



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

GSE 15  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

## **GRUPO VIII**

### **GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS**

#### **CRITÉRIOS DE ANÁLISE DE SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES DE ALTA TENSÃO QUANTO A CORRENTE DE CARGA, CURTO CIRCUITO E TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA ADOTADOS PELO PLANEJAMENTO CHESF A PARTIR DAS NOVAS REVISÕES DAS NORMAS IEC E ANSI.**

**Methodio Varejão de Godoy \***  
UPE/CHESF

**Fernando Rodrigues Alves**  
CHESF

## **RESUMO**

O envelhecimento gradual do sistema elétrico brasileiro em operação, o crescimento do número de agentes de geração próximos aos centros de carga e a elevação da relação X/R das barras do sistema elétrico brasileiro tem, entre outros fatores, causados impactos significativos e superações precoces das características elétricas nominais de equipamentos. A necessidade de melhor identificar as solicitações impostas pelo sistema elétrico e a busca de metodologias "pessimistas" simplificadas para facilitar a realização de estudos de identificação da superação, tem sido objetos de estudos por parte dos diversos agentes do setor elétrico brasileiro.

O presente trabalho tem por objetivo apresentar a revisão dos critérios adotados pelo planejamento da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) no sentido de avaliar a superação de disjuntores por corrente nominal, corrente de curto circuito e tensão de restabelecimento transitório (TRT) levando em consideração as últimas revisões da norma INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE C37. 010-1999 e da norma INTERNATIONAL ELECTROTECNICAL COMMISSION - IEC 62271-100 / 2001.

A avaliação da superação de disjuntores é efetuada por corrente nominal, curto circuito e tensão de restabelecimento transitório ( $U_c$  e TCTRT) após a realização de estudos preliminares de fluxo de potência e de curto-circuito em diferentes horizontes em carga máxima. Os disjuntores a serem objeto de análise detalhada com a nova metodologia são aqueles identificados após a aplicação do critério superação de disjuntores por corrente simétrica pela aplicação da norma IEEE STD C37. 010-1999 (correção para tensão máxima operativa e fator X/R) na sua última revisão, no limite de: 70% de sua capacidade simétrica de interrupção nominal com níveis de curto circuito com X/R maior que 17 e 80% de sua capacidade simétrica de interrupção nominal com níveis de curto circuito com X/R menor que 17.

Para os disjuntores relacionados no estudo preliminar, são realizados estudos detalhados usando a nova metodologia CHESF, sempre observando as especificações técnicas de aquisição do disjuntor e as normas técnicas vigentes no período de aquisição. Os estudos para avaliação da superação quanto à TRT são realizados usando o programa de transitórios eletromagnéticos Alternative Transient Program, ATP. Numa fase preliminar, os estudos são realizados com o sistema elétrico modelado de forma simplificada e "pessimista". Caso o estudo preliminar indicar superação, novos estudos são realizados, com uma modelagem mais detalhada.

Entre as conclusões do trabalho realizado podemos destacar a redução do número de disjuntores passíveis de estarem superados em relação à metodologia anterior (26%), a redução do tempo gasto com as simulações usando o ATP, motivados pela simplificação ou redução de representação de parâmetros de pouca influência nos resultados.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Curto Circuito, Tensão de Restabelecimento Nominal, Superação, Característica Nominal.

## 1.0 - INTRODUÇÃO

O problema de superação das características elétricas nominais de disjuntores sempre foi merecedor de preocupações do setor elétrico brasileiro, nos últimos anos essa atenção de todos os agentes do setor elétrico brasileiro tem sido redobrada, tendo em vista:

- A entrada em operação de novas térmicas próximas aos grandes centros de carga, que vem provocando uma elevação significativa dos níveis de curto circuito das barras vizinhas à conexão,
- O envelhecimento gradual dos equipamentos do sistema elétrico brasileiro,
- A implantação de novas interligações no sistema elétrico brasileiro que tem também contribuído para um incremento dos níveis de curto circuito nos subsistemas interconectados.
- O crescimento vegetativo e a evolução natural dos transformadores de potência e das linhas de transmissão vêm fazendo com que a relação X/R das barras do sistema elétrico venha sendo significativamente incrementadas.
- As dificuldades em relação à construção de novas linhas de transmissão, apontando como solução mais viável a recapacitação das linhas de transmissão já em operação, o que provocado uma significativa elevação da relação X/R das barras do sistema elétrico.
- O incremento da compensação reativa série no sistema elétrico interligado.

Os fatos anteriormente descritos, aliados a publicação da norma IEC 62271-100 em maio de 2001 e da revisão da norma IEEE STD C37. 010 em 1999 motivaram o planejamento da CHESF a rever a metodologia e os critérios para identificar a superação de disjuntores. As mudanças no tocante a como considerar a capacidade de interrupção assimétrica do disjuntor em situações de elevada relação X/R destacadas em ambas as normas foram incorporadas na revisão da metodologia de análise de superação de disjuntores.

A avaliação da superação de disjuntores é efetuada por corrente nominal, curto circuito e tensão de restabelecimento transitório ( $U_c$  e TCTRT) após a realização de estudos preliminares de fluxo de potência e de curto-circuito em diferentes horizontes em carga.

Em todas as análises da superação das características elétricas nominais de disjuntores, uma questão sempre emerge: Um disjuntor com um determinado número de anos de operação submetido a um adequado programa de manutenção mantém suas características nominais? A resposta a esta questão é hoje objeto de estudos e de pesquisas por partes de universidades, centros de pesquisa, fabricantes e concessionárias do setor elétrico. Infelizmente não se tem conhecimento de resultados conclusivos sobre o assunto.

Diante desse fato e de que é conhecido que a avaliação do grau de envelhecimento das características elétricas nominais dos disjuntores depende de um conjunto de fatores tais como: nível de manutenção, histórico de falhas e defeitos registrados no equipamento e do nível de stress submetido ao disjuntor pelas manobras requeridas pelo sistema bem como de um conjunto de aspectos construtivos e tecnológicos a seguinte premissa é assumida: "Se um determinado disjuntor vem sendo submetido a programa de manutenção adequado, suas características elétricas se mantêm ao longo de sua vida útil".

No modelo em vigor no setor elétrico brasileiro, os agentes de geração tem sido estimulados pelas regras tarifárias a instalar geradores próximos aos centros de carga, nas rede de transmissão, sem nenhum tipo de restrição ou de medidas mitigadoras como as relatadas na referência [6] que ressalta que em outros sistemas como o americano, os agentes que embora estimulados a se conectarem junto aos centros de carga, são obrigados na rede de distribuição à adotarem dispositivos que limitem significativamente a sua contribuição para a corrente de curto-circuito.

## 2.0 - ANÁLISE PRELIMINAR

Como foi descrito anteriormente, a caracterização da superação das características elétricas nominais dos disjuntores é realizada em duas etapas: uma análise preliminar e uma análise detalhada. Na análise preliminar são apenas relacionados os disjuntores que deverão ser objeto, numa segunda etapa, de uma análise detalhada.

A análise preliminar, até por que deve envolver todos os disjuntores do sistema elétrico, deve ser simplificada e "pessimista". A simplificação consiste em utilizar ferramentas, modelagem e critérios objetivos que permitam a aplicação imediata. Quanto a necessidade de a análise ser pessimista, está relacionada a necessidade de se evitar que possa vir a acontecer a superação de um dado disjuntor sem que este tenha sido objeto de uma análise detalhada.

Na análise preliminar são realizados estudos preliminares de fluxo de potência e curto circuito. Os estudos de fluxo de carga são realizados na configuração de carga máxima em condição normal e de contingência "n-1". A avaliação da necessidade ou não de estudo detalhado de superação por corrente nominal deve acontecer quando for atingido o limite de 90% (noventa por cento) da corrente nominal do disjuntor.

Na etapa preliminar, os estudos de curto circuito são realizados de forma simplificada e pessimista, considerando as seguintes premissas:

- a) O sistema elétrico na condição pré-falta opera nas tensões máximas operativas em cada barra,
- b) Todas as unidades geradoras são consideradas em operação ao mesmo tempo,
- c) A carga da condição pré-falta é desprezada,
- d) O sistema elétrico é considerado na condição normal, com todas as suas linhas de transmissão e transformadores de potência em operação.
- e) Não necessariamente precisam estar modelados todas as resistências envolvidas de linhas de transmissão e transformadores de potência, bem como os elementos shunts de linha de transmissão e as impedâncias mútuas de seqüência zero de linhas de transmissão.
- f) As correntes de curto circuito a serem utilizadas para a identificação da superação ou não do disjuntor, são as correntes de curto circuito na barra (e respectivas relações X/R) onde o disjuntor está instalado.

É importante ressaltar que ao assumir as premissas anteriormente descritas, fica definido que os estudos de curto circuito serão realizados com todas as unidades geradoras operando simultaneamente, independentemente da possibilidade de despachá-las ou não, todas ao mesmo tempo. Essa condição é pessimista e é usualmente assumida quando da especificação das características elétricas de disjuntores em horizontes relacionados à respectiva vida útil.

Os disjuntores a serem objeto da análise detalhada para avaliação da superação ou não com a nova metodologia são aqueles identificados após a aplicação do critério superação de disjuntores por corrente simétrica pela aplicação da norma IEEE STD C37. 010-1999 (correção para tensão máxima operativa e fator X/R) na sua última revisão, no limite de: 70% de sua capacidade simétrica de interrupção nominal com níveis de curto circuito com X/R maior ou igual a 17 e 80% de sua capacidade simétrica de interrupção nominal com níveis de curto circuito com X/R menor que 17. A relação X/R adotada como referência é o maior valor de X/R encontrado para todos os ramos ligados a barra em análise.

A adoção desses percentuais foi resultado de uma análise de sensibilidade no sentido de evitar que em pontos do sistema elétrico com elevada relação X/R, possa surgir algum caso de disjuntor que possa vir a ser superado pela corrente assimétrica de curto circuito sem que tivesse sido relacionado na análise preliminar para uma avaliação detalhada.

### 3.0 - ANÁLISE DETALHADA

Na análise detalhada o objetivo é comprovar ou não a real superação do disjuntor indicado na análise preliminar. Caso confirmada a superação, deve-se avaliar o horizonte da necessidade de troca do disjuntor, tendo em vista os investimentos requeridos e em alguns casos, as dificuldades de aquisição e até mesmo de fabricação no prazo necessário. Nas situações de exigüidade de prazo ou de dificuldades provocadas pelo elevado investimento requerido, a análise detalhada deve incluir possíveis soluções de mitigação de natureza transitória. Dentre as soluções disponíveis existentes a serem aplicadas no sistema elétrico são avaliadas a instalação de dispositivos limitadores de curto-circuito e até, implantar medidas operacionais como separação de barramentos, o "by-pass" de linhas de transmissão nas subestações, a implantação de chaveamentos seqüenciais e modificações na rede de seqüência zero do sistema elétrico.

#### 3.1 Por Corrente de Carga

Na análise detalhada para a caracterização da superação por corrente de carga, os estudos de fluxo máximo de potência deverão ser efetuados em vários patamares de carga nos diferentes horizontes nas condições mais severas durante emergências, para configurações futuras e incluir uma avaliação dos fluxos em barramentos de subestações nos arranjos onde existe mais de 1 disjuntor por circuito. Nesses estudos a modelagem do sistema elétrico deve buscar reproduzir o sistema elétrico existente o mais fielmente possível tanto na condição normal como na de contingência "n-1".

Nesses casos, é importante definir o horizonte de análise onde se dá a superação e o período de sobrecarga no sentido de determinar os tempos requeridos para aquisição de novos equipamentos e os riscos associados a essas sobrecargas. Medidas mitigadoras de caráter transitório como a separação de barramentos, transferências de cargas e "by-pass" de linhas de transmissão nas subestações são medidas estudadas.

#### 3.2 Por Corrente de Curto-Circuito

Na avaliação que se sucede aos disjuntores passíveis de estarem superados indicados na análise preliminar por corrente de curto circuito (simétrica e assimétrica), os estudos de curto circuito devem ser efetuados considerando as seguintes premissas:

- a) A capacidade de interrupção simétrica e assimétrica do disjuntor é confrontada com a máxima corrente de curto circuito que deve ser conduzida e interrompida pelo disjuntor, denominada corrente passante.
- b) A geração é modelada admitindo a condição de carga máxima, com a maior quantidade de unidades geradoras despachadas.

- c) A condição pré-falta é obtida a partir de um estudo de fluxo de carga em carga máxima no perfil de tensões máximas operativas em cada barra,
- d) O sistema elétrico é considerado na condição normal, com todas as suas linhas de transmissão e transformadores de potência em operação.
- e) Todas as resistências envolvidas de linhas de transmissão e transformadores de potência devem estar representadas nos estudos para o cálculo da corrente de curto circuito.
- f) Os elementos “shunts” de linha de transmissão e as impedâncias mútuas de seqüência zero de linhas de transmissão devem também estar representados.

Após o cálculo da corrente de curto simétrica passante máxima no ponto onde está localizado o disjuntor em análise, esse valor é corrigido para a tensão máxima operativa e pelo fator X/R da revisão da norma IEEE STD C37. 010 em 1999. Caso o curto circuito passante máximo no ponto onde está instalado o disjuntor for o trifásico a relação X/R é dada por  $X_1/R_1$  e no caso monofásico por  $(2X_1+X_0)/(2R_1+R_0)$ .

É importante destacar que em uma quantidade significativa de casos, os disjuntores superados ou próximos da superação, são normalmente os mais antigos, que em muitos casos foram especificados pela norma ANSI C37.010-1972 que define duas capacidades de interrupção uma simétrica e outra assimétrica referidas ao instante em que os contatos do disjuntor se separam. Essas duas capacidades segundo a referida norma são diferentes para faltas trifásicas ou monofásicas e tem relação X/R assumida como referência igual a 15.

A partir dos anos 80 com a especificação dos disjuntores usando as normas IEC e a NBR 7118/1981, a capacidade de interrupção passou a ser única caracterizada pelos valores da componente alternada e contínua. Adicionalmente, a capacidade de interrupção passou a ser constante para todas as tensões iguais ou inferiores a tensão nominal do disjuntor, que passou a ser o mesmo valor da tensão máxima de operação do equipamento. Outro aspecto importante da especificação dos disjuntores pelas normas IEC/ABNT foi a definição da componente contínua da capacidade de interrupção que passou a ser definida por uma porcentagem do valor inicial da componente contínua correspondente a  $t=0$  e expressa pela seguinte equação:

$$I_{CC\%} = e^{-\frac{t}{T}} \cdot 100$$

Onde:

- t – tempo mínimo de separação dos contatos contado a partir do início da falta, com a recomendação de utilizar o valor de meio ciclo para atuação da proteção.
- T – constante de tempo do circuito vista dos terminais do disjuntor com o valor de referência de 45 ms.

As observações feitas anteriormente ressaltam a necessidade de examinar disjuntor a disjuntor, no sentido de identificar a especificação usada para aquisição bem como a norma de referência e os resultados de ensaios realizados no processo aquisitivo.

A redução para o patamar de 70% e 80% da capacidade de interrupção simétrica dos disjuntores para realizar os estudos detalhados de superação permite uma extensão no tempo para possibilitar a implantação de medidas mitigadoras ou mesmo a aquisição ou permuta do disjuntor superado.

Confirmada a superação do disjuntor por corrente de curto circuito trifásico ou monofásico na análise detalhada, medidas definitivas como: a aquisição de novo disjuntor, “upgrade” ou atualização do disjuntor em operação, ou ainda a permuta do disjuntor superado por outro com a capacidade de interrupção requerida. Estas medidas são avaliadas sob enfoque técnico e econômico-financeiro, junto com a avaliação da implantação de medidas mitigadoras.

Na superação por corrente de curto circuito trifásico são analisadas soluções transitórias como seccionamento de barras, segmentação de sistemas de transmissão, implantação de medidas operacionais como chaveamento seqüencial e implantação de reatores série. É importante ressaltar que essas medidas contribuem para a redução da confiabilidade, eleva os custos e aumenta as perdas de potência como é o caso da implantação dos reatores série.

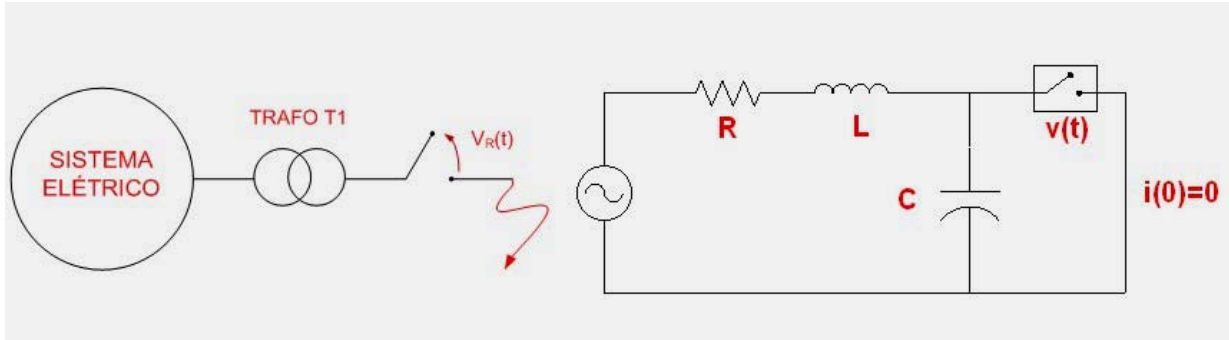
Na situação de ficar evidenciada a superação por corrente de curto-circuito monofásico do disjuntor as seguintes medidas mitigadoras podem ser avaliadas: mudar o tipo de aterramento da ligação estrela dos transformadores ou auto-transformadores, eliminando a ligação a terra ou conectando uma resistência ou reatância de aterramento, abertura da ligação em triângulo dos transformadores e auto-transformadores.

A implantação dessas medidas exige a realização de estudos específicos e consultas aos fabricantes dos transformadores. A alteração do tipo de aterramento do transformador como destacado na referência (7) exige avaliação das características de isolamento do terminal de neutro com relação as solicitações tanto de surtos de manobra quanto de surtos atmosféricos. O aterramento do neutro, através de uma impedância exige consultas aos fabricantes no tocante a suportabilidade da isolação do transformador em relação a nova distribuição de tensão nos enrolamentos.

### 3.3 Por Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT)

Na ocorrência de uma falta num sistema de potência, os disjuntores mais próximos devem isolar o trecho defeituoso com rapidez, minimizando os efeitos da falta sobre o resto do sistema. Com o início da separação mecânica dos contatos do disjuntor, como a corrente não pode variar instantaneamente por causa da conservação do fluxo magnético, se estabelece um arco entre os contatos. A capacidade de um disjuntor eliminar uma falta depende do nível de corrente e da tensão que se estabelece entre os contatos, após a extinção do arco elétrico.

Desta forma a capacidade de interrupção de um disjuntor deve ser determinada pela magnitude da corrente de falta e pela TRT através de seus contatos. A TRT tenderá a restabelecer o arco, seja por reignição térmica, ou por ruptura do dielétrico.



**Figura 1 – Caso clássico de cálculo da tensão de restabelecimento transitório**

A equação clássica para a determinação da TRT, obtida a partir da representação do sistema elétrico apresentado na Figura 1 e seu circuito equivalente monofásico, é a seguinte:

$$\frac{d^2 v_c}{dt^2} + \frac{R}{C} \cdot \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{L \cdot C} = \frac{v_s}{L \cdot C}$$

Cuja solução indica que a TRT pode ser expressa pela seguinte equação:

$$V_c(t) \cong V_m \cdot \left[ \cos(\omega \cdot t) - e^{-\frac{R}{2L}t} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \right]$$

A magnitude do pico da onda inicial da TRT é dada pela combinação de duas componentes, sendo uma delas transitória, de alta frequência  $\omega_0$ , que resulta da composição dos modos de oscilação da rede (frequência natural) e a outra, de baixa frequência  $\omega$ , que só depende das fontes e da topologia da rede (frequência industrial). A componente de frequência natural decai exponencialmente devido às resistências do circuito, enquanto que, a componente de frequência industrial oscila à frequência das fontes de tensão do sistema. A representação clássica descrita tratando o problema com uma representação monofásica é bastante aproximada.

O cálculo exato da TRT requer uma modelagem mais detalhada, uma representação trifásica, que por se tratar de um fenômeno transitório exige a resolução de equações diferenciais através de processos de integração numérica. O valor da TRT calculado para uma situação particular de falta e de seqüência de abertura dos pólos do disjuntor, depende de quais elementos da rede elétrica são considerados nos cálculos, do modelo adotado para a representação desses elementos e do método de cálculo empregado.

A TRT é particularmente elevada após a abertura de faltas terminais (que são faltas ocorridas nos terminais dos disjuntores das conexões dos transformadores para curtos nos barramentos, e nos terminais dos disjuntores ou religadores dos alimentadores) e de faltas quilométricas (que são faltas ocorridas nas linhas de transmissão, a poucos quilômetros do disjuntor). Usualmente, a falta terminal é mais severa para o valor de pico da TRT, enquanto que a falta quilométrica é mais severa para o valor da taxa de crescimento da TRT.

Durante os primeiros microssegundos após a interrupção de uma corrente, a TRT será determinada essencialmente pelos parâmetros dos elementos situados a uma distância muito pequena do disjuntor, fazendo com que o arranjo da subestação assuma uma importância fundamental na sua determinação. Pode-se citar que de uma forma geral um aumento da indutância do sistema contribui para elevar o valor de pico da TRT, enquanto que um acréscimo na capacitância provoca uma diminuição na TCTRT.

Os principais fatores indicativos de uma condição de operação menos favorável do ponto de vista das tensões de restabelecimento transitórias, são os seguintes:

- Potência de curto-circuito elevada no ponto da falta,
- Inexistência de outras linhas na barra, além daquela em que ocorre a falta. O efeito de linhas adicionais conectadas a barra onde o disjuntor está sendo manobrado atenua a TCTRT, pois estas linhas diminuem as componentes de onda refletidas que se somam com a TRT inicial, tendo em vista o efeito resistivo da impedância de surto.
- Falta nos terminais do disjuntor sem a presença da linha associada ao mesmo. O efeito da linha em falta na onda incidente da TRT é provocar uma redução na sua taxa de crescimento. Sendo assim, a desconsideração desse efeito nos estudos leva-nos à obtenção de um resultado conservativo, uma vez que não são considerados os efeitos resistivos inerentes à linha de transmissão.
- Inexistência de bancos de capacitores na barra onde está o disjuntor. Toda capacitância natural  $C$ , que sempre deve ser considerada nos estudos provoca uma atenuação na TCTRT.

Considerando os fatos anteriormente descritos, os estudos para avaliação da superação quanto à TRT de um dado disjuntor recaem no uso do programa de transitórios eletromagnéticos Alternative Transient Program (ATP). A utilização do ATP com uma representação trifásica detalhada do sistema elétrico para todos os disjuntores que apresentem níveis de curto-circuito superiores a 80% do valor nominal do equipamento, implicaria numa grande demanda de estudos, exigindo um significativo volume de dados e de mão de obra para a sua execução. No caso do sistema CHESF, esse fato implicaria numa centena de disjuntores a serem analisados detalhadamente, no mínimo uma vez por ano.

Objetivando reduzir esse “esforço” requerido, partiu-se para o desenvolvimento de uma metodologia simplificada com as seguintes premissas:

- A análise deve ser “pessimista”, de tal forma que nenhum disjuntor considerado não superado pela metodologia simplificada, pode apresentar superação num estudo detalhado.
- A análise deve ser feita com uma pequena quantidade de informações e de uma forma padronizada no sentido possibilitar avaliar um grande número de disjuntores de forma rápida e imune a problemas.

A alternativa de metodologia simplificada testada foi o método expedito descrito na norma IEEE Standard C37.011 – 1994 - IEEE APPLICATION GUIDE FOR TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE FOR AC HIGH-VOLTAGE CIRCUIT BREAKERS RATED ON A SYMMETRICAL CURRENT BASIS. A avaliação dessa metodologia simplificada foi realizada confrontando os resultados obtidos com os resultados das simulações detalhadas. Essa confrontação possibilitou concluir que em 1,6% dos casos simulados, disjuntores indicados como não superados na metodologia simplificada, apresentavam superação na taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitório(TCTR) nos estudos de faltas quilométricas.

Para evitar esses problemas na utilização da metodologia simplificada a CHESF passou a fazer uma revisão na análise de superação de disjuntores por TCRT em faltas quilométricas a partir de uma realização de simulação digital simplificada. Desta forma usando o programa de cálculo de transitórios eletromagnéticos ATP/EMTPduas configurações padronizadas passaram a ser examinadas para representar o sistema elétrico, numa condição “pessimista”:

- Falta quilométrica para disjuntor de linha (Figura 2)
- Falta quilométrica para disjuntor na baixa tensão de transformador (Figura 3)

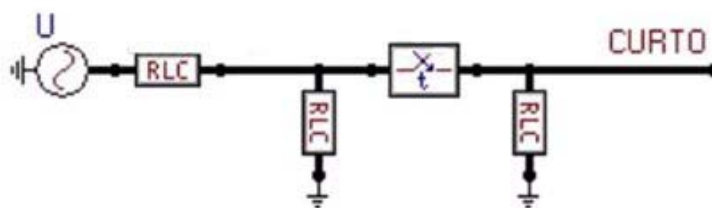


Figura 2 - Falta quilométrica para disjuntor de linha

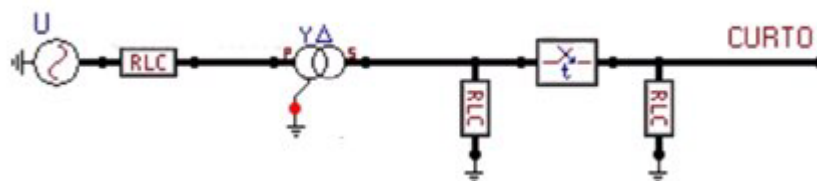
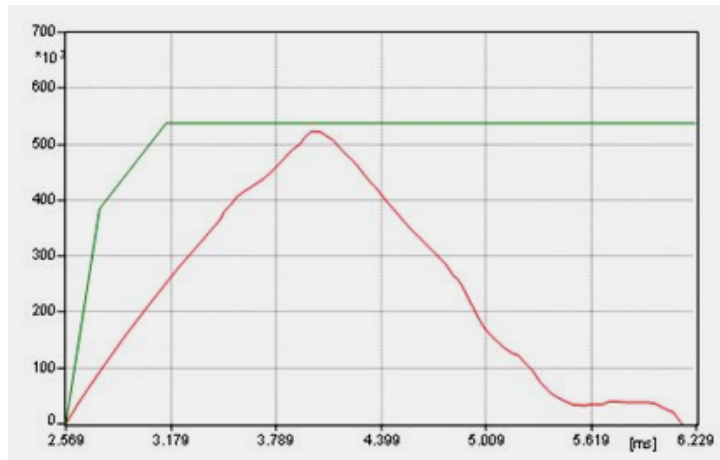


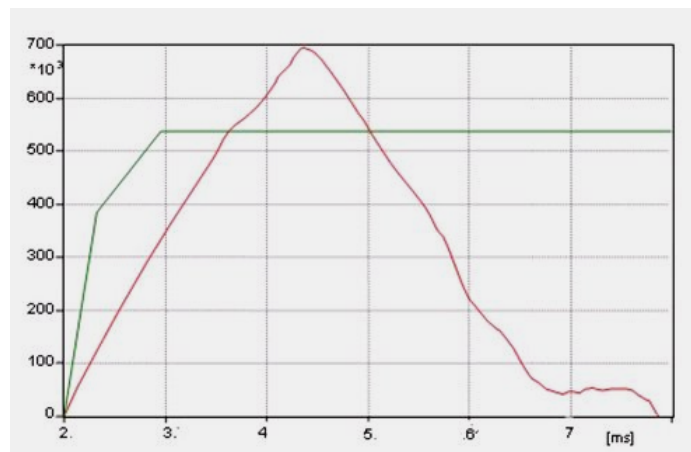
Figura 3 - Falta quilométrica para disjuntor na baixa tensão de transformador

Com a incorporação dessa mudança, o método simplificado passou a ser efetivo em 100% dos casos o que permitiu redução significativa do esforço requerido para avaliação periódica da superação de disjuntores por TRT.

Na avaliação da superação por TRT são considerados os valores e envoltórias propostos pela ABNT e IEC, considerando os diversos níveis de corrente pré-defeito estabelecidos na norma IEC 62271-100 de maio de 2001.



**Figura 4 – Disjuntor não superado pela metodologia simplificada**



**Figura 5 - Disjuntor superado pela metodologia simplificada**

#### 4.0 - AVALIAÇÃO DA SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES POR TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIO – METODOLOGIA DETALHADA

O cálculo da TRT usando a metodologia detalhada deve ser realizado para todos os disjuntores indicados como superados nos estudos realizados usando a metodologia simplificada.

A escolha dos casos a serem estudados no que diz respeito aos pontos de aplicação da falta, ao tipo de falta a ser analisado e as condições dos pólos do disjuntor (abertos ou fechados) deve ser feita de forma a evitar que as solicitações mais severas sejam esquecidas.

Considerando as dificuldades descritas, as seguintes recomendações devem ser observadas para o cálculo da TRT, seguindo a metodologia detalhada:

- Deve ser utilizado o programa de cálculo de transitórios eletromagnéticos ATP/EMTP.
- A simulação deve ser realizada considerando a falta já aplicada e em regime permanente, para a condição de corrente de curto máxima passante pelo disjuntor até sua abertura.
- O sistema elétrico deve ser representado de forma trifásica.
- O sistema elétrico deve ser modelado até duas transformações da posição do disjuntor, objeto da análise. As barras limites devem ser representadas pelos equivalentes de curto circuito.
- O passo de integração deve ser igual a um décimo do menor tempo de propagação das linhas próximas ao disjuntor em análise.
- O tempo total de simulação é de 10 ms, que é usualmente adequado para a análise da abertura dos três pólos do disjuntor.
- As linhas de transmissão devem ser representadas pelo modelo de parâmetros distribuídos.
- As cargas não devem ser representadas.

- i) As capacitâncias parasitas das barras próximas aos pontos de falta devem ser modeladas.
- j) Os transformadores e reatores devem ser representados, pelos modelos do ATP, sem representar a saturação, as capacitâncias parasitas, as perdas no ferro e sem correção de impedância de curto-circuito com a frequência.

## 5.0 - CONCLUSÕES

Com base nas análises realizadas podem-se obter as seguintes conclusões:

- a) Confirmada a superação do disjuntor devem ser avaliadas em conjunto alternativas de forma transitória envolvendo soluções de mitigação e de forma definitiva como aquisição, “upgrade” ou permuta por outro de maior capacidade. Essas avaliações passam por aspectos técnicos e aspectos econômico-financeiros.
- b) Ocorrem casos em que o disjuntor pode estar superado por TRT sem que esteja por corrente de curto circuito, porém na foram constatados casos desse tipo com correntes de curto circuito abaixo de 80% de sua capacidade de interrupção nominal.
- c) A análise preliminar para avaliação da superação por TRT e TCTR demonstrou ser conservadora e efetiva para caracterizar a não superação dos disjuntores. O procedimento simplificado descrito nesse artigo demonstrou robustez e proporcionou uma redução significativa do esforço para análise periódica da superação de disjuntores por TRT.
- d) A confirmação dos disjuntores superados só pode ser feita de forma efetiva com o emprego de programa de computador digital para cálculo de transitórios eletromagnéticos com uma melhor representação dos elementos da rede estudada.
- e) Foi constatado que o curto-circuito monofásico quilométrico apresenta valores de TCTR maiores que o curto-circuito trifásico não aterrado no barramento. Observou-se também que o valor de pico da TRT ( $U_c$ ), foi sempre superior ao caso monofásico.
- f) As medidas usuais para a mitigação da superação pela TRT consistem na instalação de capacitores do lado da fonte (caso de faltas terminais) ou do lado da linha (caso de faltas quilométricas) reduzem a confiabilidade e segurança do sistema elétrico, devendo ser adotadas de forma transitória e avaliando riscos.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1)IEEE STD C37. 010-1999 – IEEE APPLICATION GUIDE FOR AC HIGH VOLTAGE CIRCUIT BREAKERS RATED ON A SYMMETRICAL CURRENT BASIS.
- (2)IEC INTERNATIONAL STANDARD 62271-100 / 2001 - HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR AND CONTROLGEAR – Part 100: High-voltage alternating-current circuit-breakers
- (3)IEEE Standard C37.011 – 1994 - IEEE APPLICATION GUIDE FOR TRANSIENT RECOVERY VOLTAGE FOR AC HIGH-VOLTAGE CIRCUIT BREAKERS RATED ON A SYMMETRICAL CURRENT BASIS.
- (4) Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão - Ary D’Ajuz e outros.
- (5) Análise da Superação das características nominais de equipamentos: Métodos Para A Identificação Da Possibilidade de Ocorrência e Estudo de Soluções de Mitigação – Amon F. J. E outros VI SNPTEE – Curitiba – Outubro de 2005
- (6) D’AJUZ, A. et alii - “Equipamentos Elétricos - Especificação a Aplicação em Subestações de Alta Tensão” - Cap. 14 - Superação de Equipamentos - livro técnico publicado por FURNAS/UFF - 1985.
- (7) Limitação de curto-circuito: Experiência de FURNAS e análise de novas tecnologias existentes e em desenvolvimento, cada vez mais necessárias para viabilizar a conexão de novos produtores independentes à rede básica. - Amon F.,J. - IX ERLAC – Foz do Iguaçu, maio de 2001
- (8) Análise de Superação de Disjuntores quanto a Tensão de Restabelecimento Transitória no Planejamento CHESF – Godoy, Methodio e Fernando Alves. VI SNPTEE – Curitiba – Outubro de 2005
- (9) Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão - Ary D’Ajuz e outros.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Methodio Varejão de Godoy

Nascido no Recife, PE em 20 de maio de 1959. Graduado em Engenharia Elétrica em 1982 pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Mestre em Engenharia Elétrica em 1995 pela UMIST (Manchester na Inglaterra) e Doutor em 2006 pela UFPE. Engenheiro da Divisão de Estudos de Alta Tensão do Departamento de Estudos de Sistema da CHESF e Professor do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Pernambuco desde 1982.