

Estudo de circuito LC acoplado magneticamente tendo-se em vista o desenvolvimento de sensores LC passivos sem fios

Roberto Jacobe Rodrigues* e Renan Melo de Freitas*

*Universidade Federal do ABC, Santo André, Brasil

e-mail: roberto.rodrigues@ufabc.edu.br

Abstract – This paper presents experiments related to the study of the operation of wireless passive LC resonant sensors for applications in harsh environments, which may be, for examples, the temperature monitoring in a steel plant or the real-time blood pressure monitoring from within a blood vessel. These experiments consisted of measurements of impedances seen in the external module for different frequency values and to each capacitor used emulating a capacitive sensor. The experimental results presented an excellent agreement with the analytical results and thus open the perspective of future studies and experiments using capacitive sensors working along with better dimensioned coils.

Palavras-chave: Sensores capacitivos, Pressão, Temperatura, Indutância Mútua, Ambientes adversos.

Introdução

A realização de medições de grandezas físicas como temperatura e pressão pode tornar-se difícil ou até mesmo impossível em condições ambientais adversas, onde um sistema típico de medição formado por partes como sensor, fiação, bateria e amplificadores podem ser danificados, não funcionar adequadamente ou ser a causa de danos ao ambiente a ser monitorado [1][2]. Como exemplo de aplicação de sensores em ambientes severos têm-se os sensores biomédicos utilizados *in vivo* para o monitoramento da pressão em olhos [2] e em vasos sanguíneos [1]. Outro exemplo de aplicação são os sensores para medições de temperatura e pressão em ambientes com temperaturas que podem variar de -55 °C a +1500 °C, como ocorre em aeronaves e motores a combustão em geral [1][3][4]. Os sensores LC passivos sem fios ou circuitos ressonantes LC têm sido apresentados na literatura em aplicações como as exemplificadas acima [1][5][6].

A quantidade a ser medida afeta a capacitância do circuito LC imerso no ambiente que está sendo monitorado (Figura 1), que por sua vez afeta a frequência de ressonância deste circuito LC. Esta mudança na frequência de ressonância pode ser detectada por outra bobina, magneticamente acoplada, que, posicionada fora do ambiente severo,

está conectada aos circuitos eletrônicos para condicionamento do sinal obtido.

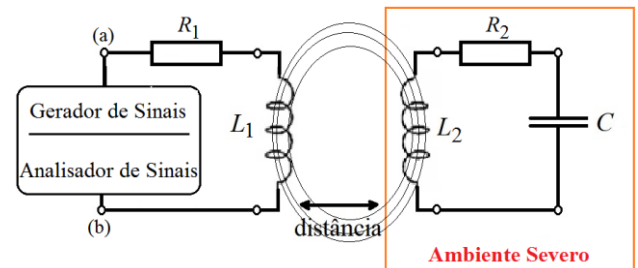


Figura 1: Sensor LC passivo sem fios.

Primeiramente, a bobina L_1 recebe um sinal AC que induz uma corrente elétrica na bobina L_2 (Lei de Faraday-Lenz). A troca de energia entre L_2 e o capacitor induz uma corrente elétrica na bobina L_1 , que pode ser detectada como uma impedância acoplada, medida entre os pontos (a) e (b) assinalados na Figura 1, e dada pela Equação 1 [4][7], abaixo:

$$\dot{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1 + \frac{(\omega M)^2}{R_2 + j\omega L_2 - j\left(\frac{1}{\omega C}\right)} \quad (1)$$

onde ω é a frequência angular (rad/s), L_1 e L_2 são as indutâncias das bobinas (Henry), R_1 e R_2 são as resistências série das bobinas (Ohm), C é a capacitância (Faraday) dependente da quantidade física sendo medida e M é a indutância mútua (Henry).

Este trabalho irá apresentar uma metodologia experimental que permitiu confirmar a dependência da impedância medida (módulo e fase) com diferentes valores de capacitância. Posteriormente, em continuidade a esta pesquisa, o capacitor será substituído por um sensor capacitivo e as bobinas dimensionadas e construídas para maximizar o desempenho do sistema.

Materiais e métodos

Para determinar a Indutância Mútua empregou-se o circuito apresentado na Figura 2, a seguir:

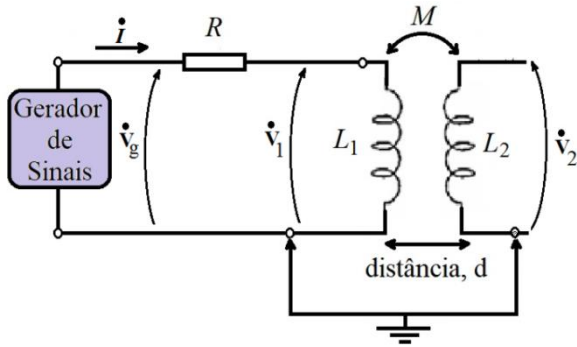


Figura 2: Determinação da Indutância Mútua.

Os valores nominais das bobinas L_1 e L_2 são de 22 mH e os valores medidos, utilizando-se um, Medidor LCR Minipa MX-1010, foram de 21,38 mH, iguais para ambas as bobinas. O resistor foi $R = 1 \text{ k}\Omega$.

O valor da Indutância Mútua pode ser obtido aplicando-se a expressão a seguir [7]:

$$\dot{V}_2 = j\omega M \dot{I} \quad (2)$$

Para determinar a corrente elétrica, \dot{I} efetuou-se o quociente da diferença entre os sinais medidos pelo osciloscópio ($\dot{V}_g - \dot{V}_1$) e a resistência R .

Na Figura 3, a seguir, é apresentado o gráfico da dependência da Indutância Mútua com as diferentes distâncias entre as bobinas.

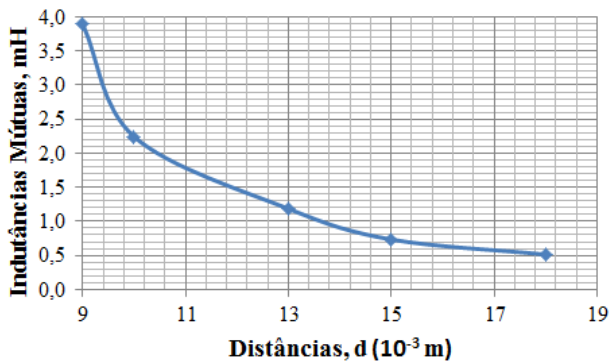


Figura 3: Dependência da indutância Mútua com a distância entre as bobinas.

A seguir é apresentado (Figura 4) o circuito utilizado para determinar experimentalmente a dependência da impedância (módulo e fase) com os diferentes valores de frequência a cada capacitância utilizada.

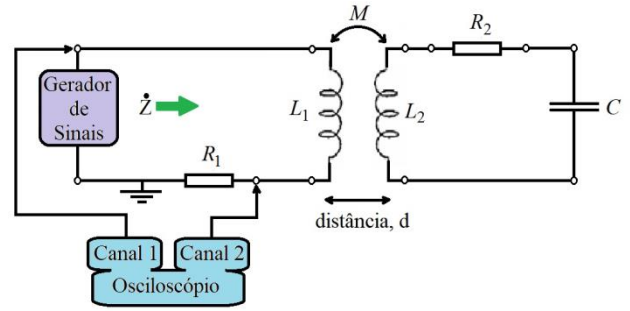


Figura 4: Circuito montado para medição da dependência da Impedância com a frequência do sinal aplicado, bem como com os capacitores.

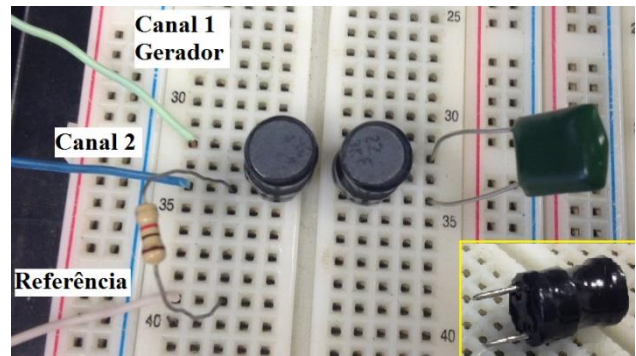


Figura 5: Foto do circuito montado e, em destaque na parte inferior à direita, a bobina tipo tambor utilizada nos testes.

Acrescentou-se o resistor $R_2 = 47 \Omega$ e o capacitor ao circuito apresentado na Figura 2. Os valores nominais utilizados para o capacitor foram de 10 nF, 33 nF e 68 nF. A distância entre as bobinas foi fixada em 10 mm, que corresponde a $M \approx 2,2 \text{ mH}$.

Para cada valor diferente de capacitância foram levantadas duas curvas: a curva que relaciona o módulo da impedância com a frequência ajustada no gerador de sinais e a curva que relaciona a fase desta impedância com esta frequência. Estas curvas foram comparadas com os resultados obtidos analiticamente utilizando-se a Equação 1.

Ajustou-se no gerador de sinais, um sinal senoidal de amplitude igual a 2 Vpp.

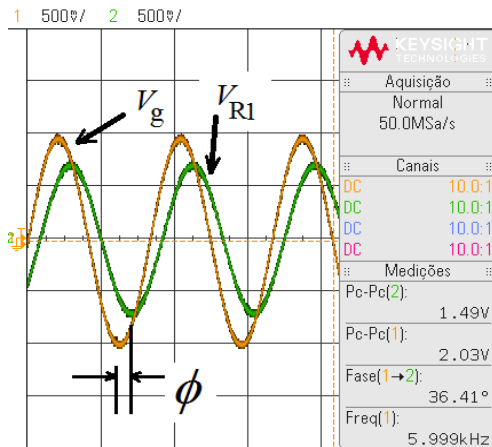


Figura 6: Sinais obtidos para $C = 33 \text{ nF}$.

Os valores do módulo da impedância foram obtidos através do cálculo do quociente entre V_g e I_{R1} . Onde a corrente I_{R1} corresponde ao quociente entre a tensão V_{R1} e a resistência R_1 (Figura 6). A fase ϕ (graus) da impedância coincide com a diferença de fase medida entre os sinais V_g e V_{R1} , conforme mostrado na Figura 6.

Resultados

A Figura 7 apresenta uma ótima concordância entre os resultados analítico e experimental para o capacitor de 10 nF. Esta concordância ocorreu também para as demais curvas onde foram utilizados os capacitores de 33 nF e 68 nF. Estes resultados também concordam qualitativamente com os resultados típicos apresentados na literatura [1][6].

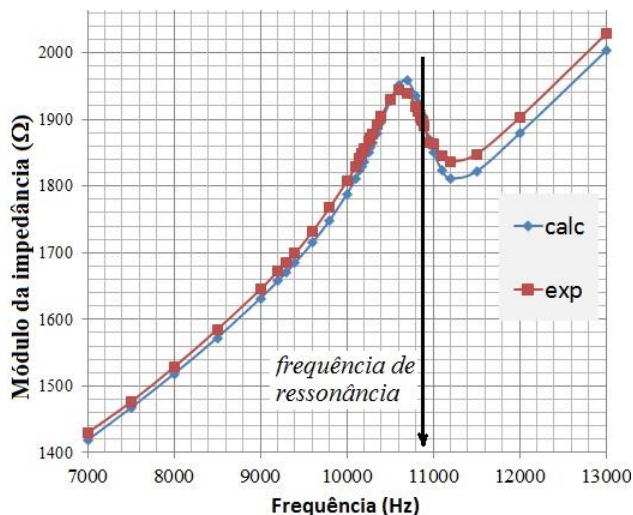


Figura 7: Módulo da Impedância x Frequência para $C=10 \text{ nF}$.

Conforme procedimentos apresentados na literatura [1][6], pode-se determinar graficamente os valores

de frequência de ressonância conforme assinalado nos gráficos da Figura 7 e da Figura 8.

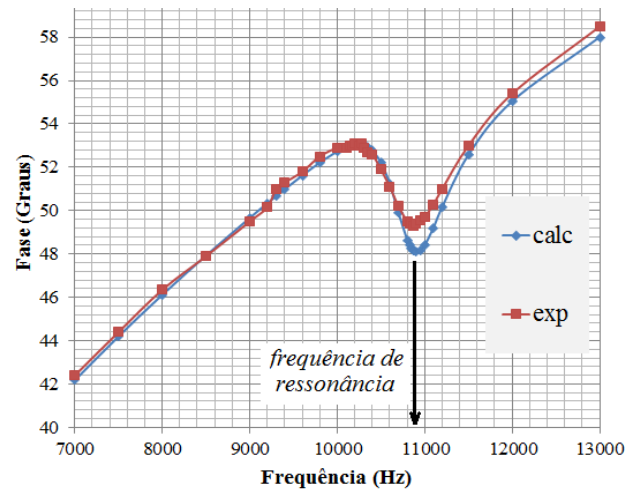


Figura 8: Fase x Frequência para $C=10\text{nF}$.

O valor da frequência de ressonância é dado pela expressão apresentada na Equação 3, a seguir:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C}} \quad (3)$$

A partir dos gráficos de Fase x Frequência (Figura 8) e como apresentado na literatura [1][6], a frequência de ressonância correspondeu à frequência a partir da qual o valor da fase começou a aumentar novamente [1][6]. Os seguintes valores de frequência de ressonância foram obtidos: cerca de 4 kHz ao utilizar um capacitor de 68 nF, cerca de 6 kHz a utilizar-se um capacitor de 33 nF e próximo a 11 kHz para um capacitor de 10 nF.

A Figura 9 e a Figura 10 permitem visualizar o comportamento do sinal obtido para frequências ao redor das frequências de ressonância tendo-se respectivamente as capacitâncias utilizadas nos testes.

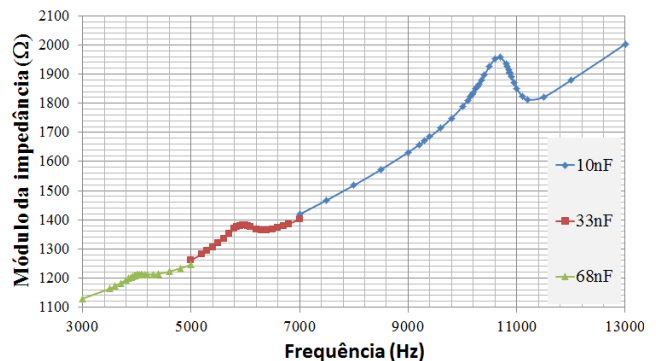


Figura 9: Módulo da Impedância de entrada para os três capacitores utilizados.

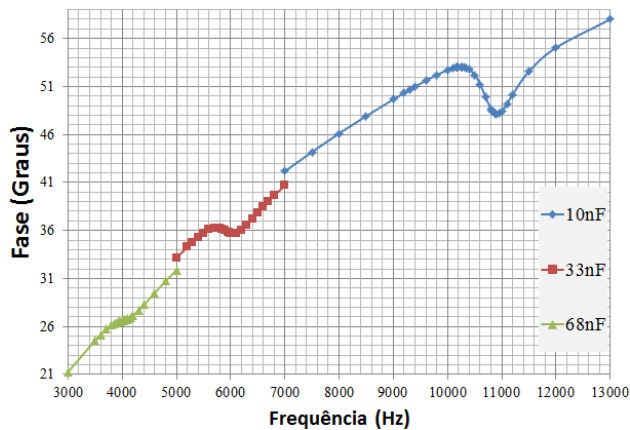


Figura 10: Diferença de fase para os três capacitores utilizados.

Discussão

A indicação da frequência de ressonância a partir do gráfico do Módulo da impedância x Frequência (Figura 7) está em conformidade com o procedimento apresentado na literatura [1][6].

A Figura 9 e a Figura 10 mostram que valores de capacitância inferiores a 10 nF tendem a determinar uma melhor definição da frequência de ressonância, ou seja, ao redor da frequência de ressonância a amplitude de variações, tanto do módulo da impedância como da fase, são mais pronunciadas. Portanto, novos testes deverão ser realizados com bobinas de valores inferiores de indutância (ordem de μH), bem como capacitâncias inferiores a 10 nF. Assim, as frequências utilizadas, bastante superiores às utilizadas no presente experimento, serão da ordem das frequências apresentadas na literatura [3][4]. Também permitirá o aumento da distância entre as bobinas devido ao aumento nos valores de frequência.

Segundo a literatura [1], o valor da frequência de ressonância obtido graficamente deverá ser diferente do valor obtido a partir da Equação 3 por um fator dependente do coeficiente de acoplamento e do fator de qualidade. Em trabalhos futuros, estudos deverão ser realizados para analisar a influência do fator de qualidade sobre o desempenho do sistema, bem como sobre a frequência experimental.

Procedimentos mais precisos para a determinação da frequência de ressonância deverão ser estudados, obtidos e apresentados em trabalhos futuros.

Conclusões

Um procedimento experimental, utilizando componentes disponíveis em laboratório didático, foi proposto para o estudo de um sistema similar ao

utilizado em aplicações como o monitoramento sem fios de temperatura numa usina siderúrgica ou o monitoramento da pressão sanguínea em tempo real de dentro de um vaso sanguíneo in vivo.

O funcionamento de sensores *LC* passivos sem fios foi apresentado por meio da comparação de solução analítica com experimentos realizados. Os resultados experimentais indicaram uma concordância com os resultados analíticos obtidos e assim abrem a perspectiva de realização de novos estudos e a proposta de novos experimentos, porém utilizando-se, ao invés de capacitores fixos, sensores capacitivos imersos em ambientes sendo monitorados, bem como com a utilização de bobinas melhor dimensionadas.

A finalidade deste artigo foi alcançada, pois se mostrou que um circuito *LC* ressonante, com valores variáveis de capacitância, pode comunicar-se sem fios com uma bobina externa.

Agradecimentos

Agradecemos ao CNPq pela concessão da bolsa de Iniciação Científica ao discente de graduação Renan Melo de Freitas. Também agradecemos à UFABC pela disponibilização da infraestrutura necessária para a realização dos testes.

Referências

- [1] Li, C et al. Review of Research status and development trends of wireless passive LC resonant sensors for harsh environments. *Sensors* 2015, 15, 13097-13109.
- [2] Collins C Miniature passive pressure transducer for implanting in the eye. *IEEE Transactions on biomedical engineering* 1967, 14, 2, 74-83.
- [3] Fonseca, MA et al. Wireless micromachined ceramic pressure sensor for high-temperature applications. *J. Microelectromechan. Syst.* 2002, 11, 337-343.
- [4] Wang, Y et al. A passive wireless temperature sensor for harsh environment applications. *Sensors* 2008, 8, 7982-7995.
- [5] Zhai, J et al. Design and modelling of a passive wireless pressure sensor. *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 2010, 59, 187-190.
- [6] Nopper, R et al. Wireless readout of passive LC sensors. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2010, 59, 2450-2457.
- [7] Miller WC. and Robbins AH. *Análise de Circuitos, Teoria e Prática*, volume 2, Cengage Learning, 2010.