

INTERDISCIPLINARIDADE NO ENSINO DE ELETROMAGNETISMO EM CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Gustavo Lobato Campos – gustavo.lobato@ifmg.edu.br

Mariana Guimarães dos Santos – mariana.santos@ifmg.edu.br

Instituto Federal de Minas Gerais
Rua Padre Alberico, 440 - São Luiz
35570-000 – Formiga – MG

Paula Carvalho Resende – pcarvalhoresende@gmail.com

Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica CEFET-UFSJ
Av. Amazonas, 7675 - Nova Gameleira
30510-000 – Belo Horizonte – MG

Natália Rodrigues de Melo – nathymelo@yahoo.com.br

Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica CEFET-UFSJ
Praça Frei Orlando, 170
36307-352 – São João del-Rei – MG

Resumo: Ao longo dos últimos anos observa-se a crescente importância da interdisciplinaridade nos cursos de engenharia elétrica como ferramenta para auxiliar na aprendizagem além de novos métodos de aprendizagem. Este artigo apresenta resultados de trabalhos relacionados com a disciplina eletromagnetismo, com ações de interdisciplinaridade envolvendo conceitos de “algoritmos e programação”, “métodos numéricos” e “sistemas elétricos de potência”. O objetivo está no desenvolvimento de simulações computacionais que apresentem resposta do comportamento do campo magnético emitido por linhas de transmissão operando em regime permanente. Para tal é apresentado estudo sobre linhas de transmissão, assim como os aspectos relacionados com o cálculo dos campos magnéticos gerados por tais estruturas e o conceito de aprendizagem baseada em problema. Como resultados, são apresentados valores obtidos por meio do algoritmo desenvolvido, assim como a comparação do mesmo com dados presentes na literatura da área. É fato a importância do domínio por parte do engenheiro eletricitista dos conceitos abordados na disciplina “eletromagnetismo”, e o proposto aqui é uma metodologia alternativa para facilitar a aprendizagem da disciplina, tornando-a mais atrativa aos discentes.

Palavras-chave: Eletromagnetismo. Interdisciplinaridade. Metodologia.

1 INTRODUÇÃO

O eletromagnetismo é matéria básica do curso de engenharia elétrica (EE). Os fenômenos eletromagnéticos estão relacionados com a maioria das teorias e práticas estudadas em todo o curso de EE. Os fundamentos do eletromagnetismo se aplicam em várias disciplinas afins, tais como: micro-ondas, antenas, máquinas elétricas, interferência e compatibilidade

eletromagnética, fibra ótica, entre outras. Entre os dispositivos do eletromagnetismo tem-se: transformadores, relés elétricos, antenas, linhas de transmissão, motores elétricos, entre outros (SADIKU, 2012). Desta forma, é imprescindível um profundo conhecimento das leis e princípios do eletromagnetismo para o discente do curso de EE visto a grande aplicabilidade do mesmo.

Apesar de sua importância, a disciplina de eletromagnetismo é vista por muitos estudantes como uma das mais difíceis no currículo de EE. Esta dificuldade está relacionada com a dificuldade de compreensão de conceitos que envolvem cálculo vetorial e com as metodologias tradicionalmente utilizadas, baseadas na “transferência” de conhecimento do docente aos discente. Além disso, na grande maioria das situações não são apresentadas aplicações práticas da disciplina, que são de fundamental importância na formação do engenheiro electricista. Esses modelos de ensino são conhecidos como métodos de ensino passivo, em que os alunos acompanham as aulas expositivas da matéria lecionada com aplicação de trabalhos e/ou avaliações. Neste método o docente faz papel principal no ensino. Por consequência de todos fatores citados acima, observa-se um crescente desinteresse dos alunos (ROSSO e TAGLIEBER, 1992).

Nesse contexto, as metodologias de ensino ativas desempenham uma função importante na aprendizagem de eletromagnetismo, onde o discente é o personagem principal e maior responsável pelo processo de aprendizado. Dentre as metodologias, destacam-se a aprendizagem baseada em projetos ou problemas (ABP) e estudos de caso. Ambas as metodologias empregadas no ensino de eletromagnetismo propõem a solução de um problema prático e condizente com a realidade. Esse fato aguça a curiosidade do aluno e torna a disciplina mais interessante (SALOMÃO, 2016).

Em suma, o foco deste trabalho é apresentar resultados obtidos ao se aplicar metodologia ativa de ensino, provendo interdisciplinaridade entre eletromagnetismo, algoritmos e programação, métodos numéricos e sistemas elétricos de potência. O objetivo está no desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de simular os níveis de campos magnéticos gerados por uma linha de transmissão operando em regime permanente. Trata-se de uma situação prática real encontrada no cotidiano no engenheiro electricista, o que evidencia a relevância do tema. Desta forma, serão apresentadas as principais leis e fundamentos que regem o eletromagnetismo, para o foco de desenvolvimento aqui apresentado, assim como informações necessárias sobre a área na qual a rotina computacional será empregada. Por fim, serão apresentados os resultados numéricos e analíticos dos problemas afim de exemplificar as aplicações do eletromagnetismo.

2 REVISÃO TEÓRICA

Como o estudo proposto tem por objetivo o entendimento dos conceitos relacionados aos campos magnéticos gerados por linhas de transmissão, é necessária uma revisão teórica dos assuntos envolvidos neste tema, quais sejam: linhas de transmissão e metodologia para cálculo de campos magnéticos. Além disso, apresenta uma breve revisão teórica sobre o ABP.

2.1 Linhas de transmissão

A principal função de um sistema de transmissão é a transferência de energia elétrica das usinas de geração até os centros de carga em condições de funcionamento normal e em condições de falta (LAFOREST, 1981). Visando a redução de perdas na transmissão da energia os níveis das tensões das LTs, são elevados e, por consequência, elevam-se também os níveis

de campos eletromagnéticos gerados nas suas faixas de passagens. Por isso, os órgãos ambientais e a própria sociedade estão exigindo maior segurança nas instalações próximas às LTs, em virtude dos possíveis efeitos à saúde humana, causados pelos campos eletromagnéticos.

A interferência eletromagnética faz-se presente e pode ser analisada, de modo geral, considerando que a LT está operando em regime permanente ou em regime transitório, descritos brevemente a seguir:

- Regime permanente: regime nominal de operação dos grandes centros de geração de energia, frequência de 50 a 60 Hz, no qual propicia a análise dos campos elétrico e magnético individualmente.
- Regime transitório: o espectro de frequência característica é amplo, podendo chegar até 10 MHz. Proveniente de grandes manobras na linha de transmissão, como operações de chaveamento, ou mesmo curtos-circuitos ou descargas atmosféricas.

Regulamentação dos níveis de campos

Regulamentações a respeito dos campos eletromagnéticos emitidos por LTs são um caso a parte na literatura da área, conforme pode ser visto em (RESENDE, CAMPOS e SANTOS, 2017), no qual apresenta uma pesquisa sobre as principais instituições nacionais e internacionais que regulamentam tal área, com destaque para a Comissão Internacional de Proteção contra Radiações Não Ionizantes (ICNIRP), Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), assim como pelo Conselho da União Europeia.

Destaca-se no Brasil a NBR 15415 é a norma que regulamenta as questões relacionadas aos níveis de campos eletromagnéticos para linhas operando acima de 1 kV e na frequência de 50 Hz ou 60 Hz. A Tabela 1 mostra os níveis de referência para campo elétrico e magnético, no limite da faixa de segurança de uma linha de transmissão, no lado externo do perímetro da subestação ou usina e no limite do afastamento mínimo do circuito de distribuição regulamentados pela NBR 15415 (ABNT, 2006).

Tabela 1 - Níveis de referência em valor eficaz de exposição a campos elétricos e magnéticos.

Aplicação	Frequência			
	50 Hz		60 Hz	
	Elétrico kV/m	Magnético μT	Elétrico kV/m	Magnético μT
Público em geral	5,00	100,00	4,16	83,3

Fonte: NBR 15415, 2006.

Como as normas passam por atualizações e alterações, a Lei Federal 11.934 de maio de 2009 e a Resolução Normativa 398 de março de 2010 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) vieram para complementar a NBR 15415. A Tabela 2 mostra as modificações referentes aos níveis de exposição do público geral e ocupacional (ANEEL, 2010).

Tabela 2 - Níveis de referência para público em geral e ocupacional.

Aplicação	Frequência			
	50 Hz		60 Hz	
	Elétrico kV/m	Magnético μT	Elétrico kV/m	Magnético μT
Campo				

Público em geral	5,00	200,00	4,17	200,00
Público Ocupacional	10,00	1000,00	8,33	1000,00

Fonte: ANEEL, 2010.

Obviamente com a existência das regulamentações faz-se necessário verificar, por meio de experimentos de medições de campos elétrico e magnético, se um sistema composto por linhas de transmissão está operando dentro dos limites especificados. Contudo também é de grande valia uma modelagem computacional capaz de calcular teoricamente estes níveis de campos (ao nível do solo) gerados pelo mesmo sistema. Observa-se que tal modelagem pode ser aplicada em fases iniciais de projetos de LTs assim como em estudos de recapitação de LTs.

2.2 Modelagem eletromagnética

A modelagem empregada para cálculo do campo magnético ocorre por meio da manipulação de uma das Equações de Maxwell, conhecida como Lei de Ampère. Esta estabelece, em sua forma integral, Equação (1) (SADIKU, 2012), que a integral de linha do componente tangencial de densidade magnética, H , em torno de um caminho fechado é igual à corrente de contorno, I_C , envolvida no caminho. Porém, I_C possui somente natureza condutiva. Assim, é preciso conhecer as correntes dos condutores de fase da LT.

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = \int_S \vec{J}_C \cdot d\vec{S} = I_C \quad (1)$$

A solução da Equação (1) aplicada a um condutor filiforme de comprimento infinito é ilustrada pela Equação (2) (SADIKU, 2012).

$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi\rho} \hat{a}_\phi \quad (2)$$

Onde I é a corrente que circula pela linha de transmissão, ρ é a distância vertical entre o ponto da fonte e o ponto de observação do campo magnético e \hat{a}_ϕ é o vetor unitário que indica a direção e sentido do campo magnético no ponto de observação.

Para obter a densidade do fluxo magnético por meio da Equação (2) é necessário aplicar a relação constitutiva, apresentada na Equação (3) (SADIKU, 2012).

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (3)$$

Destaca-se que a Equação (2) somente é válida para o cálculo do campo magnético gerado por uma linha imersa em um único meio, ou seja, infinito em todas as direções. Porém, o solo também tem influência no campo magnético e a inclusão é feita pela aplicação do método das imagens. Esse método é usado para representar as correntes que penetram no solo, as quais influenciam os valores do campo magnético no ponto de observação.

2.3 Aprendizagem baseada em problema

A forma tradicional de ensino, com pouca interação ou participação do aluno, faz com que esse modelo de ensino seja questionado. Desta forma, tem-se introduzido no ensino superior a aprendizagem baseada em problemas.

O contexto histórico da ABP inicia, segundo Gil (2010), na Grécia Antiga, onde Platão utilizava casos concretos com o intuito de instigar discussões filosóficas. Gil (2010) ainda cita, que na modernidade, o método ABP foi introduzido na Universidade de Harvard, em 1880, por Christopher Landgell, aos alunos de Direito afirmando que eles “poderiam aprender melhor estudando as decisões dos tribunais do que lendo textos jurídicos”. Como pioneira, a *Harvard Business School* tem como estratégia fundamental de ensino a ABP.

Segundo Oliveira (2011), vários autores renomados como Comenius, Piaget, Bruner, Vigotsky, Rogers e Paulo Freire foram os principais contribuintes no embasamento da ABP.

A ABP é um método de ensino que tem como estratégia e objetivo fazer que os estudantes solucionem um problema. Desta forma, é centrada no estudante, deixando de ser um receptor passivo e assume o papel de agente principal responsável pelo seu aprendizado (SALOMÃO, 2016).

Geralmente, a ABP é realizada em grupo. Assim, além do aprendizado auto-dirigido, centrado no estudante, promove o desenvolvimento da habilidade de trabalhar em grupo. O professor, por sua vez, facilita e conduz a discussão dos alunos, indicando os recursos didáticos úteis para cada situação (IOCHIDA, 2001).

A ABP, funciona da seguinte forma: são apresentados os conhecimentos prévios dos estudantes sobre os assuntos; os problemas são primeiramente identificados e listados e em seguida são formulados os objetivos de aprendizado, baseados nas questões úteis para o esclarecimento e a resolução do problema. Resumidamente, são realizados sete passos na ABP, são eles (IOCHIDA, 2001):

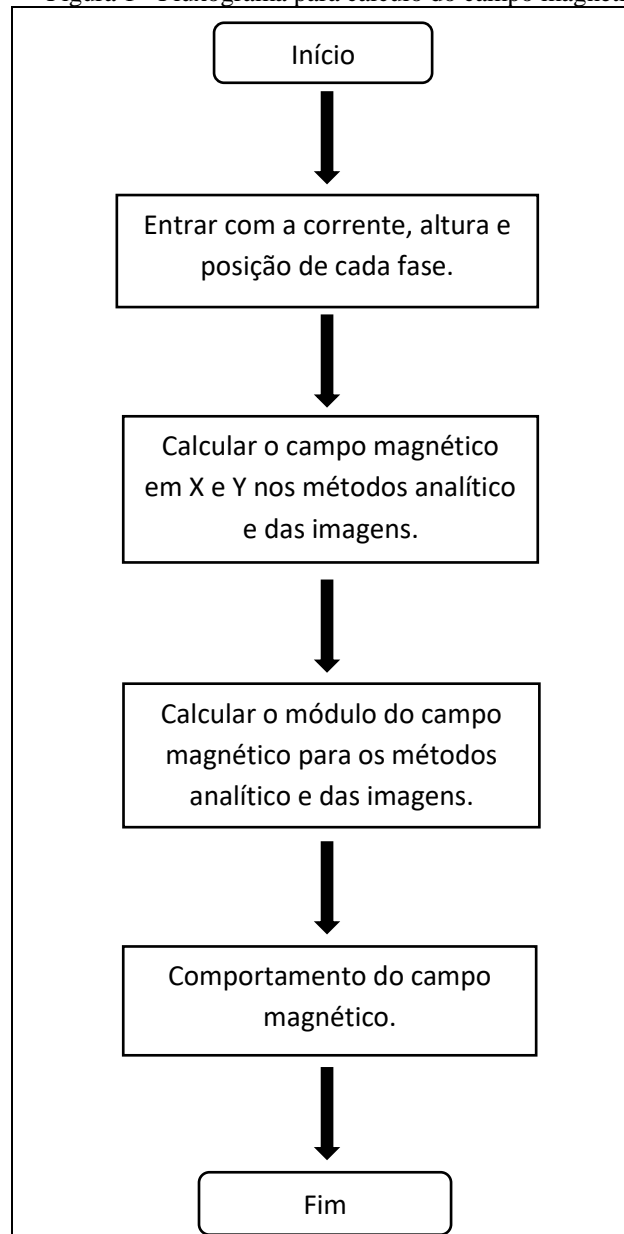
1. Esclarecimento dos termos difíceis;
2. Definição dos problemas a serem entendidos e explicados;
3. Análise dos problemas. Dar possíveis explicações, de acordo com os conhecimentos prévios;
4. Resumir;
5. Formular os objetivos de aprendizado;
6. Estudo individual baseado no passo 5;
7. Relatar ao grupo. Discutir.

3 ROTINA COMPUTACIONAL – CAMPO MAGNÉTICO

O objetivo proposto para este trabalho, que constitui no passo 5 da ABP, no qual constitui a interdisciplinaridade é a modelagem de uma linha de transmissão e a avaliação do comportamento dos seus perfis de campo magnético. Para se aplicar este aprendizado em um problema real, considerou-se os sete passos da ABP. O primeiro passo foi obtido por meio da revisão teórica. O segundo passo foi identificar o problema: considerando a linha operando em regime permanente, na frequência de 60 Hz, pode-se modelar os campos elétricos e magnéticos de forma independente, uma vez que fenômenos de propagação de onda podem ser negligenciados. Assim é possível determinar os níveis de campos magnéticos isoladamente. O terceiro passo foi a discussão entre os autores deste trabalho de como resolver e calcular os campos magnéticos emitidos por linhas de transmissão.

Para tal faz-se necessário o desenvolvimento de uma rotina computacional, fundamentada na solução analítica do problema sob dois aspectos, com e sem a influência do solo.

Figura 1 - Fluxograma para cálculo do campo magnético.



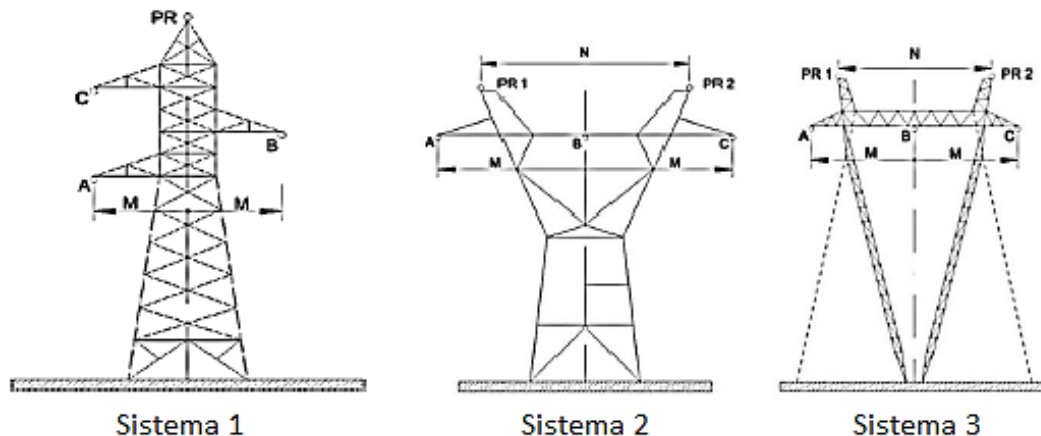
Empregando o passo 4, primeiramente, com o intuito de testar e comprovar a veracidade das modelagens, optou-se por fazer uma rotina pontual, ou seja, o cálculo do campo magnético foi observado em determinado ponto. Posteriormente, ambos os programas foram estendidos para assim ser possível a análise para uma faixa em torno da linha de transmissão, denominada faixa de passagem. O fluxograma da Figura 1 mostra a estrutura para elaboração da rotina utilizada para o desenvolvimento do algoritmo computacional para cálculo do na faixa de passagem.

4 RESULTADOS

Com a compreensão dos métodos matemáticos empregados para os cálculos dos níveis de campos magnéticos gerados, é desenvolvida uma rotina computacional para avaliação de tais níveis na faixa de passagem das LTs. Assim neste tópico são apresentados resultados fruto de comparação entre dados presentes na literatura da área, com os obtidos pelas rotinas desenvolvidas em Matlab.

Neste tópico, os passos 5, 6 e 7 da metodologia da ABP, nos quais se resumem em apresentar e discutir os resultados são apresentados. Para avaliação dos resultados relacionados aos níveis de campos magnéticos são utilizados os sistemas apresentados na Figura 2.

Figura 2 - Sistemas 1, 2 e 3.



Fonte: Vieira, 2013.

O sistema 1 trata-se de uma linha de transmissão trifásica, com tensão 138 kV e corrente de operação média de 146,43 A. O centro da estrutura é adotado como eixo de simetria. Assim, a distância entre o centro e as fases, M, é de 3 metros. A distância do condutor A e em relação ao solo é de 12,15 metros, da fase B e o solo é de 14,01 metros e a distância da fase C e o solo é de 15,97 metros.

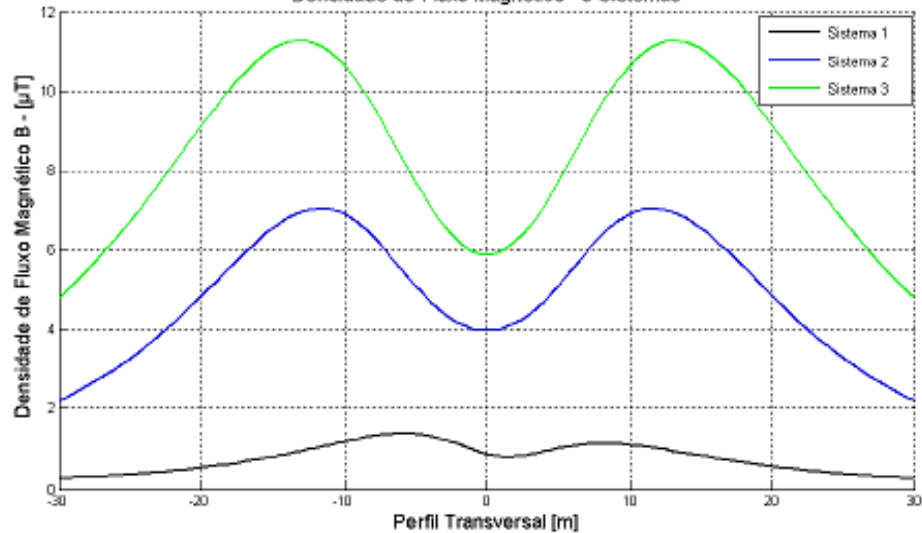
Já o sistema 2 corresponde a uma linha de transmissão que opera a 345 kV e liga sistema Pimenta-Barbacena. A corrente de operação média é de 418,3 A. A fase B é adotada como o eixo de simetria e assim, as fases A e C estão espaçadas da fase B em 9,5 metros. Devido a configuração da estrutura, a distância entre o solo e as fases é a mesma, sendo de 14 metros.

Finalmente, o sistema 3 é uma linha de transmissão trifásica, com tensão de 500 kV e corrente de operação média de 837,15 A. Como o sistema 2, a fase B é adotada como referência e a distância entre as fases A e C da fase B é de 10,24 metros. Devido a configuração da estrutura, a distância entre o solo e as fases é a mesma, sendo de 16,53 metros.

Todos os sistemas utilizados foram utilizados por Vieira (2013) e tratam-se de linhas reais do sistema Cemig de Minas Gerais. Mais detalhes a respeito de tais sistemas podem ser encontrados no trabalho citado.

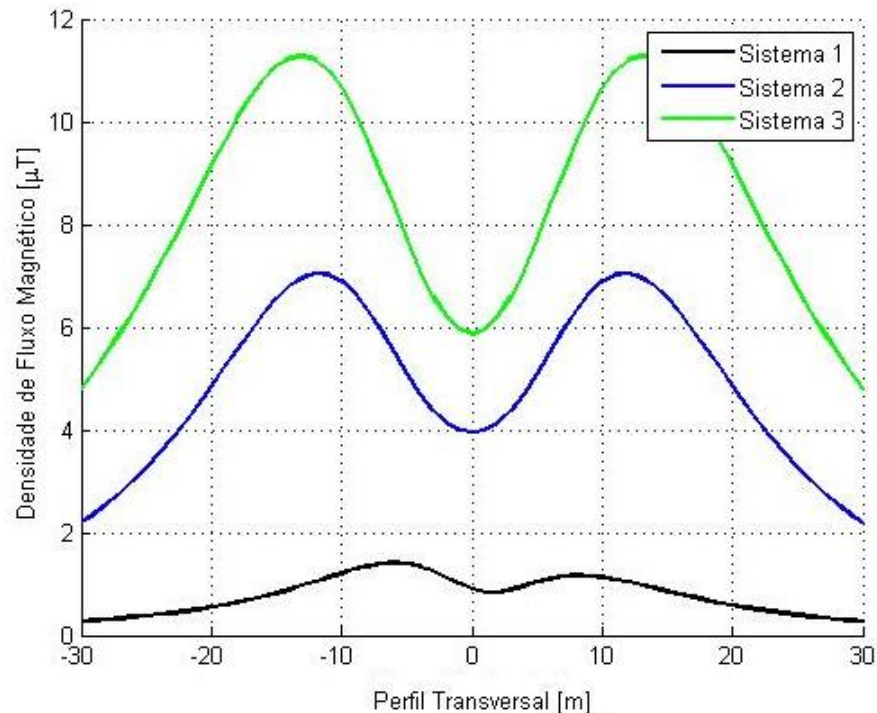
Com os valores das configurações geométricas e elétricas de todos os sistemas, o perfil do comportamento do campo magnético é simulado e comparado com os valores simulado por Vieira (2013). As Figuras 3 e 4 mostram o comportamento de cada sistema simulado por Vieira (2013) e a simulação feita nesta pesquisa. Os sistemas 1, 2 e 3 foram simulados e calculados utilizando o método das imagens.

Figura 3 - Curvas simuladas por Vieira (2013).
Densidade de Fluxo Magnético - 3 Sistemas



Fonte: Vieira, 2013.

Figura 4 - Curvas simuladas nesta pesquisa.



Para facilitar a análise dos resultados, os sistemas 1, 2 e 3 foram simulados no mesmo gráfico e é exposto com o resultado de Vieira (2013). Destaca-se que ambos foram simulados nas mesmas condições, ou seja, utilizando-se o método das imagens para considerar o efeito do solo na distribuição de campo magnético. Observa-se que a ferramenta computacional desenvolvida apresenta resultados satisfatórios quando comparados com Vieira (2013). Visualmente é possível observar a semelhança entre os perfis, que pode ser evidenciada pela

avaliação dos pontos de máximo e mínimo das mesmas. Isso deve-se ao fato de que em simulações, uma vez que os valores de entrada e formulações analíticas utilizadas são as mesmas, os resultados devem coincidir. Essa comprovação valida a ferramenta desenvolvida.

Com relação aos resultados apresentados, observa-se que os níveis de campos magnéticos estão dentro dos limites estabelecidos pela norma NBR 15415 e que os perfis dependem diretamente da configuração geométrica da linha e dos níveis de correntes elétricas presentes na superfície dos condutores da mesma.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do trabalho proposto, na disciplina de eletromagnetismo, mostrou-se uma alternativa eficiente para auxiliar no entendimento e no estímulo à aprendizagem dos discentes. A possibilidade de utilizar as equações e conceitos teóricos estudados na disciplina, em aplicações práticas reais, desperta o interesse do aluno e permite com que o mesmo tenha contato com problemas relevantes para a área de engenharia elétrica mesmo antes de se formarem.

No que diz respeito à ferramenta computacional desenvolvida, observa-se que os resultados obtidos apresentam semelhança com resultados já divulgados na literatura e permitem análises dos níveis de campos magnéticos na faixa de passagem das linhas de transmissão. Percebe-se ainda que os perfis de campo magnético dependem dos níveis de correntes e das configurações geométricas dos sistemas, ou seja, da disposição dos condutores das linhas de transmissão. Além disso, observa-se que, para todos os sistemas, os níveis encontrados são aceitáveis conforme regulamentação apresentada. Ademais, o desenvolvimento do trabalho permitiu a interação de conceitos interdisciplinares, envolvendo conhecimentos de programação, métodos numéricos, linhas de transmissão e eletromagnetismo.

Agradecimentos

A todos os integrantes do Grupo de Pesquisa CNPq, GSE (Grupo de Soluções em Engenharia), pela interação e colaboração no desenvolvimento do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 394**, de 23 de março de 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15415**: Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 Hz e 60 Hz. Rio de Janeiro, 2006.

GIL, Antônio Carlos. **Didática do Ensino Superior**. 1ª Ed. 5. Reimpressão. São Paulo: Atlas, 2010.

IOCHIDA, Lucia Christina. **Aprendizado baseado em problemas**. 2001. Disponível em: <http://www2.unifesp.br/centros/cedess/pbl/>. Acesso em: 09 jul. 2018.

LAFORST, J. J. **Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above**. USA: United States General Electric Company, 1981.

OLIVEIRA, Margibel A. de. **Didática do ensino superior**. 1ª Ed. São Paulo: Know How, 2011.

RESENDE, Paula Carvalho; CAMPOS, Gustavo Lobato; SANTOS, Mariana Guimarães. Estudo sobre as principais regulamentações dos campos eletromagnéticos em linhas de transmissão operando em regime permanente. **ForScience**, v. 5, n. 3, 2017.

ROSSO, Ademir José; TAGLIEBER, José Erno. Métodos ativos e atividades de ensino. **Perspectiva**, v. 10, n. 17, p. 37-46, 1992.

SADIKU, M. O. **Elementos do Eletromagnetismo**. 5ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2012.

SALOMÃO, Dennys. Metodologia de ensino ativo. **Revista Compartilhe Docência**, v. 1, p. 13-14, 2016.

VIEIRA, Hugo Rodrigues. **Acoplamento magnético entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos**. 2013. 158 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de São João del-Rei, 2013.

INTERDISCIPLINARY IN ELECTROMAGNETISM TEACHING IN ELECTRICAL ENGINEERING COURSE

Abstract: *Over the last few years, the increasing importance of interdisciplinary in electrical engineering has been observed as a tool to aid in learning. This article presents works results related to the electromagnetism course with actions of interdisciplinary involving concepts of "algorithms and programming", "numerical methods" and "electrical power systems". The objective is to develop computational simulations that show the behavior of the magnetic field emitted by transmission lines operating in steady state. For this purpose, a study is presented on transmission lines, including also aspects related to the calculation of the magnetic fields generated by such structures. The values obtained through the implemented algorithm and a comparison of this one with data from the literature are presented as the results. It is true that an electrical engineer should dominate the concepts addressed in the discipline "electromagnetism" and here is proposed an alternative methodology to facilitate the learning of the course, making it more attractive to the students.*

Key-words: *electromagnetism, interdisciplinary, methodology.*