

## GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

### ANÁLISE E DIAGNÓSTICO DE TRANSFORMADORES DE CORRENTE SUJEITOS A FALHAS CRÍTICAS

**CARLOS KLEBER DA COSTA ARRUDA(1); ROGÉRIO MAGALHÃES DE AZEVEDO(1); LUIS ADRIANO DE MELO CABRAL DOMINGUES(1); RÔMULO DOS SANTOS DELGADO(1)**  
**CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA CEPEL(1)**

#### RESUMO

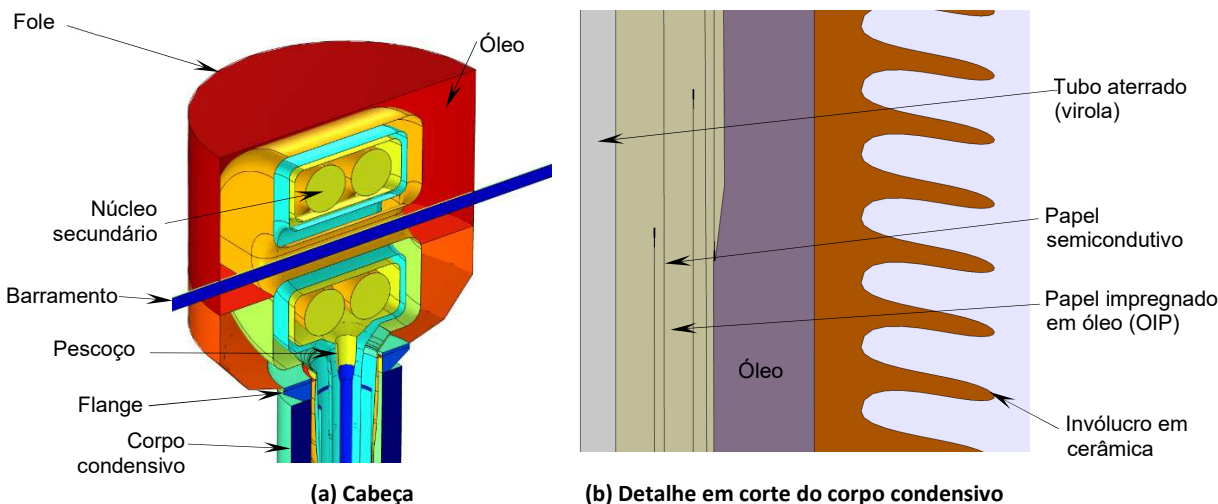
Empresas transmissoras vêm tendo problemas graves com um modelo de transformador de corrente (TC). A gravidade desses eventos levou ao desenvolvimento de estudos para análise do problema, em busca de um diagnóstico conclusivo que permita superar esses riscos. Este trabalho apresenta um modelo em elementos finitos do dielétrico do equipamento, buscando possíveis regiões críticas no projeto; modelo em ATP para resposta impulsiva; comparação com medições de resposta em frequência; e análise das interações do equipamento com o sistema, visando identificar possíveis sobreensões. Foi proposto um possível diagnóstico que aponta a causa raiz das falhas observadas e possíveis caminhos para evitar sua repetição.

#### PALAVRAS-CHAVE

Transformador de corrente, método de elementos finitos, ATP, resposta em frequência

#### 1 INTRODUÇÃO

O transformador de corrente do tipo *top core*, esquematizado na Figura 1, é composto basicamente por uma cabeça contendo os núcleos toroidais aterrados do secundário, envolvido por camadas de papel impregnado em óleo (*oil impregnated paper* - OIP) e papel semicondutivo (outora denominado *carbon black*). Este conjunto é parcialmente cimentado em epóxi na parte inferior da cabeça, sendo a parte superior preenchida com óleo. Este conjunto é suportado pelo corpo condensivo, contendo no seu núcleo aterrado a descida dos cabos do secundário e sendo envolvido por camadas de OIP, papel semicondutivo e folhas metálicas. Este conjunto de camadas do corpo condensivo permite uma equipotencialização entre a cabeça e a parte inferior do TC, e será o foco deste trabalho.



**Figura 1 – Diagrama esquemático dos principais componentes do TC tipo *top-core***

#### 2 INVESTIGAÇÃO DE FALHAS EM TCS

Uma série de notórias ocorrências em um determinado modelo de TC, motivou a investigação das possíveis causas. As ocorrências registradas são catastróficas, envolvendo exemplares com menos de 10 anos de uso. O Cepel, em conjunto com diversos agentes do setor elétrico, teve a oportunidade de realizar o estudo em alguns equipamentos, obtidos em diversas condições de uso. Os exemplares foram removidos do sistema e ensaiados no Laboratório de Alta Tensão, sendo realizada na sequência a dissecação e o levantamento dimensional da parte interna. Com base neste levantamento, foi realizada a modelagem numérica em elementos finitos e ATP. Esta metodologia foi sendo aprimorada ao longo do recebimento dos exemplares, sendo extensivamente documentada para seus clientes [1].

Durante o estudo no Cepel, puderam ser dissecados dois modelos de TCs, aqui denominados “Modelo 1” e “Modelo 2”, ambos de classe de tensão 550 kV e com projetos semelhantes. O Modelo 1 registrou falhas prematuras em diversas concessionárias, e o Modelo 2 é uma revisão de projeto, apresentando alterações dimensionais e se constatando um desempenho adequado. Uma das principais diferenças entre os modelos é no acabamento das terminações das camadas. No Modelo 1, as camadas de OIP, papel semicondutivo e metal, Figura 2a, são terminadas por uma dobra, cujo raio de curvatura é determinada pela espessura e pressão no papel, como visto na Figura 2b. No Modelo 2, constatou-se a presença de uma mola no interior de cada dobra, Figura 2c, o que assegura um maior raio de curvatura.

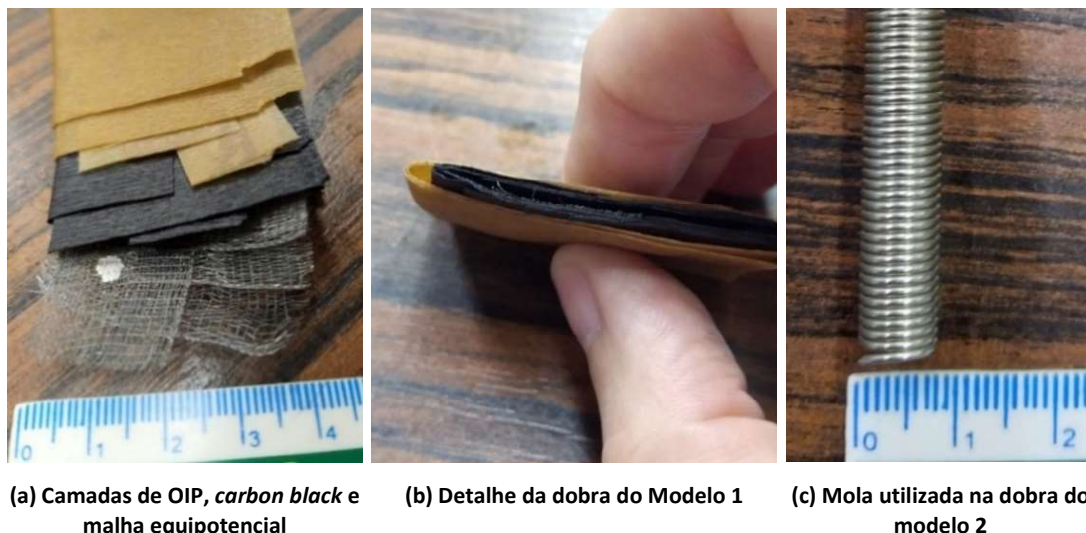


Figura 2 – Aspectos das terminações das camadas no corpo condensivo

### 3 MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS

Na análise do campo elétrico foi utilizado o software Comsol [2], aplicando um modelo em elementos finitos axissimétrico ( $2\frac{1}{2}$  D). O modelo básico para análise é o eletrostático, onde os materiais são caracterizados pelas suas permissividades. Para a análise em frequência, utilizou-se o modelo de corrente, incluindo as condutividades dos materiais. Os valores de permissividades e condutividades utilizados foram baseados em medições realizadas no Laboratório de Propriedades Elétricas do Cepel, além de registros de literatura, como [3].

A modelagem compreendeu no conjunto isolante (óleo, papel, cerâmica), entre as partes metálicas ao potencial (cabeça do TC) e o miolo aterrado, em cujo interior passam os cabos do secundário, que não foram considerados. Intercaladas com as camadas de papel, consideraram-se folhas de *carbon black* e malhas metálicas como potenciais flutuantes. Finalmente, considerou-se o ar exterior ao conjunto. A geometria axissimétrica considera metade do domínio, logo a cabeça consiste no potencial mas sem a presença do barramento.

A aplicação da malha foi focada nos detalhes geométricos com maior influência no resultado do campo elétrico, notadamente as dobras do OIP/ *carbon black* nas terminações de cada camada. O Modelo 1 apresenta 13 camadas de *carbon black*, sendo a camada 1 mais próxima do terra (miolo) e a camada 13 no potencial (conectada à cabeça). As camadas 1 a 10 possuem dobras em contato com óleo, e as camadas 11 a 13 as dobras estão cobertas por camadas de papel.

Como resultados, foram obtidos o campo elétrico na interface papel-óleo, *carbon black*-papel e metal-papel em todas as dobras e no pescoço. Adicionalmente, extraiu-se os valores de potencial flutuante em cada camada.

Na Figura 3a apresenta-se a vista geral do modelo geométrico utilizado nas simulações, assumindo simetria em torno do eixo vertical. O modelo axissimétrico ( $2\frac{1}{2}$  D) é o mais adequado para simulação em geometrias com as características deste TC, permitindo maior precisão na análise das regiões críticas para uma dada capacidade computacional.

Um ponto fundamental na distribuição de campo elétrico reside na colocação das fitas de *carbon black*, pois estas são determinantes na distribuição de potencial e campo elétrico. Há 13 folhas de *carbon black* no Modelo 1 e 9 folhas no Modelo 2, que ficam na interface entre papel e óleo ou entre camadas de papel. Por convenção definiu-se como camada “0” a camada mais interna, aterrada, e a última camada no potencial de linha. Todas as outras camadas são consideradas como potenciais flutuantes.

A modelagem compreende o conjunto isolante – óleo, OIP e *carbon black* - entre as partes metálicas ao potencial (cabeça do TC) e um miolo aterrado, com o tubo de alumínio em cujo interior passam os cabos do secundário, o corpo de porcelana e um volume de ar em torno do TC.

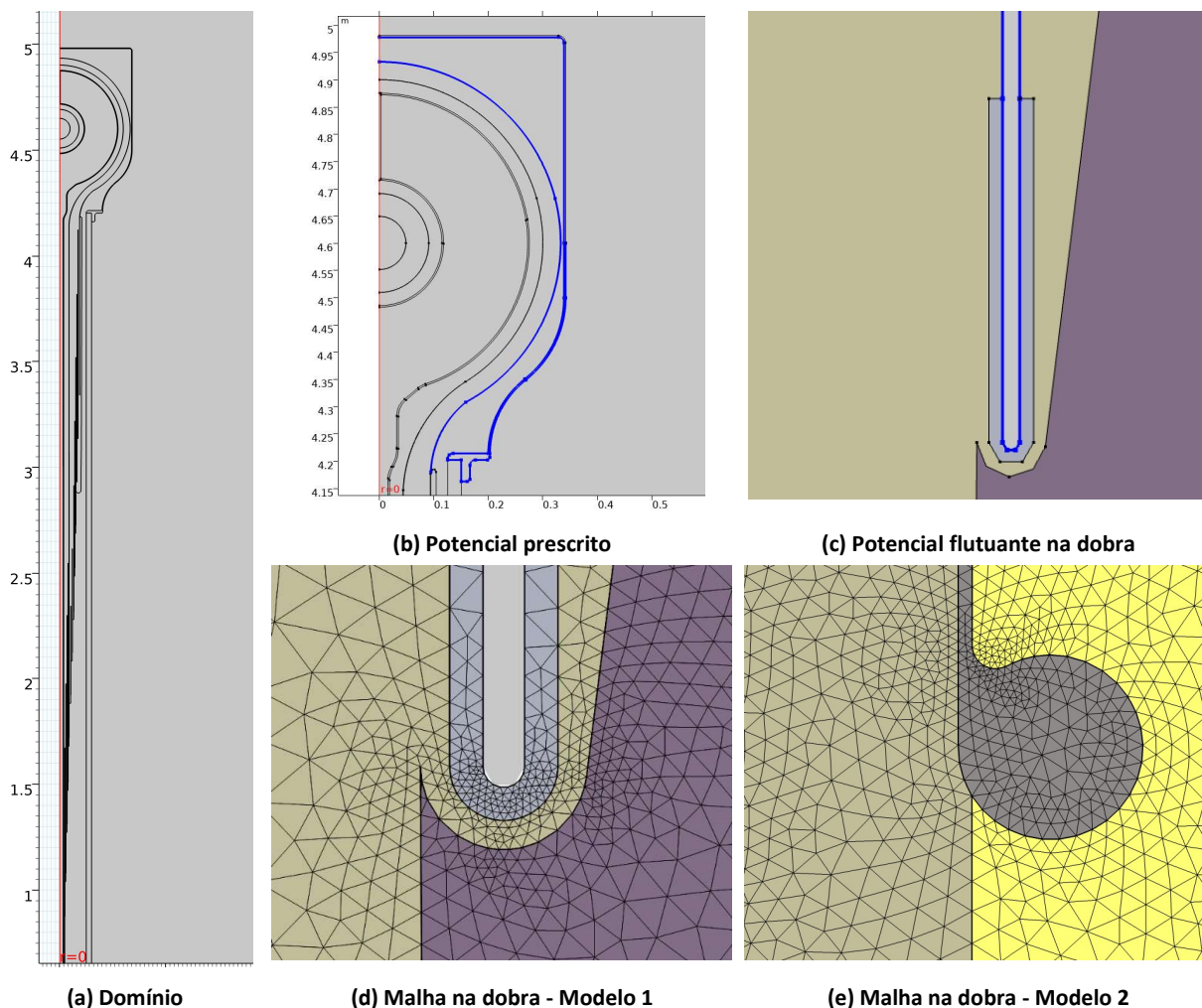


Figura 3 – Aspectos típicos do modelo em elementos finitos

Tabela 1. Características dos materiais modelados

	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
Ar	1	0
Papel com óleo (OIP)	2,9	$10^{-12}$
Porcelana	6,3	$10^{-12}$
Óleo	2,2	$10^{-12}$
Epóxi	3,5	$10^{-10}$

Na simulação, o foco principal foi determinar se há locais de concentração excessiva de campo elétrico, podendo superar a rigidez dielétrica dos materiais isolantes, podendo ser causa de descargas localizadas, evoluindo até a falha catastrófica.

Na Figura 4 apresenta-se a distribuição de potencial nas camadas para a tensão de linha de 550 kV, mostrando-se aproximadamente uniformes.

A Figura 5 corresponde a um mapa típico de campo elétrico próximo as terminações de uma camada. O valor máximo de campo corresponde à superfície, sendo assim extraiu-se perfis em cada dobra, Figura 6. No caso da dobra do Modelo 2 parte do perfil encontra-se com contato com o papel, provocando uma descontinuidade no gráfico.

A solução do modelo de campo elétrico é determinada particularmente sobre os contornos, sendo fortemente influenciados pelas permissividades dos domínios. Sabendo-se que o campo elétrico normal na fronteira entre dois meios dielétricos é determinado pela relação inversa das permissividades:

$$\frac{E_{n1}}{E_{n2}} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (1)$$

Como exemplo a Figura 7, consiste em um estudo paramétrico sobre a variação na relação entre permissividades do papel *kraft* e do óleo. Observando o caso base igual a 2,2 para o óleo e 2,9 para o OIP, pode-se notar uma variação de cerca de 100% nos valores máximos de campo elétrico em função da variação na permissividade do papel entre 2,2 e 4.

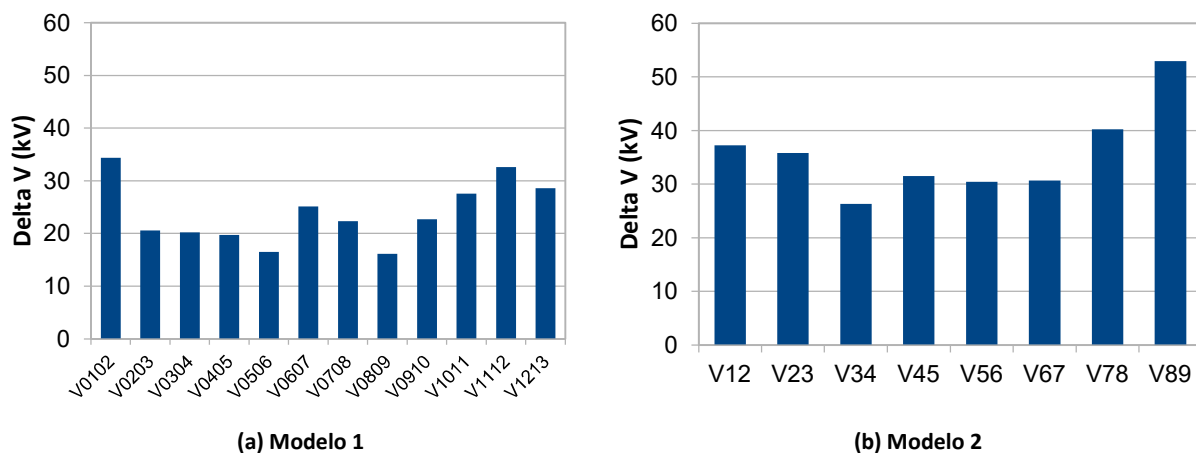


Figura 4 - Diferença de potencial entre as camadas

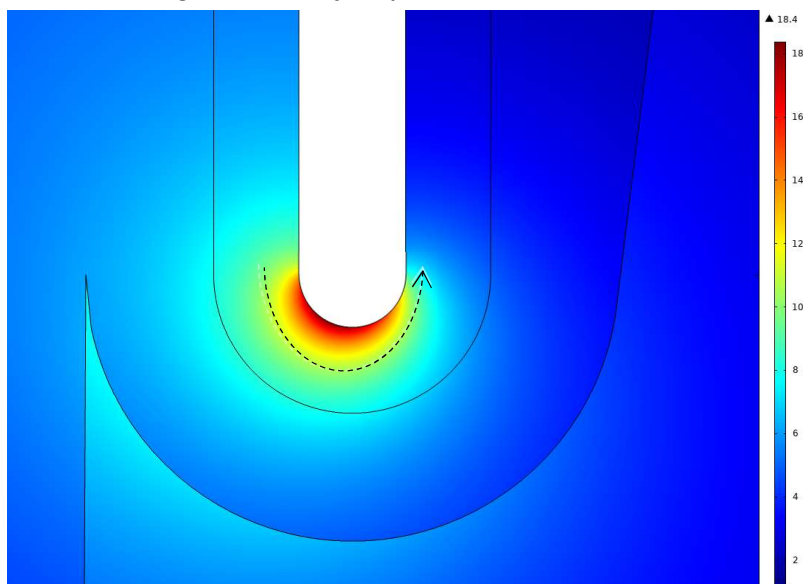


Figura 5 – Exemplo de mapa de intensidade de campo elétrico (kV/mm) próximo a dobra, e convenção do perfil (tracejado)

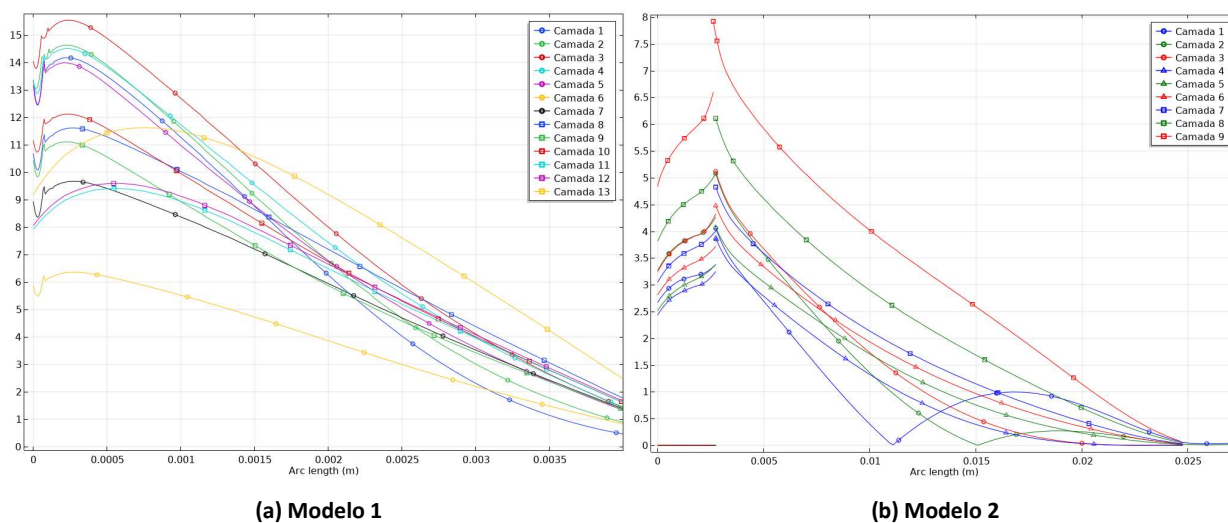


Figura 6 - Campo elétrico na superfície das dobras (kV/mm)

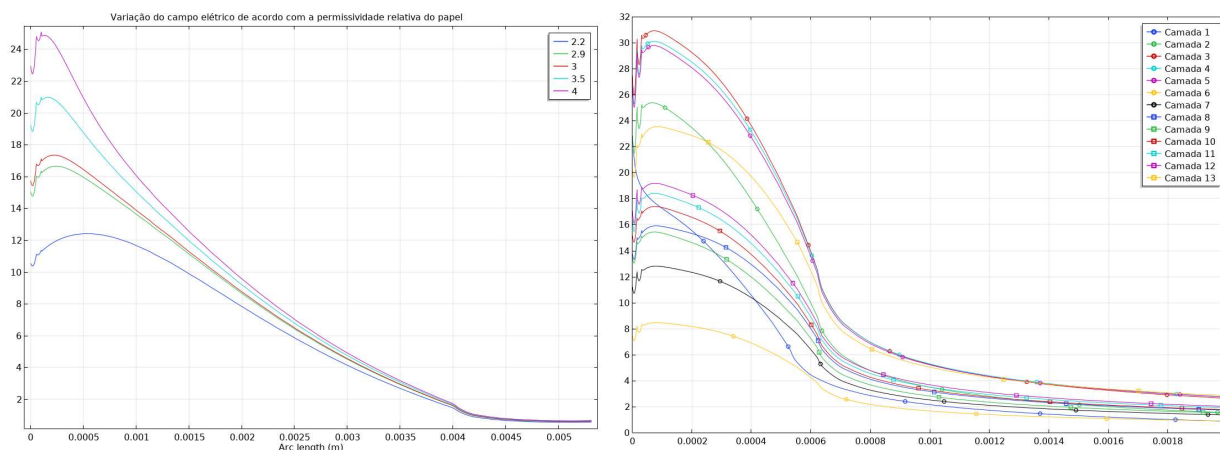


Figura 7 - Variação de perfil de campo elétrico em função da permissividade do papel

Esta análise chama a atenção para a influência que alterações nas características dos materiais, em função de condições de uso, temperaturas, e outros fatores podem ter no desempenho dos equipamentos.

Estima-se que a variação dos campos elétricos superficiais em função da geometria seja coerente com a realidade, partindo-se da premissa da dobra no Modelo 1 de 1 mm. Considerando que o vinco da dobra não é controlado como no modelo 2, o campo pode assumir valores mais elevados. A Figura 8 demonstra os valores de campo para uma borda de 0,2 mm.

De modo geral pode-se dizer que os campos máximos nos dois modelos ocorrem, conforme esperado, nas dobras do *carbon black*, porém as intensidades são significativamente maiores (cerca do dobro) no Modelo 1 do que no Modelo 2, o que é coerente com a diferença dos raios de curvatura nas dobras, onde no Modelo 2 a colocação das molas garante uma curvatura muito mais favorável.

Este ponto é de fundamental importância pois, conforme se pode perceber pela Figura 2b, o procedimento utilizado na dobra do *carbon black* no Modelo 1 dificilmente pode garantir um raio de curvatura preciso, podendo haver variações em função da montagem e condições de operação, o que causar variações expressivas nos valores



máximos de campo, com impacto direto no desempenho do equipamento. No caso do Modelo 2 é razoável assumir que a mola garanta uma raio de curvatura mais estável e um campo elétrico mais controlado.

#### 4 MODELAGEM EM ATP

##### 4.1.1 Modelagem detalhada

A modelagem detalhada do TC baseou-se em modelos de buchas capacitivas utilizados, principalmente, em estudos de *Very Fast Transient Overvoltage* (VFTO) [4]. As formulações foram utilizadas para representar o corpo condensivo do TC e adaptadas para a modelagem da parte ativa ou núcleo.

O modelo considera que cada camada é dividida em um número de seções que depende do seu comprimento e da presença de *carbon black* em relação à camada interna. Em seguida, cada seção é representada por um modelo “ $\pi$ ” equivalente, cuja indutância e capacitância, por unidade de comprimento, são calculadas pelas equações:

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{R}{r} \quad (2)$$

$$C' = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r \left( \ln \frac{R}{r} \right)^{-1} \quad (3)$$

onde  $R$  e  $r$  são os raios externo e interno de cada camada,  $\mu_0$  é a permeabilidade no vácuo ( $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m),  $\epsilon_0$  é a permissividade no vácuo ( $8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m) e  $\epsilon_r$  é a permissividade relativa do OIP, igual a 2,9.

A parte ativa do TC foi modelada de maneira equivalente, linearizando seu comprimento. Assim, os parâmetros dos cilindros equivalentes foram calculados pelas equações acima e suas extremidades conectadas ao corpo condensivo do TC. Outras características do TC também foram consideradas no modelo. A camada mais externa de equalização é conectada à cabeça metálica do TC por cabos, que foram representados por indutâncias, estimadas a partir de dados típicos de 1 a 2  $\mu$ H/m. As perdas elétricas e dielétricas, representadas por resistores, e a capacitância externa ao longo da coluna de isolador também foram adicionadas ao modelo, inicialmente, considerando valores típicos e, posteriormente, ajustados de modo a reproduzir as medições de resposta em frequência e de aplicação de impulso. A Figura 9 mostra a representação gráfica completa do modelo no programa *ATPDraw*.

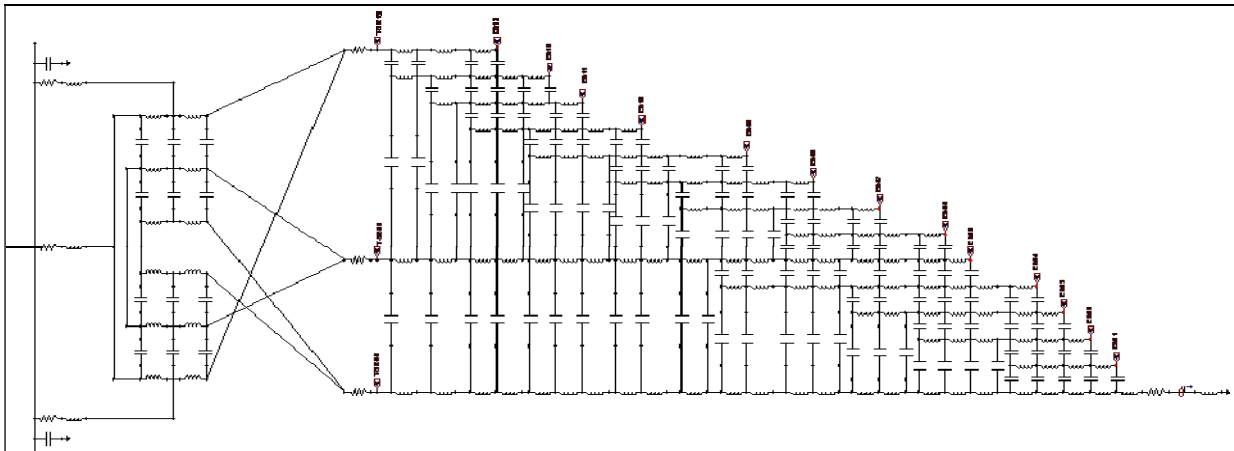


Figura 9 - Modelo detalhado do TC representado no programa *ATPDraw*

##### 4.1.2 Modelagem simplificada

Para validação do modelo detalhado, comparou-se medições experimentais realizadas pelo Cepel no LabDig, resposta em frequência (impedância) e aplicação de impulsos, com as respectivas simulações [5]. A Figura 10 ilustra as medições de magnitude e ângulo da impedância do TC.

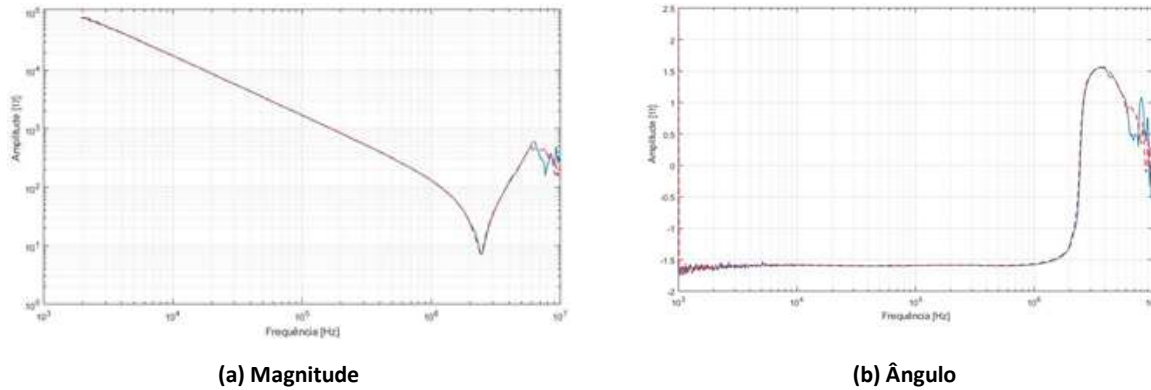


Figura 10 – Medições de resposta em frequência em um TC

Pode-se observar um comportamento capacitivo até, praticamente, 1 MHz, ou seja, uma representação puramente capacitiva até esta frequência já seria suficiente, correspondente a um valor de 850 pF. Um segundo modelo também pode ser elaborado, considerando a ressonância em 2,5 MHz e representando o TC por um circuito RLC série.

A partir desses dados e daquelas considerações do modelo detalhado, elaborou-se um modelo simplificado do TC, Figura 11, onde  $C_e$  é a capacitância externa,  $L$  representa os condutores de conexão ao toróide e  $R$ ,  $LR$  e  $CR$  são os parâmetros ajustados para este modelo.

A Figura 12 apresenta a resposta em frequência obtida no ATP (rotina FSCAN) dos modelos apresentados. A Figura 13 mostra uma comparação da simulação de um strike durante manobra de chave seccionadora, considerando os modelos detalhado e simplificado. Pode-se notar que, praticamente, não há diferença entre as correntes e tensões obtidas com os dois modelos.

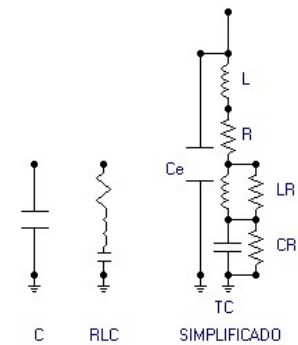


Figura 11 - Representação do TC por modelos simplificados

#### 4.1.3 Medições e simulações de aplicação de impulso

Para avaliar os modelos desenvolvidos, foi necessária a modelagem de todo o circuito de ensaio, compreendendo o gerador de impulso, *gap* para corte da onda, divisor de tensão e conexões. A Figura 14 apresenta esta modelagem.

Foram realizadas medições de corrente, que fluem pelo aterramento do TC, com um *shunt* e um HFCT (*High frequency current transformer*), e de tensão, durante aplicação de um impulso  $1,2 \times 50 \mu s$  com corte na cauda em 2  $\mu s$ . A Figura 15 apresenta uma sobreposição das medições simulações de aplicação de onda cortada.

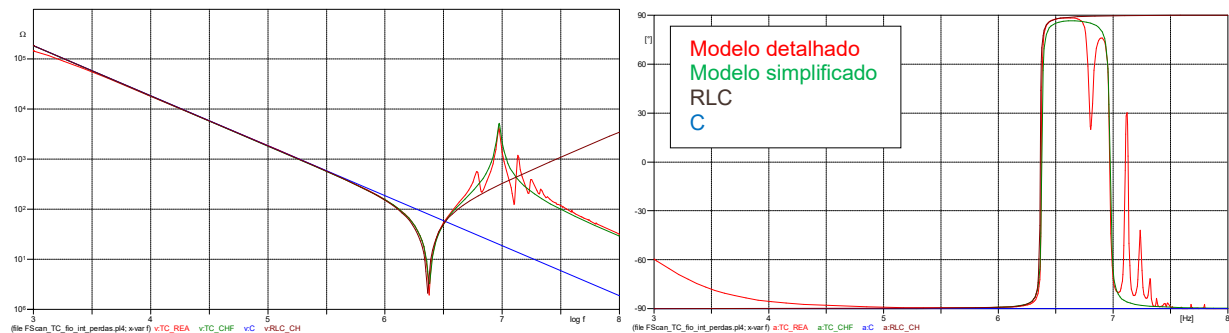


Figura 12 - Resposta em frequência dos modelos apresentados

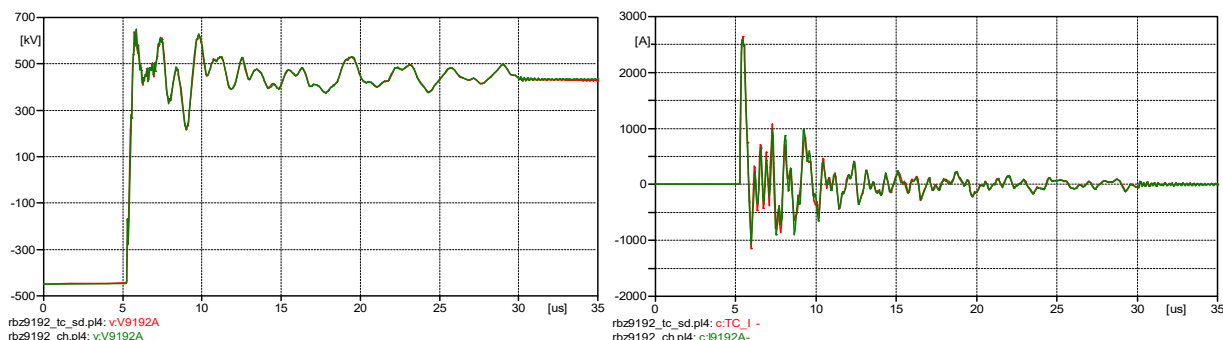


Figura 13 - Comparação entre os modelos detalhado (vermelho) e simplificado (verde), mostrando tensão e corrente no TC

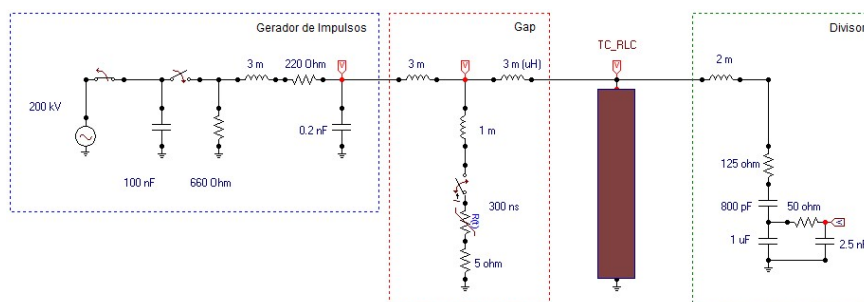


Figura 14 - Modelagem do circuito de aplicação de impulsos no TC

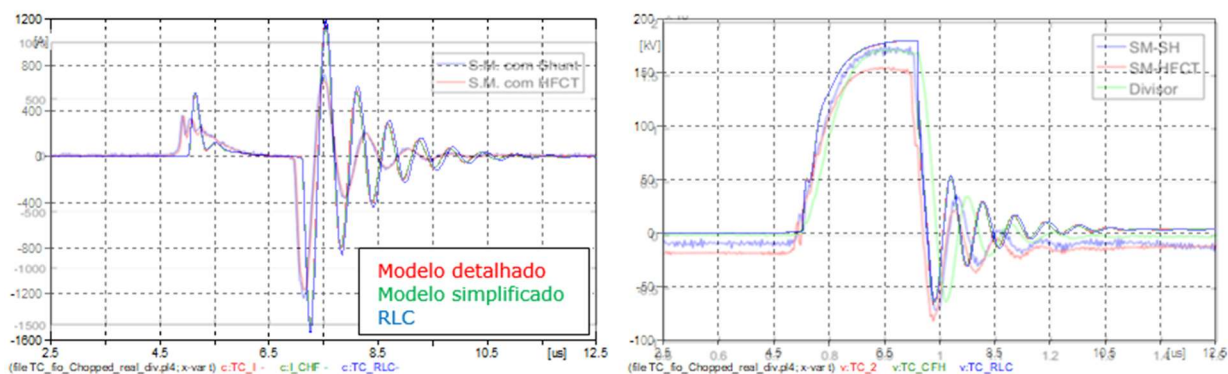


Figura 15 - Simulação e medição de aplicação de onda cortada no TC

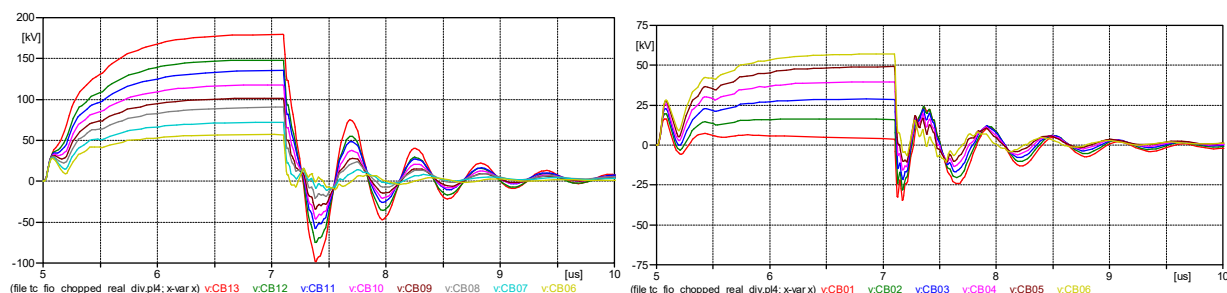


Figura 16 - Distribuição de tensão no TC para aplicação de impulso de onda cortada

#### 4.1.4 Distribuição interna da tensão no TC

O modelo detalhado do TC também permite a verificação da distribuição de tensão ao longo das camadas de equalização. Isto é mostrado na Figura 16, considerando a simulação de aplicação de onda cortada.

A Figura 17 mostra o resultado da simulação de um strike gerado durante a manobra de uma chave seccionadora próxima ao TC em uma subestação. Assim como na simulação de impulso cortado, a distribuição da sobretensão é linear, não apresentando ressonâncias internas.



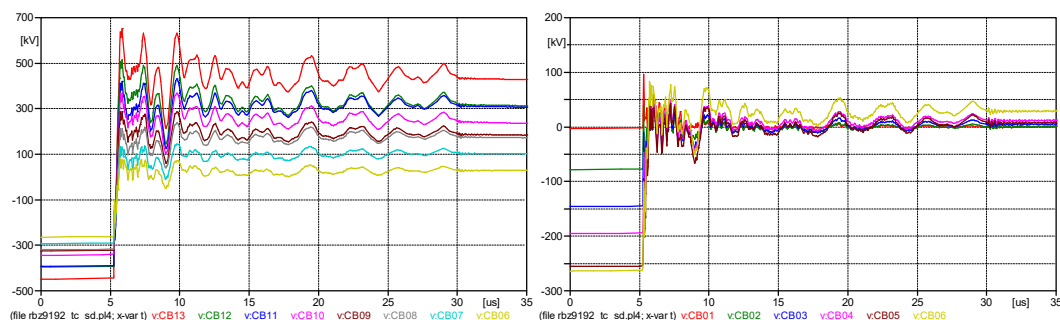


Figura 17 - Distribuição da tensão no TC para simulação de um *strike* durante manobra de chave seccionadora

## 5 CONCLUSÕES

O levantamento dimensional do TC, realizado nos laboratórios do Cepel em Adrianópolis, possibilitou a modelagem detalhada deste equipamento para avaliação dos campos elétricos e transitórios eletromagnéticos.

A distribuição de potenciais nas folhas de *carbon black* é quase linear nos dois modelos, o que é favorável ao desempenho dos equipamentos. As diferenças de potencial entre camadas adjacentes, contudo, apresentam variações nos dois casos, mas os valores não são preocupantes considerando as distâncias e isolamento envolvidos.

Analisando as distribuições de campo elétrico, os locais mais críticos são as bordas do *carbon black*, e em menor grau, a região do pescoço. Os valores de campo nessas bordas são elevados no Modelo 1, podendo atingir valores próximos da rigidez dielétrica, e mais baixos no Modelo 2, conforme se registrou anteriormente, por conta da garantia do arredondamento das bordas pela presença da mola.

A análise das permissividades relativas aponta, conforme esperado, que a situação mais favorável ocorre quando as permissividades dos materiais adjacentes são iguais ou muito próximas. Se essas permissividades diferirem, sempre ocorrerão valores mais elevados de campo elétrico no material com menor permissividade. Nesta simulação verifica-se que variações das permissividades do óleo e OIP, dentro das faixas normais de variação, originam valores de campo elétrico que superam, em diversos locais, a suportabilidade dielétrica do óleo isolante.

Outra hipótese, não considerada neste estudo, consiste na variação das propriedades dos papéis isolantes utilizados, não necessariamente devido a desgastes ou quaisquer outros processos físico-químicos, mas originada nos processos fabris, ou seja, já presentes no equipamento desde o início da sua vida útil. Tal aspecto pode justificar as ocorrências de falhas catastróficas em um curto espaço de tempo de operação.

Em relação à modelagem para programas de transitórios eletromagnéticos, a partir de medições de resposta em frequência e aplicação de impulsos, realizadas pelo Centro, foi possível validar os modelos apresentados, comparando as simulações no programa ATP com as respectivas medições. Além disso, o modelo detalhado, construído a partir das informações geométricas do equipamento, possibilitou a avaliação da distribuição interna de tensão ao longo das camadas de equalização do TC. Nos exemplos mostrados, aplicação de impulso e manobra de chave seccionadora em um bay típico de uma subestação de 500 kV, nota-se que a distribuição das sobretensões transitórias é linear, sem ocorrência de ressonâncias internas ou tensões que possam comprometer a isolamento do equipamento. Cabe ressaltar que outros aspectos também têm sido levantados para a análise deste problema, como o efeito na isolamento dos múltiplos impulsos de tensão, além das correntes transitórias que circulam pelo equipamento durante a manobra de seccionadoras [6].

## 6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Associação Brasileira de Empresas de Transmissão de Energia Elétrica – Abrate, pela coordenação da Força-Tarefa de Manutenção (FTM), tornando possível estes estudos.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CEPEL. Relatórios técnicos (acesso restrito), 2019-2021.
- [2] COMSOL AB. COMSOL Multiphysics 5.6 (Build 280), 2020.
- [3] BRANDÃO, D. P. L., "Tecnologia da Eletricidade - Materiais usados em Electrotecnia", Fundação Calouste Gulbenkian.
- [4] ARDITO, A., et al "Accurate Modeling of Capacitively Graded Bushings for Calculation of Fast Transient Overvoltages in GIS", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.7, No.3, July 1992.
- [5] SOUZA, D. S. et al. Medição Indireta de Sobretensões Transitórias em Transformadores de Corrente Tipo Top Core Através da Corrente que Flui para a Terra, XXV SNPTEE, GSE-09, Belo Horizonte, 2019.
- [6] SPRESSOLA, F. E., MARTINS, H. J. A., ANDRADE, J. G. B. M. Efeito dos Transitórios Rápidos gerados por manobra de seccionador sobre transformadores de corrente do tipo Top-Core, XXV SNPTEE, GSE-10, Belo Horizonte, 2019.

## DADOS BIOGRÁFICOS



### CARLOS KLEBER DA COSTA ARRUDA

Formado em Engenharia Industrial Elétrica pelo CEFET-RJ (1999), mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela UFRJ (2003, 2012). Atualmente é pesquisador do CEPEL no Departamento de Gestão de Ativos. Tem experiência em pesquisa de modelos computacionais aplicados em linhas de transmissão e equipamentos, campos eletromagnéticos, aterramento, descargas atmosféricas e confiabilidade aplicada a subestações.

### ROGÉRIO MAGALHÃES DE AZEVEDO

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais em 1990 e recebeu o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1993. É pesquisador do CEPEL, no Departamento de Gestão de Ativos, atuando nas áreas de coordenação de isolamento, transitórios eletromagnéticos e estudos de sistemas em UATCA e HVDC.

### LUIS ADRIANO DE MELO CABRAL DOMINGUES

Engenheiro Eletricista, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1980. M.Sc. PUC (Pontifícia Universidade Católica – Rio de Janeiro) – Aplicação de técnicas de previsão no estudo da temperatura de cabos condutores de Linhas de Transmissão. Pesquisador no Departamento de Gestão de Ativos – CEPEL, trabalhando com modelagem e cálculo de campos eletromagnéticos aplicados a Linhas de Transmissão e Equipamentos; estudos do efeito corona e fenômenos de indução; análises de confiabilidade de equipamentos e sistemas. Diversos artigos publicados em Seminários Nacionais e Internacionais, incluindo Sessão Bienal Cigré 2010, BEMS e ICNIRP.

### RÔMULO DOS SANTOS DELGADO

Graduado em Engenharia Elétrica pela UniFOA – Centro Universitário de Volta Redonda (2011). M.Sc. em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ (2018). Pesquisador do CEPEL desde Jan/2015. Atuou no Laboratório de Diagnóstico em Equipamentos e Instalações Elétricas na utilização de técnicas de inspeção não invasivas e medições de transitórios eletromagnéticos de alta tensão. Atualmente faz parte da equipe dos Laboratórios de Alta Corrente e Alta Potência na unidade Adrianópolis.