

Avaliação de um enlace indutivo formado por 3 bobinas

Evaluation of a 3-Coil inductive link

Vitor Felipe Alves de Oliveira

vfelipeoliveira@hotmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

Fábio Luiz Bertotti

bertotti@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um programa em MatLab® para o cálculo da indutância mútua entre duas bobinas, visando facilitar a obtenção dessa grandeza elétrica e de simular outras configurações de enlaces indutivos, especialmente de enlaces indutivos com 3 bobinas aplicados a sistemas de biotelemetria. As indutâncias mútuas foram obtidas experimentalmente, a partir de um enlace previamente desenvolvido, e calculadas utilizando o Método do Filamento. Comparando os valores obtidos com os calculados, conclui-se que o programa provê resultados precisos da indutância mútua e com um custo computacional baixo.

PALAVRAS-CHAVE: Biotelemetria. Enlace indutivo. Indutância mútua.

ABSTRACT

This work presents the development of a MatLab® program to calculate the mutual inductance between two coils, which is of great relevance to obtain parameters of 3-Coil inductive links applied to biotelemetry systems. Besides that, the developed program turns the calculation of this electric quantity practical and easier, which allows the simulation of other configurations of inductive links. The mutual inductances were experimentally obtained from a previously developed link, and calculated using the Filament Method. Based on the comparison of the experimental values with the calculated ones, the developed program provided accurate results of the mutual inductance and with a low computational cost.

KEYWORDS: Biotelemetry. Inductive link. Mutual inductance.

Recebido: 31 ago. 2018.

Aprovado: 04 out. 2018.

Direito autoral:

Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.





INTRODUÇÃO

O monitoramento remoto de fenômenos ou eventos biológicos de animais ou de seres humanos é possível por meio de técnicas que se referem coletivamente como biotelemetria (CROMWELL; WEIBELL; PFEIFFER, 1980). Essas técnicas permitem o envio das informações obtidas em unidade sensora para uma unidade receptora separadas por distâncias que podem chegar a quilômetros. Desta forma, os pesquisadores podem obter, armazenar e analisar as informações desejadas por um longo período de tempo e ininterruptamente.

Dispositivos implantáveis permitem avaliar fenômenos e eventos internos ao corpo de um indivíduo. Um exemplo do uso de unidades implantáveis é na aquisição da bioimpedância intracorpórea, cuja grandeza permite a detecção de doenças, a análise de tecidos biológicos, o acompanhamento médico de pacientes que tiveram um órgão recém transplantado, visando, por exemplo, monitorar a aceitação deste órgão (MIN et. al., 2002).

Tipicamente, os sistemas de biotelemetria são formados por enlaces indutivos acoplados magneticamente, permitindo que energia seja transferida de uma unidade de leitura (externa ao copo) a uma unidade implantável ou sensora, além de possibilitar o envio da grandeza medida para a unidade de leitura (CROMWELL; WEIBELL; PFEIFFER, 1980; MIN et. al., 2002).

Os enlaces indutivos comumente empregados em sistemas de biotelemetria são formados por duas bobinas, sendo uma delas pertencente a unidade de leitura e a outra a unidade sensora. Com a evolução dos circuitos eletrônicos, foi possível incorporar circuitos analógicos e digitais complexos na unidade implantável, o que levou a um consumo maior de energia e a necessidade de transmitir informações digitais. Desta forma, estudos foram realizados com o objetivo de aumentar o desempenho destes enlaces, tanto em termos de transferência de energia como na comunicação de dados. Como resultado, foram propostos enlaces indutivos formados por três bobinas, sendo duas na unidade de leitura e uma na unidade sensora, conforme o trabalho desenvolvido por Ramrakhiani e Lazzi (2013).

O enlace indutivo de três bobinas proposto por [3] possui na unidade de leitura uma bobina denominada *driver* e outra chamada de transmissora, enquanto que a unidade sensora inclui apenas a bobina de carga (*Load*). Segundo os resultados obtidos por Ramrakhiani e Lazzi (2013), este enlace apresenta resultados superiores em termos de transferência de energia e transferência de dados quando comparado aos enlaces tradicionais formados por duas bobinas. Apesar disso, com a inserção de uma bobina adicional ao enlace indutivo de duas bobinas, aumenta-se o número de variáveis nos cálculos dos parâmetros do sistema, tais como a indutância mútua, eficiência, ganho de tensão, largura de banda, entre outros. Ainda, essas variáveis dependem fortemente das características construtivas das bobinas.

O presente trabalho tem o objetivo de estudar, modelar e simular a indutância mútua entre as bobinas do enlace indutivo proposto por Ramrakhiani e Lazzi (2013), o que permite obter outros parâmetros do enlace, como a energia transmitida à unidade sensora em função da distância de separação entre elas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Um enlace indutivo formado por 3 bobinas foi construído conforme o enlace desenvolvido por Ramrakhyani e Lazzi (2013). Este enlace possui três bobinas tipo disco, sendo feitas com fio de Litz de 44 AWG, que possui um melhor fator de qualidade Q em relação a outros fios. As bobinas foram montadas em um suporte de acrílico, que possibilita alterar a distância entre as bobinas de carga e as bobinas *driver* e transmissora. As bobinas *driver* e transmissora são concêntricas e suas dimensões aproximadas estão dispostas no Quadro 1, em que R_1 é o raio interno da bobina, R_2 o raio externo e N o número de espiras.

A indutância própria das bobinas foi medida utilizando um LCR *Meter* modelo 4263B, fabricado pela empresa Agilent Technologies®. As medições foram realizadas na frequência de 100 kHz e os valores encontrados estão dispostos também no Quadro 1.

Quadro 1 – Dimensões e indutância própria medidas

Bobina	R_1 (mm)	R_2 (mm)	N	L (μ H)
<i>Driver</i>	21.8	24.5	2	0.67
Transmissora	9.35	21.8	10	3.79
Carga	0.5	12.15	13	1.84

Fonte: Autoria própria (2018)

Para caracterizar o enlace na prática, foi necessário medir a indutância mútua. Para isso, foi necessário fornecer a uma das bobinas um sinal senoidal a fim de obter a tensão induzida em aberto na outra bobina. A indutância mútua entre duas bobinas pode ser obtida na prática a partir de Ke et. al. (2014):

$$M = \frac{L_1 V_0}{V_i}, \quad (3)$$

sendo L_1 a indutância própria da bobina excitada, V_0 a tensão em aberto na segunda bobina e V_i é a tensão na bobina excitada.

Tendo em vista o aperfeiçoamento dos enlaces propostos e testar novas configurações de bobinas, foi desenvolvido um programa em MatLab® para calcular a indutância mútua entre duas bobinas, tendo como parâmetros de entrada suas dimensões.

O método escolhido para este cálculo foi o chamado Método do Filamento apresentado por Akyel e Babic (2007) para bobinas coaxiais, que consiste em utilizar a equação de Maxwell da indutância mútua entre dois filamentos concêntricos para quaisquer configurações de bobinas circulares. Nesse método, as bobinas são divididas em vários filamentos, como mostra a Figura 2, e a indutância mútua é dada pela equação:

$$M = \frac{(N_1 N_2)}{(2K+1)(2N+1)(2m+1)(2n+1)} \sum_{g=-K}^{g=K} \sum_{h=-N}^{h=N} \sum_{p=-m}^{p=m} \sum_{l=-n}^{l=n} M(g, h, p, l), \quad (1)$$

onde $M(g, h, p, l)$ é a indutância mútua entre dois filamentos.

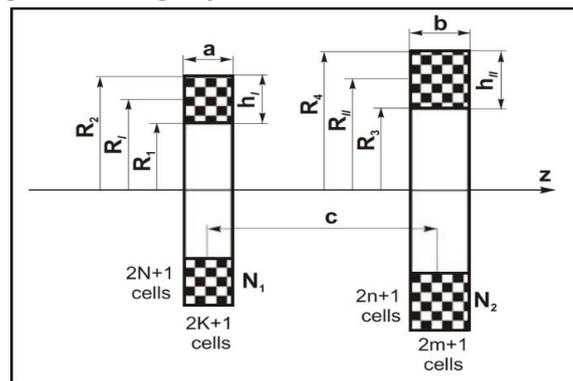
A Eq. (1) pode ser simplificada dependendo do tipo de bobina, o que diminui consideravelmente o custo de tempo computacional. Babic e Akyel (2016) propõe uma modificação na Eq. (1) que aumenta a precisão do cálculo da

indutância mútua para o caso de duas bobinas do tipo disco fino (ou panqueca), onde essas bobinas são concêntricas. A nova fórmula é dada por:

$$M = \frac{(N_1 N_2)}{(2K+1)(2N+1)\ln(R_4/R_3)\ln(R_2/R_3)} \sum_{h=-N}^{h=N} \sum_{l=-n}^{l=n} \frac{M(g,h,p,l)}{r_I(h)r_{II}(l)} \quad (2)$$

Essa nova expressão não é válida para os casos onde pelo menos uma das bobinas possui um raio interno muito pequeno, devido ao termo logarítmico acrescentado ao denominador da Eq.(2).

Figura 2 – Configuração de bobinas Método do Filamento

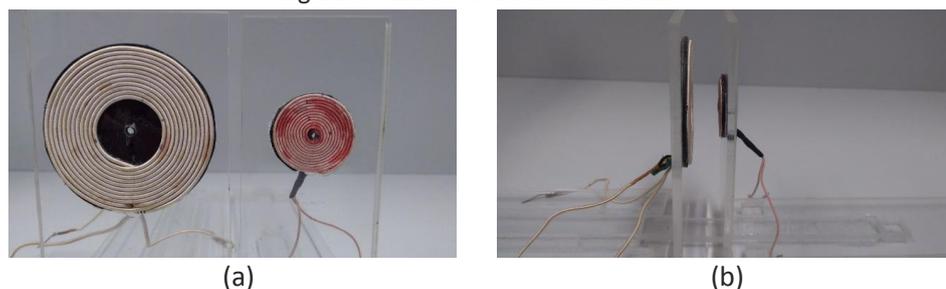


Fonte: Adaptado de Akyl (2007)

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O enlace indutivo construído pode ser visto na Figura 3. Os valores dos ensaios de indutância mútua e os cálculos destas feitas no programa em MatLab[®] podem ser vistos na Figura 4.

Figura 3 – Enlace indutivo construído



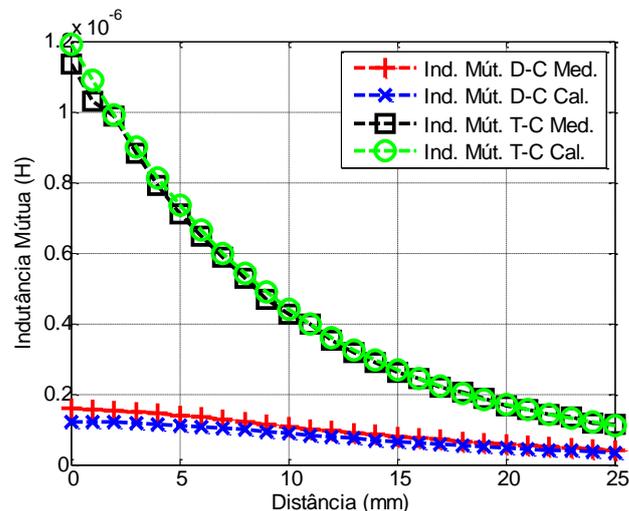
Fonte: Autoria própria (2018)

O tempo computacional para o cálculo das indutâncias entre as bobinas D-C (*driver* e carga) e T-C (transmissora e carga) foi de 31,67 segundos e 43,77 segundos, respectivamente. A simulação foi feita utilizando uma equação simplificada de (1) para o caso de dois discos finos, para diminuir o tempo computacional, e com subdivisões $N=100$ e $n=100$, que aumentam a precisão do resultado. Para um menor tempo computacional pode-se diminuir o número de subdivisões, ao custo de diminuir levemente a precisão.

O valor da indutância mútua entre as bobinas *driver* e transmissora medido, utilizando-se (3), foi de $M=0,54576 \mu\text{H}$. Como estas bobinas são concêntricas, utilizou-se (2) para o cálculo da indutância mútua, e o valor obtido foi de

$M=0,54311 \mu\text{H}$ com um tempo computacional de 1,37 segundos para $N=100$ e $n=100$. Utilizando menos subdivisões, $N=10$ e $n=10$, obteve-se $M= 0,54251 \mu\text{H}$ com um tempo computacional de 0,035 segundos. O erro no valor calculado com menos subdivisões foi de apenas 0,11%, enquanto que o tempo computacional foi, aproximadamente, 40 vezes menor.

Figura 4 – Resultados práticos e simulados para a indutância mútua das bobinas



Fonte: Autoria própria (2018)

CONCLUSÕES

O programa desenvolvido apresenta cálculos de indutância mútua com uma boa precisão e a um custo computacional baixo. Mesmo o método utilizado sendo para bobinas com secção reta retangular, pode-se observar pela Figura 2 que o valor calculado é bem próximo ao medido quando consideradas bobinas de secção reta circular. Se levarmos em conta os possíveis erros nas medições, esse valor pode se aproximar ainda mais.

O programa permite fazer o cálculo da indutância mútua para qualquer configuração de bobinas coaxiais, solenoides e discos com uma ou mais camadas, ou uma bobina de um único filamento. Com isso é possível testar diversas configurações de enlaces indutivos a fim de obter melhores resultados. Na área biomédica isso pode significar uma redução nas dimensões de bobinas implantáveis.

REFERÊNCIAS

AKYEL, C.; BABIC, S. **Mutual inductance between coaxial circular coils of rectangular cross section and thin coaxial circular coils with constant current density in air (filament method)**. *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering*, jan. 2007. p. 102–108. Disponível em: <<http://www.wseas.us/e-library/conferences/2007istanbul/papers/557-156.pdf>>. Acesso em: 30 ago. 2018.



BABIC, S.; AKYEL, C. **Mutual inductance and magnetic force calculations for coaxial bitter disk coils (Pancakes).** *IET Science, Measurement & Technology*, 10(8), 2016. p. 972–976. Disponível em: <<https://doi.org/10.1049/iet-smt.2016.0221>> Acesso em: 30 ago. 2018.

CROMWELL, L.; WEIBELL F. J.; PFEIFFER, E. **A. Biomedical Instrumentation and Measurements**, 2. ed., Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1980.

KE, L.; YAN, G.; YAN, S.; WANG, Z.; LIU, D. **Improvement of the Coupling Factor of Litz-Wire Coil Pair With Ferrite Substrate for Transcutaneous Energy Transfer System.** *Progress In Electromagnetics Research M*, 39, ago. 2014. p. 41–52. Disponível em: <<https://doi.org/10.2528/PIERM14080604>>. Acesso em: 30 ago. 2018.

MIN, M.; PARVE, T.; KUKK, V.; KUHLBERG, A. **“An implantable analyzer of bioimpedance dynamics: Mixed signal approach,”** *IEEE Trans. on Inst. and Meas.*, vol. 51, no. 4, ago. 2002.

RAMRAKHYANI, A. K.; LAZZI, G. **On the design of efficient multi-coil telemetry system for biomedical implants.** *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 7(1), 2013. p. 11–23. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TBCAS.2012.2192115>> Acesso em: 30 ago. 2018.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação Araucária pela bolsa de iniciação científica e apoio financeiro, assim como a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Pato Branco e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) do Câmpus Pato Branco pela infraestrutura concedida.