

IT 002 – SOBRETENSÕES EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.

DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

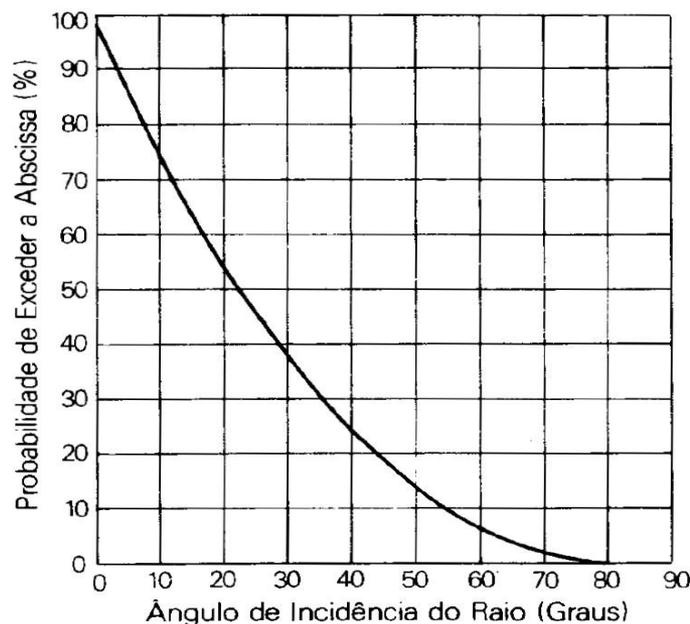
José Pissolato Filho

Outubro 2022

Ângulo de Incidência

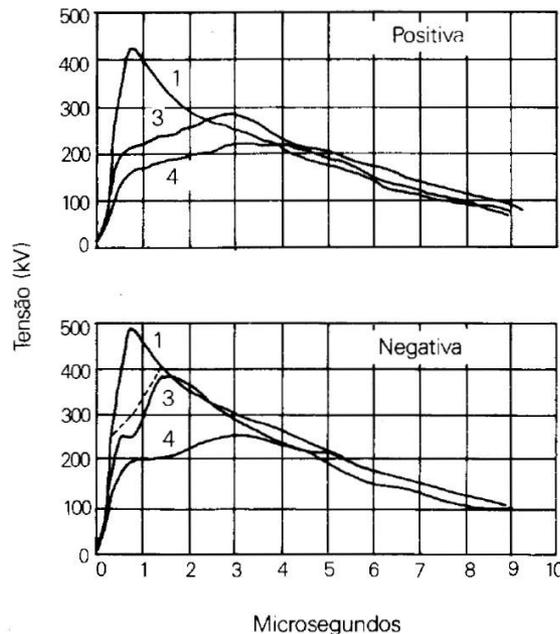
A incidência de descargas atmosféricas se realiza invariavelmente com alguma inclinação em relação à vertical.

Este ângulo de inclinação do raio com relação à vertical, bem como todos os demais dados relacionados com a descarga, apresenta também uma natureza estatística.



ATENUAÇÃO E DISTORÇÃO

Os surtos sofrem significativas reduções durante a propagação até atingir a subestação.



Pequenas descargas ao redor do condutor como corona provocam perdas e conseqüentemente redução da amplitude do surto.

- 1 - início
- 3 - após 2,3 km
- 4 - após 8,0 km

A redução na amplitude máxima do surto pode ser obtida considerando a seguinte expressão:

$$V = V_0 e^{-\alpha t}$$

Onde:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} + \frac{G}{C} \right)$$

Condição de Heaviside

$$R/L = G/C$$

Sendo:

R, L, G, C - parâmetros da linha de transmissão

V_0 - valor da tensão inicial

MODELO ELETROGEOMÉTRICO

A partir do trabalho de Golde, 1961 o qual estabelece uma relação entre a Corrente do raio e a região de atração, diversos autores desenvolveram modelos Analíticos na tentativa de consolidar o elo entre as características elétricas das Descargas atmosféricas e os parâmetros geométricos das linhas de transmissão.

Em 1968, Armstrong e Whitehead relataram o desenvolvimento de um modelo analítico envolvendo a geometria da linha de transmissão e o mecanismo das descargas atmosféricas, o qual foi calibrado através de sucessivas tentativas para as configurações de 50 linhas de transmissão efetivamente blindadas, correspondendo a 80000 km de linhas para o número de anos considerados.

A base do modelo eletrogeométrico é o estabelecimento de uma relação entre a intensidade da corrente de raio e a região ao alcance da ponta da descarga piloto, a qual permite então que o raio em sua trajetória para a terra tenha preferência em alcançar objetos mais próximos.

Esta curva foi obtida a partir das equações desenvolvidas por Love e Whitehead para a distância de atração e tensão da descarga piloto, indicadas a seguir:

$$\bar{r}_s = 0,0513 \left[I_0 L_n(2\bar{r}_s/b) [I_0 L_n(2\bar{r}_s/a) + 2000] \right]^{0,6}$$

$$V_s = 0,06 \left[I_0 L_n(2\bar{r}_s/b) [I_0 L_n(2\bar{r}_s/a) + 2000] \right]^{0,5}$$

Sendo:

V_s = tensão da descarga piloto em MV para I_0 em kA

\bar{r}_s = distância de atração média em metros para I_0 em kA

I_0 = corrente do raio

b = raio da descarga piloto, dependente da tensão

a = raio da corrente de retorno, dependente da corrente

Uma aproximação da curva
pode ser obtida pela utilização da equação

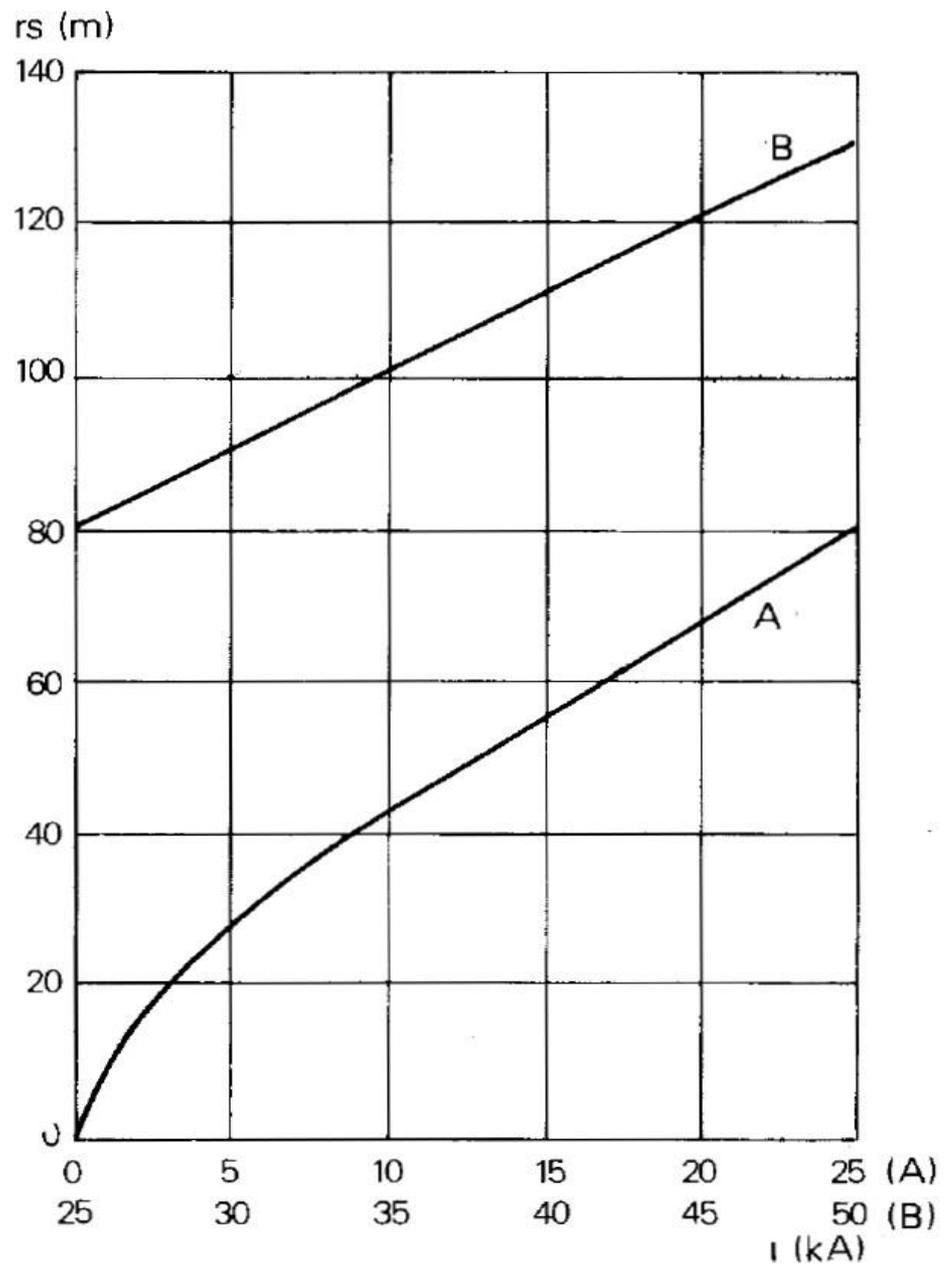
$$\bar{r}_s = 2 I_0 + 30 \left[1 - e^{-I_0/6,8} \right]$$

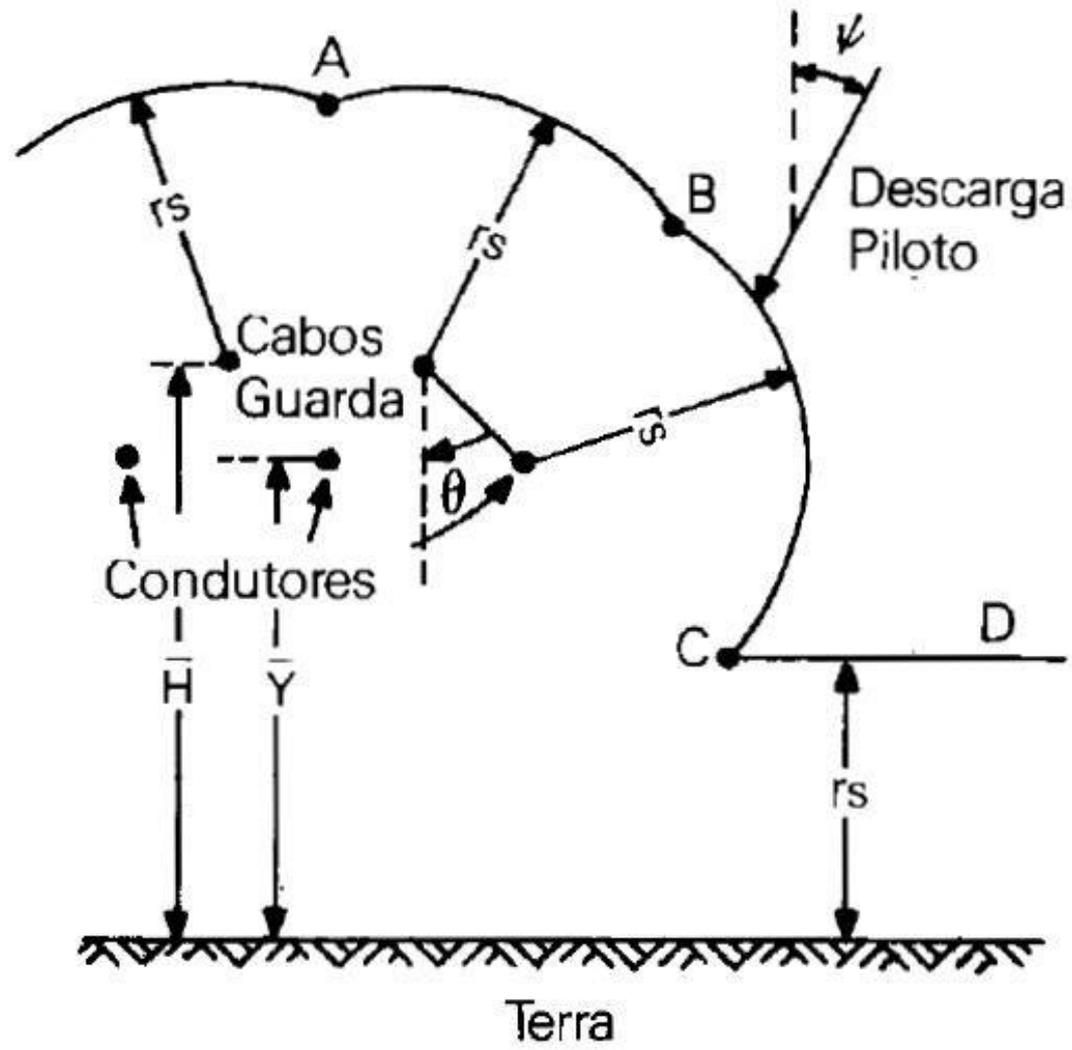
que a representa com um erro inferior a 1 metro, para
correntes acima de 5 kA.

Para a maioria das aplicações, uma relação mais
simples

$$\bar{r}_s = 9,0 I_0^{0,65}$$

é inteiramente satisfatória

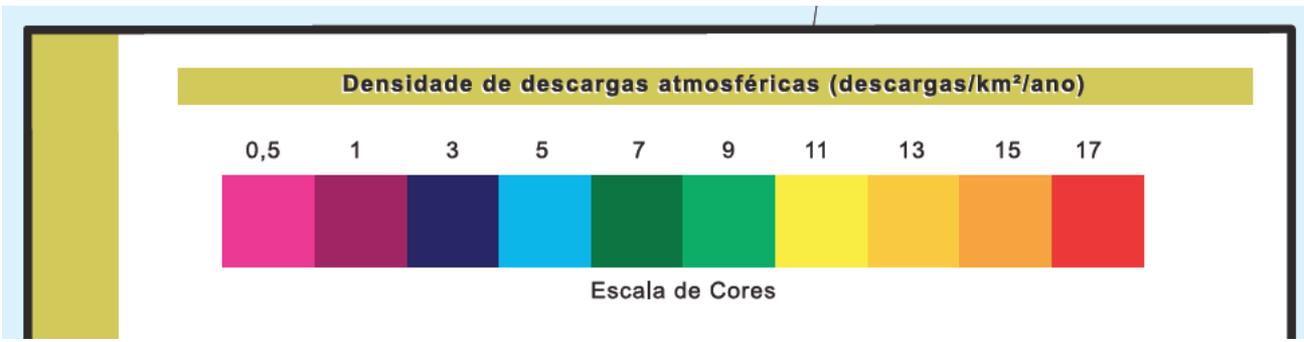
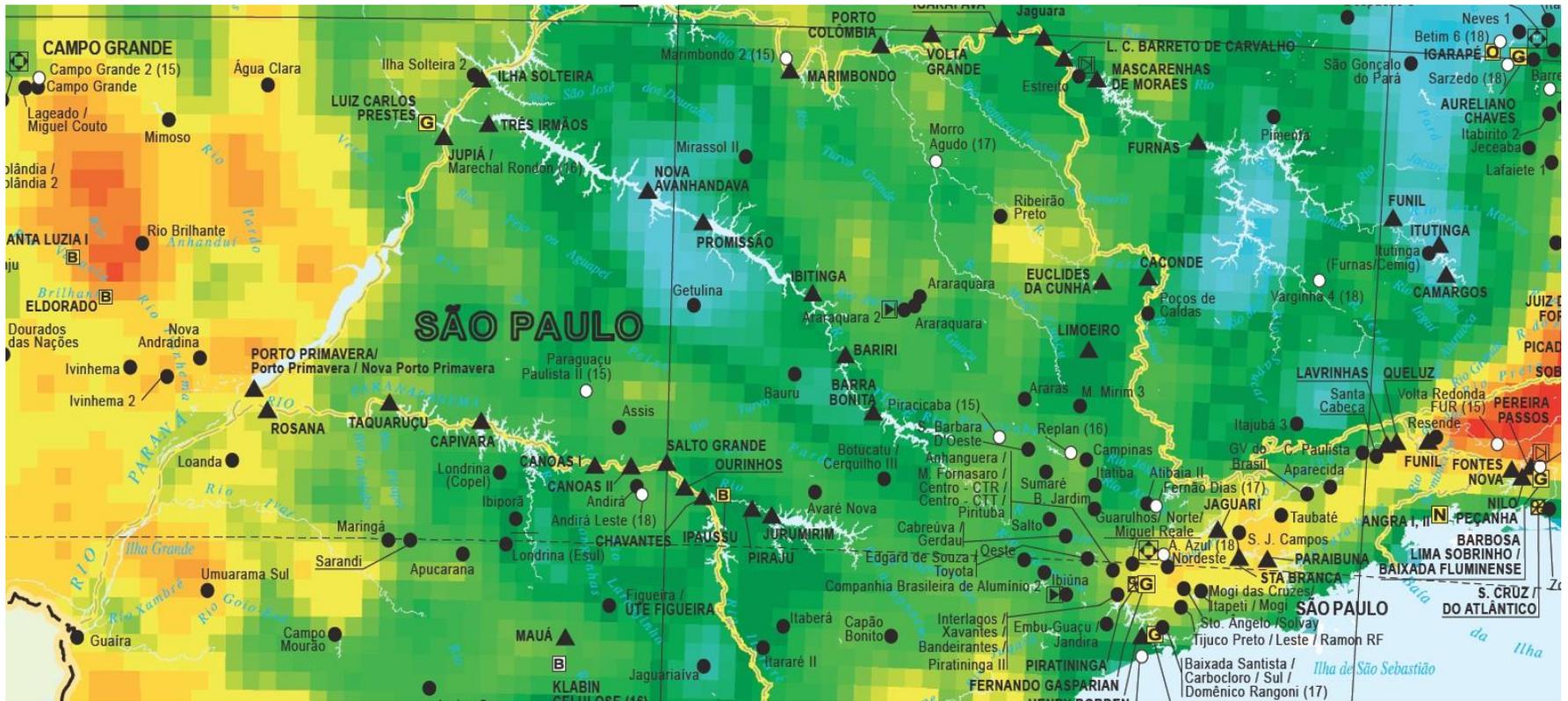




θ - ângulo de proteção
 r_s - distância de incidência

Frequência de Ocorrência

A densidade de raios para a terra (número de raios para a terra por quilômetro quadrado por ano) pode ser obtida a partir do nível cerâmico de cada região, o qual indica o número de dias no ano com ocorrência de trovoadas. O nível cerâmico não reflete necessariamente o número de descargas para a terra, já que uma única descarga ou uma série delas durante algumas horas serão ambas contadas como um único dia de trovoadas.



Sobretensões de Manobra

**Energização e Religamento de
Linhas**

**Chaveamento de Capacitores e
Reatores**

Energização de Transformadores

Rejeição de Carga

Aplicação e Eliminação de Falta

**Tensão de Restabelecimento
Através do Disjuntor**

**Resumo das Principais Manobras
e Valores Típicos de Sobretensões**

Outras Operações de Manobra

SOBRETENSÕES DE MANOBRA

- Definir requisitos dos isolamentos do equipamentos
- Especificar equipamentos de proteção
- SÃO SUBSTANCIALMENTE DIFERENTES DAS SOBRETENSÕES TEMPORÁRIAS

- VALORES MAIS ELEVADOS

- A MAGNITUDE É INFLUENCIADA PELA CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA
POTENCIA DE CURTO CIRCUITO, CARACTERISTICAS DO EQUIPAMENTOS

MODOS DE REDUÇÃO

COMPENSAÇÃO PARALELA, RESISTORES DE FECHAMENTO ETC

ASPECTO PROBABILISTICO

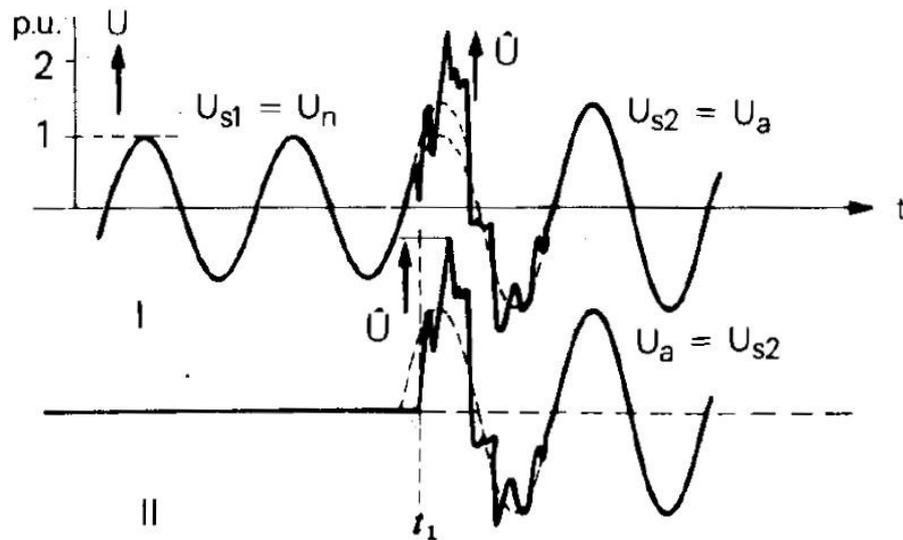
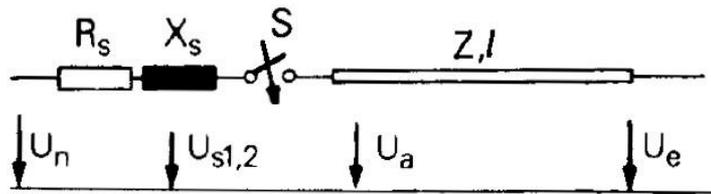
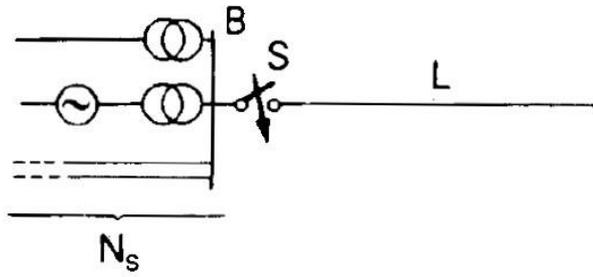
DIFERENTES VALORES DE SOBRETENSÃO PARA
UMA MESMA MANOBRA

DISPERSÃO NO INSTANTE DO FECHAMENTO DO DISJUNTOR
INSTANTE DA ONDA DE TENSÃO ONDE OCORREU O FECHAMENTO.

As sobretensões resultantes de manobras de energização e religamento dependem de diversas condições do sistema, sendo as mais importantes relacionadas a seguir:

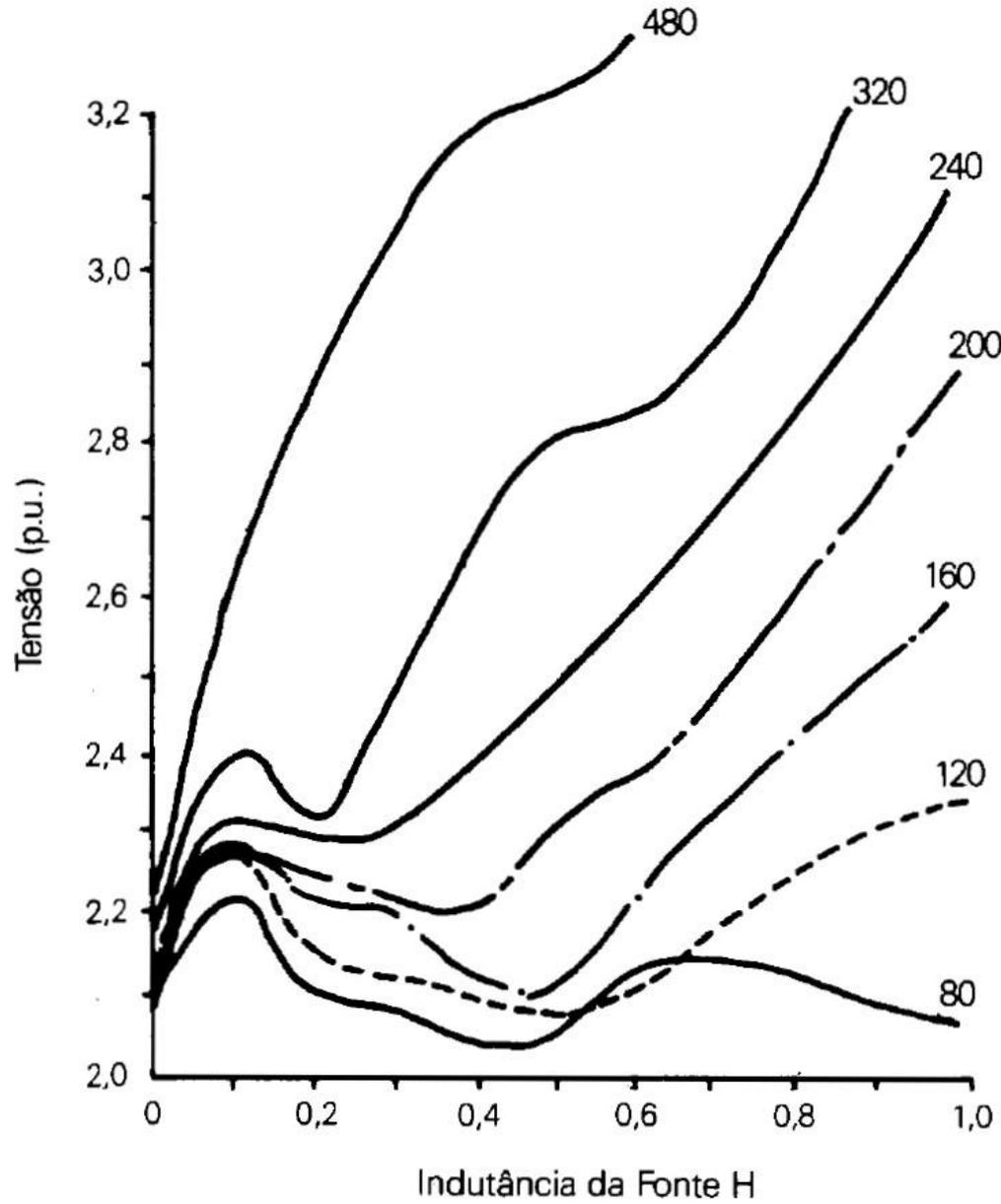
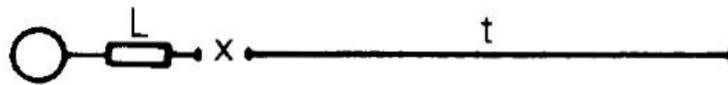
- a. Potência de curto-circuito do sistema alimentador
- b. Ponto na onda de tensão em que o disjuntor é fechado
- c. Grau de compensação da linha de transmissão
- d. Comprimento da linha de transmissão
- e. Perdas no condutor
- f. Presença de equipamentos de proteção
- g. Grau de aterramento do sistema
- h. Tensão de pré-manobra
- i. Valor do resistor de pré-inserção
- j. Tempo de inserção do resistor
- l. Dispersão entre os contatos do disjuntor
- m. Valor da carga residual na linha para o caso do religamento propriamente dito, uma vez que a energização pode ser encarada como um caso particular de religamento, onde a carga armazenada é igual a zero.

Energização de Linha

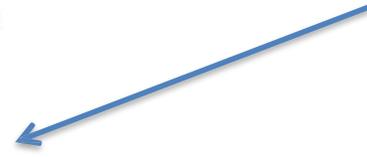


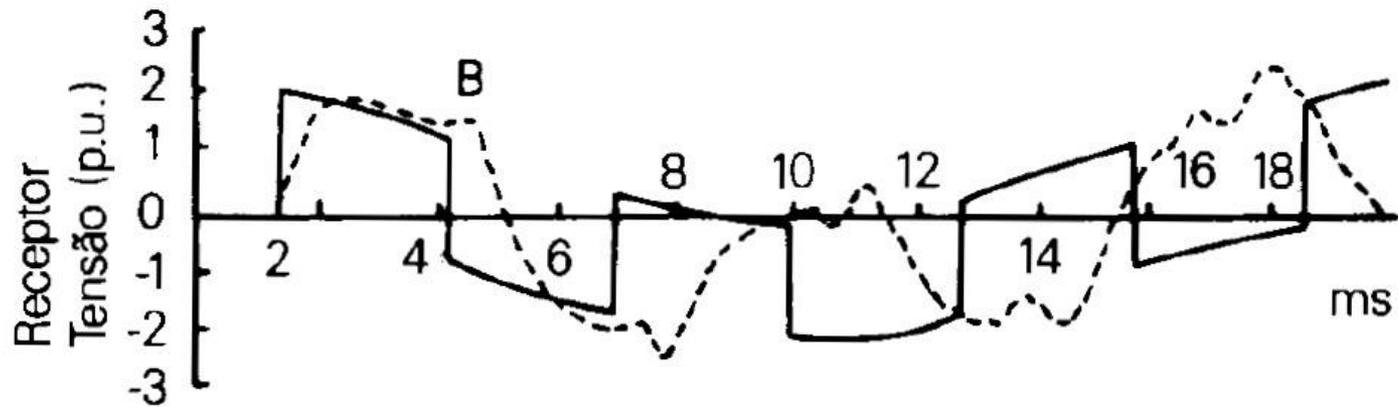
Como as 3 fases não são fechadas simultaneamente, em função da dispersão entre os contatos do disjuntor, logo após o fechamento da primeira fase já se têm ondas trafegando nas demais fases por causa do acoplamento existente entre elas. Estas ondas de tensão se propagam pela linha, indo se refletir nos terminais abertos onde então ocorrem as maiores sobretensões.

Quando uma linha de transmissão é energizada por uma fonte indutiva, as formas de onda e a magnitude das sobretensões transitórias desenvolvidas são dependentes de 3 constantes de tempo.



Comprimento da linha





— fonte infinita
 - - - fonte indutiva

Religamento de Linha

DISJUNTOR DESLIGA UMA LINHA EM VAZIO

A CORRENTE CAPACITIVA É INTERROMPIDA QUANDO PASSA POR ZERO

A TENSÃO ESTA PASSANDO PELO SEU VALOR MÁXIMO



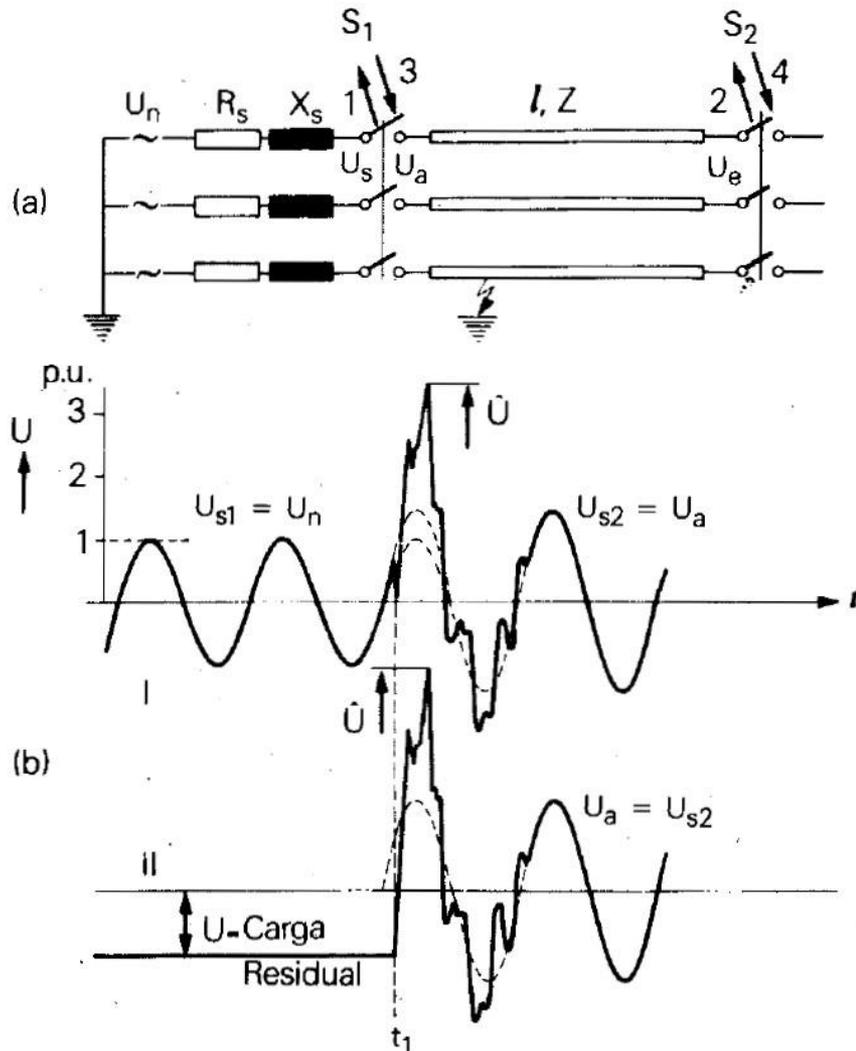
CARGA RESIDUAL

SE A LINHA FOR RELIGADA ANTES DA CARGA RESIDUAL TER SIDO DRENADA E OS POLOS DO DISJUNTOR FECHAREM....



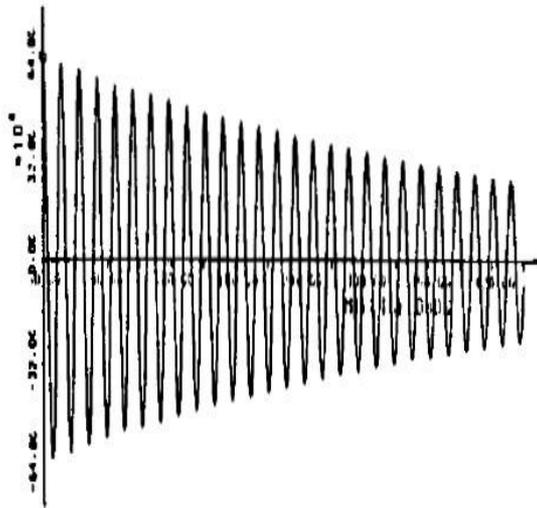
SOBRETENSÃO

Religamento de Linha

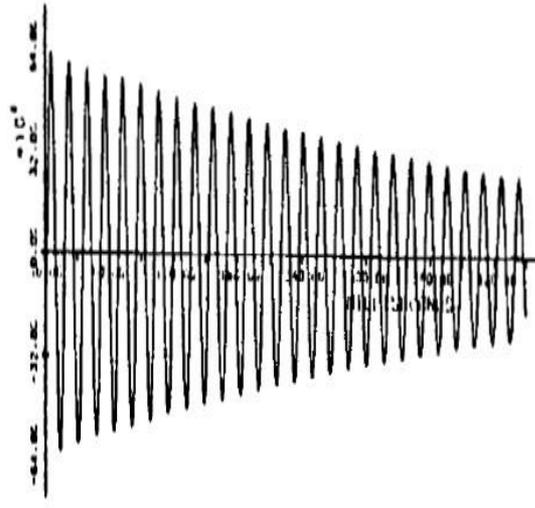


Desta forma, a linha mantém-se carregada com praticamente sua tensão máxima por um longo período após a interrupção da corrente, tempo este da ordem de 2 a 5 minutos para descarga total da linha, podendo atingir 15 minutos em condições ambientais muito secas, ou seja, bastante superior ao tempo morto utilizado nos esquemas de religamento que se situa em torno de 30 ciclos (0,5 segundos).

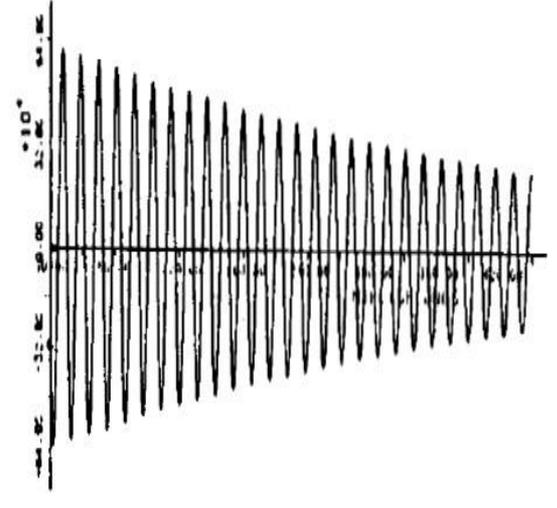
Fase A



Fase B



Fase C



(a) Abertura de linha em vazio com 100% de compensação

Oscilação da Carga em Linhas não Transpostas com Compensação Paralela - Medido no Começo da Linha

Quando a linha é compensada por um reator em derivação, o comportamento da carga residual retida nas capacitâncias da linha assume forma oscilatória, em geral com composição de freqüências, dependendo do grau de compensação paralela. A forma de onda possui um amortecimento na sua magnitude no decorrer do tempo, dependente do fator de qualidade do reator. Esta descarga transitória é quem determina as condições de fechamento dos pólos do disjuntor.

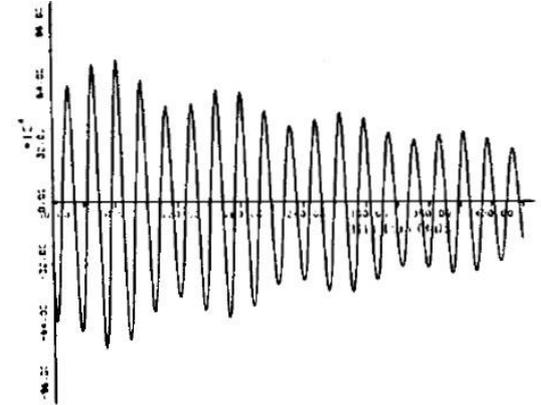
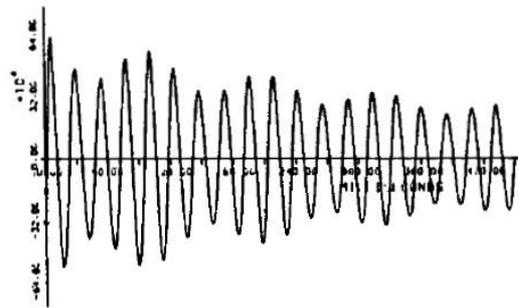
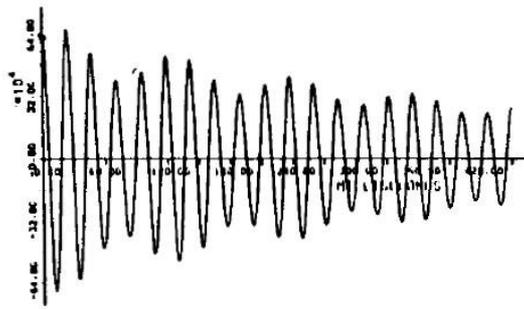
Neste caso transposto tem-se como freqüências naturais dos diferentes modos a seguinte relação: $f_1 = f_2 \neq f_0$, onde f_1 e f_2 são conhecidos como os modos "aéreos", enquanto que f_0 corresponde à seqüência zero.

$$f_1 = f_2 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}}$$

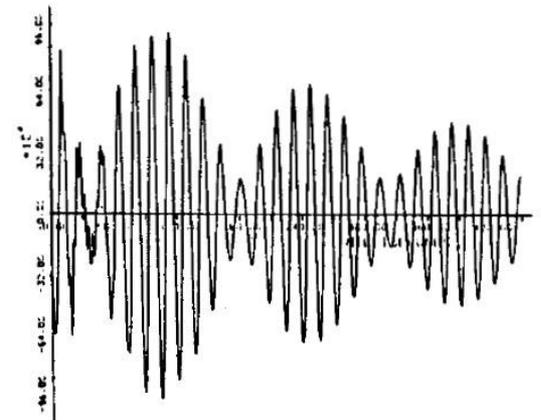
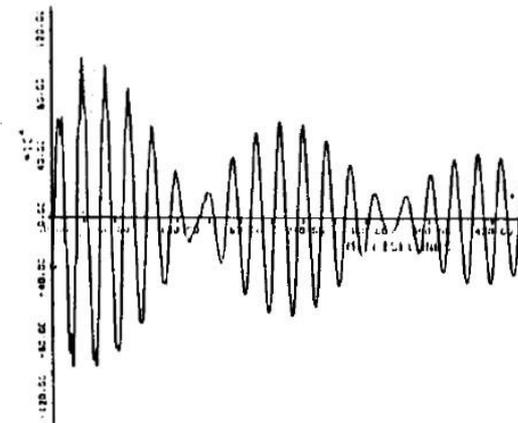
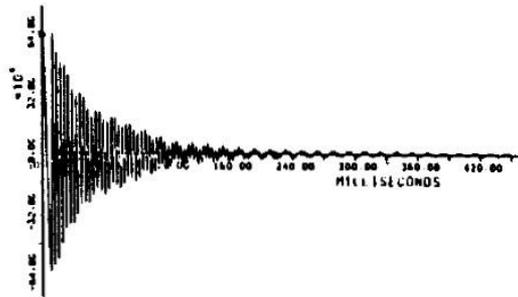
L_1, C_1 - parâmetros de seqüência positiva

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0 C_0}}$$

L_0, C_0 - parâmetros de seqüência zero



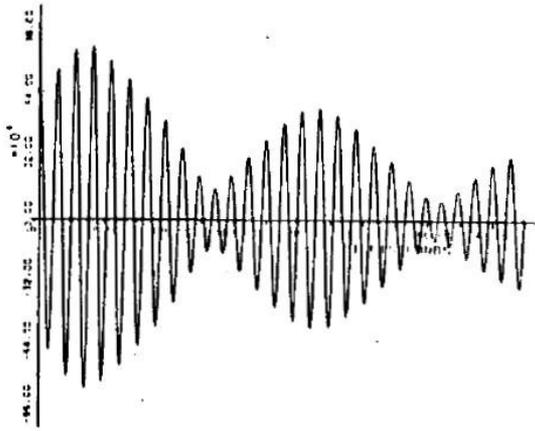
(b) Abertura de linha em vazio com 50% de compensação



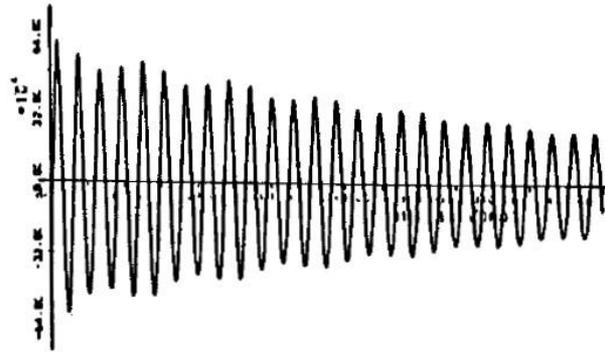
(c) Abertura de linha com curto monofásico - 100% de compensação

Estas sobretensões podem ainda ser reduzidas se os disjuntores forem providos de resistores de fechamento, os quais absorvem a energia associada às ondas trafegantes.

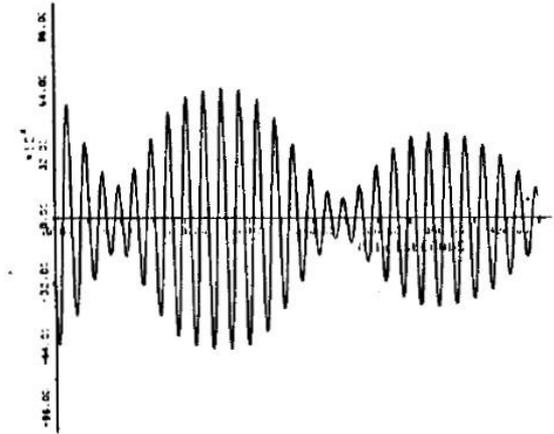
Fase A



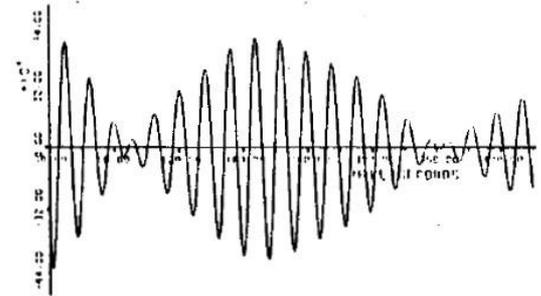
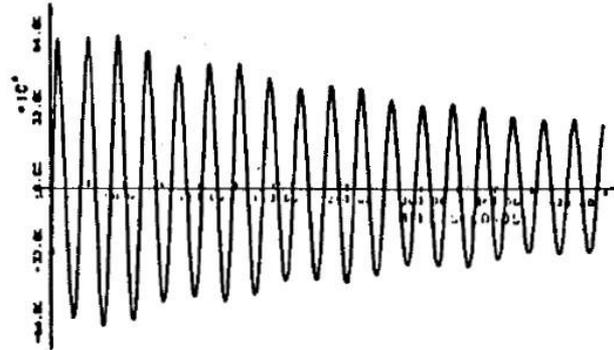
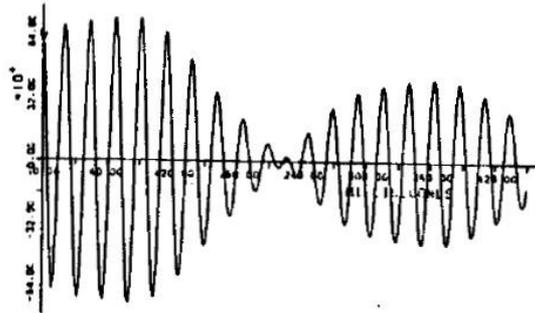
Fase B



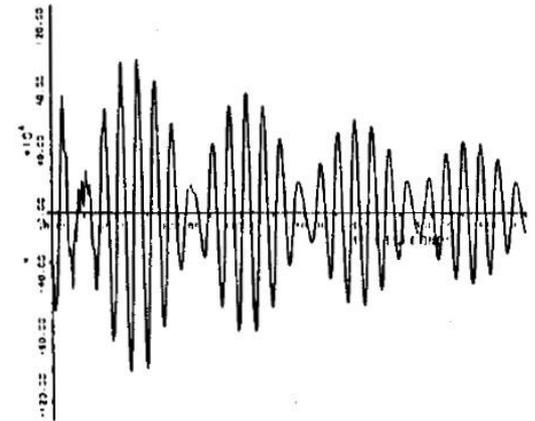
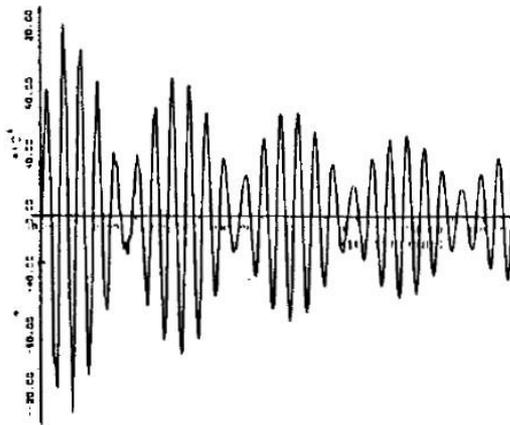
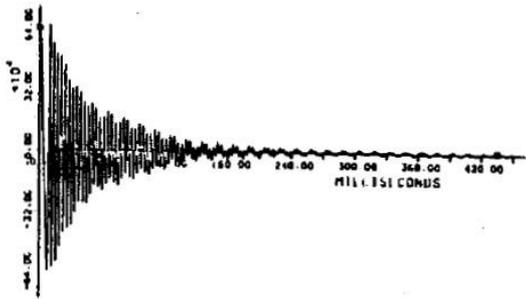
Fase C



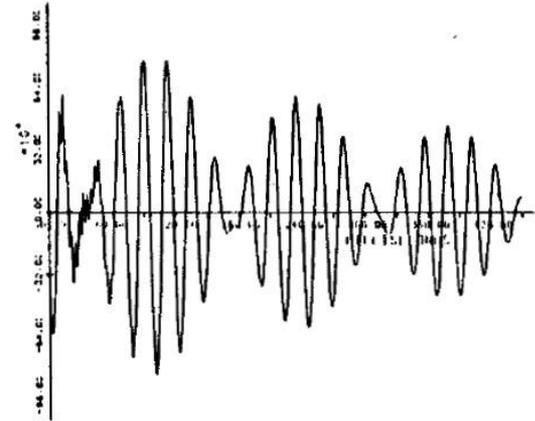
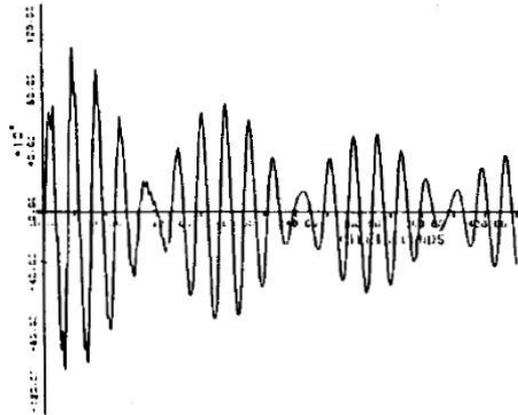
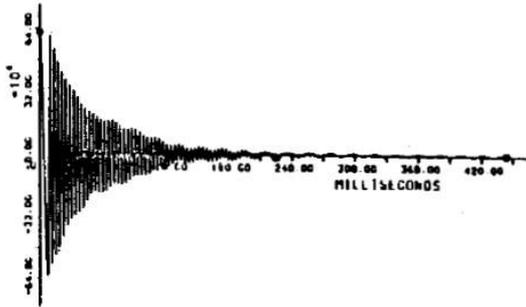
(a) Abertura de linha em vazio com 100% de compensação



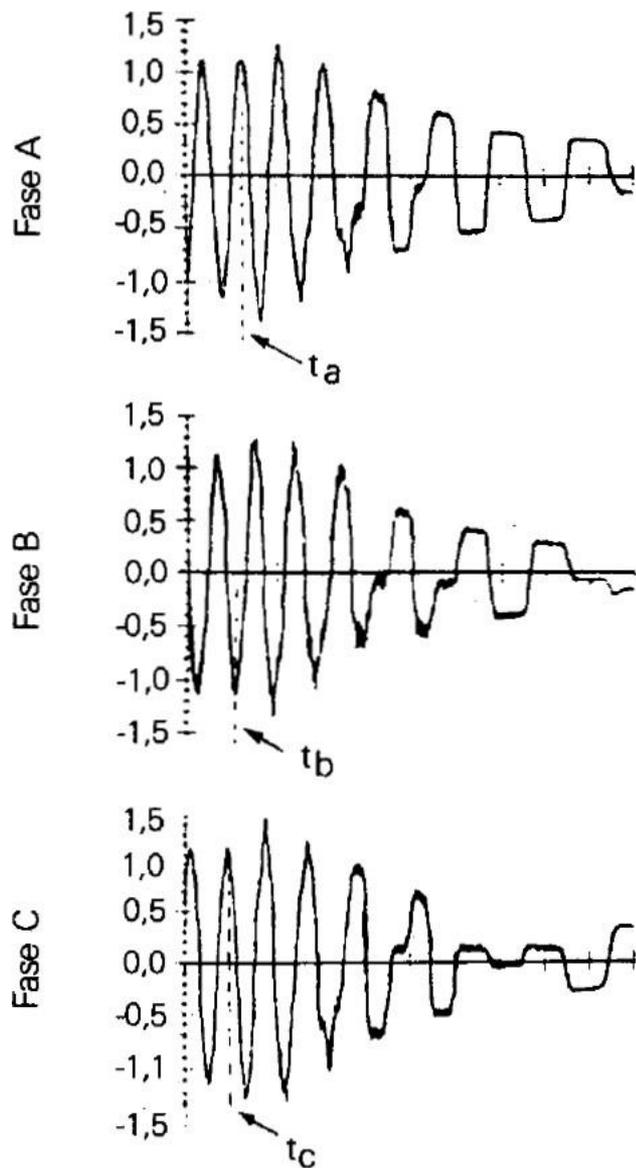
(b) Abertura de linha em vazio com 50% de compensação



(c) Abertura de linha com curto monofásico - 100% de compensação



(d) Abertura de linha com curto monofásico - 50% de compensação

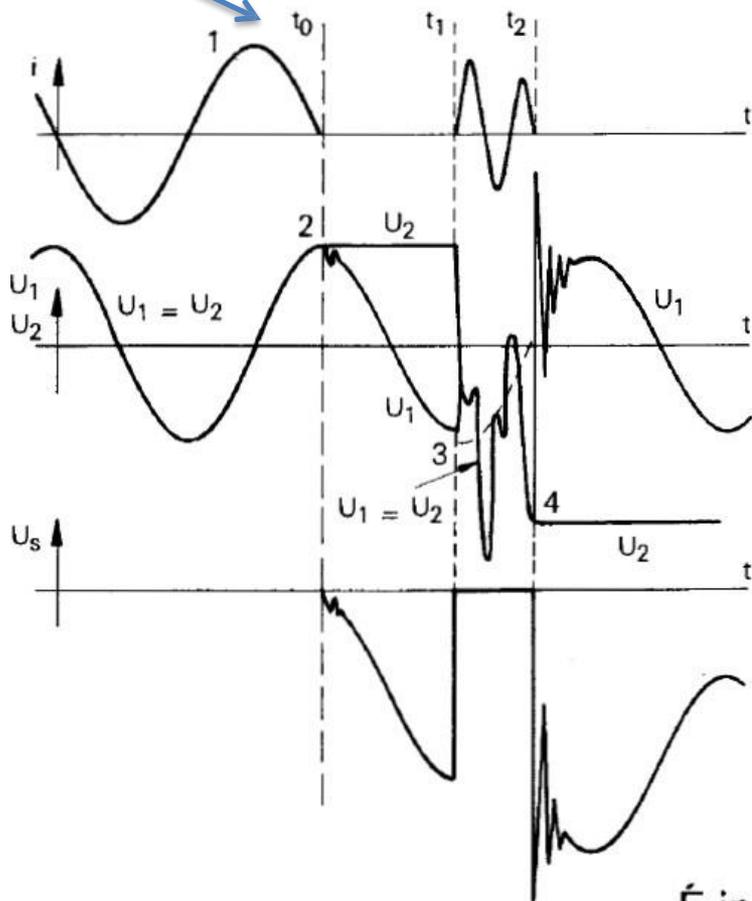
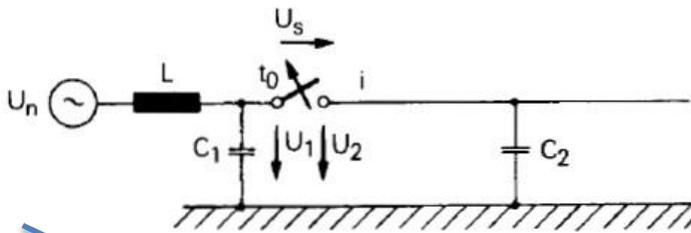


Sobretensões transitórias também podem ser produzidas quando uma linha é desenergizada. Um exemplo de desenergização de uma linha terminada com um transformador

onde se pode observar que a tensão atinge valores de aproximadamente 1,5 p.u. e a forma de onda apresenta um aspecto retangular por causa do efeito da saturação do transformador.

Sobretensões Produzidas quando uma Linha Terminada por Transformador é Desenergizada (t_a , t_b , t_c são os instantes de abertura dos disjuntores) [1]

Chaveamento de Capacitores e Reatores



Circuitos Capacitivos

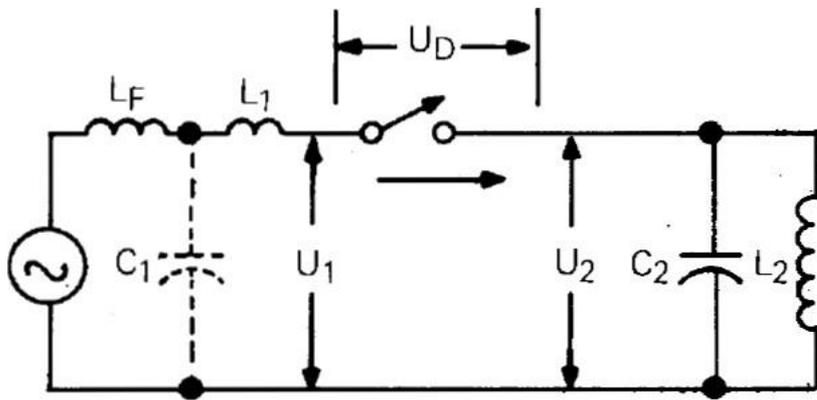
A corrente está adiantada em relação à tensão de 90° . Os contatos do disjuntor se abrem em torno do ponto 1. Se estabelece um arco até a passagem por zero.

Ponto 2 o capacitor permanece carregado com a Tensão $U_2 = 1 \text{ pu}$. Quando a tensão da fonte muda de polaridade a tensão atinge $U_2 - U_1$ até 2 pu . Se o disjuntor não tiver suficiente rigidez dielétrica para suportar a tensão através de seus contatos ocorrerá **reignição**.

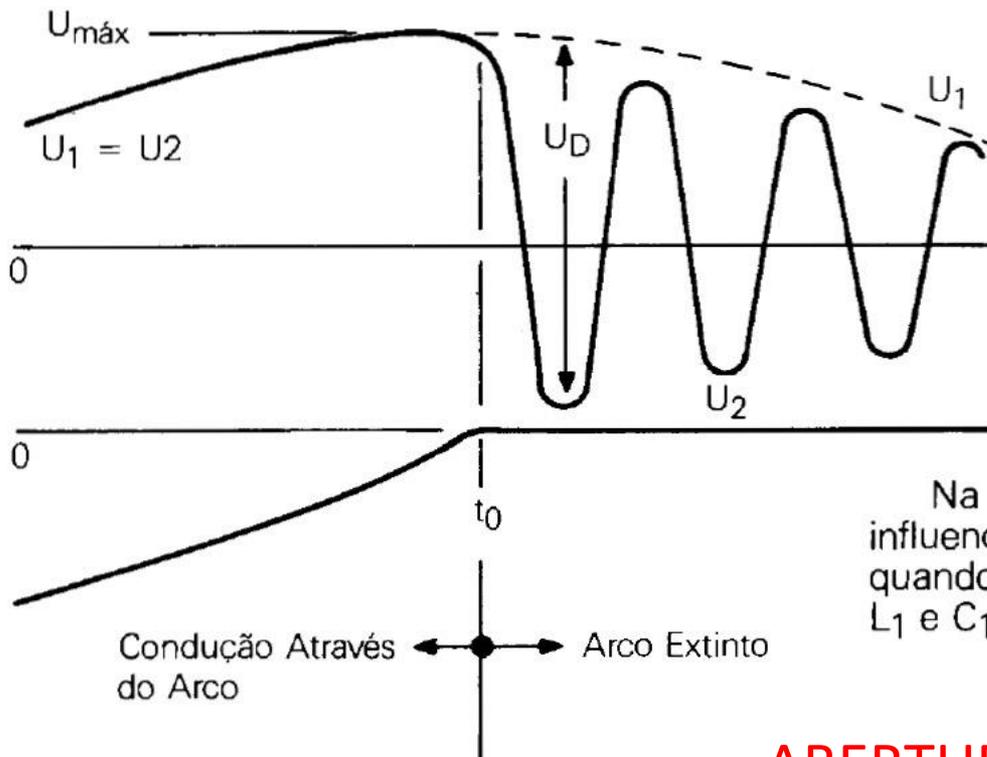
É interessante enfatizar que este processo pode ocorrer sempre que correntes capacitivas são manobradas, como por exemplo a abertura de uma linha de transmissão, um cabo ou um banco de capacitores.

Circuitos Indutivos

$$\omega L \ll 1/\omega C,$$



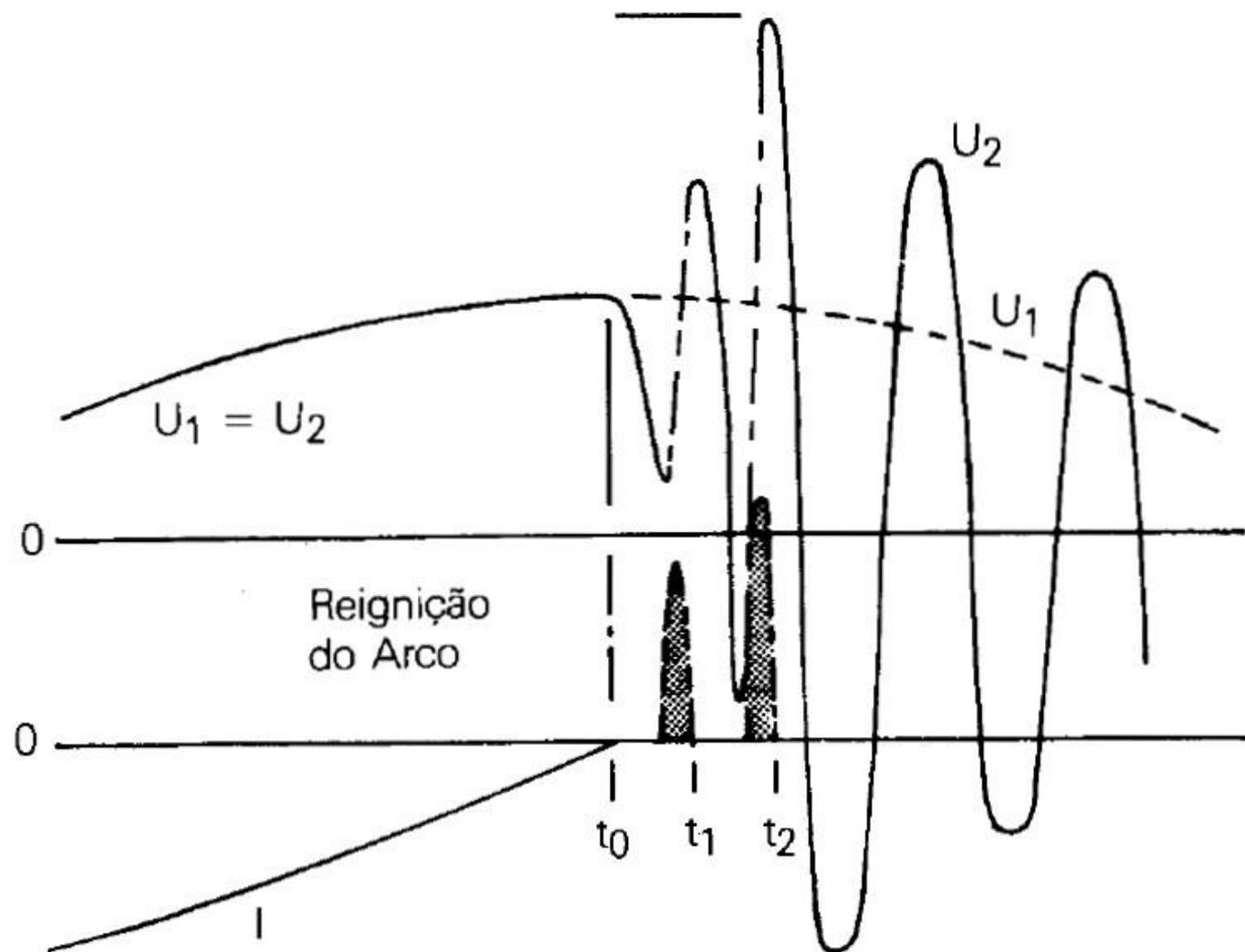
I_1 é a mesma corrente que circula na chave
 admite-se que L_F é menor que L_2
 Os contatos do disjuntor se separam antes da
 corrente passar por zero quando o arco se
 extingirá isto é quando $U_1 = U_2$ máximo
 Se o arco se extinguiu e assim permaneceu
 haverá uma oscilação da tensão U_2 devido a
 troca de energia entre C_2 e L_2

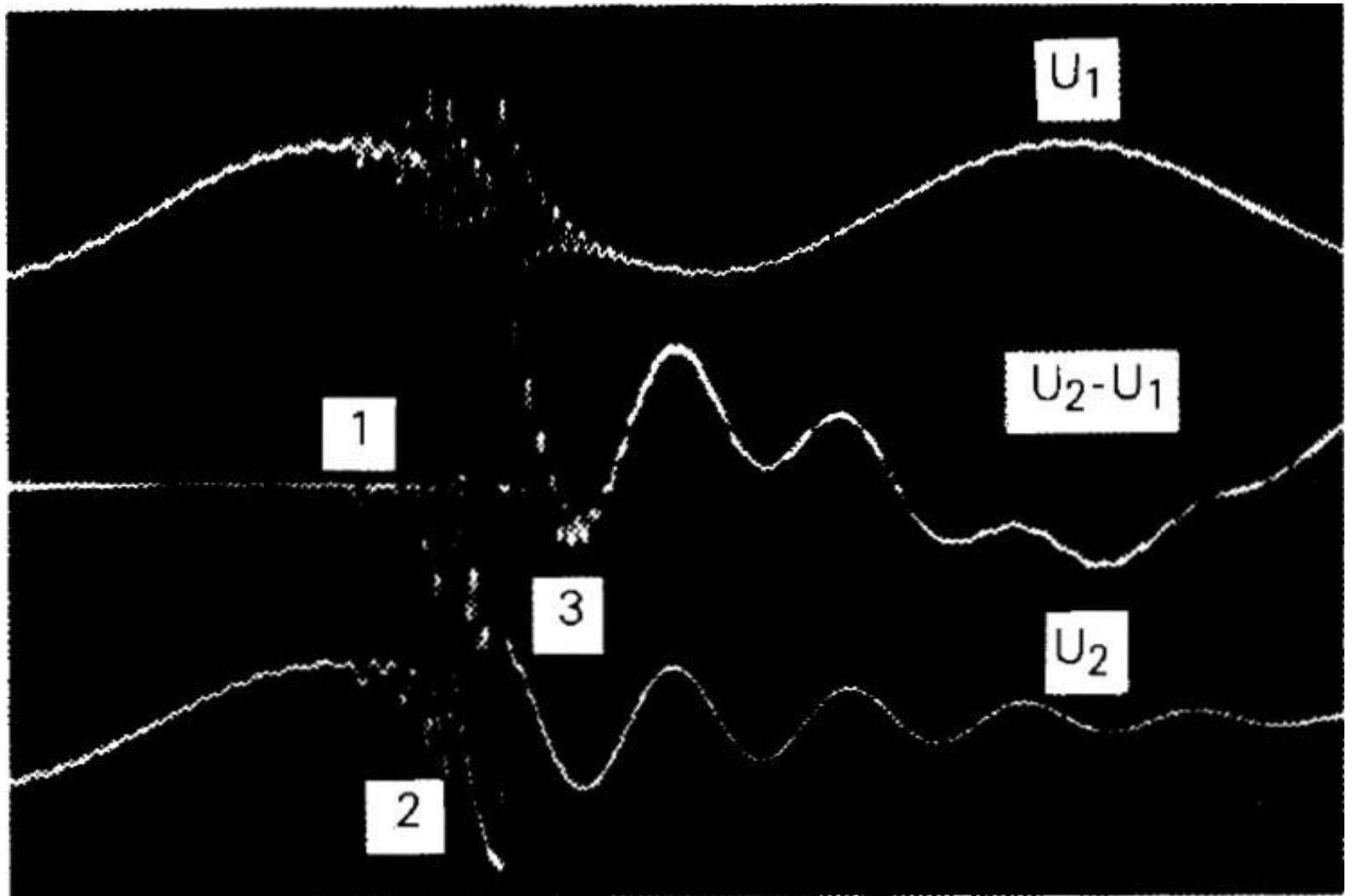


Na prática, a tensão de restabelecimento é influenciada pelas oscilações que ocorrem na tensão U_1 quando o arco se extingue. Estas oscilações são devidas a L_1 e C_1 .

ABERTURA DE UM CIRCUITO INDUTIVO

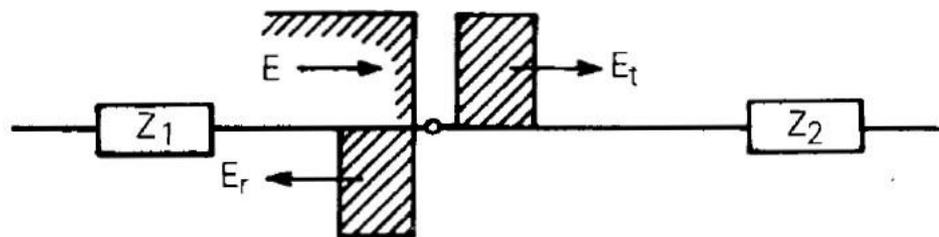
Reignição e Aumento da Tensão





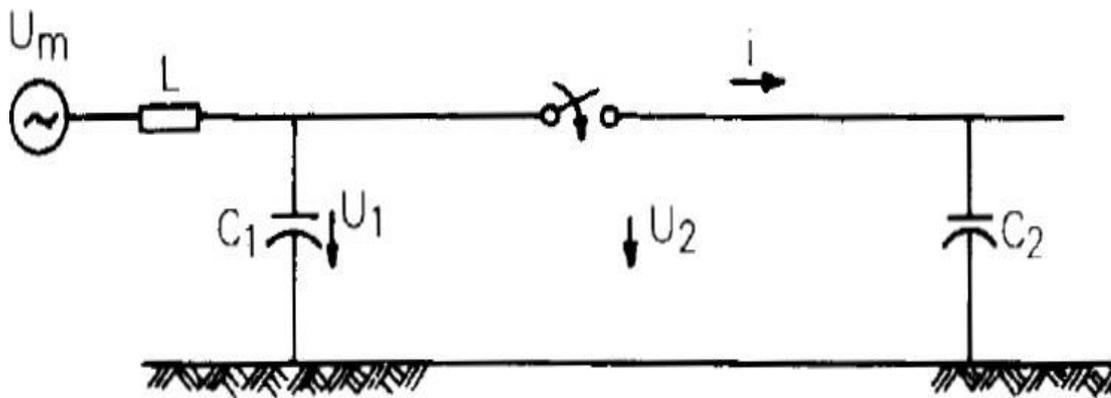
Aplicação e Eliminação de Falta

A importância dos estudos de aplicação de falta se prende basicamente a dois fatos. O primeiro é de que as sobretensões transitórias e sustentadas geradas em um sistema quando da ocorrência de um curto-circuito são fatores decisivos na seleção dos pára-raios, uma vez que estes são escolhidos de modo a não atuarem dinamicamente para esta manobra pois, em caso contrário, a sua capacidade de absorção de energia seria excedida.



E - onda incidente
 E_t - onda transmitida
 E_r - onda refletida

A manobra de eliminação de falta, quando esta operação for feita sem que haja abertura de linha (por exemplo, curto no barramento) pode ser analisada considerando que no circuito da Figura abaixo a chave fecha quando a tensão da fonte passar pelo máximo, sem tensão inicial através do capacitor. Isto é equivalente a uma eliminação do defeito (no zero de corrente) através do capacitor, havendo, com este chaveamento, uma redistribuição da tensão através de um circuito oscilatório.



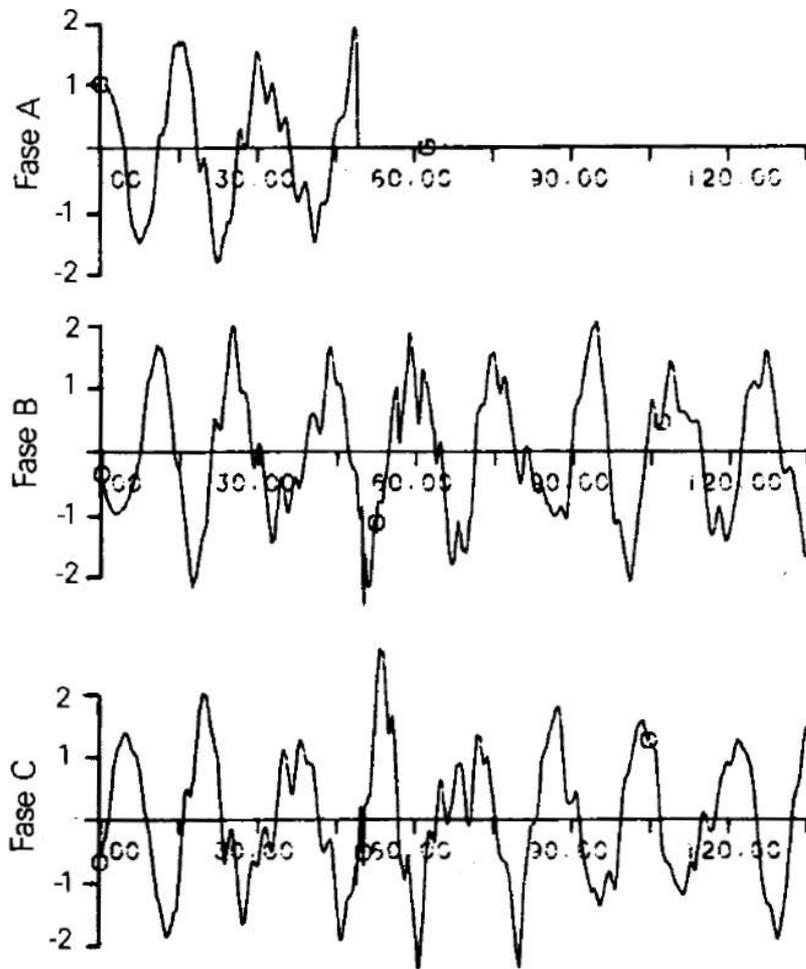
CAPACITOR C_2 DESCARREGADO

Eliminação de Falta

No caso de um disjuntor operar no sentido de retirar a linha faltosa, esta análise pode ser feita de forma semelhante à abertura de circuitos capacitivos.

O defeito mais comumente estudado é o curto-circuito monofásico, uma vez que esta é a falta mais freqüente em um sistema de transmissão. Assumindo-se, para um sistema de neutro isolado, que o valor de pico da componente transitória ocorre simultaneamente com o pico da tensão à freqüência industrial, a sobretensão decorrente deste defeito poderá atingir, teoricamente, $\sqrt{3} + 1 = 2,73$ vezes

Rejeição de Carga

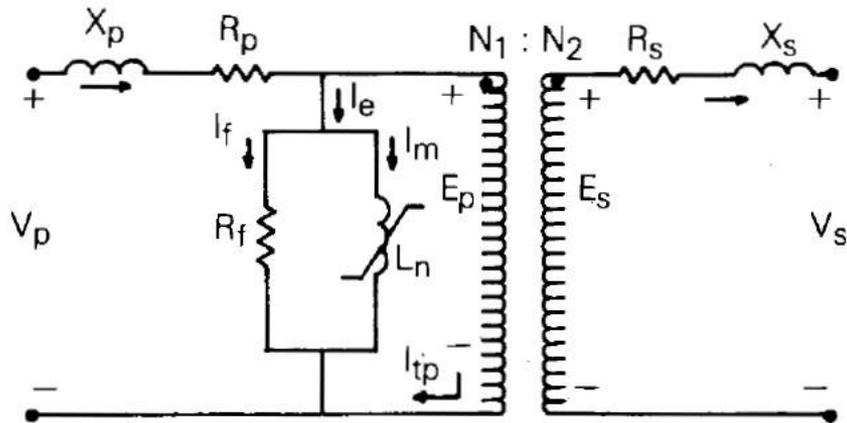


Valores em p.u.

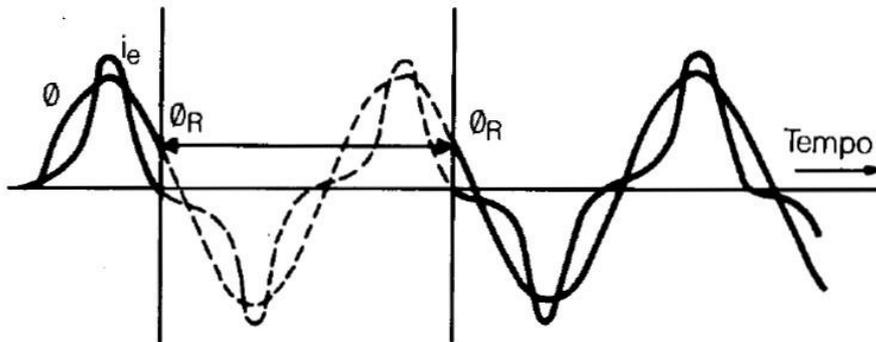
Quando a rejeição de carga é seguida de curto-circuito, normalmente as sobretensões nas fases sãs aumentam significativamente,

Os pára-raios conectados na rede por ocasião de uma rejeição de carga normalmente são severamente solicitados, apresentando elevados níveis de absorção de energia com descargas sucessivas.

Energização de Transformadores



Correntes inrush pode permanecer por vários segundos e apresenta picos muito Superiores a corrente nominal do trafos.



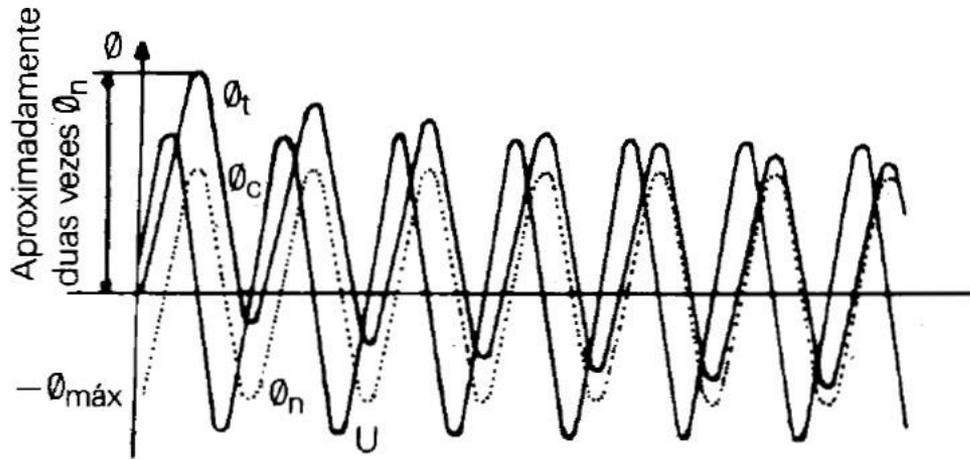
Transformador desenergizado neste ponto

Transformador reenergizado neste ponto

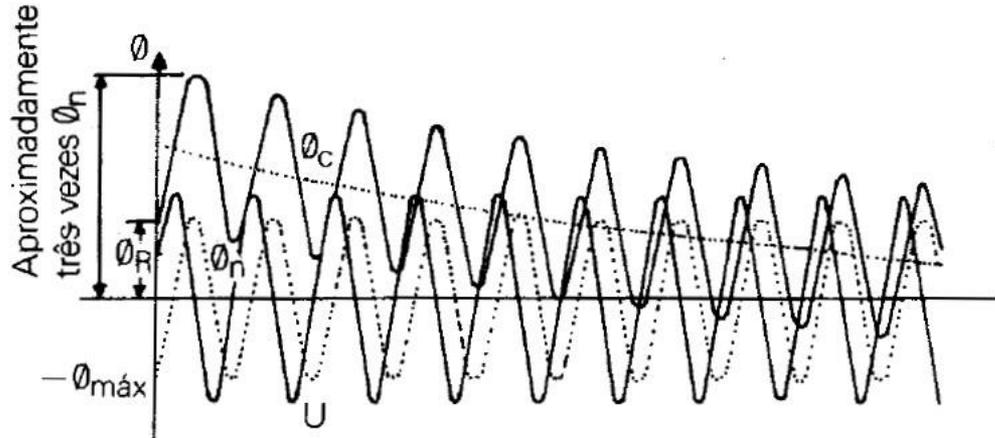
Energização de Transformador no Instante em que o Fluxo é Igual ao Fluxo Residual

Exemplos de Corrente de "Inrush"

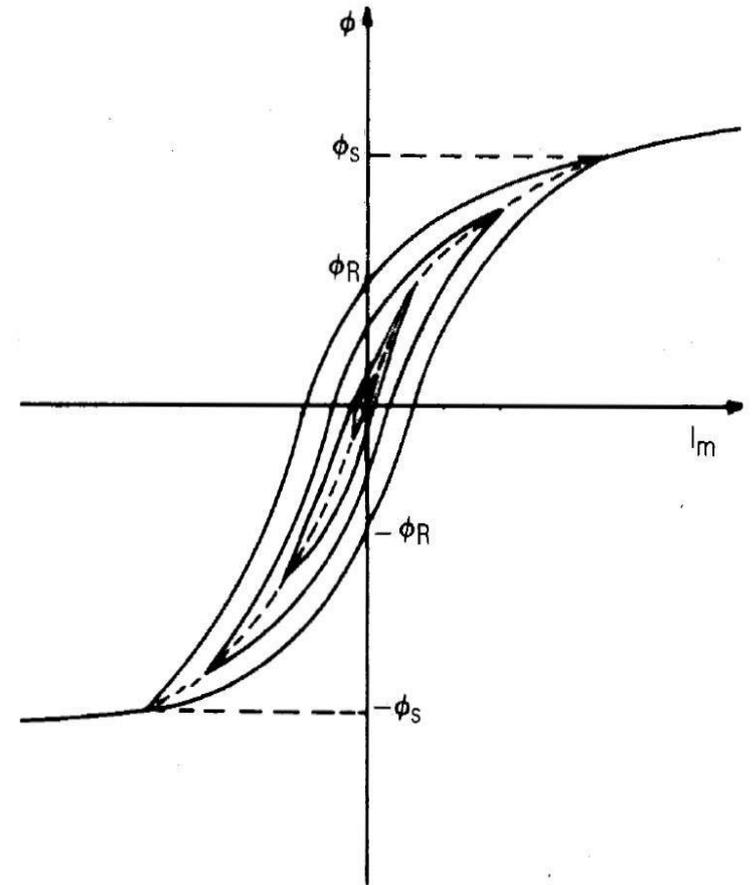




Energização de Transformador no Instante em que o Fluxo é Máximo Negativo, sem Fluxo Residual



Energização de Transformador no Instante em que o Fluxo é Máximo Negativo, com Fluxo Residual Igual a $+\phi_{\text{máx}}$



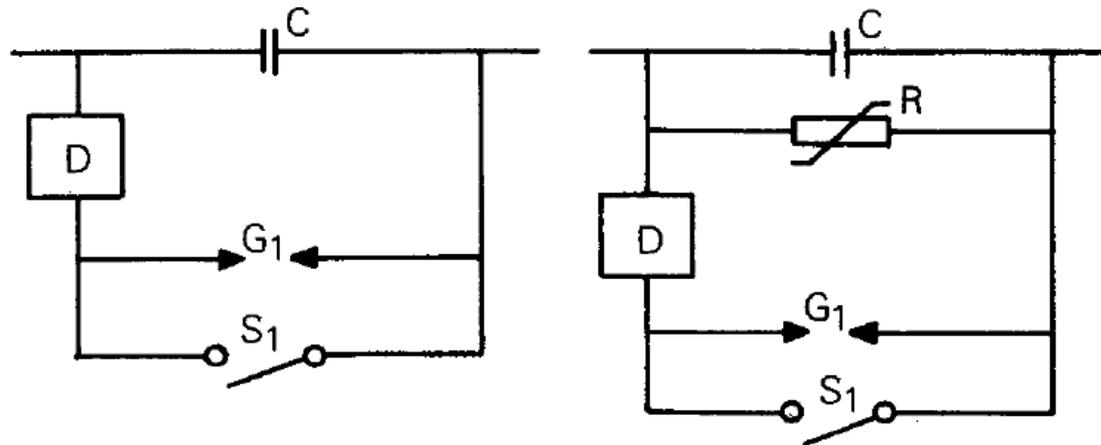
Sobretensões Ressonantes

Durante o "inrush", as correntes circulantes no sistema elétrico, principalmente no transformador energizado, apresentam componentes a frequências diferentes da industrial. Estes harmônicos de corrente, ao circularem pelos componentes do sistema elétrico, provocam o aparecimento de tensões com forte conteúdo harmônico.

É importante caracterizar que a fonte de harmônicos é a indutância não linear do transformador energizado, mas os efeitos destas correntes e tensões distorcidas se fazem sentir em todo o sistema elétrico, com maior intensidade nas áreas próximas da subestação energizada.

Outras Operações de Manobra

Existem outros tipos de operações de manobra que não se encaixam na definição de energização e religamento, mas que são causadores de sobretensões.



Esquemas de "By-pass" de Capacitor Série

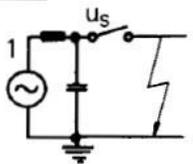
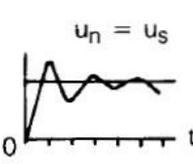
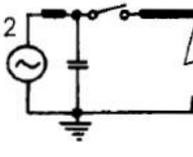
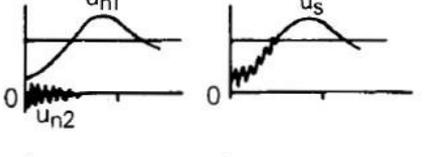
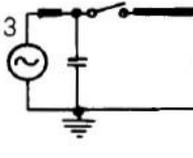
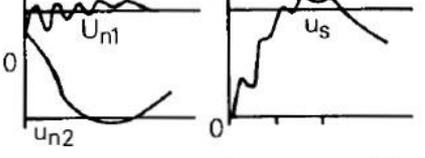
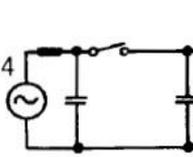
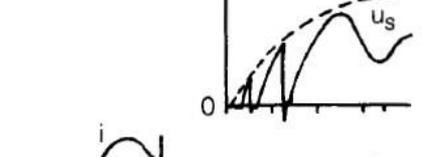
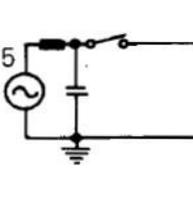
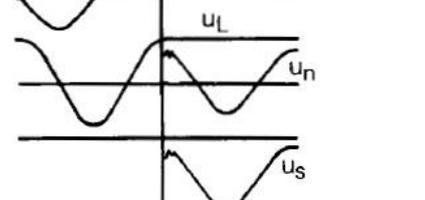
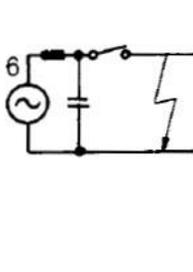
- C Capacitor
- R Resistor não-linear (ZnO)
- D Circuito de amortecimento
- G₁ "Gap"
- S₁ Disjuntor de "by-pass"

Uma seqüência típica desses eventos começa com um curto-circuito fase-neutro com um conseqüente aumento da corrente que circula através do capacitor série na fase em falta. Este aumento de corrente, por sua vez, causa um aumento da tensão através deste capacitor, resultando numa eventual operação de proteção, retirando o capacitor.

TABELA 5.2 - Sumário das mais importantes Operações de Manobra [4]

Operações de Manobra	Diagrama Básico	
1 Energização de linha		
2 Religamento (energização de uma linha com carga residual)		
3 Energização, pelo lado de baixa, de uma linha		
4 Energização de uma linha terminada por um transformador em vazio		
5 Rejeição de carga no final da linha		
6 Rejeição de carga no final da linha seguido de abertura da mesma		
7 Interrupção de linha em vazio ("line dropping")		
8 Chaveamento de transformador em vazio		
9 Chaveamento de transformadores com reatores ligados no terciário		
10 Chaveamento de reatores		
11 Chaveamento em subestações intermediárias		
12 Iniciação de curto monofásico sem operação de chaveamento		
V ₀ - carga residual	1,2 - seqüência de manobra	3 - carga

TABELA 5.3 - Resumo dos mais importantes Casos de Interrupção de Circuitos Elétricos [4]

Tipo de Manobra	Sistema	Forma de Onda
1 Falta terminal		
2 Falta quilométrica		
3 Chaveamento em 2 sistemas fora de fase (perda de sincronismo) - a tensão depende das condições de aterramento do sistema.		
4 Chaveamento de pequenas correntes indutivas - corte de corrente (transformador em vazio).		
5 Interrupção de correntes capacitivas - bancos de capacitor, linhas e cabos em vazio.		
6 Desenvolvimento de falta - por exemplo ocorrência de descarga na interrupção de transformadores em vazio com formação de arco entre os contatos do disjuntor e conseqüente curto-circuito. Neste caso, embora o disjuntor tenha efetuado sua operação de manobra inicial, ele deve agora interromper este curto-circuito.		

Após a abertura do disjuntor quando o mesmo está interrompendo uma corrente de defeito, um arco é formado entre os contatos. Sob determinadas condições este arco é extinto quando da passagem da corrente pelo zero.

A rede elétrica reage a esta interrupção de corrente sob a forma de oscilações transitórias, que dá origem à Tensão de Restabelecimento Transitória – TRT.

Em outras palavras, a TRT é a diferença entre a resposta transitória do lado fonte e a do lado carga nos pólos de um disjuntor.