



**GRUPO X
SOBRETENSÕES, COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO E INTERFERÊNCIAS (GSI)**

AValiação DA TENSÃO DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIA (TRT) PARA DISJUNTORES DE 550KV DA UHE TUCURUÍ SEGUNDA ETAPA

José Toshiyuki Honda*	Norte Sul Engenharia	Camilo Machado Junior	ELETRONORTE
Wanderley Sousa Pinto	ELETRONORTE	Eber H. Rose	ELETRONORTE
Ary D'Ajuz	ELETRONORTE		

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados de estudos de TRT realizados, pela ELETRONORTE, para a especificação dos disjuntores da UHE Tucuruí-Segunda Etapa. São mostrados os resultados de simulações efetuadas com o programa ATP (Alternative Transients Program) e metodologia de simulação adotada.

PALAVRAS-CHAVE

Tensão de Restabelecimento Transitória, Disjuntores, Oscilação de Tensão.

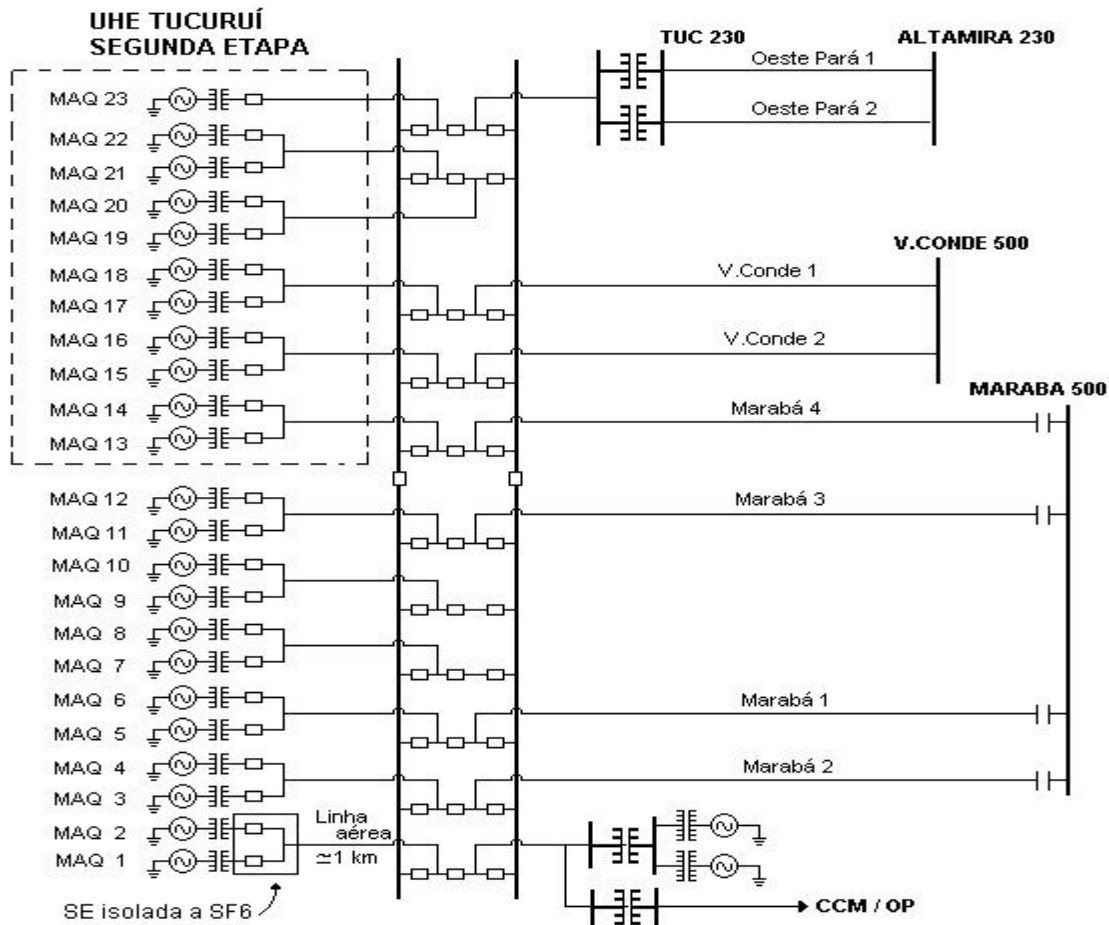
1.0 - INTRODUÇÃO

A UHE Tucuruí, planejada para ser construída em duas etapas, tem atualmente um parque gerador constituído por 12 unidades que fornecem uma potência de 4240 MW. Conforme a concepção original da Usina, o seu parque gerador será complementado com mais 11 unidades geradoras de 390 MW cada. Quando concluída a ampliação, a capacidade total de geração será de 8350 MW. O sistema de transmissão previsto para o escoamento desta potência é constituído por seis linhas em 550 kV e mais duas em 230 kV. O pátio da subestação elevadora (isolada em SF6), atual e da Segunda Etapa, será interligado com a subestação (isolada a ar) por meio de seis linhas de transmissão em 550 kV, circuito duplo, com aproximadamente 1,0 km de comprimento. A cada circuito, por sua vez, deverão ser conectados duas unidades geradoras com os respectivos transformadores elevadores e disjuntores. Na Figura 1, é apresentado o diagrama simplificado da usina bem como o sistema de 550kV associado.

A corrente máxima de curto-circuito prevista para a UHE Tucuruí é de 52kA na barra de 500kV. Esta elevada corrente, associada ao fato do pátio da usina estar separado da subestação por linhas de transmissão, acenou à ELETRONORTE a necessidade de realizar estudos específicos de TRT (Tensão de Restabelecimento Transitória) para os disjuntores da SE blindada de 550kV.

Tradicionalmente, as análises de TRT têm sido realizadas através do programa de simulação digital EMTP (Electromagnetic Transients Program), ou, em tempos mais recentes, através do ATP (Alternative Transients Program). O método de simulação, nestes programas, consiste em calcular um fluxo de carga para definir as condições iniciais e, posteriormente, através do método numérico de integração trapezoidal, processar os cálculos dos transitórios eletromagnéticos no tempo. Invariavelmente, as simulações têm sido realizadas com um curto-circuito mantido já em regime permanente, isto é, incorporado às condições iniciais. Somente os transitórios imediatamente subsequentes à abertura dos disjuntores são considerados. Nestas condições, a TRT é comparada com a envoltória de norma, para a verificação da capacidade do disjuntor em suportar a tensão de restabelecimento.

No caso específico da UHE Tucuruí Segunda Etapa, como a sua relação X/R é elevada e a atuação da sua proteção é muito rápida, 1,5 a 3,0 ciclos, que implicam na existência de transitórios causados pelo curto-circuito, inclusive componente DC, ainda não suficientemente atenuados antes da abertura dos pólos dos disjuntores, optou-se por realizar estudos de TRT considerando esses transitórios.



2.0 - OBJETIVO

É objeto deste artigo, apresentar o estudo de TRT realizado para os disjuntores da UHE Tucuruí Segunda Etapa considerando os transitórios devido ao curto-circuito, mostrando, inclusive, resultados comparativos com o método tradicional. É analisada, entre outros fenômenos, a oscilação de tensão devida às capacitâncias parasitas dos equipamentos da usina e às respectivas indutâncias.

3.0 - DADOS E METODOLOGIA

As simulações consideram a configuração prevista para o ano 2008, com todas as unidades geradoras representadas (total de 23), conforme Figura 1.

A linha de interligação entre a Usina e a SE 500kV, diretamente envolvida na manobra de abertura do disjuntor, é representada pelo modelo J.Marti, isto é, com os seus parâmetros variando com a frequência e uniformemente distribuídos. As demais LT's são representadas pelos tradicionais modelos de parâmetros distribuídos sem considerar a variação dos parâmetros com a frequência. As unidades geradoras são modeladas com uma tensão constante atrás da reatância

(subtransitória). Além dos modelos de transformadores, linhas e outros equipamentos normalmente representados para este tipo de estudo, são considerados também as capacitâncias parasitas típicas de disjuntores (80pF), chaves (80pF) e transformadores elevadores (4,0nF), bucha de entrada da Usina (150pF) e as capacitâncias de equalização das câmaras (1200pF cada uma) dos disjuntores em análise. Não são consideradas as impedâncias de surto no interior da blindada.

Os disjuntores são todos considerados como sendo de 63kA e os valores de norma da TRT adotados como referências para efeito de análise, são os constantes na Norma de Disjuntores NBR7118 da ABNT de Setembro de 1994. Nas Tabelas 1 e 2 estão reproduzidos os valores presumidos da TRT para ensaios

TABELA 1 : Envoltórias de TRT para faltas quilométricas, Norma ABNT-Vn 550kV

I_{cc} / I_n (%)	V_1 (kV)	T_1 (μ s)	V_C (kV)	T_2 (μ s)	S (kV/ μ s)
100	449	225	629	675	2

TABELA 2 : Envoltórias de TRT para faltas terminais Norma ABNT - Vn 550kV

I_{cc} / I_n (%)	V_1 (kV)	T_1 (μs)	V_C (kV)	T_2 (μs)	S (kV/ μs)
100	584	292	817	876	2
60	584	195	876	878	3
30	584	117	876	878	5
10	1031	100	-	-	10,3

A metodologia adotada nas simulações consiste em considerar, inicialmente, um estado em regime permanente da rede elétrica sem a falta aplicada. Somente após o início da simulação no tempo é aplicada a falta, dando início ao fenômeno transitório nas três fases. Decorridos 2 a 3 ciclos, em relação ao instante de aplicação da falta, dependendo de cada simulação, abrem-se os pólos dos disjuntores para isolar o curto. Por conseguinte, com esse critério de análise, considera-se o aspecto transitório da corrente de curto passante nos disjuntores, antes e após as aberturas dos seus pólos, inclusive as componentes contínuas nas três fases. A Figura 2 ilustra a metodologia de simulação da corrente de curto-circuito adotada para este estudo de TRT.

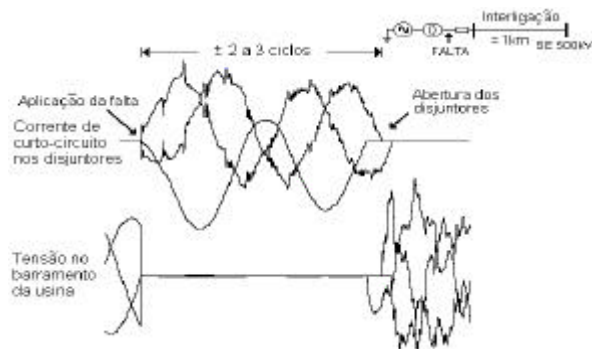


FIGURA 2: Corrente e tensão nos disjuntores

4.0 - TRT

A seguir são comentados os três casos mais representativos do fenômeno de TRT observados nos estudos realizados.

4.1 - Faltas terminais no lado da Usina

Os curtos-circuitos trifásicos no interior de uma subestação blindada são praticamente inexistentes. No entanto, no caso da UHE Tucuruí, como foi constatada a ocorrência de três casos de faltas monofásicas nas buchas imersas em óleo, dos transformadores elevadores, analisou-se, além das faltas monofásicas, a possibilidade de ocorrência de curtos-circuitos trifásicos junto aos transformadores situados na parte externa à blindada. Assim, nas Figuras 3a e 3b são mostrados os resultados da simulação de um curto-circuito aterrado aplicado entre o transformador elevador e o disjuntor, considerando apenas uma

unidade geradora (MAQ 23). A corrente de curto-circuito é de 73kAp.

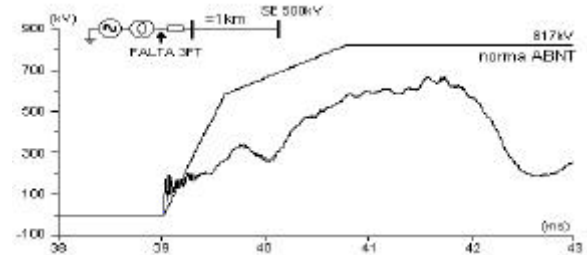


FIGURA 3a: TRT, faltas terminais, lado da Usina uma unidade geradora

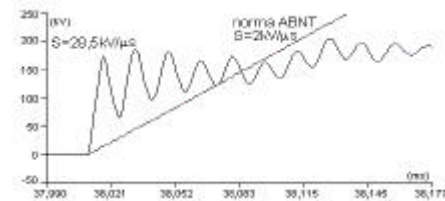


FIGURA 3b: TRTI, faltas terminais, lado da Usina uma unidade geradora

Em função do pequeno comprimento da linha de interligação que tem a extremidade do lado da Usina aberta após a manobra dos disjuntores, o fenômeno da propagação de onda através da interligação produz uma TRT inicial (TRTI) com uma elevada taxa de crescimento, $S = 28,5 \text{ kV}/\mu\text{s}$. O primeiro pico da TRT ocorre em apenas $8 \mu\text{s}$, que representa, aproximadamente, o tempo gasto pela onda trafegante percorrer a Interligação, atingir a SE Tucuruí e retornar à Usina. A frequência correspondente é de 67kHz.

Com um conjunto de duas unidades geradoras, a linha de Interligação não constitui mais uma linha aberta, pois o segundo conjunto de unidade geradora se mantém conectado após a manobra de abertura do disjuntor. Essa condição operativa contribui para diminuir a taxa de crescimento sem, contudo, torná-la inferior à especificada em norma. As formas de onda da TRT deste caso são ilustradas nas Figuras 4a e 4b.

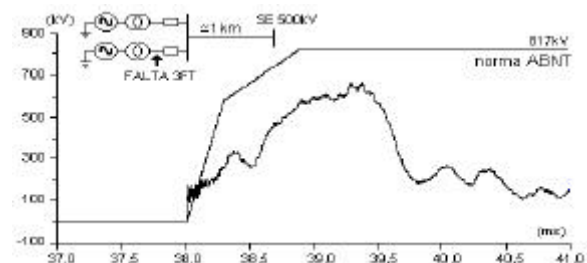


FIGURA 4a: TRT, faltas terminais, lado da Usina duas unidades geradoras

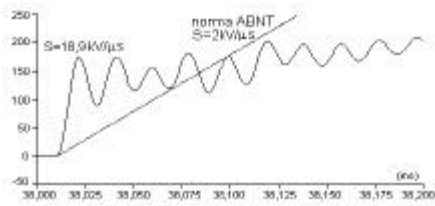


FIGURA 4b: TRTI, faltas terminais, lado da Usina duas unidades geradoras

Os resultados de simulações efetuadas com a aplicação de uma falta monofásica, no lado da usina, no interior da blindada são apresentados a seguir. A corrente de curto-circuito é de 64kAp.

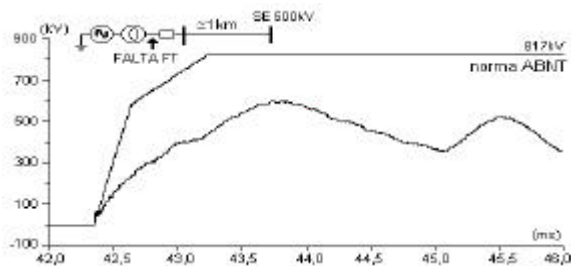


FIGURA 5a: TRT, faltas terminais monofásica lado da Usina, uma unid. geradora

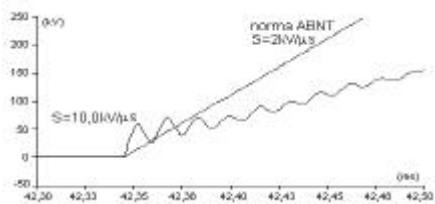


FIGURA 5a: TRTI, faltas terminais monofásica lado da Usina, uma unid. geradora

A taxa de crescimento da TRTI diminuiu sensivelmente em relação a verificada para uma falta trifásica terra (de 28,5 para 10kV/μs), mas, ainda, se apresenta bem superior ao valor de norma (2,0kV/μs).

As TRTIs observadas nas simulações, se considerada a modelagem detalhada da GIS, para frequências elevadas, devem sofrer uma sensível diminuição, em função da linha aérea conectada diretamente à GIS, conforme cita a própria norma ABNT. Quanto as TRTs máximas, onde esta consideração não seria válida, são inferiores aos valores de norma.

4.2 Faltas terminais no lado da Interligação

É aplicado um curto-circuito trifásico aterrado na interligação próximo à Usina. A corrente de curto-circuito é de 3,2 kAp.

A forma de onda da TRT confirma a existência de uma oscilação de tensão em função das capacitâncias parasitas representativas dos equipamentos da Usina e

da indutância vista do disjuntor para o lado da máquina. São apresentadas duas simulações parametrizando o valor total das capacitâncias parasitas: na primeira simulação, com os valores das capacitâncias conforme o citado no Item 2.0, e o segundo, diminuindo o seu valor para 1/3. As Figuras 6 e 7 mostram as formas de onda da TRT obtidas.

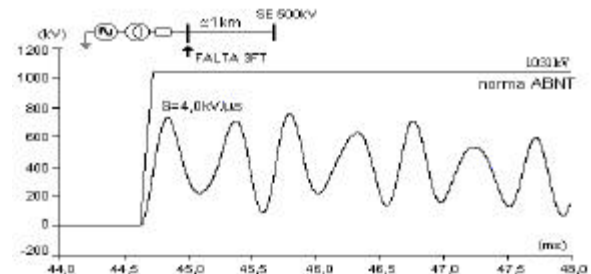


FIGURA 6: TRT, faltas terminais, lado da interligação com capacitância parasita normal

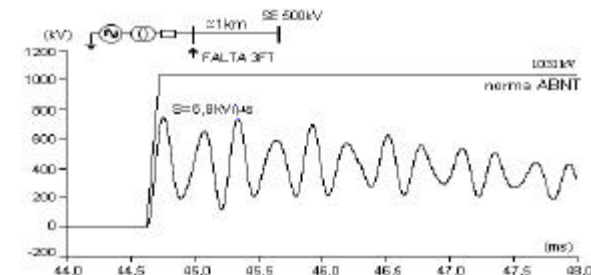


FIGURA 4: TRT, faltas terminais, lado da interligação com capacitância parasita reduzida

Nota-se claramente, com a diminuição das capacitâncias, o aumento da frequência de oscilação de 1,9kHz para 4,3kHz e, conseqüentemente, o aumento da taxa de crescimento (4,0 para 6,8kV/μs).

Nos dois casos, a TRT não constitui uma solicitação severa para os disjuntores; a corrente de curto-circuito verificada neste tipo de falta é pequena, fato que confere aos disjuntores uma ampla capacidade de suportabilidade dielétrica. Esta capacidade maior é considerada implicitamente pela adoção de uma envoltória de norma para corrente de curto-circuito inferior a 10% em relação a capacidade nominal de interrupção do disjuntor. Nos estudos realizados, foi verificado que as faltas monofásicas produzem TRTs, similares aos apresentados neste item (faltas trifásicas).

4.3 - Faltas quilométricas no lado da interligação

Uma falta monofásica é aplicada próximo à SE Tucuruí, distante 1,0km da Usina. A corrente de curto-circuito máxima é de 2,0kAp.

O fenômeno da oscilação de tensão é também verificado nesta simulação de faltas quilométricas. Como o realizado na simulação anterior, é considerada

a parametrização das capacitâncias parasitas representativas dos equipamentos da usina. A frequência de oscilação aumenta de 2,5kHz para 4,0kHz. As formas de onda da TRT são apresentadas nas Figuras 8 e 9.

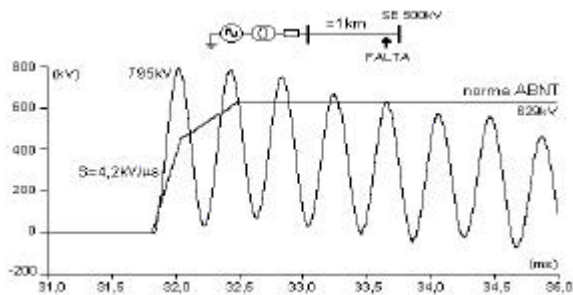


FIGURA 8: TRT, falhas quilométricas com capacitância parasita normal

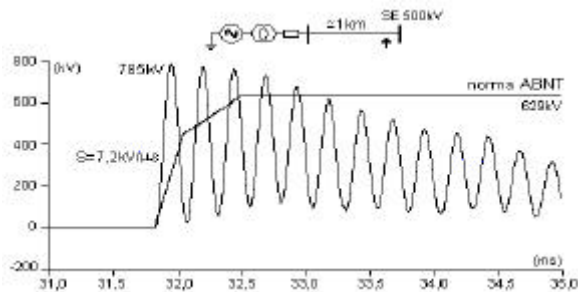


FIGURA 9: TRT, falhas quilométricas com capacitância parasita reduzida

Na forma de onda da TRT não é possível visualizar a reflexão de onda típica de uma falha quilométrica, pois o primeiro pico de tensão, que ocorre 8 μ s após a abertura do disjuntor, é de apenas 3,1kVp. Este reduzido valor é consequência do comprimento de 1km da linha de interligação e do baixo valor da corrente de curto-circuito (2,0kA). A TRTI correspondente somente à reflexão é de apenas 0,39kV/ μ s.

Nesta simulação, a TRT supera a envoltória de norma (ABNT) no seu valor máximo. A taxa de crescimento, após os instantes iniciais, isto é, após a atenuação das reflexões de onda na linha (falha quilométrica) também é superior ao valor de norma (4,2 e 7,2kV/ μ s contra 2,0kV/ μ s, de norma). Por outro lado, as máximas TRTs verificadas nas simulações, não devem sofrer reduções drásticas se considerarmos a modelagem da GIS para frequências elevadas, em função da diferença das impedâncias de surto da linha aérea (450 Ω) e dos cabos da GIS (60 Ω), pois esses modelos não se aplicariam na faixa de frequência da oscilação de tensão (2,0 a 4,0kHz).

As TRTs observadas nesta análise são muito parecidas com os mostrados no item 4.2, referente às falhas terminais no lado da linha de interligação. Portanto constituem, praticamente, nas mesmas solicitações aos

disjuntores. Assim como, pela norma, os disjuntores suportam as TRTs provocadas pelas falhas terminais no lado da linha de interligação, possivelmente, esses disjuntores deverão suportar também as TRTs de falhas quilométricas. No entanto, as TRTs produzidas pelas falhas quilométricas deverão ser incluídas na especificação do disjuntor como requisito fora de norma.

5.0 - SIMULAÇÃO TRADICIONAL DE TRT

São apresentados as simulações dos casos correspondentes aos analisados no Item 4.0, utilizando a metodologia tradicional, isto é, considerando o curto circuito mantido em regime antes da abertura dos disjuntores. O propósito desta comparação é o de aferição dos resultados apresentados neste artigo.

a) Falhas terminais no lado da Usina

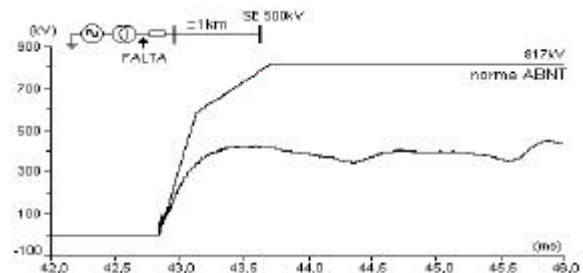


FIGURA 10a: TRT Falhas terminais no lado da Usina CC em regime permanente

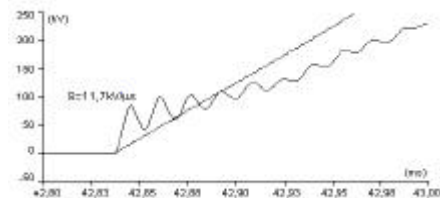


FIGURA 10b: TRTI Falhas terminais no lado da Usina CC em regime permanente

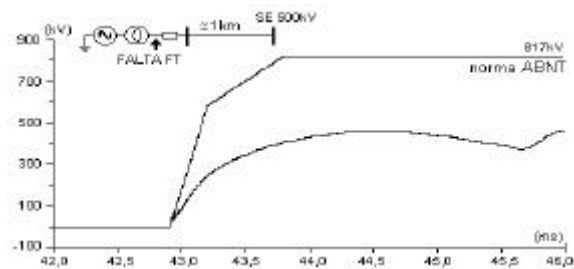


FIGURA 11a: TRT Falhas terminais no lado da Usina CC em regime permanente

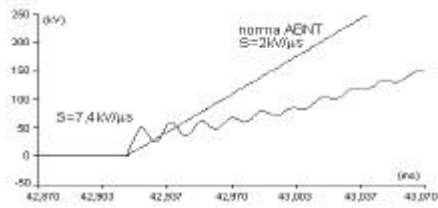


FIGURA 11b: TRTI Faltas terminais no lado da Usina CC em regime permanente

Também nesta simulação com a metodologia tradicional, a reflexão de onda na interligação produz uma taxa de crescimento elevada; cerca de $11,7\text{kV}/\mu\text{s}$, para falta trifásica, e $7,4\text{kV}/\mu\text{s}$, para falta monofásica. Estes valores são bem inferiores aos $28,5\text{kV}/\mu\text{s}$ e $10,0\text{kV}/\mu\text{s}$, do Item 4.1.

b) Faltas terminais no lado da interligação

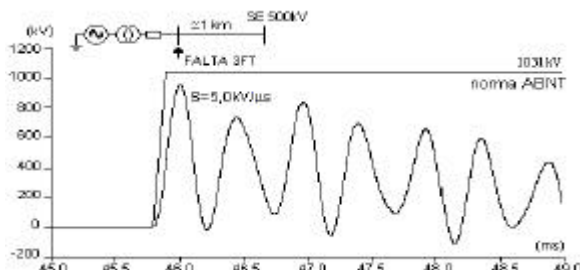


FIGURA 12: TRT, Faltas terminais, lado interligação CC em regime permanente

As formas de onda da TRT são muito parecidas com o obtido considerando-se os transitórios provocados pelo curto-circuito (Item 4.2). É importante ressaltar que a frequência de oscilação é a mesma, pois as capacitâncias parasitas dos equipamentos da blindada continuam as mesmas.

c) Faltas quilométricas

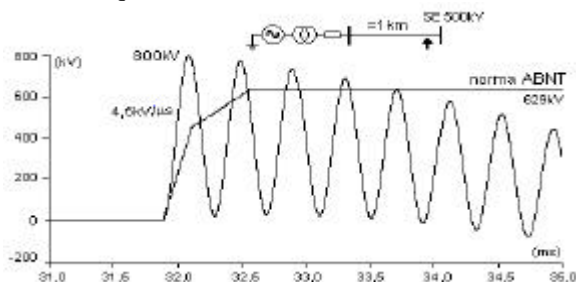


FIGURA 13: TRT, Faltas quilométricas CC em regime permanente

Novamente, verifica-se que as formas de onda da TRT são praticamente iguais aos vistos no caso correspondente (Item 4.3). Em ambas as situações a TRT supera a envoltória de norma, tanto na amplitude como na taxa de crescimento.

6.0 - CONCLUSÃO

As principais conclusões são:

- Com relação às faltas terminais no lado da linha de interligação, os valores de norma para TRT de disjuntores de 550kV são suficientes para a especificação dos disjuntores da UHE Tucuruí Segunda Etapa..
- As TRTs de faltas quilométricas devem ser incluídas na especificação dos disjuntores como requisitos fora de norma.
- Quanto à TRTI de faltas terminais no lado da usina, deve ser elaborado um estudo específico com a modelagem detalhada da usina na faixa de frequência do fenômeno envolvido (50 a 70kHz).
- As simulações considerando transitórios de curto-circuito apresentaram resultados, praticamente, iguais aos obtidos com a metodologia tradicional, com curto-circuito em regime permanente, com exceção dos efetuados para as faltas terminais no lado da usina. Nestes tipos de falta, devido ao fenômeno da propagação de onda na linha aberta da interligação, os transitórios existentes antes da abertura dos disjuntores têm uma influência significativa na máxima taxa de crescimento da TRT.

7.0 – BIBLIOGRAFIA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Norma de Disjuntores NBR7118, Setembro de 1994. Brasil
- AMON, F.J. The of ATP-TACS subroutine in calculation of transient recovery voltage for circuit breakers: direct computation of peak values, corresponding times and rate-of-rise and generation of reference envelopes. 1992. Greece.
- D'AJUZ, A., FONSECA, C.F., CARVALHO, F.M.S., et alli. Transitórios elétricos e coordenação de isolamento - Aplicação em sistemas de potência de alta tensão. 1987. Brasil
- CARVALHO, A.C., PUENTE, A.P., FUCHS, A., et alli. Disjuntores e chaves - Aplicação em sistemas de potência. 1995. Brasil.
- COLOMBO, R. A TRT e a TRTI na falta quilométrica - Critérios de normalização e suas solicitações sobre os disjuntores de alta tensão. 1995. Brasil
- ESMERALDO, P.C.V., AMON, F.J., SALGADO, F.M. et alli. Design studies for the Brazilian North-South 500 Kv Ac interconnection. 1998. Brasil
- GEC ALSTHON. Eletronorte - Tucuruí 500kV GIS study of VFT produced by opening and closing operation of disconnectors. 1997. França.
- NORTE SUL ENGENHARIA. Usina Tucuruí - Segunda Etapa - Avaliação da adequação dos disjuntores de 550kV para solicitações do tipo TRT. 1999. Brasil.