



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
XXX.YY  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

## **GRUPO X**

### **GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO – GSC**

#### **SOLICITAÇÕES DE DISJUNTORES NA MANOBRA DE LINHAS NÃO CONVENCIONAIS**

**Carlos Portela\***

**COPPE / UFRJ**

**Carlos Kleber C. Arruda**

**CEPEL e COPPE / UFRJ**

**Clóvis José Silva**

**COPPE / UFRJ**

**José Augusto Miranda**

**PETROBRAS e COPPE / UFRJ**

## **RESUMO**

Analisa-se aspectos de interrupção de corrente de defeito para dois tipos construtivos de linhas de transmissão (LT): um projeto “convencional”, com concepção similar ao das linhas usuais (LC) (inclusivamente no Brasil) e um projeto “não-convencional”, baseado em linhas “não convencionais” (LNC), nomeadamente com características adequadas para transmissão a distâncias muito longas (da ordem de 2000 a 3000 km) e associadas a concepções também não convencionais dos troncos de transmissão, em princípio sem compensação reativa ou com compensação reativa muito reduzida, e, por exemplo, com manobra do conjunto da linha a partir de uma das extremidades, usando um único disjuntor.

Basicamente, a análise refere-se à manobra de interrupção de correntes elevadas por disjuntores terminais de linha, para a qual a condição crítica típica corresponde à interrupção de defeito “quilométrico” (“*short line fault*”), que é bastante mais severa, para o disjuntor, que a interrupção de curto-circuito aos terminais do disjuntor. Compara-se a severidade, para os disjuntores, da manobra de linhas LC e LNC.

Apresenta-se exemplos comparando linhas LC e LNC, com níveis de tensão 500-550 kV, 750-800 kV e 1000 kV. Para o nível 500-550 kV, a comparação é feita para uma linha de 500 km, uma vez que este nível de tensão não é adequado para transmissão a distâncias muito longas. Para os níveis 750-800 kV e 1000 kV faz-se a comparação para condições representativas do que será a solução natural para base do crescimento do setor elétrico a médio prazo, com aproveitamento do potencial hidroelétrico da Amazônia, o que exige a adoção de soluções adequadas para transmissão a distâncias muito longas, transportando energia elétrica produzida em usinas hidroelétricas nos afluentes do Amazonas para os centros “consumidores” (e também geradores) no Sudeste e no Nordeste.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Disjuntor, defeito quilométrico, linhas de transmissão não convencionais, LNC, transmissão a distância muito longa.

## **1.0 - INTRODUÇÃO**

A solução natural para o imprescindível crescimento do setor elétrico brasileiro, a médio prazo, é basear esse crescimento no aproveitamento do potencial hidroelétrico da Amazônia, sem prejuízo de meios de geração complementar, a partir de outras fontes, otimizando globalmente o setor de energia elétrica. Um dos condicionamentos desse aproveitamento é a necessidade de otimizar a transmissão de energia, basicamente para o Sudeste e Nordeste, com distâncias de transmissão da ordem de 2000 a 3000 km, e, para tal, é inadequado, sob os pontos de vista técnico e econômico, o uso de soluções tradicionais de transmissão.

Uma solução potencialmente interessante, mas que não é objeto da análise feita neste artigo, é o uso de transmissão em corrente contínua.

Outra solução potencialmente muito interessante é basear a transmissão em linhas não convencionais (LNC), em corrente alternada, otimizadas para os condicionamentos específicos das transmissões em causa.

Em pesquisas e trabalhos anteriores (6), estudou-se soluções não convencionais, abandonando deliberadamente o critério de escolher soluções similares a linhas e equipamento de compensação similares aos atuais sistemas de transmissão, mas considerando critérios muito robustos de validade física, impacto ambiental e otimização conjunta do tronco de transmissão. Essa otimização considera nomeadamente: custos de investimento e operacionais, incluindo perdas, flexibilidade operacional, adequação para uma larga gama de cenários a longo prazo e confiabilidade. Nomeadamente, obteve-se soluções muito interessantes, baseadas em troncos de transmissão em corrente alternada, não convencionais, com capacidade de transmissão unitária de 2 GW a 12 GW,

(\*) Rua Eng. Cesar Grillo, 249, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, CEP 22640-150 ; Tel./Fax: +55-21-2493-4201; email: <portelac@ism.com.br>

para níveis de tensão de 500 kV a 1200 kV, sem necessidade de compensação reativa, ou com compensação reativa muito reduzida, e sem necessidade de subestações intermediárias. Esses troncos podem ser energizados e desenergizados manobrando um único disjuntor, com sobretensões de manobra moderadas, têm perdas reduzidas, comportamento muito favorável para variações de carga e estabilidade eletromecânica de redes interligadas, originam campo eletromagnético moderado próximo da linha, têm impacto ambiental muito menor e custos tipicamente muito menores que sistemas de transmissão baseados em soluções convencionais.

Comparativamente com soluções recentes, baseadas em linhas convencionais, o uso de soluções baseadas em LNC, permite reduzir a cerca de um quinto a um terço (relação de custos da ordem de 5 : 1 a 3 : 1), os custos de transmissão por unidade de potência transmitida, com características técnicas muito mais interessantes e com impacto ambiental muito menor (6).

Fez-se também (6) uma análise sistemática das condições potencialmente críticas para as soluções não convencionais, que podem ser bastante diferentes das condições tipicamente críticas para as soluções convencionais, e identificou-se procedimentos para evitar ou limitar eventuais condicionamentos indesejáveis, fazendo uso adequado das características específicas das soluções não convencionais.

### 1.1 Escopo básico da análise efetuada

Na linha da análise sistemática mencionada acima, apresenta-se neste artigo uma análise básica da manobra de interrupção de correntes elevadas por disjuntores terminais de linha, para a qual a condição crítica típica corresponde à interrupção de defeito “quilométrico” (“*short line fault*”), que é bastante mais severa, para o disjuntor, que a interrupção de curto-circuito aos terminais do disjuntor. Compara-se a severidade, para os disjuntores, da manobra de linhas LC e LNC.

Apresentam-se exemplos comparando linhas LC e LNC, com níveis de tensão 500-550 kV, 750-800 kV e 1000 kV. Para o nível 500-550 kV, a comparação é feita para uma linha de 500 km, uma vez que este nível de tensão não é adequado para transmissão a distâncias muito longas. Para os níveis 750-800 kV e 1000 kV faz-se a comparação para condições representativas do que será a solução natural para base do crescimento do setor elétrico a médio prazo, com aproveitamento do potencial hidroelétrico da Amazônia, o que exige a adoção de soluções adequadas para transmissão a distâncias muito longas, transportando energia elétrica produzida em usinas hidroelétricas nos afluentes do Amazonas para os centros “consumidores”, especialmente no Sudeste, e, em segundo grau de importância, no Nordeste.

Considera-se uma hipótese de um tronco da transmissão de 2550 km, interligando, por exemplo, um centro de geração na região Norte a um centro de geração e carga na região Sudeste, conforme ilustrado na Figura 1. A região de geração reúne grupos de usinas em uma subestação de 750-800 kV ou 1000 kV, a partir de LTs curtas. A subestação do “centro de carga” é interligada a um sistema “equivalente” representativo da carga e geração para efeitos do barramento terminal do tronco de transmissão, representando cargas e usinas geradoras. O estudo de abertura de disjuntor considera a manobra dos disjuntores dos dois terminais da linha, procurando as condições potencialmente mais desfavoráveis para a análise em causa; por exemplo, no sentido de considerar uma situação potencialmente desfavorável, considera-se que, no caso de o tronco de transmissão envolver mais de uma linha, só está ligado ao barramento em que se considera a manobra do disjuntor a linha em que ocorreu o curto-circuito.

Considera-se, também uma hipótese de tronco de transmissão de 500-550 kV, representando uma interligação entre duas regiões, com 500 km de comprimento, visto que este nível de tensão não é apropriado para transmissão a longas distâncias muito longas, não sendo pertinente uma análise de um tronco de transmissão similar ao considerado para a comparação relativa a 750-800 kV e 1000 kV.

Salienta-se que o objetivo da análise efetuada é a comparação da severidade da manobra em causa, quanto a solicitação do disjuntor e capacidade de interrupção do mesmo, comparando, sob esse ponto de vista, LCs e LNCs. Este objetivo condicionou a escolha das hipóteses, válidas para a comparação em causa. Naturalmente, para avaliar a severidade absoluta, para um sistema de transmissão específico, haverá que considerar as respectivas características. Os resultados apresentados devem ser considerados de acordo com o mencionado objetivo, não devendo ser supostos como numericamente aplicáveis a um sistema de transmissão genérico.

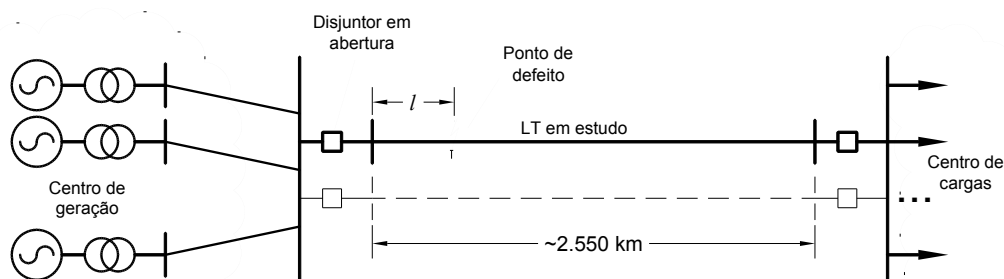


FIGURA 1 – Tronco de transmissão hipotético de 800 kV ou 1000 kV.

## 2.0 - TRONCOS DE TRANSMISSÃO CONSIDERADOS

### 2.1 Linhas consideradas na comparação

Para a análise efetuada no artigo, considerou-se três linhas LC e três linhas LNC. Na figura 2 representa-se a disposição dos condutores, junto às estruturas, para um vão típico de cada linha, em terreno plano (da ordem de 500 m para as linhas de 750-800 kV e de 1000 kV).

Para as LCs considerou-se feixes com disposição circular dos condutores com distância entre eixos de condutores consecutivos 457,2 mm (18"). Para as LNCs considerou-se o feixe central diferente dos feixes laterais, e impôs-se condicionamentos de simetria e de distância entre condutores de cada feixe, para evitar eventuais condicionamentos especiais associados, nomeadamente, a modos de vibração potencialmente desfavoráveis.

Em todos os exemplos considerados admitiu-se cabos de fase alumínio-aço, do tipo designado comercialmente por *Rail* (2), com seção total 517 mm<sup>2</sup>, seção de alumínio 483 mm<sup>2</sup>, diâmetro 29,59 mm.

Para o cálculo dos parâmetros das linhas admitiu-se um solo com condutividade a baixa frequência  $\sigma_0 = 0,1$  mS/m, intermediário entre valores encontrados na Amazônia, e com parâmetros  $\sigma$  e  $\varepsilon$  função da frequência (9), sendo

$$W = \sigma + i \omega \varepsilon = \sigma_0 + \Delta W = \sigma_0 + \Delta \sigma(\omega) + i \omega \varepsilon(\omega) = \sigma_0 + \Delta_i \left[ \cot \text{ang} \left( \frac{\pi}{2} \alpha \right) + i \right] \left( \frac{f}{1 \text{ MHz}} \right)^\alpha \quad [1]$$

sendo  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\omega = 2 \pi f$ ,  $\sigma$  a condutividade elétrica,  $\varepsilon$  a permissividade elétrica, os parâmetros  $\sigma$ ,  $\Delta_i$  e  $\alpha$  estatisticamente independentes, e considerando para  $\Delta_i$  e  $\alpha$  os valores medianos das respectivas distribuições estatísticas (9).

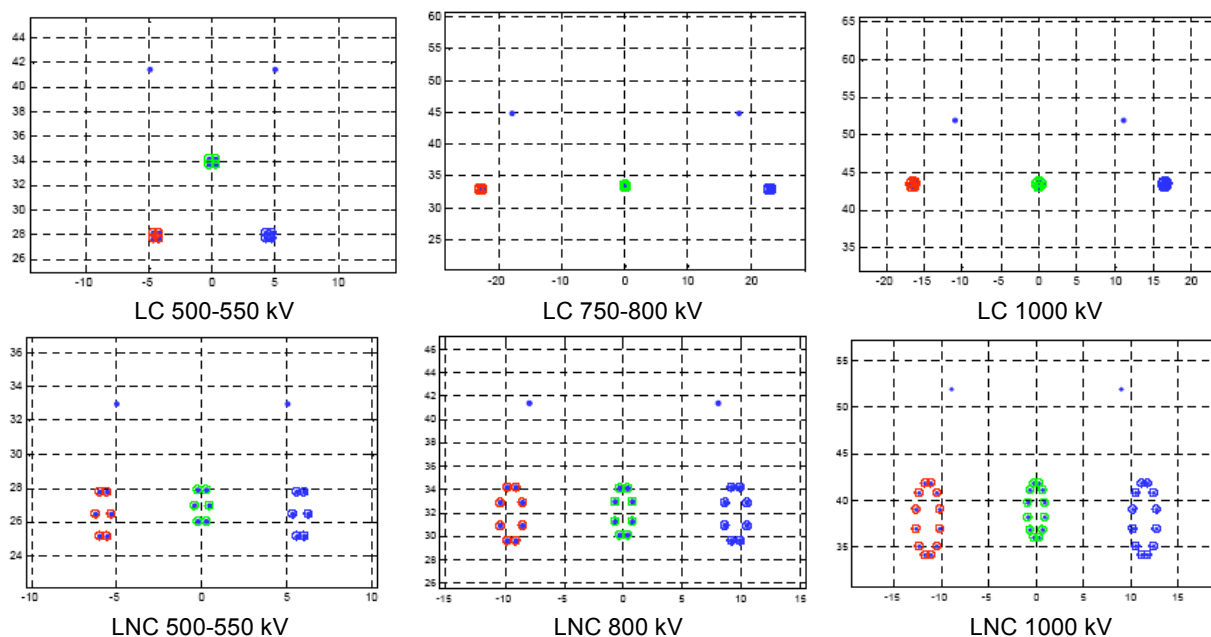


FIGURA 2 – Configurações de LTs consideradas na análise. Posição dos condutores junto à torre.

Os números em abcissas indicam a distância algébrica ao plano vertical de simetria da linha.

Os números em ordenadas indicam a distância ao solo, para solo plano horizontal.

## 2.2 Transmissão a muita longa distância

Para transmissão a distâncias muito longas, da ordem de 2000 a 3000 km, a solução mais adequada, para uma transmissão basicamente ponto a ponto, consiste em ajustar a eventual compensação reativa por forma que o conjunto “linha - sistema de compensação” apresente um “comprimento elétrico” equivalente a pouco mais de meia onda, a frequência industrial (comprimento “elétrico” avaliado com base na velocidade de fase a frequência industrial). Nota-se que um comprimento elétrico aproximadamente igual a “meia onda” é totalmente inadequado, e corresponde a uma singularidade, com, por exemplo, mudança de sinal de derivada da potência transmitida em relação à defasagem entre as tensões nas duas extremidades da linha, sem o comportamento naturalmente estabilizador (mesmo sem sistemas estabilizadores de controle), em termos eletromecânicos, típico de linhas “curtas”.

Numa linha tendo um comprimento elétrico (em conjunto com o eventual sistema de compensação) um pouco superior a meia onda, a operação normal da linha ocorre com defasagem,  $\alpha$ , entre as tensões nas duas extremidade da linha, da ordem de  $\pi$ , variando a potência transmitida com  $\alpha - \pi$  de forma similar ao que ocorre, para linhas curtas, com a variação da potência transmitida em função de  $\alpha$ . Nessas condições, a tensão a meio da linha é aproximadamente proporcional à potência transmitida. A solução “natural” é operar a linha para potência transmitida aproximadamente na gama  $[-P_c, P_c]$ , e portanto com tensão ao longo da linha não excedendo, aproximadamente, a maior das tensões nos dois terminais da linha (em regime sustentado, a frequência industrial). Nestas condições, para uma linha muito longa, a potência característica do conjunto “linha – sistema de compensação” representa aproximadamente a capacidade de transmissão do tronco. Nota-se que, diferentemente do que sucede com linhas muito longas, para linhas curtas, por exemplo com algumas centenas de quilômetros, a potência característica não traduz a capacidade de transmissão da linha.

## 2.3 Solicitações de disjuntores

A análise refere-se à manobra de interrupção de correntes elevadas por disjuntores terminais de linha, para a qual a condição crítica típica corresponde à interrupção de defeito “quilométrico” (“short line fault”), que é bastante mais severa, para o disjuntor, que a interrupção de curto-circuito aos terminais do disjuntor.

O método analítico apresentado em (5) permite avaliar, de forma simples, as condições de severidade de uma interrupção de curto-circuito, para defeito de tipo quilométrico. A análise parte dos seguintes parâmetros:

1. Impedância longitudinal unitária da LT, a frequência industrial, “homopolar” e “não-homopolar” (ou “similares”, para análise razoavelmente mais correta, no que respeita a representação sem considerar as simplificações associadas a hipótese de transposição ideal);
2. Impedância de onda da LT a jusante, homopolar e não-homopolar (aproximadamente equivalente, para fenômenos “rápidos”);
3. Velocidade de propagação na LT, aproximadamente equivalente para o tipo de defeito e situação dos pólos do disjuntor;
4. Impedância de onda da rede a montante, homopolar e não-homopolar (aproximadamente equivalente, para fenômenos “rápidos”);
5. Parâmetros do modelo do arco do disjuntor;
6. Tipo de defeito;
7. Posição dos pólos restantes do disjuntor;
8. Efeitos capacitivos próximos ao disjuntor (traduzidos por uma capacitância “equivalente”,  $C$ , entre terminais do pólo do disjuntor).

Observou-se a variação dos itens 1, 2 e 3 na comparação LCs e LNCs e seu impacto na severidade.

Segundo o método definido em (5), estima-se a severidade de um defeito quilométrico, em relação a um defeito terminal, através do parâmetro  $F^{-1}$ , com o significado de um parâmetro de severidade. Este parâmetro pode ser interpretado de diversas formas (equivalentes), nomeadamente:

- Traduzindo a relação entre um parâmetro do modelo de arco do disjuntor tal que as condições limites de interrupção ocorrem ou para a condição crítica de interrupção de defeito quilométrico ou para curto-circuito aos terminais, sem efeitos capacitivos ( $C = 0$ ).
- Traduzindo a relação entre a derivada da tensão de restabelecimento,  $S^*$ , que o disjuntor suportaria com defeito aos terminais,  $C = 0$ , e corrente de curto-circuito inalterada, e a derivada da tensão de restabelecimento  $S_0$ , para defeito aos terminais, considerada para definir as condições limites de interrupção, para defeito a distância  $\ell$  do disjuntor:

$$F^{-1} = \frac{S^*}{S_0} \quad [2]$$

De forma simplificada, esta relação significa que, se para curto-circuito aos terminais, com corrente de valor eficaz  $I_e$ , a derivada da tensão de restabelecimento (para  $C = 0$ ), for  $S_0$ , para que o disjuntor possa interromper o defeito quilométrico a distância  $\ell$  dos terminais do disjuntor e com o valor de  $C$  aplicável, o disjuntor deverá poder interromper, para defeito aos terminais, a mesma corrente  $I_e$ , com  $C = 0$ , mas com uma derivada da tensão de restabelecimento  $S^* = F^{-1} \cdot S_0$ . A “distância crítica” corresponde ao valor de  $\ell$  para o qual  $F^{-1}$  é máximo (nas condições admitidas para rede, linha, tipo de defeito, parâmetro  $C$ , etc.).

### 2.3.1 Influência da linha de transmissão

O defeito quilométrico origina uma parcela em dente de serra da tensão de restabelecimento, parcela que varia entre zero e o valor máximo num tempo  $2\tau$ , sendo  $\tau$  o tempo de propagação ao longo da distância,  $\ell$ , entre o ponto de curto-circuito e o terminal da linha. Para  $\tau$  inferior ou da ordem de grandeza da “constante de tempo equivalente” do arco, o efeito do dente de serra é parcialmente atenuado pelo arco. Para  $\tau$  bastante superior à constante de tempo do arco, a amplitude máxima do dente de serra ocorre “depois” de definida a extinção ou não do arco, e o efeito do dente de serra é caracterizado pela respectiva inclinação, que diminui, tal como a parcela da tensão de restabelecimento associada à rede a montante do disjuntor, e a derivada da corrente no arco, ao aumentar  $\ell$ . Portanto, o agravamento máximo da severidade de interrupção do defeito quilométrico, associado ao aumento da derivada da tensão de restabelecimento e redução da derivada da corrente no arco, tem um máximo, correspondente a  $\tau$  tipicamente da ordem de cerca de cinco vezes a “constante de tempo equivalente” do arco do disjuntor. Esse agravamento é também afetado pelo efeito capacitivo acima mencionado.

A ocorrência de uma corrente de curto-circuito elevada origina forças importantes sobre os condutores, que atuam no sentido de aproximar os condutores dos feixes e aumentar a impedância de onda e, portanto, a severidade do defeito quilométrico, comparativamente com o curto-circuito aos terminais do disjuntor.

Comparativamente com as LCs, as LNCs possuem uma impedância de onda significativamente menor e menos afetada pela deformação dos feixes resultantes das forças sobre os condutores resultantes de correntes de curto-circuito intensas. Em consequência, o agravamento associado ao defeito quilométrico é mais reduzido para LNCs que para LCs.

### 2.4 Deformação mecânica do feixe de condutores

Quando uma corrente intensa circula num feixe de condutores, ocorre uma forte atração entre os cabos. A força será suficiente para deslocá-los entre o instante do início do curto-circuito e o instante de interrupção do arco no disjuntor. Este fenômeno de deformação dos condutores origina uma contração do feixe, com eventual contato mecânico entre os condutores de cada uma das fases afetadas pelo curto-circuito, numa fração importante dos sub-vãos. Na terminologia anglo-saxónica é designado como “*bundle clash*”.

A atração origina o deslocamento dos condutores, alterando a geometria do feixe e os parâmetros da linha. O deslocamento dos condutores pode originar uma alteração significativa dos parâmetros da linha, durante o curto-circuito, e a severidade do defeito quilométrico.

Nota-se que a variação dos parâmetros da linha influencia a corrente de curto-circuito, alterando, consequentemente, o deslocamento dos condutores. Todavia, este efeito é, em geral, moderado, podendo, em princípio, ser desprezado. O efeito mais importante da deformação dos condutores, para a análise apresentada neste artigo, é a alteração das impedâncias de onda da LT.

Este fenômeno ocorrerá de forma diferenciada entre LCs e LNCs, basicamente pelo uso de maiores distâncias entre os condutores de cada feixe, nas LNCs.

No cálculo da deformação mecânica dos condutores considerou-se as seguintes aproximações:

- Considerou-se apenas a interação entre os condutores de cada feixe, desprezando a interação entre fases distintas.
- Desprezou-se o efeito da deformação dos condutores na corrente de curto-circuito.
- Considerou-se distribuição uniforme de corrente entre os condutores de cada feixe.
- Considerou-se as posições médias dos condutores para cálculo dos parâmetros elétricos (a hipótese de condutor disposto segundo uma catenária deixa de ser válida).
- Simulou-se um sub-vão ligado a um sistema mecânico equivalente, por forma a considerar a variação da força de tração longitudinal do feixe.

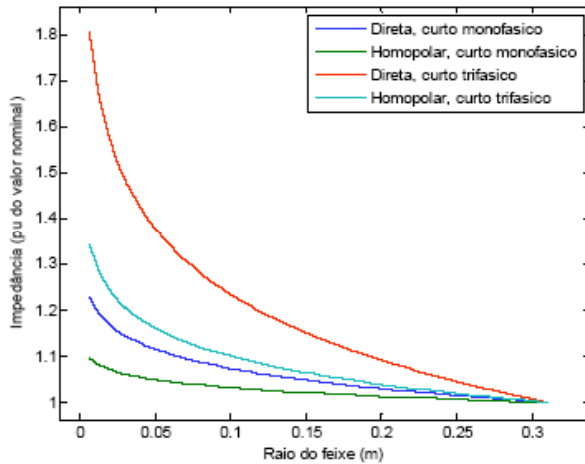


FIGURA 3 - Variação da impedância de onda em função do raio médio do feixe, para um feixe circular de 4 condutores, com distância entre eixos de condutores consecutivos, na ausência de forças magneto-dinâmicas significativas, 457,2 mm.

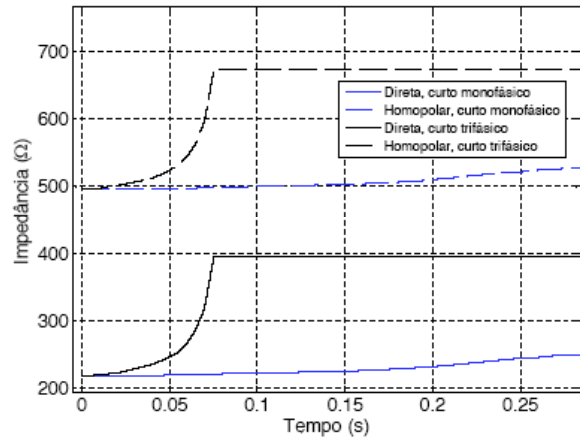


FIGURA 4 – Exemplo de variação da impedância de onda em função do tempo, para um feixe circular de 4 condutores, com distância entre eixos de condutores consecutivos 457,2 mm. Componente unidirecional máxima obtida supondo-a traduzida por circuito R , L , para L/R = 0,05 s , para curto-circuito trifásico (48 kA) e monofásico (20 kA).

A Figura 3 ilustra a variação da impedância de onda para um feixe circular com quatro condutores com espaçamento 457,2 mm entre condutores. Com a redução do raio médio do feixe, observa-se a elevação das impedâncias de onda.

Desta forma, a impedância de onda da LT convencional será significativamente alterada até o momento da interrupção, o que origina alteração significativa da severidade da manobra de abertura de defeito de tipo quilométrico, em relação à hipótese de não considerar o deslocamento dos condutores do feixe.

O comprimento dos sub-vãos, neste aspecto, dentro da prática usual das empresas, possui pouca influência no resultado. Foram realizadas simulações com sub-vãos de 60 a 240 m.

## 2.5 Modelos de arcos elétricos em disjuntores

O modelo de Thiel é recomendado para a determinação do comportamento do arco elétrico em disjuntores de SF<sub>6</sub> (5). Sendo  $g$  a condutância,  $P_0$  a potência de equilíbrio,  $\theta$  a constante de tempo do arco, e  $A^*$ ,  $B$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  parâmetros do arco, este modelo é traduzido pelas relações:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left( \frac{P}{P_0} - 1 \right) \quad \theta = A^* g^\alpha \quad P_0 = B g^\beta \quad [3]$$

A partir de ensaios com um disjuntor específico, descritos em (5) , numa gama de  $0,1 \text{ mS} < g < 10 \text{ mS}$ , selecionou-se os seguintes valores (para  $g$  expresso em Siemens):  $\theta = 7,37 g^{0.259} [\mu\text{s}]$ ,  $P_0 = 2,64 \cdot 10^6 g^{0.337} [\text{MW}]$ . Nessa mesma análise aponta-se para o uso de um modelo mais preciso, com duas constantes de tempo. Para efeitos deste artigo, utilizou-se os valores citados, com um “fator de escala” para considerar diferentes parâmetros básicos dos disjuntores.

## 3.0 - DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES CRÍTICAS DE INTERRUPTÃO

### 3.1 Resumo das configurações

#### 3.1.1 Linhas de transmissão

Os parâmetros das LTs foram calculados a partir das recomendações descritas em (9), em condições médias de carregamento. Utilizou-se um modelo de solo homogêneo, com parâmetros função da frequência variável pela

frequência, com parâmetros conforme convenção em (9) de  $\sigma_0 = 10^{-4}$  S/m,  $\alpha = 0,705(519)$ ,  $\Delta_i = 11,7(094) 10^{-3}$  S/m. As impedâncias de onda foram determinadas para frequência 100 kHz.

A Tabela 1 indica alguns parâmetros das linhas consideradas como exemplo (convencionais, LC, e não convencionais, LNC): potência característica a frequência industrial ( $P_c$ ), impedâncias de onda direta e homopolar para fenômenos rápidos, calculadas tomando como base as impedâncias de “quase-modos” a 100 kHz ( $Z_{c1}$  e  $Z_{c0}$ ), impedâncias longitudinais unitárias a frequência industrial, direta e homopolar ( $Z_1$  e  $Z_0$ ) e velocidade de propagação direta e homopolar, calculadas tomando como base a velocidade de fase a 100 kHz ( $V_0$  e  $V_1$ ). Para a determinação da potência característica, foram usadas as tensões de 550, 800 e 1000 kV.

Denominação	Tensão (kV)	$P_c$ (MW)	$Z_{c0}$ ( $\Omega$ )	$Z_{c1}$ ( $\Omega$ )	$Z_0$ ( $\Omega$ /km)	$Z_1$ ( $\Omega$ /km)	$V_0$ (m/ $\mu$ s)	$V_1$ (m/ $\mu$ s)
LC 500-550	550	1 374	496,5	217,9	$0,3586 + j 1,4988$	$0,0187 + j 0,2801$	278,4	298,5
LNC 500-550	550	2 015	401,1	146,6	$0,3806 + j 1,4109$	$0,0126 + j 0,1913$	273,3	294,3
LC 750-800	800	2 226	391,2	283,1	$0,3792 + j 1,2044$	$0,0130 + j 0,3722$	281,2	294,6
LNC 800	800	4 803	343,6	131,7	$0,3570 + j 1,1130$	$0,0084 + j 0,1740$	275,5	291,7
LC 1000	1 000	4 033	415,3	244,5	$0,3849 + j 1,2104$	$0,0084 + j 0,3165$	285,7	296,5
LNC 1000	1 000	8 601	328,2	115,0	$0,3402 + j 1,0806$	$0,0058 + j 0,1521$	278,6	291,0

TABELA 1 - Resumo de parâmetros das linhas de transmissão consideradas.

### 3.1.2 Rede

As condições mais relevantes são as correntes de curto-circuito e a configuração imediatamente a montante do disjuntor. Neste caso as LTs de concentração em paralelo determinarão a impedância de onda.

Realizou-se a varredura da pior condição de curto-circuito: tipo de defeito, abertura de pólos, fase com defeito, e número de LTs a montante. A condição mais severa, dentro das hipóteses adotadas, foi o curto-circuito trifásico sem terra.

### 3.1.3 Disjuntores

Utilizou-se o modelo de Thiel para simulação numérica em algumas condições particulares. Para o estudo analítico, realizou-se a aproximação do modelo de Mayr, com parâmetros obtidos a partir do modelo de Thiel para o instante de “anulamento” ( $t = 0$ ) da corrente no disjuntor (à parte a corrente de deslocamento) considerando para  $\theta$  um valor  $\theta_1$ , para  $t = 0$  e  $g = g_1$  no qual (5):

$$\theta_1 = \theta(g_1) = A \cdot g_1^\alpha = cte \cdot A^{\frac{2\alpha}{1+\beta-2\alpha}} \quad [4]$$

### 3.1.4 Capacitâncias

Utilizou-se valores de capacitâncias em paralelo de até 2 nF, equivalentes aos efeitos de buchas e barramentos relativamente próximos ao disjuntor. O uso de compensação série, quando aplicável, não influenciará diretamente a severidade, em virtude de os capacitores em série não estarem localizados próximo do barramento.

### 3.1.5 Deformação dos feixes

À parte dos casos mencionados acima, foi realizada uma comparação entre as LTs de 500 kV, simulando a ocorrência da deformação do feixe durante o defeito. Ambas as LTs são compostas por cabos “Rail” (seção total 517 mm<sup>2</sup>, seção de alumínio 483 mm<sup>2</sup>, diâmetro 29,59 mm, 45/7 fios, 1339,1 kg/km, módulo de elasticidade inicial 5414 kgf/mm<sup>2</sup>). A duração do defeito considerada foi de até 0,5 s, refletindo condições prováveis de tempo de atuação da proteção. Foram simulados curto-circuitos trifásicos sem terra e monofásicos na fase externa. Em ambas as configurações de LTs, o sub-vão foi de 60 m.

A componente unidirecional da corrente de curto não influi diretamente e de forma significativa, na severidade, mas é muito relevante na deformação dos feixes. Considerou-se uma relação L/R igual a 0,05 s, para efeitos de estimativa da componente de tipo unidirecional da corrente de curto-circuito.

## 3.2 Metodologia

O procedimento resumiu-se nas seguintes etapas:

- Levantamento dos parâmetros das LTs, hipóteses de configuração de rede e condições de interrupção;
- Determinação da corrente de curto-circuito terminal, derivada de corrente e parâmetros definindo a relação entre derivada de corrente e tensão de restabelecimento;
- Severidade para curto-circuito terminal;
- Cálculo do parâmetro  $F^{-1}$ ;
- Determinação do ponto crítico na LT.

## 4.0 - EXTRATO DE RESULTADOS

As figuras 5 a 8 mostram a variação da severidade do defeito quilométrico para as duas configurações de 750-800 kV. A tabela 5 resume o desempenho de todas as configurações. Utilizou-se o parâmetro  $F^{-1}$ , para a visualização da condição crítica como um ponto de máximo. Nas figuras, as simulações com capacitores são referentes a 2 nF. Nas condições representadas nas figuras 5 a 8 não se considerou o efeito da alteração da geometria dos condutores resultante dos esforços eletrodinâmicos associados às correntes nos condutores, que

tende a aumentar as impedâncias de onda, aumentando, consequentemente, a derivada da tensão de restabelecimento e a severidade, para o disjuntor que efetue a manobra da linha.

O efeito da deformação dos condutores na caracterização das severidade de abertura de curto-circuito, para defeito “quilométrico”, é ilustrado nas figuras 9 e 10, que indicam a variação da impedância de onda e do parâmetro de severidade  $F^{-1}$  em função do tempo, a contar do início da corrente de curto-circuito, até ao instante em que ocorre a passagem por zero da corrente no disjuntor, na vizinhança do qual ocorre a interrupção da corrente. Compara-se a variação do parâmetro  $F^{-1}$  ao longo do tempo para os exemplos de LC e LNC de 500–550 kV. As figuras 9 e 10 resumem a variação da severidade da manobra de abertura do disjuntor, em função do tempo a contar do início do curto-circuito em que ocorre a passagem por zero da corrente no disjuntor, em cuja vizinhança ocorre a interrupção da corrente. Para a linha, ocorre o contato mecânico entre condutores do feixe, em grande parte do sub-vão, após um intervalo de tempo curto, de cerca de 0,07 s (nas condições do exemplo, para curto-circuito trifásico), o que “satura” a variação da impedância de onda e da severidade da solicitação do disjuntor, ao interromper o defeito de tipo quilométrico.

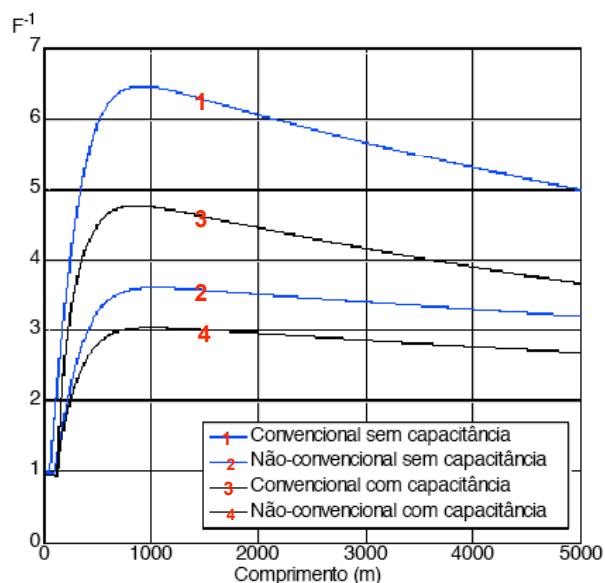


FIGURA 5 - Variação do parâmetro  $F^{-1}$  com a localização do curto-circuito, para LC e LNC de 750-800 kV, e, nas variantes com capacitância, para capacitância equivalente, entre terminais do pólo do disjuntor, 2 nF.

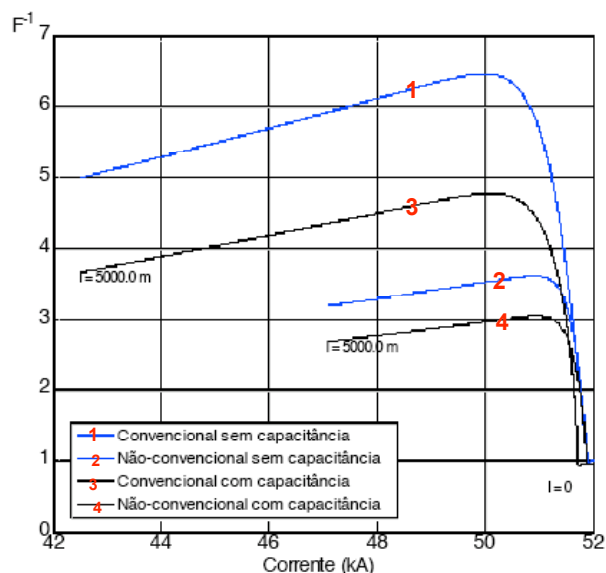


FIGURA 6 – Relação entre o parâmetro  $F^{-1}$  e a corrente de curto-circuito, para LC e LNC de 750-800 kV, e, nas variantes com capacitância, para capacitância equivalente, entre terminais do pólo do disjuntor, 2 nF.

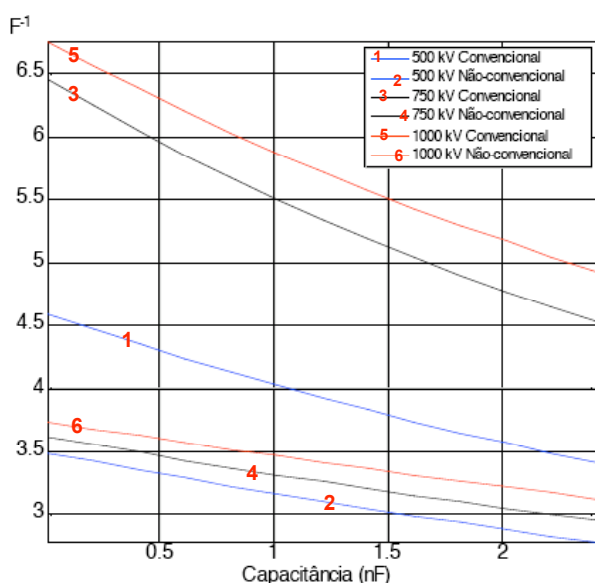


FIGURA 7 - Relação entre o parâmetro  $F^{-1}$  mais crítico e a capacitância equivalente, entre terminais do pólo do disjuntor.

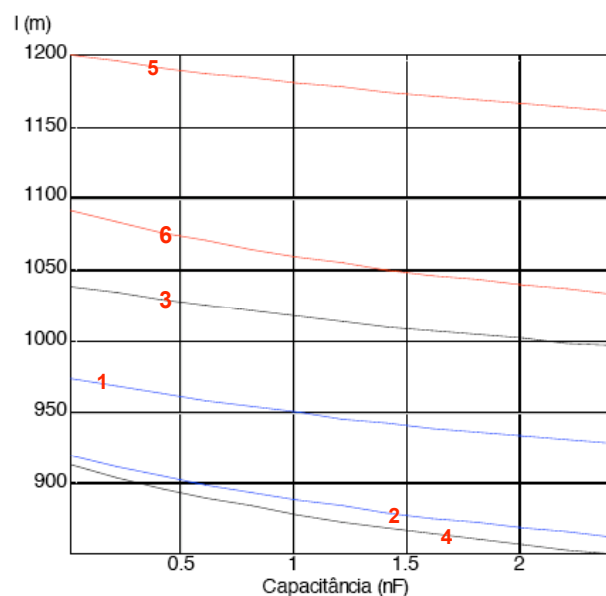


FIGURA 8 – Relação entre a capacitância equivalente, entre terminais do pólo do disjuntor, e a distância crítica entre o ponto de defeito e o terminal da linha. A identificação das curvas é análoga à da figura 7.



Tipo de c. c.	500-550 kV	750-800 kV	1000 kV
Trifásico	48 kA	52 kA	45 kA
Monofásico	20 kA	22 kA	19 kA

TABELA 2 – Valores de corrente de curto-circuito terminal usados em cada configuração.

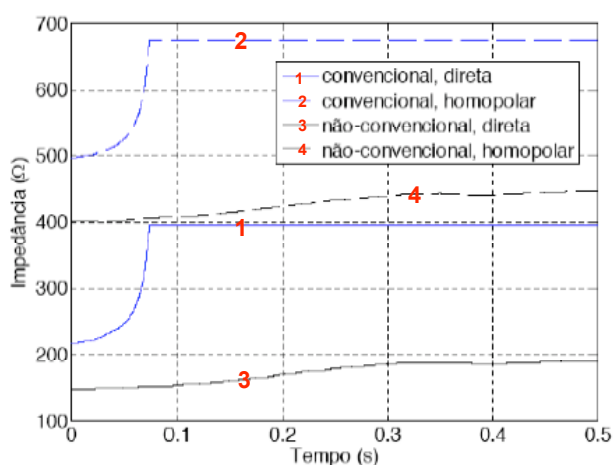


FIGURA 9 - Variação da impedância de onda em função do tempo, a contar do início do curto-circuito, para curto-circuito trifásico, nas condições dos exemplos de LC e LNC de 500-550 kV.

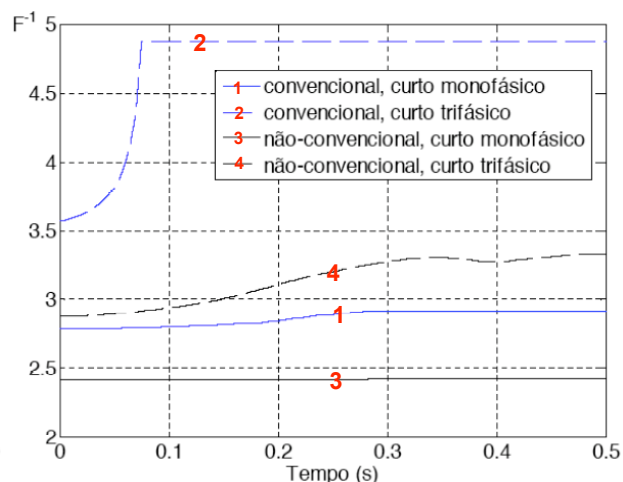


FIGURA 10 - Variação do parâmetro  $F^{-1}$  em função do tempo, a contar do início do curto-circuito, nas condições dos exemplos de LC e LNC de 500-550 kV, para curtos-circuitos trifásico e monofásico, considerando capacitância equivalente  $C = 2$  nF.

## 5.0 - CONCLUSÕES

A manobra de linhas, tipicamente mais severa, de abertura de correntes de curto-circuito intensas, quanto a severidade em termos de solicitação do disjuntor que efetua a manobra, corresponde à abertura de defeito de tipo quilométrico.

Os exemplos analisados evidenciam, consistentemente, que, para essa manobra, as LNCs são bastante mais favoráveis que as LCs. A vantagem comparativa das LNCs envolve os dois seguintes aspectos:

- Comparação abstraindo do efeito da deformação dos condutores dos feixes originada pelos esforços eletrodinâmicos resultantes das correntes elevadas nos condutores, durante o curto-circuito.
- Agravamento da severidade da solicitação dos disjuntores, para a manobra em causa, resultante da deformação dos condutores e consequente aumento da impedância de onda da linha e portanto da derivada da tensão de restabelecimento entre terminais do disjuntor manobrado.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Portela, C. ; Carvalho, A. ; Carvalho, F. ; Lacorte, M. ; Colombo, R. - " *Disjuntores e Chaves - Aplicação em Sistemas de Potência - Capítulo 11, A Teoria do Arco Elétrico nos Disjuntores de Alta Tensão* " pp 307-346 - Furnas Centrais Elétricas S.A. - EDUFF Editora da Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1995
- (2) EPRI, *Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above*, 2nd ed., Electric Power Research Institute, Califórnia, Estados Unidos, 1982.
- (3) Kennedy, M. W. "Network switching conditions", In: *Power circuit breaker theory and design*, C. H. Flurscheim (ed.), IEE Monograph Series, 1975.
- (4) Portela, C. "Determinação das condições críticas na manobra de disjuntores para defeitos de tipo quilométrico", *IX SNPTEE*, Belo Horizonte, MG, 1987.
- (5) Portela, C. *Modelagem de arco elétrico em disjuntores, Aplicações de modelos em estudos de manobra*, COPPE/ UFRJ, Setembro de 1996.
- (6) Portela, C. "Sistema Elétrico Brasileiro - Realidades e Opções", *Simpósio Carlos Portela 70 anos*, COPPE/ UFRJ, Dezembro 2005.
- (7) Portela, C. "*Regimes Transitórios, Vol. I – IV*", COPPE/ UFRJ, 1983, edição ELETROBRAS e COPPE/UFRJ.
- (8) Portela, C. "Some aspects of very long lines switching", *CIGRÉ SC 13 Colloquium*, 1995.
- (9) Portela, C., Tavares, M. C. "Modeling, simulation and optimization of transmission lines. Applicability and limitations of some used procedures", *Proceedings IEEE Transmission and Distribution 2002*, São Paulo, Brasil, Março de 2002.

Carlos M. J. C. M. Portela — Engenheiro Eletrotécnico (1958) e Doutor em Engenharia (1963) pelo Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade Técnica de Lisboa (UTL). Professor Catedrático do IST-UTL. Professor Titular da COPPE-UFRJ.

Carlos Kleber C. Arruda, Clóvis José Silva, José Augusto Miranda — Alunos de doutoramento da COPPE-UFRJ.