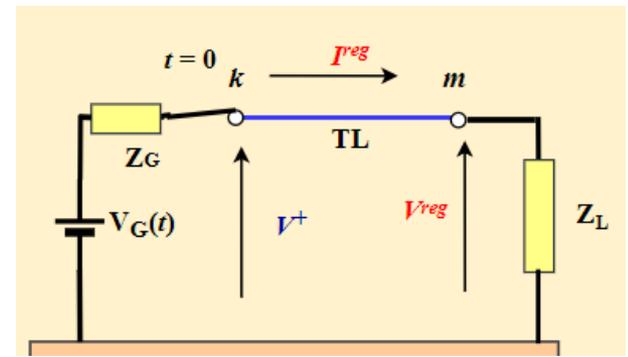
V_k

V_m

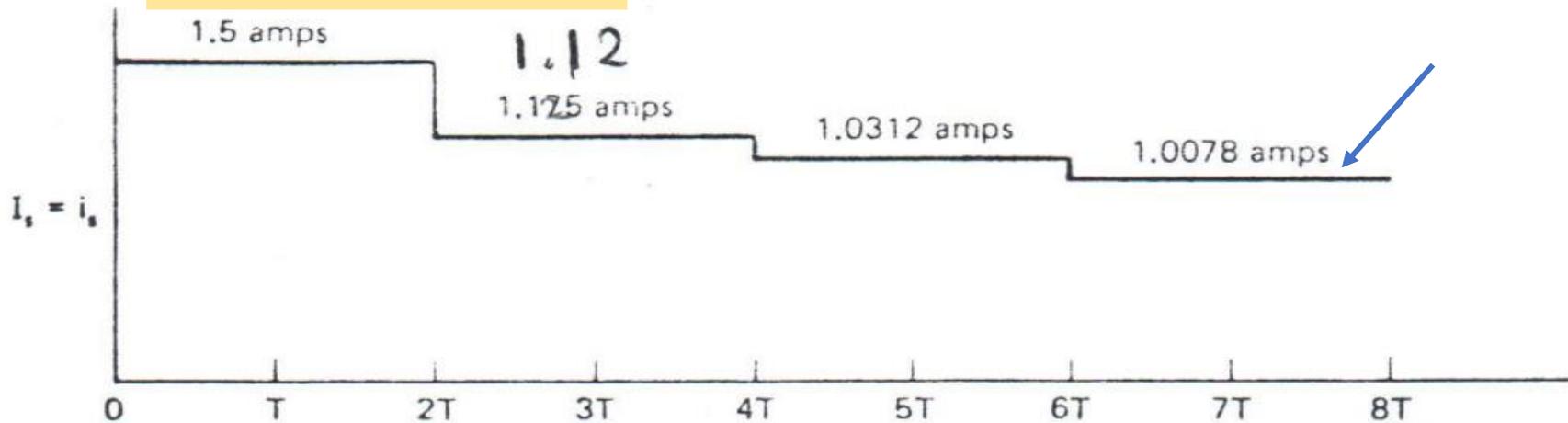
$$\Gamma_L^i = \frac{Z_0 - Z_L}{Z_L + Z_0} = -\Gamma_L = -0.5$$



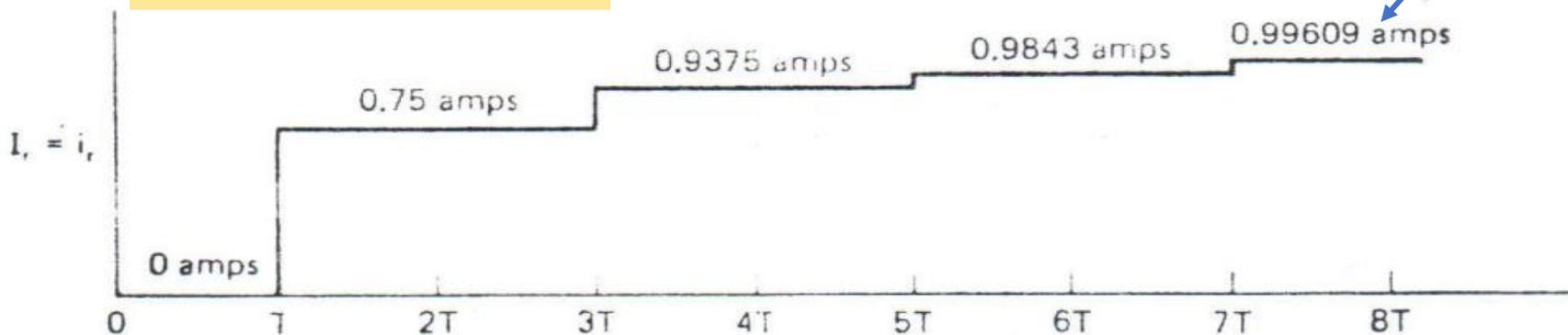
$$I^{reg} = \frac{V_G}{Z_G + Z_L} = \frac{300}{150 + 150} = 1 \text{ A}$$



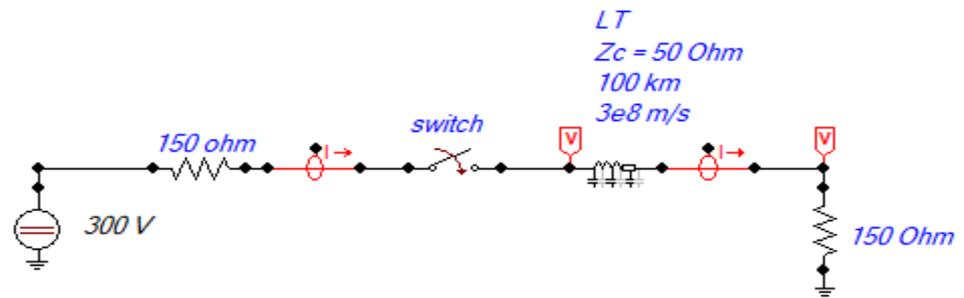
I_k - corrente no emissor



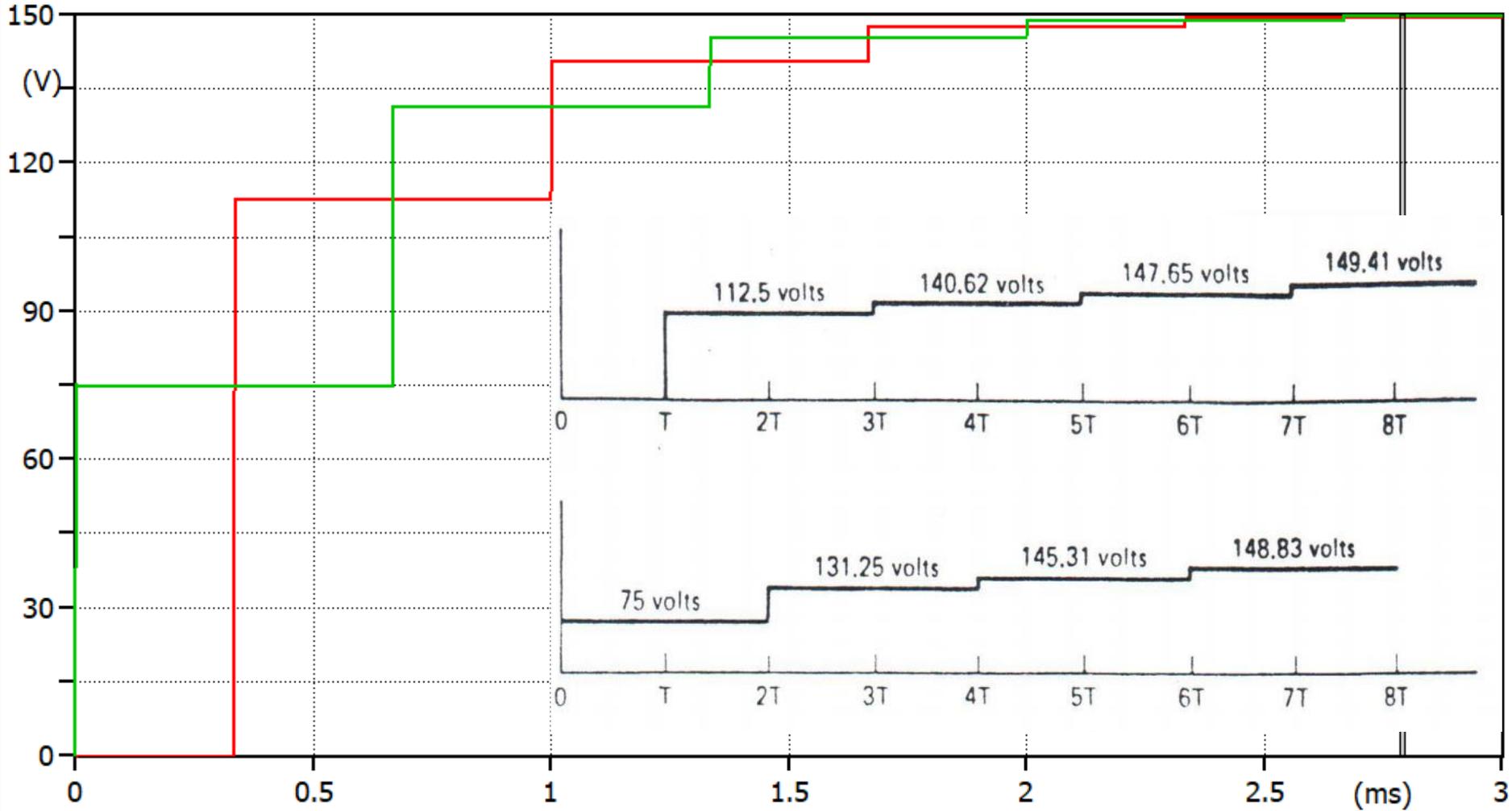
I_m - corretor no receptor



Comparação com o ATP



MC's PlotXY - Plot 1

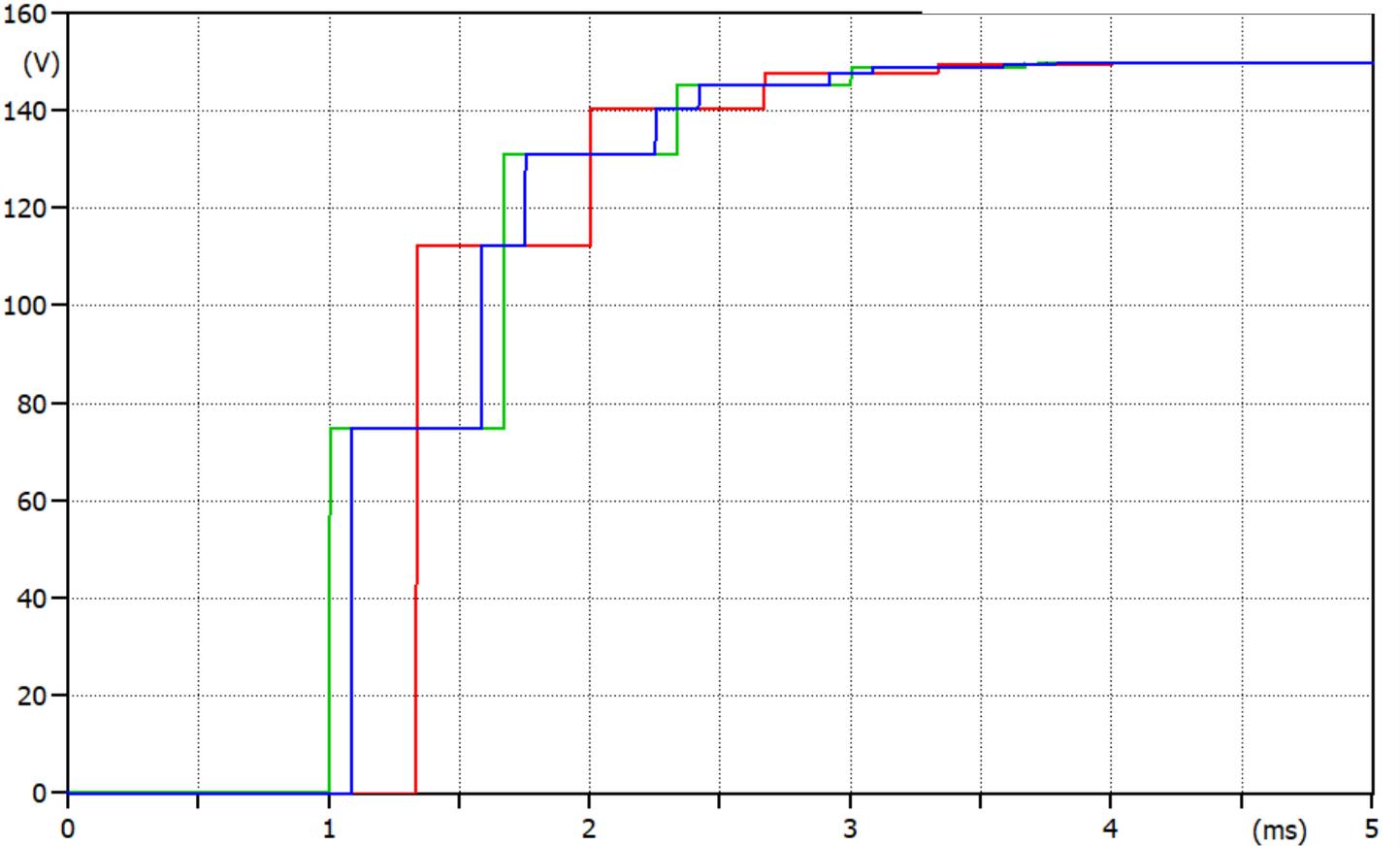
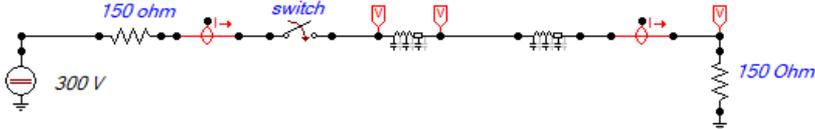


(file exemplo_aula.pl4; x-var t) v:XX0004 v:XX0003

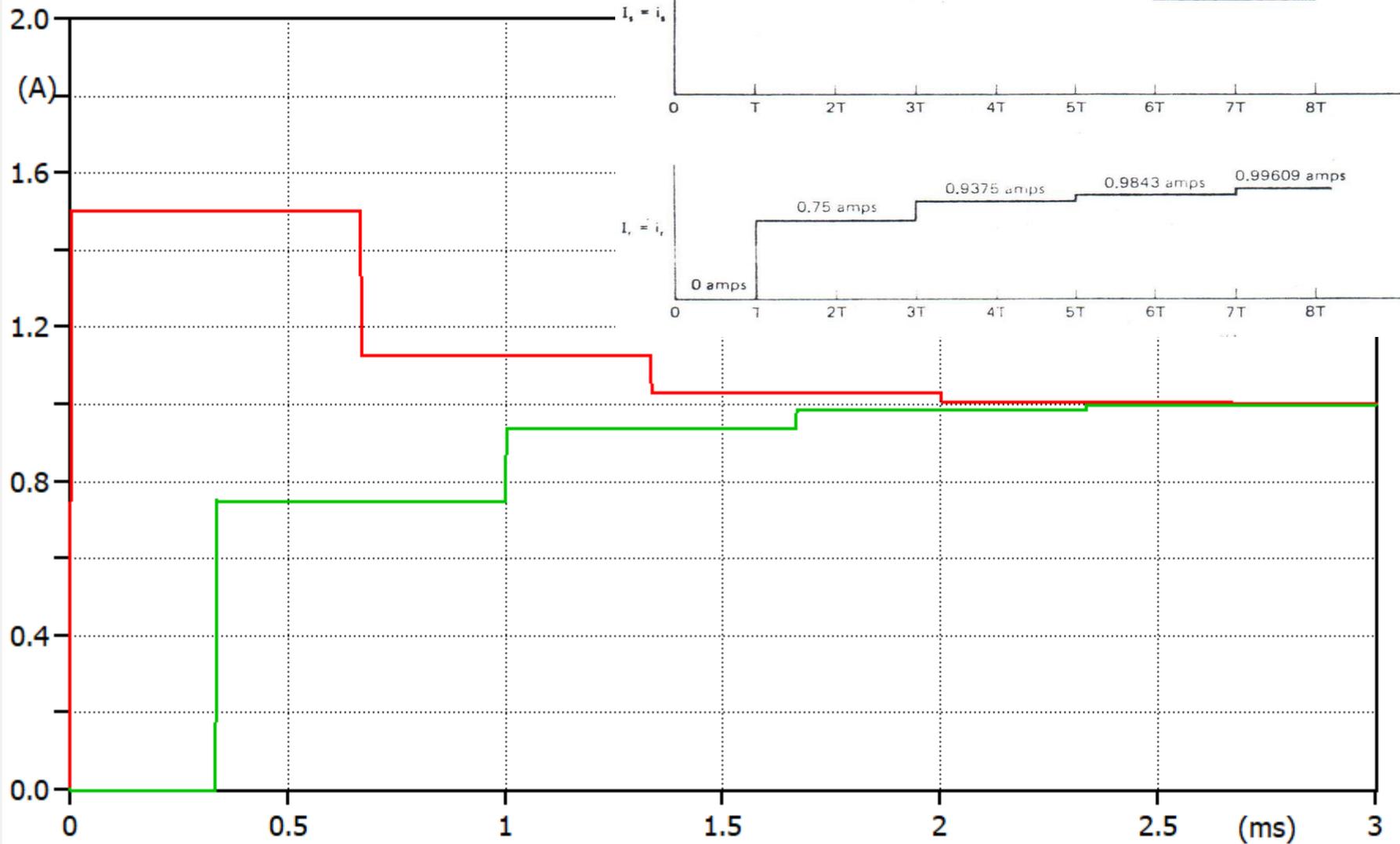
Cálculo da tensão em qualquer ponto da LT

LT
 $Z_c = 50 \text{ Ohm}$
 25km
 $3e8 \text{ m/s}$

LT
 $Z_c = 50 \text{ Ohm}$
 75 km
 $3e8 \text{ m/s}$

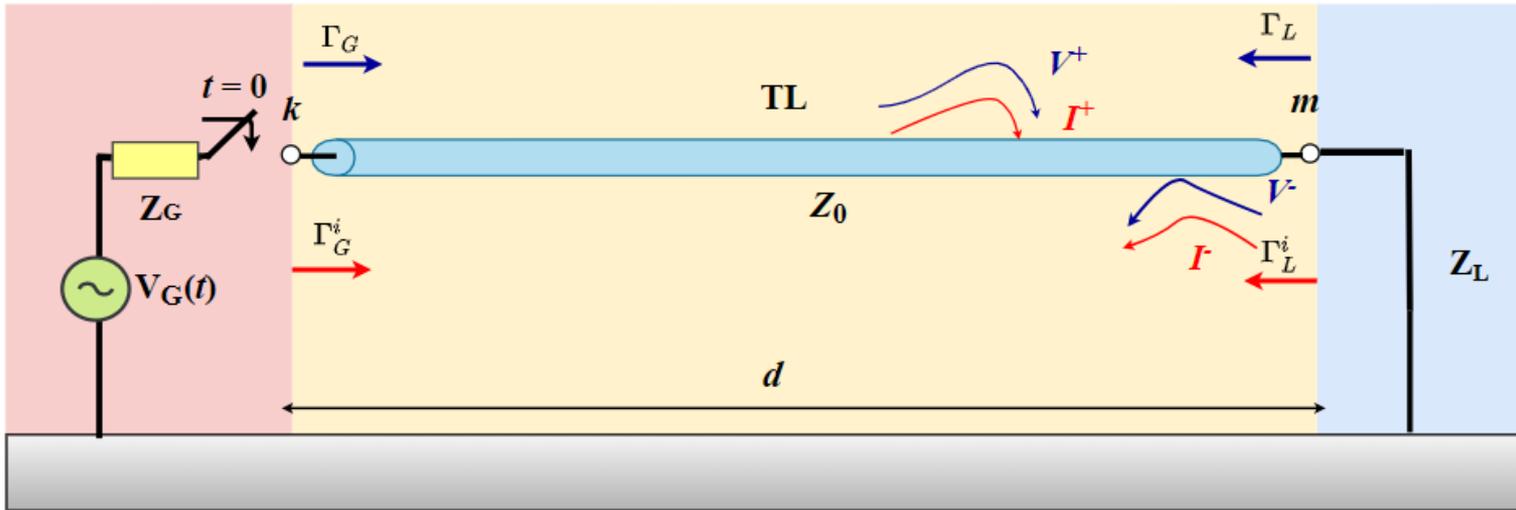


(file exemplo_aula.pl4; x-var t) v:XX0006 v:XX0005 v:XX0008



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

LT em curto



Coef. de reflexão para a tensão

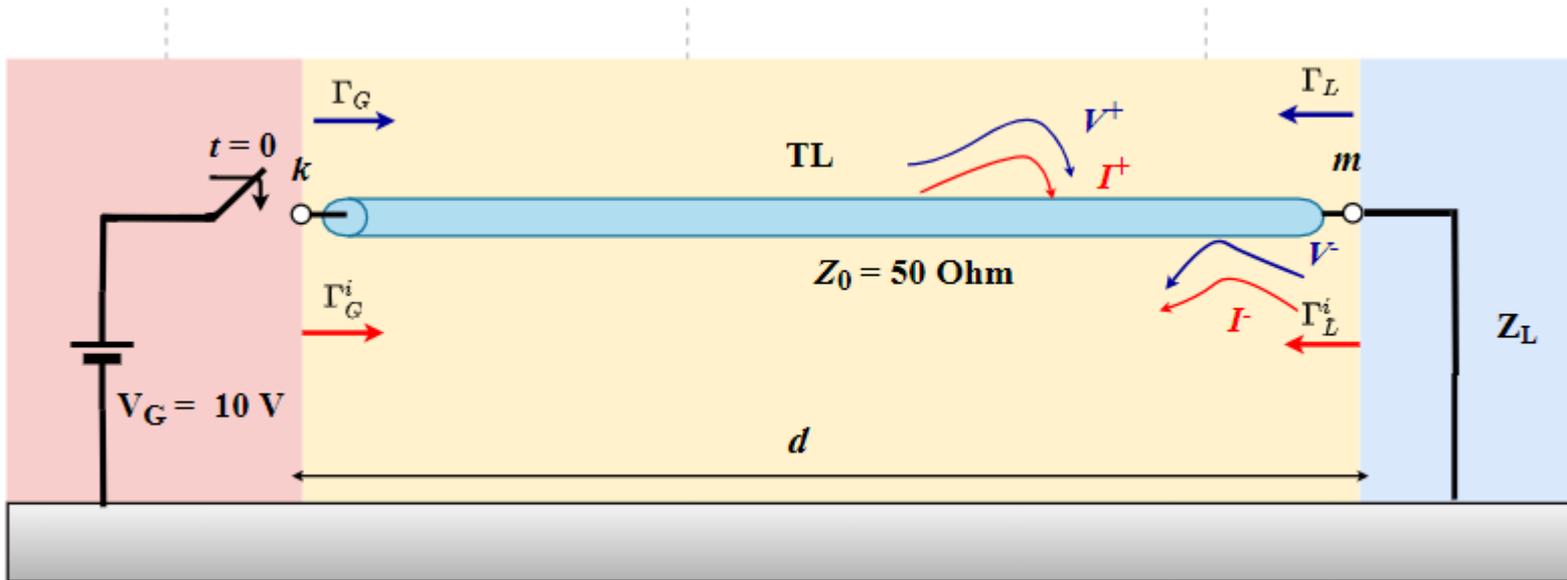
$$\Gamma_L = \frac{V^-}{V^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

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

Coef. de reflexão para a corrente

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

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



$$\Gamma_L = \frac{0 - Z_0}{0 + Z_0} = -1$$

$$\Gamma_L^i = \frac{Z_0 - Z_L}{Z_L + Z_0} = +1$$

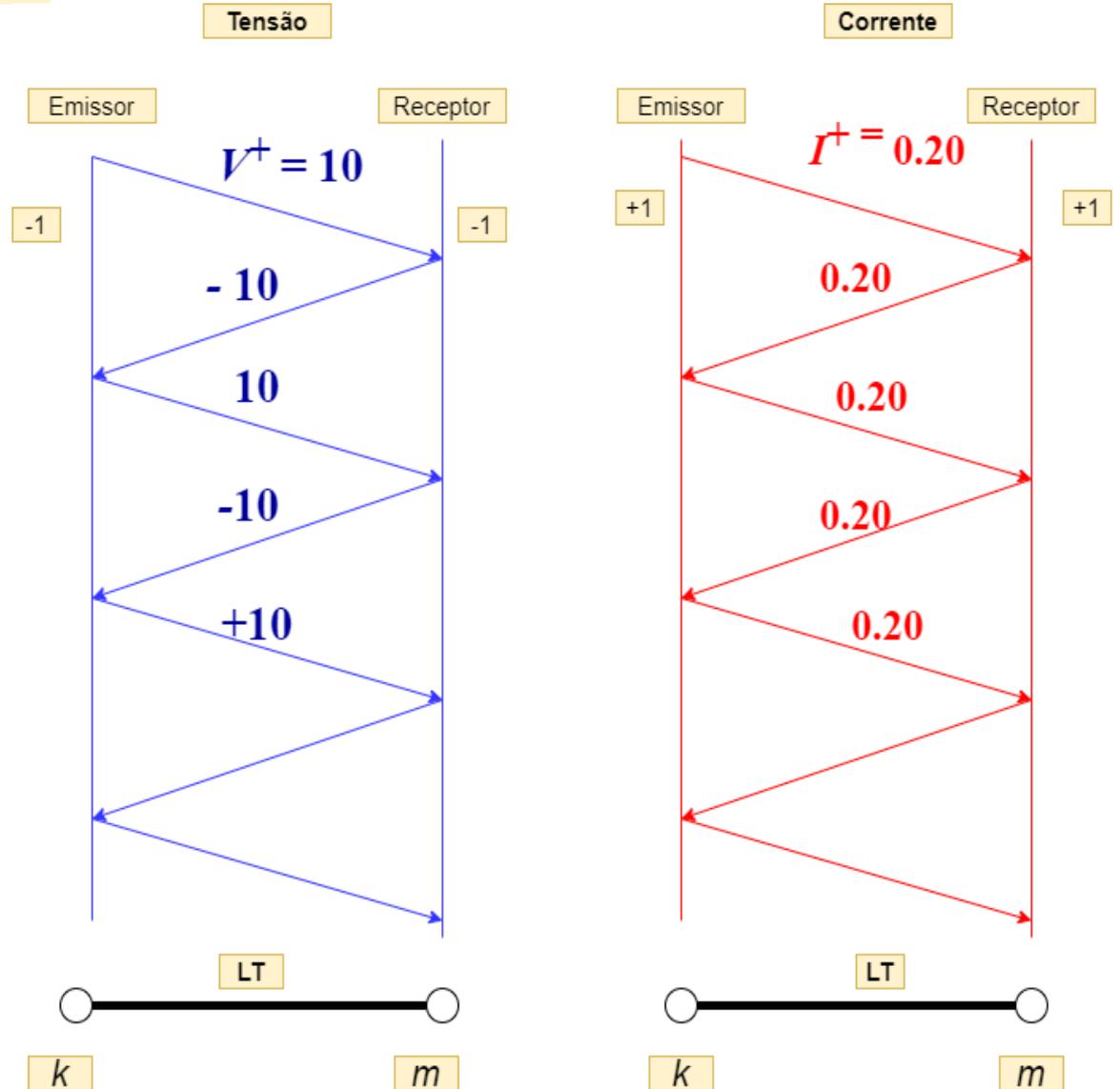
$$I^+ = \frac{V_G}{Z_G + Z_0} = \frac{10}{0 + 50} = 0,20 \text{ A}$$

$$\Gamma_G = \frac{0 - Z_0}{0 + Z_0} = -1$$

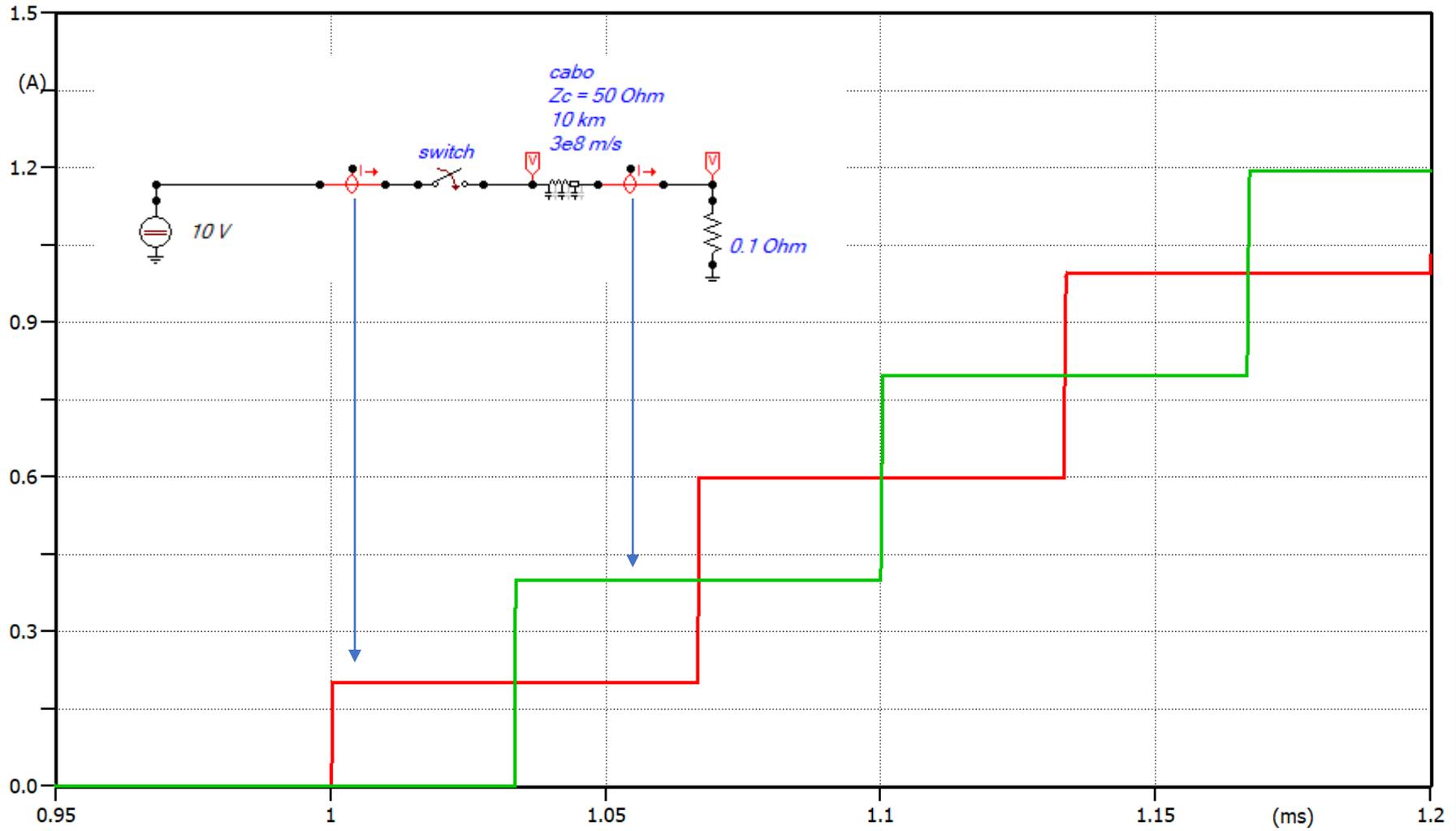
$$\Gamma_G^i = \frac{Z_0 - Z_G}{Z_G + Z_0} = +1$$

$$V^+ = \frac{Z_0}{Z_G + Z_0} V_G = \frac{50}{0 + 50} 10 = 10 \text{ V}$$

Diagrama de Lattice

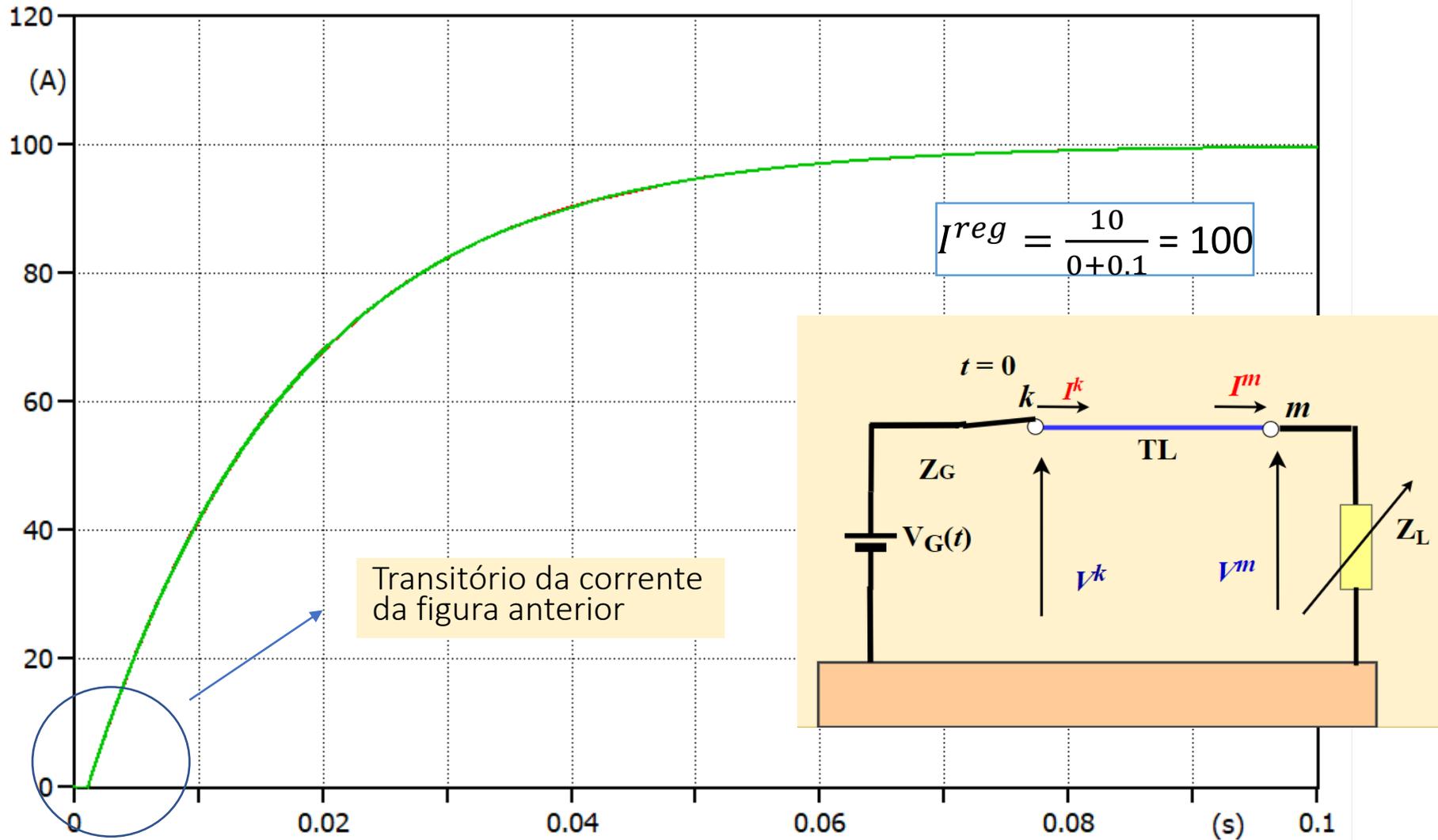


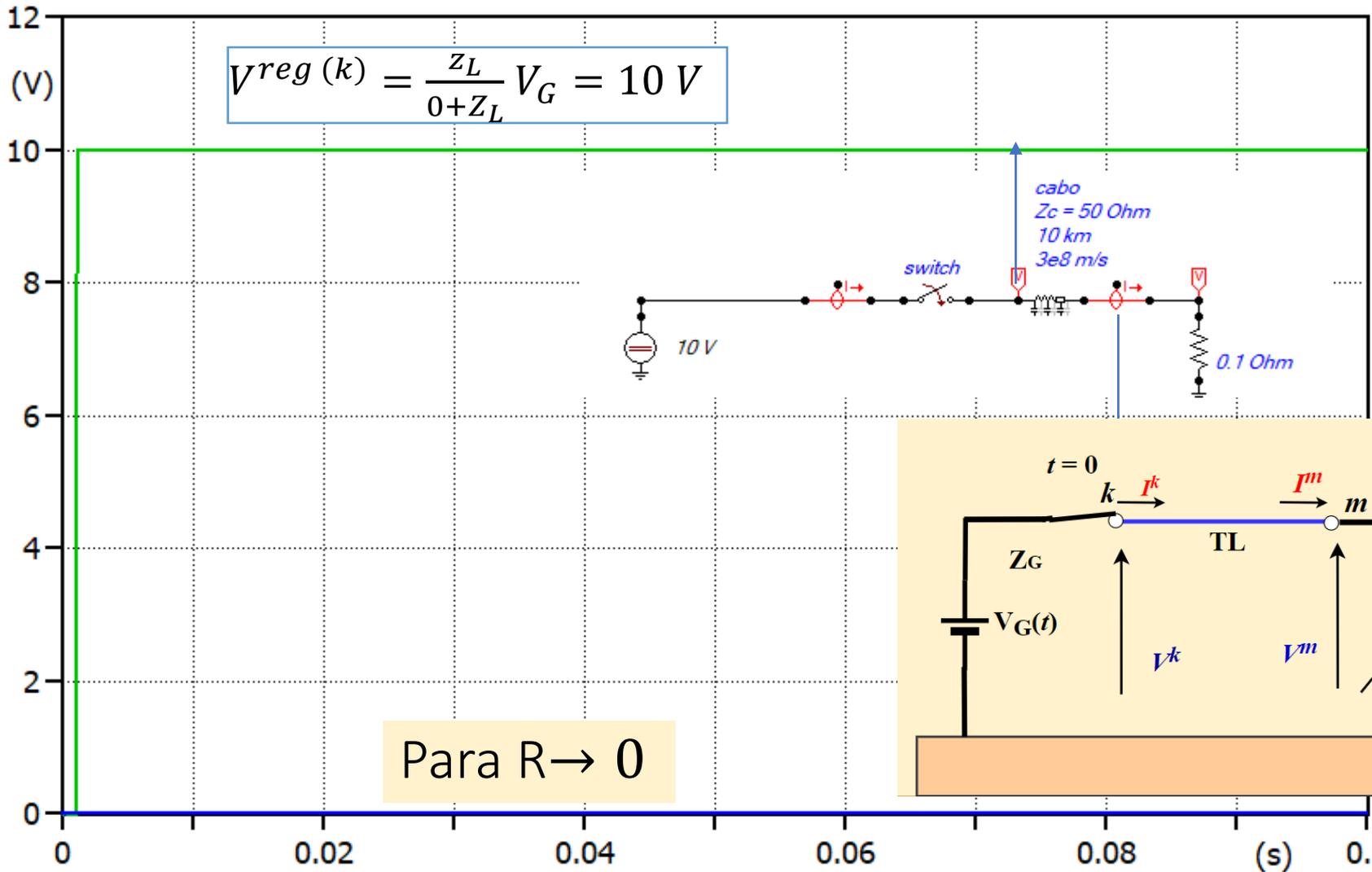
Em regime transitório



(file exemplo_aula.pl4; x-var t) c:XX0007-XX0004 c:XX0001-XX0006

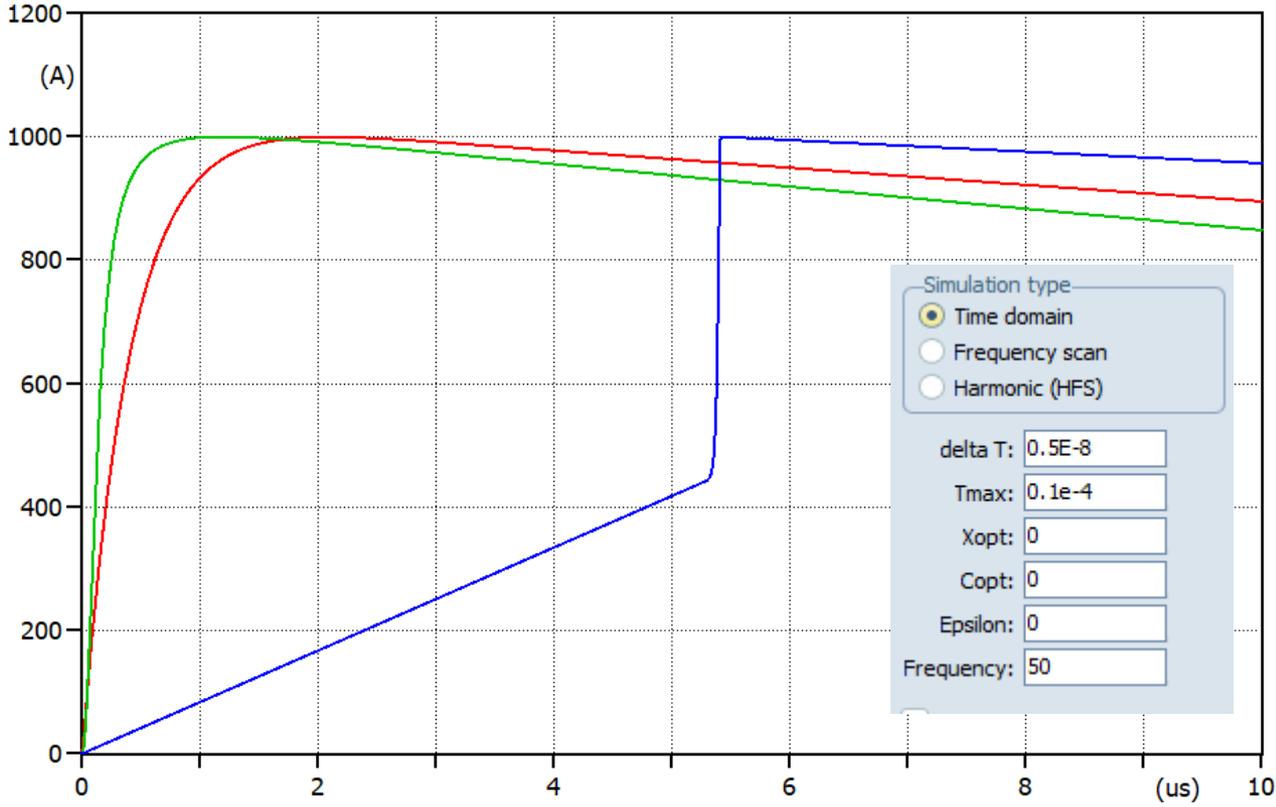
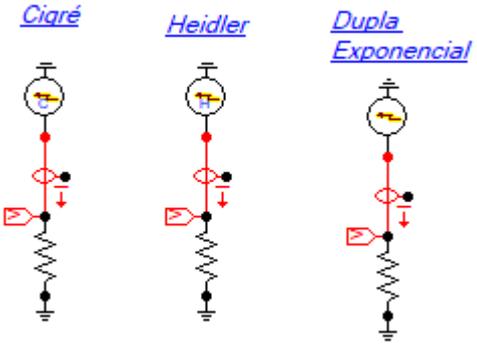
Em regime permanente





(file exemplo_aula.pl4; x-var t) v:XX0005 v:XX0006

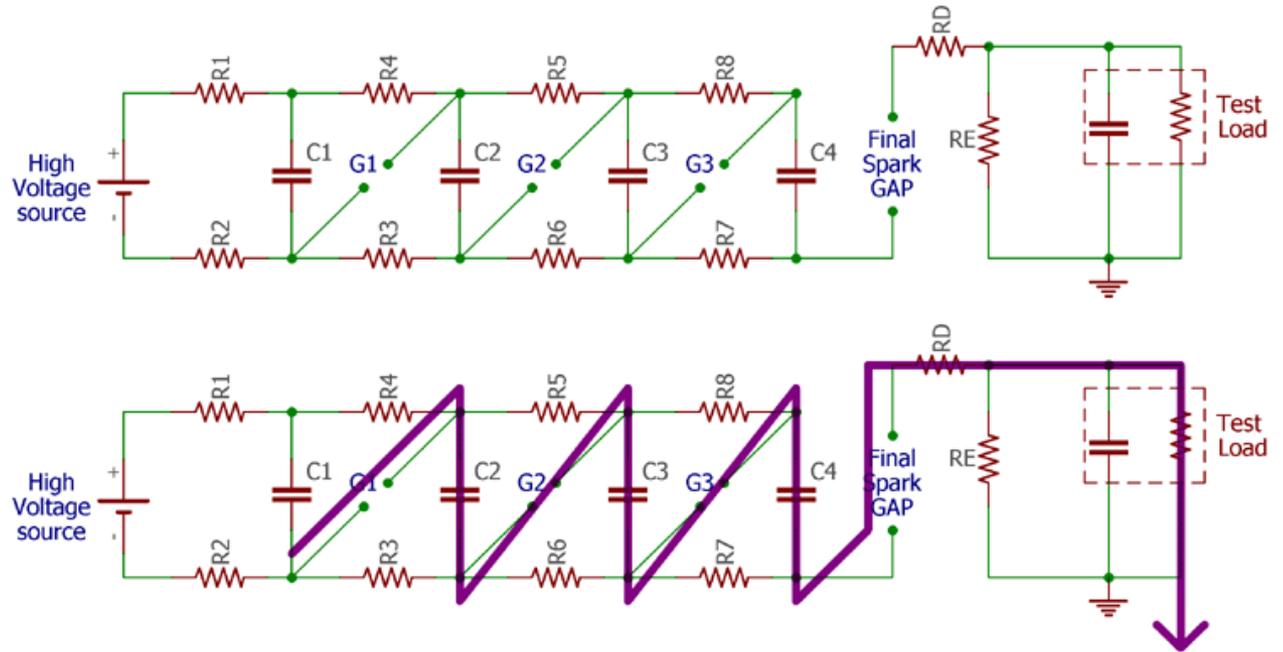
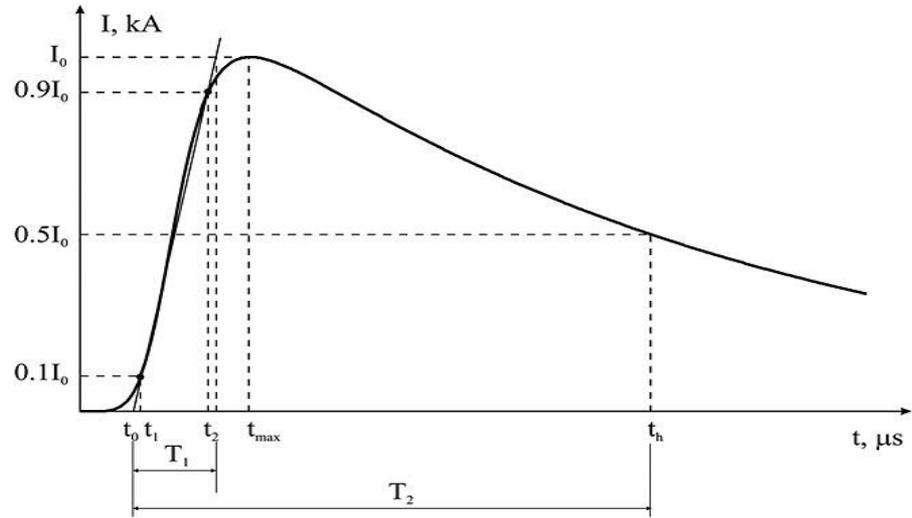
Descargas atmosféricas



(file ejemplo_descarga.pl4; x-var t) c:DUE -XX0001 c:HEIDLE-XX0003 c:CI -XX0005

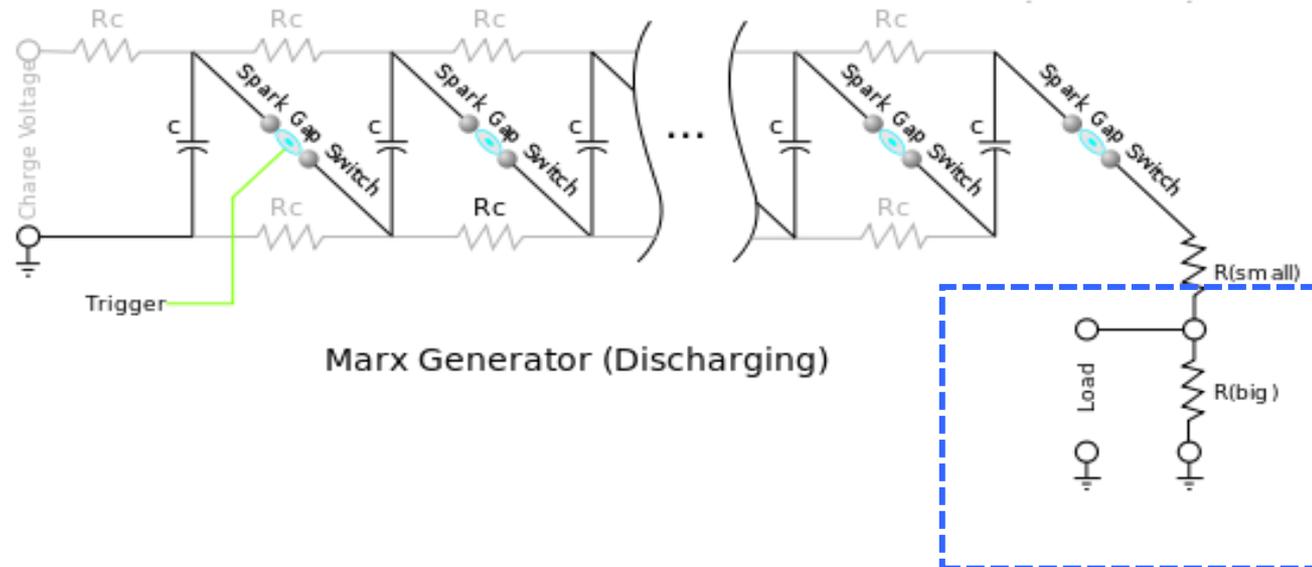
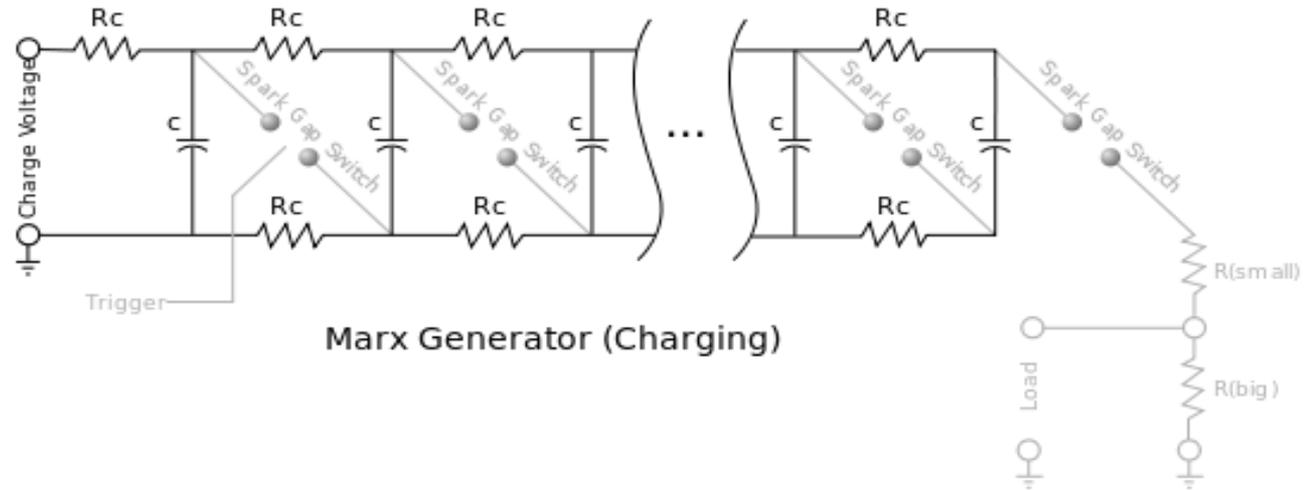
Função Dupla-Exponential

$$i(t) = \frac{I_0}{k} (e^{-at} - e^{bt})$$



Impulse Voltage Generator

Circuito de um gerador de impulso



No ATP

- Probes & 3-phase
- Branch Linear
- Branch Nonlinear
- Lines/Cables
- Switches
- Sources**
 - AC source (1&3)
 - DC type 11
 - Ramp type 12
 - Slope-Ramp type 13
 - Surge type 15**
 - Heidler type 15
 - Standler type 15
 - Cigré type 15
 - JACS source
 - AC Source modulated
 - Empirical type 1
 - AC Ungrounded
 - DC Ungrounded
 - Trapped charge source
- Machines
- Transformers
- MODELS
- JACS
- User Specified
- Steady-state
- Power system tools
- All standard comp...
- Add Objects



Component: SURGE

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Amplitude	Volt	10000	SU	1	
A	1/s	-14700			
B	1/s	-2470000			
Tstart	s	0			
Tstop	s	1000			

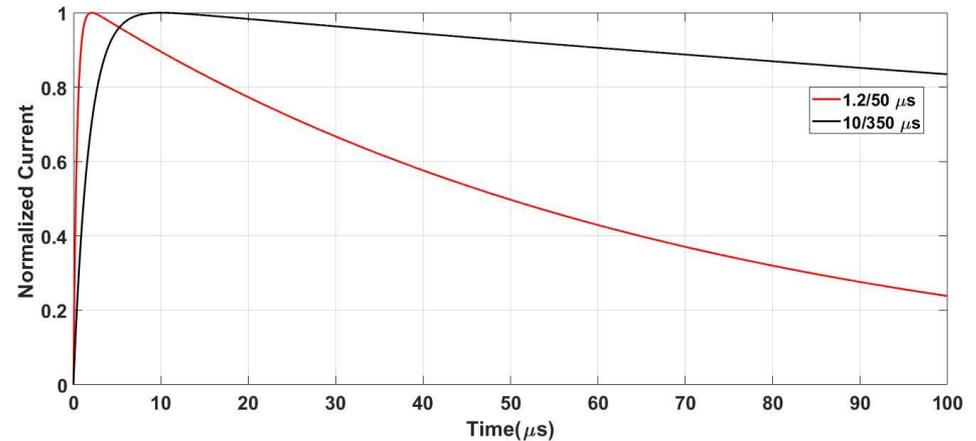
Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Type of source:
 Current
 Voltage

Hide

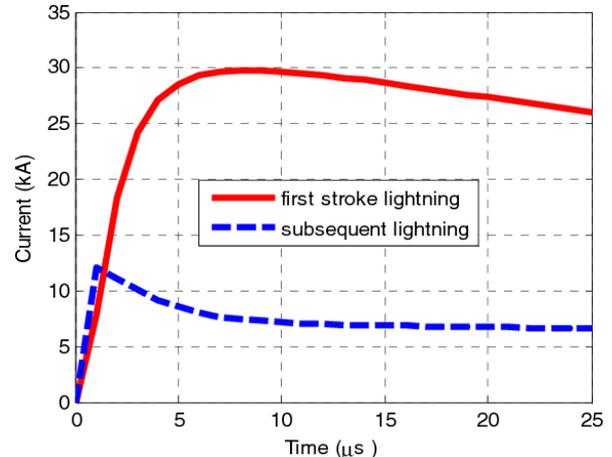
Edit definitions OK Cancel Help



Função de Heidler

Parameters	I_0	τ_1	τ_2	n	I_0	τ_1	τ_2	n
First stroke	28	1.8	95	2	--	--	--	--
Subsequent stroke	10.7	0.25	2.5	2	6.5	2	230	2

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} e^{-t/\tau_2}$$



- Probes & 3-phase
- Branch Linear
- Branch Nonlinear
- Lines/Cables
- Switches
- Sources**
 - AC source (1&3)
 - DC type 11
 - Ramp type 12
 - Slope-Ramp type 13
 - Surge type 15
 - Heidler type 15**
 - Standler type 15
 - Cigré type 15
- IACS source
- AC Source modulated
- Empirical type 1
- AC Ungrounded
- DC Ungrounded
- Trapped charge source

Component: HEIDLER

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Amplitude	Volt	10000
T_f	s	1.2E-6
tau	s	5E-5
n		2
T_start	s	0
T_stop	s	1000

NODE	PHASE	NAME
HEI	1	

Order: 0 Label:

Comment:

Type of source: Current Voltage Hide

Buttons: Edit definitions, OK, Cancel, Help

Como modelar funções mais complexas?

$$i(t) = \sum_1^N \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} (e^{-t/\tau_2})$$

Analytical Representation of Single- and Double-Peaked Lightning Current Waveforms

Alberto De Conti and Silvério Visacro, *Member, IEEE*

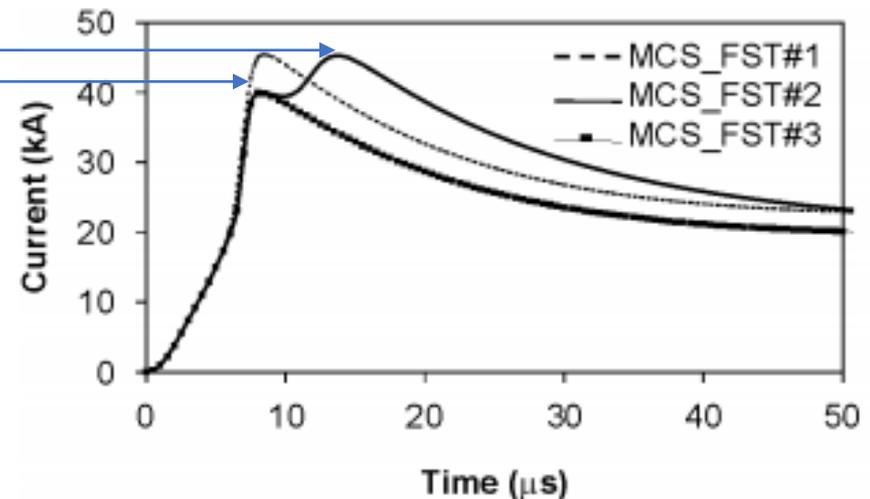


TABLE I

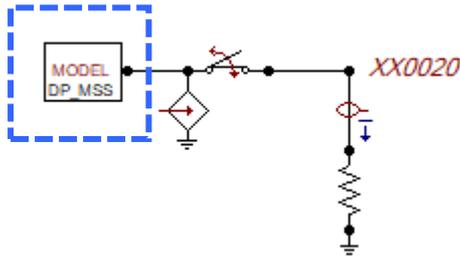
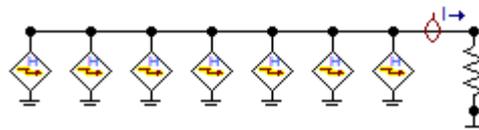
PARAMETERS USED TO SYNTHESIZE FIRST NEGATIVE STROKE CURRENTS MEASURED AT THE MORRO DO CACHIMBO STATION^a

k	MCS FST#1				MCS FST#2			
	I_{0k} (kA)	n_k	τ_{1k} (μ s)	τ_{2k} (μ s)	I_{0k} (kA)	n_k	τ_{1k} (μ s)	τ_{2k} (μ s)
1	6	2	3	76	6	2	3	76
2	5	3	3.5	10	5	3	3.5	10
3	5	5	4.8	30	5	5	4.8	30
4	8	9	6	26	8	9	6	26
5	22	21	7	23.2	16.5	30	7	23.2
6	20	2	70	200	17	2	70	200
7	-	-	-	-	12	14	12	26

^aTo obtain the curve MCS_FST#3 of Fig. 2(a), simply make $I_{0k} = 0$ in the curve MCS_FST#2.



No ATP



- Probes & 3-phase
- Branch Linear
- Branch Nonlinear
- Lines/Cables
- Switches
- Sources
- Machines
- Transformers
- MODELS**
 - Default model
 - Files (sup/mod)...
 - Type 94
 - Write Max/Min
 - Show Max/Min
 - Write MonteCarlo
- IACS
- User Specified
- Steady-state
- Power system tools
- All standard comp...
- Add Objects

MODEL: DEFAULT

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
d1		1	i1	1	
d2		1	i2	1	
			o1	1	
			o2	1	

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Models Library

Mgdel: DEFAULT Edit Use As: DEFAULT Record

Hide Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Colocar a fonte de corrente

The image shows a software interface for configuring a current source. On the left, a menu is open with 'Sources' selected, and 'TACS source' is highlighted in the sub-menu. A circuit diagram shows a series of nodes with a current source symbol at the end. On the right, the 'Component: TACSSOUR' dialog box is open, showing the 'Attributes' tab with a table of parameters and configuration options.

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
TStart	s	0	TACS	1	
TStop	s	1000			

Component: TACSSOUR

Attributes

Order: 0 Label:

Comment:

Type of source:

Current Voltage

NumPh 1

Buttons: Edit definitions, OK, Cancel, Help

```

Model Editor
File Edit View Debug Done Help
1 MODEL DEFAULT
2 DATA d1,d2
3 INPUT i1,i2
4 OUTPUT o1,o2
5 VAR o1,o2
6 INIT
7   o1:=0
8   o2:=1
9 ENDINIT
10 EXEC
11   o1:=(i1-i2)*t
12   o2:=sin(o1)
13 ENDEXEC
14 ENDMODEL
1:1 Modified

```

```

Model Editor
File Edit View Debug Done Help
1 MODEL DP_MCS
2 OUTPUT Itotal
3 VAR Itotal, I0[1..7],n[1..7],t1[1..7],t2[1..7],Eta[1..7],I[1..7],k
4 INIT
5   I0[1..7]:=[6,5,5,8,16.5,17,12]*1E3
6   n[1..7]:=[2,3,5,9,30,2,14]
7   t1[1..7]:=[3,3.5,4.8,6,7,70,12]*1E-6
8   t2[1..7]:=[76,10,30,26,23.2,200,26]*1E-6
9 ENDINIT
10 EXEC
11   k:=1
12 WHILE k<=7 DO
13   Eta[k]:=exp(-(t1[k]/t2[k])*(n[k]*t2[k]/t1[k])** (1/n[k]))
14   I[k]:=(I0[k]/Eta[k])*((t/t1[k])**n[k])*exp(-t/t2[k])/(1+(t/t1[k])**n[k])
15   k:=k+1
16 ENDWHILE
17 Itotal:=I[1]+I[2]+I[3]+I[4]+I[5]+I[6]+I[7]
18 ENDEXEC
19 ENDMODEL
1:1 Modified

```

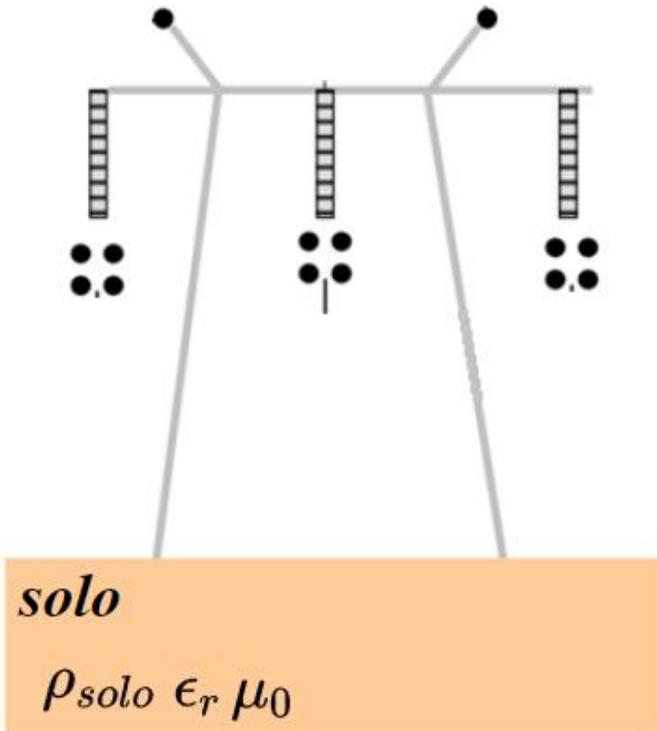
TABLE I
PARAMETERS USED TO SYNTHESIZE FIRST NEGATIVE STROKE CURRENTS MEASURED AT THE MORRO DO CACHIMBO STATION^a

k	MCS FST#1				MCS FST#2			
	I_{0k} (kA)	n_k	τ_{1k} (μ s)	τ_{2k} (μ s)	I_{0k} (kA)	n_k	τ_{1k} (μ s)	τ_{2k} (μ s)
1	6	2	3	76	6	2	3	76
2	5	3	3.5	10	5	3	3.5	10
3	5	5	4.8	30	5	5	4.8	30
4	8	9	6	26	8	9	6	26
5	22	21	7	23.2	16.5	30	7	23.2
6	20	2	70	200	17	2	70	200
7	-	-	-	-	12	14	12	26

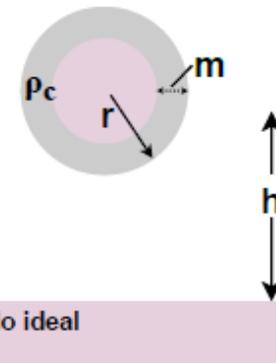
^aTo obtain the curve MCS_FST#3 of Fig. 2(a), simply make $I_{07} = 0$ in the curve MCS_FST#2.

Linhas de transmissão trifásicas

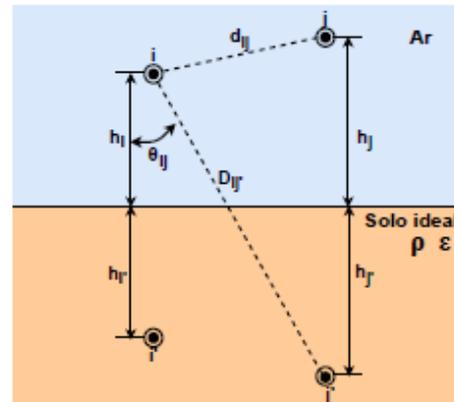
$$Z_{long}(\omega) = Z_{int}(\omega) + Z_{ext}(\omega) + Z_{solo}(\omega)$$



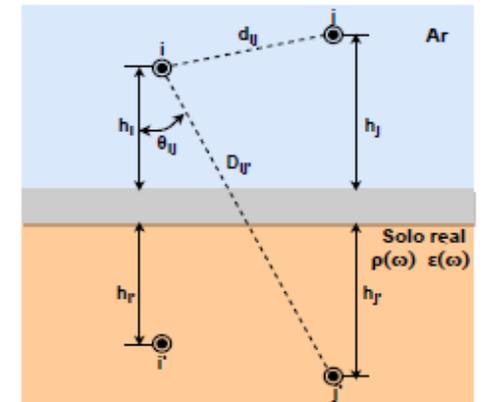
(a)



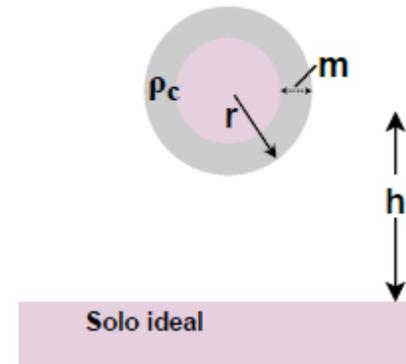
(b)



(c)



Impedância interna- Efeito Skin

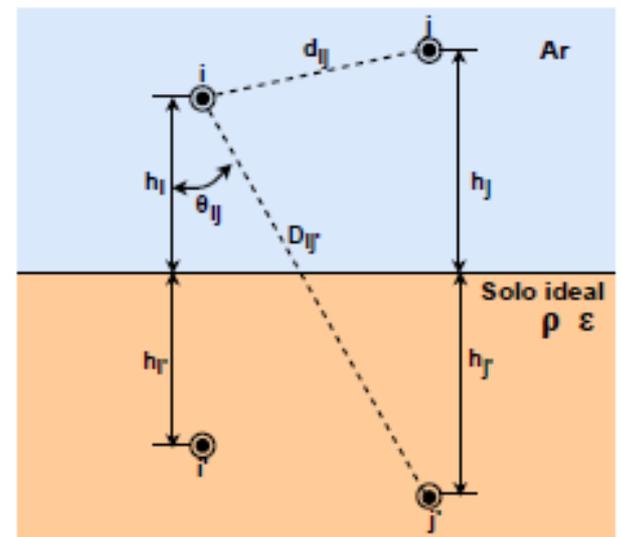


2004). A resistência efetiva juntamente com a reatância indutiva interna resulta na impedância interna $Z_{int}(\omega)$ de uma LT. Para seu cálculo, para um condutor sólido e cilíndrico, empregam-se as funções de Bessel de primeira ordem, dada por (GATOUS, 2005):

$$Z_{int}(\omega) = j \frac{\omega \mu}{2\pi r} \left[\frac{ber(u) + jbei(u)}{(\frac{\sqrt{2}}{m})ber'(u) + jbei'(u)} \right] [\Omega/m]; \quad m = \sqrt{\frac{2\rho_c}{\omega\mu}} \quad [m]; \quad u = \frac{r\sqrt{2}}{m} \quad [m] \quad (2)$$

Na Eq. (2), $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular [rad/s], f é a frequência da corrente alternada em [Hz], μ é a permeabilidade do condutor ($\mu = \mu_r \mu_0$) da qual $\mu_r = 1$ para condutores metálicos e μ_0 é permeabilidade magnética do vácuo $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m. A variável m é a profundidade pelicular de penetração, ρ_c é a resistividade do condutor em [$\Omega \cdot m$], r é o raio do condutor [m], conforme mostrado na Figura 1-(a) e $ber(u)$ e $bei(u)$ são as funções modificadas de Bessel e as suas derivadas ($ber'(u)$ e $bei'(u)$). Em um sistema de n fases, a impedância interna é escrita na forma matricial [$Z_{int}(\omega)$] ($n \times n$) formada apenas por coeficientes próprios na diagonal principal,

Impedância Externa

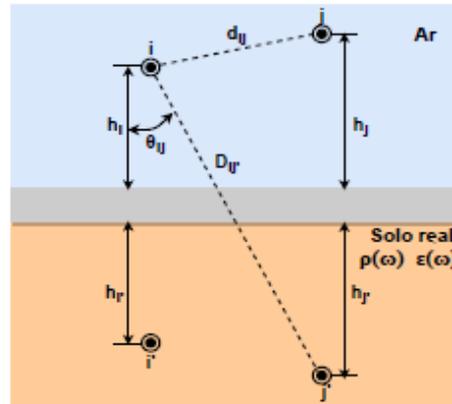


As correntes percorrem longitudinalmente os condutores de fase de uma dada LT e produzem um campo magnético variante no tempo e dependente da frequência angular da fonte de excitação. O campo magnético gerado por um dado condutor está concatenado com os condutores vizinhos, resultando em uma impedância externa $Z_{ext}(\omega)$. Em um sistema multifásico de n fases, a impedância externa é expressa na forma matricial $[Z_{ext}(\omega)]$ ($n \times n$) cujos coeficientes próprios e mútuos dos condutores i e j são calculados por (MARTINEZ-VELASCO, 2009):

$$Z_{ext_{ii}}(\omega) = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{2h_i}{r_i} \right) [\Omega/m]; \quad Z_{ext_{ij}}(\omega) = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D_{ij}'}{d_{ij}} \right) [\Omega/m] \quad (4)$$

Sendo r_i o raio do condutor i [m], h_i a altura do condutor i em relação ao solo [m], d_{ij} a distância do condutor i ao condutor j [m] e D_{ij}' a distância do condutor i a imagem do condutor adjacente j [m], conforme a Figura 1-(b).

Efeito Solo



O acoplamento magnético da linha com o solo é representado por impedâncias próprias e mútuas. Os elementos mútuos aparecem devido ao fato do solo não ser um condutor ideal. Por meio de diversos estudos, os efeitos do solo sobre os parâmetros longitudinais podem ser calculados por diferentes equações que podem ser aplicadas em LT aéreas (DOMMEL, 1996). As impedâncias próprias e mútuas de circuitos com retorno pelo solo são iguais às impedâncias próprias e mútuas para um circuito que envolve um solo ideal, acrescida de um termo de correção que é aplicável para as impedâncias (FUCHS, 1979). A impedância do solo em um sistema multifásico de n fases, é expressada na forma matricial $[Z_{solo}(\omega)]$ ($n \times n$).

O termo de correção de Carson considera que os condutores da linha são infinitos e que a permissividade relativa do solo é 1. Esse termo foi denominado impedância do solo. Por consequência deste efeito as impedâncias próprias e mútuas são representadas como sendo:

$$Z_{solo}(\omega) = \Delta R_{solo}(\omega) + j\Delta X_{solo}(\omega) \quad [\Omega/m] \quad (5)$$

Efeito Solo

Onde, $\Delta R_{solo}(\omega)$ é o fator de correção dos termos da resistência considerando o efeito do solo e $\Delta X_{solo}(\omega)$ é o fator de correção dos termos da indutância considerando o efeito do solo. Os termos de correção $\Delta R_{solo}(\omega)$ e $\Delta X_{solo}(\omega)$ são funções de um ângulo θ ($\theta = 0$ para impedâncias próprias, e $\theta = \theta_{ik}$ para impedâncias mútuas) e também de um parâmetro α definido como (DOMMEL, 1996):

$$\alpha(\omega) = 4\pi\sqrt{5}\cdot 10^{-4}D\sqrt{\frac{\omega}{2\pi\rho}} \quad (6)$$

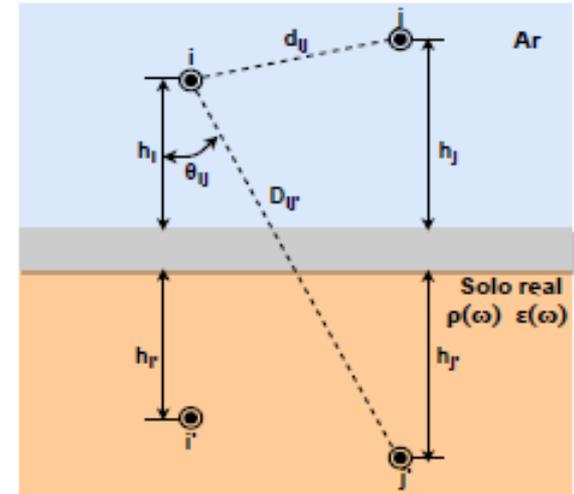
Na Eq. (6), $D = D_{ij} = D_{ji}$ [m] para impedâncias mútuas Z_{ij} e Z_{ji} , $D = 2h_i$ [m] para a impedância própria Z_{ii} e $D = 2h_j$ [m] para a impedância própria Z_{jj} . Para $\alpha \leq 5$, os termos de correção de Carson podem ser escritos como (DOMMEL, 1996):

$$\Delta R_{solo}(\omega) = 4\omega \cdot 10^{-4} \left\{ \frac{\pi}{8} - b_1\alpha \cos \theta + b_2[(c_2 - \ln \alpha)\alpha^2 \cos 2\theta + \theta\alpha^2 \sin 2\theta] + b_3\alpha^3 \cos 3\theta - d_4\alpha^4 \cos 4\theta - b_5\alpha^5 \cos 5\theta + b_6[(c_6 - \ln \alpha)\alpha^6 \cos 6\theta + \dots] \right\} \quad (7)$$

$$\Delta X_{solo}(\omega) = 4\omega \cdot 10^{-4} \left\{ \frac{1}{2}(0,6159315 - \ln \alpha) + b_1\alpha \cos \theta - d_2\alpha^2 \cos 2\theta + b_3\alpha^3 \cos 3\theta - b_4[(c_4 - \ln \alpha)\alpha^4 \cos 4\theta + \theta\alpha^4 \sin 4\theta] + b_5\alpha^5 \cos 5\theta - d_6\alpha^6 \cos 6\theta + \dots \right\} \quad (8)$$

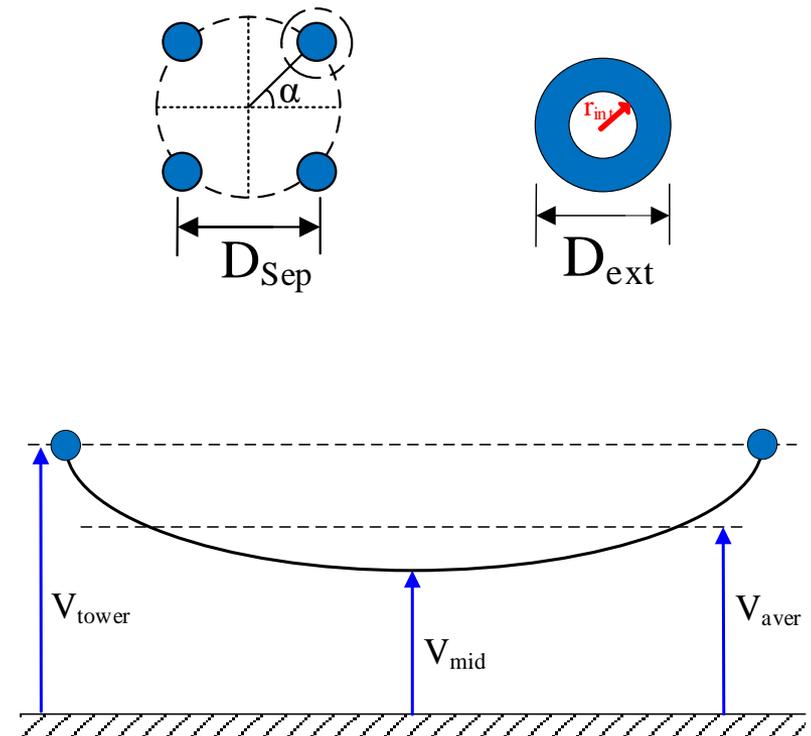
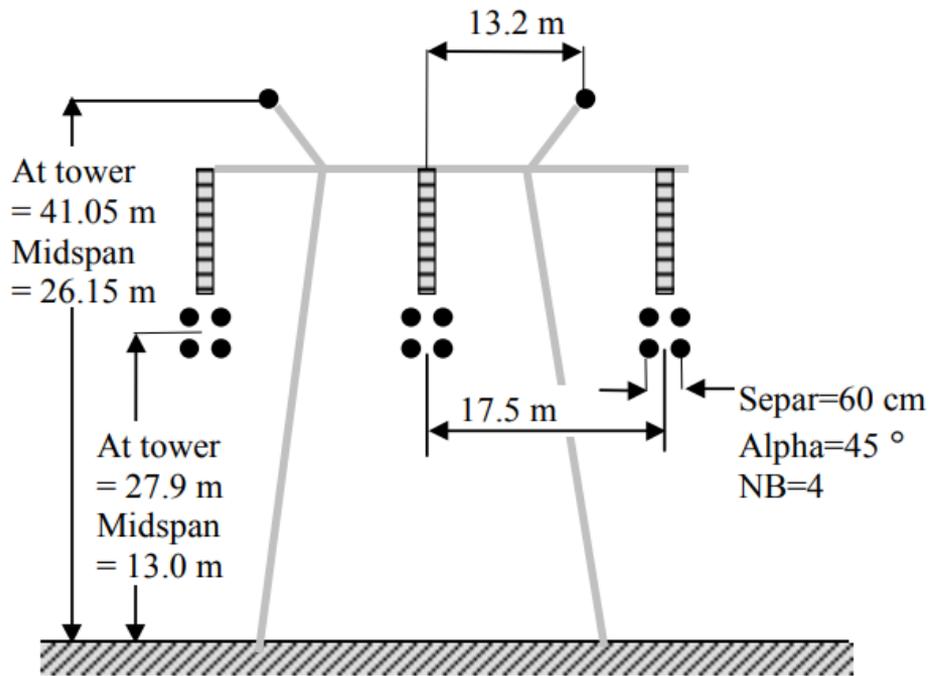
Os coeficientes b_i , c_i e d_i das equações (7) e (8) são valores constantes que são obtidos utilizando as seguintes expressões:

$$b_i = |b_{i-2}| \frac{\text{sign}}{i(i+2)}; \quad c_i = c_{i-2} + \frac{1}{i} + \frac{1}{i+2}; \quad d_i = \frac{\pi}{4} b_i \quad (9)$$



Simulação de manobras em linhas de transmissão.

❖ Energização de uma Linha de transmissão trifásica



$$h_{aver} = \frac{2}{3} h_{mid} + \frac{1}{3} h_{tower}$$

Component: ACSOURCE

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
AmplitudeA	Volt	10000	AC	1	
Frequency	Hz	50	ACNEG	1	
PhaseAngleA	degrees	0	Internal	1	
StartA	sec	-1			
StopA	sec	100			

Order: 0 Label:

Comment:

Current
 Single
 3-phase
 3*1-phase
 Voltage

Degrees
 Seconds
 Peak L-G
 RMS L-G
 RMS L-L
 Grounded
 Floating

Hide

Edit definitions OK Cancel Help



Probes & 3-phase

Branch Linear

Branch Nonlinear

Lines/Cables

Switches

Sources

Machines

Transformers

MODELS

IACS

User Specified

Steady-state

Switch time controlled

Switch time 3-ph

Switch voltage contr.

Diode (type 11)

Valve (type 11)

Triac (type 12)

IACS switch (type 13)

Measuring



Component: SWIT_3XT

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
T-cl_1	s	-1	IN1	3	
T-op_1	s	1000	OUT1	3	
T-cl_2	s	-1			
T-op_2	s	1000			
T-cl_3	s	-1			
T-op_3	s	1000			
Imar	Amps	0			

Order: 0 Label:

Comment:

Output: Hide

Edit definitions OK Cancel Help



Probes & 3-phase ▸

- Probe Voltage
- Probe Line volt.
- Probe Branch volt.
- Probe Current
- Probe IACS
- Probe MODELS
- Probe Flux-linkage ▸
- COMTRADE ▸
- Splitter (3 phase)
- Collector
- Transp1 ABC-BCA
- Transp2 ABC-CAB
- Transp3 ABC-CBA
- Transp4 ABC-ACB
- ABC Reference
- DEF Reference

Branch Linear ▸

Branch Nonlinear ▸

Lines/Cables ▸

Switches ▸

Sources ▸

Machines ▸

Transformers ▸

MODELS ▸

IACS ▸

User Specified ▸

Steady-state ▸

Power system tools ▸

All standard comp...

Add Objects ▸

Open voltage probe

#Phases: 3

Monitor:

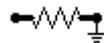
- A-1
- B-2
- C-3
- D-4
- E-5
- F-6

Node:

Steady-state

Enable

OK Help



Component: RESISTOR

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
R	Ohm	1000000	From	ABC	X0002
			To	ABC	

Order: 0 Label:

Comment:

Output: 0 - No

Hide

\$Vintage.1

NumPh: 3

Edit definitions OK Cancel Help

Simulação de manobras em linhas de transmissão.

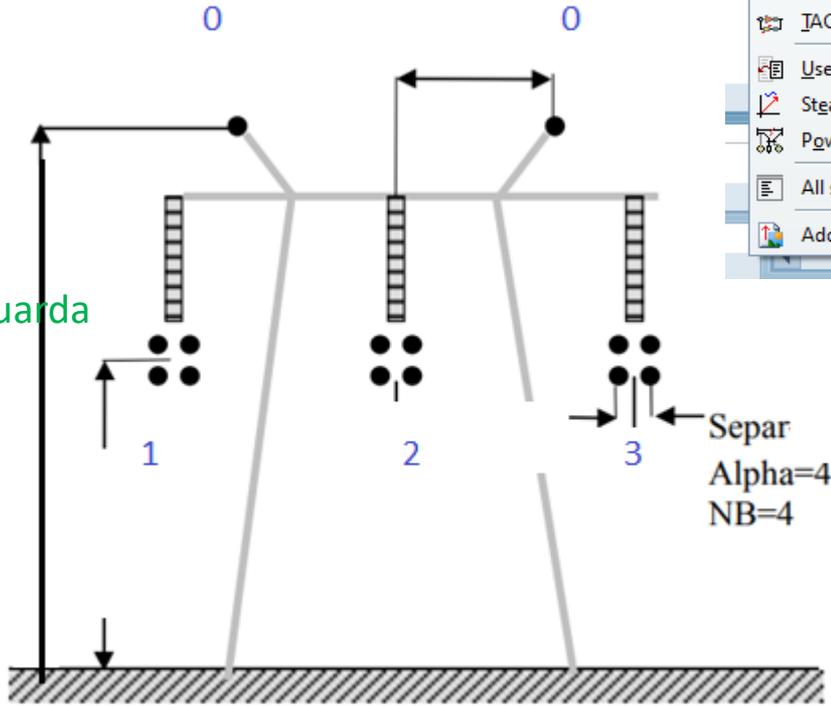
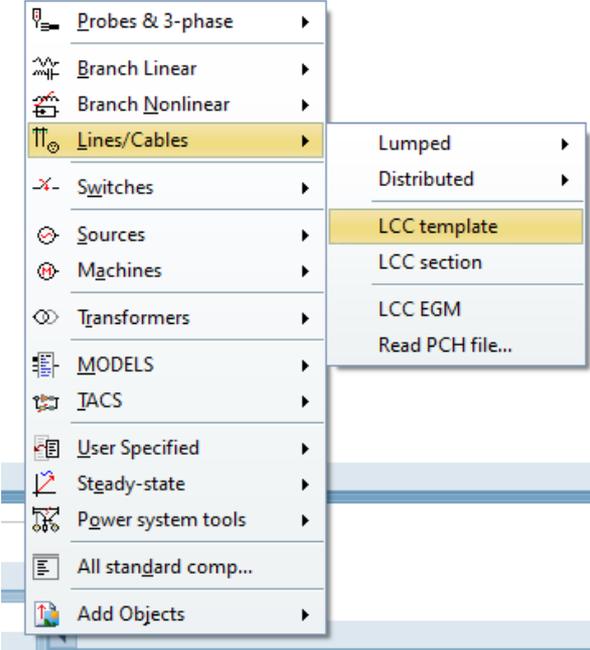
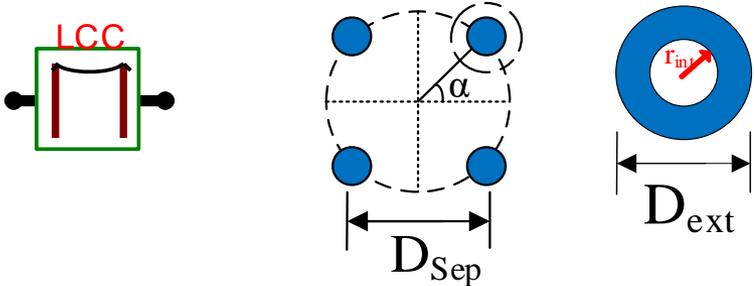
❖ Energização de uma Linha de transmissão trifásica

Condutores de fase

- Longitude
- Tensão

Condutores de fase

- Resistencia
- Raio_in
- Raio_ext
- Condutores de cabo de guarda
- Resistencia
- Raio_in
- Raio_ext



Simulação de manobras em linhas de transmissão.

Line/Cable Data: 500kV

Model | Data | Nodes

System type

Name: 500kV

Overhead Line

#Ph: 3

Standard data

Rho [ohm*m] 1000

Freq. init [Hz] 0.1

Length [km] 100

Model

Type

Bergeron

PI

JMarti

Noda

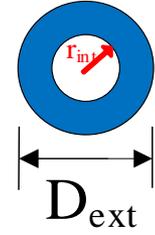
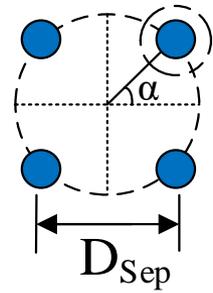
Semlyen

Comment: CS-525 KV CAND-MELO 4XDOVE PR:1XACO3/8 E OPGW

Order: 0

Label:

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify



Line/Cable Data: 500kV

Model | Data | Nodes

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.4335	1.177	0.1181	-10.8	31.62	12.23	45.7	45	4
2	2	0.4335	1.177	0.1181	0	32.62	12.83	45.7	45	4
3	3	0.4335	1.177	0.1181	10.8	31.62	12.23	45.7	45	4
4	0	0.36	0.67	0.724	9.05	42.25	23.7	0	0	0
5	0	0.36	0.457	0.724	-9.05	42.25	23.7	0	0	0

0 indica o para-raio

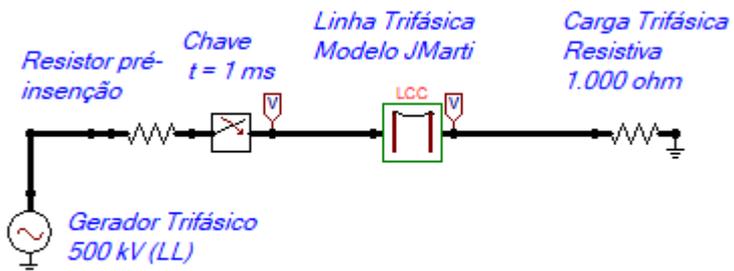
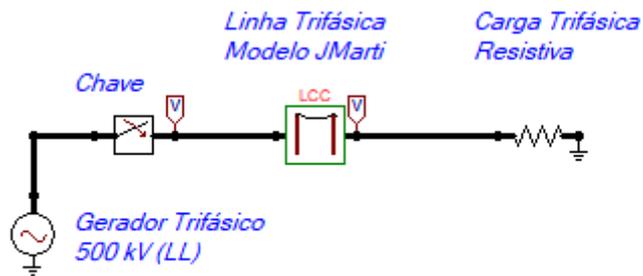
A diagram of a transmission line sag. It shows a blue circle at the top left and another at the top right, representing conductors. A curved line represents the sag between them. Vertical arrows indicate the tower height V_{tower} at the left end, the midspan height V_{mid} at the lowest point of the sag, and the average height V_{aver} at the right end. A yellow box highlights the value '0' in the table above, with an arrow pointing to the text '0 indica o para-raio'.

Add row | Insert copy row | Delete last row | Delete this row | Move

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

Simulação de manobras em linhas de transmissão.

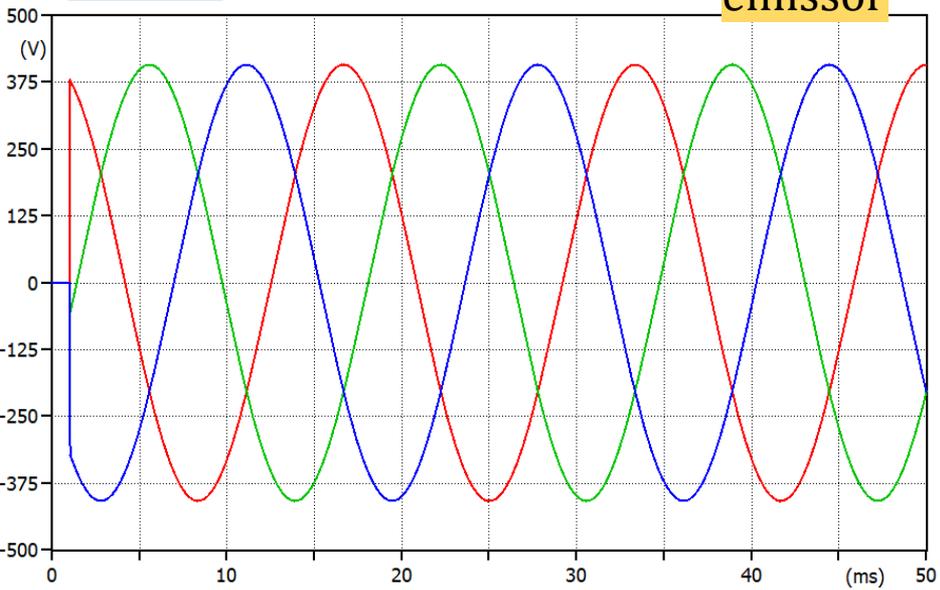
- ❖ Exemplo 8: Energização
- ❖ de uma Linha de transmissão trifásica



Energização tripolar da LT. Em $t=0.05s$ fecha o interruptor e da origem ao transitório

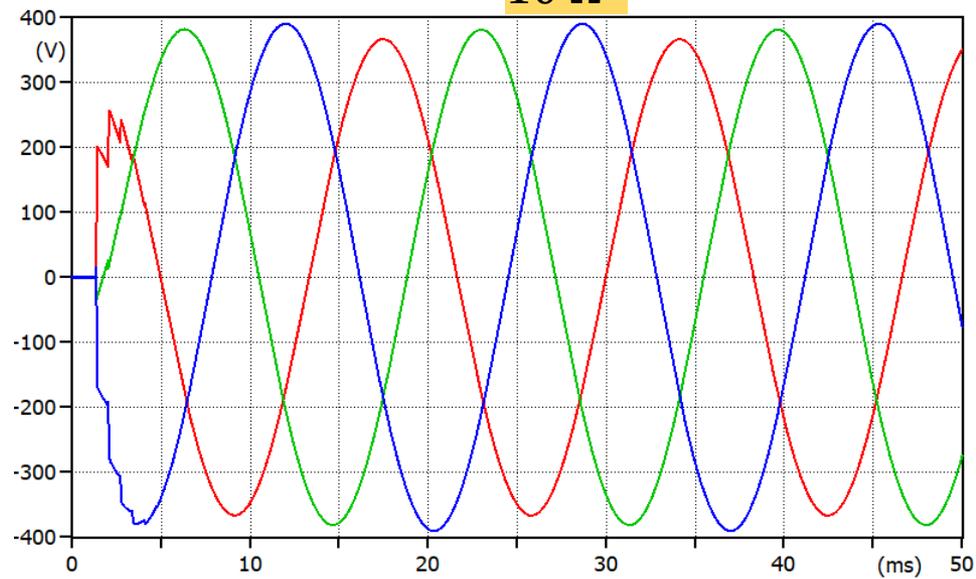
Carga

emissor



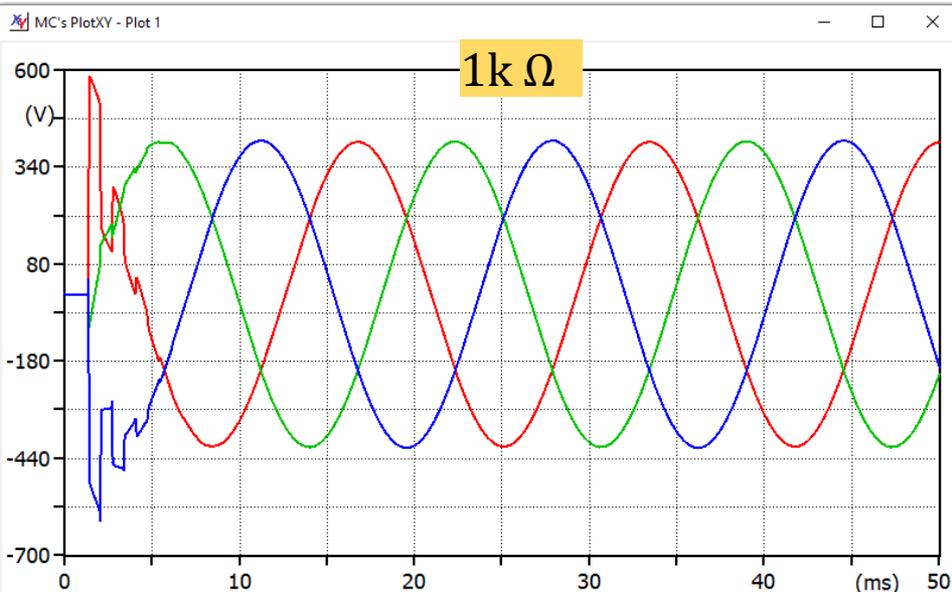
(file linha_3fasica_exemplo1.pl4; x-var t) v:X0003A v:X0003B v:X0003C

10 Ω



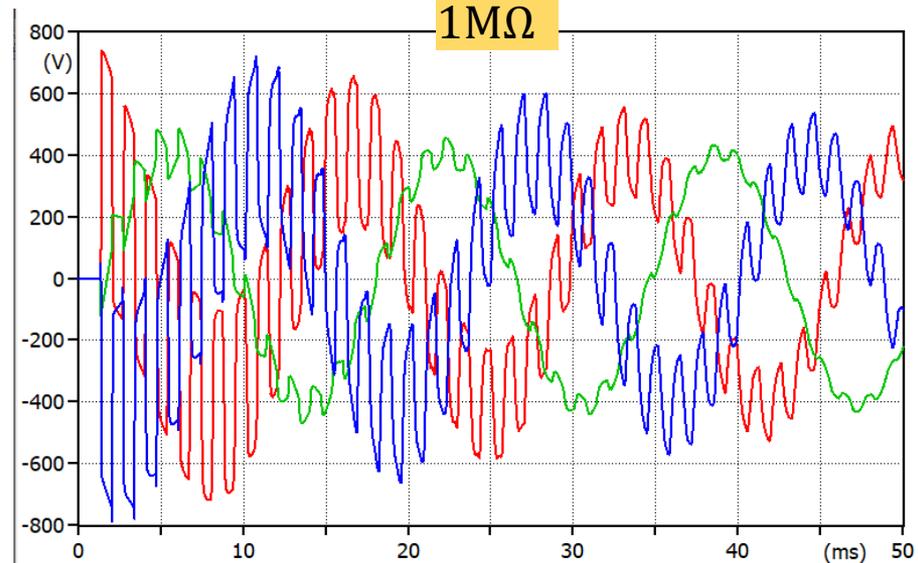
(file linha_3fasica_exemplo1.pl4; x-var t) v:X0002A v:X0002B v:X0002C

1k Ω



(file linha_3fasica_exemplo1.pl4; x-var t) v:X0002A v:X0002B v:X0002C

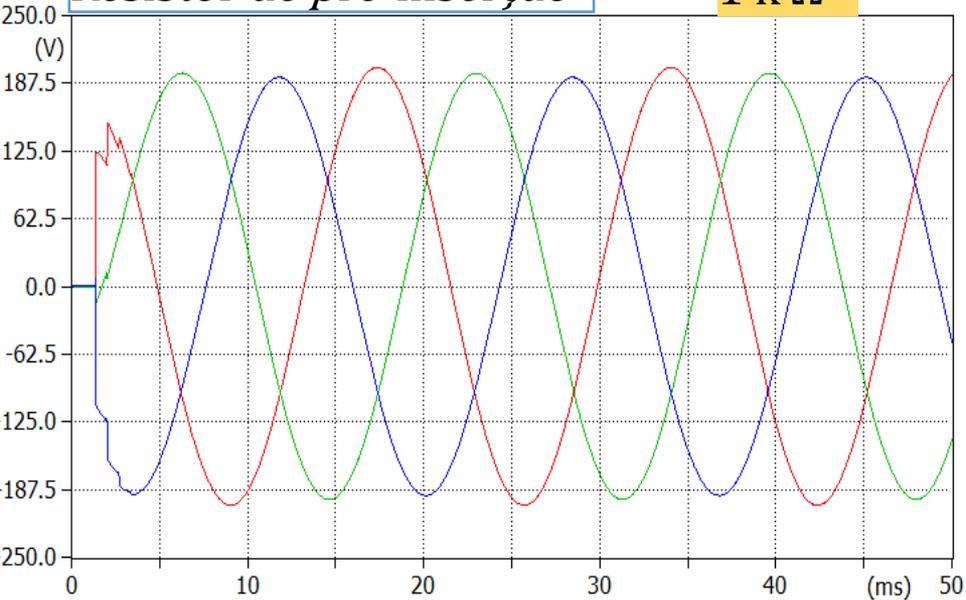
1M Ω



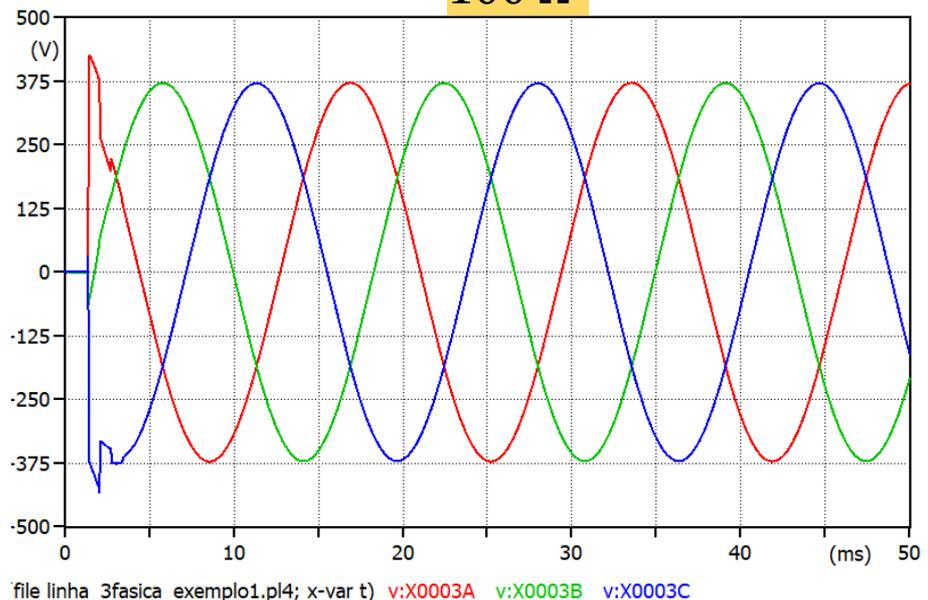
(file linha_3fasica_exemplo1.pl4; x-var t) v:X0002A v:X0002B v:X0002C

Resistor de pré-inserção

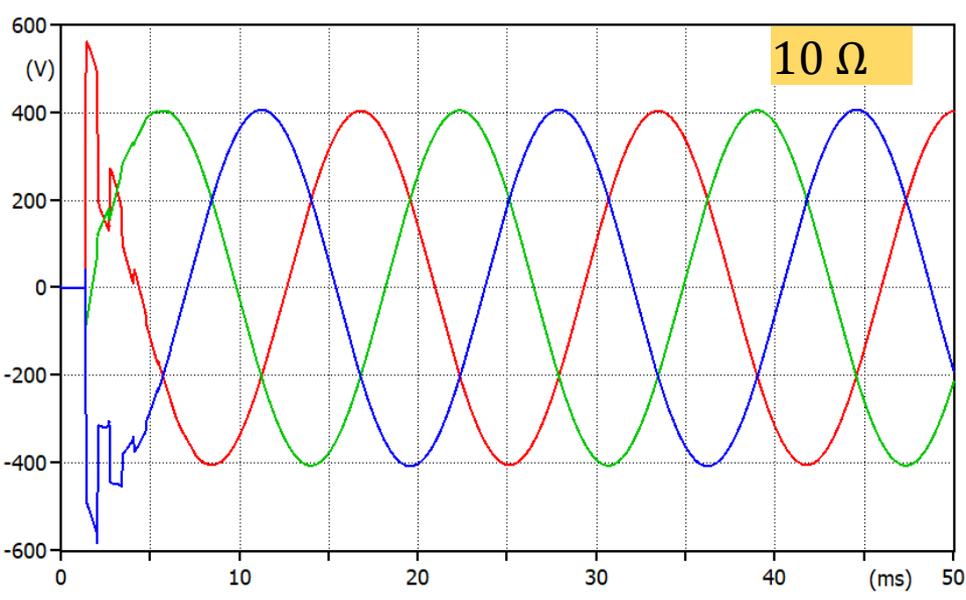
1 k Ω



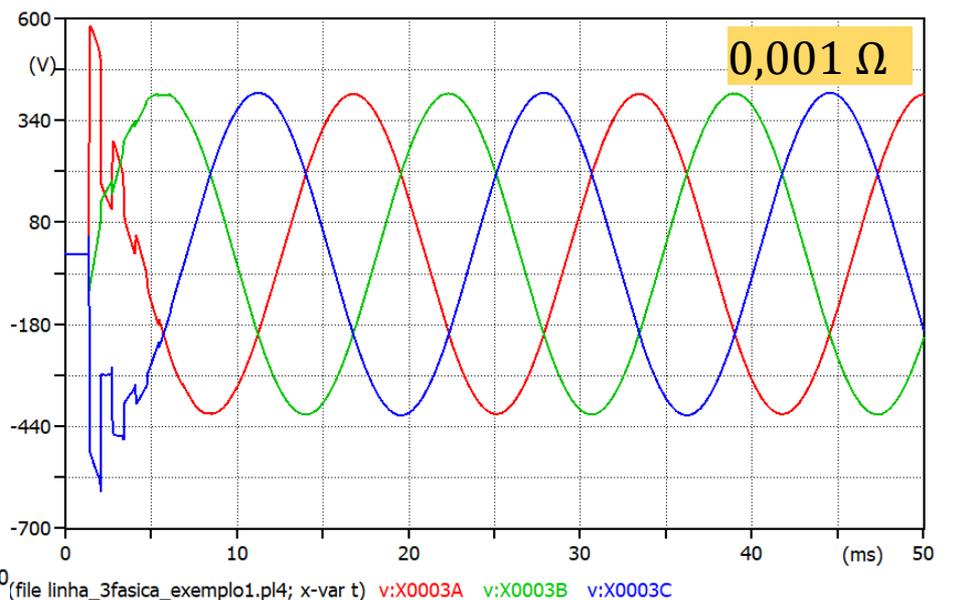
100 Ω



10 Ω



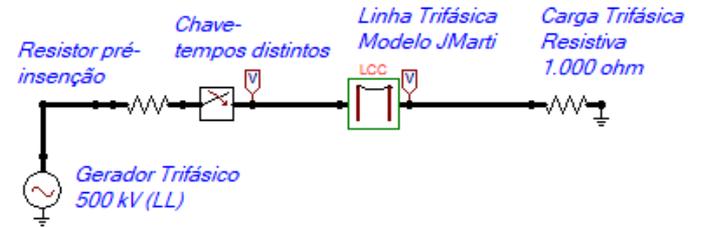
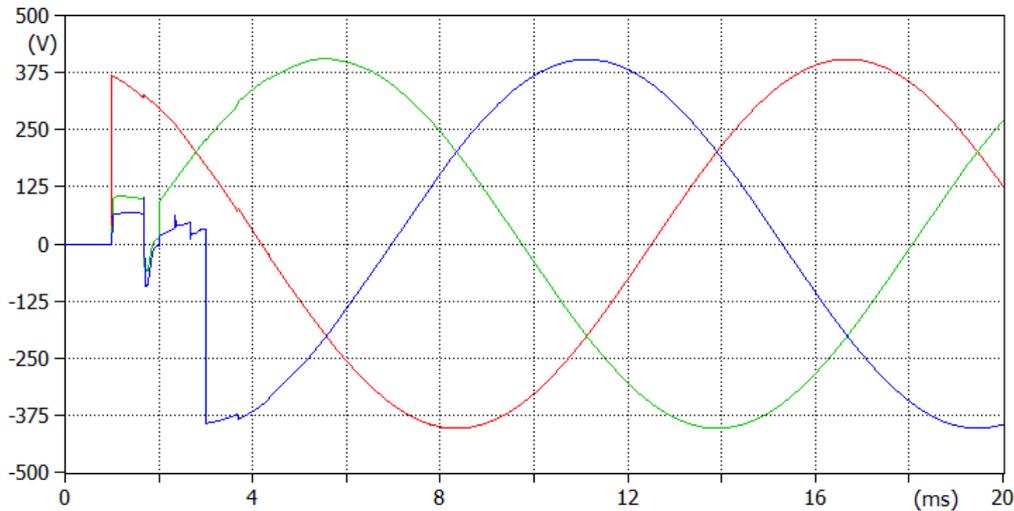
0,001 Ω



(file linha_3fasica_exemplo1.pl4; x-var t) v:X0003A v:X0003B v:X0003C

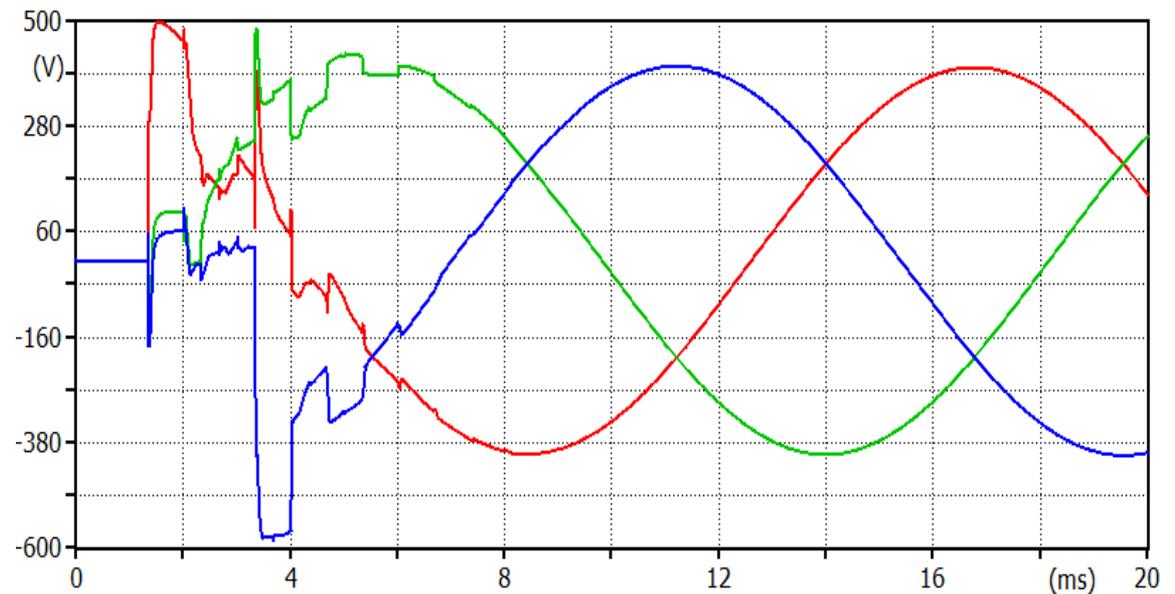
(file linha_3fasica_exemplo1.pl4; x-var t) v:X0003A v:X0003B v:X0003C

Tempos distintos de chaveamento



(file linha_3fasica_exemplo1.p4; x-var t) v:X0004A v:X0004B v:X0004C

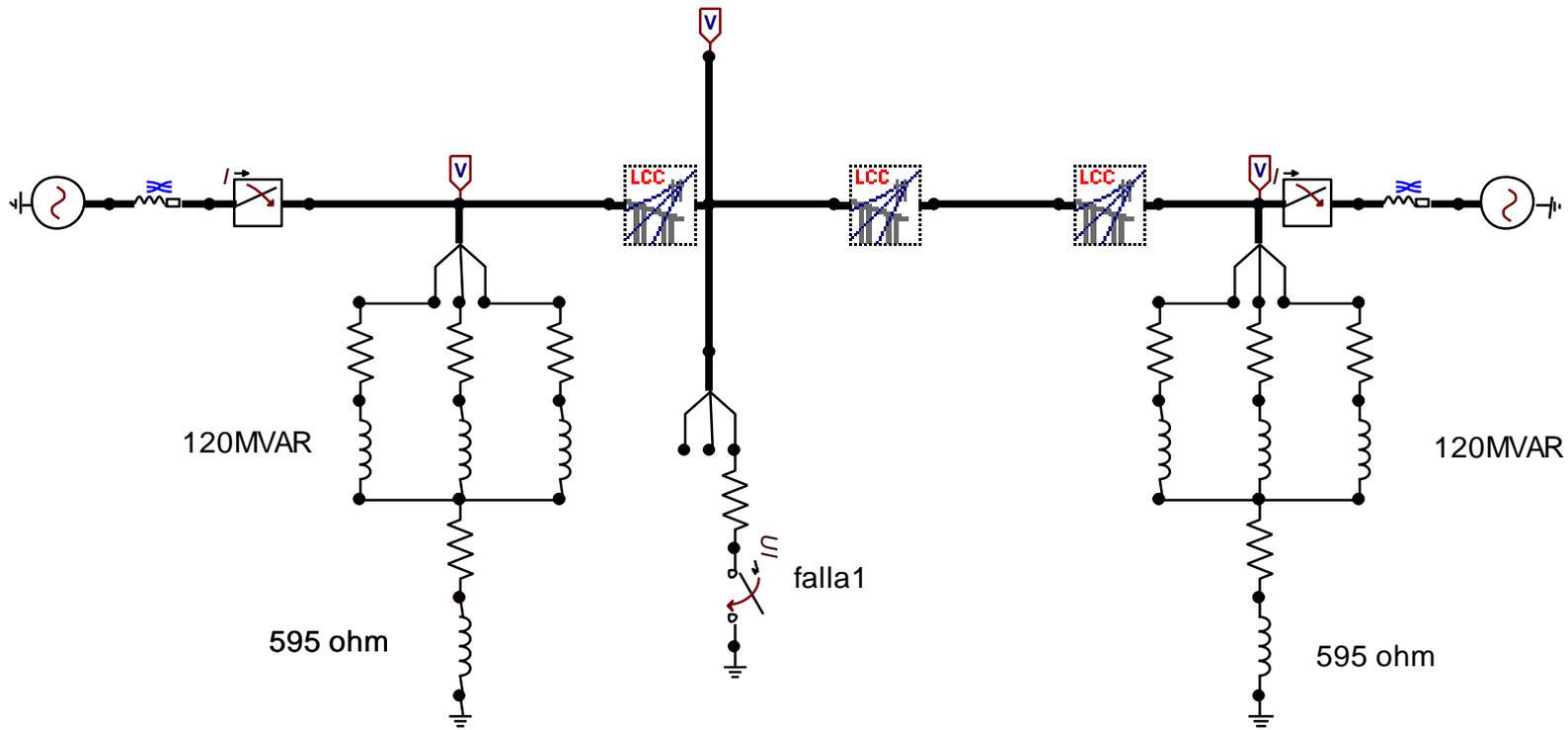
DATA	UNIT	VALUE
T-cl_1	s	0.001
T-op_1	s	1000
T-cl_2	s	0.002
T-op_2	s	1000
T-cl_3	s	0.003
T-op_3	s	1000
Imar	Ámps	0



Simulação de manobras em linhas de transmissão.

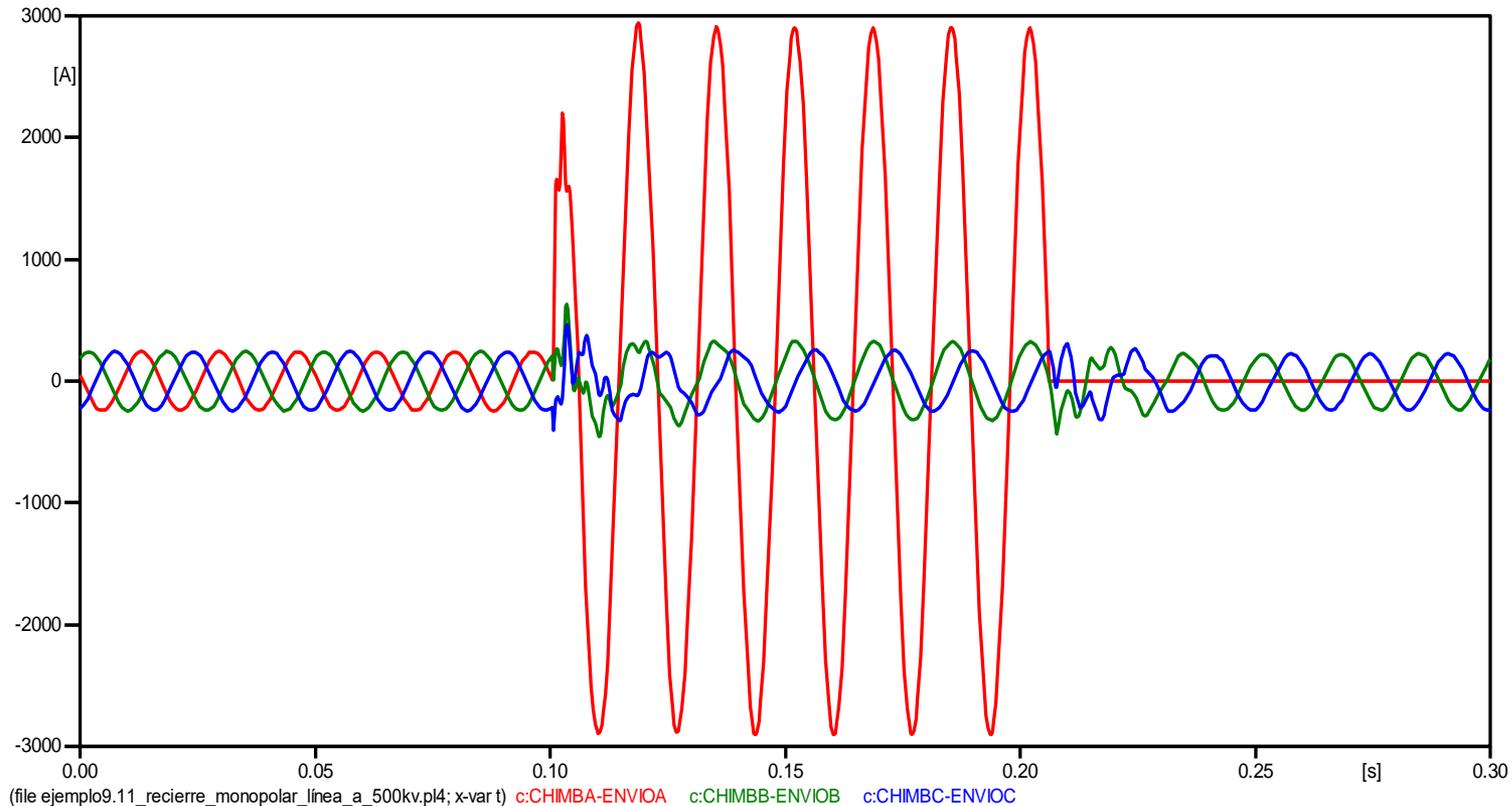
❖ Exemplo 10: Religamento monofásico em Linha de transmissão

Falta na fase A, e o interruptor nas subestações faz religamentos monopolares.



Simulação de manobras em linhas de transmissão.

❖ Exemplo 10: Descarga atmosférica em uma Linha de transmissão com para-raios



Pode se observar no gráfico que uma falta monofásica com $R_{falta}=5\Omega$, aplicada em fase A do ponto de transposição “falta1” em $t=0.1s$ e elimina em $t=0.2s$;

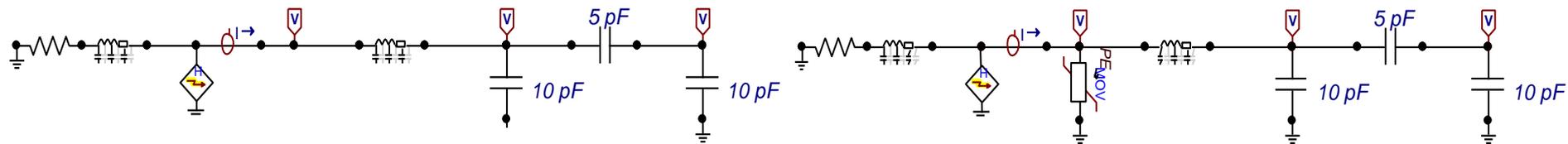
Simulação de descargas atmosféricas em Torres de transmissão

❖ Descarga atmosférica em uma Linha de transmissão com para-raios



Simulação de descargas atmosféricas em Torres de transmissão

❖ Exemplo 11: Descarga atmosférica em uma Linha de transmissão com para-raios



The screenshot shows a software menu for adding components. The menu is titled "Add Objects" and contains the following items:

- 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

The "Branch Nonlinear" item is selected, and a sub-menu is displayed with the following options:

- R(i) Type 99
- R(i) Type 92
- R(t) Type 97
- R(t) Type 91
- L(i) Type 98
- L(i) Type 93
- L(i) Type 96
- L(i) Hevia 98->96
- L(i) Zirka-Moroz
- MOV Type 92
- R(TACS) Type 91
- L(TACS)
- C(TACS)
- L(i) Type 98, init
- L(i) Type 96, init
- L(i) Type 93, init

