



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

BR/GTM/02
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO -XIII

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES -
GTM**

**MODELAGEM NUMÉRICA DE CAMPO ELÉTRICO EM TRANSFORMADOR DE 550KV ATRAVÉS DOS
MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS 3D E DO "CUMULATIVE STRESS" DE RELUTÂNCIAS**

**Anderson Santos (*)
ESSS**

**Diogo Fernando Harmel
WEG T&D**

RESUMO

Considerando-se a importância do transformador no contexto de sistemas de potência e a complexidade em avaliar seu sistema interno de isolamento, este trabalho visa aplicar o método "*cumulative stress*" e o MEF 3D em uma saída de um transformador com tensão máxima de 525kV. São apresentados o método "*cumulative stress*", os modelos numéricos e os resultados obtidos.

PALAVRAS-CHAVE

Elementos Finitos, Campo Elétrico, Transformador, Sistemas de Potência, "*cumulative stress*"

1.0 - INTRODUÇÃO

O nível de segurança nos sistemas de transmissão depende do perfeito funcionamento dos vários elementos nele inserido, e, dentre estes, os transformadores podem ser destacados como um dos principais equipamentos. (3) Esta necessidade faz com que os fabricantes busquem cada vez mais "*know how*" e tecnologias capazes de auxiliar o desenvolvimento de equipamentos com a melhor performance dielétrica possível.

Uma forma efetiva de controlar a probabilidade de falha em transformadores é através da análise de seu sistema interno de isolamento (avaliação de geometrias, dutos de óleo, blindagens e barreiras isolantes). (7) Para tal, considera-se que a distribuição interna de tensão ao longo do conjunto de enrolamentos já é conhecida, pois será aplicada em forma de condições de contorno no MEF (Método de Elementos Finitos) (1). A metodologia para obtenção da distribuição de tensão é bem difundida e está disponível em referências clássicas, como em (7), (5), (4) e (6).

De posse de um método para a análise numérica, que é o MEF 3D, utiliza-se o método "*Cumulative Stress*" para avaliar a probabilidade de falha em determinadas regiões de interesse. Este método é aplicado na validação técnica do projeto elétrico dos transformadores durante a etapa de "*design review*" definida em 2002 pelo grupo de trabalho do Cigre 12.22. (2) Conforme especificado por algumas concessionárias de energia, o fabricante do transformador deve apresentar a análise da distribuição de campo elétrico nos enrolamentos do transformador.

Mesmo o método "*cumulative stress*" sendo largamente difundido, este artigo tem objetivo de apresentar este método através de uma abordagem acessível, além de aplicá-lo em casos práticos com complexidade razoável, nos quais se fazem necessários modelos tridimensionais.

2.0 - MÉTODO "CUMULATIVE STRESS"

A técnica "*cumulative stress*" consiste em quantificar os valores de campo elétrico cumulativo ao longo de um caminho pré-definido, com o propósito de evidenciar o possível caminho de descargas elétricas, as quais podem ocorrer em dutos entre os enrolamentos, nas superfícies dos cilindros ou anéis isolantes e nos condutores

isolados com papel, com maior probabilidade de surgimento nas regiões de maior concentração de campo elétrico pontual.

Antecedendo a aplicação do "*cumulative stress*", faz-se necessária a simulação numérica para obter a distribuição de potencial elétrico, e consequentemente de campo elétrico, ao longo do domínio em estudo. Com esta distribuição, a primeira etapa consiste em definir o caminho a ser analisado conforme a Figura 1 .

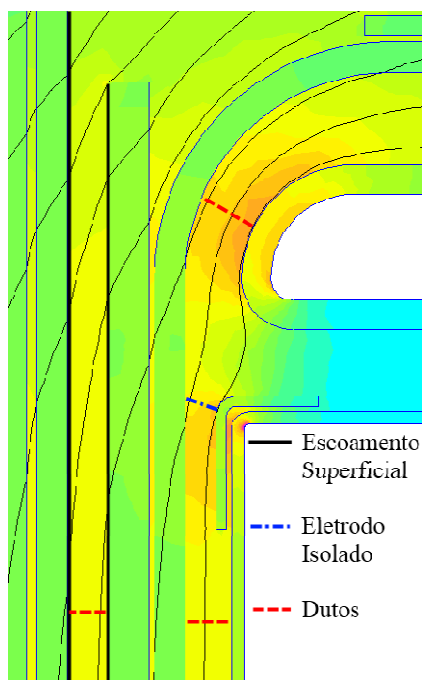


Figura 1 - Caminhos para aplicação do método "*cumulative stress*"

De posse de um caminho a ser avaliado, obtém-se uma tabela com os valores de distância e potencial de cada ponto deste caminho, conforme as 4 primeiras linhas da Figura 2 . Na sequência, são calculados todos os valores de campo elétrico entre estes pontos e o método de cálculo "*cumulative stress*" inicia no ponto com maior campo elétrico, Figura 2 - Passo 1. (7) O incremento do caminho de descarga está baseado na verificação dos possíveis caminhos para a continuidade desta descarga, o que é evidenciado através dos passos 2 e 3, da Figura 2 .

Desta forma os valores de campo elétrico cumulativo são obtidos ao longo do caminho definido. Os "*" indicam o incremento do caminho de descarga.

Ponto	1	2	3	4	5
Caminho	●	●	●	●	●
Tensão [kV]	64	58	50	38	35
Distância [mm]	2	4	6	8	10
E [kV/mm] Passo 1	3	4	6	1.5	
E [kV/mm] Passo 2		5	*	*	3.75
E [kV/mm] Passo 3	*	*	*	3.83	

Figura 2 - Caminhos para aplicação do método "*cumulative stress*"

Os valores de campo elétrico cumulativo definem a condição dielétrica de determinada estrutura, porém a probabilidade de falha é definida pela margem de segurança (MS), dada pela mínima relação entre os valores de campo elétrico cumulativo e os valores suportáveis definidos pelas "*design curves*", propostas em (8).

3.0 - MODELO NUMÉRICO

3.1 Geometria

O modelo em análise é uma saída de Alta Tensão de um transformador com tensão máxima de 525kV, isolado a óleo mineral, e suas principais partes podem ser verificadas através da Figura 2 , sendo - (1) enrolamento, (2) isolamento do enrolamento, (3) tanque, (4) shield para conexão com a bucha, (5) tubo de saída e (6) isolamento do tubo de saída. Tal geometria contém simetrias, afim de reduzir o esforço computacional necessário à simulação. Com este mesmo fim, este modelo é dividido em duas partes, uma para a região do enrolamento, Figura 2 , e outra para a região do tubo de saída, Figura 2 .

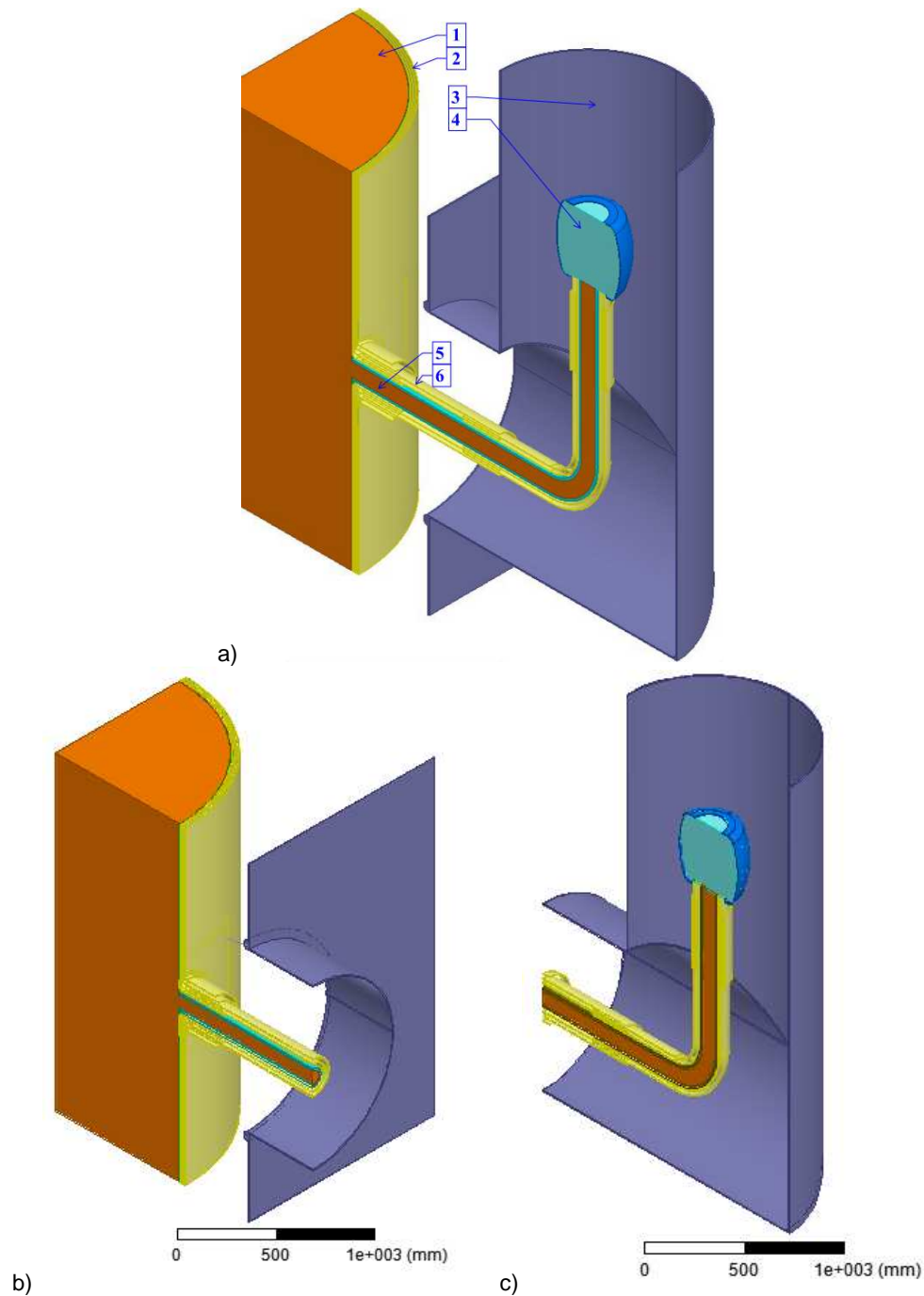


Figura 3 - Modelo 2D

a) Modelo completo, b) Modelo para região do enrolamento e c) Modelo para a região do tubo

3.2 Modelagem numérica

As equações de Maxwell são as leis físicas que regem os campos eletromagnéticos e constituem um sistema de equações de derivadas parciais. Uma delas, a Lei de Gauss para a eletrostática, é dada na Equação (1) . A Equação (2) define a da relação constitutiva para materiais dielétricos.

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \mathbf{E} \quad (2)$$

O campo elétrico é dado por -

$$\mathbf{E} = -\nabla \Phi \quad (3)$$

Onde ε_0 é a permissividade dielétrica do vácuo (F/m), ε_r é a permissividade dielétrica relativa e ρ_v é a densidade volumétrica de carga (Q/m³).

Aplicando-se (3) e (2) e em (1), obtém-se Equação de Poisson para o potencial escalar elétrico Φ , (4).

$$\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \Phi) = -\rho_v \quad (4)$$

Porém nesta aplicação a densidade volumétrica de carga é considerada nula, resultando-se em (5), que é resolvida numericamente através do MEF 3D. Para tal é utilizado um pacote computacional comercial, (9).

$$\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \Phi) = 0 \quad (5)$$

3.3 Características da malha e simulação

As malhas geradas para ambos os modelos são apresentadas na Figura 4, sendo que ambas contêm aproximadamente 2.5 milhões de tetraedros. Para a definição da qualidade das malhas, são configurados os parâmetros de relação de aspecto e desvio normal dos elementos. Também é adicionado o parâmetro de energia em determinadas regiões, como variável de otimização no processo de malha adaptativa.

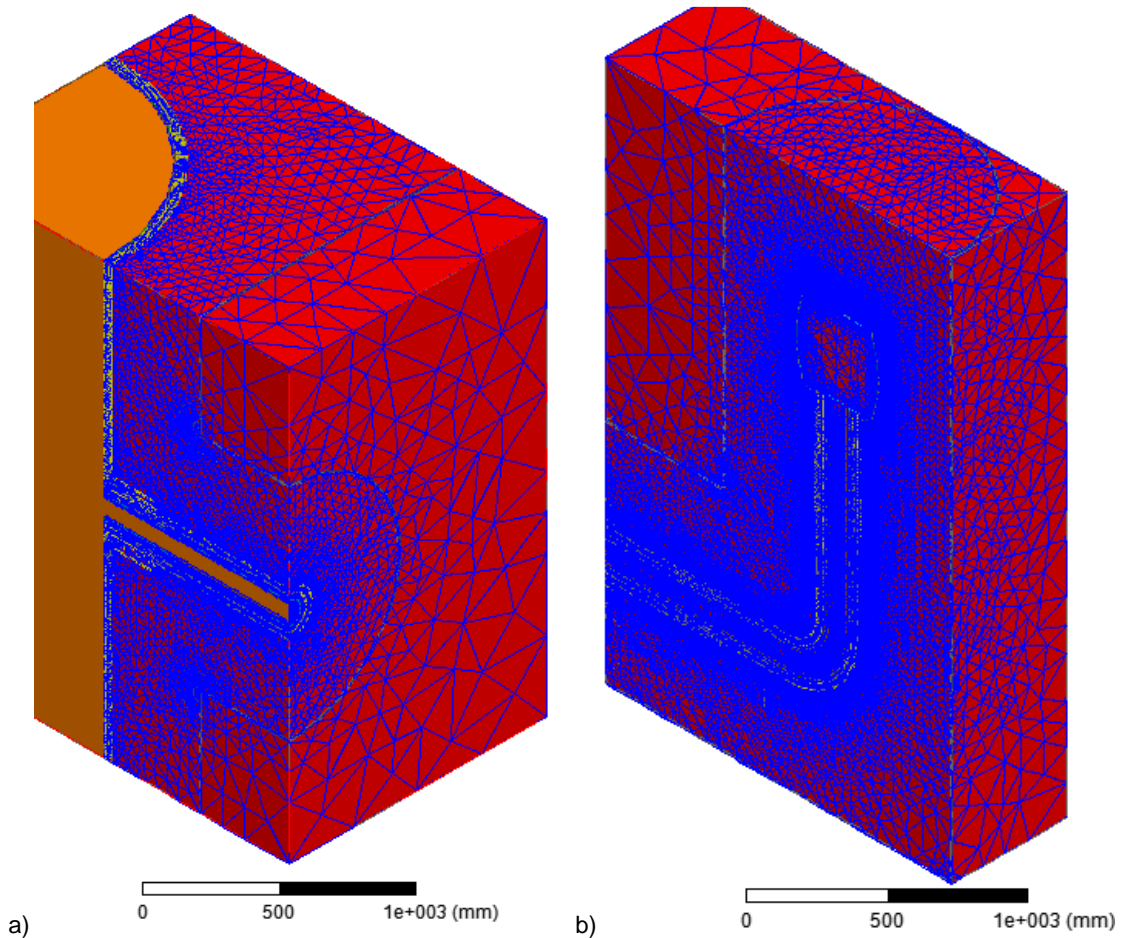


Figura 4 - Malhas - a) Malha para região do enrolamento e b) Malha para região do tubo

O tempo de simulação de cada um dos modelos propostos é de, aproximadamente, 40 minutos e o consumo de memória é de 36GB, em uma estação de trabalho com 48GB de memória RAM e 12 núcleos de 3.33 GHz.

4.0 - RESULTADOS

Tendo-se em vista que os modelos apresentados possuem muitas regiões a serem analisadas, somente alguns resultados são apresentados como exemplos da aplicação do método "*cumulative stress*".

Conforme mencionado no Capítulo 2, faz-se necessário definir os possíveis caminhos de descarga, definidos por valores de campo elétrico. No caso da Figura 5, tais caminhos são definidos pela quantidade de linhas equipotenciais que atravessam as superfícies dos materiais isolantes.

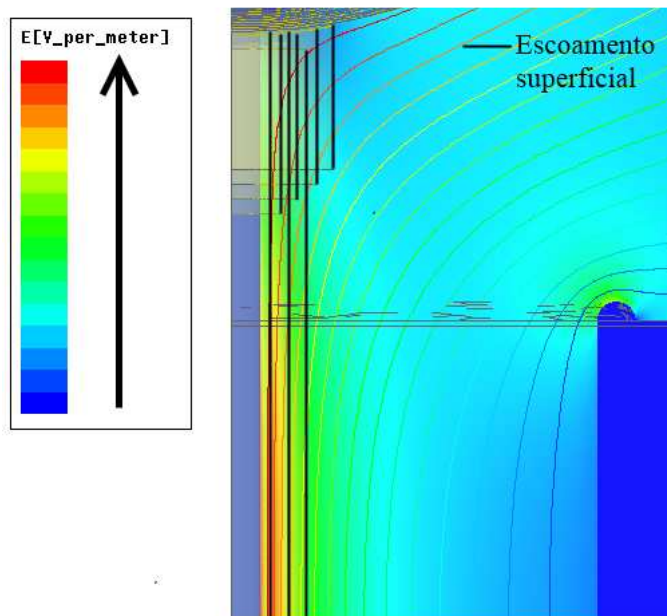


Figura 5 - Campo elétrico e caminhos para possíveis descargas superficiais

Para a aplicação do "*cumulative stress*", precisa-se definir os vetores de tensão ao longo dos caminhos, apresentados na Figura 6. Na Figura 7 são apresentados os resultados da aplicação do método apresentado.

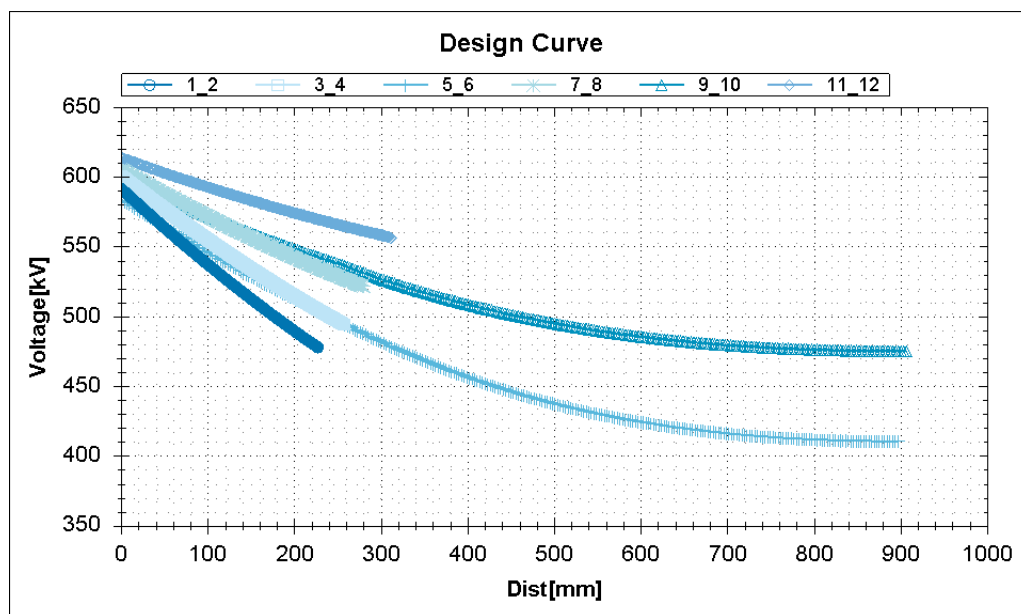


Figura 6 - Tensões ao longo dos caminhos

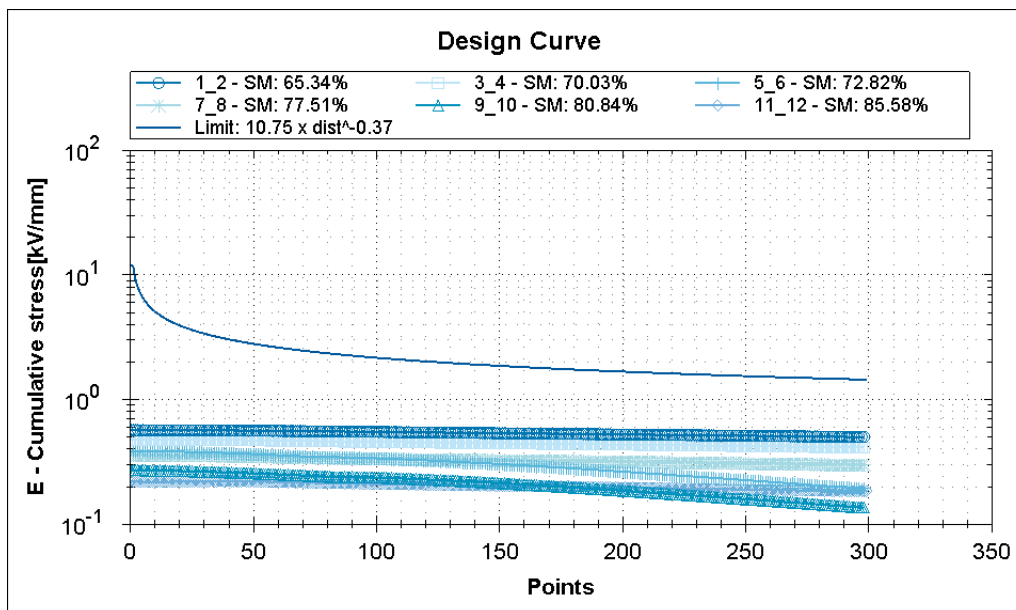


Figura 7 - Resultados obtidos com o "cumulative stress"

Os resultados abaixo apresentados são referentes a aplicação do método "cumulative stress" em dutos de óleo, ao invés de superfícies, como apresentado nos resultados acima.

Nas Figuras 9 e 10 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do método "cumulative stress" ao longo dos caminhos apresentados na Figura 8.

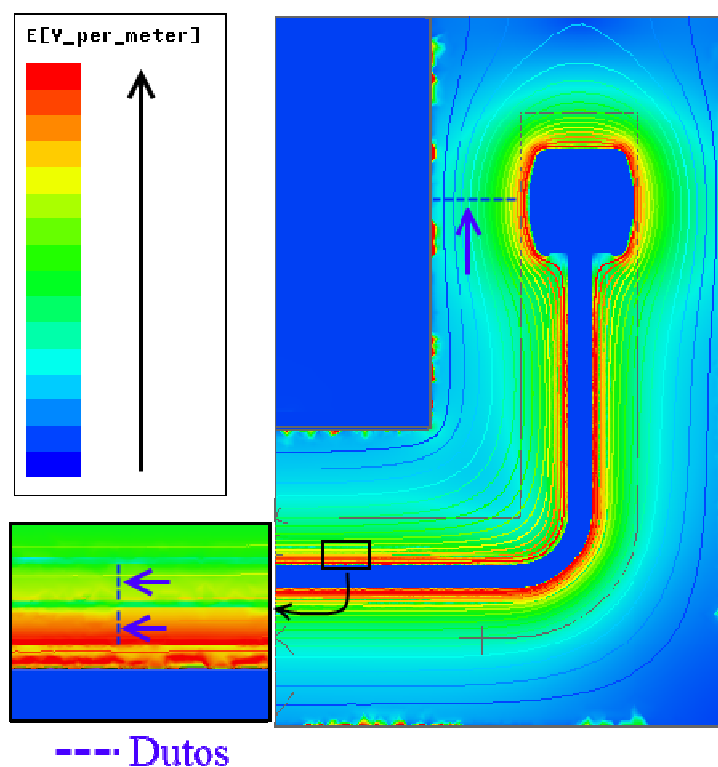


Figura 8 - Campo elétrico e caminhos para possíveis descargas em dutos de óleo

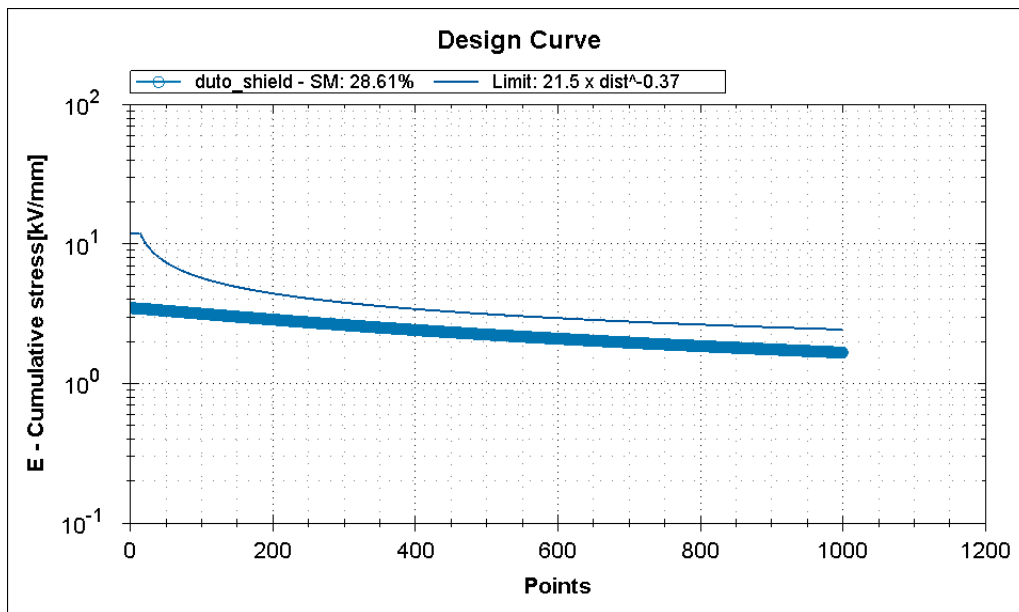


Figura 9 - Resultados obtidos com o "cumulative stress"

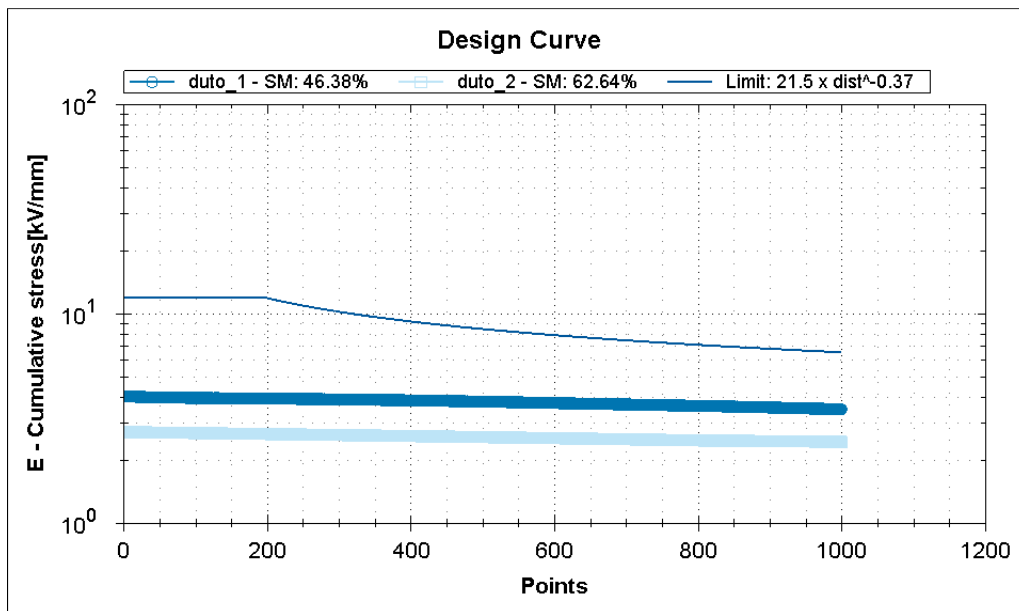


Figura 10 - Resultados obtidos com o "cumulative stress"

5.0 - CONCLUSÃO

O método "cumulative stress" é uma abordagem relativamente simples que permite a análise de fenômenos eletrostáticos tridimensionais complexos.

A análise do transformador em questão permite avaliar com um bom nível de precisão o desempenho da estrutura dielétrica projetada, permitindo avaliar as margens de segurança e otimização do equipamento.

A modelagem através do MEF 3D não é trivial, porém em face aos resultados obtidos se torna de suma importância quando se trata de equipamentos complexos e importantes aos sistemas de potência nos quais estão inseridos.

6.0 - REFERENCES

(1) J. P. A. BASTOS; N. SADOWSKI. *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods*. New York - Marcel Deeker, 2003.

(2) 12 wg 12.22 - Guidelines for conducting design reviews for transformers 100 mva and 123 kv and above.

(3) V. DAHINDEN; K. SCHULTZ; A. KUECHLER. The function of solid insulation in transformers. *Transform 98. Munich*.

(4) A. N. GREENWOOD. *Electrical Transients in Power Systems. 2nd. ed.* New York - John Wiley & Sons, 1991.

(5) J. M. HEATHCOTE. *The J & P Transformer Book, Twelfth edition.* Oxford - Newnes,, 1998.

(6) K. KARSAI; D. KERENYI ; KISS L. *Large Power Transformers.* Amsterdam-Oxford-New York - Elseiver, 1987.

(7) S. V. KULKARNI; S. A. KHAPARDE. *Transformer Engineering - Design and Practice.* New York - Marcel Dekker, 2004.

(8) H.P MOSER. *Transformerboard.* Scientia Electrica/H. Weidmann AG. Rapperswil, 1979.

(9) ANSYS INC. *Maxwell 3D - Electromagnetic and Electromechanical Analysis, v.14, Canonsburg PA, 2010.*

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Anderson Santos Nunes

Nascido em Santa Maria, Rio Grande do Sul, em 08 de abril de 1986. É doutorando (2016) e Mestre (2013) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Pós Graduação (2011) em Projetos de Transformadores e Graduado (2010) pela Universidade Regional de Blumenau (FURB). Atua desde 2013 na empresa ESSS (*Engineering Simulation and Scientific Software*), como especialista em CAE.

Diogo Fernando Harmel

Nascido em São Bento do Sul, Santa Catarina, em 05 de setembro de 1976. É mestrando (2013) em Engenharia Elétrica pela Universidade Regional de Blumenau, Pós Graduação (2001) em Projetos de Transformadores e Graduado (2009) pela Universidade Regional de Blumenau (FURB). Atua desde 1998 na empresa WEG T&D, Unidade de Blumenau, no setor de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I).