

## **ANÁLISE DE ESTRUTURAS EXISTENTES COM RELAÇÃO AO ATENDIMENTO DA RESOLUÇÃO NORMATIVA N. 398 DA ANEEL COM RELAÇÃO AOS LIMITES DE EXPOSIÇÃO A CAMPOS ELÉTRICOS E MAGNÉTICOS**

PABLO SHIMOE PAGANOTO<sup>1\*</sup>, MAYSA PROBST HAGEDORN<sup>2</sup>; JULIANO RICARDO DA SILVA<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Acadêmico em Engenharia Elétrica, UNIOESTE, Foz do Iguaçu-PR, pablosimoepaganoto@hotmail.com

<sup>2</sup> Acadêmica em Engenharia Elétrica, UDC, Foz do Iguaçu-PR, maysaprobst@gmail.com

<sup>3</sup> Dr. em Engenharia Elétrica, UNIOESTE, Foz do Iguaçu-PR, jrsilva@itaipu.gov.br

Apresentado no  
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2016  
29 de agosto a 1 de setembro de 2016 – Foz do Iguaçu, Brasil

**RESUMO:** Com o aumento de demanda de energia elétrica, novas fontes de geração e outros sistemas de transmissão são necessários. Para suprir a demanda dos centros de consumo, as subestações e linhas de transmissão ficam normalmente em lugares próximos a circulação de pessoas comuns e de locais em que haja residências. Assim como todo sistema de transmissão de energia, são gerados campos eletromagnéticos como consequência da necessidade de transmissão de energia. Esses campos, dependendo do nível de exposição e sua amplitude, podem causar efeitos prejudiciais à saúde, como distúrbios no sistema nervoso, parada cardíaca, entre outros. Para estabelecer limites de exposição às pessoas, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) elaborou a Resolução Normativa nº 398, que limita os níveis máximos de exposição aos campos elétricos e magnéticos. Assim, empreendimentos novos e existentes devem ser avaliados com relação aos campos elétricos e magnéticos que os mesmos geram, principalmente em locais em que haja a circulação de pessoas. Essas análises podem ser feitas através de medições, cálculos analíticas ou ainda por meio de soluções numéricas computacionais. De acordo com os valores obtidos para esses campos, devem-se tomar ações no sentido de dirimir sua influência sob as pessoas afetadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Transmissão, método dos elementos finitos, campos eletromagnéticos.

### **ANALYSIS OF EXISTING STRUCTURES WITH RESPECT TO THE NORMATIVE RESOLUTION N.398 FROM ANEEL WITH RESPECT TO LIMIT EXPOSURE TO ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS**

**ABSTRACT:** With the increase of electricity demand, new generation sources and transmission systems are required. To supply the consumption centers' demand, substations and transmission lines are usually located next to crowded places and residential areas. Similarly to any transmission system, electromagnetic fields are produced due to the need to transmit energy. Depending on the level and intensity of exposure they can cause many diseases, such as nervous system disorders, cardiac arrest, among others. To establish exposure limits for humans, ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) developed the Normative Resolution nº 398, which limits the maximum level of exposure to electric and magnetic fields. Thus, new and old sites need to evaluate the electromagnetic field produced by their own, especially, in populous places. The analysis can be made by measurements, analytic calculations, or computational numeric solutions. Relying on how impactful the fields are, some actions to mitigate this influence will be needed.

**KEYWORDS:** Transmission, finite element method, electromagnetic fields.

### **INTRODUÇÃO**

O sistema elétrico de potência (SEP) brasileiro tem por objetivo suprir a demanda necessitada das várias cargas distribuídas no Brasil. Assim, este sistema faz com que a energia gerada em pontos distantes do centro de carga seja entregue às indústrias e cidades, com qualidade e com o mínimo de

custo (Elgerd, 1976). Segundo Sadaat (1999), a rede pode ser subdivida em: geração, transmissão, subtransmissão, distribuição e cargas.

Cada um destes níveis possui sua importância para o sistema e pode ser isolado eletricamente com a utilização dos transformadores. Sua principal função é a de realizar a elevação e o rebaixamento de tensão, de modo a possibilitar que a transferência de potência entre regiões seja feita com a menor perda de energia possível. (Kosow, 1982).

Esta característica de reduzir os níveis de corrente para o lado de alta tensão faz com que seja possível diminuir consideravelmente as perdas nas linhas, as quais são diretamente proporcionais ao quadrado da corrente, o que permite e justifica o uso de altas e extra-altas tensões em linhas de transmissão de energia para distâncias longas (Sadaat, 1999). O uso destes sistemas de alta tensão é regulamentado por normas com relação aos procedimentos, métodos de ensaios, materiais utilizados, padronização dos tipos de instalações, distâncias mínimas entre cabos e sistema aterrado, isolamentos, entre outros. Além das características técnicas, ainda devem ser respeitados os limites de exposição a campos elétricos e magnéticos, conforme disposto nas resoluções do Ministério do Trabalho e Emprego (TEM) e da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Essas normas são a Norma Regulamentadora de N°10 do MTE, que trata de Segurança em Instalações de Eletricidade, norma ABNT NBR 5422, a qual trata do projeto de linhas de transmissão, e a Resolução Normativa nº398 da ANEEL, que se refere aos limites à exposição humana a campos eletromagnéticos.

Os campos eletromagnéticos produzidos pelas linhas de alta tensão têm recebido cada vez mais atenção, devido aos efeitos causados pela exposição a níveis elevados de campos, como a ocorrência de tensão induzida na superfície da terra (tensão de passo), tensão induzida em estruturas (tensão de toque), tensão ou corrente induzida em objetos, veículos e pessoas próximas aos equipamentos de alta tensão (Shalan, et al, 2010).

Com relação aos campos elétricos, a percepção cutânea é a mais robusta consequência à sua exposição em pessoas. Isto pode ser causado pela aproximação ou contato físico entre pessoas e objetos que estejam imersos no campo elétrico ou em diferentes potenciais elétricos, resultando em passagem de corrente elétrica pelo indivíduo (ICNIRP, 1998), o efeito mais comumente notado é o de eriçamento dos pelos do corpo.

Outros efeitos consideráveis são as estimulações elétricas em células ou tecidos do corpo humano como sistema nervoso, cardíaco e outros sistemas biológicos causados por indução eletromagnética, corrente ou densidade de corrente dentro de tecidos e órgão do corpo (IEEE Standards Coordinating Committee 39, 2010).

Nesse artigo serão discutidos os principais pontos sobre o tema e será proposta uma forma de se analisar os campos em estruturas novas e existentes.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O campo elétrico é o campo gerado por cargas elétricas as quais podem exercer uma força de interação com outras cargas. Para valores elevados de corrente em cabos esta interação pode se tornar inconveniente, causando, por exemplo, nas proximidades do cabo a ionização do ar devido ao alto gradiente de campo elétrico, levando à causa do efeito corona. Para distâncias maiores, a intensidade diminui, porém ainda pode causar riscos à saúde humana.

Tabela 1. Intervalos de limites de corrente para efeito indireto em criança, mulheres e homens.

Efeito indireto	Limite de corrente (mA) para as frequências:		
	50/60 Hz	1 kHz	100 kHz
Percepção no toque	0.2-0.4	0.4-0.8	25-40
Dor no contato do dedo	0.9-1.8	1.6-3.3	33-55
Choque doloroso/limite contração muscular	8-16	12-24	112-224
Choque severo/dificuldade de respiração	12-23	21-41	160-320

Fonte: ICNIRP, 1998.

Assim, o modo em que o campo elétrico se distribui em torno dos equipamentos em sistema de potência faz com que seja parte integral tanto no projeto quanto nas instalações de subestações em áreas urbanas. O campo elétrico produzido pelas linhas de alta tensão tem ganhado cada vez mais cautela para garantir a segurança do trabalhador e de pessoas em geral nos arredores destes equipamentos, sem que haja comprometimento da eficiência destes equipamentos e da linha.

Segundo NRPB (2004), a mais notável das consequências à exposição a campos elétricos em pessoas é a percepção ou dor na pele. A mesma fonte também cita que o limite para a percepção foi reportado em torno de 20 kV/m, e sensações indesejáveis ocorrem ao se expor a campos elétricos acima de 25 kV/m. Assim o campo elétrico pode induzir corrente no indivíduo resultando nos efeitos indiretos apontados na tabela 1, retirado de ICNIRP (1998), para cada respectivo nível de corrente.

No Brasil, o órgão que regulamenta as restrições básicas para exposição humana a campos elétricos e magnéticos a 50 e 60Hz é a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), a qual define, para instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica os níveis de referência para exposição do público em geral e para população ocupacional (agentes trabalhadores nas instalações elétricas) (ANEEL, 2010). Os níveis de referência indicado pela ANEEL para as frequências 50 e 60 Hz são apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Níveis de referência para campos elétricos e magnéticos variantes no tempo para frequência de 50 e 60 Hz.

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

Fonte: ANEEL, 2010.

A população ocupacional se refere às pessoas que tem o conhecimento de que estão expostas aos campos eletromagnéticos e devem ser treinadas para exercer adequadamente suas atividades. Já a população geral se refere às pessoas de todas as faixas etárias com condições diferentes de saúde. Este grupo de pessoas não tem consciência de que estão expostos aos campos. Portanto, os níveis de referência de exposição são mais conservadores em relação ao grupo da população ocupacional (ANEEL, 2010).

Levando em conta os riscos biológicos e os limites de exposição a campos eletromagnéticos apontados acima, nota-se a necessidade de determinar os níveis de campo elétrico para regiões próximas a sistemas que utilizam cabeamento de alta tensão como, por exemplo, subestações e regiões próximas á linha de transmissão.

Na determinação dos níveis de campo elétrico para projetos novos pode-se utilizar de métodos computacionais ou soluções analíticas, já para projetos existentes, pode-se efetuar a medição local, de modo a verificar os valores existentes. Geralmente é muito custoso para efetuar testes prévios que avaliam a distribuição do campo elétrico, requerindo construção de protótipos e realização de ensaios que validem o caso estudado. Além disso, é difícil o uso de aparelhos de medição sem que cause mudanças no campo elétrico medido, podendo questionar a aquisição dos dados em campo (Zhang, et al, 2010).

Assim, o campo elétrico pode ser determinado por soluções analíticas, que apresentam soluções exatas, e por métodos computacionais numéricos, que discretizam o domínio e simplificam a solução das equações diferenciais ou integrais que governam o campo elétrico. Segundo (Silva Filho, 2008) o uso de soluções exatas é limitado apenas a sistemas simplificados, pois só podem ser resolvidos por manipulações matemática. Mostrando-se de difícil resolução para casos não lineares e de geometria complexa.

Em aplicações de engenharia são comumente utilizados métodos numéricos, que consideram tanto a geometria do sistema quanto a composição dos elementos e os processos físicos envolvidos. Os métodos numéricos mais utilizados na engenharia elétrica, segundo POUZADA (1999), são: método

das diferenças finitas (MDF), método dos elementos finitos (MEF), método dos elementos de contorno (MEC) e método de simulação de carga (MSC).

Entre estes diferentes métodos numéricos o método dos elementos finitos tem sido apontado por (Chari, et al, 2010) por ser prático, de fácil implementação em um sistema computacional, e apresenta boa precisão numérica na solução de campos eletromagnéticos.

O método dos elementos finitos consiste no processo de subdividir todo o sistema em componentes individuais (discretização do sistema) que apresentam comportamento compreensível, e então reconstruir o sistema original a partir da solução destes elementos subdivididos que dependem das condições de contorno do sistema (Silva, 2015).

O objetivo desta metodologia é encontrar soluções aproximadas para as equações diferenciais de Maxwell, as quais tem que ser numericamente estáveis, significando que o erro inicial e o calculado a partir das iterações não se acumulem causando divergência no resultado e invalidando a simulação (IEEE Standards Coordinating Committee 39, 2010).

A formulação das equações de Maxwell para condições de campos senoidais de frequência de operação em sistemas de potência, consideradas baixa frequência por Silva Filho (2008), podem ser simplificadas de tal modo que se negligencia a propagação de onda eletromagnética, fazendo com que as equações de transiente que governam a eletrostática fiquem desacopladas às equações de campo magnético (Silva Filho, 2008; Sadiku, 2004). Resultando nas equações (1) e (2).

$$\nabla \cdot \vec{E} = \rho_v \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{D} = \vec{J} + \nabla \times \vec{A} \quad (2)$$

Na qual  $\vec{E}$  é a intensidade de campo elétrico dado em volts por metro.  $\vec{D}$  é a densidade de fluxo elétrico, que é denominada de deslocamento elétrico, é medido em coulombs por metro quadrado.  $\rho_v$  é a densidade volumétrica de carga, dada em coulombs por metro cúbico.

Para meios materiais lineares isotrópicos (condições em que  $\epsilon$  não depende das coordenadas espaciais) têm-se as relações (3) e (4)

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (4)$$

Na qual  $\vec{J}$  é o vetor densidade de corrente e  $\sigma$  é a condutividade elétrica do material.

Para a solução dessas equações em situações reais que apresentam geometria 3D é necessária a utilização de software que aplique o método numérico citado nas equações diferenciais (1) e (2) com as relações apresentadas em (3) e (4).

Níveis elevados desses campos elétricos estão principalmente presentes em sistemas de alta tensão, como em linhas de transmissão e proximidades de subestações. Como a exposição de campo elétrico em pessoas está mais presente em subestações por serem instaladas em meio urbano para redução do nível de tensão de transmissão para distribuição, o objetivo deste trabalho tem por dimensionar e analisar as magnitudes de campo elétrico em sistemas de alta tensão com possibilidade de alta exposição de campo a pessoas. Determinando assim as distâncias mínimas de operação e instalação de equipamentos auxiliares à subestação.

Assim, essa é a metodologia preferencial para a solução das equações propostas, já que é de simples implementação e consagrada solução para esse tipo de problema, resumindo a metodologia de solução do problema como a seguinte:

- a) Representação tridimensional da geometria no a ser analisada;
- b) Determinação e atribuição das características dos materiais que compõem o sistema;
- c) Discretizar o domínio de modo a possibilitar a solução numérica com a utilização de malhador para a aplicação do MEF;
- d) Definição das condições de contorno;
- e) Solução das equações diferenciais;
- f) Análise da distribuição dos campos .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia proposta pode ser aplicada a qualquer ponto do sistema no qual se deseja avaliar a influência desses campos sobre as pessoas e estruturas e pode ser aplicada no estudo de

viabilidade para implantação dos projetos de transmissão de energia, de modo a evitar possíveis complicações ou limitações de operação futuras. Além disso, está sendo verificada a condição de campos elétricos e magnéticos da saída de linha da subestação isolada a gás da Itaipu Binacional como projeto para validar a metodologia proposta. Os resultados são importantes para a avaliação e tomada de decisão com relação a operação do sistema, além de poder limitar o trânsito e permanência de pessoas em determinadas regiões.

## CONCLUSÃO

A exposição do corpo humano ao campo elétrico pode apresentar efeitos diretos e indiretos que podem resultar, a partir de indução eletromagnética, corrente ou densidade de corrente em danos biológicos e físicos em pessoas. Sabendo que a exposição a estes campos é importante para a avaliação dos locais que envolvam instalações elétricas de alta tensão, verifica-se a necessidade de identificar e avaliar os pontos em que as magnitudes de campo elétrico são elevadas, de modo a mitigar sua influência, além de possibilitar condições mínimas de segurança para operação e construção de estruturas ao redor de sistemas que operam em níveis elevados de tensão.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador que apoiou com a pesquisa e a elaboração deste artigo.

## REFERÊNCIAS

- Brasil. ANEEL. Resolução ANEEL nº398 de 23 de março de 2010. Regulamenta a Lei nº 11.934, de 5 de maio de 2009, no que se refere aos limites à exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Disponível em: <  
[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2009/047/documento/resolucao\\_cem\\_1910\\_09\\_%282%29.pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2009/047/documento/resolucao_cem_1910_09_%282%29.pdf)>. Acesso em 13 jun. 2016.
- Chari M.V.K., Bedrosian G., D'angelo J. Finite Element Applications in Electrical Engineering. IEEE Transactions on Magnetics, v. 29, n. 2, mar. 1993.
- Elgerd O. I. Introdução à teoria de energia elétrica. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1976.
- ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics, v.74, n. 4, p 494–522, 1998.
- Kosow I. L. Máquinas elétricas e transformadores volume 1. Porto Alegre: Editora Globo, 1982.
- NRPB. Advice on Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (0–300 GHz). Disponível em: <  
[http://grouper.ieee.org/groups/scc28/sc4/NRPB.limits\\_15\\_2.03.04.pdf](http://grouper.ieee.org/groups/scc28/sc4/NRPB.limits_15_2.03.04.pdf)> . Acesso em: 13 jun. 2016.
- Saadat H. Power System Analysis. New York: McGraw-Hill, 1999.
- Sadiku M. N. O. Elementos de eletromagnetismo. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- Shalan E. M.; Ghania S. M.; Ward S. A. Analysis of electric field inside hv substations using charge simulation method in three dimensional. In: Annual Report Conference On Electrical Insulation And Dielectric Phenomena, 2010, West Lafayette (USA). Anais... West Lafayette: IEEE, 2010.
- Silva Filho E. B. Estudo de campo elétrico em linha de transmissão utilizando o método dos elementos de contorno. 207 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Programa de Pós-graduação em engenharia Elétrica. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2008.
- Silva, J. R. da. Avaliação “On-line” de temperatura do transformador de potência através de modelagem numérica magnética e termodinâmica. 151 p, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2015.
- Zhang C.; Kester J. J.; Daley C. W.; Rigby S. J. Electric Field Evaluation on High Voltage Outdoor Insulation by Means of Finite Element Method. In: IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2010, San Diego (USA). Anais... San Diego: IEEE, 2010.
- USA. IEEE Standards Coordinating Committee 39. Institute of Electrical and Electronic Engineering, IEEE. IEEE Recommended Practice for Measurements and Computations of Electric, Magnetic, and Electromagnetic Field with Respect to Human Exposure to Such Fields, 0 Hz to 100 kHz. New York. NY, 2010. 100p.