



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

BR/GPC/30
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - V

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA-GPC

PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DO PONTO DE SATURAÇÃO NA CURVA DE EXCITAÇÃO DE TC DE PROTEÇÃO PARA AVALIAÇÃO DO FATOR DE REMANÊNCIA MAGNÉTICA

Valci Vitor Coelho(*)
ELETROSUL

Nelson J. Bastitela
USFC/GRUCAD

Nelson Sadowski
USFC/GRUCAD

João P. A. Bastos
USFC/GRUCAD

Paulo R. Bernardes
ELETROSUL

RESUMO

Este artigo apresenta os resultados obtidos na avaliação do fator de remanência magnética em Transformadores de Corrente (TCs) de proteção conforme o método proposto pela IEC60044-6 (1) em comparação com outros métodos que adotam como referência o ponto de saturação diferente desta norma. A norma IEC60044-6 (1) é a que define o fator de remanência magnética e o tipo de classe de TC TPY.

PALAVRAS-CHAVE

Fator de Remanência Magnética, TC TPY, Tensão de Saturação, Tensão de Joelho, Curva de Excitação

1.0 - INTRODUÇÃO

Para alcançar a meta de mensurar o Fator de Remanência K_r de Transformadores de Corrente (TCs), em especial de TC tipo TPY, e aperfeiçoar o sistema de ensaio de saturação do Laboratório de Alta Tensão (LALTE) da empresa Eletrosul Centrais Elétricas, foram desenvolvidos instrumentos virtuais (VIs) em LabView que possibilitam uma melhor avaliação do comportamento dinâmico de núcleos de TCs. O TC utilizado para as medições foi com entreferro, tipo TPY, classe de tensão 145kV de isolamento, classe de carga C400, relação 1200/5, código de manutenção TC6200377.

Da curva de excitação, determina-se o ponto de joelho e ponto de saturação conforme as normas: IEC (1) (Figura 3), IEEE/ANSI (2) e NBR (3) (Figura 4). Também se determina os pontos de inflexão superior e inferior (Figura 5), que provêm de um método proposto no trabalho de mestrado de Coelho V. V. (4) para a avaliação da curva de magnetização de TCs. Geralmente, os fabricantes utilizam o valor máximo da forma de onda do fluxo, sendo o fluxo de saturação obtido através do último ponto de operação de ensaio. Estes valores são utilizados para determinação do fator de remanência K_r e comparados entre si para verificar qual deles está mais próximo do índice de 10%, sendo o valor de referência para o TC TPY. Os valores de K_r , conforme as várias maneiras de serem determinados, serão diferenciados pelas nomenclaturas:

- K_{rIEC} – Fator de remanência obtido conforme IEC (1);
- K_{rIEEE_Vx} – Fator de remanência usando o ponto de saturação adotado pela IEEE (2, 3);
- $K_{rFluxMax}$ – Fator de remanência adotado pelos fabricantes;
- $K_{rInflexãoSup}$ – Fator de remanência obtido pelo método proposto (4).

No Instrumento Virtual de análise, o usuário pode definir se o TC é com ou sem entreferro, e se as grandezas avaliadas são eficazes ou de pico. Os pontos acima citados e a curva de magnetização são obtidos também para o fluxo magnético em função da corrente de magnetização.

2.0 - BANCADA EXPERIMENTAL DE ENSAIOS DE TC

A Figura 1 obtida de (5) apresenta o diagrama de blocos funcionais da bancada de ensaio.

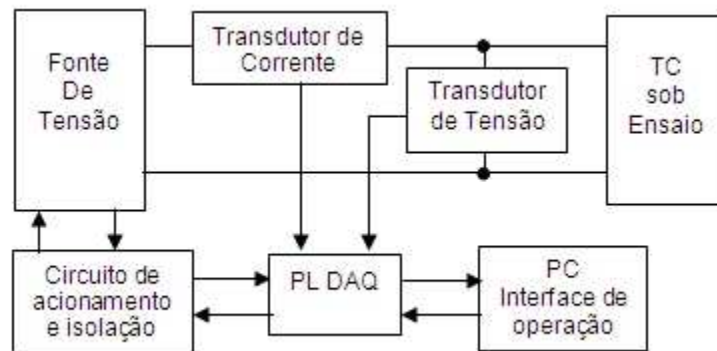


FIGURA 1 – Diagrama de blocos do sistema de automação do ensaio de saturação em TC

A fonte de tensão corresponde a um autotransformador de tensão variável, um transformador isolador e vários transformadores elevadores cascadeados (que servem para elevar a tensão de 400V até 2000V – vide Figura 2). O bloco funcional “PL DAQ” representa a placa de aquisição de dados da empresa *National Instruments*.

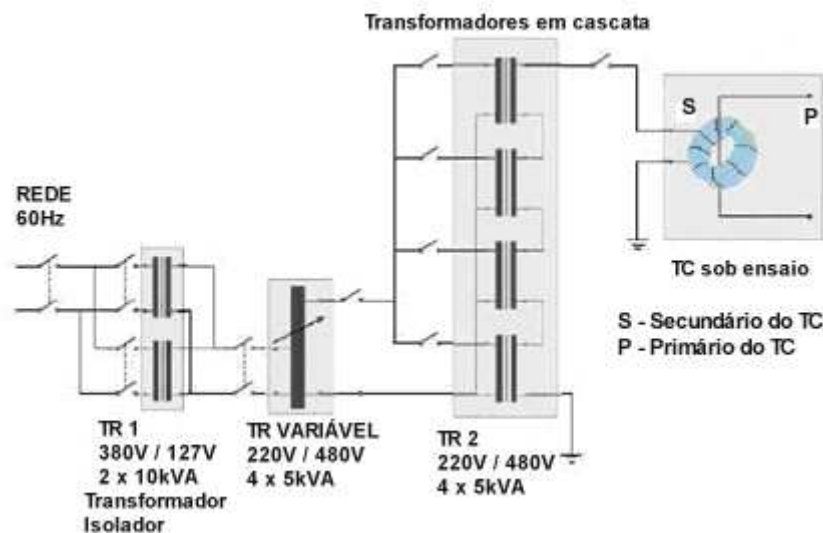


FIGURA 2 – Configuração do circuito de ensaio

2.1 Avaliação do índice de remanência magnética de TC TPY

A IEC 60044-6 (1) define que para encontrar o ponto do fluxo de saturação se deve encontrar o ponto onde há um crescimento da indução magnética B em 10% resultando um aumento do campo magnético H de 50%. No entanto, para se obter os valores de B e H é necessário o conhecimento das dimensões do núcleo e dos enrolamentos do TC, algo raro de estar disponível na prática. Além disso, sabe-se que ocorre a variação do caminho médio magnético, provocando incertezas nos valores calculados para o campo magnético (4). Assim, esta norma adota a curva de excitação tensão versus corrente como representativa para esta avaliação, sendo a tensão de joelho o ponto de saturação a ser considerado (ver Figura 3). Converte-se, então, este valor de tensão de pico em fluxo de pico, o qual passa a ser considerado como fluxo de saturação Φ_s . O fluxo remanente Φ_r , obtido conforme a norma IEC 60044-6 (1), é o valor do fluxo (passagem do laço de fluxo) quando a corrente possui valor nulo. O VI de análise da bancada do LALTE sempre utiliza este procedimento para determinar o valor do fluxo remanente, o qual é calculado para o laço relativo ao último ponto de operação do TC medido, isto é, para o “maior” laço de fluxo por corrente.

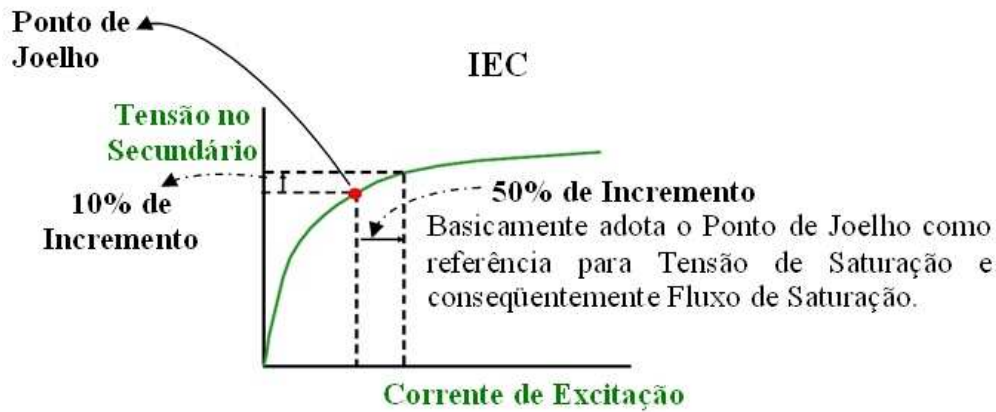


FIGURA 3 – Determinação do ponto de joelho conforme IEC (1)

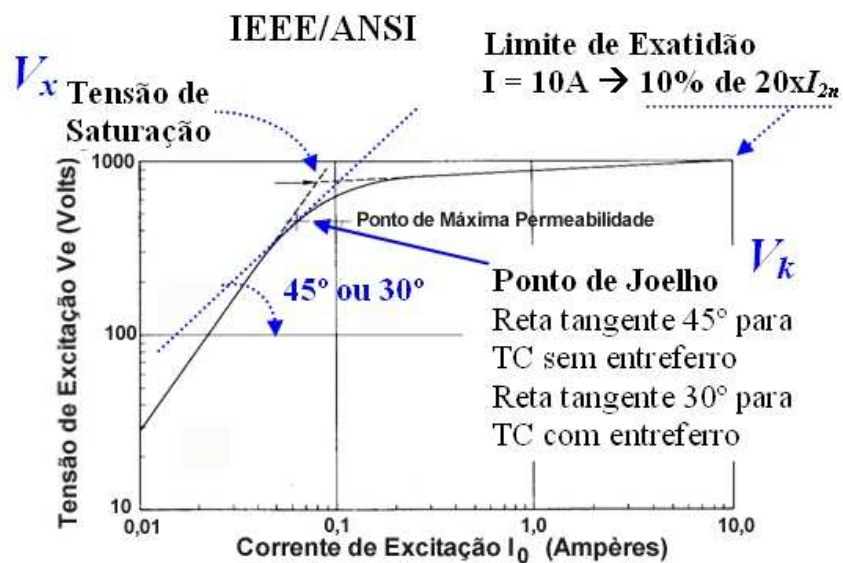
O fator de remanência magnética K_r , conforme norma (1), é obtido pela relação entre Φ_r e Φ_s como mostra a Equação (1).

$$K_r = 100 \times \frac{\Phi_r}{\Phi_s} \quad (1)$$

Para avaliação a mensuração conforme IEC 60044-6 (1) foi denominada como K_{rIEC} , já mencionado anteriormente.

2.1.1 Critério de avaliação conforme normas IEEE/ANSI e NBR (2, 3), denominação K_{rIEEE_Vx}

Este método calcula o fluxo de saturação através do valor eficaz da tensão de saturação (V_x) determinado conforme normas (2, 3) (ver Figura 4). Este método não é normalizado, embora utilize o único método normalizado de obtenção do ponto de saturação através da determinação do valor de V_x .

FIGURA 4 – Método de determinar o ponto de joelho V_k e tensão de saturação V_x (2, 3)

2.1.2 Critério de avaliação conforme procedimento de fabricantes, denominação $K_{rFluxMax}$

Este método de cálculo utiliza o valor máximo da forma de onda do fluxo, sendo o fluxo de saturação obtido através do último ponto de operação de ensaio. Geralmente os TCs ensaiados são de 5 A no secundário e têm um fator de sobrecorrente F_s igual a 20, o que implica em ter 100 A como limite para carga nominal do TC e, como o erro admissível é de 10 % na informação à proteção, isto equivale a 10 A. Comumente é até onde as curvas de excitação são obtidas, isto é, com uma corrente secundária em torno de 10 A. Sendo assim, $K_{rFluxMax}$ representa o ponto equivalente à classe de exatidão ANSI (2, 3), isto é, quando a curva chega a 10 A eficazes na corrente de excitação. Os fabricantes geralmente adotam este ponto como ponto de referência do fluxo de saturação. Porém,

as normas não definem os valores correspondentes à saturação desta maneira. A Figura 4 também apresenta este ponto de operação do TC.

2.1.3 Critério de avaliação conforme método proposto (4) $K_{rInflexãoSup}$

Este método calcula o fluxo de saturação através do valor eficaz de tensão do ponto de inflexão pelo método proposto conforme (4). Este valor é convertido em valor de pico e, posteriormente, no valor de fluxo.

No método proposto (4), sugere-se o uso do conceito de traçar retas referenciais na região linear e de saturação semelhante ao proposto pela IEEE/ANSI e NBR (2, 3), porém adotando o ponto de inflexão inferior e superior como ponto de joelho e de saturação, respectivamente. Sugere-se isto, pois estes pontos são os que parecem ter mais coerência como representantes de zonas limites do comportamento da curva de excitação do TC. O ponto de inflexão inferior delimita a região linear da região de transição ou de joelho propriamente dita, enquanto que o ponto de inflexão superior delimita a região de joelho da região de saturação. A Figura 5 mostra a representação desta proposta de análise. Esta definição da tensão de joelho V_{Joelho} é mais conservadora do que a determinação dos valores definidos pelas normas, mas é mais coerente com o que se espera para uma atuação adequada de TC para a proteção. Para valores acima deste ponto proposto, não se garante uma representação adequada da corrente primária no circuito secundário.

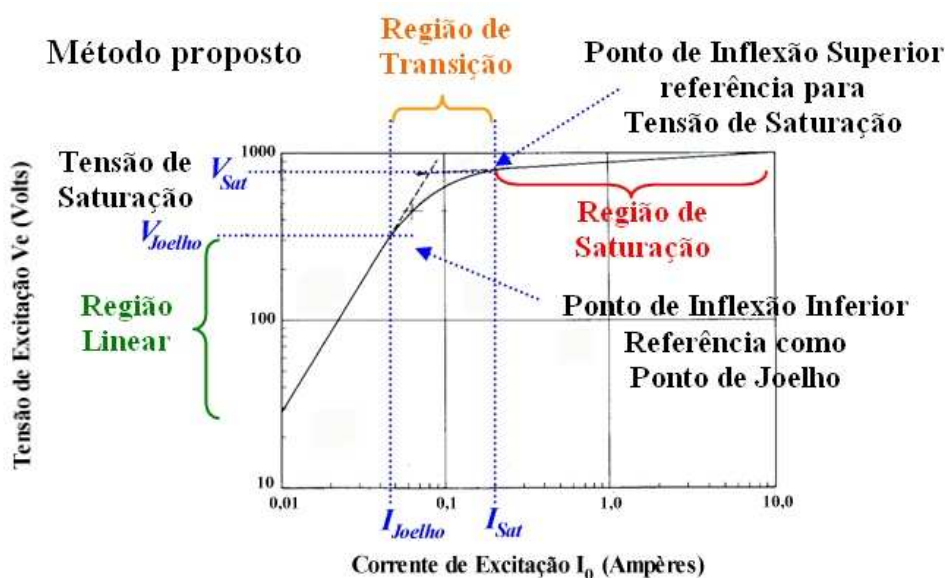


FIGURA 5 – Método proposto (4) para determinação do ponto de joelho e de saturação

2.2 Resultado da avaliação do fator de remanência K_r pelos diferentes métodos apresentados

Utilizando-se o TC6200377 descrito anteriormente, obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 1. A Figura 6 mostra o maior laço de fluxo obtido do TC ensaiado.

Tabela 1 – Valores obtidos do K_r para o TC6200377

TC6200377 – com entreferro			
IEEE/ANSI referência (V_x)	Método IEC	Método proposto	IEEE/ANSI referência (erro da classe de exatidão) Adotado pelos fabricantes *
$K_{rIEEE_Vx} \%$	$K_{rIEC} \%$	$K_{rInflexãoSup} \%$	$K_{rFluxMax} \%$
14,61	15,42	14,36	12,98

* independente do cálculo dos valores em pico ou eficaz, este permanece o mesmo valor.

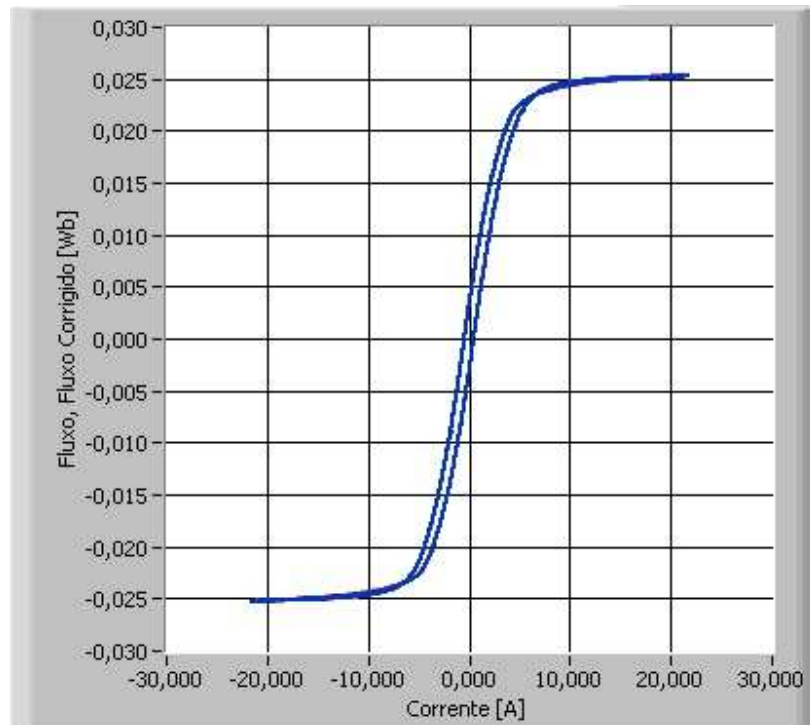


FIGURA 6 – Laço de Fluxo versus Corrente para determinar K_r

Dos resultados mensurados, tem-se o seguinte panorama:

- O maior valor de K_r obtido dentre os quatro procedimentos analisados foi justamente K_{rIEC} que segue os requisitos da IEC60044-6 (1).
- O segundo maior valor obtido de K_r foi K_{rIEEE_Vx} , que utiliza o ponto de saturação V_x como referência conforme a norma IEEE/ANSI e NBR (2, 3).
- O valor que apresentou o menor valor de K_r é o método que utiliza o último ponto da curva como referência (maior valor de fluxo de saturação Φ_s para o cálculo de $K_{rFluxMax}$).
- O método proposto (4), $K_{rInflexãoSup}$, não apresentou o menor valor de K_r , mas obteve um resultado mais próximo de 10% que os dois métodos referenciados por normas.

3.0 - CONCLUSÃO

Nesta análise experimental deste TC estudado, o método IEC (conforme a norma que define e propõe a metodologia para determinação do fator de remanência) é o que apresentou o maior valor de K_r (15,42 %) para TC com entreferro. Foi o pior dos valores avaliados de determinação do fator de remanência.

O fator de remanência para o fluxo máximo $K_{rFluxMax}$ naturalmente apresenta o menor valor porque utiliza o maior valor de fluxo de saturação.

Todos os resultados obtidos nestes ensaios apresentaram valores maiores do que os 10 % esperado para um TC TPY. No entanto, a norma não especifica a tolerância nesta percentagem de 10 %. Assim, fica mais um quesito a ser decidido pelo inspetor de ensaio ao aceitar ou não um TC quando for analisado o Fator de Remanência Magnética K_r .

4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) NORME INTERNATIONALE CEI – Instruments Transformers – Part 6 – Requirements for protective current transformers for transient performance. IEC - 60044-6 – 1992.

(2) IEEE Standard REQUIREMENTS FOR INSTRUMENT TRANSFORMERS - IEEE Std C57.13-1993 – March 4, 1994 (Revision of IEEE Std C57.13-1978).

(3) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. Transformador de Corrente – Especificação. NBR 6856, ABR./1992.

(4) Coelho, V. V. ESTUDO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE ALTA TENSÃO ATRAVÉS DA CURVA DE EXCITAÇÃO, da Dissertação de Mestrado, PGEEL, UFSC, Florianópolis, dezembro de 2011.

(5) Bandeira, M. I. C. AUTOMAÇÃO DO ENSAIO DE SATURAÇÃO EM TRANSFORMADORES DE CORRENTE UTILIZADOS EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Valci Vitor Coelho, nascido em 23/09/1961 na cidade de São José – Santa Catarina - Brasil, formou-se em engenharia elétrica em 1993 pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Em 2011, completou o Mestrado em Engenharia Elétrica no GRUCAD – Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos da UFSC. Trabalha desde 1982 na Eletrosul Centrais Elétricas, e atualmente é o responsável pelo Laboratório de Alta Tensão.



Nelson Jhoe Batistela nasceu em Xaxim, no Estado de Santa Catarina, em 1964. Formou-se Engenheiro Eletricista na UFSC em 1992, e realizou o Mestrado e o Doutorado nesta mesma universidade em 1994 e 2001, respectivamente. Integrou-se à UFSC em 2002 no cargo de professor no Departamento de Engenharia Elétrica. É Pesquisador do CNPq desde 2003.



João Pedro Assumpção Bastos nasceu em Porto Alegre, em 1952. Formou-se como Engenheiro Eletricista na UFRGS (1975) e fez seu Doutorado na Univ. Paris VI em 1980. Integrou-se à UFSC em 1984 e é atualmente Prof. Titular. Fundador do GRUCAD/UFSC, é pesquisador 1A do CNPq e Presidente Emérito da SBmag. Possui aprox. 300 artigos publicados em periódicos e conferências e é autor de quatro livros na área de Eletromagnetismo e Métodos Numéricos para Modelagem Eletromagnética.



Nelson Sadowski nasceu em 27/03/1959. Formou-se Engenheiro Eletricista (1983) e fez seu Mestrado (1985) na UFSC. Obteve seus diploma de Doutorado e HDR no Institut National Polytechnique de Toulouse em 1993 e 2000, respectivamente. Atualmente é Professor Titular da UFSC e pesquisador do CNPq.



Paulo Roberto Bernardes, nascido em 13/03/1973, formou-se em técnico em eletrotécnica em 1993 pela Escola Técnica Federal de Santa Catarina e Licenciatura em Matemática em 2011 pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Trabalha desde 1998 na Eletrosul Centrais Elétricas, atuando como técnico no Laboratório de Alta Tensão.