



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

CB/GSE/21

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO-VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE EM CICLOS DUPLO E TRIPLO DE
RELIGAMENTOS PARA AUMENTO DE DISPONIBILIDADE DE ATIVOS**

**Dalton F. Guedes Filho (*)
CHESF**

**Heldemarcio Leite Ferreira
CHESF**

**Flávio E. Spressola
GE**

**Rodrigo G. de Oliveira
GE**

**Fernando Moreira Lagos
GE**

**Túlio Sallum de Carvalho
GE**

RESUMO

É apresentado neste trabalho o resultado de um estudo de resposta transitória de Transformadores de Corrente – TC, classe P conforme [1], especificados pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – Chesf com carga superior às necessidades reais de projeto, em situações de curtos-circuitos assimétricos com religamentos automáticos sem sucesso de linhas de transmissão em 500 kV. Para comparação, a mesma avaliação é feita com TC classe TPY.

Também é mostrado que simplesmente majorar a carga especificada do TC considerando classe P pode levar a equívocos para curtos-circuitos assimétricos. Por fim, é apresentado o comportamento do TPY em um ciclo triplo de religamento.

PALAVRAS-CHAVE

Transformador de Corrente, classe P, TPY, desempenho transitório, Especificação Técnica

1.0 - INTRODUÇÃO

Em sistemas elétricos de potência - SEP que estão sujeitos às regras e aos preceitos da rede básica do sistema interligado nacional, especial atenção deve ser dada aos aspectos relacionados à confiabilidade e à disponibilidade dos ativos que concorrem para a correta operação desse sistema. Neste contexto, o presente trabalho enfoca os Transformadores para Instrumentos - TI, que são equipamentos essenciais para a realização das funções de medição e proteção de sistemas elétricos de potência. Uma vez que o mau funcionamento desses transformadores pode acarretar prejuízos à concessionária dos serviços de energia ou a terceiros, podendo inclusive resultar em danos materiais ou pessoais.

O Transformador de Corrente - TC, em conjunto com o Transformador de Potencial - TP, são os equipamentos responsáveis pela alimentação de toda a cadeia de proteção e controle do SEP. A confiabilidade, segurança, proteção e disponibilidade das instalações elétricas são completamente dependentes da resposta destes equipamentos. Esses equipamentos precisam reproduzir, com exatidão adequada, nos seus terminais secundários, valores proporcionais da grandeza elétrica imposta ao seu primário, seja a corrente no caso de TC ou a tensão em se tratando de TP, nas mais diversas solicitações impostas pelo SEP, em regime permanente ou durante fenômenos transitórios.

(*) Rua Delmiro Gouveia, n° 333 – sala 218 - Bloco D – CEP 50761-901, Recife, PE – Brasil
Tel: (+55 81) 3229-3088 – Fax: (+55 81) 3229-3269 – Email: daltonf@chesf.gov.br

A norma [1] prevê a concepção de TCs, conforme classe PR, PXR, TPY e TPZ, que são construídos de forma a apresentar um baixo valor de fluxo remanescente algum tempo após decorrido fenômenos transitórios referentes a curtos-circuitos de elevada assimetria, sendo que este tempo depende da constante de tempo secundária de cada projeto. Esses baixos valores de fluxo são conseguidos por meio de pequenos entreferrós colocados no interior do núcleo magnético que permitem limitar o fluxo remanescente ao valor especificado mesmo para correntes fortemente assimétricas no primário do equipamento. Para cada classe existente na norma IEC 61869-2, há diferentes parâmetros a serem especificados, sendo as classes TPY e TPZ as mais indicadas para sistemas com religamentos automáticos e considerações de curto-circuito assimétrico, pois geram projetos eficientes, do ponto de vista técnico (confiabilidade da resposta apresentada pelo TC) e econômico (tamanhos de núcleos otimizados em função dos tempos associados ao ciclo de operação).

É apresentado também neste trabalho o resultado de um estudo de resposta transitória em um TC, classe P conforme [1], especificados pela Chesf com carga superior às necessidades reais de projeto, em situações de curtos-circuitos assimétricos em religamentos automáticos sem sucesso de linhas de transmissão em 500 kV. A mesma avaliação é feita com TC classe TPY também conforme especificações técnicas da Chesf.

A modelagem foi realizada com base em parâmetros medidos em ensaios de laboratório, mediante simulações efetuadas no ATP (*Alternative Transient Program*), utilizando um modelo validado em [2]. Foram simulados diversos casos operacionais possíveis de modo a verificar a eficácia e os efeitos da utilização de uma especificação consistente à aplicação do TC, em comparação à majoração dos parâmetros da carga.

Os resultados obtidos desse estudo visam propiciar o aperfeiçoamento da especificação técnica desses transformadores, de modo a atender às necessidades atuais das concessionárias de serviços de transmissão de energia, tendo em vista as recentes discussões em curso no setor elétrico que sugerem possíveis mudanças em procedimentos operacionais estabelecidos, com a finalidade de melhorar a operação e aumentar a disponibilidade dos ativos e, por conseguinte, diminuir ao máximo o desconto decorrente da Parcela Variável. Uma das sugestões mais recorrentes tem sido no sentido de aumentar o número de tentativas possíveis de reenergização das Linhas de Transmissão - LT, mediante sucessivos religamentos.

2.0 - EXIGÊNCIAS DOS PROCEDIMENTOS DE REDE

O Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS exige através dos Procedimentos de Rede [3], submódulo 2.6, que todas as Linhas de Transmissão sejam dotadas de esquema para religamento automático tripolar ou monopolar e que determinadas condições e parametrizações sejam atendidas ou disponibilizadas. Entre as exigências colocadas pelo ONS, cita-se o tempo máximo exigido para eliminação da falta que varia entre 100 e 150 ms, conforme nível de tensão, para sistemas de proteção de elementos como Transformadores, Reatores, LT, Bancos de Capacitores, Barramentos de Subestações e outros. Esse tempo compreende o tempo de operação do relé de proteção, dos relés auxiliares e o tempo de abertura dos disjuntores. Tempos maiores são tolerados para sistemas de proteção relacionados à falha de disjuntor, proteções de retaguarda remota e elementos como Compensadores Estáticos de Reativos [3].

Além do acima exposto, o ONS [3] estabelece também que os disjuntores devem ser capazes de interromper a corrente de defeito em até 2 ciclos de 60 Hz para níveis de tensão iguais ou superiores a 345 kV e em até 3 ciclos para aplicações com níveis de tensão inferiores.

A Resolução Normativa 729/16 da ANEEL determina a apuração por parte do ONS de indisponibilidades de funções de transmissão para cada evento com duração igual ou superior a 1 (um) minuto, sem prejuízo da aplicação das penalidades cabíveis em decorrência da indisponibilidade de ativo. O ONS informa ainda, no submódulo 15.6 de [3], a possibilidade de isenção do período referente às limitações técnicas para religamentos e que a disponibilização do ativo para reintegração ao sistema, por parte do agente de transmissão, somente será considerada como término do período de indisponibilidade caso a função de transmissão seja religada com sucesso em um tempo inferior a 5 minutos após autorização do ONS para reenergização, não automática neste caso.

3.0 - ESPECIFICAÇÃO DE TC CLASSE TRANSITÓRIA

Para atender às aplicações que exigem uma resposta transitória com exatidão nos primeiros ciclos da corrente de curto-circuito, os TCs devem ser calculados levando em consideração a configuração do sistema de potência que impõe uma constante de tempo primária associada ao X/R e um fator de assimetria que depende do ângulo da tensão no momento em que o curto-circuito ocorre.

Durante o curto-circuito, o sistema apresenta uma característica fortemente indutiva, portanto a corrente elétrica que se estabelece como consequência do defeito é atrasada da tensão em cerca de 90 graus. Como a corrente

elétrica em circuitos altamente indutivos não sofre variações instantâneas, surge uma componente transitória que explica matematicamente a descontinuidade observada na corrente quando o curto-circuito ocorre em um ângulo da tensão diferente de $\pi/2$. Esta componente transitória impõe um valor DC na corrente de curto-circuito e a relação entre o valor de crista e o valor eficaz determina o fator de assimetria usado no dimensionamento do TC. Para atender ao exposto acima e garantir que o TC não sature durante o tempo de leitura do relé, neste caso deve-se observar que o importante é o tempo de leitura e não o tempo de atuação que envolve o processamento e o envio do comando de trip, a seção do núcleo de proteção pode ser dimensionada por um valor que depende de alguns parâmetros, entre eles o ciclo de operação e seus tempos associados, as características do sistema de potência e as cargas de projeto relacionadas aos circuitos de proteção alimentados pelo TC.

O fator de dimensionamento K_{td} do núcleo do TC para garantir exatidão nos primeiros ciclos da corrente de um curto-circuito assimétrico com reprodução fiel da corrente no secundário de proteção é dado pela Equação 1 conforme [4] para um ciclo duplo de operação (C-O-C-O). Onde ω é a frequência angular, T_p e T_s são respectivamente as constantes de tempo primária e secundária, t_{fr} é o tempo morto do disjuntor, t' é o tempo de interrupção da corrente no primeiro ciclo e t''_{al} é o tempo de atuação da proteção no segundo ciclo.

$$K_{td} = \left[\frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left(e^{-\frac{t'}{T_p}} - e^{-\frac{t'}{T_s}} \right) + 1 \right] e^{-\frac{(t_{fr} + t''_{al})}{T_s}} + \left[\frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} \left(e^{-\frac{t''_{al}}{T_p}} - e^{-\frac{t''_{al}}{T_s}} \right) + 1 \right] \quad (\text{Eq. 01})$$

De acordo com a Equação 1, para se garantir exatidão em um curto-circuito assimétrico, o núcleo do TC deve ser majorado de acordo com o fator de dimensionamento para o regime transitório, K_{td} , e que representa, para atender à assimetria especificada, um sobredimensionamento da seção de núcleo necessária para garantir exatidão em curtos-circuitos simétricos.

Considerando um ciclo de operação duplo (C-O-C-O), com religamento rápido de linha de transmissão, deve-se considerar no cálculo do TC os tempos de atuação da proteção (tempo de leitura do relé), de abertura do disjuntor e de recomposição do disjuntor para religamento (tempo morto) que pode envolver tempos para recarregamento de molas, resfriamento de câmara, etc. O tempo antes do religamento é muito importante devido à indução remanescente que poderá existir no núcleo do TC no momento do religamento e que poderá se somar à indução provocada pelo fluxo imposto (considerado aqui como sendo de mesmo sentido) pela corrente de defeito a partir do religamento sem sucesso. Dessa forma, quanto maior o tempo entre os ciclos de operação (tempo morto), mais favorável será para a resposta do TC no religamento e menor será o fator de majoração necessário para atender ao segundo ciclo de operação, considerando um projeto com a mesma constante de tempo secundária. Vale ressaltar que, em geral, o sucesso no religamento é influenciado pelo tempo para religamento haja vista que muitas causas de defeitos estão relacionadas a queimadas, por exemplo. Outrossim, restrições do sistema impedem o religamento em tempo muito curto, a exemplo de linhas de transmissão próximas de usinas termoelétricas ou mesmo restrições de consumidores.

Em se tratando de TC clássico com núcleo majorado, em função do sobredimensionamento da carga e não linearizado (sem entreferros), deve-se considerar um valor elevado para a constante de tempo secundária, pois o decaimento da indução após a interrupção da corrente no primeiro ciclo ocorre de forma lenta, impondo uma indução remanescente elevada no momento do religamento.

4.0 - CLASSE P APLICADA A CURTO CIRCUITO ASSIMÉTRICO

Conforme definido nas normas [1] e [5], a classe P não possui limite para o fluxo remanescente e é especificado o comportamento de saturação para um curto-circuito simétrico. Dessa forma, a tensão limite de exatidão é dada pela Equação 02.

$$E_{ALF} = ALF \cdot I_s \cdot \sqrt{(R_{ct} + R_b)^2 + X_b^2} \quad (\text{Eq. 02})$$

Entretanto, uma forma normalmente utilizada para verificar se um núcleo com classe P atende as condições de regime transitório é apresentada em [6], e que pode ser reescrita como apresentada na Equação 03.

$$E_{al} = \left(1 + \frac{X}{R} \right) \cdot I_s \cdot Z \cdot K_{SSC} \quad (\text{Eq. 03})$$

Conforme definições existentes em [1] ALF e K_{SSC} possuem definições equivalentes, porém ALF é utilizado para classe P e K_{SSC} para as classes destinadas a regime transitório. Deste modo, verifica-se que na Equação 03 há o termo adicional $1+X/R$ que é o fator de dimensionamento transitório em comparação a Equação 02. A norma [7] apresenta a Equação 04.

$$K_{tfp,dc,max} = \omega \cdot T_p \cdot \left(\frac{T_p}{T_s}\right)^{\frac{T_p}{T_s - T_p}} + 1 \quad (\text{Eq. 04})$$

Como $T_s \gg T_p$ para TC com classe P, a equação 04 pode ser reescrita como apresentada na equação 05

$$K_{tfp,dc,max} = \omega \cdot T_p + 1 = \omega \cdot \frac{X/R}{\omega} + 1 = \frac{X}{R} + 1 \quad (\text{Eq. 05})$$

Assim, o fator de dimensionamento transitório para atender regime transitório, sem considerar religamento, pode ser dado por $1+X/R$. Contudo, diferente do que foi apresentado para a abordagem da classe TPY, neste caso não se considera os tempos de atuação de relé, visto que o equacionamento considera o máximo fluxo possível durante o curto-circuito assimétrico. Desta forma, pode-se resultar em especificações de TC com tamanho de núcleo muito superior ao necessário, ou mesmo não sendo factível a fabricação. A fórmula apresentada por [1] para calcular o fator de dimensionamento transitório para um caso sem religamento automático é apresentada na equação 06.

$$K_{td} = \frac{\omega \cdot T_p \cdot T_s}{T_p - T_s} \cdot \left(e^{-\frac{t_{al}}{T_p}} - e^{-\frac{t_{al}}{T_s}} \right) + 1 \quad (\text{Eq. 06}).$$

Enquanto a Equação 04 considera o tempo que leva para o TC atingir o fluxo máximo, a Equação 06 considera o tempo t_{al} , que é o tempo necessário para o relé fazer a leitura da corrente. A Figura 01 exemplifica bem o conceito da diferença entre o dimensionamento do núcleo do TC quando se considera apenas o fator $1+X/R$ ou quando se consideram os tempos de atuação do relé. Para gerar o gráfico da Figura 01, fez-se uso de um fator X/R igual a 18, frequência nominal igual a 60 Hz e constante de tempo secundária igual a 25 s. Observa-se que para um tempo de atuação do relé igual aos típicos 16,67 ms, o fator de dimensionamento necessário é apenas 6,4, enquanto a utilização da simplificação do fator de dimensionamento apenas pela utilização de $1+X/R$ resultaria em um núcleo aproximadamente três vezes maior sem a necessidade real desta majoração. Nesta análise não se considerou o religamento do sistema.

O fator de dimensionamento transitório apresentado é válido somente para casos sem religamento. Ao se considerar o religamento, este fator assumirá valores bem elevados de modo a compensar a inexistência de decaimento do fluxo magnético durante o tempo morto. O estudo de caso no próximo item apresenta este comportamento.

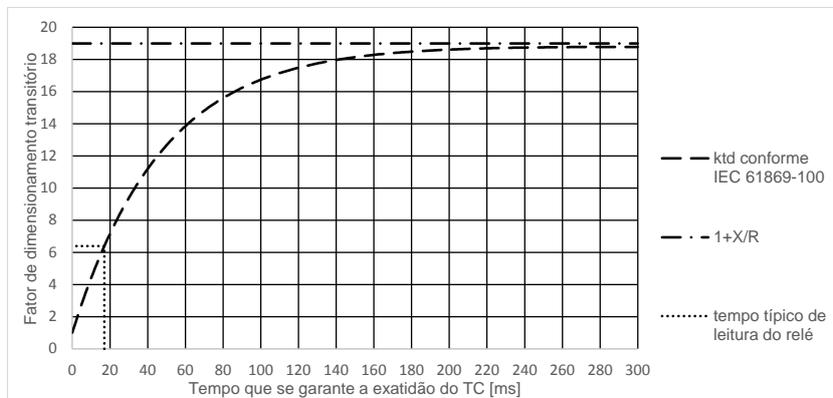


Figura 01 – Comparação entre fatores de dimensionamento transitórios

5.0 - ESTUDOS DE CASO – SE IGAPORÃ III 500 KV - TC CLASSE TPY VERSUS TC CLASSE P

Neste tópico são apresentados os resultados de avaliações de TC classes P e TPY especificados para aplicação no setor em 500kV da Subestação Igaporã III, de propriedade da Chesf, para alimentar instrumentações referentes a sistemas de proteção associados a linhas de transmissão com esquemas de religamento automático. São apresentadas na Tabela 1 as cargas de projeto referentes ao caso mais crítico de carregamento para os núcleos de proteção dos TC 500 kV da SE Igaporã III, cujas características nominais são apresentadas nas tabelas 3 e 4 para os TCs classe P e TPY respectivamente.

Tabela 1 - Dados da aplicação, pior caso, SE Igaporã III

Dados da aplicação, pior caso, SE Igaporã III						
CABO	Corrente Secundária Nominal	Seção (cabo)	Z(cabo)	Comprimento (ida/volta)	Z (cabo)	Potência (cabo)
	(A)	(mm ²)	(Ω/km)	(m)	(Ω)	(VA)
	1	6	3,69	468	1,727	1,727
INSTRUMENTOS			Relé IED 670	RDP RA331		
			Carga < 0,25 VA @ 1A	Carga < 0,02 VA @ 1A		
CARGA TOTAL		Carga total (VA)	Impedância Z (Ω)	Carga (VA)		
		2,0	2,0	20		

Tabela 2 - Dados especificados para o TC 500 kV classe P

Dados gerais especificados para o TC 500 kV classe P							
Classe exatidão	Corrente primária	Corrente secundária	Carga secundária	Fator limite de exatidão	Corrente térmica	Corrente dinâmica	Erro
ANSI	(A)	(A)	(VA)	Kssc/ALF	(kA)	(kA)	%
C	750x1500x3000	1-1-1	20	17	50	130	10

Tabela 3 - Dados especificados para o TC 500 kV classe TPY

Dados gerais especificados para o TC 500 kV classe TPY							
Classe exatidão	Corrente primária	Corrente secundária	Carga secundária	Fator limite de exatidão	Corrente térmica	Corrente dinâmica	Erro
IEC	(A)	(A)	(VA)	Kssc/ALF	(kA)	(kA)	(%)
TPY	1000/1500/2000/3000	1-1-1	2	17	50	130	10
t'al = t'al = 17 ms		t' = 67 ms		tm = 500 ms		X/R = 18	
						Assimetria 100%	

Conforme apresentado na Tabela 2, os TC 500 kV, $I_{sec} = 1A$, classe P, foram especificados para garantir exatidão com cargas de até 20VA em condições de curto-circuito simétrico da ordem de 17 vezes a corrente nominal. Como a corrente secundária nominal é 1A, uma carga de 20VA traduz-se em uma impedância de 20 Ω ($f_p = 0,9$), ou seja, 10 vezes a carga de projeto informada na Tabela 2. Para um fator limite de exatidão igual a 17, o erro máximo permitido irá ocorrer quando a corrente de magnetização for da ordem de 1,7A (1700mA) em regime permanente. Este valor limite tolerável, visto o erro aceitável (10%), para a corrente no ramo magnetizante é alcançado com uma tensão de excitação superior a 728 V (Figura 2, TC classe P). Entretanto, com carga nominal conectada aos terminais secundários de proteção, o TC em questão desenvolve uma tensão de excitação no núcleo do equipamento da ordem de 486 V em condições de curto-circuito simétrico, considerando a resistência interna do enrolamento medida e igual a 8,59 Ω (75°C). Este fato justifica o erro medido de 2,5% em ensaios de resposta a altas correntes. Entretanto, para uma carga de projeto de apenas 2 VA, o valor eficaz da tensão de excitação imposta ao núcleo de proteção do equipamento é da ordem de 180 V em condições de curto-circuito simétrico. Dessa forma, verifica-se que o TC classe P em questão está sobredimensionado para as condições de regime permanente e mais à frente avaliaremos se este sobredimensionamento é suficiente para garantir um bom desempenho transitório com correntes de curto-circuito fortemente assimétricas.

A mesma avaliação em regime transitório, com religamento sem sucesso, será igualmente apresentada para o TC classe TPY, nas mesmas condições, cujas características encontram-se na Tabela 3 e a curva de excitação é apresentada na Figura 2.

Na Figura 3, é apresentado o modelo ATP, com reator não linear tipo 98, representativo do circuito equivalente do TC classe TPY sem os efeitos da histerese dado que o núcleo deste equipamento possui entreferros que garantem uma desmagnetização mais rápida, constante de tempo secundária baixa, e conseqüentemente um valor baixo de indução remanescente. Entretanto, a fim de representar os efeitos da histerese no núcleo do TC classe P, que naturalmente possui uma constante de tempo secundária elevada, o reator não linear foi alterado para o tipo 96, conforme Figura 4, cuja envoltória (dado de entrada) foi calculada pelo método do arco tangente [8].

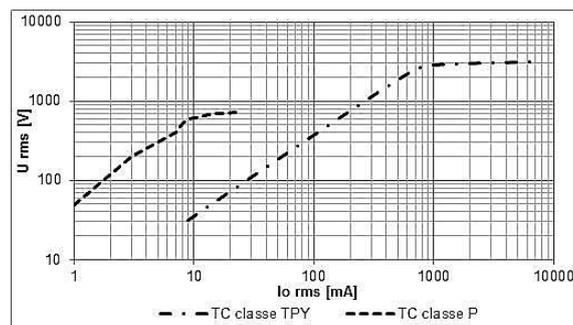


Figura 2 – Curva de excitação dos TCs classe TPY e classe P

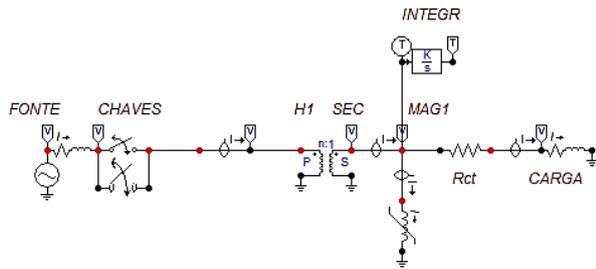


Figura 3 – Modelo do TC em ATP com reator não linear tipo 98

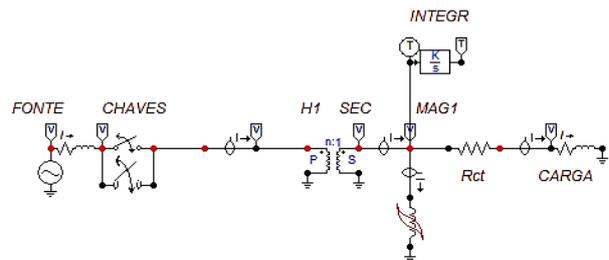


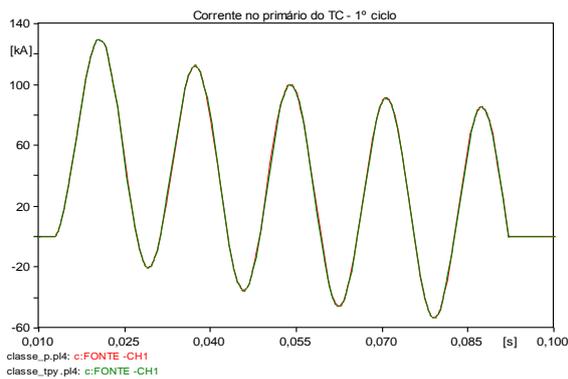
Figura 4 – Modelo de TC em ATP com reator não linear tipo 96 representando histerese

A Figura 5 mostra o sinal de corrente primária utilizada na simulação.

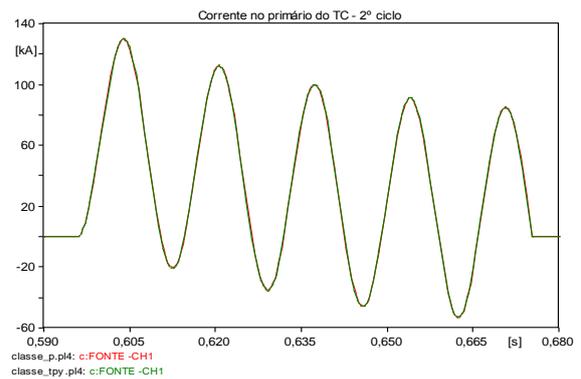
Os tempos referentes ao ciclo de operação foram ajustados, conforme mostrados na Tabela 4, com base nos valores especificados, de forma a possibilitar o fechamento do circuito no zero da tensão conforme observado em manobras de disjuntor e também para proporcionar uma assimetria máxima. Além disso, o ajuste prevê a extinção da corrente de defeito no pico da tensão de forma a estabelecer um valor máximo de fluxo remanescente. Ou seja, o ajuste proposto na Tabela 4 garante uma condição de operação mais severa.

Tabela 4 – Tempos ajustados do ciclo de operação

Ciclo ajustado, t (s)			
C	O	C	O
0,0125	0,08333	0,5958	0,66667



(a)



(b)

Figura 5 – Corrente primária dos TCs – (a) 1º ciclo (b) 2º ciclo

Na Figura 06 é possível observar que o fluxo enlaçado no núcleo do TC classe P atinge a saturação com valores muito inferiores ao valor do fluxo de saturação do núcleo do TC classe TPY. Assim como observado na Figura 2, os núcleos apresentam tensão de saturação diferente.

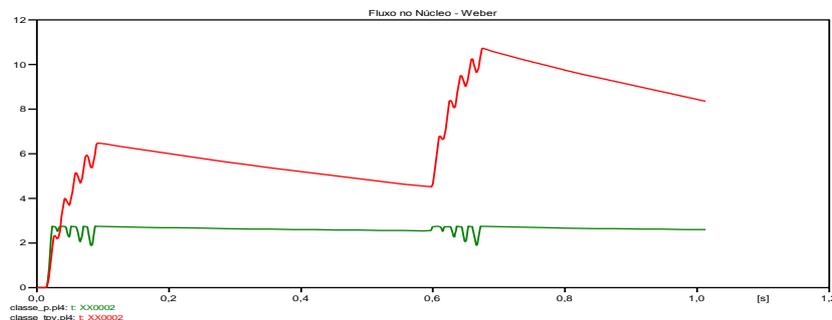


Figura 06 – Fluxo enlaçado nos núcleos dos TCs

Na Figura 07 é apresentado o desempenho dos TC classe P e TPY com relação à resposta em altas correntes assimétricas. Verifica-se que o TC classe TPY consegue representar, em seu secundário, a corrente de curto-circuito assimétrica com um erro de 0,24A no 1º ciclo e de 0,71A no 2º ciclo, ambos no tempo de atuação da proteção $t'_{al} = t''_{al} = 1$ ciclo de 60Hz especificado, conforme apresentado na figura 09.

No caso do TC classe P, observa-se que o fluxo de saturação é atingido com 10 ms no 1º ciclo (Figura 07) e com 3,3 ms no 2º ciclo (Figura 08). Ou seja, nas condições mais severas de um curto-circuito assimétrico, o TC classe P não é capaz de reproduzir a corrente de defeito dentro do tempo exigido pela proteção, retardando a atuação da proteção e por consequência o envio do comando de abertura do disjuntor.

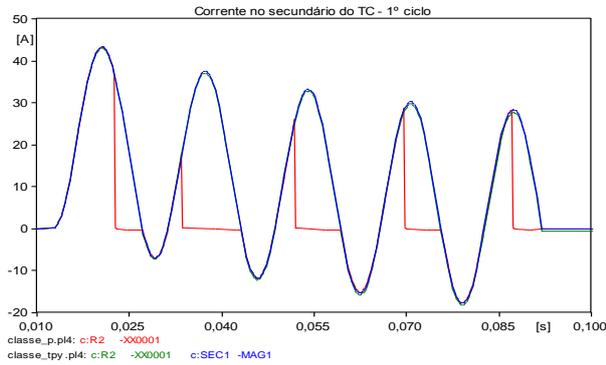


Figura 07 – Corrente no secundário dos TCs – 1º ciclo

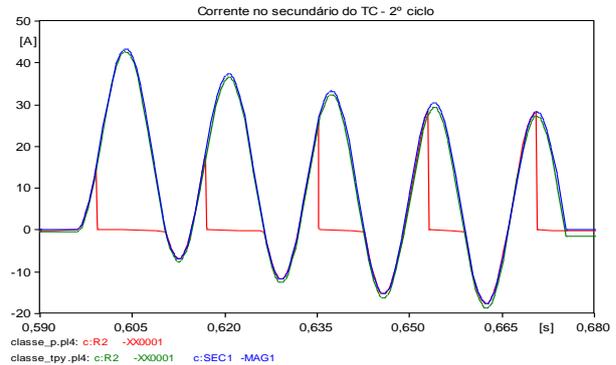


Figura 08 – Corrente no secundário dos TCs – 2º ciclo

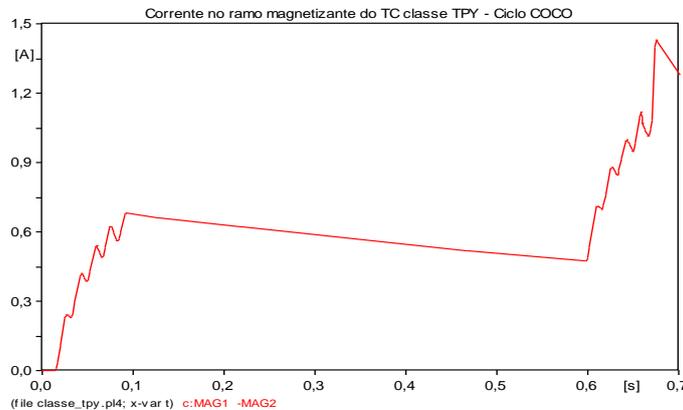


Figura 09 – Corrente no ramo magnetizante do TC TPY – Ciclo C-O-C-O

Tempos para religamento maiores do que o tempo morto considerado nas simulações acima, são mais favoráveis a um melhor desempenho deste TC haja vista que o fluxo remanescente decai exponencialmente em função da constante de tempo secundária. Entretanto, para o TC classe P, mesmo partindo de um fluxo remanescente zero no 1º ciclo, verificou-se que o desempenho não atende às exigências especificadas nas condições impostas. O TC classe TPY, no entanto, reproduziu fielmente a corrente de falta na pior situação de curto-circuito terminal, sendo possível submeter o equipamento a uma nova tentativa de religamento dentro da tolerância total de 1 minuto, inclusive com relação à suportabilidade térmica. O TC TPY em questão possui uma constante de tempo secundária de 1,76 s e, portanto o fluxo remanescente decairá para próximo de zero a partir de 8 s de tempo morto, conforme Figura 10. A resposta da corrente secundária para o 3º ciclo é apresentada na Figura 11.

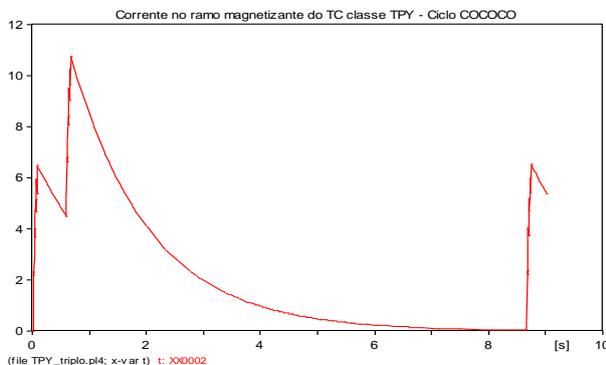


Figura 10 – Corrente no ramo magnetizante do TC TPY – Ciclo C-O-C-O-C-O

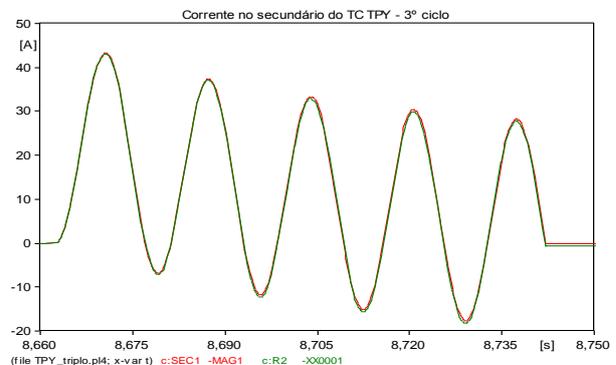


Figura 11- Corrente no secundário do TC TPY – 3º ciclo

Em consulta aos grandes e principais fornecedores de disjuntores da Chesf, fomos informados que algumas linhas de disjuntores podem operar com o ciclo O-0,5s-CO-59s-CO, $t + t' < 1$ minuto. Com isso, seria possível realizar um segundo CO dentro do tempo de tolerância do ONS, à partir do qual é apurada a indisponibilidade da função de transmissão para efeitos de desconto na receita. Ou seja, para esse segundo CO, a limitação não seria o TC e sim o disjuntor que precisa aguardar um tempo morto maior.

Toda a análise apresentada acima diz respeito à maior relação de transformação dos TC analisados, isto é 3000-1A. Na figura 12, observa-se que o erro de corrente é maior nas menores relações de transformação. Dessa forma, as relações devem ser especificadas conforme necessidades de projeto, pois o dimensionamento do TC é feito para atender a classe de exatidão na maior relação de transformação, salvo quando especificado de forma diferente. No caso do TC TPY objeto desse estudo, cuja exatidão foi exigida em todas as relações, o erro máximo instantâneo de corrente, medido em laboratório em ensaio pelo método direto e nas condições aqui apresentadas e avaliadas, foi de 6,3% na relação 1000-1A e de 1,9% na relação 3000-1A no 2º ciclo com religamento em 500ms. Com isso, observa-se que a maior relação tem uma margem muito maior do que a menor relação, face erro máximo tolerável de 10%, reforçando a importância da especificação correta das necessidades reais da aplicação em termos de corrente nominal, de longa e curta duração, para evitar um sobredimensionamento desnecessário.

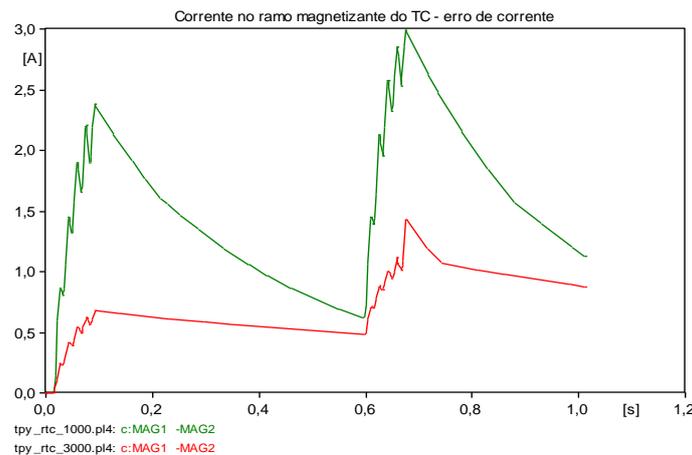


Figura 12 – Corrente no ramo magnetizante TC classe TPY, RTC 1000/3000-1A

6.0 - CONCLUSÃO

Transformadores de Instrumento são equipamentos essenciais em subestações, pois são responsáveis pela alimentação dos sistemas de proteção e controle do SEP. Desta forma, é de fundamental importância que a corrente secundária do TC seja fiel a corrente primária, sendo que isto é possível somente se o núcleo magnético não atingir a saturação.

A classe P de [1] e [5] é definida para curtos-circuitos simétricos e o seu uso para transitórios pode ocasionar na saturação do TC e assim, gerar uma corrente secundária totalmente distorcida e, portanto, não representativa da corrente primária, deste modo podendo resultar em uma má atuação do sistema de proteção. Para se evitar esta saturação, tem sido regra de uso comum, em algumas transmissoras, a especificação de uma carga maior do que a carga real a ser instalada no secundário do TC, entretanto conforme apresentado, esta majoração pode não ser suficiente.

No estudo conduzido para elaboração do presente artigo também foi simulado o comportamento de um TC com classe TPY, onde o fato do núcleo magnético possuir entreferros reduz significativamente a indução quando não há corrente primária, sendo que esta desmagnetização é muito importante para esquemas de religamentos automáticos de LT, sobretudo os religamentos rápidos. Além disso, o núcleo magnético dos TC classe TPY são adequadamente dimensionados para representar com exatidão as correntes de curto-circuito fortemente assimétricas, permitindo uma atuação rápida e correta da proteção.

Também foi apresentado o comportamento do fluxo magnético para um ciclo C-O-C-O-C-O, sendo que o resultado da simulação, conforme esperado, mostra claramente que decorrido um tempo acima de três vezes a constante de tempo secundária, o núcleo já estará desmagnetizado e, portanto, apto para novas solicitações de curto-circuito. Dessa forma, no caso do TC classe TPY corretamente especificado, há a possibilidade de alterações nos esquemas de religamento de LT no sentido de adotar uma nova tentativa de religamento, observando as limitações do disjuntor, dentro do tempo de tolerância estabelecido pelo ONS e com isso tentar reduzir penalidades decorrentes da indisponibilidade de funções de transmissão, além de contribuir para redução de riscos e impactos decorrentes do corte de cargas.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] International Electrotechnical Commission (IEC), *IEC 61869-2; Instrument transformers – Part 2: Additional requirements for current transformers*, 2012.
- [2] T. S. d. Carvalho, R. G. d. Oliveira, F. E. Spressola, R. A. R. S. M. G. Fabris, R. Salengue e J. F. P. Vaniel, “Análise de superação de tc quanto ao desempenho em correntes assimétricas de curto-circuito – Panorama atual e refinamento de especificações técnicas,” Foz do Iguaçu-PR, Brasil, 2013.
- [3] Operador Nacional do Sistema Elétrico, “Procedimentos de Rede,” Operador Nacional do Sistema Elétrico, 01 01 2017. [Online]. Available: <http://www.ons.org.br/procedimentos/>. [Acesso em 01 Abril 2017].
- [4] International Electrotechnical Commission (IEC) , *IEC 60044-6; Instrument Transformers - Part 6: Requirements for protective current transformers for transient performance*, 1992.
- [5] Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR), *NBR-6856; Transformador de corrente — Especificação e ensaios*, 2015.
- [6] H. J. Altuve, N. Fischer, G. Benmouyal e D. Finney, “Sizing Current Transformers for Line Protection Applications,” 2013.
- [7] International Electrotechnical Commission (IEC), *IEC 61869-100; Guide for Application of Current Transformers in Power System Protection*, 2017.
- [8] T. S. de Carvalho, “Análise comparativa de modelos computacionais de transformadores de corrente via medições e simulações,” Novembro 2015.

DADOS BIOGRÁFICOS



Dalton França Guedes Filho, nascido em Corrente/PI em 1980. Graduado em Engenharia Elétrica em 2007, com ênfase em Eletrotécnica e Telecomunicações, pela Universidade Federal de Campina Grande - UFCG em cooperação com o Instituto Nacional Politécnico de Grenoble – INPG/França. Possui mestrado em Engenharia Elétrica pela UFCG (2012), na área de processamento da energia. Iniciou suas atividades na Eletrobrás/CHESF em 2008 na área de planejamento de sistemas elétricos de potência, tendo contribuído em estudos para expansão do sistema elétrico da região nordeste até o ano de 2012 quando iniciou atuação na área de projetos eletromecânicos de subestações de alta e extra-alta tensão, sendo responsável também pela especificação técnica de equipamentos de pátio, a exemplo dos TC/TP.

Heldemarcio Leite Ferreira, nascido em Itapetim/PE em 1962. Graduado em Engenharia Elétrica em 1984, com ênfase em Eletrotécnica, pela Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Possui doutorado em Engenharia de Produção na área de manutenção de sistemas industriais pela UFPE em 2009. Atualmente é engenheiro da Eletrobras/CHESF com atuação na área de manutenção de subestações, inclusive na análise de desempenho de equipamentos de pátio, a exemplo dos TC/TP.

Rodrigo Gomes de Oliveira, nascido em Santa Bárbara d'Oeste/SP em 1984. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá em 2007, cursa mestrado na mesma área e universidade. Trabalha na GE Grid Solutions, unidade Itajubá, desde 2007, onde recebeu o título de Especialista Técnico em Transformadores para Instrumento. Atualmente é Engenheiro de Pesquisa e Desenvolvimento.

Fernando Moreira Lagos, nascido em Curitiba/PR no ano de 1988. Graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Itajubá em 2010. Cursa mestrado com foco em simulações computacionais de transitórios eletromagnéticos de transformadores de potencial capacitivo na mesma universidade. Atualmente trabalha na GE Grid Solutions no setor de Pesquisa e Desenvolvimento de transformadores para instrumento, linha de alta tensão. Atualmente é Engenheiro de Pesquisa e Desenvolvimento.

Túlio Sallum de Carvalho, nascido em São Lourenço/MG no ano de 1987. Graduado em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Federal de Itajubá em 2009. Recebeu o título de Mestre em Engenharia Elétrica em 2015 na mesma universidade. Atualmente trabalha na GE Grid Solutions no setor de Engenharia de transformadores para instrumento, linha de alta tensão.

Flávio Eduardo Spressola, nascido em Jardinópolis/SP, em 1975. Graduado em Engenharia Elétrica pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá em 1999, MBA Executivo (2003) e Mestre em Sistemas Elétricos de Potência (2011) pela Universidade Federal de Itajubá. Trabalha na GE Grid Solutions, unidade Itajubá, desde 2000, onde recebeu o título de Especialista Técnico em Transformadores para Instrumento e Ensaio Elétricos. Atualmente é Gerente Técnico do Produto Transformador de Potencial Capacitivo.