

Análise de Campos Eletromagnéticos em Linhas de Transmissão Paralelas utilizando Modelo Bidimensional no Software FEMM

Roberto J. Cabral ^{a,c}, Matias A. Arntzen ^a, Mario O. Oliveira ^a, Manuel A. Mazzeletti ^{a,c}, Fernando Botteron ^{b,c}

^a *Laboratorio de Investigación Desarrollo en Energía Eléctrica - LIDEE, Universidad Nacional de Misiones - UNaM*

^b *Instituto de Materiales de Misiones - IMAM, Universidad Nacional de Misiones - UNaM*

^c *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - CONICET, Argentina*

e-mail: robert_rjc@hotmail.com

Abstract: The present paper evaluates the electromagnetic field induced by the high voltage overhead transmission line of 132 kV, by numerical modeling in FEMM software using "finite element method magnetics". Several case studies are considered, where simulations are proposed under nominal conditions in 132 kV transmission lines, for typical structures in Argentina. The simulations carried out in relation to the study of distribution of Electric and Magnetic Fields in the right of way for 2 parallel overhead transmission lines at 132 kV, both in rural and urban areas. The results obtained will be evaluated based on what is established by current regulations.

Resumo: O presente trabalho avalia o campo eletromagnético induzido pela linha aérea de transmissão de 132 kV, por meio de modelagem numérica no software FEMM utilizando o "método dos elementos finitos". Vários estudos de caso são considerados, onde são propostas simulações em condições nominais em linhas de transmissão de 132 kV, para estruturas típicas de linhas de transmissão na Argentina. As simulações realizadas em relação ao estudo de distribuição de Campos elétricos e Magnéticos na zona de servidão para 2 linhas aéreas de transmissão paralelas em 132 kV, tanto no meio rural como no meio urbano. Os resultados obtidos serão avaliados com base no estabelecido pela regulamentação vigente.

Keywords: Electromagnetic fields, FEMM Software, Finite Elements, Numerical Simulation, Transmission Line.

Palavras-chaves: Campos Eletromagnéticos, Software FEMM, Elementos Finitos, Simulação Numérica, Linha de Transmissão.

1. INTRODUÇÃO

Existem muitos estudos sobre a influência dos Campos Eletro-Magnéticos (CEM) nas pessoas [1]-[3] em que se expõe uma fraca correlação entre a exposição prolongada a Campos Magnéticos (CM) de baixa frequência e o aumento da probabilidade de contrair leucemia infantil, não havendo evidência deste tipo para Campos Elétricos (CE). A ausência de uma demonstração definitiva da inocuidade dos Campos Eletro-Magnéticos de baixa frequência torna necessária a adoção de normas de caráter preventivo, mitigando a intensidade dos CEM nos limites técnico-econômicos possíveis.

Muitos estudos têm sido realizados para avaliar os Campos Eletro-Magnéticos em diferentes linhas de transmissão de energia, onde o Campo Magnético (CM) é a principal fonte de indução, em linhas de transmissão simples e paralelas [4]-[12].

Consideram-se valores admissíveis os valores recomendados pela Comissão Internacional sobre Radiações Não Ionizantes (IRPA/INIRC) [13], cujo critério básico é que Campos Elétricos (CE) e campos Magnéticos (CM) de frequência

industrial não induzam densidades de corrente mais altas em 10 mA/m², valor semelhante aos gerados pelo próprio organismo.

Os valores-limite de Campos Eletro-Magnéticos (CEM) estabelecidos na República Argentina são sancionados na Res. n° 77/98 [14], definidos para o público em geral e correspondem a:

- a. Campo Elétrico $E = 3$ kV/m em condições de campo elétrico não perturbado, para linhas com tensão nominal e temperatura máxima anual do condutor, medida na borda da faixa de servidão, fora dela e na borda perimetral dos transformadores das subestações com referência a 1 m de altura do nível do solo [14].
- b. Campo Magnético $B = 25$ μ T (250 mG) para linhas de transmissão em condições de carga máxima definidas pelo limite térmico dos condutores, medidos na borda da faixa de servidão, fora dela e na borda do perímetro das subestações de transformação com referência a 1 m de altura do nível do solo [14].

O presente trabalho de pesquisa analisa o efeito da intensidade do Campo Eletro-Magnético (CEM) na área de serviço usando o software FEMM para simular a distribuição dos campos elétricos e magnéticos da Linha Aérea de Transmissão (LAT) de 132 kV CA e frequência de 50 Hz onde o modelo de linha é apresentado em 2D e aterrado para condutores sob feixe em sistemas CA trifásico. Os cenários são modelados no software FEMM usando o método dos elementos finitos para resolver as equações diferenciais de Maxwell.

2. TEORIA ELETROMAGNÉTICA

Para solucionar os casos de campo elétrico variável a que estão submetidas as linhas de transmissão, é necessário utilizar o módulo do software FEMM denominado Fluxo de Corrente, no qual são consideradas as correntes, e a frequência do sistema é de natureza industrial, eles não têm impacto no resultado final [15].

As equações utilizadas para este método de resolução são (1) a (7), levando em consideração que são grandezas vetoriais expressas conforme (7).

Para a resolução de problemas eletrostáticos, deve-se considerar que o produto do operador de divergência e a densidade de fluxo elétrico (D) deve ser igual à densidade de carga (ρ) satisfazendo (1), enquanto o produto do operador de divergência e a intensidade do campo elétrico (E) deve satisfazer (2). A densidade de fluxo (D) e o campo elétrico (E) estão relacionados por meio da permissividade elétrica (ϵ) conforme mostrado em (7).

(1)

(2)

(3)

(4)

(5)

(6)

(7)

Para simplificar o cálculo computacional, o software FEMM utiliza o escalar de potencial elétrico (V) definido conforme a seguinte equação.

(8)

Na busca de agrupar todos os parâmetros em uma única equação, define-se (9) pelo qual o software FEMM resolve o problema para uma tensão (V) definida pelo usuário ao longo de um domínio específico.

(9)

3. MODELAGEM E SIMULACAO DE CEM EM LAT

3.1 Linhas Aéreas de Transmissão - LATs

As estruturas consideradas neste trabalho correspondem a configuração de torre simples para 2 linhas aéreas de transmissão - LATs trifásicas, representadas na Fig. 1, ambas LATs no nível de tensão de 132 kV. Para os casos estudados, considera-se a pior condição de altura mínima do condutor em relação ao solo no meio do vão. De acordo com a normativa AEA 95301 [16], a altura mínima entre o solo e o condutor é de 7 m para áreas rurais, e de 10 m em áreas urbanas.

As linhas aéreas de transmissão (LAT) e seus efeitos são analisados até o limite da faixa de servidão, que é de 32,5 m de ambos os lados em relação ao eixo da linha. Os condutores de fase serão do tipo ALAC 300/50, enquanto os cabos de guarda para proteção contra raios são OPGW 50.

A Fig. 1 apresenta a localização geométrica de cada condutor na configuração de torre trifásica simples. Vale ressaltar que também foram consideradas as zonas de segurança estabelecidas, que são 12,5m m de cada lado do LAT, onde foram analisados os valores dos campos eletromagnéticos (campos elétricos e magnéticos por separado). Para esta configuração, a distância entre os postes é de 25 metros. Também foram consideradas as zonas de segurança estabelecidas pelo regulamento para as faixas de servidão.

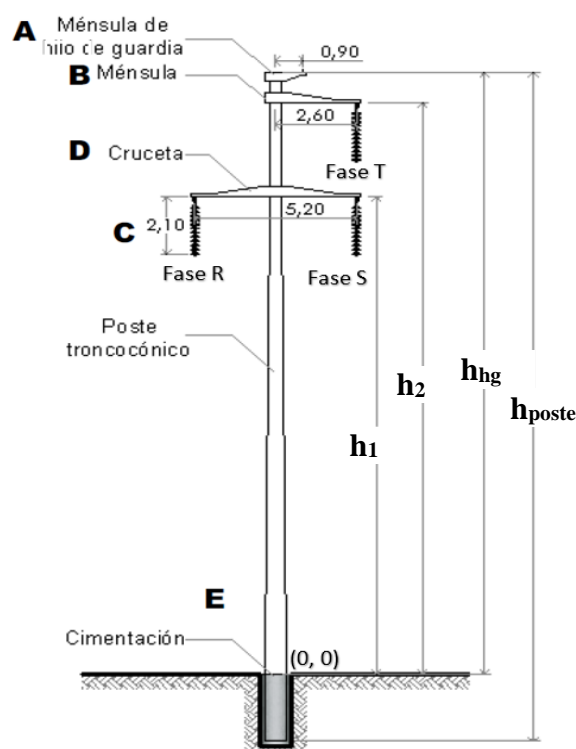


Fig. 1. Arranjo de condutores de LATs com estrutura simples AC 132 kV, distância em metros.

A Tabela 1 apresenta as coordenadas geométricas de cada condutor de duas torres paralelas, a distância entre os postes é

de 25 m. Também foram consideradas as zonas de segurança estabelecidas pelo regulamento para as faixas de servidão.

Tabela 1. Coordenadas dos condutores para LATs Paralelas em 132 kV.

Valores em metros	Caso 1: zona rural	Caso 2: zona urbana
Fase R	(-2,6; 7)	(-2,6; 10)
Fase S	(2,6; 7)	(2,6; 10)
Fase T	(2,6; 10,35)	(2,6; 13,35)
Cabo de Guarda	(0,9; 14,55)	(0,9; 17,55)

Para definir a altura do cabo de guarda no vão médio, considerou-se que este terá uma deflexão máxima não superior a 90% do valor da deflexão do condutor de fase no estado de temperatura média anual.

3.2 Campo Elétrico em 2 LAT Trifásicas em Paralelo

As figuras a seguir apresentam os resultados obtidos para a distribuição do campo elétrico - CE na vizinhança de 2 LATs paralelas. A Fig. 2 apresenta o malhado do modelo geométrico em 2D de campo elétrico - CE de duas linhas de transmissão paralelas para simulação por elementos finitos e a Fig. 3 apresenta o resultado da simulação e a distribuição geométrica em 2D do campo elétrico - CE de duas linhas de transmissão paralelas.

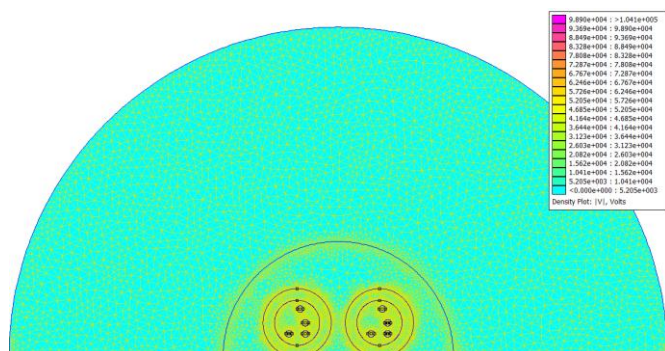


Fig. 2. Malhado do modelo geométrico em 2D de Campo Elétrico - CE de duas LATs paralelas de 132 kV.

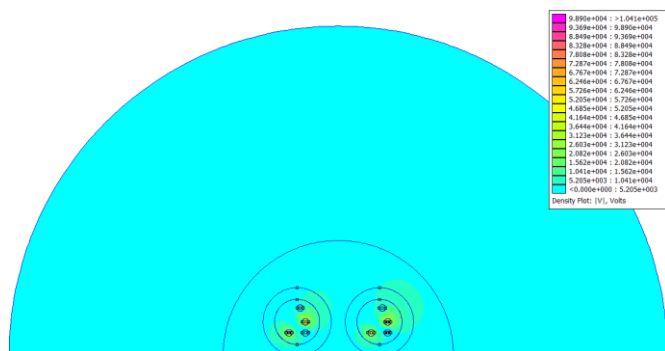


Fig. 3. Distribuição geométrica em 2D do Campo Elétrico - CE de duas linhas de LATs de 132 kV.

3.3 Campo Magnético em 2 LAT Trifásicas em Paralelo

As figuras a seguir apresentam os resultados obtidos para a distribuição do campo magnético - CM na vizinhança de 2 LATs paralelas. A Fig. 4 apresenta o malhado do modelo geométrico em 2D de campo magnético - CM de duas linhas de transmissão paralelas para simulação por elementos finitos e a Fig. 5 apresenta o resultado da simulação e a distribuição geométrica em 2D do campo magnético - CM de duas linhas de transmissão paralelas.

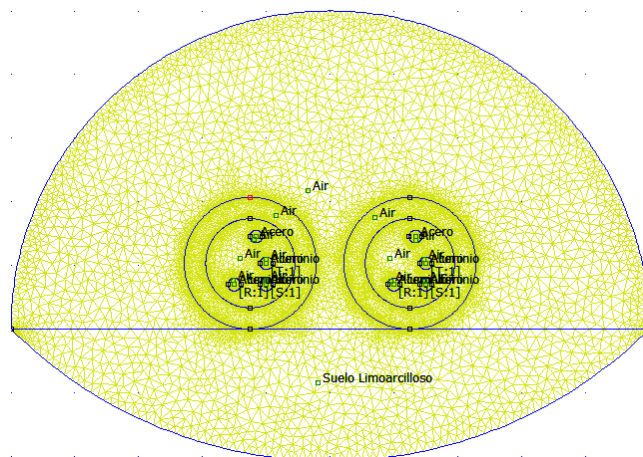


Fig. 4. Malhado do modelo geométrico em 2D de Campo Magnético - CM de duas LATs paralelas de 132 kV.

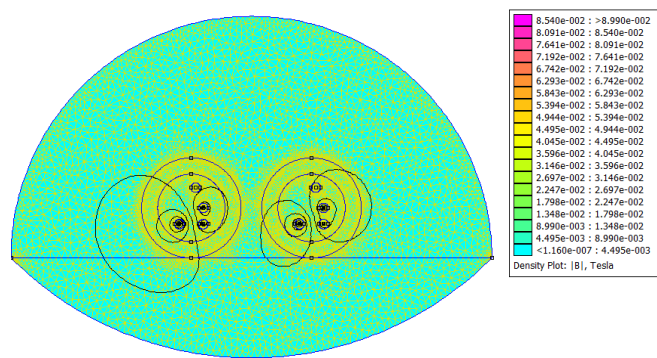


Fig. 5. Distribuição geométrica em 2D do Campo Magnético - CM de duas LATs paralelas de 132 kV.

3.3 Estudos de Caso Simulados

Foram analisados 10 casos de estudo para a configuração de duas LATs em paralelo. Foi levado em consideração que a altura mínima do condutor em relação ao solo é dada no meio do vão, respeitando os valores exigidos pelas normativas vigentes que indicam a seguir:

- Altura mínima do condutor na zona rural $h_{rural} = 7$ m.
- Altura mínima do condutor na zona urbana $h_{urbana} = 10$ m.

Para o estudo do Campo Magnético (CM), foram considerados três cenários de carga:

- LAT paralela com corrente de 400 A.
- LAT paralela com corrente de 625 A.
- LAT paralela com corrente de 735 A.

Por outro lado, a análise do Campo Elétrico (CE) foi realizada para dois níveis de tensão:

- LAT paralela com tensão de 132 kV.
- LAT paralela com tensão de 145 kV.

Os casos de estudo que foram modelados e simulados usando o software FEMM (*Finite Element Method Magnetics*), e são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Casos Simulados para LATs Paralelas em 132 kV.

Nº Caso	Campo simulado	Tipo de linha	Corrente [A]	Tensão [kV]
1	Elétrico	rural	400	132
2	Elétrico	rural	400	145
3	Elétrico	urbana	400	132
4	Elétrico	urbana	400	145
5	Magnético	rural	735	132
6	Magnético	rural	625	132
7	Magnético	rural	400	132
8	Magnético	urbana	735	132
9	Magnético	urbana	625	132
10	Magnético	urbana	400	132

4. RESULTADOS

4.1 Campo Elétrico em 2 LATs em Circuitos Paralelos

As figuras a seguir apresentam os resultados da distribuição do CE nas proximidades das 2 LATs em circuito paralelo para as condições de 132 kV (Caso 1) e de 145 kV (Caso 2) simuladas no meio do vão.

Os valores representados na Fig. 6 correspondem a magnitudes de CE a uma altura de 1 m do nível do solo, as normativas vigentes exigem que seja medido e avaliado para essa condição [14]. As simulações foram realizadas dentro de uma zona de servidão de 25 m (12,5 m de cada lado do eixo de cada LAT).

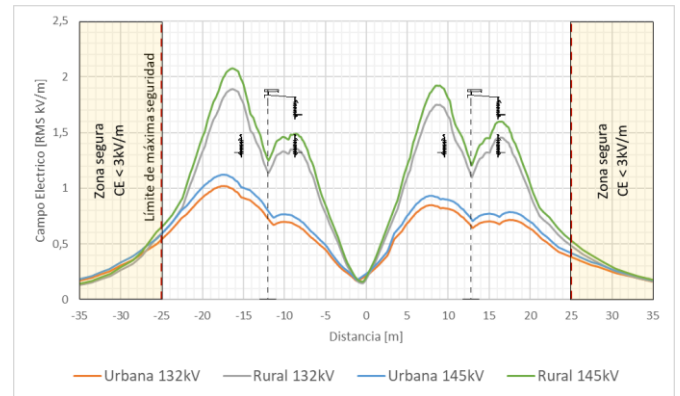


Fig. 6. Distribuição de CE, simulada no meio do vão a 1m do solo de 2 LATs paralelas (Caso 1 ao Caso 4).

4.2 Campo Magnético em 2 LATs em Circuitos Paralelos

As figuras a seguir apresentam os resultados obtidos nas simulações para a distribuição geométrica do CM nas proximidades de 2 LATs paralelos a 132 kV para os seguintes cenários de carga: 400 A, 635 A e 735 A.

A Fig. 7 e a Fig. 8 mostram a distribuição de CM no meio do vão para cenários na zona rural e urbana, os valores foram simulados a 1 m do solo na área de servidão (25 m do eixo de simetria da LAT) de a cordo a normativa vigente [14].

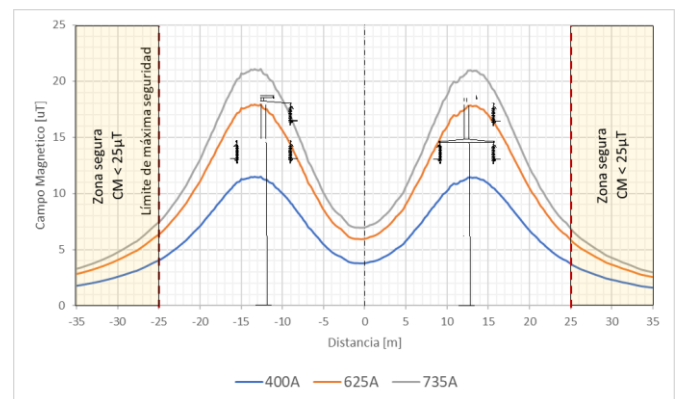


Fig. 7. Distribuição de CM, simulada no meio do vão a 1m do solo de 2 LATs paralelas em 132 kV na zona rural (Caso 5 ao Caso 7).

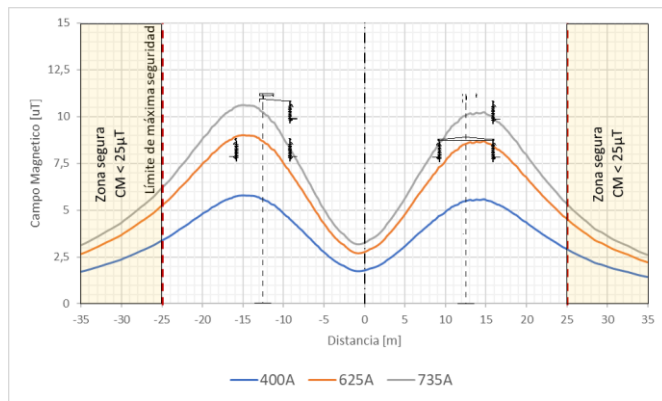


Fig. 8. Distribuição de CM, simulada no meio do vão a 1m do solo de 2 LATs paralelas em 132 kV na zona urbana (Caso 8 ao Caso 10).

Os valores obtidos do campo elétrico (CE) e campo magnético (CM) simulados a uma altura de 1 m em relação ao nível do solo estão abaixo do estabelecido pela normativa vigente [14] tanto no limite da faixa de servidão, como dentro dela, obtendo os valores expressados na Tabela 3.

Tabela 3. Casos Simulados para 2 LAT Paralelas em 132 kV.

Nº Caso	Campo simulado	Tipo de linha	Limite norma	Esq.	Dir.	Cumpre condição?
1	Elétrico	rural	≤ 3 kV/m	0,649 kV/m	0,534 kV/m	Sim
2	Elétrico	rural	≤ 3 kV/m	0,591 kV/m	0,486 kV/m	Sim
3	Elétrico	urbana	≤ 3 kV/m	0,591 kV/m	0,421 kV/m	Sim
4	Elétrico	urbana	≤ 3 kV/m	0,538 kV/m	0,383 kV/m	Sim
5	Magnético	rural	≤ 25 µT	7,46 µT	6,91 µT	Sim
6	Magnético	rural	≤ 25 µT	6,34 µT	5,87 µT	Sim
7	Magnético	rural	≤ 25 µT	4,06 µT	3,75 µT	Sim
8	Magnético	urbana	≤ 25 µT	6,19 µT	5,34 µT	Sim
9	Magnético	urbana	≤ 25 µT	5,26 µT	4,54 µT	Sim
10	Magnético	urbana	≤ 25 µT	3,36 µT	2,91 µT	Sim

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho o software FEMM é utilizado no cálculo dos campos eletromagnéticos baseado no método dos elementos finitos.

A análise dos campos elétricos e magnéticos gerados pelas linhas de transmissão paralelas de 132 kV operando na frequência de 50 Hz, é feita considerando a variação de diferentes parâmetros, 2 níveis de tensão (132 kV e 145 kV) e 3 estados de corrente de carga (400 A, 365 A e 735 A).

Através da análise de simulação do software FEMM em linhas de transmissão paralelas de 132 kV, conclui-se que os valores de compatibilidade eletromagnética - EMC obtidos na faixa de servidão do eletroduto, verifica os valores estabelecidos na normativa vigente [14], mitigando assim os riscos sobre os organismos vivos poderá estar sujeita.

Este trabalho poderia ser estendido para analisar os efeitos dos campos elétricos e magnéticos devidos à linha de transmissão de alta tensão e/ou produzir efeitos biológicos no corpo humano, animais e plantas; e deixando-o ser e tratá-lo por longos períodos de tempo.

Propõe-se como trabalho futuro realizar medições de campos eletromagnéticos *in situ* para validar os modelos desenvolvidos através do uso do software FEMM.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecer ao LIDEE, IMAM, UNaM e CONICET da Argentina.

REFERÊNCIAS

- [1] R. R. Diaz. “Los Campos Electromagnéticos de Frecuencia Industrial y los Riesgos para la Salud”, Revista de Ciencias Exactas e Ingeniería, Tucumán: FACET-UTN, 2007. ISSN 1668 8910.
- [2] A. Hossam-Eldin, K. Youssef y H. Karawia. “Measurements and evaluation of adverse health effects of electromagnetic fields from low voltage equipments”. 12th International Middle-East Power System Conference. 2008 doi:10.1109/mepcon.2008.4562374.
- [3] T. Tynes, y T. Haldorsen. “Residential and occupational Exposure to 50 Hz Magnetic Field and Hematological Cancers in Norway”. Cancer Causes and Control, 2003, 14(8), 715–720. doi:10.1023/a:1026331807952.
- [4] A. Balaji, “Effect of High Voltage Transmission Lines on Human Health, Plant Life, and Animal Activity”, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Vol. 02, PP. 441-446, 2015.
- [5] G. Petrović, T. Kilić, T. Garma, “Measurements and Estimation of the Extremely Low Frequency Magnetic Field of the Overhead Power Lines”, Elektronika Ir Elektrotehnika, Vol.19, No.7, PP.1392-1215, 2013.
- [6] D. Tsanakas, E. Mimos, A. Tzinevrakis, “Regulations for protection against electric and magnetic fields and optimum solution for the development of 150kV transmission lines in suburban regions”, Proceedings of

- the International Conference on Energy & Environmental Systems, Greece, PP.237-242, 2006.
- [7] K. Hameyer, R. Mertens, R. Belmans, “Numerical methods to evaluate the electromagnetic fields below overhead transmission lines and their measurement”, IEEE Conference on Devices, Circuits and Systems, PP. 32 – 36, 1995.
- [8] M. S. H. Al Salameh, I. M. Nejdawi, O. A. Alani, “Using the nonlinear particle swarm optimization (pso) algorithm to reduce the magnetic fields from overhead high voltage transmission lines”, International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, Vol. 4, PP. 18-31, 2010.
- [9] O. E. Gouda, G. M. Amer., W.A. Salem, “Computational Aspects of Electromagnetic Fields near H.V. Transmission Lines”, Energy and Power Engineering Journal, PP. 65-71, 2009.
- [10] J. M. Ehtaiba, S. M. Elhabashi, “Magnetic Field Around The New 400kV OH Power Transmission Lines In Libya”, Proceedings of the WSEAS International Conference on Environment, Medicine And Health Sciences, PP.17-22, 2010.
- [11] J. R. Ruiz, A. G. Espinosa, “Magnetic Field Generated by Sagging Conductors of Overhead Power Lines”, Wiley Computer Applications in Engineering Education, Vol.14, PP.787-794, 2011.
- [12] D. M. Petković, D. Krstić, V. B. Stanković, “The effect of electric field on humans in the immediate vicinity of 110 kv power lines”, Working and Living Environmental Protection Journal, Vol. 3, No 1, PP. 63 – 72, 2006.
- [13] INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION. “ICNIRP Guidelines: Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz)”, Health Phys. 2010 Dec; 99(6):818-36. doi: 10.1097/HP.0b013e3181f06c86.
- [14] Secretaría de Energía / Energía Eléctrica - Resolución nº77/98: "Manual de Gestión Ambiental del Sistema de Transporte Eléctrico de Extra Alta Tensión". 1998. Disponible en: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/45000-49999/49781/norma.htm>.
- [15] D. Meeker; “Finite Element Methods Magnetics Version 4.2 User’s Manual” Mayo 2020. Disponible en <https://www.femm.info/wiki/Documentation/>.
- [16] ASOCIACIÓN ELECTROTÉCNICA ARGENTINA - AEA 95301 - “Líneas Eléctricas Aéreas Exteriores de Media y Alta Tensión”. 2007. ISBN: 378-950-659-030-7.