



---

## Determinação e Análise dos Níveis de Campos Eletromagnéticos para as Estruturas de Alta Tensão de Itaipu Segundo a Resolução Normativa 398/2010 da Agência Nacional de Energia Elétrica

Juliano R. da Silva<sup>1</sup>, Pablo S. Paganoto<sup>2</sup> e Rafael Graeff<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Usina Hidrelétrica de Itaipu

<sup>2</sup> Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE).  
jrsilva@itaipu.gov.br.

### Brasil

#### Resumo

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é responsável por gerar, transmitir e distribuir a energia elétrica. As áreas que correspondem à geração e transmissão de energia elétrica geralmente estão relacionadas a elevados níveis de tensão e de corrente elétrica, estes que são fatores determinantes na formação de campos eletromagnéticos. Por conta deste fenômeno, existe a preocupação quanto à saúde de pessoas expostas a valores elevados de campo elétrico e de campo magnético, de forma que a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) mediante a Resolução Normativa nº 398 de 2010 estipulou os limites máximos de exposição permitidos. O trabalho desenvolvido determinou, por meio de simulação numérica computacional, os níveis e as distribuições de campo elétrico e de campo magnético produzidos nas estruturas de alta tensão existentes na usina hidrelétrica de Itaipu. Os resultados obtidos através das simulações foram avaliados com base nos valores limites de exposição determinados pela ANEEL para constatação de valores superiores aos estabelecidos na norma.

**Palavras-chave:** Campo eletromagnético; Limites de exposição; Solução numérica computacional.

#### 1. INTRODUÇÃO

Pode-se considerar que o Sistema Elétrico de Potência é composto por estações geradoras, linhas de transmissão e centros de distribuição. As linhas de transmissão fazem a interconexão entre as estações de geração e a distribuição de energia [1] e, devido à distância entre os locais de geração e os centros de consumo, é necessário aumentar os níveis de tensão para reduzir as perdas existentes no processo de transmissão. As linhas de transmissão, por sua vez, também são susceptíveis aos princípios do eletromagnetismo, visto que uma linha de transmissão apresenta características indutivas e capacitivas, existe a criação de campos elétricos e campos magnéticos, em suas proximidades, durante o transporte de energia.

No caso do Brasil, sistemas de alta tensão e de ultra alta tensão são utilizados na transmissão de energia. Também podem ser utilizados sistemas especiais de transmissão de corrente contínua, com níveis elevados de tensão. Essas estruturas são muitas vezes construídas em locais em que há um fluxo significativo de pessoas, tanto funcionários que operam e mantêm as estruturas, quanto tráfego ou residência de pessoas em locais próximos.

A exposição contínua dos seres humanos a campos eletromagnéticos, proveniente de sistemas de alta tensão, tem gerado uma grande preocupação sobre os seus possíveis efeitos nocivos. Sendo assim, a Comissão Internacional de Proteção Contra Radiação Não Ionizante (ICNIRP), propôs restrições para os valores máximos de níveis de campo elétrico e magnético, em locais em que há risco de exposição a seres humanos a estes fenômenos eletromagnéticos [2].

**XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ**  
06 y 07 de Setiembre de 2018

A ANEEL sancionou a resolução normativa 398 de 2010, em que se estipulam os limites de exposição humana a campos elétricos e campos magnéticos originados de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. A restrição dos níveis máximos de exposição é baseada em efeitos reconhecidos a saúde, com recomendações da Organização Mundial de Saúde (OMS) [3].

Os níveis regulamentados abrangem dois valores de frequência de operação do sistema (50 e 60 Hz) e as populações são divididas em público geral e população ocupacional. A população ocupacional consiste em adultos geralmente expostos a campos eletromagnéticos em condições conhecidas e que possuem treinamento relacionado aos potenciais riscos envolvendo campos eletromagnéticos, sendo capazes de tomar precauções apropriadas durante a exposição. Já o público geral é composto por todos os indivíduos não pertencentes a população ocupacional [3]. A Tabela I apresenta os limites de exposição de campo elétrico e magnético definidos pela ANEEL para as frequências de 50 e 60 Hz.

Tabela I: Níveis de referência para campos elétricos e campos magnéticos para frequências de 50 e 60 Hz.

Classe	Instalações em 50 Hz		Instalações em 60 Hz	
	Campo Elétrico (kV/m)	Campo Magnético (μT)	Campo Elétrico (kV/m)	Campo Magnético (μT)
<b>Público em Geral</b>	5,00	200,00	4,17	200,00
<b>População Ocupacional</b>	10,00	1000,00	8,33	1000,00

Desta forma fica estipulada que todas as seções existentes nas instalações de um SEP devem estar adequadas a resolução normativa aqui apresentada, estabelecendo distâncias mínimas de segurança para evitar a exposição das populações envolvidas.

## 2. EQUAÇÕES DE MAXWELL

A teoria eletromagnética atual foi desenvolvida por Maxwell através da unificação de diversos estudos predecessores, que são reconhecidamente casos particulares das equações de Maxwell [4]. As equações de Maxwell compreendem as condições dos domínios das altas e baixas frequências dos campos eletromagnéticos. Para as altas frequências, pode-se dizer que engloba o estudo e a análise de ondas eletromagnéticas, bem como a propagação de energia pelas frequências superiores a algumas dezenas de kHz. Por outro lado, o domínio das baixas frequências, condiz às frequências não superiores a algumas dezenas de kHz, correspondente aos estados “quase estacionários”, geralmente nesta área é possível estudar separadamente campos elétricos e magnéticos, ao contrário do domínio das altas frequências em que tais campos são interdependentes [5].

As quatro equações de Maxwell na forma diferencial são escritas em (1), (2), (3) e (4).

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

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (4)$$

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
06 y 07 de Setiembre de 2018

Juntamente com as equações de Maxwell é necessário apresentar um conjunto de três equações que relacionam de forma construtiva os conceitos de linearidade, isotropia e homogeneidade do meio material em que se aplicam os campos eletromagnéticos [4]. As equações auxiliares as equações de Maxwell são apresentadas em (5), (6) e (7).

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

As grandezas que constituem as equações de Maxwell são o Campo elétrico  $\mathbf{E}$ , a Densidade de fluxo elétrico  $\mathbf{D}$ , o Campo magnético  $\mathbf{H}$ , a Densidade de fluxo magnético  $\mathbf{B}$  e a Densidade volumétrica de carga  $\rho$ . As constantes que dependem do meio material em que os campos eletromagnéticos podem se desenvolver são a Permeabilidade magnética  $\mu$ , a Permissividade elétrica  $\epsilon$  e a Condutividade elétrica  $\sigma$ .

As equações de Maxwell tornam-se difíceis de resolver por métodos analíticos, mesmo com a ausência de termos variáveis no tempo. Assim, a solução pode ser obtida com a aplicação de métodos numéricos [6].

### 3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMPUTACIONAL EM PROBLEMAS DE ENGENHARIA

Os métodos numéricos são extremamente competentes na resolução de problemas de engenharia, uma vez que capazes de lidar com um grande número de equações, não linearidades e geometrias complexas [7]. Segundo [2], existem duas categorias de métodos numéricos: Os métodos de domínio e os métodos de fronteira. Os métodos de domínio fazem a utilização de equações diferenciais em seu processo de solução, enquanto os métodos de fronteira fazem a utilização de equações na forma integral como recurso de solução. O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um exemplo de método de domínio e também o utilizado na realização desta pesquisa.

O eletromagnetismo sendo explorado através do MEF se consolidou como instrumento de trabalho, visto que *softwares* de interface amigável estão à disposição de engenheiros, projetistas e estudantes. Assim, projetos podem ser concebidos, aprimorados e otimizados de forma computacional não havendo a necessidade de construção e testes de protótipos, pois o comportamento físico do dispositivo está vinculado diretamente ao comportamento do seu campo eletromagnético [5].

### 4. METODOLOGIA

A metodologia aplicada para a determinação dos campos eletromagnéticos com aplicação do MEF é apresentada em [8]. Esta metodologia consiste em dividir o processo da solução em etapas de pré-processamento, processamento e pós-processamento. O estágio de pré-processamento consiste em preparar os dados de entrada para a solução pelo MEF, o processamento é o estágio no qual o sistema de equações para o domínio discretizado é montado e resolvido com a aplicação do MEF, etapas descritas por [9]. O pós-processamento contém comandos que oferecem resultados visíveis com gráficos e animações de análise.

Algumas simplificações são necessárias para a realização de uma simulação; No entanto, dependendo das magnitudes de interesse, tais simplificações podem ser feitas sem alterar significativamente os resultados

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
06 y 07 de Setiembre de 2018

[10]. As simulações foram realizadas usando o software Ansys<sup>TM</sup>. Para alguns casos, este pacote de extensão apresenta boa aproximação com a realidade [11].

A aplicação da metodologia foi realizada em um estudo de caso, que apresenta as características de interesse na análise de campos eletromagnéticos em relação à Resolução Normativa N ° 398 da ANEEL: operação de equipamentos de alta tensão em locais próximos ao fluxo de pessoas.

## 5. ESTUDO DE CASO

A metodologia é aplicada a duas estruturas de alta tensão de Itaipu, sendo o sistema de saída de linha de uma subestação isolada a gás SF<sub>6</sub> e o barramento de fases isoladas que conecta o gerador ao transformador. As geometrias tridimensionais que representam estas estruturas foram desenvolvidas em SolidWorks<sup>TM</sup>. Para a realização da geometria fez-se o uso dos projetos destes conjuntos que estão disponíveis no Sistema de Arquivo Técnico de Itaipu (SAT).

O sistema de saída de linha é ilustrado pela Figura 1 (a). Este sistema opera com tensão nominal de 500 kV e é composto por buchas de saída de linha, filtro de onda, transformador de potencial capacitivo e para-raios. O sistema completo consiste em três grupos de equipamentos, com arranjo mostrado na Figura 1 (b), e uma cerca de contorno que delimita o acesso dos trabalhadores à região.

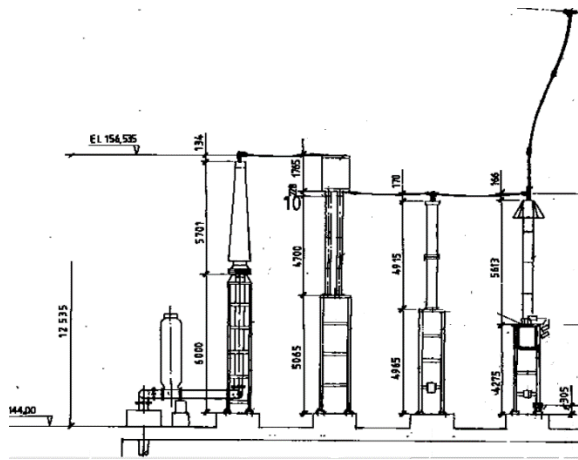


Figura 1 (a): Saída de linha da subestação isolada a gás.

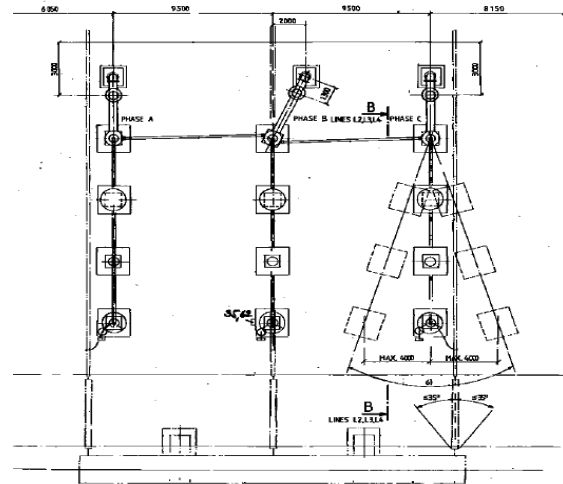
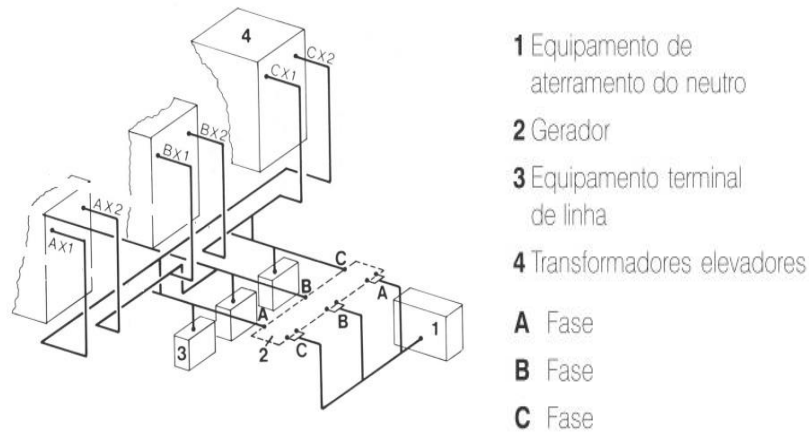


Figura 1 (b): Layout de saída de linha da subestação isolada de gás em Itaipu.

Outro sistema avaliado foram os barramentos de fases isoladas de Itaipu, que são responsáveis por interligar os geradores com os transformadores elevadores são internos às cotas da barragem. Na Figura 2 está o diagrama representativo da interconexão entre o barramento de fases isoladas e os transformadores elevadores.

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
 06 y 07 de Setiembre de 2018


**Figura 2: Diagrama representativo do barramento de fases isoladas de Itaipu.**

Na modelagem tridimensional alguns detalhes físicos da construção das estruturas foram negligenciados propositalmente, como os isoladores que sustentam o condutor dentro do revestimento e as saias de porcelana das buchas de saída de linha. Segundo [10], estes tipos de procedimentos são adotados quando a influência do componente em questão não possui grande impacto no resultado final, possibilitando uma redução na demanda computacional durante as simulações.

As geometrias de interesse devem ser inseridas em uma região finita de simulação, na qual serão realizados os cálculos com o MEF. A região finita deve confinar todo o conjunto de geometrias em que se deseja realizar a análise e deve possuir as dimensões apropriadas para que não haja interferência na solução dos campos eletromagnéticos [12].

As condições de contorno utilizadas na simulação foram determinadas de acordo com as características elétricas nominais de operação dos sistemas. Para o sistema de saídas de linha foi considerada a tensão nominal da linha de transmissão conectada ao conjunto de equipamentos, com o de 500 kV. Os valores de tensão e corrente utilizados são decorrentes das capacidades nominais dos geradores de Itaipu. A Tabela II apresenta as características dos geradores de Itaipu para as frequências de 50 e 60 Hz.

Tabela II: Características elétricas nominais dos geradores de Itaipu.

Item	Unidade	50 Hz	60 Hz
Potência nominal	MVA	823,6	737
Potência máxima	MVA	823,6	766
Fator de potência	-	0,85	0,95
Tensão nominal	kV	18	18
Corrente nominal	A	26.417	23.639

Devido à capacidade da usina de Itaipu em fornecer energia em 50 Hz e 60 Hz, a análise do sistema de saída de linha foi realizada em relação ao padrão para os níveis limite das duas populações e para ambas as frequências. Os valores das grandezas elétricas consideradas para as simulações do barramento de fases isoladas são referentes aos equipamentos que operam na frequência de 60 Hz e os máximos valores de tensão e corrente, sendo estas as condições de contorno, são determinadas por meio dos valores nominais dos geradores conectados.

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
06 y 07 de Setiembre de 2018

A análise do risco de exposição foi fixada em um plano que se encontra a uma distância de 1,75 m do solo, distância estipulada como à altura média da população que pode circular nas proximidades das estruturas de alta tensão.

Na verificação do campo elétrico, para o sistema de saída de linha aplicou-se uma tensão de 500 kV aos condutores e 0 V aos elementos aterrados. Para o barramento de fases isoladas por se tratar de um sistema trifásico, a tensão aplicada na simulação é equivalente ao valor da diferença de potencial entre o condutor e o revestimento, com magnitude igual a 10,4 kV.

A simulação magnética foi conduzida no instante de tempo igual a 4,16667 ms, em que a corrente da fase A tem o valor igual ao nominal e as correntes das fases B e C possuem o valor igual a metade do valor nominal. Sendo assim,  $I_a = 23639$  A e  $I_b = I_c = -11818,5$  A.

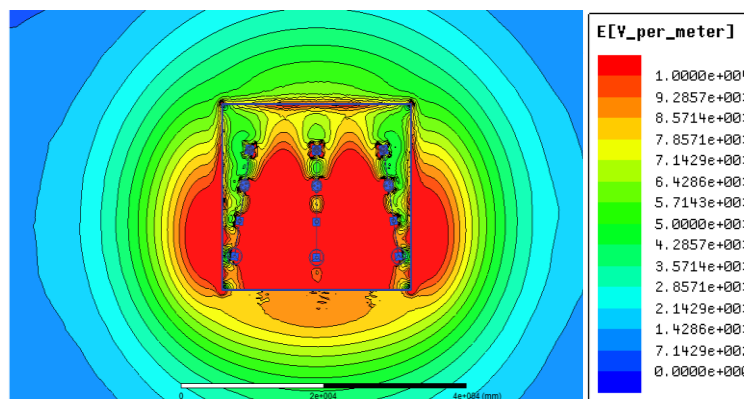
## 6. RESULTADOS

Os resultados obtidos para as simulações de campo elétrico e campo magnético foram analisados em função dos limites máximos de exposição para população ocupacional estipulados através da resolução normativa 398/2010 da ANEEL.

### 6.1. Campo elétrico

O campo elétrico do barramento blindado permanece completamente enclausurado entre o condutor e o revestimento do mesmo, este comportamento de campo elétrico esta de acordo com o esperado, uma vez que a tensão presente no condutor é relativamente baixa e o revestimento do barramento apresenta potencial elétrico nulo por estar aterrado. Por este motivo, não há risco de exposição a campo elétrico proveniente do barramento de fases isoladas.

As magnitudes do campo elétrico produzido pelo sistema de saídas de linha para o plano a 1,75 m do solo são ilustradas pela Figura 3.

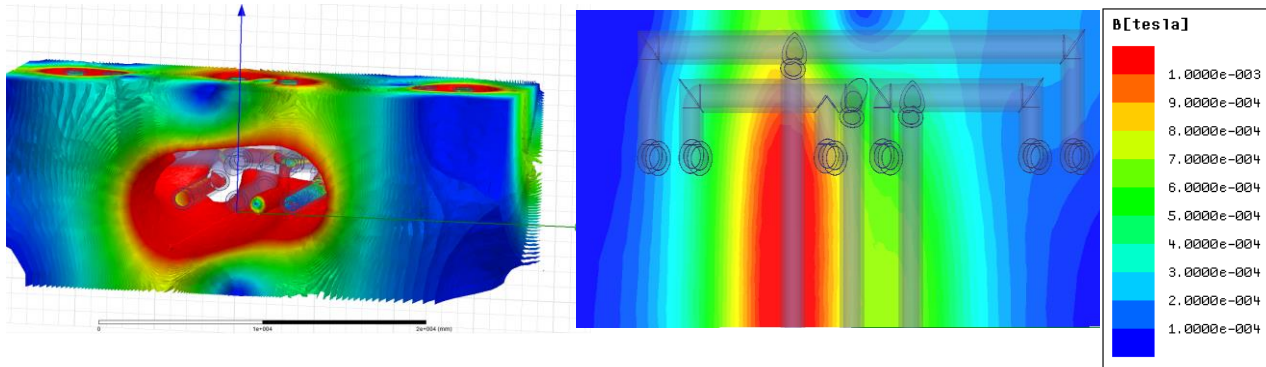


**Figura 3 : Distribuição do campo elétrico da saída de linha da subestação isolada de gás a 1,75 m do solo.**

Na Figura 3 percebem-se regiões do plano em que o valor de campo elétrico é superior ao limite máximo de exposição recomendado na norma. Nota-se que as concentrações de campo elétrico que excedem a norma estão localizadas nas laterais da saída de linha.

## 6.2. Campo magnético

As Figuras 4 (a) e 4 (b) ilustram a distribuição de campo magnético nas proximidades do barramento de fases isoladas e a disposição do campo magnético no plano de interesse a 1,75 m do solo, respectivamente.



**Fig. 4 (a):** Campo magnético nas proximidades do barramento de fases isoladas.

**Fig. 4 (b):** Distribuição de campo magnético a 1,75 m do solo.

Diferentemente do campo elétrico, o campo magnético não se mantém enclausurado, de forma que o mesmo transcende o revestimento e estabelece a existência de campo magnético nas proximidades do barramento de fases isoladas.

De acordo com a Figura 4 (b), percebe-se que em uma faixa do plano de interesse o campo magnético possui uma magnitude superior ao disposto na resolução normativa 398/2010 da ANEEL.

É importante ressaltar que a concentração de campo magnético existente fica em constante transição no espaço, uma vez que as correntes variam com o tempo, esta fração de campo magnético tem a tendência de se deslocar entre as proximidades das fases A, B e C durante os instantes de tempo em que ocorrem os máximos picos de corrente.

O campo magnético proveniente da saída de linha da subestação isolada a gás não é apresentado neste trabalho por possuírem baixa intensidade.

## 7. CONCLUSÃO

Os resultados para os valores de campo elétrico e campo magnético existentes em proximidades de estruturas de alta tensão de Itaipu foram obtidos por meio de simulação e pôde-se observar que existem regiões nas proximidades das estruturas de alta tensão que apresentam magnitudes de campo elétrico e campo magnético que excedem os limites estipulados pela resolução normativa. Em específico, as distribuições de campo elétrico para a saída de linha da subestação isolada a gás e o campo magnético proveniente do barramento de fases isoladas.

Como os valores foram obtidos por simulação, restando ainda a realização das medições dos valores reais dos campos existentes e assim, caso ainda se mantenha uma área de restrição, devem ser adotadas medidas de proteção e segurança para as pessoas que possam estar expostas a este risco.



XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
06 y 07 de Setiembre de 2018

A avaliação de campos elétricos e magnéticos é extremamente útil no processo de projeto e análise para implantação de empreendimentos que possuam elevadas correntes e tensões. A avaliação utilizando métodos numéricos leva ao aprimoramento do layout e eliminação de potenciais riscos aos usuários das instalações.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens (CEASB), a Fundação Parque Tecnológico Itaipu (FPTI), a Itaipu Binacional e à Universidade Estadual do Oeste do Paraná pelo apoio à pesquisa e pelo suporte financeiro.

#### REFERÊNCIAS

- [1] W.D. Stevenson Junior. “Elementos de Análise de Sistemas de Potência”. São Paulo: Mcgraw-hill, 1975, pág. 458.
- [2] H. Das, K. Gogoi and S. Chatterjee, “Analysis of the effect of electric field due to High Voltage Transmission lines on humans,” in 1st Conference on Power, Dielectric and Energy Management at NERIST (ICPDEN), Itanagar, Jan. 2015.
- [3] Resolução Normativa ANEEL nº398. Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasil, 2010, página 3.
- [4] M. N. O. Sadiku. *Elementos de eletromagnetismo*. Porto Alegre: Bookman, 2004, pág. 687.
- [5] J. P. A. Bastos. *Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática*. Ed. da UFSC, 2004 pág. 396.
- [6] N. Ida; J. P. A. Bastos, *Electromagnetics and Calculation of Fields*, 1th ed. New York: Springer-Verlag, 1992, pág. 473.
- [7] S. C. Chapra, R. P. Canale. *Métodos numéricos para engenharia*. São Paulo: McGraw-Hill, 2008, pág. 809.
- [8] S. Moaveni, *Finite Element Analysis: Theory and Applications with ANSYS*, New Jersey: Prentice-Hall, 1999, pág. 272.
- [9] M. V. K. Chari, *Numerical Methods in Electromagnetism*. New York: Academic Press, 2000, pág. 783.
- [10] J. R. da Silva and J. P. A. Bastos, “Analysis of power transformer geometry simplifications on electromagnetic and thermodynamic simulations,” *IEEE Trans. Magn.*, volume 51, número 3, março 2015.
- [11] C. Zhang; J. J. Kester; C. W. Daley; S. J. Rigby, “Electric Field Analysis of High Voltage Apparatus Using Finite Element Method” in Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, West Lafayette, oct. 2010.
- [12] ANSYS. ANSYS Maxwell V16 Training Manual, Lecture 2: Geometry Operations. 2015. Disponível em: <[http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/Maxwell\\_v16\\_L02\\_Geometry\\_Operations.pdf](http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/Maxwell_v16_L02_Geometry_Operations.pdf)>.