

IT 002 – SOBRETENSÕES EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Prof. Dr. José Pissolato Filho

AGOSTO DE 2022

REGIME TRANSITÓRIO

CONHECIMENTO DAS SOBRETENSÕES A PRIORI
FORNECERÁ SUBSÍDIOS PARA A COORDENAÇÃO DE
ISOLAMENTO DAS LINHAS, SUBESTAÇÕES
ASSIM COMO A ESPECIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS E
COMPONENTES ELÉTRICOS



OPERAÇÃO DO SISTEMA MAIS CONFIÁVEL

Origem

- Interna
 - Sobretensões de Manobra
 - Sobretensões Temporárias
- Externa
 - Sobretensões atmosférica

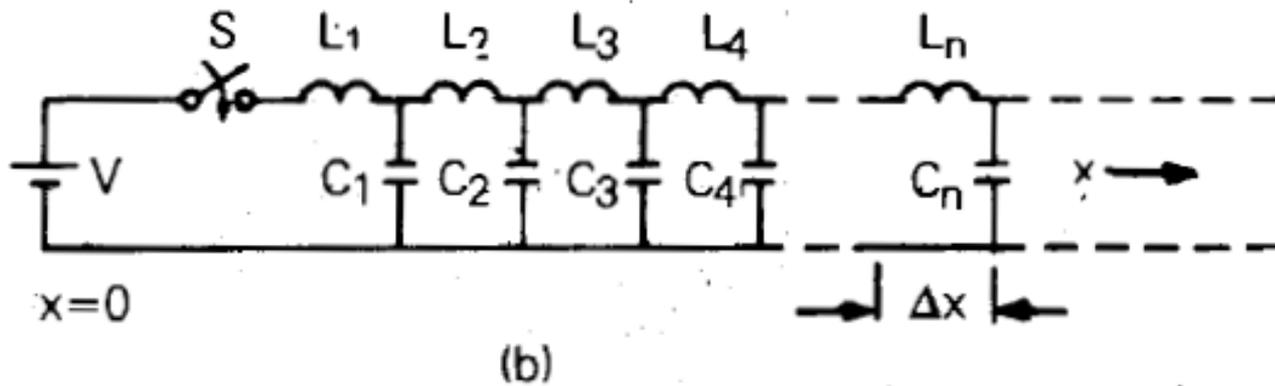
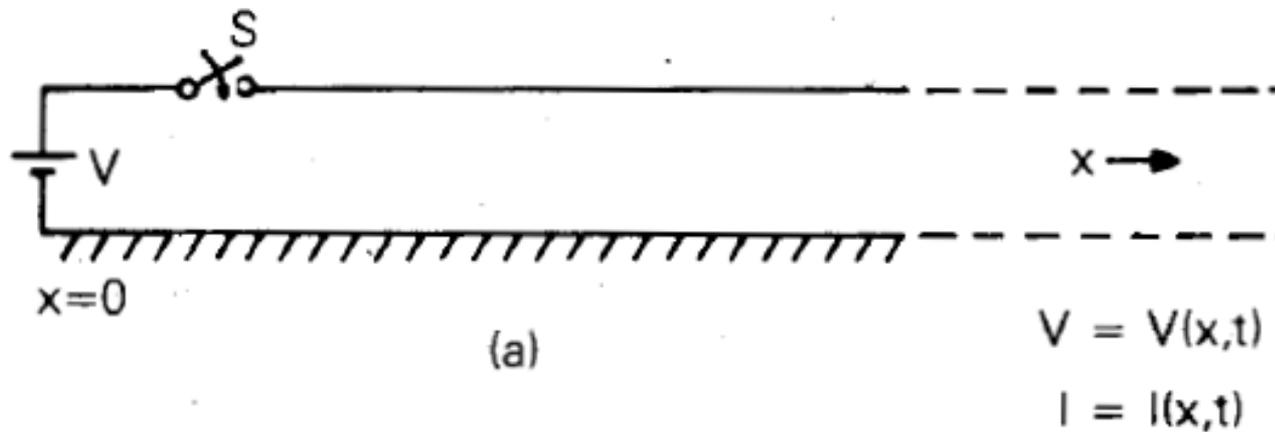
SOBRETENSÕES

As características elétricas dos equipamentos são determinadas pelas sobretensões a que estarão submetidas.

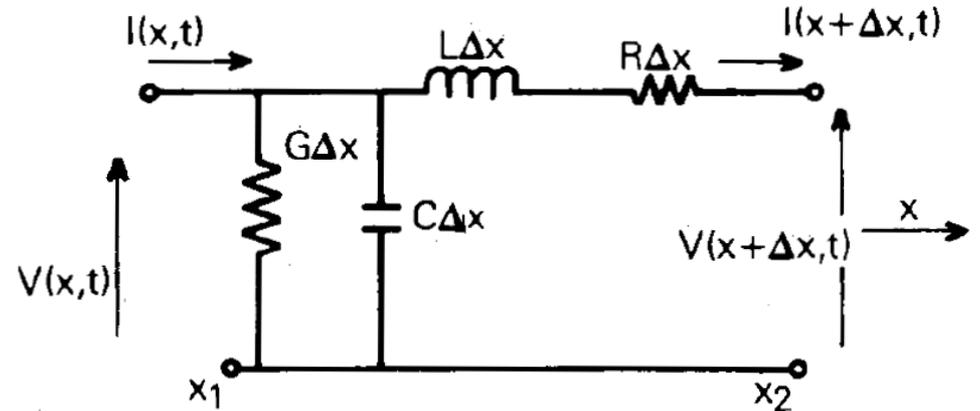
Essas sobretensões podem ser causadas por condições quasi-estacionárias ou por fenômenos de alta frequência de curta duração originados por impactos no sistema de potência.

Algumas são chamadas de sobretensões dinâmicas.

TEORIA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO



MODELO DA LINHA A PARÂMETROS DISTRIBUÍDOS



- L = Henrys/metro
- C = Farads/metro
- R = Ohms/metro
- $\Delta x = x_2 - x_1$

ar (μ_0, ϵ_0)

*Linha de
Transmissão*



d

solo ($\rho_s, \mu_s, \epsilon_s$)

ONDAS TRAFEGANTES NA LINHA

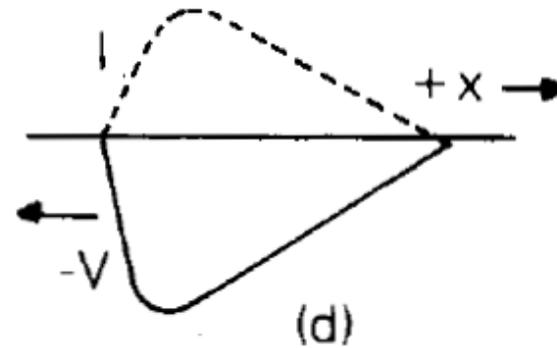
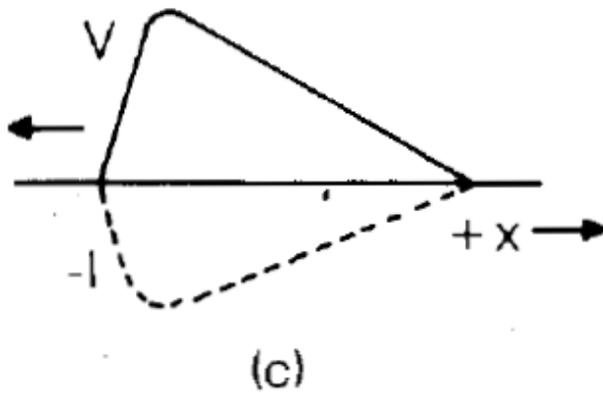
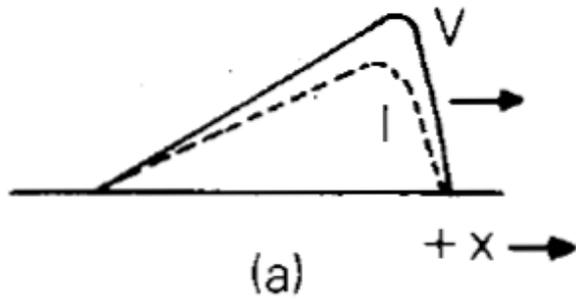
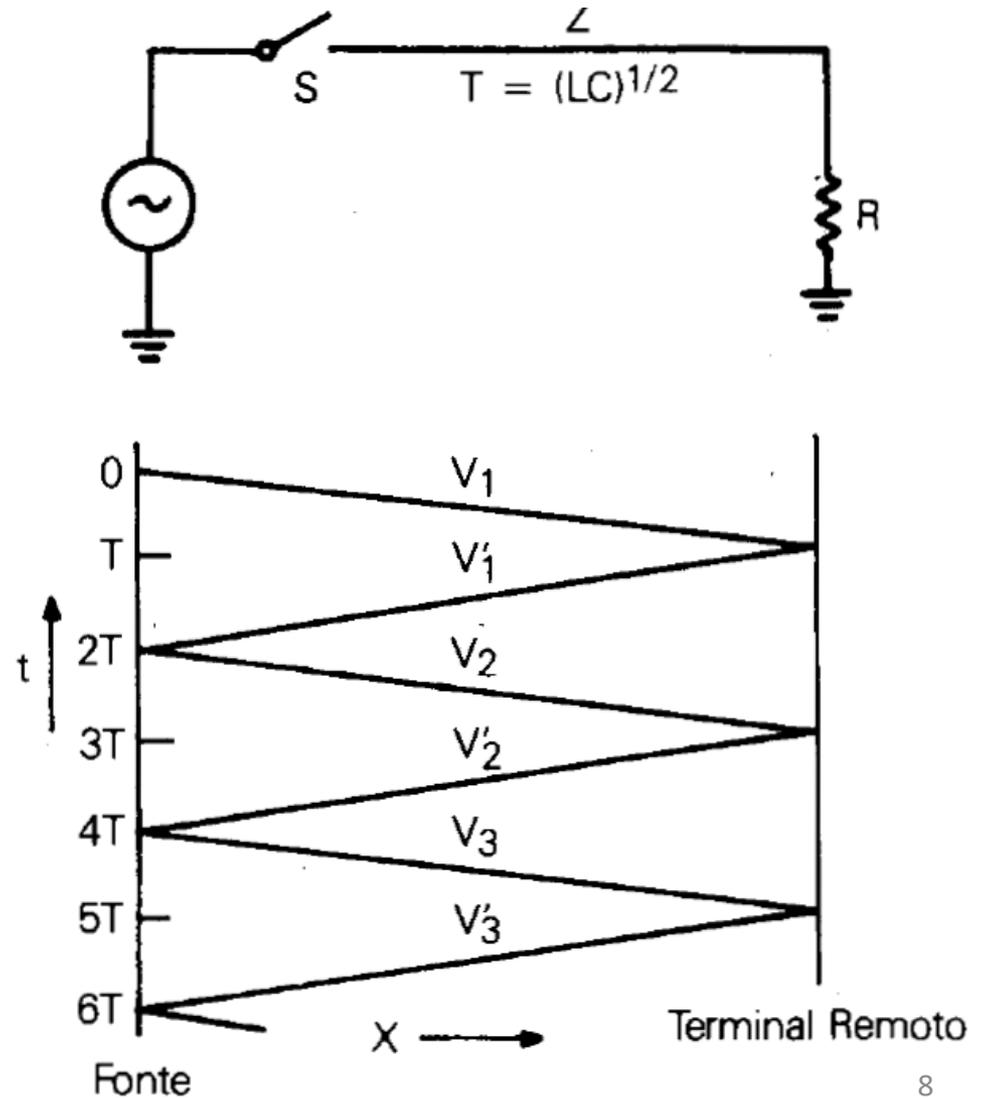


Diagrama de Treliças (Lattice)



Estudos de Sobretensões: Objetivos e Conceitos Básicos

- Sobretensões Temporárias
- Sobretensões de Manobra
- Sobretensões Atmosféricas

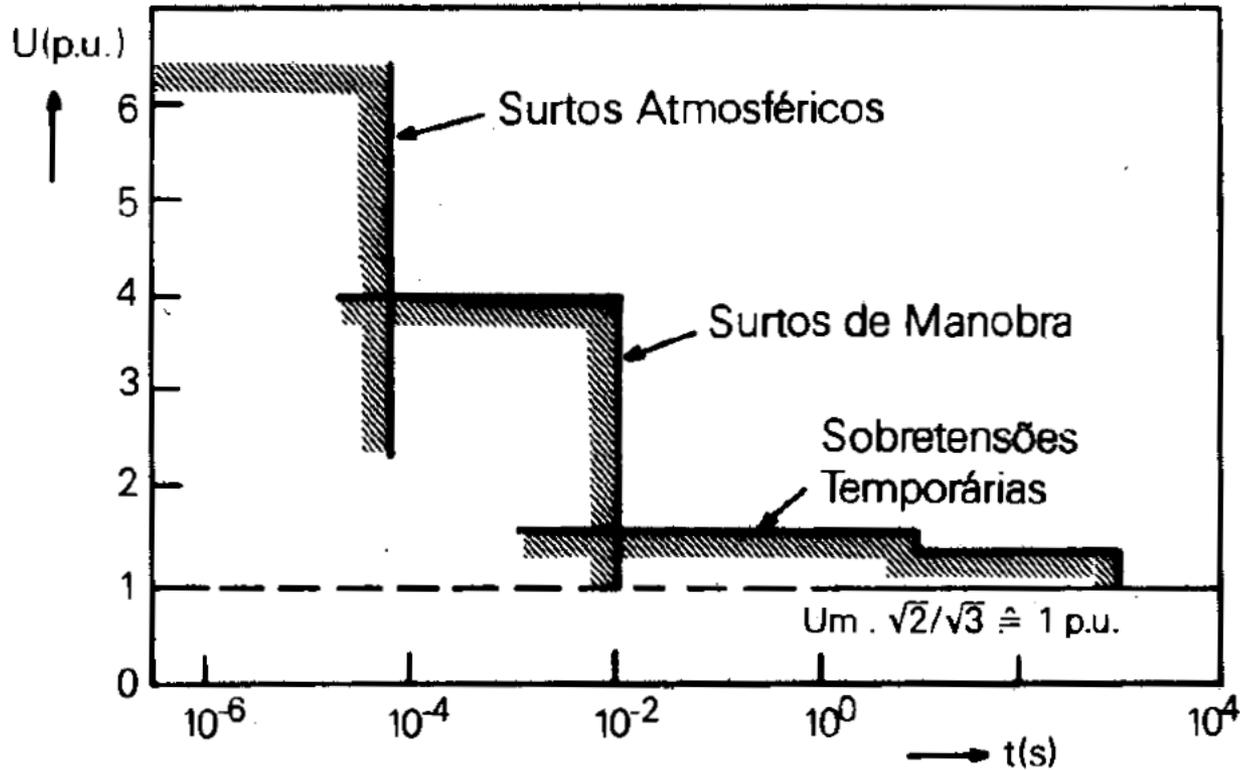
Sobretensões Temporárias

- Sobretensão de longa duração, fracamente amortecida:
 - Amplitude: $< 1.5 \text{ pu}$
 - Frequência: $< =$ fundamental
 - Duração: $> 10 \text{ ms}$
- ▶ Manobras: rejeição de carga
- ▶ Falhas: curto circuito monofásico
- ▶ Fenômenos não-lineares: ferro-ressonância
- ▶ Efeito Ferranti: linha longa a vazio

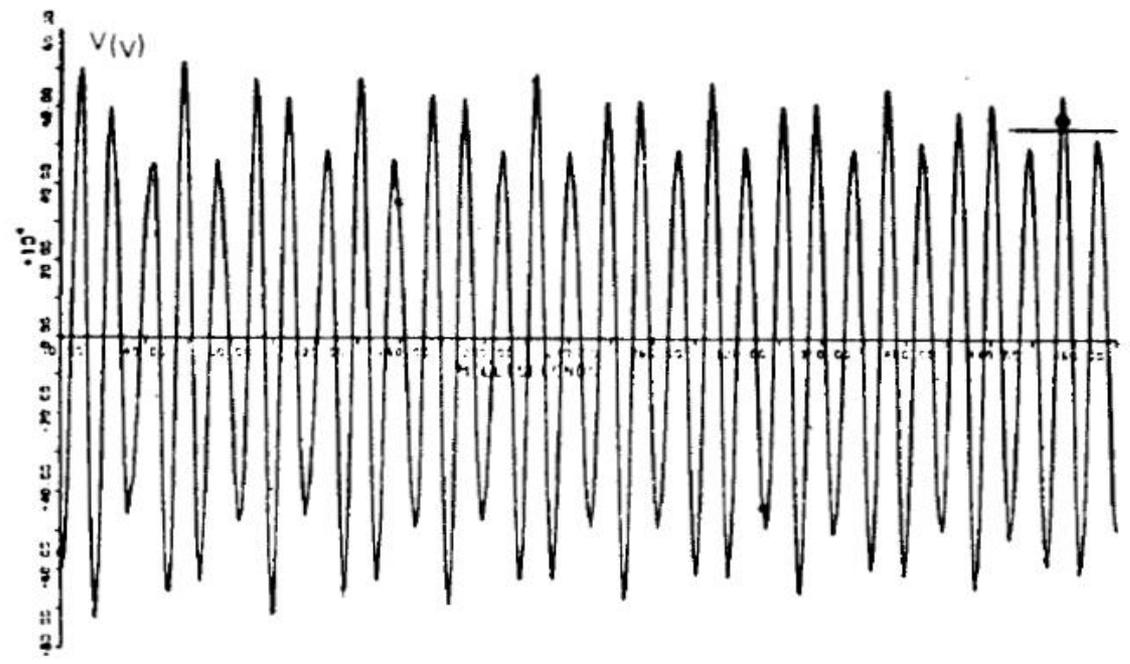
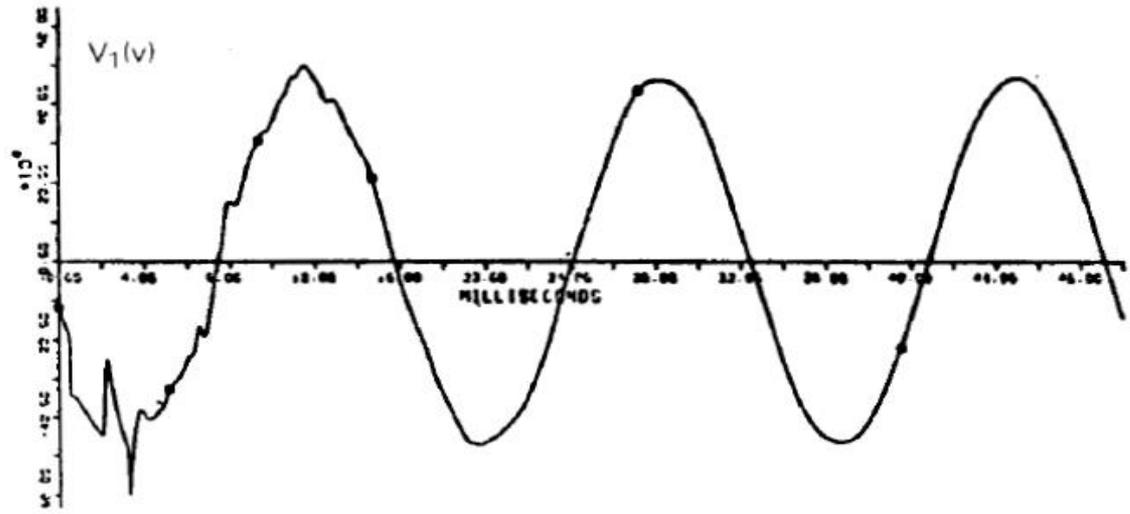
SOBRETENSÕES TEMPORÁRIAS

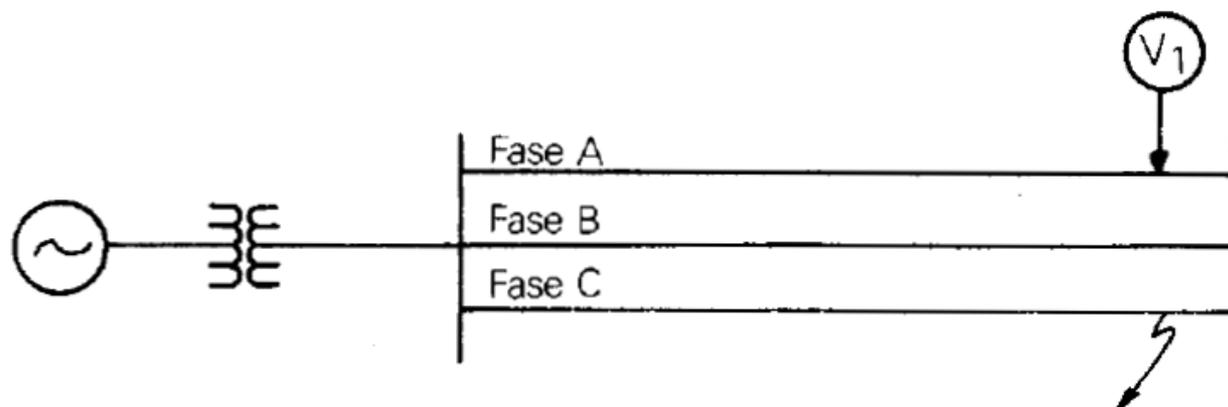
- Faltas para terra;
- Rejeição de Carga;
- Efeito Ferranti;
- Ressonância;
- Ferro-Ressonância.

Amplitude x tempo

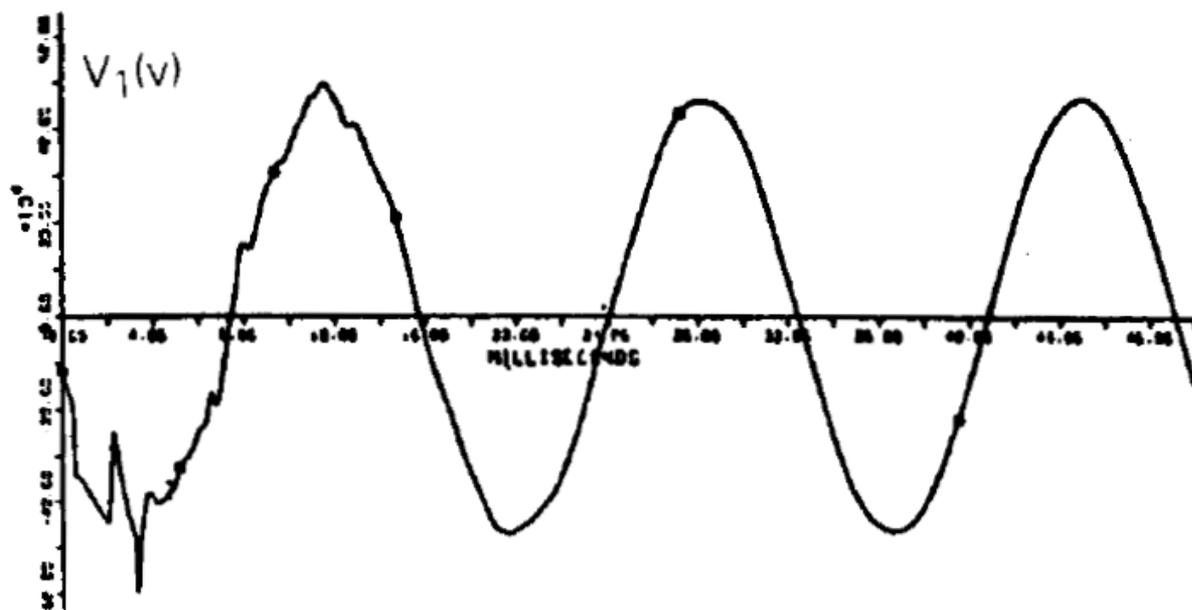


SOBRETENSÕES TEMPORÁRIAS

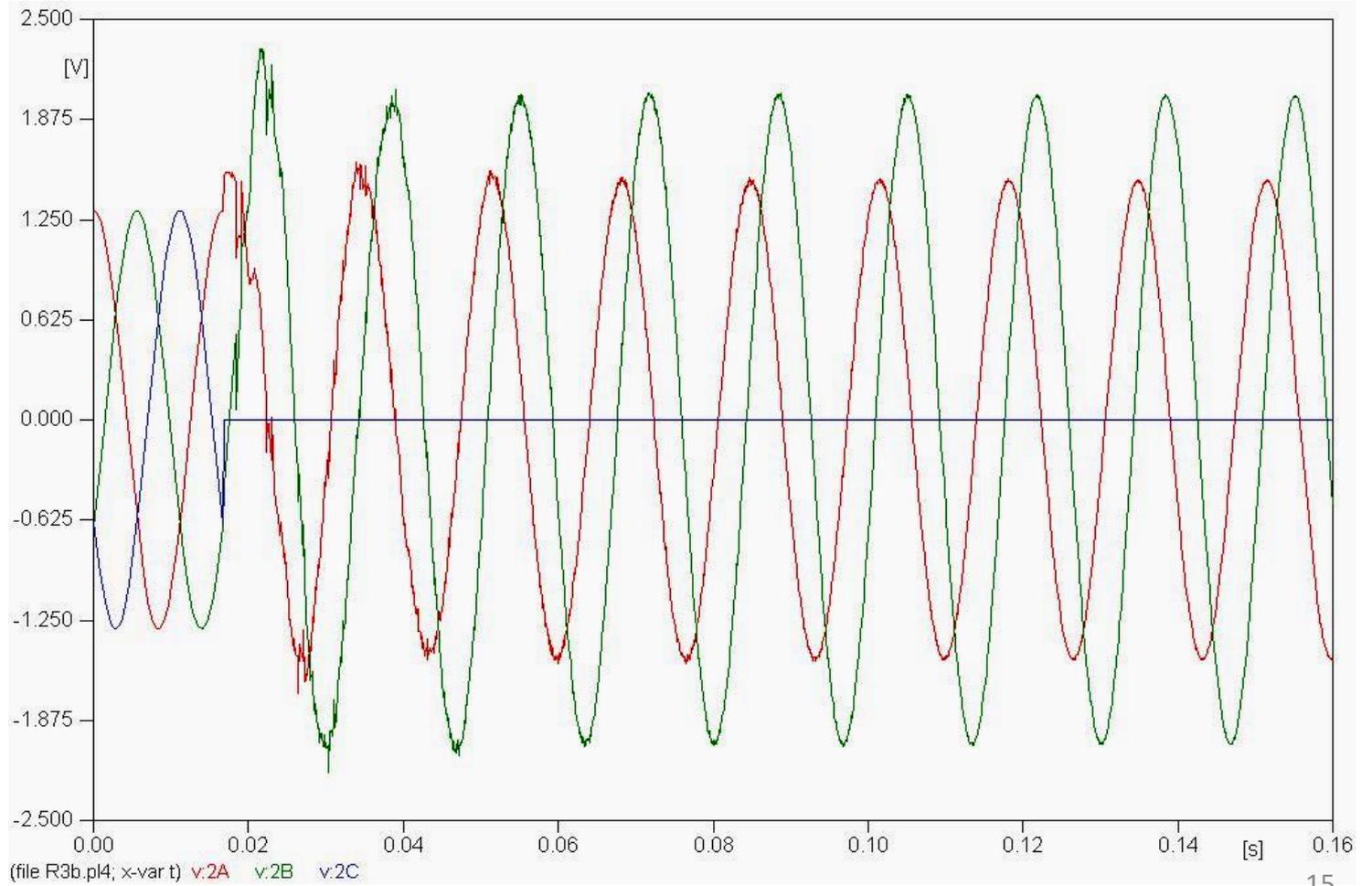
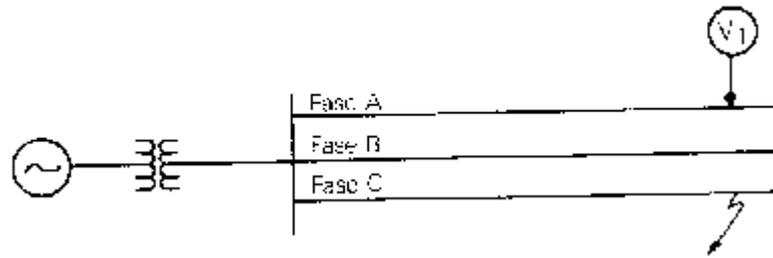




(a) Diagrama



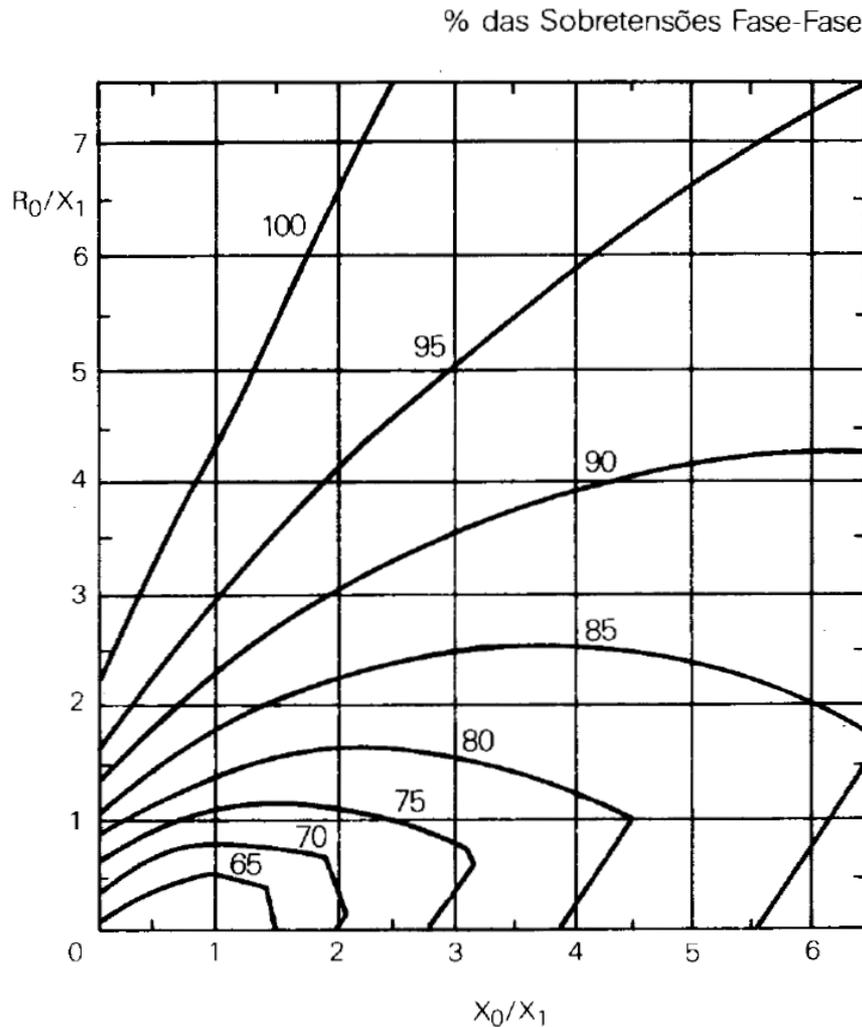
(b) Forma de Onda da Tensão



COMPONENTES SIMÉTRICAS

No caso de um sistema eficazmente aterrado, onde a relação entre a reatância de seqüência zero e a reatância de seqüência positiva é inferior a 3 ($X_0/X_1 \leq 3$) e a relação entre a resistência de seqüência zero e a reatância de seqüência positiva é inferior a 1 ($R_0/X_1 \leq 1$), as

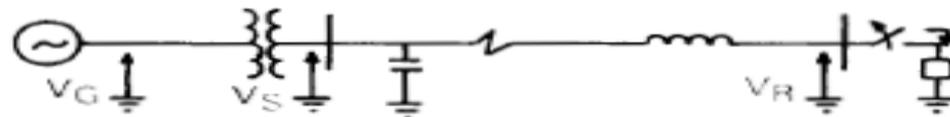
sobretensões nas fases sãs não alcançam 1,4 p.u., o que significa que podem atingir no máximo 80% da tensão fase-fase, conforme pode ser visto pela Figura 3.1, sendo $R_1 = R_2 = 0,1 X_1$ e $X_1 = X_2$ (seqüência negativa).



$$0,8 \times 1,73 = 1,4 \text{ pu}$$

Figura 3.1 - Máximos Valores de Sobretensão Temporária Devido à Ocorrência de Falhas em Função das Reatâncias do Sistema [4]

SOBRETENSÕES TEMPORÁRIAS

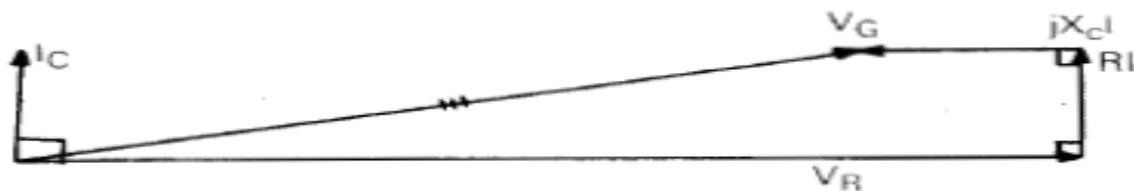


(a) Rejeição de Carga em Sistema Radial

Rejeição de Carga
(Perda Súbita de Carga)

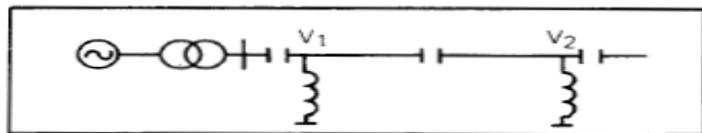


(b) Diagrama Vetorial antes da Rejeição

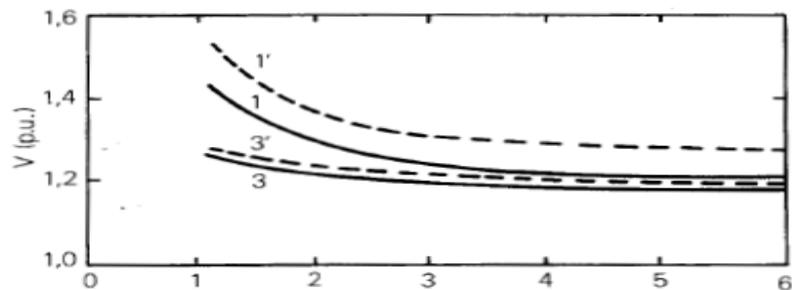


(c) Diagrama Vetorial depois da Rejeição

Figura 3.3 - Rejeição de Carga

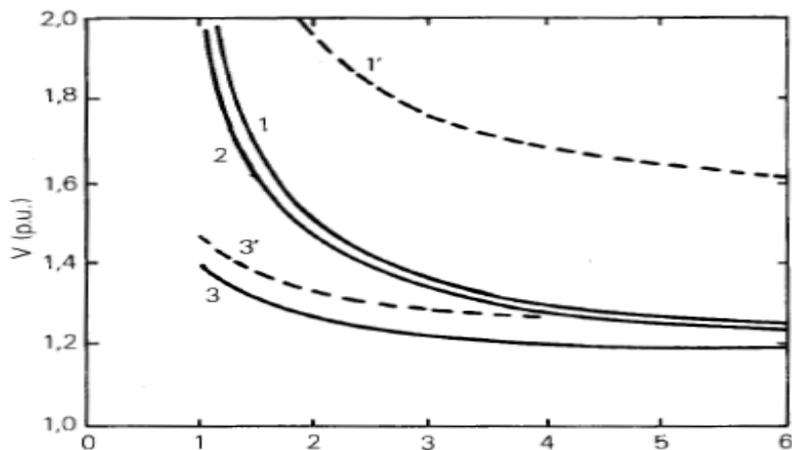


(a) Diagrama



Potência de curto-circuito do lado emissor ($\times 10^3$) - MVA

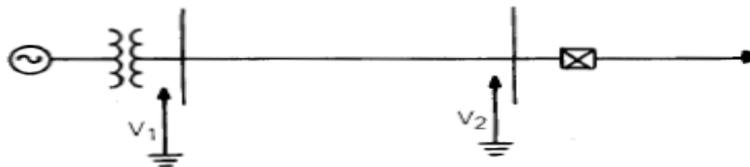
(b) Linha de 300 km



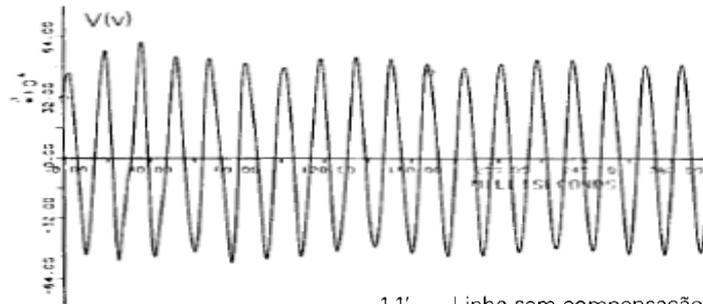
Potência de curto-circuito do lado emissor ($\times 10^3$) - MVA

(c) Linha de 600 km

Figura 3.4 - Tensão à Frequência Industrial Devido à Compensação da Reatância da Linha [2]



(a) Diagrama



(b) Lado emissor

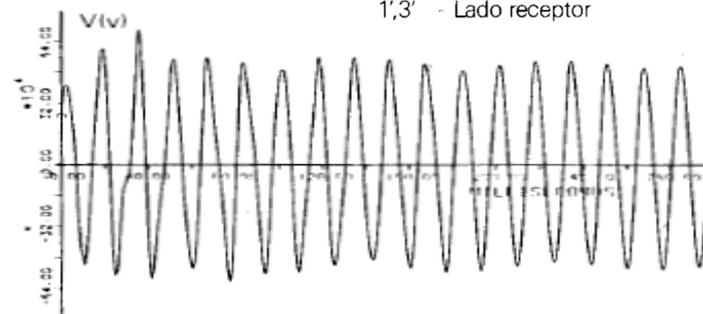
1-1' - Linha sem compensação

2 - Linha com 50% de compensação capacitiva série

3-3' - Linha com 50% de compensação capacitiva série e 70% de compensação indutiva em derivação

1,2,3 - Lado emissor

1',3' - Lado receptor



(c) Lado receptor

Figura 3.5 - Forma de Onda da Tensão para Rejeição do Campo

Simulação	Estudo de Rejeição de Carga	
	Frequência Industrial	Transitória
1 Ferramenta	Programa estabilidade	Programa EMTP ou TNA
2 Máquina	Representação em detalhes incluindo enrolamentos amortecedores e saturação	Reatância linear indutiva
3 Sistema de excitação	Diagrama de bloco, considerando ganhos e constante de tempo	Curva com variação $E'' \times f$ com tempo
4 Rede	Possibilidade de representação completa bem além do ponto de rejeição	Uso de equivalentes perto do ponto de rejeição é necessário devido à limitação da ferramenta e tempo de simulação
5 Transformadores	Representação Monofásica	Representação Trifásica com saturação e possibilidade de representação de histerese
6 Linhas de Transmissão	Representação Monofásica Parâmetros R,L,C concentrados Variação com frequência é possível	Representação trifásica Seqüências positiva e zero Perdas distribuídas ao longo da linha Parâmetros distribuídos com variação com a frequência
7 Disjuntores	Representação Monofásica. Abertura realizada no tempo solicitado pelo usuário do programa	Representação trifásica. Abertura realizada nos zeros de corrente em cada fase

SOBRETENSÕES TEMPORÁRIAS

Efeito Ferranti

Para $I_2 = 0$

$$V_1 = V_2 \cosh(\gamma l)$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\cos(\beta l)}$$

Sendo:

$$\beta = \omega \sqrt{LC} = 6^\circ/100 \text{ km em } 50 \text{ Hz e } 7,2^\circ/100 \text{ km em } 60 \text{ Hz}$$

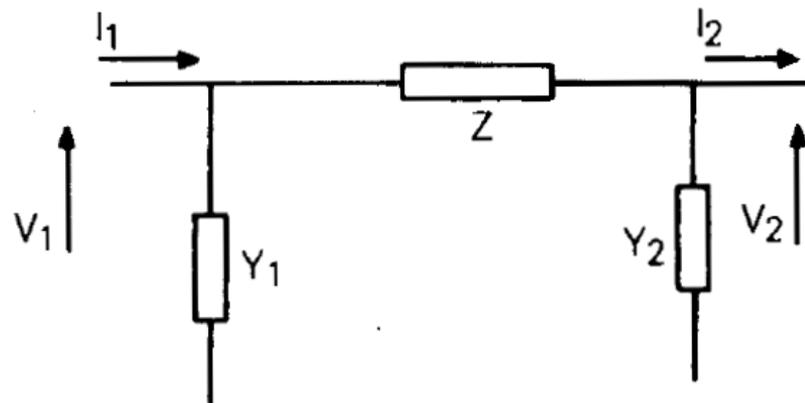


Figura 3.8 - Circuito Equivalente para uma linha de Transmissão

A equação geral para a linha é dada então por:

$$V_1 = V_2 \cosh(\gamma l) + Z_c I_2 \sinh(\gamma l),$$

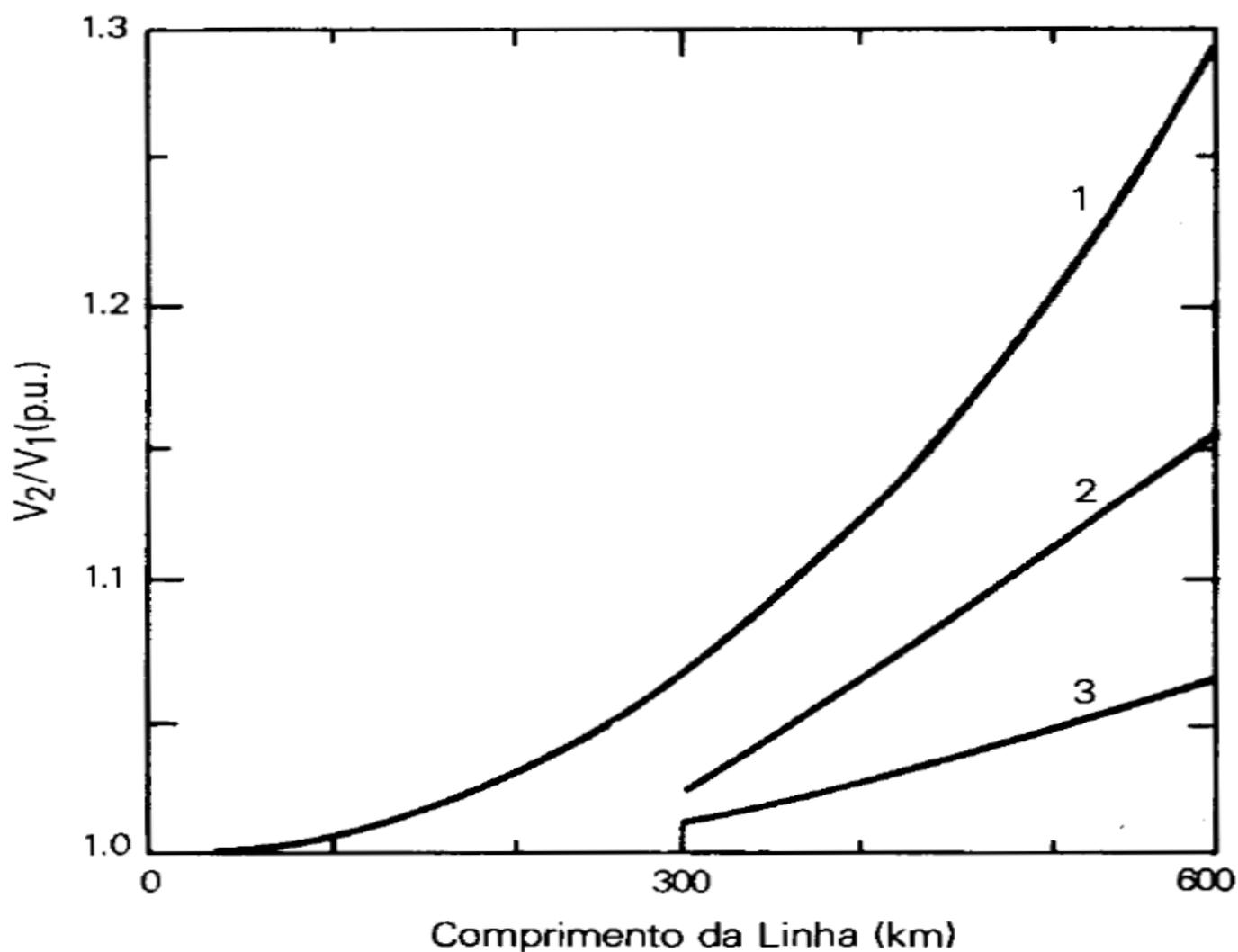
Onde:

V_1 - tensão no lado da geração (emissor)

V_2 - tensão no lado da recepção

l - comprimento da linha

Z_c - impedância característica da linha

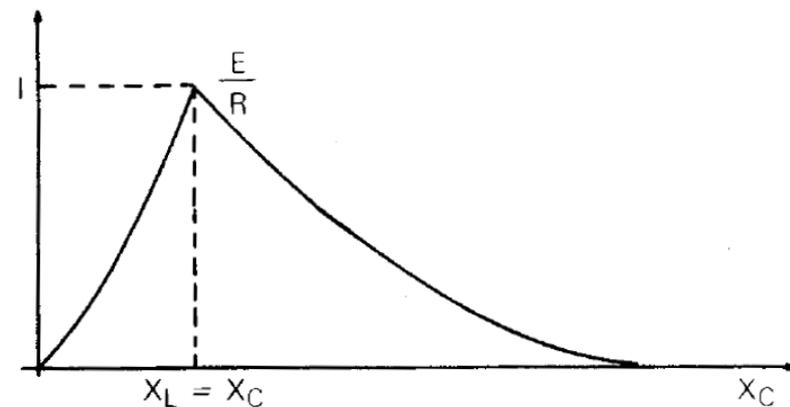
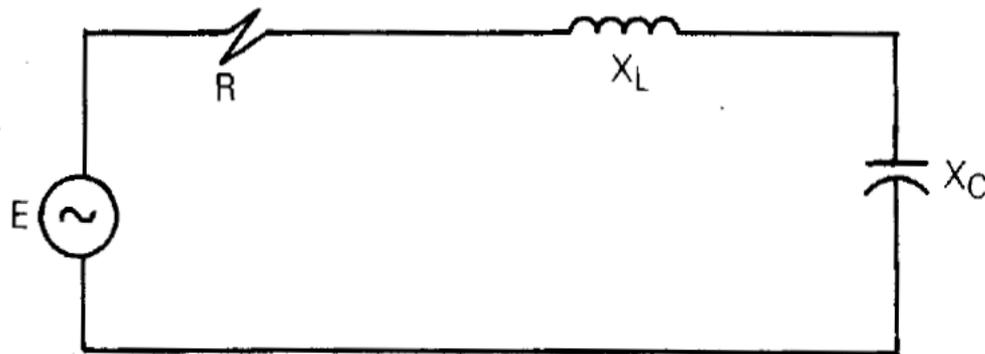


- 1 Linha sem compensação
- 2 Linha com 50% de compensação capacitiva série
- 3 Linha com 50% de compensação capacitiva série e 70% de compensação reativa em derivação

Ressonância e Ferro-Ressonância

Condições de ressonância são estabelecidas quando um circuito contendo capacitâncias e indutâncias lineares é excitado por uma tensão a freqüência próxima ou igual à sua freqüência natural, enquanto que podem ser caracterizados por ferro-ressonância os efeitos peculiares introduzidos pela presença de saturação no circuito magnético da indutância.

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$



Como o R é baixo a corrente é elevada.

LINHA DE TRANSMISSÃO

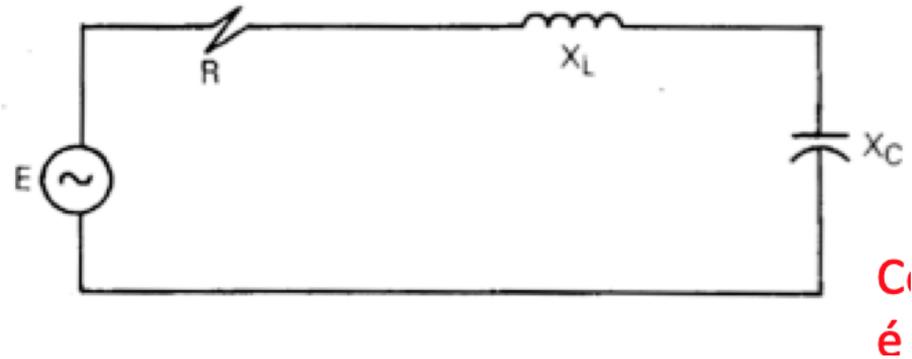
$$r = 0,1 \text{ ohms/km}$$

$$l = 2 \text{ mH/km}$$

$$c = 10 \text{ nF/km}$$

20 kV

$$I = V / (r^2 + (X_l - X_c)^2)^{1/2}$$
$$I = 0,075 \text{ A}$$

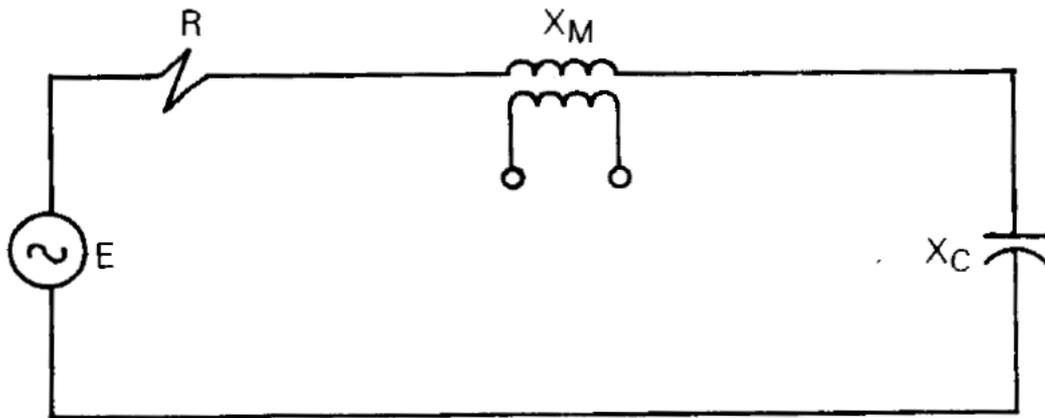


$$f_o = 1 / 2 \pi (L C)^{1/2}$$

$$f_o = 35,6 \text{ khz}$$

p/ f=60 hz X_l = 0,75 ohms
X_c = 265,3 10⁻³ ohms

Na ressonância, X_l = X_c I = V / r I = 20 * 10⁴ A



Como o valor de X_m é variável devido a saturação podem-se ter vários pontos de ressonância.

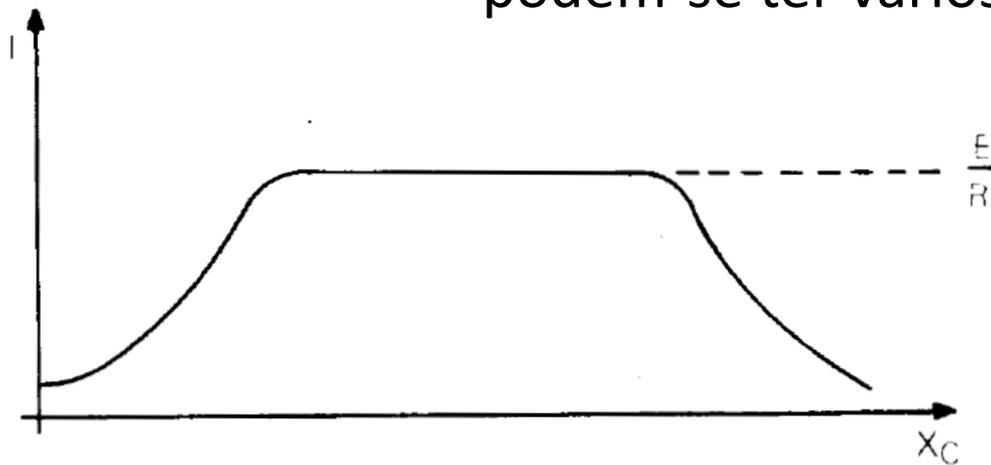
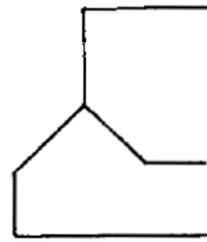
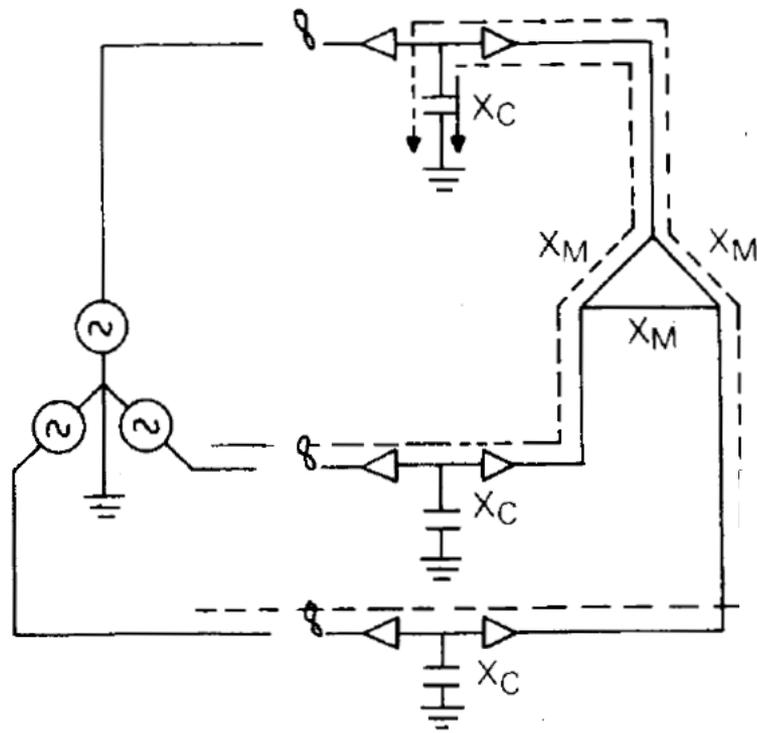


Figura 3.13 - Corrente x Impedância para um Circuito com Indutância Variável



Outras soluções que poderiam ser adotadas são:

- Alocação de carga resistiva no secundário do transformador. Esta carga se refletirá no primário, aumentando o amortecimento no circuito. Esta solução tem, no entanto, a desvantagem de aumentar, em operação normal do sistema, o carregamento do cabo e do transformador dissipando mais potência.
- Modificação do circuito. Isto pode ser conseguido alterando o comprimento do cabo, transformando a alimentação em aérea, utilizando sempre o reator de terciário ou ainda, em certos casos, aumentando a resistência de aterramento. A desvantagem desta solução é que implica em gastos elevados em obras e equipamentos.
- Redução da tensão aplicada fazendo o transformador operar na região linear da sua curva de saturação.

As situações que propiciam o aparecimento de sobretensões temporárias até aqui analisadas foram vistas isoladamente, sem relacioná-las entre si. Entretanto, em geral, as piores condições para um sistema ocorrem quando há superposição de fenômenos, implicando em que os efeitos decorrentes de um evento se sobreponham aos de um ou mais eventos. Como exemplo, podem-se citar as sobretensões resultantes de uma rejeição de carga, que podem atingir valores tais que acarretem descarga através da cadeia de isoladores de determinada fase, causando um curto-circuito monofásico. Neste caso, nas fases sãs, haverá uma elevação ainda maior da tensão.