



GRUPO X

**SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO (GSC)**

**EXPERIÊNCIA DA CEMIG NA ANÁLISE DE TENSÕES DE RESTABELECIMENTO TRANSITÓRIAS  
ASSOCIADAS ÀS FALTAS ALIMENTADAS POR TRANSFORMADORES**

Luiz H. S. Duarte \*  
CEMIG

Angélica C. O. Costa  
CEMIG

Sebastião O. Moreira  
CEMIG

Laís A. F. Oliveira  
CEMIG

**RESUMO**

Este artigo apresenta os estudos de transitórios desenvolvidos pela CEMIG para se determinar os parâmetros da tensão de restabelecimento transitória (TRT) de disjuntores 242kV, considerando a eliminação de faltas alimentadas por transformadores. Esses parâmetros são determinados principalmente pela resposta em frequência do transformador, e, portanto, a idéia principal deste artigo é a representação com a maior exatidão possível de transformadores associados com disjuntores. TRT calculadas a partir de diferentes modelos são apresentadas, comparadas e discutidas. Para o caso exemplo, as ações e os critérios para a definição da TRT a ser especificada, visando obter a devida confiabilidade operativa, são apresentados.

**PALAVRAS CHAVES**

Tensão de restabelecimento transitória – Disjuntor – Falta alimentada por transformador – Modelagem de transformadores

**1.0 – INTRODUÇÃO**

A Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, no estado de Minas Gerais, possui uma capacidade instalada de 6012MW e um sistema de transmissão em extra-alta tensão que inclui 30 subestações e aproximadamente 5000km de linhas de transmissão de 230kV a 500kV.

Estudos desenvolvidos pela área de planejamento da CEMIG apontaram a necessidade de conectar um extenso e fraco sistema de subtransmissão, localizado na região noroeste de Minas Gerais, à Usina Hidroelétrica de Irapé recentemente construída, visando melhorar o controle de tensão na respectiva área. Adicionalmente, essa interconexão deveria prover condições para o aumento do consumo de energia na região. Portanto, uma nova subestação, SE Araçuaí 2, foi planejada com as seguintes características técnicas e componentes principais: banco de autotransformadores 230/138kV-13.8kV, 225MVA, interligação através de uma LT 230kV para a SE Irapé, e duas LT 138kV conectando o sistema de subtransmissão existente na região noroeste. A Figura 1 apresenta um diagrama das interconexões citadas e a Figura 2 apresenta o diagrama esquemático das subestações Irapé e Araçuaí 2.

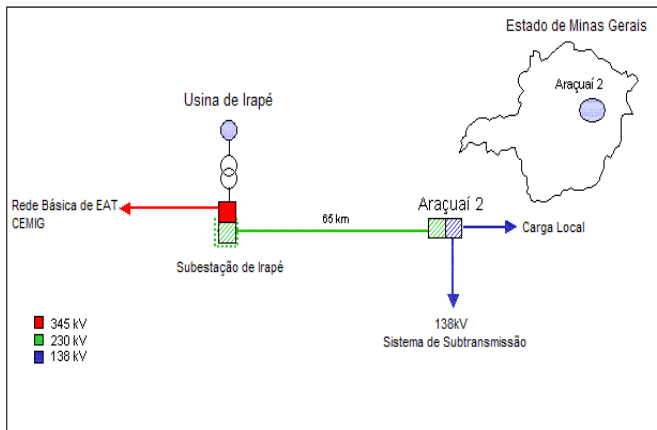


Figura 1 – Interconexões da SE Araçuaí 2

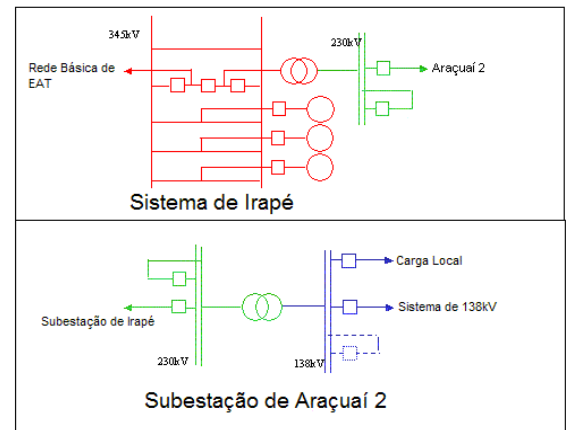


Figura 2 – SE Irapé e SE Araçuaí 2

Como pode ser observado, os disjuntores 242kV das subestações Irapé e Araçuaí 2 são conectados diretamente a jusante de autotransformadores, sem um valor apreciável de capacitância, e obviamente, tem como função principal eliminar faltas limitadas pelos equipamentos a montante. Embora a magnitude da corrente dessas faltas alimentadas por transformadores seja apenas uma fração da capacidade de interrupção dos disjuntores, as respectivas condições de TRT podem ser mais severas que aquelas associadas com os maiores níveis de correntes de falta (1) (2), em particular devido às taxas de crescimento da TRT (TCRT). A condição de falta denominada alimentada por transformador é mostrada na Figura 3 (3).

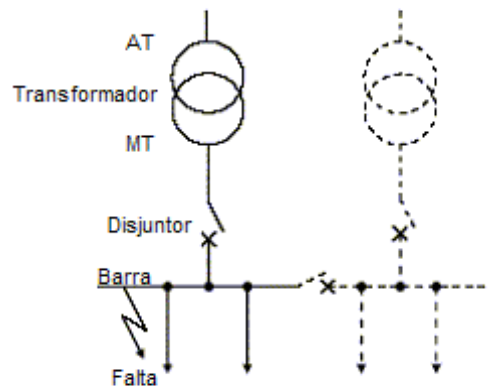


Figura 3 - Falta alimentada por transformador

Nesses casos, a modelagem do transformador deveria possuir a maior exatidão possível, pois a sua resposta em frequência é a característica dominante para a determinação dos parâmetros de TRT. Infelizmente, informações detalhadas sobre o modelo de transformadores para as frequências tipicamente encontradas em estudos de transitórios não são normalmente disponíveis. Alguns estudos encontrados na literatura assumem que a resposta do transformador é predominantemente de frequência única e, dessa forma, representam o transformador por um circuito equivalente de frequência singular. A partir dessas considerações, a CEMIG obteve, através do fabricante, modelos mais apropriados para os autotransformadores das subestações Irapé e Araçuaí 2, visando aperfeiçoar os cálculos e análise das TRT.

Os resultados dos estudos de transitórios motivaram uma aferição e melhor determinação dos requisitos previamente especificados, o que será discutido nos itens seguintes.

## 1.0 – SISTEMA DE POTÊNCIA ESTUDADO

O sistema equivalente considerado para os estudos da TRT foi obtido a partir dos dados de fluxo de potência e curto-circuito disponibilizados pelo ONS para o ano de 2007. A área estudada inclui a rede interligada da CEMIG de 345, 230 e 138kV da região nordeste de Minas Gerais. Fontes equivalentes e interligações geradas pelo

programa para cálculo de curto-circuito ASPEN Oneliner (4) representam a parte do sistema não modelada. A Figura 4 mostra o sistema equivalente modelado para os estudos de TRT.

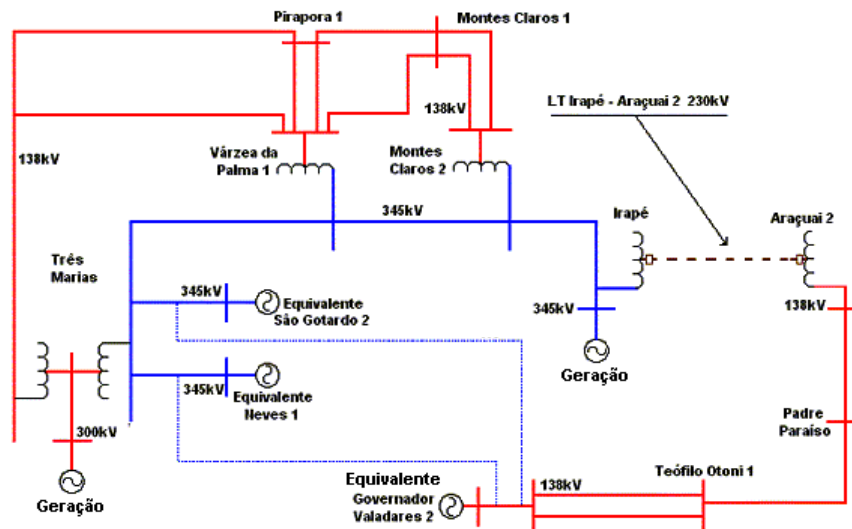


Figura 4 – Sistema equivalente para os estudos de TRT

### 3.0 – METODOLOGIA E MODELOS PARA OS ESTUDOS TRANSITÓRIOS

#### 3.1 - Metodologia de estudo

Os estudos de transitórios foram desenvolvidos utilizando-se o programa ATP (Alternative Transient Program) (5) de acordo com a metodologia abaixo:

- Aferição da exatidão dos modelos através de comparação entre as correntes de falta monofásicas e trifásicas do sistema em análise obtidas através dos programas ASPEN Oneliner (4) e ATP (5).
- Avaliação dos parâmetros de TRT para faltas trifásicas e bifásicas, aterradas ou não, faltas fase-terra na LT Araçuaí 2 – Irapé, em ambos os terminais.
- Avaliação dos parâmetros de TRT para faltas quilométricas ocorrendo a 2Km dos terminais das SE's Irapé e Araçuaí 2. Essa distância foi determinada visando-se obter uma corrente de curto-circuito igual a 90% da corrente de curto-circuito terminal, o que é coberto pela norma brasileira pertinente (6).
- Considera-se que as correntes de falta atingem a condição simétrica antes da interrupção.
- O sistema é considerado sob condições normais de operação com máxima tensão operativa.

#### 3.2 - Modelos para o programa ATP

Os modelos considerados para os estudos do sistema através do ATP foram os seguintes:

##### Autotransformadores:

- Os autotransformadores das SE's Irapé e Araçuaí 2 são modelados como malhas, representando-se as partes dos enrolamentos como elementos de circuitos elétricos. As capacitâncias, indutâncias e resistências próprias e de acoplamento são modeladas por circuitos "II". As resistências são calculadas e consideradas para a frequência de 25kHz. A Figura 5 apresenta o modelo dos enrolamentos de um dos autotransformadores de maneira simplificada.

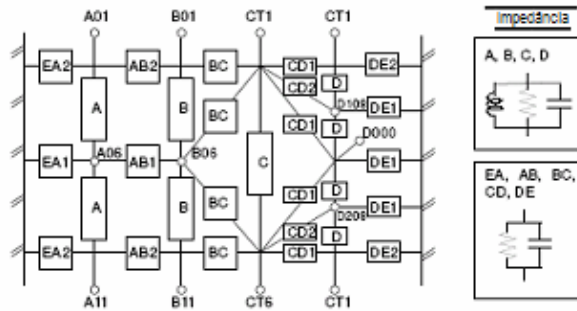


Figura 5 – Circuito elétrico equivalente dos enrolamentos

- O modelo de transformador do programa ATP é utilizado para os demais transformadores através de capacitâncias concentradas para a terra representando as capacitâncias dos enrolamentos. Para fins de comparação de resultados obtidos para diferentes modelos de transformadores, os autotransformadores das SE's Araçuaí 2 e Irapé são também simulados utilizando-se o modelo do ATP com capacitâncias concentradas dos enrolamentos de 2 e 4 nF, respectivamente.

#### Linhas de transmissão:

- Modelo de linhas de transmissão de parâmetros distribuídos (Bergeron)

#### Fontes:

- Unidades geradoras são representadas pela fonte tipo 14 do ATP, 60Hz, associadas com impedâncias subtransitórias.
- As extremidades da área de estudo são representadas por fontes equivalentes, tipo ATP 14, associadas com de impedâncias próprias e de transferência calculadas conforme (5).

#### Cargas:

- Circuitos equivalentes com parâmetros R, L, C concentrados e conectados ao sistema de 138kV.

#### Disjuntores:

- Os disjuntores são modelados como chaves determinísticas.

#### Barramentos:

- Os barramentos são modelados como capacitâncias concentradas com valores típicos de 7nF/km (para as fases externas) e 5.8nF/km (para a fase central).

## 4.0 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

A tensão e a capacidade de interrupção em curto-circuito nominais dos disjuntores das SE's de Irapé e Araçuaí 2 são 242kV e 40kA. Considerando a expectativa da corrente de curto-circuito desse sistema não ultrapassar 12kA (30% de 40kA) no horizonte de planejamento, adotam-se os valores estabelecidos em (6) para disjuntores 242kV para a seqüência de ensaio T30, na análise dos resultados. Para faltas quilométricas, os limites são calculados considerando-se as características do disjuntor e seguindo-se a metodologia apresentada no Anexo A de (6). A Tabela 1 apresenta os limites considerados para as faltas terminal e quilométrica.

Tabela 1 – Critério de Avaliação (6)

Tipo de falta	Tensão nominal	Parâmetros de TRT					
		Primeira tensão de referência	Tempo	TRT Valor de pico	Tempo	Tempo de retardo	TCTRT
		$U_1$ (kV)	$t_1$ ( $\mu$ s)	$U_c$ (kV)	$t_2$ ( $\mu$ s)	$t_d$ ( $\mu$ s)	$U_1/t_1$ (kV/ $\mu$ s)
Quilométrica	242	31,68	4,6	269,28	297,0		7,2
Terminal	245	-	-	400,00	80,0	12	5,0

Os resultados relativos aos estudos de caso mais críticos são apresentados nas Tabelas 2 e 3 para as os disjuntores das SE's Irapé e Araçuaí 2, respectivamente. Foram considerados os dois modelos adotados nas simulações para os autotransformadores, ou seja, o modelo específico obtido através do fabricante e o modelo do programa ATP em conjunto com uma capacitância equivalente concentrada, representando a capacitância dos enrolamentos.

Tabela 2 – TRT dos disjuntores 242kV da SE Irapé

Modelo do autotransformador	Tipo de falta	Parâmetros de TRT						
		Primeira tensão de referência	Tempo	TRT Valor de pico	Tempo	Tempo de retardo	TCTRT	
		$U_1$ (kV)	$t_1$ ( $\mu$ s)	$U_c$ (kV)	$t_2$ ( $\mu$ s)	$t_d$ ( $\mu$ s)	$U_1/t_1$ (kV/ $\mu$ s)	
Capacitância concentrada 4nF	Terminal	3 $\emptyset$ aterrada	119,0	41	184,0	1.157	4	2,90
		1 $\emptyset$	129,0	42	200,0	1.195	5	3,00
		2 $\emptyset$ não aterrada	116,0	42	231,0	1.282	3	3,00
		3 $\emptyset$ não aterrada	137,0	42	266,0	1.304	4	3,20
	Quilométrica	3 $\emptyset$ aterrada e a 2 km	119,0	48	187,0	1.181	3	3,00
Fabricante	Terminal	3 $\emptyset$ aterrada	185,6	70	188,0	234	4	2,60
		1 $\emptyset$	184,0	87	187,0	243	4	2,10
		2 $\emptyset$ não aterrada	190,0	92	224,5	764	5	2,05
		3 $\emptyset$ não aterrada	207,0	76	233,0	731	4	2,70
	Quilométrica	3 $\emptyset$ aterrada e a 2 km	186,0	72	189,0	243	4	2,60

Tabela 3 – TRT dos disjuntores 242kV da SE Araçuaí 2

Modelo do autotransformador	Tipo de falta	Parâmetros de TRT						
		Primeira tensão de referência	Tempo	TRT Valor de pico	Tempo	Tempo de retardo	TCTRT	
		$U_1$ (kV)	$t_1$ ( $\mu$ s)	$U_c$ (kV)	$t_2$ ( $\mu$ s)	$t_d$ ( $\mu$ s)	$U_1/t_1$ (kV/ $\mu$ s)	
Capacitância concentrada 2nF	Terminal	3 $\emptyset$ aterrada	75,0	135	162	1.986	4	0,60
		1 $\emptyset$	66,0	106	176	2.101	4	0,62
		2 $\emptyset$ não aterrada	80,5	118	219	1.098	5	0,68
		3 $\emptyset$ não aterrada	115,0	170	193	2.041	3	0,68
	Quilométrica	3 $\emptyset$ aterrada e a 2 km	80,0	137	168	2.032	2	0,60
Fabricante	Terminal	3 $\emptyset$ aterrada	187,0	69	187	69	3	2,70
		1 $\emptyset$	177,0	64	177	64	3	2,80
		2 $\emptyset$ não aterrada	147,0	52	248	676	4	2,80
		3 $\emptyset$ não aterrada	197,0	67	225	670	3	2,90
	Quilométrica	3 $\emptyset$ aterrada e a 2 km	197,0	72	225	664	3	2,70

Dentro das expectativas, existem diferenças significativas entre os parâmetros de TRT calculados para os dois modelos dos autotransformadores, especialmente para os valores das TCTRT. Para os disjuntores da SE Irapé, os resultados tendem a ser mais severos adotando-se o modelo do programa ATP/capacitância concentrada, embora o tempo para se atingir o valor de pico da TRT ( $t_r$ ) é bem menor para os cálculos efetuados com o modelo do fabricante. Os parâmetros de TRT para os disjuntores da SE Araçuaí 2 tem um comportamento oposto, com altos valores de TCTRT para os cálculos efetuados com o modelo do fabricante. As figuras de 6 a 9 mostram as TRT de alguns casos apresentados nas Tabelas 2 e 3.

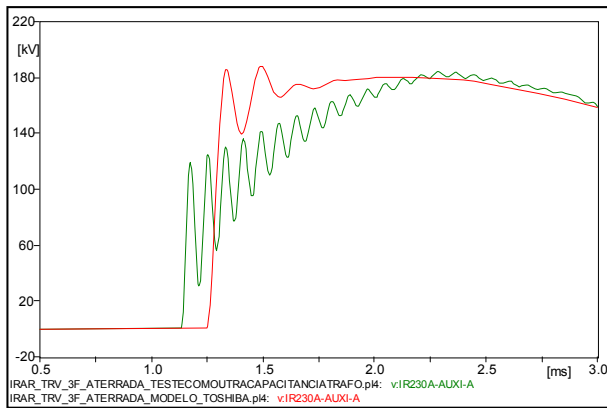


Figura 6 - TRT SE Irapé - Falta 3Ø aterrada

NOTA: Vermelho: modelo do fabricante

Verde: modelo de capacitância concentrada

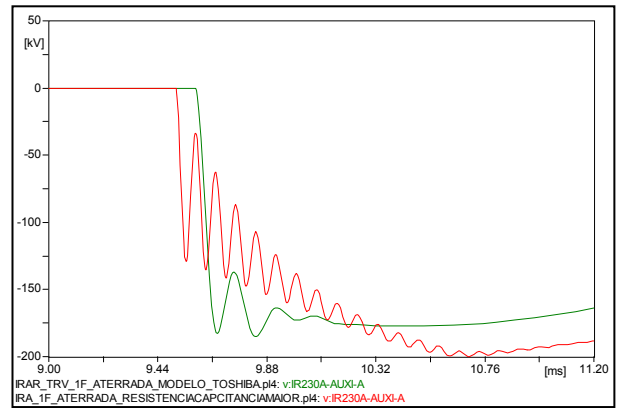


Figura 7 - TRT SE Irapé - Falta 1Ø

NOTA: Vermelho: modelo do fabricante

Verde: modelo de capacitância concentrada

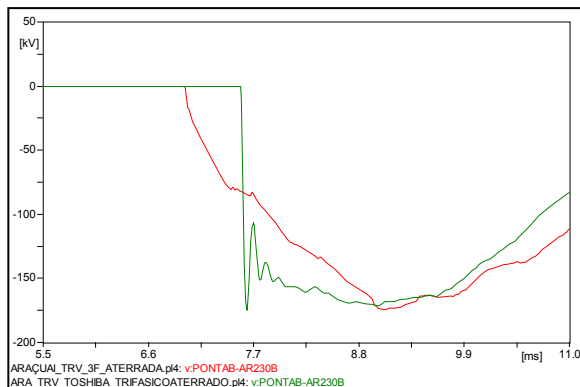


Figura 8 - TRT SE Araçuaí 2 - Falta 3Ø aterrada

NOTA: Vermelho: modelo de capacitância concentrada

Verde: modelo do fabricante

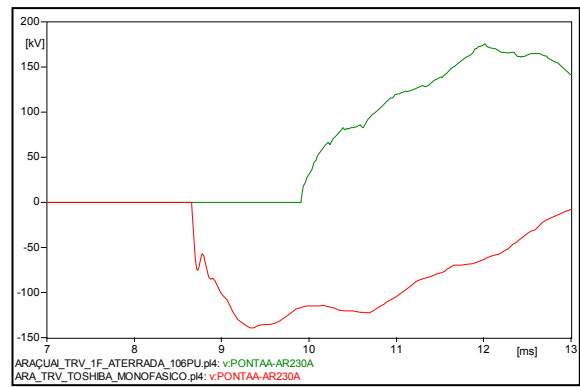


Figura 9 - TRT SE Irapé - Falta 1Ø

NOTA: Vermelho: modelo do fabricante

Verde: modelo de capacitância concentrada

Os valores de TRT e TCTRT encontrados para todos os casos estão abaixo dos valores normalizados. Para alguns casos (destacados na Tabela 3), o tempo de retardo ( $t_d$ ) está abaixo, ou seja, mais severo que o valor normalizado ( $12\mu s$ ) apresentado na Tabela 1. Para a aplicação específica, essa informação foi repassada para o fabricante dos disjuntores para avaliação da necessidade de algum procedimento especial considerando-se as características do equipamento e os ensaios de tipo previstos e/ou já realizados.

Como a TRT e a TCTRT para faltas alimentadas por transformadores são dependentes da resposta em frequência desses transformadores, os valores calculados através dos modelos do fabricante são considerados mais exatos. Nos casos onde esses modelos não são disponíveis, pode-se calcular uma capacitância concentrada equivalente baseada na resposta em frequência do transformador. Essa alternativa se mostra adequada quando o transformador em questão já se encontra em operação e, portanto, essa informação pode ser facilmente obtida através de medições.

## 5.0 – ESPECIFICAÇÃO DOS DISJUNTORES E AUTOTRANSFORMADORES

O projeto e implantação da interconexão anteriormente mencionada foram contratados em regime *turn-key*, ou seja, o fornecedor foi responsável pela aquisição dos autotransformadores, disjuntores, etc., tendo como premissa o atendimento das especificações técnicas da CEMIG.

Considerando as características de falta alimentada por transformadores, a CEMIG decidiu especificar parâmetros preliminares para os disjuntores 242kV, os quais deveriam ser confirmados ou revisados a partir dos resultados dos estudos específicos de transitórios que levariam em conta os autotransformadores em fornecimento. Complementarmente, a especificação técnica dos autotransformadores requereu o desenvolvimento de modelos adequados para estudos de fenômenos de alta frequência.

Na prática, a CEMIG determinou o necessário entre o usuário e os fabricantes dos equipamentos visando obter uma especificação confiável e que também contemplasse a interação entre os autotransformadores, disjuntores e o respectivo sistema elétrico. Nesse contexto, os estudos transitórios para cálculo da TRT foram desenvolvidos pela CEMIG objetivando-se a determinação de parâmetros definitivos a serem atendidos pelo fabricante dos disjuntores.

A metodologia adotada pela CEMIG mostrou-se efetiva quanto ao propósito de se obter resultados mais exatos e confiáveis no que se refere aos estresses transitórios impostos aos disjuntores. Agregou-se, ainda, a requerida garantia de performance concedida pelos fornecedores. Essa metodologia está aderente ao adendo 2 da norma IEC 62271-100, que contempla casos especiais de TRT, tais como faltas alimentadas por transformadores.

## 6.0 – CONCLUSÃO

O artigo apresenta os estudos de transitórios desenvolvidos pela CEMIG para determinação dos parâmetros da tensão de restabelecimento transitória (TRT) dos disjuntores 242kV no que se refere às faltas alimentadas por transformadores, o que se tornaram subsídios para a consolidação da especificação técnica.

Os resultados obtidos a partir de diferentes modelos de autotransformadores confirmam que a respectiva resposta em frequência é a característica dominante na determinação dos parâmetros de TRT. Portanto, recomenda-se modelar os transformadores com a melhor exatidão possível a fim de se obter resultados confiáveis.

Para os disjuntores 242kV da SE Araçuaí 2, a TCTRT calculada foi mais severa nos casos onde se utilizou o modelo do autotransformador desenvolvido pelo fabricante, o qual mostrou-se mais apropriado para as faixas de frequências envolvidas. Para a SE Irapé, o modelo de capacitâncias concentradas típicas implicaram maiores valores de TCTRT. O modelo desenvolvido pelo fabricante do autotransformador foi considerado mais confiável para a avaliação em questão, permanecendo os parâmetros dentro dos valores normatizados, excetuando-se os tempos de retardo.

Essa investigação, considerando-se um modelo mais exato dos autotransformadores para a consolidação da especificação técnica, permitiu uma solução sob medida, evitando-se a possibilidade de adquirir equipamentos inapropriados (super ou sub-dimensionados).

A interação entre os fabricantes de disjuntores e transformadores de potência não é muito usual durante o processo de aquisição. Dessa forma, o caso analisado requereu um empenho adicional da CEMIG no sentido de coordenar as atividades de engenharia nesse projeto. Por outro lado, essa inovação foi uma excelente oportunidade para aprimorar os conhecimentos da CEMIG no “estado-da-arte” de considerar a interação entre transformadores, disjuntores e sistema elétrico para aplicação em projetos futuros.

## 7.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) CIGRÉ. A Review of transformer TRV condition – Electra, nº 102. CIGRÉ – França.
- (2) HAMER, H., RODRIGUEZ, J. Transient recovery voltage associated with power- system three-phase transformer secondary faults; IEEE Winter Meeting, Nova York, Estados Unidos.
- (3) DUFURNET, D., BOSMA, A., TRAPP, N. Treatment of Extreme stresses on high-voltage circuit-breakers in IEC 62271-100 – Bienal Cigré; CIGRÉ – França.
- (4) ADVANCED SYSTEMS FOR POWER ENGINEERING – Aspen Oneliner v10.3.
- (5) LEUVEN EMTP CENTER, ATP - Alternative Transient Program - Rule Book, Herverlee. Bélgica.
- (6) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Equipamentos de alta-tensão Parte 100: Disjuntores de alta tensão de corrente alternada - ABNT – NBR IEC 62271-100. Brasil.