

Cálculo da TCTRT - Taxa de Crescimento da Tensão de Restabelecimento Transitória

Patrícia de Oliveira Preto

Luiz Cera Zanetta Junior

Departamento de Energia e Automação Elétricas

Escola Politécnica

São Paulo, Brasil

Resumo—Este artigo aborda o cálculo da taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória, considerando o caso de falta na barra, durante a abertura do primeiro polo. Os principais casos possíveis de falta na barra foram analisados e os resultados demonstram a precisão das expressões obtidas. Normalmente o cálculo da TCTRT é feito por meio de simulações em programas de transientes eletromagnéticos havendo rotinas específicas para a extração dos valores da TCTRT, porém em determinadas condições podem ocorrer oscilações ou imprecisões numéricas. Por ser um assunto de grande interesse convém desenvolver expressões que possam esclarecer resultados duvidosos sem a necessidade de artifícios de redução do passo de integração a valores muitas vezes não factíveis. As expressões obtidas neste trabalho podem ser utilizadas para se obter de forma precisa e simplificada os valores da taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória de um circuito real.

Palavras-chave—Faltas trifásicas, taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória, tensão de restabelecimento transitória, transientes eletromagnéticos.

I. INTRODUÇÃO

Na eliminação de faltas em sistemas elétricos de potência, além de correntes de curto-circuito elevadas, os disjuntores são submetidos à TRT (tensão de restabelecimento transitória) que é a tensão que aparece entre os terminais do disjuntor no momento da interrupção da corrente de falta. Um dos aspectos fundamentais da TRT é a taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória, denominada por TCTRT. Os valores da TRT e da TCTRT não devem ultrapassar os valores para os quais o disjuntor foi testado. Caso exista a superação de qualquer um desses valores os fabricantes devem ser consultados e/ou o disjuntor deve ser substituído.

Os temas da TRT e da TCTRT foram tratados pelas normas IEEE, [1], e IEC, [2], a partir dos anos 60. A referência [3] apresenta uma análise destas normas. Diversos trabalhos nesta época tiveram contribuições importantes para a elaboração destas normas [4,5,6].

A norma IEEE assume como envoltória da TRT uma curva $1-\cos$ para tensão nominal até 72,5kV e uma curva $\exp-\cos$ para tensões acima desse valor. Vale ressaltar, que a curva $\exp-\cos$ aparece também no desenvolvimento matemático da TRT desenvolvido por [4]. A IEEE apresenta a obtenção das envoltórias mencionadas acima, em um circuito típico, para o caso do curto trifásico isolado na barra.

A fig. 1 ilustra as envoltórias da norma IEEE.

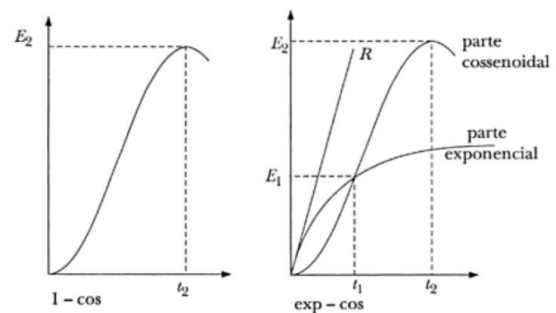


Fig. 1 – Envoltórias da norma IEEE para curto na barra

Para análise das envoltórias da norma IEEE, a mesma apresenta um circuito equivalente, fig.2, do circuito típico mencionado, já aplicando o método de injeção de correntes.

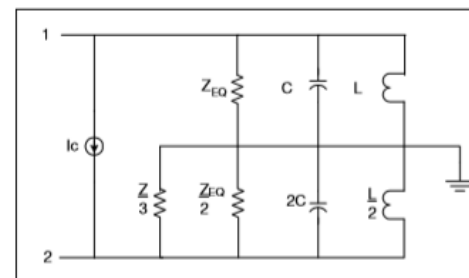


Fig. 2 - Circuito equivalente norma IEEE

Em geral a capacitância deste circuito pode ser desprezada e desta maneira, a norma [1] apresenta uma equação simples para os primeiros instantes do fenômeno (1).

$$\Delta v(t) = 1,5kL * (1 - e^{-\frac{zt}{L}}) \quad (1)$$

Derivando esta expressão, a TCTRT obtida pelo equacionamento da norma é equivalente a:

$$TCTRT = 1,5kZ. \quad (2)$$

Onde,

$$k = I_0 w \quad (3)$$

Io é a amplitude (valor de pico) da corrente de curto-circuito. Sendo assim, k irá variar de acordo com o caso estudado.

A norma IEC também apresenta dois tipos de envoltórias, definidas por segmentos de reta, de 2 e 4 parâmetros. Sendo o caso da curva de 2 parâmetros para tensão nominal até 72,5kV e o caso de 4 parâmetros para tensões acima deste valor. A norma IEC não faz nenhum comentário sobre o método de obtenção dessas curvas. Cabe comentar que as especificações de disjuntores feitas no Brasil tomam como base a norma IEC.

A figura abaixo, fig. 3, ilustra a curva com 4 parâmetros da norma IEC.

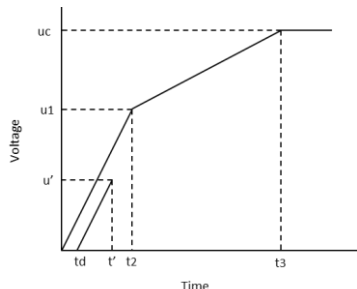


Fig. 3 - Curva de 4 parâmetros IEC

Apesar da norma IEEE, mencionada anteriormente, apresentar o desenvolvimento da expressão básica, a mesma não menciona claramente qual a impedância Z, apresentada no equacionamento da TRT e da TCTRT, e efetua os cálculos apenas para o caso de curto trifásico isolado.

A interpretação da impedância Z, para o curto trifásico isolado na barra, foi apresentada em [7], utilizando componentes simétricas. Nesta referência, assim como em [1], apenas o caso trifásico isolado na barra é tratado.

O método usual de cálculo, utilizado por profissionais, emprega simulações no tempo por meio do programa ATP [8], e diversas referências recentes estudaram casos específicos por meio de simulações [9] e [10]. Cabe ainda comentar que existem proposições para análise da TRT no domínio da frequência, como em, como [11] e [12].

Este trabalho tem por objetivo complementar as informações de [1], apresentando o cálculo da TCTRT por meio de expressões relativamente simples e precisas, não só para o curto trifásico isolado, mas também para os demais casos de curto na barra, apresentando os parâmetros para cada um dos casos. O estudo toma como base a abertura do primeiro polo e também é baseado no método de injeção de correntes, utilizado pela norma IEEE.

A obtenção destas equações auxilia a interpretação do fenômeno da TCTRT e também vai de encontro às exigências da ANEEL de efetuar o cálculo da TRT e da TCTRT para os variados tipos de curto.

O cálculo exato da TRT é feito computacionalmente no domínio do tempo ou da frequência, para levar em conta as reflexões de terminações. Porém, conforme mencionado, as fórmulas obtidas para a TCTRT neste artigo são fundamentais, não só para o entendimento do fenômeno, mas também como uma linha auxiliar do cálculo computacional. Em casos de redes extensas e com imprecisões numéricas nem sempre é possível uma redução do passo de integração, por limitações computacionais. Nestes casos, as equações obtidas neste artigo podem servir como ferramenta de suporte e validação dos resultados de softwares de simulação.

II. CÁLCULO DA TCTRT

Esta seção descreve o método proposto para o cálculo da TCTRT e as equações encontradas para cada um dos tipos de curto circuito. Os circuitos utilizados neste estudo desprezam as capacitâncias, que é uma simplificação também utilizada pela norma IEEE, mas nada impede que as mesmas sejam incluídas no equacionamento.

A metodologia deste trabalho é a mais geral possível, sendo apresentada para o curto trifásico isolado na barra, no caso de linhas com transposição, com a finalidade de se estabelecer uma relação com as expressões da norma. Para os demais casos de curto o tratamento é semelhante.

A. Método proposto para o cálculo da TCTRT, caso do curto trifásico isolado:

A fig. 4 considera uma falta trifásica isolada na barra, onde a matriz Z representa a matriz de impedâncias características, equivalente, das linhas conectadas à barra em falta.

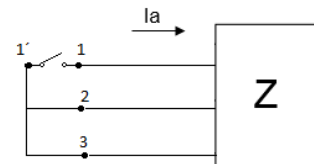


Fig. 4 - Curto trifásico isolado

Utilizando as condições de contorno, este circuito pode ser representado pelo seguinte sistema de equações:

$$\begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \\ V_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a(t) \\ -I_a(t) - I_c(t) \\ I_c(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Considerando o caso mais comum de linhas com transposição, o sistema acima será reescrito, conforme abaixo:

$$\begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_2(t) \\ V_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a(t) \\ -I_a(t) - I_c(t) \\ I_c(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Utilizando a primeira linha do sistema acima, é obtida a seguinte equação:

$$V_1(t) = Z_p \cdot I_a(t) + Z_m \cdot (-I_a(t) - I_c(t)) + Z_m \cdot I_c(t) \quad (6)$$

De onde é possível obter a expressão que correlaciona V_1 e I_a :

$$V_1(t) = (Z_p - Z_m) \cdot I_a(t) \quad (7)$$

Podendo também ser escrita através da impedância de sequência positiva, como:

$$V_1(t) = Z_1(t) \cdot I_a(t) \quad (8)$$

Entretanto, para obtermos a expressão da TCTRT é necessário obter o valor da diferença de tensão entre os pontos 1 e 1' da fig. 4.

De maneira a obtê-la o sistema acima será reescrito, considerando a equivalência, facilmente observada pela fig. 4, $V_{1'} = V_2 = V_3$.

$$\begin{bmatrix} V_1(t) \\ V_{1'}(t) \\ V_{1'}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_p & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a(t) \\ -I_a(t) - I_c(t) \\ I_c(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Somando as duas últimas equações deste sistema:

$$V_{1'}(t) = -0,5(Z_p - Z_m) \cdot I_a(t) \quad (10)$$

Podendo ser reescrita através da impedância de sequência positiva, como:

$$V_{1'}(t) = -0,5 \cdot Z_1 \cdot I_a(t) \quad (11)$$

Assim, temos:

$$\Delta v = 1,5 \cdot Z_1 \cdot I_a(t) \quad (12)$$

Ou seja, derivando a equação acima, a TCTRT, é equivalente a:

$$TCTRT = 1,5 \cdot Z_1 \cdot k \quad (13)$$

Este equacionamento é o mesmo obtido pela norma IEEE, através da equação (1). A vantagem do procedimento empregado é caracterizar a impedância de sequência positiva Z_1 .

B. Equações da TCTRT para os demais casos de curto:

A obtenção das formulas para os demais casos de curto-circuito, pode ser feita de modo similar ao procedimento

adotado na seção A, considerando as condições de contorno específicas de cada caso, estas expressões.

Estas equações são ilustradas na tabela I, abaixo. Nesta tabela é possível observar que todos os casos poderiam ser representados por um circuito com uma impedância equivalente, multiplicado por k, onde k é descrito pela equação (2) para cada caso de curto.

TABELA I - EQUAÇÕES TCTRT

Tipo de Falta	Expressão da TCTRT
Monofásica	$TCTRT = k \cdot Z_p$
Dupla fase terra	$TCTRT = k \cdot \left[Z_p - \frac{Z_m^2}{Z_p} \right]$
Trifásico Terra	$TCTRT = \left[Z_p + 2 \left[\frac{-Z_m^2}{Z_p + Z_m} \right] \right] \cdot k$
Trifásica Isolada	$TCTRT = 1,5 \cdot Z_1 \cdot k$
Dupla fase Isolada	$TCTRT = 2 \cdot Z_1 \cdot k$

O procedimento de obtenção destas expressões será objeto de um trabalho futuro.

III. RESULTADOS

Os resultados apresentados foram obtidos utilizando duas redes. Uma delas, bem simples, permite uma redução sensível do passo de integração e desse modo tem a finalidade de comprovar a exatidão das expressões obtidas. A outra rede representa um caso de maior porte e em uma situação típica, na qual não é possível uma redução acentuada do passo de integração. Os resultados obtidos através da aplicação das equações foram comparados com os resultados obtidos no ATP.

O maior erro encontrado no caso do circuito simplificado, foi ao redor de 0,3%, utilizando-se um passo de integração de 10^{-8} μ s no ATP.

O circuito simplificado possui apenas 2 barras e 5 linhas conectadas entre as barras, a tabela II apresenta os resultados obtidos no circuito simplificado.

TABELA II – RESULTADOS DO CIRCUITO SIMPLIFICADO

Tipo de Falta	TCTRT		
	Equações	ATP	Erro
Monofásica	2,439kV/ μ s	2,4365 kV/ μ s	0,137%
Dupla fase terra	2,11989kV/ μ s	2,11581kV/ μ s	0,193%
Trifásico Terra	1,83248kV/ μ s	1,83032KV/ μ s	0,118%
Trifásica Isolada	2,2375kV/ μ s	2,2338kV/ μ s	0,169%
Dupla fase Isolada	2,5837kV/ μ s	2,5745kV/ μ s	0,357%

Para o caso da rede de maior porte, obteve-se um erro de 1%, utilizando o menor passo de integração permitido pelo ATP para este circuito, 10^{-6} μ s. Este menor passo permitido

ocorre por limitações na representação de redes com linhas de transmissão longas. Neste caso, as faltas foram analisadas na barra C, do circuito da fig. 5.

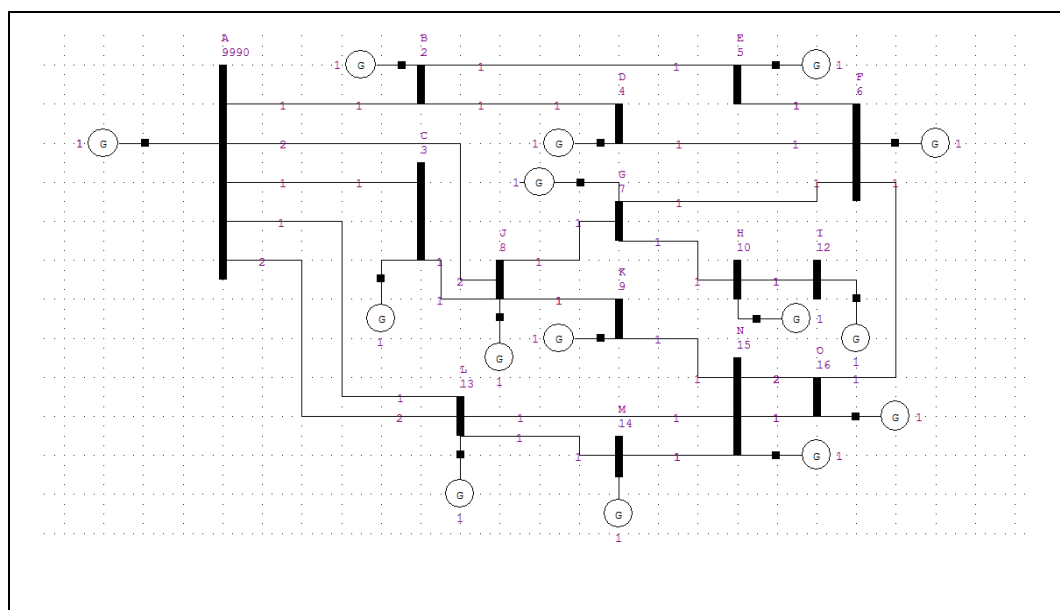


Fig. 5 - Circuito típico

As figuras, de 6 a 10, ilustram as TRTs obtidas para o circuito da fig. 5, utilizando-se o ATP e aplicando as faltas na barra C.

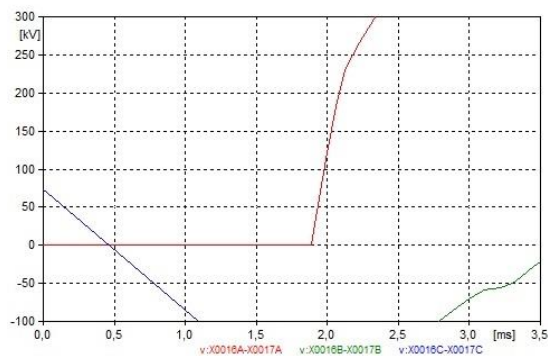


Fig. 6- Curto monofásico terra

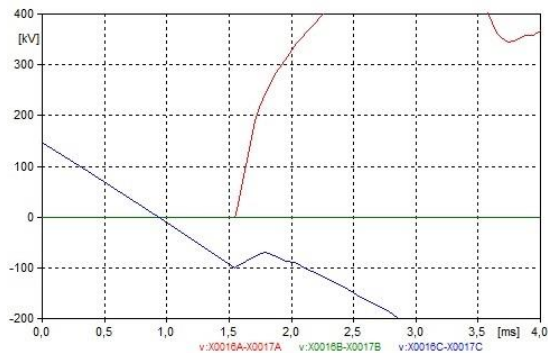


Fig. 7 - Curto dupla fase terra

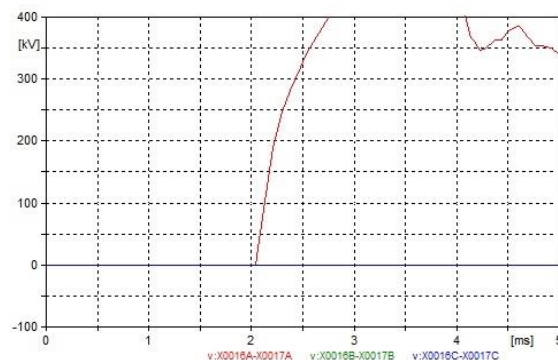


Fig. 8- Curto trifásico terra

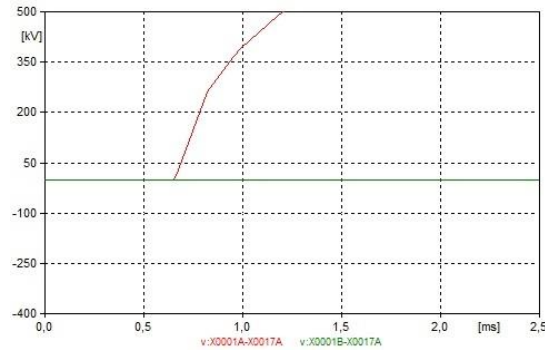


Fig. 9- Curto dupla fase isolado

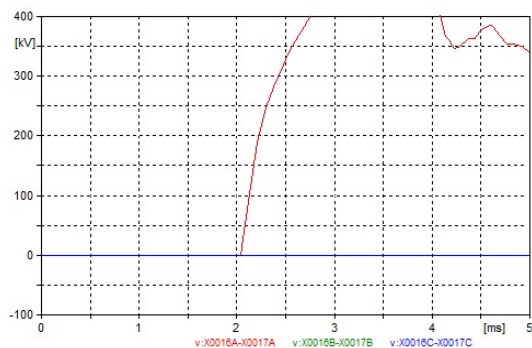


Fig. 10 - TRT curto trifásico isolado

A tabela III ilustra os valores encontrados da TCTRT para os diferentes tipos de curto, considerando o software de simulação, ATP, e o uso das equações para o caso da fig. 5.

TABELA III – RESULTADOS CIRCUITO TÍPICO

Tipo de Falta	TCTRT		
	Equações	ATP	Erro
Monofásica	1,142kV/μs	1,155 kV/μs	1,071%
Dupla fase terra	1,205kV/μs	1,214 kV/μs	0,694%
Trifásico Terra	1,176kV/μs	1,1834 kV/μs	0,614%
Trifásica Isolada	1,387kV/μs	1,3929kV/μs	0,3977%
Dupla fase Isolada	1,602kV/μs	1,608 kV/μs	0,3957%

É interessante observar que nos processamentos efetuados com o passo de integração reduzido ao valor mínimo possível para a rede da figura 5, existe uma boa aderência entre os resultados obtidos tanto com o programa ATP quanto com as fórmulas apresentadas, com erro em cerca de 1%. No entanto, podem ocorrer situações em que haja necessidade de se reduzir ainda mais o valor do passo para melhorar a precisão do cálculo da TCTRT, nas quais seria conveniente um recurso adicional para uma análise mais detalhada da rede, principalmente nos casos em limites permissíveis de norma.

Outro fato a destacar, possível de ser observado neste exemplo, é que a falta trifásica isolada pode não ser o pior caso, reforçando a necessidade, solicitada pela ANEEL, de efetuar o cálculo para diferentes tipos de falta.

IV. CONCLUSÕES

Ao realizar o cálculo com softwares de simulação, como o ATP, existe uma limitação relacionada com o passo de integração. Dependendo da complexidade do circuito, os softwares de simulação podem não permitir um passo de integração muito reduzido. Desta maneira, o cálculo da TCTRT apresentado neste trabalho apresenta uma maior precisão para o caso de circuitos complexos.

O trabalho apresenta expressões para o cálculo da TCTRT, apresentando os parâmetros envolvidos, para todos os tipos de curto, sendo este cálculo importante, pois o curto trifásico isolado pode não ser o pior caso para um determinado

circuito. Este resultado também está alinhado com requisitos da ANEEL que solicita o cálculo da TRT e TCTRT para todos os tipos de curto. A expressão da TCTRT foi apresentada para o caso específico de norma de curto trifásico isolado na barra.

Do ponto de vista prático, julga-se que as fórmulas apresentadas possam ser de grande utilidade, facilitando o cálculo com precisão da TCTRT.

REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Std C37.011-2005 [1], *IEEE Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on Symmetrical Current Basis*. PROCEEDINGS OF THE IEEE, IEEE, 2005.
- [2] IEC 56-1987. *High Voltage Alternating Current Circuit Breakers*, Geneve, 1987.
- [3] C. L. Wagner and H. M. Smith, *Power Circuit Breaker Transient Recovery Voltages*, IEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 103, n.11, pp.3354-3364, Nov. 1984.
- [4] O. Naef, C. P. Zimmerman and J. E. Beehler. *Proposed Transient Recovery Voltages*, IEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 94, n.7, pp.580-608, July 1965.
- [5] P. E. Headman and S. R. Lamber, *Double Earth Faults in Power Stations*, IEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 95, n.1, pp.197-608, Jan-Feb.1976.
- [6] W. F. Skeats, C. H. Titus and W. R. Wilson, *Severe Rates of Rise of Recovery Voltage Associated with Transmission Lines Short Circuits*, IEE Power systems Engineering Series, Power Math Associates, 1958.
- [7] L. C. Zanetta Junior, *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. EDUSP, pp 545-626,2003.
- [8] *ATP: Alternative Transients Program*. Rule Book. Leuven, K.U. Leuven EMTP Center, 1987.
- [9] D. Kouba and L. Nohacova. *Solution of Two Simultaneous Faults in the Middle Voltage Distribution Network*. 2nd International Conference on Energy Systems and Technologies, Cairo, Egypt, 2013.
- [10] G. S. Koepl and D. Braund., *Double Earth Faults in Power Stations*, IEE Power systems Engineering Series, Power Math Associates, 2014.
- [11] M. Steurer, W. Hribernik and J. H. Brunke, *Calculating the Transient Recovery Voltage Associated with Clearing Transformer Determined Faults by Means of Frequency Response analysis*. IEEE Transactions on Power Delivery, v 19, n.1, pp 168-173, 2004.
- [12] D. Sinder, *Métodos de Cálculo da Tensão de Restabelecimento Transitória para Análise da Superação de Disjuntores de Alta Tensão*. Dissertação de M.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.