



## USO DE BOBINAS PARA EXTRAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO POR ACOPLAMENTO INDUTIVO

Raphael Batista\*<sup>1</sup> e Úrsula do Carmo Resende<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

<sup>2</sup>CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

**Resumo** - Este trabalho apresenta um estudo associado à possibilidade de extrair energia elétrica de linhas de transmissão por meio de acoplamento indutivo com o uso de bobinas. Para isso, considera-se um circuito constituído, basicamente, por condutores posicionados próximos à linha de transmissão. Apresenta-se uma formulação analítica para o fenômeno, a qual permite a avaliação da tensão induzida no sistema acoplado para diferentes geometrias e número de espiras. Além disso, realiza-se um procedimento para validar a modelagem matemática utilizada para o cálculo da impedância própria a fim de aplicá-la ao trabalho. Os resultados, que são apresentados em valores por espira, permitem uma análise simples da viabilidade da configuração escolhida. Consequentemente, pode-se descobrir o número mínimo de espiras da bobina utilizada em função da potência necessária para a carga a ser alimentada.

**Palavras-Chave** - Circuitos magnéticos, Eletromagnetismo, Linhas de transmissão, Reaproveitamento de energia.

### EVALUATION OF AN ENERGY EXTRACTION SYSTEM FROM TRANSMISSION LINES BY MAGNETIC COUPLING

**Abstract** - This work shows a study about the electrical energy extraction of transmission lines by the magnetic coupling. For this, a circuit constituted by conductors positioned close to the transmission line is considered. In the research, an analytical formulation for the phenomenon is presented, which is used for the evaluation of the induced voltage in the coupled system for different geometries and solenoid turns. An experiment to validate the mathematical model developed for the self-impedance is made in order to be applied in the work. The results, presented in values per solenoid turn, make possible a simple viability analysis of the chosen configuration. Consequently, one can find the minimum number of solenoid turns required for the power load.

**Keywords** - Electromagnetism, Energy recycling, Magnetic circuits, Transmission lines.

### I. INTRODUÇÃO

O interesse pela transmissão de energia elétrica via ondas eletromagnéticas, sem a utilização de fios, surgiu no final do século XIX, com a proposta da teoria unificada do eletromagnetismo, por Maxwell. Um dos precursores desse tipo de transmissão foi Nikola Tesla, responsável por várias patentes no âmbito do eletromagnetismo e especialmente na transmissão de energia elétrica via ondas eletromagnéticas.

Desde então, diversas tecnologias têm sido investigadas nas últimas décadas, como os trabalhos de [1-3]. Entre eles, enaltecem-se os que se baseiam em raios-laser, em antenas omnidirecionais e indução eletromagnética.

Os raios-laser podem ser utilizados de maneira eficiente para transmissão de energia sem fio, mesmo em longas distâncias, porém, esta não é uma opção prática para aplicações do dia-a-dia, pois, além de exigir que o transmissor e o receptor estejam diretamente visíveis um ao outro – sem obstáculos, há um risco de que objetos que cruzem essa linha de visada sejam incinerados. Modos radioativos em antenas omnidirecionais, embora eficientes para transmissão de dados, são inapropriadas para transmitir energia devido ao espalhamento de energia em todas as direções, o que a torna ineficiente. Antenas direcionais possuem o mesmo problema dos raios-laser, com a adição da necessidade de um complexo sistema de rastreamento de objetos móveis.

Para sistemas utilizando acoplamento indutivo, existem vários esquemas atualmente sendo desenvolvidos e aplicados, como as bobinas ressonantes acopladas. Neste experimento, pesquisadores do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) chegam à conclusão de que é possível aumentar a distância entre as bobinas adicionando ressonância à solução. Em seus primeiros experimentos, usando ressonância magnética, eles foram capazes de transmitir energia suficiente para acender uma lâmpada de 60 watts, a uma distância de aproximadamente 2 metros utilizando um acoplamento magnético que oscila a uma frequência de aproximadamente 10 MHz [3,4].

Especificamente em relação ao acoplamento indutivo, a viabilidade da extração de energia elétrica de linhas de transmissão de corrente alternada através do acoplamento

\*raphaelbatista@ufmg.br

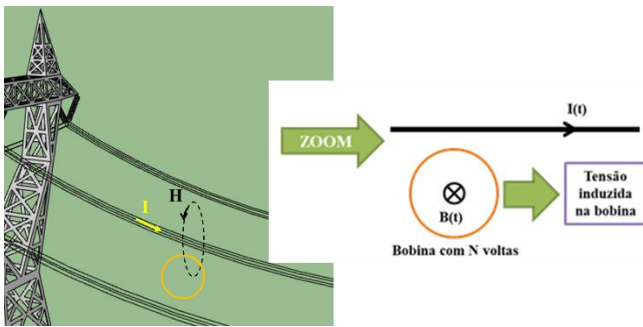
entre a linha e um circuito constituído basicamente por condutores posicionados próximos à mesma já foi demonstrada nos trabalhos [5-7]. Porém, não se encontra na literatura textos relacionados a dispositivos baseados em acoplamento indutivo como o tratado neste trabalho. Destaca-se, portanto, a importância deste trabalho devido às possibilidades de utilização e fins que o dispositivo pode oferecer se sua viabilidade for comprovada. Destaca-se que a transmissão de energia sem fio pode ser aplicada na alimentação de inúmeros equipamentos elétricos, especialmente quando a mobilidade é necessária/desejada ou quando o acesso é difícil e perigoso. Ademais, o presente trabalho representa uma modificação daquele realizado em [8].

## II. MODELAGEM ELETROMAGNÉTICA DO PROBLEMA

### A. Descrição do problema

Com o objetivo de facilitar sua compreensão, a Figura 1 mostra uma ilustração do problema avaliado. Uma linha de transmissão com corrente alternada gera um campo eletromagnético variável no tempo. O campo magnético, denotado por  $\vec{H}$  na Figura 1, atravessa uma bobina (condutor) localizada em uma posição próxima das fases da linha de transmissão. Por ser variável no tempo, o fluxo de densidade magnética induz na bobina uma tensão induzida entre seus terminais – lei da indução de Faraday. Se estes forem fechados em forma de curto ou por meio de uma carga, uma corrente induzida na bobina surgirá devido à tensão induzida. Seguindo este princípio, almeja-se avaliar o uso de bobinas em paralelo com a linha de transmissão para reaproveitamento da energia contida no campo magnético.

Figura 1: Representação de uma bobina em paralelo a um condutor fase genérico de uma linha de transmissão n-fásica.



### B. Tensão induzida para o caso geral de uma linha de transmissão n-fásica

Como apresentado em [8], a configuração proposta neste trabalho permite a desconsideração do acoplamento condutivo nas condições de regime permanente da linha devido ao bom isolamento entre sistema de extração de energia e à linha de transmissão. Outro ponto omitido é o efeito de radiação devido à baixa frequência do problema – 60 Hz, além do efeito capacitivo, pelo fato do condutor que sofre uma tensão induzida estar conectado ao solo.

A formulação do problema apresentado em [8] se baseia nas deduções realizadas em [9]. A lei da indução de Faraday

caracteriza o fenômeno da indução eletromagnética a partir de suas formas diferencial e integral, respectivamente, dadas por:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\int_C \vec{E} \cdot d\vec{l}_C = -\frac{\partial}{\partial t} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (2)$$

Onde:

$\vec{E}$  - Vetor de campo elétrico.

$\vec{B}$  - Vetor de densidade de fluxo magnético.

Destaca-se que a integral à esquerda da Equação (2) é a força eletromotriz induzida – f.e.m. Os dois parâmetros são dependentes da posição e tempo, ou seja, tem-se que  $\vec{E}(x, y, z, t)$  e  $\vec{B}(x, y, z, t)$ . O potencial vetor magnético  $\vec{A}$  e sua relação com  $\vec{B}$  são dados, respectivamente, por:

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \frac{\vec{J}}{r} dv = \frac{\mu}{4\pi} \int_L \frac{I}{r} dl_L \hat{a}_z \quad (3)$$

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \quad (4)$$

Onde:

$\vec{J} = \vec{J}(x, y, z, t)$  - Vetor densidade de corrente.

$r$  - Módulo do vetor que une o ponto de observação do campo à fonte do mesmo.

$\mu$  - Permeabilidade magnética do meio.

A representação final da Equação (3) é alcançada para a condição em que a corrente  $I$  possua apenas uma direção e possa ser considerada centrada no eixo do condutor, além de  $\hat{a}_z$  corresponder ao versor que define a direção do eixo do condutor. Outra hipótese considerada é a de que o problema se encontra em regime permanente senoidal ou RPS, logo, pode ser avaliado pelo uso de fasores.

A substituição da Equação (4) em (2), considerando a notação indicada na Equação (3) e o uso do teorema de Stokes, resulta em:

$$f.e.m. = \int_C \vec{E} \cdot d\vec{l}_C = -\frac{\partial}{\partial t} \int_C \vec{A} \cdot d\vec{l}_C \Rightarrow \quad (5)$$

$$f.e.m. = -\frac{j\omega\mu}{4\pi} \iint_C \left( \int_L \frac{I}{r} dl_L \hat{a}_z \right) \cdot d\vec{l}_C$$

Onde:

$\omega$  - Velocidade angular.

$\hat{a}_z$  - Versor de direção de  $\vec{B}$ .

Os índices C e L das integrais na Equação (5) representam, respectivamente, integrações no condutor induzido – ponto de observação do campo, e no condutor indutor – fonte do campo.

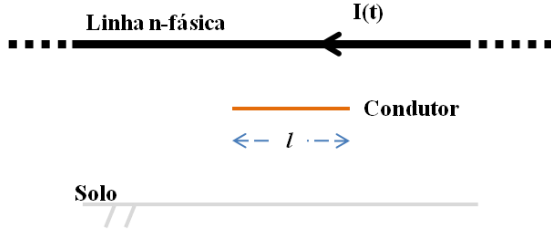
Como apresentado em [7], supõe-se uma linha de transmissão n-fásica infinita, representada por condutores de seção transversal desprezível, que podem ser tratados como filamentos, e comprimento infinito, imersos no ar e percorridos por uma corrente cossenoidal. Ademais, supõe-se um objeto condutor, de comprimento  $l$ , paralelo à linha de transmissão, como ilustrado na Figura 2. A resistividade do solo é estimada por meio da profundidade complexa, denotada por  $p$  [10]:

$$p = 1/\sqrt{j\omega\mu\sigma}, \sigma = \rho^{-1} \quad (6)$$

Onde:

- $\sigma$  - Condutividade elétrica do solo.
- $\rho$  - Resistividade elétrica do solo.

Figura 2: Representação do objeto condutor paralelo a um condutor fase genérico de uma linha de transmissão n-fásica.



O uso do Método das Imagens para a análise do potencial vetor magnético no objeto conduzido, seguido de sua substituição na Equação (5), resulta na expressão para o cálculo da força eletromotriz [7]:

$$\text{f.e.m.} = -\sum_{i=1}^n jf\mu_0 I I \left\{ \ln \frac{\sqrt{[(\Delta x_{ip})^2 + (h_p + h_i + 2p)^2] [(\Delta x_{ip})^2 + (h_i - h_s)^2]}}{\sqrt{[(\Delta x_{ip})^2 + (h_i - h_p)^2] [(\Delta x_{ip})^2 + (h_i + h_s + 2p)^2]}} \right\} \angle_i \frac{2\pi}{n} \quad (7)$$

Onde:

- $\mu_0$  - Permeabilidade magnética do ar.
- $I$  - Valor eficaz da corrente na fase da linha.
- $h_p$  - Altura do condutor superior do objeto conduzido.
- $h_s$  - Altura do condutor inferior do objeto conduzido.
- $h_i$  - Altura da fase  $i$ .
- $\Delta x_{ip}$  - Distância horizontal entre a fase  $i$  e o sistema conduzido.

### C. Cálculo da indutância de uma bobina circular multiespiras

Apesar das limitações encontradas para a construção de bobinas com geometrias diferentes da circular, apresenta-se a fórmula para o cálculo de loops circulares mono e multiespiras e sua extensão para outras geometrias. Como proposto em [11], a força eletromotriz induzida em um loop com uma espira vale:

$$\text{f.e.m.}_{\text{loop único}} = \frac{d\Psi_{\text{loop único}}}{dt} = L_{\text{loop único}} \frac{dI}{dt} \quad (8)$$

Onde:

- $\Psi$  - Fluxo concatenado pela corrente  $I$ .
- $L$  - Indutância da bobina.

Para o caso de  $N$  espiras, como ilustrado na Figura 3 e 4, têm-se que:

$$\begin{aligned} \text{f.e.m.}_{\text{total}} &= N \left( \text{f.e.m.}_{\text{loop único}} \right) \Rightarrow \\ \text{f.e.m.}_{\text{total}} &= N^2 \left( L_{\text{loop único}} \frac{dI}{dt} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

o que resulta na indutância da bobina multiespiras como  $N^2$  vezes o valor da indutância da monoespira.

Figura 3: Bobina multiespiras com  $N$  voltas bem próximas.

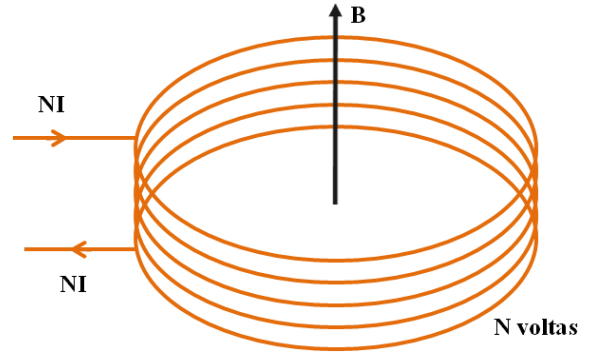
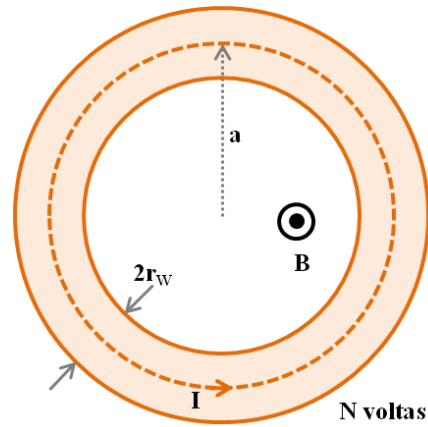


Figura 4: Detalhes geométricos da bobina multiespiras com  $N$  voltas.



A densidade de fluxo magnético sobre a bobina, como indicado em [11], pode ser calculada pela lei de Biot-Savart ou pelo uso do potencial vetor magnético, enquanto a indutância é estimada a partir da lei da indução de Faraday, do potencial vetor magnético ou por meio da integral de Neumann. Todos os métodos resultam na mesma fórmula para o cálculo da indutância de uma bobina multiespiras:

$$L = N^2 \mu_0 a \left[ \ln(8a/r_w) - 2 \right], \quad a \gg r_w \quad (10)$$

Onde:

- $a$  - Raio da bobina.
- $r_w$  - Raio do fio que compõe a bobina.

## III. RESULTADOS

### A. Validação da modelagem matemática para cálculo da indutância de bobinas multiespiras

Executou-se um experimento com o objetivo de comparar os resultados de medição de bobinas com aqueles apresentados por meio do uso da Equação (10). Um medidor Hameg LCR-Bridge HM8118 e duas bobinas construídas de forma manual, em que o número de espiras é estimado de forma visual, foram utilizados. A bobina 1 possui 2,25 espiras, 73,04 mm de diâmetro do núcleo e 0,90 mm de fio, enquanto a bobina 2 tem 3,15 espiras, 80,09 mm de diâmetro do núcleo e 0,90 mm de fio. Os resultados apresentados na Tabela I indicam a consistência da Equação (10) em relação aos resultados experimentais, ainda que a bobina seja construída de forma rudimentar e seu número de espiras estimado da

mesma maneira. Para a bobina 1, encontrou-se uma diferença relativa de 10,68% e para a bobina 2, de 3,48%. O valor medido na Tabela I apresenta a estimacão e a incerteza associada à precisão do equipamento utilizado.

Tabela I: Comparaco das medioes com valores estimados de indutância por meio de fórmula para bobinas multiespiras

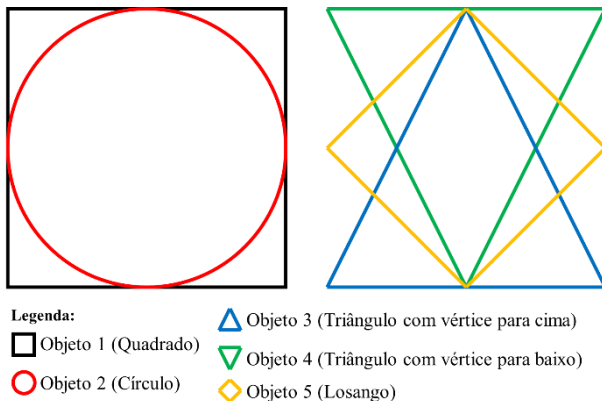
| Valor                                    | Bobina 1            | Bobina 2            |
|--|---------------------|---------------------|
| Medido ( $\mu\text{H}$ )                 | $1,1644 \pm 0,0042$ | $2,2043 \pm 0,0037$ |
| Estimativa via fórmula ( $\mu\text{H}$ ) | 1,04                | 2,281               |

### B. Análise da tensão induzida para um sistema monofásico

A tensão induzida em funo da geometria do objeto induzido consiste na primeira análise realizada. Para realiz-la, supõe-se uma linha monofásica infinita de corrente  $I = 100$  A, com coordenadas  $(x,y,z) = (0,0,20)$  m, isto , à 20 metros de altura do solo. Os objetos conduzidos, como ilustrado na Figura 5, se situam em  $(x,y,z) = (0;0,15;19,35)$  m. O objeto base para comprimento  o retângulo da Figura 4, que possui 0,3 m de lado.

A análise  realizada por meio da implementaco da Equaco (7) em rotina computacional. Os objetos são discretizados na rotina e considerados como um conjunto de segmentos condutores. A contribuico de cada elemento condutor  contabilizada na forma de parcelas para estimar a tensão induzida total no objeto. Tal procedimento permite a estimacão da tensão induzida de geometrias quaisquer de forma prática, desde que a discretizaco realizada no objeto condutor seja suficiente – algo que pode ser detectado pela convergência do valor da tensão induzida com o aumento da segmentaco do objeto.

Figura 5: Configuracoes geométricas testadas para o objeto induzido.



Os resultados da Tabela II indicam que o triângulo com vrtice para baixo possui a maior tensão induzida por área de objeto, enquanto o losango possui a maior tensão induzida por perímetro ou comprimento de condutor. Esses resultados indicam duas possibilidades de projeto para escolha da geometria a ser desejada: para o caso de o espaço ser um fator problemático, o triângulo com vrtice para baixo  a melhor escolha, enquanto a geometria mais eficiente do ponto de vista econmico  a em forma de losango. Destaca-se que a bobina circular, escolhida para análise devido à facilidade de construico,  a terceira melhor escolha em relao a cada parâmetro.

Tabela II: Comparaco das geometrias em funo da tensão induzida por área e por perímetro

| Objeto | Perímetro (m) | rea ( $\text{m}^2$ ) | Tensão induzida por área ( $\text{V}/\text{m}^2$ ) | Tensão induzida por perímetro ( $\text{V}/\text{m}$ ) |
|--------|---------------|-----------------------|--|---|
| 1      | 1,2           | 0,090                 | 2,076  | 0,156   |
| 2      | 0,942         | 0,071                 | 2,638  | 0,198   |
| 3      | 0,971         | 0,045                 | 4,032  | 0,187   |
| 4      | 0,971         | 0,045                 | 4,273  | 0,198   |
| 5      | 0,849         | 0,090                 | 2,069  | 0,219   |

Considerando tais resultados, realizou-se a segunda análise referente ao estudo do fio de cobre utilizado na bobina. Os dados de corrente máxima admissível para as bitolas avaliadas são as apresentadas por [12]. A Tabela III apresenta os resultados obtidos para bobinas de uma espira. Assim, a tensão induzida pode ser multiplicada pelo número de espiras a fim de se obter o caso desejado.

Tabela III: Resultados de tensão induzida para uma linha monofásica em funo da bitola do condutor da bobina circular

| Bitola (mm) | Tensão (mV) | Resistência ( $\text{m}\Omega$ ) | Indutância ( $\mu\text{H}$ ) | Impedância ( $\text{m}\Omega$ ) |
|-------------|-------------|----------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 3,264       | 13,248      | 1,933                            | 0,867                        | 1,933                           |
| 3,665       | 13,248      | 1,533                            | 0,845                        | 1,533                           |
| 4,115       | 13,248      | 1,223                            | 0,823                        | 1,223                           |
| 4,620       | 13,248      | 0,965                            | 0,802                        | 0,965                           |
| 5,189       | 13,248      | 0,765                            | 0,780                        | 0,765                           |

Destaca-se que, enquanto a tensão induzida praticamente não se altera com o aumento da bitola, a impedância diminui e uma maior corrente circula no sistema para fios mais grossos. Ademais, deve-se considerar que uma carga colocada em série diminuir a corrente e, conseqüentemente, a potência fornecida para sua alimentaco. Para compensar tal efeito, deve-se aumentar o número de espiras a fim de se obter o valor nominal de corrente para a carga e avaliar sua viabilidade.

Do ponto de vista físico, a manuteno da tensão induzida com o aumento da bitola do condutor que compõe a bobina se deve a insignificativa alteraco da área do objeto. Como a tensão induzida  funo do fluxo magnético que, por sua vez,  funo da densidade de fluxo magnético que atravessa uma área, espera-se que o aumento da ordem de poucos mm no raio dos condutores seja insignificante para os casos avaliados – comportamento que aparece nas simulaoes realizadas.

Ademais, espera-se que a tensão induzida no objeto atue como uma fonte para a carga a ser acoplada em série ao condutor. Nesse caso, a potência extraída tende a ser constante com a variao da carga.

### C. Análise da tensão induzida para um sistema trifásico

A análise referente ao estudo da bitola do fio de cobre utilizado na bobina circular considera uma linha trifásica infinita, com fases defasadas de  $120^\circ$  elétricos, corrente de 100 A e dispostas, respectivamente, em  $(x_1,y_1) = (0,0)$  m,  $(x_2,y_2) = (0,5)$  m e  $(x_3,y_3) = (0,10)$  m à 20 m de altura. A bobina se situa em  $(x,y,z) = (0;5;19,35)$  m e a estimacão  realizada por meio de rotina computacional e procedimento similar ao apresentado no item anterior.

A Tabela IV apresenta os resultados obtidos de impedância e tensão induzida para cada bitola simulada para um solo com resistividade nula. Percebe-se que a tensão induzida por espira é 8,3% maior que o caso monofásico.

Tabela IV: Resultados de tensão induzida em função da bitola para linha monofásica

| Bitola (mm) | Tensão (mV) | Resistência (mΩ) | Indutância (μH) | Impedância (mΩ) |
|-------------|-------------|------------------|-----------------|-----------------|
| 3,264       | 14,351      | 1,933            | 0,867           | 1,933           |
| 3,665       | 14,351      | 1,533            | 0,845           | 1,533           |
| 4,115       | 14,351      | 1,223            | 0,823           | 1,223           |
| 4,620       | 14,351      | 0,965            | 0,802           | 0,965           |
| 5,189       | 14,351      | 0,765            | 0,780           | 0,765           |

#### IV. CONCLUSÕES

O trabalho apresenta um estudo sobre como calcular a tensão induzida por um sistema composto por bobinas devido à indução gerada por linhas de transmissão. Destaca-se que a viabilidade de aplicação do sistema apresentado depende da impedância e da potência da carga a ser alimentada. Por exemplo, cargas de baixa impedância e potência inferior da ordem de 1 W podem ser viáveis pelo número necessário de espiras para realizar tal objetivo. Nesse sentido, os resultados das Tabelas III e IV servem como estimativa da tensão induzida e impedância por espira e permitem calcular a corrente e potência resultante em uma carga ligada em série ao sistema.

A aplicabilidade do sistema é vasta, podendo ser aplicada a sensores dos mais diversos tipos e em dispositivos de comunicação para controle e verificação de equipamentos localizados em lugares isolados. Como exemplo, cita-se a alimentação de antenas acopladas a transformadores que permitam enviar sinais das condições do equipamento, além de dispositivos que possam funcionar como atuadores para troca do *tap* (derivação) de trafos.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da FAPEMIG e do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEACOPI) do CEFET-MG, em especial ao Márcio Santos, pelo auxílio em experimentos e por sua prestabilidade.

#### REFERÊNCIAS

[1] S. Á. J. Florez, “Generación Electromagnética y Transmisión Inalámbrica de Energía Eléctrica”, in *VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais*, pp. 1-6, 2008.

[2] J. Hirai, T. Kim, and A. Kawamura, “Wireless transmission of power and information and information for cableless linear motor drive”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 15, no. 1, pp. 21-27, 2000.

[3] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher and M. Soljagic, “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances”, *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, 2007.

[4] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljagic, “Efficient wireless non-radiative mid-range energy

transfer”, *Annals of Physics*, vol. 323, no. 1, pp. 34-48, 2008.

[5] R. Berthiaume, and R. Blais, “Microwave Repeater Power Supply Tapped from the Overhead Ground Wire on 735 kV Transmission Lines”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-99, no. 1, pp. 183-184, 1980.

[6] G. L. Torres, *Análise de problemas típicos na extração de pequenas potências por efeitos eletromagnéticos nas proximidades das linhas de transmissão*, Universidade Federal de Itajubá, Dissertação, Itajubá, 1986.

[7] M. A. O. Schroeder, and S. V. Filho, “An Alternative System for Direct Supply from Transmission Lines by Means of Magnetic Coupling”, *IEEE Power Engineering Review*, vol. 21, no. 5, pp. 52-53, 2001.

[8] M. A. O. Schroeder, *Concepção de um sistema para extração de energia elétrica de linhas de transmissão através de acoplamento magnético*, Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação, Belo Horizonte, 1996.

[9] S. V. Filho, *Comportamento transitório de aterramentos elétricos*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese, Rio de Janeiro, 1992.

[10] A. Deri, G. Tevan, A. Semlyen, and A. Castanheira, “The Complex Ground Return Plane a Simplified Model for Homogeneous and Multi-Layer Earth Return”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, no. 8, pp. 3686-3693, 1981.

[11] C. R. Paul, *Inductance: Loop and Partial*, Wiley-IEEE Press, 1<sup>st</sup> Edition, New Jersey, 2009.

[12] EBERLE (2005). *Tabela de fios esmaltados*. Acessado em 8 de Outubro de 2016, em: [www.ufrgs.br/lmeae/arquivos\\_manuais/fios/fios.pdf](http://www.ufrgs.br/lmeae/arquivos_manuais/fios/fios.pdf).