



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

GPT - 11  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

**GRUPO II  
GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT**

**EXPERIÊNCIA DA AVALIAÇÃO DOS ESFORÇOS TORSIONAIS NOS EIXOS DAS MÁQUINAS TÉRMICAS  
RESULTANTES DE RELIGAMENTOS TRIPOLARES DE LINHAS DO SISTEMA ELÉTRICO**

**Álvaro J. P. Ramos \* Yendys S. Dantas Antonio F. A. Lima Egberto P. Tavares**

**ANDESA**

**ANDESA**

**ANDESA**

**UFF**

**RESUMO**

O trabalho descreve aspectos metodológicos no que se refere à identificação das condições e eventos mais críticos, modelagem das máquinas e do eixo gerador-turbina(s) no programa ATP para estudos de avaliação de esforços torsionais sobre eixo das máquinas térmicas decorrentes de religamentos tripolares mal sucedidos. São discutidas as dificuldades em se obter, junto aos fabricantes, os dados necessários aos estudos bem como os limites suportáveis de torques nas diversas seções do eixo. Estes estudos são essenciais para subsidiar decisões que compatibilizem os interesses da operação do sistema (ONS) e das empresas de transmissão em manter a prática de religamento tripolar de linhas com os interesses do acessante proprietário das máquinas, em preservar a integridade, a vida útil e as garantias contratuais das mesmas.

São também discutidas medidas de curto e médio prazo a serem implementadas para evitar a ocorrência de esforços excessivos no eixo gerador – turbina(s), tais como religamentos seletivos, religamentos sequenciais, etc.

**PALAVRAS-CHAVE**

Religamento Tripolar, Oscilações Torsionais, Torques Transitórios, Religamentos mal sucedidos.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Religamento tripolar de linhas é uma prática operacional adotada por muitos anos no sistema elétrico brasileiro, especialmente na região Nordeste onde têm sido instaladas unidades de geração térmicas nos recentes anos. Como o sistema elétrico brasileiro era praticamente composto de Usina Hidroelétrica (UHE) os impactos de religamentos tripolares em eixos gerador-turbina não representavam motivos de preocupações uma vez que a estrutura física do eixo das máquinas das UHE apresenta a inércia concentrada principalmente no gerador o que tornam os efeitos torsionais desprezíveis.

Entretanto, com a instalação das primeiras máquinas térmicas no sistema brasileiro, esta prática operacional precisou ser revista. De fato, variações abruptas no torque elétrico do gerador, causado por chaveamentos no sistema elétrico podem resultar em oscilações torsionais do eixo gerador-turbina de grande amplitude. Estas oscilações são geralmente de baixo amortecimento na faixa típica de 10 a 50 Hz. A ocorrência de defeitos trifásicos próximos aos terminais da máquina representa duas variações rápidas de torque elétrico de grande severidade, correspondente a aplicação e remoção do defeito, criando condições prováveis de amplificação dos torques transitórios para valores até 6,0pu.

Como as oscilações torsionais podem levar vários segundos para amortecer, o religamento tripolar da linha onde ocorreu o defeito representa uma manobra de elevado risco para a máquina. Dependendo do instante do

religamento, este chaveamento pode significar uma “injeção” de energia no sistema físico gerador-turbina que experimentará amplificação na amplitude das oscilações de torque podendo atingir valores proibitivos e extremamente perigosos para a integridade física da estrutura do eixo gerador-turbina. Isto é especialmente severo para os casos de religamentos tripolares mal sucedidos, ou seja, o religamento sem que o defeito tenha sido eliminado em linhas próximas à planta térmica. Verifica-se que nestes casos os torques transitórios podem atingir níveis muito superiores aos valores definidos na norma ANSI (2) que constituía a base dos projetos de unidades térmicas.

De fato, ocorrem quatro chaveamentos sucessivos (aplicação do defeito, remoção do defeito, religamento sobre o defeito e segunda remoção de defeito) com uma elevada possibilidade de ocorrência de torques elevados. Estes torques resultam em perda prematura de vida da máquina pelo efeito de fadiga resultante de esforços repetitivos mesmo que de valores inferiores aos limites de ruptura do material ou estrutura mecânica.

## 2.0 - MODELAGEM E SIMULAÇÃO DOS EVENTOS

### 2.1 Comentários Gerais

Alguns autores indicam que análises de torques esforços torsionais podem ser realizados através de programas de estabilidade com a modelagem apropriada das seções do eixo do conjunto gerador/turbinas (1). De fato, alguns programas de estabilidade como o PSS/E do PTI incluem a representação das seções do eixo da máquina através dos clássicos modelos massas-molas-amortecedores. Entretanto esta é uma forma simplificada de análise do problema onde vários efeitos são desprezados e que podem ser essenciais em estudos que requerem um certo nível de detalhe.

A simulação detalhada dos eventos transitórios torsionais deve utilizar programas de simulação de transitórios eletromagnéticos com a representação dinâmica (equações diferenciais) e trifásica da rede elétrica como o ATP – “Alternative Transient Program”, que é o programa utilizado nos estudos aqui apresentados.

### 2.2 Representação da Máquina e do Eixo Gerador-Turbina

As máquinas síncronas cujos eixos são objeto de análise torsional deve necessariamente ser modelada pelo menos com o modelo tipo “59” disponível no ATP. O modelo do eixo do conjunto gerador/turbinas é representado pelo modelo massa-mola-amortecedor também disponível no ATP cujos parâmetros são as inércias das massas e as constantes elásticas entre estas.

O modelo de 12 massas representativo do eixo do conjunto turbina/gerador de um caso real é mostrado na Figura 1. Aqui não são considerados os fatores de amortecimento próprios e mútuos entre as massas de modo que os resultados são conservativos uma vez que as oscilações torsionais não apresentam amortecimento. Embora os valores máximos de torque não sejam afetados por esta premissa, este fato impossibilita uma análise de avaliação de tempo morto necessário para se realizar o religamento de modo que os torques transitórios sejam limitados a valores considerados seguros para a máquina. Em todos os casos estudados pelos autores os fabricantes não forneceram os fatores de amortecimento. As massas indicadas devem corresponder a partes do eixo tais como turbina a gás, compressor, embreagens, gerador, excitatriz, etc. O nível de detalhes e, portanto o número de massas deve ser tal que o modelo seja capaz de reproduzir todas as modos torsionais presentes, em particular aqueles de frequência subsíncronas. A massa correspondente ao rotor do gerador, sobre a qual se aplica o torque elétrico deve ser informada pelo fabricante. Em certos casos, o fabricante representa o gerador por mais de uma massa de forma que o analista não sabe, a priori em qual das massas o torque elétrico é aplicado. Na modelagem utilizada o torque elétrico é aplicado em uma única massa de forma pontual.

Quando o valor da constante de mola entre duas massas é muito elevado e muito maior do que as demais (cinco vezes maior, por exemplo) as duas massas se comportam como se fosse uma única massa rígida. Nestes casos podemos somar as massas assim acopladas e desprezar a constante de mola, reduzindo a ordem do modelo e eliminando um modo de oscilação torsional de alta frequência.

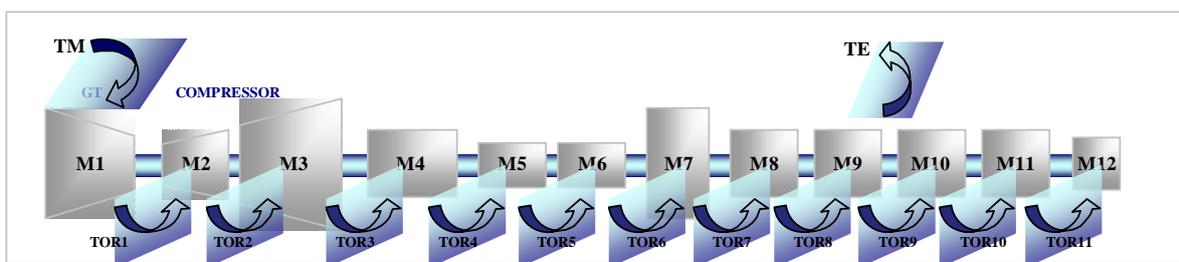


FIGURA 1 – Modelo massa-mola típico de um eixo gerador/turbina de uma UTE a ciclo combinado.

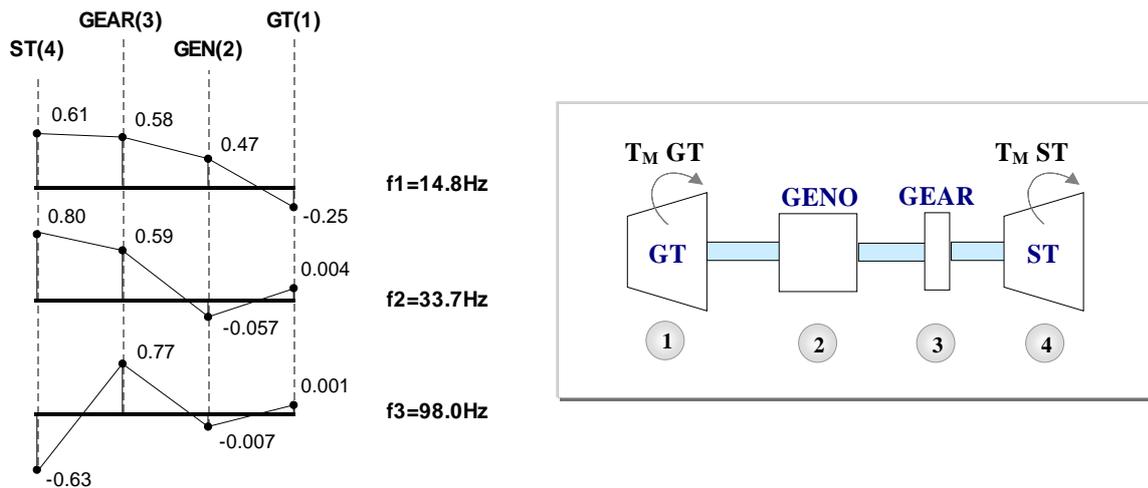


FIGURA 2 – Modelo massa-mola típico de um eixo gerador/turbina de uma UTE a ciclo combinado com a turbina a vapor no mesmo eixo. (1)=turbina a gás; (2)=gerador; (3)=engrenagem; (4)=turbina a vapor.

A Figura 2 mostra um outro modelo, também fornecido pelo fabricante da máquina de apenas 5 massas que reproduzem 3 modos de oscilação mostrados na mesma figura e obtidos por uma análise de autovalores. A Figura 3 mostra um modelo, fornecido pelo fabricante, de um gerador de pequeno porte acionado por um motor a óleo de 16 cilindros. Os torques mecânicos são distribuídos de forma equitativa entre os 16 cilindros. Os modos naturais se situam na faixa de 16,4Hz, 73,8Hz e outros de frequência superiores a 200Hz.

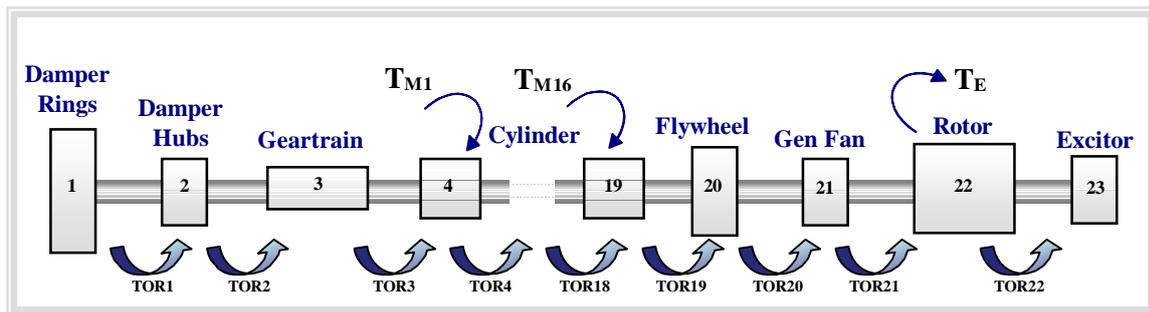


FIGURA 3– Modelo massa-mola típico de um eixo gerador/motor a óleo de 16 cilindros.

### 2.3 Esquemas de Religamentos de Linhas.

A Figura 4 indica os tempos de chaveamento relacionados à ocorrência do defeito ( $t_F$ ), a primeira remoção do defeito ( $t_{CL1}$ ), o religamento mal sucedido ( $t_R$ ) e a remoção final do defeito ( $t_{CL2}$ ). O impacto no torque dependerá do instante de remoção do defeito ( $t_{CL1}$ ) e do religamento ( $t_R$ ) sem sucesso.

Observa-se que nos casos simulados de religamentos mal sucedidos, apenas o primeiro terminal a religar é efetivamente religado uma vez que a proteção desliga a linha antes que o segundo terminal venha a religar. Em algumas situações pode ser importante considerar retardos entre o instante de abertura ( $t_{CF}$ ) de um terminal e do outro da linha em estudo.



FIGURA 4– Seqüência típica de eventos em um dos terminais da linha, para os religamentos mal sucedidos.

Como a seqüência de chaveamentos e os intervalos de tempo envolvidos tem grande influência sobre os resultados é importante que o esquema de proteção e religamento real seja reproduzido com fidelidade. Apesar disto, em face das incertezas dos instantes exatos de fechamento dos pólos dos

disjuntores, é necessário que se faça uma busca das condições mais severas em termos de torques transitórios. Este ponto é crucial neste tipo de estudo e será comentado mais adiante.

### 3.0 - ANÁLISE DOS TORQUES TRANSITÓRIOS

#### 3.1 Curto Circuito nos Terminais da Máquina

Como se sabe, a norma ANSI C50.13-1989 (2) indica que os geradores devem ser capazes de suportar os esforços mecânicos decorrentes de curtos-circuitos nos seus terminais. Supõe-se que este requisito se aplica apenas ao gerador propriamente dito, não envolvendo todo conjunto girante constituído pela turbina/gerador.

Entretanto a probabilidade de ocorrência de curto circuito trifásico nos terminais do gerador é extremamente baixa, de forma que se estima que o mesmo ocorra em número muito reduzido ao longo da vida útil da máquina. Entretanto os defeitos trifásicos em linhas de transmissão, seguidos de religamentos mal sucedidos nas linhas de transmissão têm probabilidade maior e devem ser objeto de avaliação.

Os valores de torques máximos verificados nos casos de curto circuito trifásico nos terminais da máquina podem ser tomados como referência como valores máximos suportáveis pela máquina, embora seja prudente que os limites a serem considerados devam ser definidos pelo fabricante da máquina. A experiência mostra que os torques transitórios devido a religamentos mal sucedidos podem resultar em valores bem superiores aos torques máximos resultantes de curto circuito trifásicos nos terminais da máquina.

A Figura 5 mostra o torque elétrico e torques ao longo do eixo do conjunto gerador-turbina para um curto circuito eliminado em 200ms mantendo-se a máquina conectada ao sistema. O desempenho do torque elétrico mostra uma oscilação de frequência fundamental (60Hz) durante o defeito, amortecendo após a eliminação do mesmo quando predomina a oscilação eletromecânica de frequência um pouco maior do que 1Hz. Esta componente de 60Hz está relacionada a componente DC da corrente de curto. No caso de curto circuito desequilibrado com presença no estator de corrente de seqüência negativa, observa-se no torque elétrico transitório uma componente de 120Hz que reflete o efeito da corrente de seqüência negativa do estator sobre o torque elétrico no rotor que gira em sentido contrário a força magnetomotriz criada pela corrente de seqüência negativa.

A Figura 5 mostra que o torque entre as massas 5 e 6 (TOR 5) contém praticamente apenas o modo de oscilação de frequência aproximadamente 13Hz, tendo uma forma muito próxima de uma senóide. O torque TOR1 (entre as massas 1 e 2) apresenta uma superposição do modo de 13Hz e um outro de frequência mais elevada com menor participação. Para o TOR9 (entre as massas 9 e 10) a superposição de frequências diferentes é evidente, dificultando a identificação de cada modo individual. Para identificar cada modo de oscilação pode-se fazer uso de uma análise de autovalores simples como realizado para o caso da Figura 2.

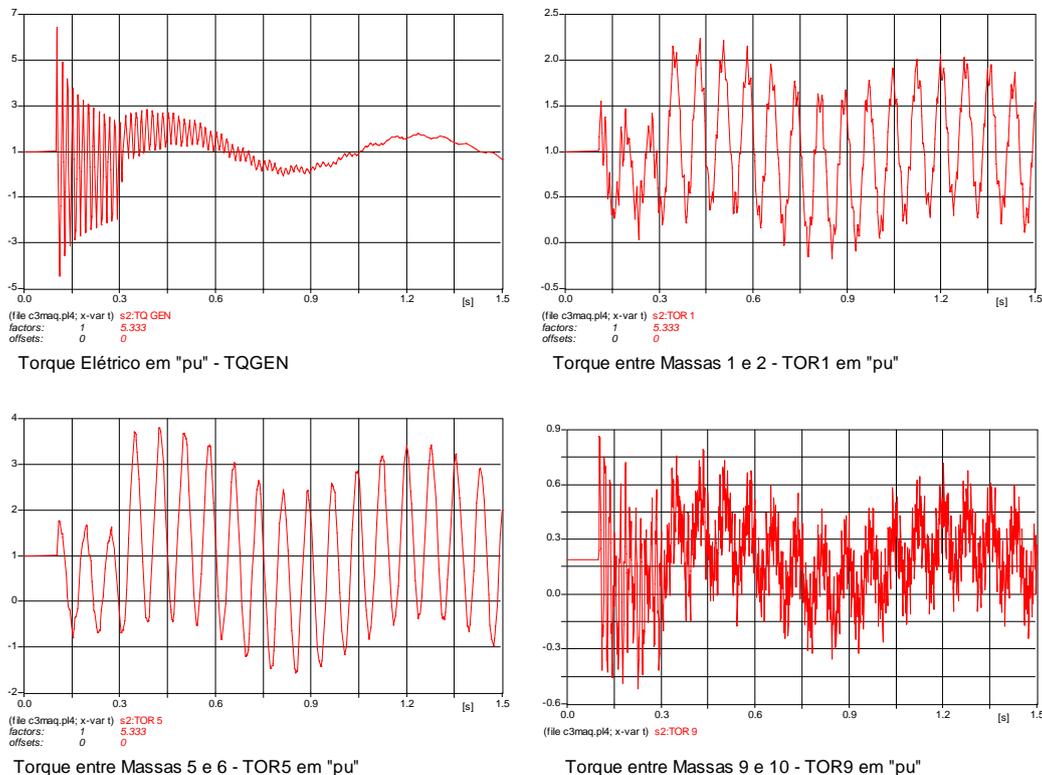


FIGURA 5– Torques transitórios para curto circuito trifásico nos terminais da máquina da Figura 1.

### 3.2 Fatores que Influenciam os Esforços no Eixo

Um estudo de religamento tripolar de linhas para quantificar os torques transitórios no eixo das máquinas térmicas requer conhecer com precisão o esquema de religamento da determinada linha em questão. Isto significa saber os tempos dos eventos como indicados na Figura 4. Entretanto, dada à extrema sensibilidade do comportamento transitório dos torques nas seções do eixo para o instante de religamento, é essencial se investigar variações do tempo de religamento em torno do valor estabelecido que refletem a variabilidade de fechamento dos pólos do disjuntor. Para casos onde os torques transitórios apresentam uma forte predominância de um único modo de oscilação e, portanto com forma de onda bem próxima de uma senóide, é possível aplica-se uma regra simples para pesquisa de caso mais severo como indicado na referência (1). Conforme esta regra, o religamento mal sucedido após um número ímpar de meios períodos da frequência de oscilação torsional irá resultar em amplificação nas amplitudes dos torques. Caso o religamento mal sucedido ocorra após um número par de meio período da oscilação torsional, um efeito de atenuação será verificado.

Em casos onde existem diferentes frequências superpostas, esta regra não é facilmente aplicável de forma que é necessário se fazer uso de chaves com modelagem estatística do instante de fechamento da chave (religamento), considerado como uma variável aleatória. Nos estudos realizados pelos autores, o tempo de religamento foi considerado composto de uma parcela de dispersão dos pólos com distribuição uniforme e desvio padrão de 1,44ms, e uma parcela devida à distribuição em um ciclo de 360°, também com distribuição uniforme. Pelo menos 100 manobras aleatórias de religamentos devem ser realizadas com um tempo de simulação apropriado para se assegurar que os valores máximos dos torques sejam obtidos deste mapeamento. Estas simulações permitiram a determinação dos instantes de fechamento dos pólos da chave de manobra com relação à onda de tensão, que maximizam cada um dos torques das diversas seções do eixo da máquina.

Quando se investiga valores máximos de torques a que as máquinas podem ser submetidas, além das simulações dos esquemas pré-definidos de religamentos, deve também ser consideradas situações mais críticas como o primeiro terminal a religar sendo o mais próximo da máquina sob análise. É evidente que o religamento tripolar das linhas eletricamente mais próximas da máquina representam as condições mais críticas em termos de torques transitórios.

Pela experiência dos autores em vários casos reais, os fabricantes não informam os fatores de amortecimento dos modelos de forma que as oscilações torsionais não apresentam decaimento ao longo do tempo o que impede a investigação da elevação do tempo morto de religamento como medida de mitigação dos torques transitórios.

## 4.0 - ANÁLISE DE CASOS REAIS

### 4.1 Influência do Instante do Religamento

A Figura 6 mostra a simulação de dois casos de religamento quase idênticos com os instantes de religamentos diferindo em apenas 30ms aproximadamente. Observa-se que os torques elétricos são insensíveis a tal variação no tempo de religamento enquanto para os torques mostrados, ocorre amplificação ou atenuação. Em linhas próximas a planta térmica é comum encontrar casos críticos onde o torque atinge valores de 5,0 a 6,0 pu, onde 1,0pu corresponde ao torque de cada seção do eixo quando a máquina está operando nas condições nominais de potência.

Os esquemas de religamento tripolares em linhas próximas à planta térmica devem, dentro do possível ser evitados, pois representam grave risco para o eixo das máquinas. Algumas das medidas de mitigação podem ser adotadas como alternativas descritas mais adiante neste artigo. Estas medidas podem constituir em solução de compromisso que não venha a resultar em prejuízo para a empresa proprietária da linha pela eventual caracterização de indisponibilidade da linha por não dispor de religamento rápido automático.

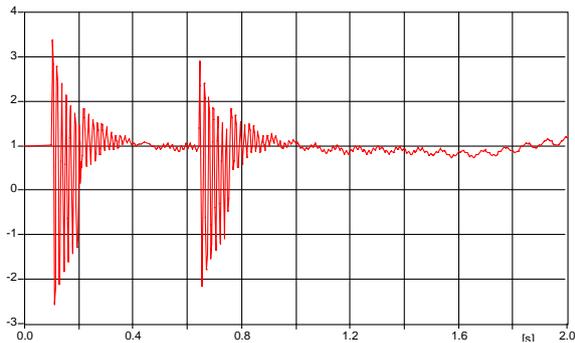
### 4.2 Influência do Religamento em Terminal Remoto

Como esperado, a definição de primeiro terminal a religar como sendo o terminal remoto, ou seja, o terminal da linha mais afastado da planta térmica, pode produzir resultados satisfatórios. A Figura 7 mostra nos gráficos da coluna esquerda o resultado de um religamento mal sucedido no terminal próximo da máquina enquanto no o religamento no terminal remoto é mostrado nos gráficos da coluna direita. É oportuno destacar que quando nos referimos aos termos “1° terminal a religar” na verdade é o único a efetivamente realizar o religamento, uma vez que as proteções de distância desligam novamente a linha antes que o 2° terminal venha a religar. Ademais o esquema de verificação de sincronismo usualmente existente não deverá liberar o religamento do 2° terminal em caso em que o defeito não tenha sido extinto. Esta medida de mitigação é referenciada por alguns autores(3) como “religamento seqüencial”. Esta medida tem efeito reduzido nos casos de linhas curtas e sistemas muito “malhados”, ou seja, com inúmeros outros caminhos paralelos entre os terminais da linha em consideração.

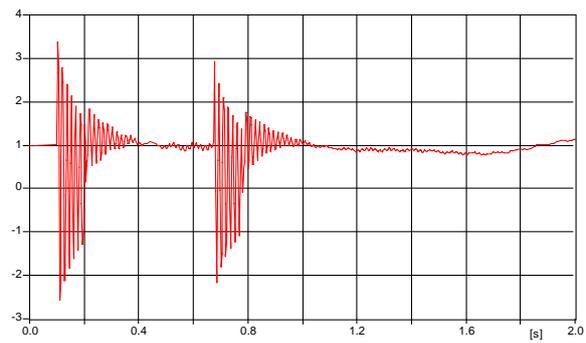
### 4.3 Influência do Tipo de Religamento

Deve ser destacado que o problema aqui tratado está relacionado a religamentos tripolares mal sucedidos quando o defeito que causou o desligamento da linha foi trifásico. Felizmente a grande maioria dos defeitos nas linhas de

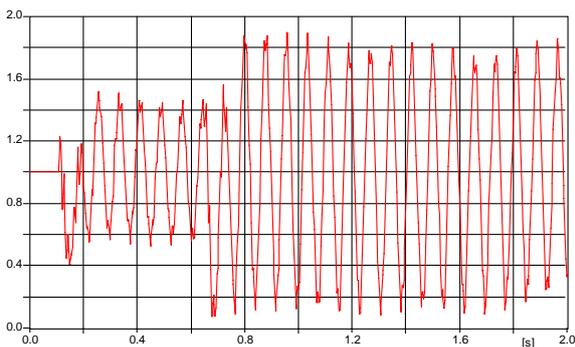
alta tensão é fase-terra de forma que o religamento monopolar nestes casos não causa a torques transitórios elevados que necessite uma análise detalhada. É preciso ficar atento para linhas com religamento monopolar ativado que pode religar as três fases quando o defeito for trifásico, o que representa a mesma situação de risco do religamento tripolar. Assim sendo, quando possível, o religamento monopolar deve ser adotado como primeira alternativa pelo menos para linhas próximas de plantas térmicas, desde que não religuem para defeitos trifásicos. A dificuldade desta alternativa é para linhas existentes onde as cadeias de proteção ou disjuntores não apresentam recursos para religamento monopolar. Em alguns casos pode ser viável implementar na cadeia de proteção procedimentos que assegurem que o religamento da linha só é autorizado se o curto circuito que deu origem ao desligamento da linha tenha envolvido apenas uma fase. Esta alternativa, também designada como “religamento seletivo” é muito interessante considerando que curtos circuitos trifásicos em linhas de alta tensão, acima de 230kV representam um percentual inferior a 5% do total de defeitos.



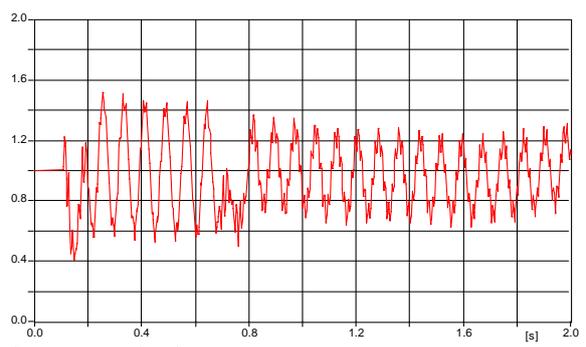
Torque Elétrico em "pu" - TQGEN



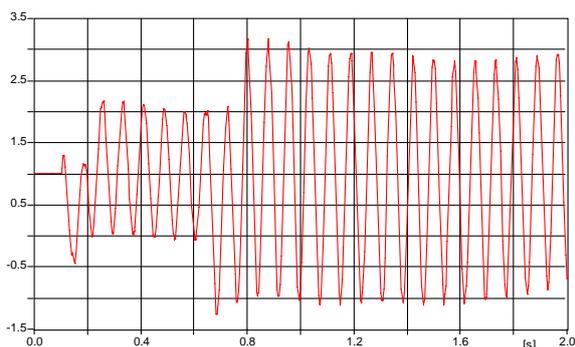
Torque Elétrico em "pu" - TQGEN



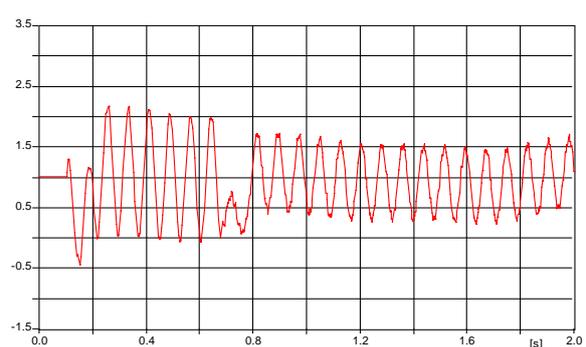
Torque entre Massas 1 e 2 - TOR1 em "pu"



Torque entre Massas 1 e 2 - TOR1 em "pu"

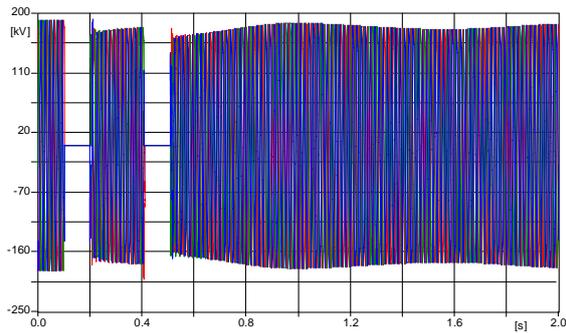


Torque entre Massas 5 e 6 - TOR5

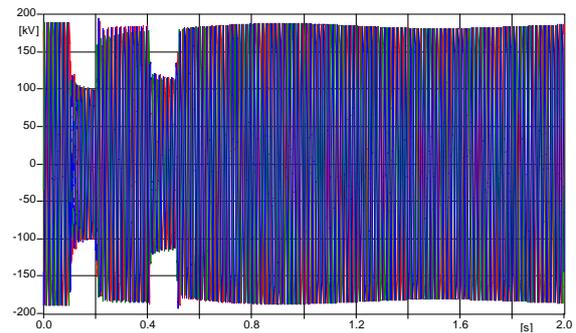


Torque entre Massas 5 e 6 - TOR5

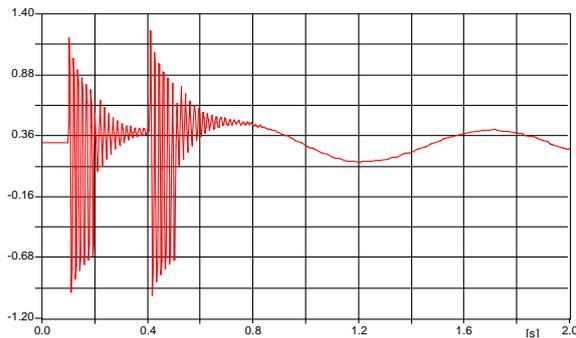
FIGURA 6– Torques transitórios para casos de religamentos mal sucedidos com tempos de religamentos diferindo em 30ms.



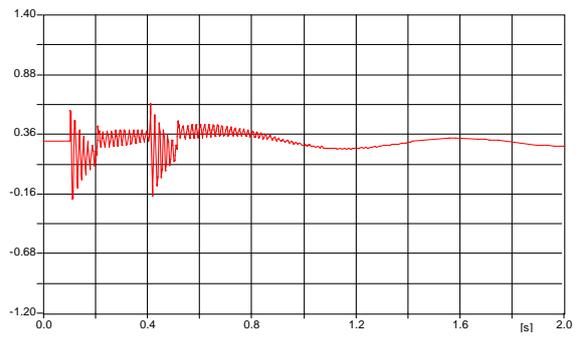
Forma de onda das tensões VA, VB e VC



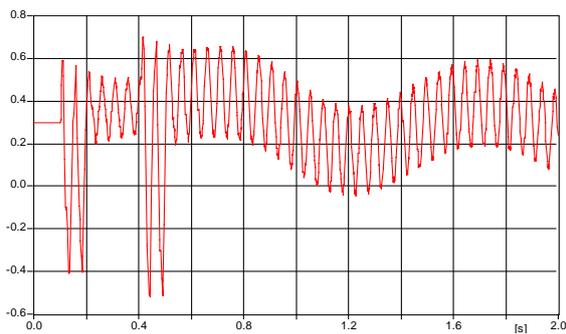
Forma de onda das tensões VA, VB e VC



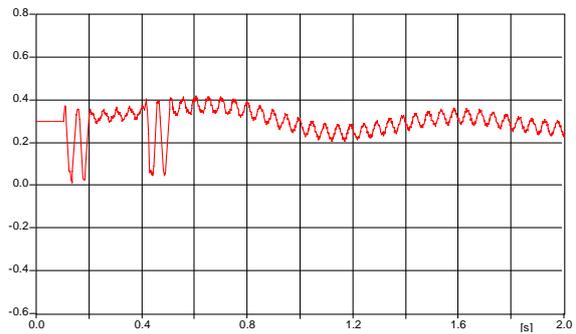
Torque Elétrico - TQGEN



Torque entre Massas 1 e 2 - TOR1 em "pu"



Torque entre Massas 4 e 5 - TOR4



Torque entre Massas 5 e 6 - TOR5

FIGURA 7– Torques transitórios para casos de religamentos mal sucedidos em terminais distintos da linha (coluna esquerda=terminal lado da UTE; coluna direita=terminal remoto).

## 5.0 - ALTERNATIVAS DE MITIGAÇÃO

A seleção das melhores alternativas de mitigação dos esforços torsionais sobre as seções dos eixos das plantas térmicas dependerá de cada situação em particular e dos recursos disponíveis nas cadeias de proteção. As situações mais críticas são aquelas em que se instala uma UTE numa área onde as linhas existentes são antigas com disjuntores e cadeias de proteção antigos que não têm os recursos de controle modernos exigidos pelos Procedimentos de Rede - Módulo 2.5. Nestes casos torna-se difícil encontrar soluções de baixo custo e de implantação em curto prazo, considerando que eliminar simplesmente o religamento tripolar irá degradar a confiabilidade do sistema e pode implicar em penalidades para a empresa de transmissão.

Embora a eficácia das alternativas abaixo indicadas devam ser avaliadas por estudo específico e acordadas com o fabricante da máquina, podemos enumerar as recomendações seguintes:

- 1) Eliminar o religamento – esta alternativa é raramente aceitável pelos motivos já comentados. Em casos de vários circuitos em paralelos em que se comprove não haver perda de confiabilidade para o sistema esta alternativa poderá eventualmente ser negociada principalmente para linhas próximas a UTE e cujo religamento tripolar possa resultar em graves riscos para a máquina.

- 2) Elevar o tempo de religamento (tempo morto) – é uma alternativa eficaz utilizar intervalo de tempo necessário para que o transitório torsional tenha amortecido suficiente antes do religamento. A dificuldade reside no fato em que os modelos disponibilizados pelos fabricantes não indicam fatores de amortecimento impossibilitando este tipo de análise através das simulações. Caso modelos apropriadamente confiáveis incluam os fatores de amortecimento, as simulações indicarão o tempo morto mínimo para limitar os torques transitórios a valores aceitáveis. O ajuste do tempo morto é geralmente facilmente implementado mesmo nas cadeias de proteção antigas.
- 3) Religamento Sequencial – não havendo restrições de outra natureza, esta medida deve ser sempre adotada para reduzir os torques transitórios mesmo quando os mesmos são aceitáveis, pois assim se preserva a vida útil da máquina reduzindo os efeitos de fadiga pelos impactos repetitivos;
- 4) Religamento Seletivo – enquanto as medidas anteriores são normalmente factíveis em curto prazo e a baixos custos, o religamento seletivo exigirá modificações e investimentos na cadeia de proteção, a não ser que se trata de cadeias de proteção modernas onde estes procedimentos sejam facilmente adotados. Em cadeias de proteção antigas, com relés tipo eletromecânico, estes procedimentos podem ser inviáveis requerendo a troca total da cadeia, o que representa custo e prazo para a sua concretização.

## 6.0 - CONCLUSÕES

Embora a incidência de curtos circuitos trifásico nas linhas de alta tensão (acima de 230kV) seja normalmente inferior a 5% do total de defeitos, a possibilidade de ocorrência religamento tripolar sem que o defeito tenha sido extinto pode representar um grave risco para as máquinas térmicas principalmente aquelas que se situam eletricamente próxima à linha considerada. Assim sendo, a adoção de esquemas de religamento tripolar ou monopolar não seletivo para linhas próximas às unidades de geração térmica deve ser analisada com precaução. Tais análises devem contar com dados e modelos apropriadamente realistas, fornecidos pelo fabricante da máquina que deve também se pronunciar sobre os níveis máximos de esforços obtidos nos estudos. A experiência tem revelado resistência dos fabricantes em fornecer dados técnicos detalhados e mais ainda, de informar limites máximos de suportabilidade do eixo do conjunto gerador - turbinas. Esta é uma questão delicada e complexa uma vez que, mesmo esforços abaixo dos limites de suportabilidade podem, cumulativamente, promover um processo de fadiga que venha a comprometer a vida útil da máquina.

Para linhas de transmissão novas este problema não deverá ser motivo de preocupação uma vez que os Procedimentos de Rede, Submódulo 2.5 estabelece a exigência de que os esquemas de religamentos de linhas devam ter meios de realizar os religamentos automáticos apenas quando da ocorrência de defeitos fase – terra. O uso deste recurso para as linhas indicadas nos estudos como críticas, elimina os riscos de esforços elevados sobre o eixo das unidades térmicas.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) J. M. Undrill, L. H. Hannett, "Turbine-Generator Impact Torque in Routine and Fault Operations", Paper and discussions. IEEE, TRANS on PAS, Vol. PAS-98, N0 2, March/April 1979.
- (2) ANSI C50.13-1989, American National Standard for Rotating Electrical Machinery – Cylindrical-Rotor Synchronous Generators.
- (3) C. E. J. Bowler, F. G. Brown, D. N. Walker, "Evaluation of the Effect of Power Circuit Breaker Reclosing Practices on Turbine-Generator Shafts", IEEE, TRANS on PAS, Vol. PAS-99, No 5, Sept/Oct. 1980.