



EMULAÇÃO DE INDUTÂNCIA PARA ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS EM CIRCUITOS RLC: A ELETRÔNICA ANALÓGICA AUXILIANDO A ANÁLISE DE CIRCUITOS ELÉTRICOS

Vander Teixeira Prado – vanderprado@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio

Avenida Alberto Carazzai, 1640

86300-000 – Cornélio Procópio – Paraná

Resumo: Em diferentes áreas do conhecimento diversos sistemas dinâmicos podem ser matematicamente modelados através de circuitos elétricos compostos por resistores, indutores e capacitores, também conhecidos como circuitos RLC. Este trabalho apresenta a análise do transitório da resposta ao degrau de um circuito RLC a partir da emulação do indutor por meio de um circuito eletrônico composto por amplificadores operacionais, resistores e um capacitor. Além de contornar a problemática da escassa disponibilidade de valores comerciais de indutores e/ou relativamente alto valor financeiro de décadas de indutância, o circuito utilizado não apresenta a resistência interna do enrolamento e possibilita, teoricamente, o ajuste de distintos valores de indutância, obtendo-se, na prática, resultados mais próximos ao teórico/simulado do que quando utilizando uma indutância real, como demonstrado experimentalmente. Apesar de não apresentar o efeito magnético e depender de fontes de alimentação, a emulação é importante tanto em circuitos elétricos, como em sistemas modelados por circuitos RLC pelo baixo custo, alta versatilidade no ajuste dos componentes, fácil compreensão e a interdisciplinaridade entre circuitos elétricos e eletrônica analógica, fortalecendo os conceitos básicos de ambas áreas num mesmo caso de estudo.

Palavras-chave: Circuito RLC. Circuitos Elétricos. Eletrônica analógica. Emulação de indutância. Interdisciplinaridade.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Nilson e Riedel (2008), o ponto comum a sistemas de comunicação, computação, controle, potência, aquisição de dados, processamento de sinais, entre outros são os circuitos elétricos. Um circuito elétrico é um modelo matemático que se comporta aproximadamente como um sistema elétrico real.

Um circuito elétrico composto por resistores, indutores e capacitores é conhecido como circuito RLC. Diferentemente de circuitos puramente resistivos, nos quais o equacionamento resulta em equações algébricas lineares nas correntes de ramo e potenciais dos nós, no caso de circuitos RLC, gera-se um conjunto de equações algébricas e diferenciais, advindas do equacionamento de elementos que armazenam energia.

Devido à possibilidade de modelagem de diversos sistemas por equações diferenciais ordinárias, como por exemplo sistemas mecânicos, térmicos, máquinas elétricas, entre outros, pode-se, a partir da análise teórica e/ou experimental de um circuito RLC, estudar o comportamento de diferentes sistemas dinâmicos, de forma simples, rápida e com baixo custo.

Encontram-se vários trabalhos e estudos documentados utilizando circuitos RLC como modelo equivalente. Ferraz e Martinez (2015), por exemplo, propôs um modelo de circuito equivalente para estudar transformadores de distribuição em uma ampla faixa de frequência.

Ainda utilizando dessa dualidade entre os sistemas, Ponte e Bortoli (1997) utilizaram circuito RLC na otimização de sistemas mecânicos/amortecedor mecânico. Silva, Brandão e Steffen (2002) avaliaram o controle de vibrações em estruturas flexíveis utilizando um circuito ressonador acoplado a um elemento piezoelétrico, o qual tem características capacitivas. Utilizou-se um circuito ressonador, constituído de um resistor e um indutor, acoplados a um elemento piezoelétrico, todos em paralelo. O absorvedor dinâmico de vibrações se trata de um sistema massa-mola que complementa um sistema principal, com o propósito de absorver as vibrações desse sistema. As equações do sistema de absorção são similares às equações de circuitos RLC, auxiliando na análise e projeto.

A análise de circuitos RLC pode ser dividida em regimes transitório e permanente. Segundo Johnson, Hilburn e Johnson, (1994), dado um circuito de corrente contínua (CC), transcorrido um tempo, todas as fontes de correntes e tensões se estabilizam, e quando isso ocorre pode-se dizer que o circuito se encontra em regime permanente. A análise do regime transitório é importante pois ocorre sempre que há uma perturbação ou alteração no circuito. É o objeto central de diversas técnicas de controle, objetivando-se, por exemplo, um menor tempo de estabelecimento, menor percentual de *overshoot* ou tempo de resposta do sistema.

Os transitórios são alvo de estudos em várias áreas (VAN DER SLUIS, 2001; NETO, FERNANDES, 2009; COSTA, FREITAS, 2013). Cabral (2003) avaliou 3 tipos de transitórios elétricos em transformadores, utilizando um método intitulado *Transmission Line Modelling* (TLM). É um estudo de grande relevância, uma vez que os surtos rápidos de tensão podem causar diversos efeitos no transformador, quando os componentes são submetidos a altas frequências, por exemplo a distribuição de surtos de tensão em enrolamentos contínuos de transformadores. Também a histerese em transitórios elétricos de frequência industrial.

Martins (2004) apresenta uma análise do transitório em centrais hidrelétricas e tubulações, apoiado a metodologia dos Grafos de Ligação, que mescla potência e analogias de subsistemas hidráulico, mecânico e elétrico, descrevendo as não linearidades dos componentes, possibilitando simular respostas transitórias a partir de analogias entre circuitos hidráulicos e elétricos.

Os indutores possuem pouca variedade de valores comerciais, quando comparado a capacitores e resistores, principalmente para baixas frequências, o que se torna um empecilho quando é necessário um valor específico deste em um determinado projeto. Existem ainda, no mercado, diferentes décadas de indutâncias, que são kits com diferentes indutâncias que podem ser associadas entre si através da mudança de ligação física entre elas. O problema dessas décadas é que são relativamente caras e os diferentes valores possíveis são discretos. Por exemplo, na empresa Politerm - Instrumentos de Medições Ltda., encontra-se disponível uma década de indutância modelo LBOX-405 que varia de 10uH até 11,1mH (10uH por passo), com precisão de 5% por indutância e limitação de corrente de 10mA no valor de R\$870,00 (oitocentos e setenta reais) (POLITERM INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO LTDA). Esses fatores limitam bastante os experimentos com circuitos RLC nos laboratórios de diferentes instituições, como na disciplina de circuitos elétricos nos cursos de engenharia elétrica, eletrônica e controle e automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Cornélio Procopio.

O trabalho proposto consiste na substituição da indutância em um circuito RLC por um circuito eletrônico que emula o comportamento através de amplificadores operacionais (amp ops), resistores e um capacitor. De acordo com Sedra e Smith (2007) o circuito simulador de

Antoniou (ANTONIOU, NAIDU, 1973) tem se destacado pelo fato de a operação do circuito ser mais tolerante às propriedades não ideais dos amp ops.

2 RESPOSTA AO DEGRAU DE UM CIRCUITO RLC

Nilsson e Riedel (2009) dividem a análise desses tipos de circuito em etapas. Na primeira etapa são consideradas correntes e tensões que surgem quando o circuito é desligado repentinamente de sua fonte de corrente contínua (CC). A energia até então armazenada no indutor e no capacitor é dissipada no resistor. Esse tipo de comportamento é denominado de resposta natural de um circuito. Quando se acrescentam fontes a esse tipo de circuito, surge a chamada resposta forçada. Neste trabalho considera-se resposta forçada, visto que as equações para a resposta natural são as mesmas quando se anulam os efeitos das fontes.

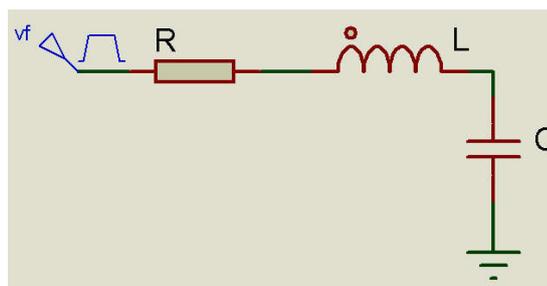
Circuitos compostos por resistores, indutores e capacitores são denominados de segunda ordem. São assim chamados pelo fato de que as tensões e correntes em cada componente são caracterizadas por equações diferenciais de segunda ordem.

Considerando-se o circuito RLC ilustrado na Figura 1, aplicando-se as leis de Ohm e de Kirchhoff e as relações de tensão-corrente no capacitor e no indutor, a equação que descreve o comportamento do circuito é (NILSON, RIEDEL, 2008):

$$\frac{d^2 i(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{LC} i(t) = \frac{1}{L} \frac{dv_f(t)}{dt}, \quad (1)$$

sendo R , L e C os valores da resistência, indutância e capacitância do circuito da Figura 1, respectivamente, $i(t)$ a corrente elétrica do circuito e $v_f(t) = V_f u(t)$ a tensão da fonte, um degrau de amplitude V_f .

Figura 1 – Circuito RLC série.



Fonte: Autoria própria utilizando-se o *software* Proteus.

Da Equação (1) chega-se a:

$$s^2 + 2\alpha s + \omega_0^2 = 0, \quad (2)$$

cuja solução é s_1 e s_2 , sendo:

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (3)$$

e

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (4)$$

A Equação (1) pode ter 3 tipos de soluções, que determinarão o comportamento da resposta do circuito com relação as tensões e correntes transitórias:

- $\alpha^2 > \omega_0^2$: s_1 e s_2 reais e distintas \rightarrow resposta superamortecida;
- $\alpha^2 < \omega_0^2$ s_1 e s_2 complexas conjugadas \rightarrow resposta subamortecida;
- $\alpha = \omega_0^2$ s_1 e s_2 reais e iguais \rightarrow resposta criticamente amortecida,

Neste trabalho considera-se a resposta subamortecida, por se tratar de um caso de estudo bastante utilizando não só na disciplina de circuitos elétricos, mas também em áreas afins, como controle e automação e áreas distintas como engenharia mecânica, civil e outras. Entretanto, análise similar pode considerada para dos demais casos.

Para resposta subamortecida, a corrente do circuito pode ser expressa por:

$$i(t) = \left[\frac{1}{(j2\beta)} \left(\frac{V_f}{L} + (-\alpha + j\beta) i_L(0) - \frac{v_C(0)}{L} \right) e^{(-\alpha + j\beta)t} + \frac{1}{(-j2\beta)} \left(\frac{V_f}{L} + (-\alpha - j\beta) i_L(0) - \frac{v_C(0)}{L} \right) e^{(-\alpha - j\beta)t} \right] u(t), \quad (5)$$

sendo $i_L(0)$ a corrente inicial no indutor, relacionada com a energia inicialmente armazenada no indutor, ou armazenada no instante $t = 0$, $v_C(0)$ a tensão inicial no capacitor, relacionada com a energia inicialmente armazenada no capacitor, e $\beta = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$.

A partir da Equação (5), pode-se mostrar que a tensão no capacitor é dada por:

$$v_C(t) = \left[V_f - \frac{R + Ls_1}{(s_1 - s_2)} \left(\frac{V_f}{L} + s_1 i_L(0) - \frac{v_C(0)}{L} \right) e^{s_1 t} - \frac{R + Ls_2}{(s_2 - s_1)} \left(\frac{V_f}{L} + s_2 i_L(0) - \frac{v_C(0)}{L} \right) e^{s_2 t} \right] u(t). \quad (6)$$

Considera-se aqui a tensão no capacitor por ser a grandeza a ser mensurada e comparada entre o circuito comumente utilizado e o proposto neste trabalho, na próxima seção.

3 EMULAÇÃO DA INDUTÂNCIA

De acordo com Cervelin (2014) os circuitos que simulam indutância mais utilizados são os de Riordan (1967) e Antoniou (1969) (IBRAHIM et al., 2011), (SIRIPHOT; MANEEWAN, 2013), (PARVEEN; AHMED, 2009), assim como derivações dos mesmos (HOLMES; HEINLEIN; GRUTZMANN, 1969), (KUMNGERN, 2011), (PETCHMANEELUMKA, 2009). Segundo Sedra e Smith (2007) o circuito simulador de Antoniou (ANTONIOU; NAIDU, 1973) tem se destacado pelo fato de a operação do circuito ser mais tolerante às propriedades não ideais dos amp ops.

A indutância de Antoniou está ilustrada na Figura 2. Considerando-se algumas características de um amp ops ideal, isto é, corrente de entrada nula, ganho de malha aberta

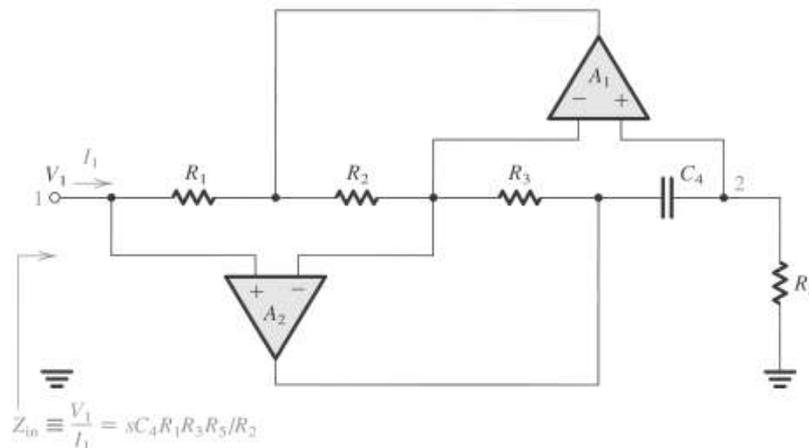
independente da frequência e elevado, resultando em curto circuito virtual entre as entradas do amp op, e impedância de saída nula, pode-se mostrar que a impedância vista pelos seus terminais do circuito é dada por:

$$Z_{in} = s \frac{R_1 R_3 C_4 R_5}{R_2}, \quad (7)$$

que equivale a um indutor de valor:

$$L = \frac{R_1 R_3 C_4 R_5}{R_2}. \quad (8)$$

Figura 2 – Indutância de Antoniou.



Fonte: (SEDRÁ, RIEDEL, 2007)

A emulação de indutância através do circuito da Figura 2 ou similares não apresenta o efeito magnético, que pode ser um ponto positivo ou negativo, dependendo da aplicação, além da desvantagem de se necessitar de uma fonte de alimentação para alimentação dos amp ops, ficando ainda dependente das características e limitações do amp op real, como operação em frequências abaixo de 100 kHz. Por outro lado, tem as vantagens de oferecer grande facilidade no ajuste do valor da indutância, alterando-se os valores das resistências e capacitância, e baixo custo, principalmente quando comparado a indutâncias reais para se operar em baixas frequências, que além do custo apresentam elevados volume e peso (PERTENCE, 2003). Assim, a indutância emulada torna-se um atrativo para utilização em experimentos com circuitos RLC, seja para a disciplina de circuitos elétricos, seja para outros casos em que o sistema é modelado por um circuito equivalente.

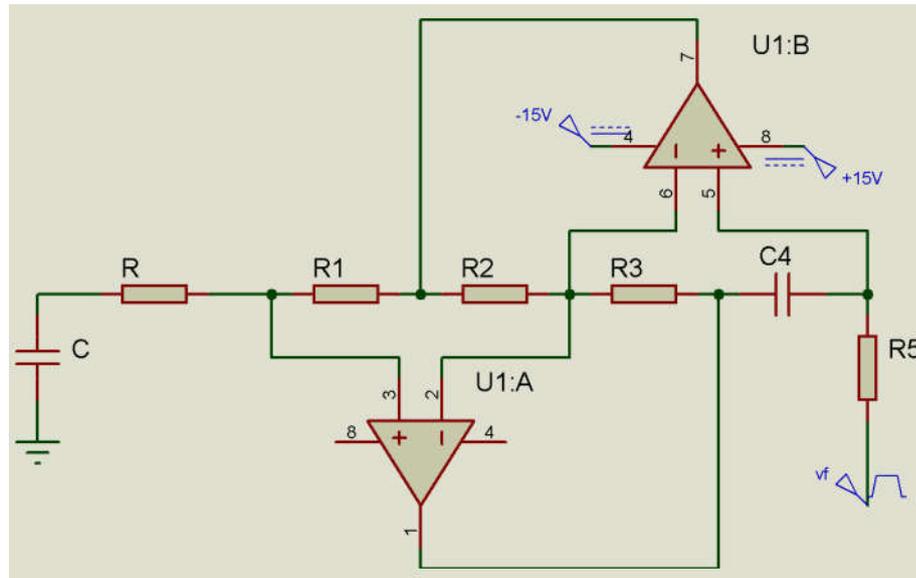
Substituindo-se o indutor da Figura 1 pela indutância de Antoniou tem-se o circuito RLC com indutância emulada, ilustrado na Figura 3.

4 VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

Os circuitos RLC série com indutor real e com a indutância emulada estão ilustrados na Figura 4.

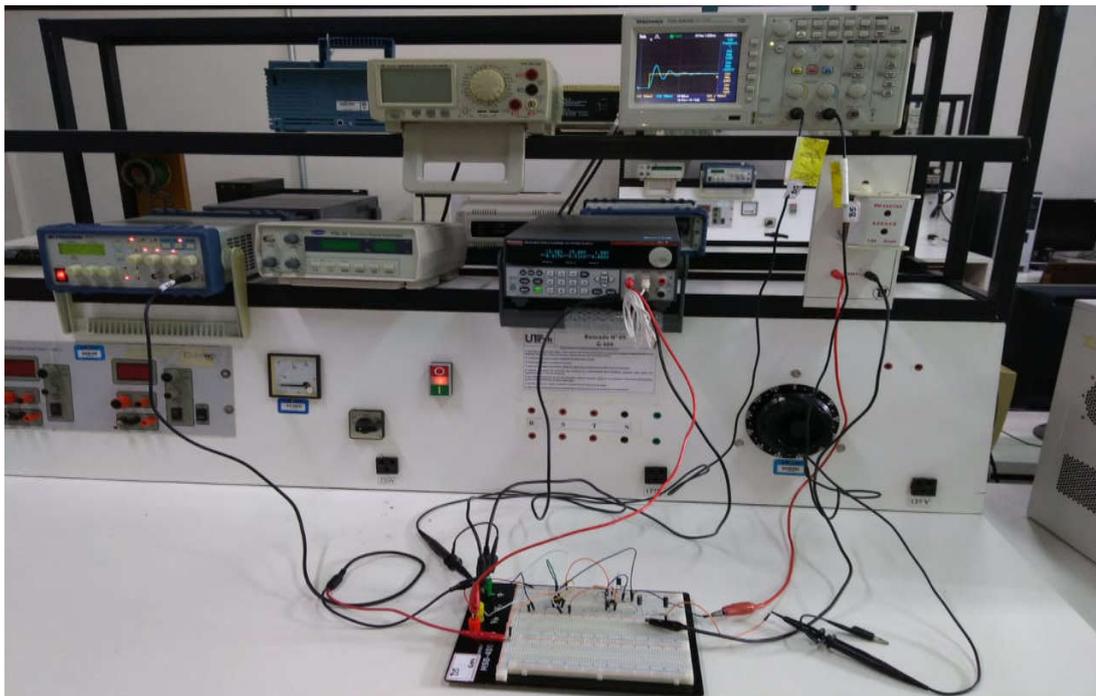
Aplicou-se um degrau de 1V utilizando-se de um gerador de sinais BK Precision 4017B, fazendo-se a aquisição dos sinais com um osciloscópio digital Tektronix TDS2002B. Alimen-

Figura 3 – Circuito RLC série com indutância emulada



Fonte: Autoria própria utilizando-se o software Proteus.

Figura 4 – Montagem experimental dos circuitos.

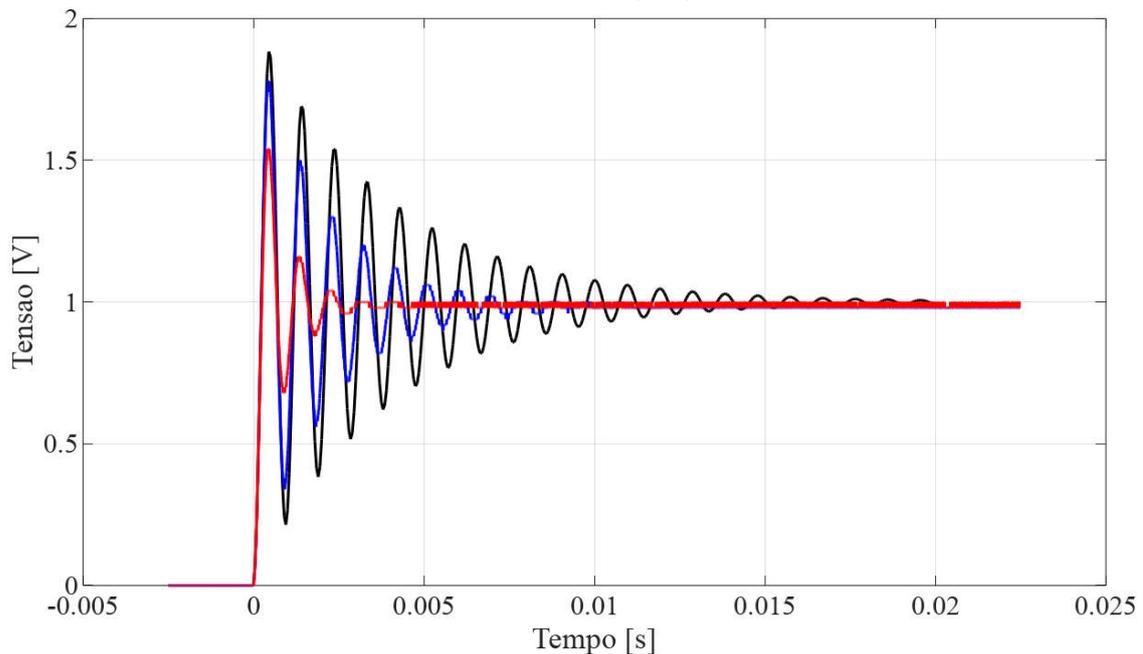


Fonte: Autoria própria.

tou-se o amp op com uma fonte CC KEYTHLEY 2231A-30-3. Considerando-se o circuito da Figura 1, utilizou-se um resistor de $10,7\Omega$, um capacitor de $1,098\mu\text{F}$ e um indutor de 21mH (um dos únicos 3 valores disponíveis nos laboratórios). Os valores do resistor e do capacitor foram mensurados com um multímetro digital Minipa ET-2507A. O valor do indutor é o valor comercial. Considerando-se o circuito da Figura 3, utilizaram-se amp ops do modelo TL082 e os componentes passivos com valores reais de: $R_1 = 988\Omega$, $R_2 = 10,53\text{k}\Omega$, $R_3 = 9,81\text{k}\Omega$, $C_4 = 2,34\text{nF}$ e $R_5 = 9,78\text{k}\Omega$, resultando em uma indutância emulada de $21,06\text{mH}$.

Mediu-se a tensão no capacitor, comparando-se o resultado com a teoria. A curva teórica foi obtida a partir da Equação (6). Os resultados foram agrupados utilizando-se o *software* Octave e estão ilustrados na Figura 5. Observa-se que a curva do indutor real (vermelho) apresenta um transitório mais curto e com amplitude menor que o valor teórico (preto), devido à resistência interna do enrolamento e ao valor real da indutância. O resultado obtido com a indutância emulada (azul) apresenta um resultado intermediário entre o real e o teórico. Deve-se levar em consideração que embora o valor comercial do indutor é de 21mH, não se tem como verificar o valor real do componente, isolando-o de efeitos parasitas como a resistência interna e eventuais capacitâncias parasitas.

Figura 5 – Tensão no capacitor: teórica (preto), circuito RLC com indutância real (vermelho) e com indutância emulada (azul).



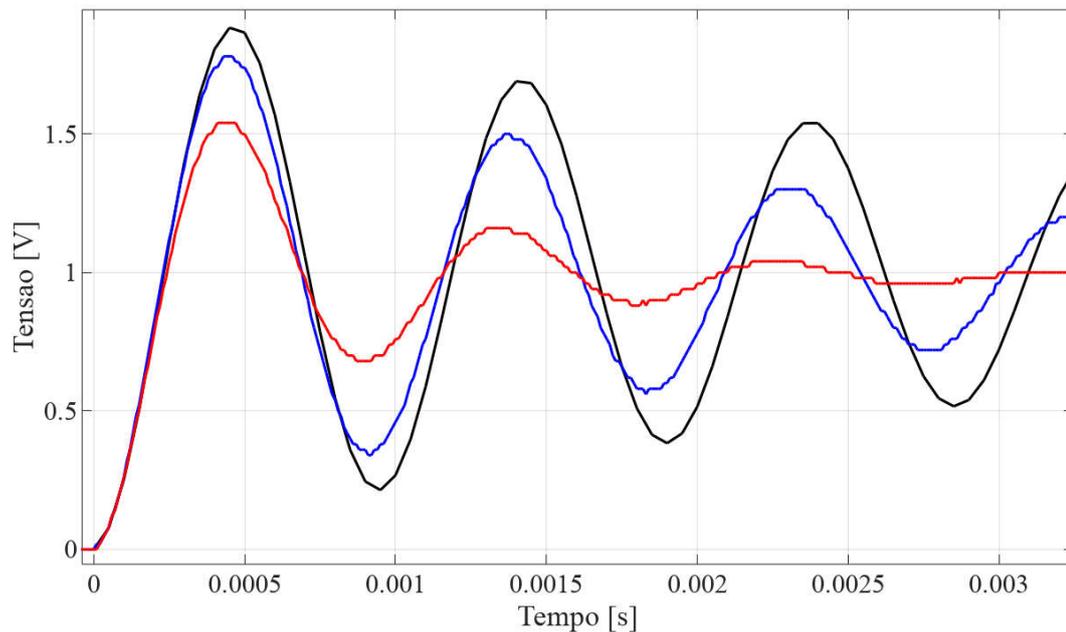
Fonte: Autoria própria.

Detalhe da curva de tensão no capacitor no início do regime transitório pode ser observado na Figura 6. Observa-se que não só a amplitude e o tempo de acomodação do sistema, mas também a frequência de oscilação durante o transitório é diferente para os casos teórico e real, obtendo-se, novamente, um valor intermediário entre eles para o caso emulado.

Desta forma, entende-se que embora a emulação da indutância através do circuito de Antoniou não apresente resposta idêntica ao caso teórico, devido as não idealidades do amp op não consideradas na análise, consegue-se um circuito com resposta mais próxima ao ideal quando comparado ao resultado obtido com o indutor comercial (real) e, portanto, pode-se utilizar o circuito como referência para o estudo de circuitos RLC ou outros sistemas que apresentem comportamentos que possam ser modelados por equações similares. A partir do circuito apresentado, pode-se também, facilmente, variar o valor do indutor emulado, variando-se os valores de alguns componentes, o que não se consegue na prática com o indutor comercial, contribuindo significativamente para os experimentos envolvendo circuitos RLC.

Destaca-se também a riqueza no aprendizado do estudante de engenharia ao estudar o circuito que envolve conceitos de eletricidade básica e eletrônica analógica para auxílio na análise de um circuito elétrico, reforçando a interdisciplinaridade e o suporte no conteúdo de cada uma das disciplinas envolvidas.

Figura 6 – Detalhe no início do regime transitório da resposta ao degrau da Figura 5. Tensão no capacitor: teórica (preto), circuito RLC com indutância real (vermelho) e com indutância emulada (azul).



Fonte: Autoria própria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dada a importância de um circuito RLC, não apenas para o estudante das engenharias elétrica e eletrônica, mas para todas engenharias, visto que diferentes sistemas, como elétricos, mecânicos, térmicos, entre outros, podem ser modelados como um circuito RLC, apresentou-se de forma concisa e objetiva a análise de um caso – resposta subamortecida transitória ao degrau – propondo-se a utilização de um circuito eletrônico para emulação da indutância, obtendo-se resultados mais próximos ao teórico, objeto do estudo, do que utilizando-se indutores comerciais. Apesar de não apresentar o efeito magnético e depender de fontes de alimentação, a emulação é importante pelo baixo custo, alta versatilidade no ajuste dos componentes, fácil compreensão e a interdisciplinaridade entre circuitos elétricos e eletrônica analógica, fortalecendo os conceitos básicos de ambas áreas num mesmo caso de estudo. Pretende-se, futuramente, considerar diferentes circuitos que emulam a indutância, assim como diferentes amp ops e as não idealidades do componente. Serão confeccionados kits de circuitos RLC com indutâncias variáveis para a disciplina de circuitos elétricos e, posteriormente, utilizar-se-á o indutor emulado em diferentes aplicações.

REFERÊNCIAS

ANTONIOU, A.; NAIDU, K. S. Modeling of a Gyrator Circuit. **IEEE Transactions on Circuit Theory**, v. 20, n. 5, p. 533–540, 1973.

CABRAL, S. H. L. **Análise de transitórios elétricos em transformadores através do método TLM**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.



CERVELIN, José Eduardo. **Redução de vibrações mecânicas em processo de torneamento usando material piezolétrico**. 2014. 179f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, 2014.

COSTA, Tito R. Vaz; FREITAS, Francisco D. **Identificação de impedâncias de sistemas de potência trifásicos por meio do método *vector fitting***. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, 2013.

FERRAZ, G.; MARTINEZ F., **Proposta de um modelo de Circuito Equivalente para representação em Banda Larga de Transformadores de Distribuição**, 2015, Itajubá. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Itajubá, 2015.

HOLMES, W. H.; HEINLEIN, W. E.; GRUTZMANN, S. Sharp-cutoff low-pass filters using floating gyrators. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 4, n. 1, p. 38–50, 1969.

IBRAHIM, M. A. et al. Lossless grounded inductance simulation using only one modified dual output DDCC. **2011 34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing, TSP 2011 - Proceedings**, p. 261–264, 2011.

JOHNSON, D. E., HILBURN, J. L., JOHNSON, R. J., **Fundamentos de Análise de Circuitos Elétricos**. 4ª Edição, Rio de Janeiro, RJ: Editora Prentice-Hall do Brasil LTDA, 1994.

KUMNGERN, M. New positive/negative floating inductance simulation using OTA and CCCII. **ISWTA 2011 - 2011 IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications**, n. 4, p. 5–8, 2011.

MARTINS, Adair Vilas Boas. **O Uso da Técnica dos Grafos de Ligação para a Simulação de Centrais Hidrelétricas em Regime Transitório**, 2004. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2004.

NETO, A. S., FERNANDES, A. B., **Efeito da modelagem da carga para estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de transmissão**. XII ERIAC, Porto Iguazu, Argentina, 2009.

NILSSON, J. W., RIEDEL, S. A., **Circuitos Elétricos**. 8ª edição, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

PARVEEN, T.; AHMED, M. T. OFC based versatile circuit for realization of impedance converter, grounded inductance, fdnr and component multipliers. **2009 International Multimedia, Signal Processing and Communication Technologies, IMPACT 2009**, v. 2, n. 1, p. 81–84, 2009.

PERTENCE, A.. **Amplificadores operacionais e filtros ativos**. 6ª edição, Porto Alegre: Bookman, 2003.

PETCHMANEELUMKA, W. Simple floating inductance simulators using OTAs. **2009 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, I2MTC 2009**, n. May, p. 1022–1025, 2009.



POLITERM INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO LTDA. **Década Indutância modelo LBOX-405**. Disponível em: <http://www.politerm.com.br/Produto-c-1-Decada-Indutancia-modelo-LBOX-405-versao-41-41.aspx>. Acesso em: 13 mar. 2019.

PONTE, F. A. R.; BORTOLI, A. L., **Otimização de sistemas mecânicos/amortecedor mecânico**. Salão de Iniciação Científica. Livro de resumos. Porto Alegre: UFRGS, 1997.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C., **Microeletrônica**. 5ª edição, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

SILVA, J. P.; BRANDÃO, R.; STEFFEN, V., **Amortecimento de vibrações em estruturas flexíveis utilizando um elemento piezoelétrico conectado a um circuito tipo shunt ressonador**, Uberlândia. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia – MG, 2002.

SIRIPHOT, D.; MANEEWAN, S. Single Active Element Based Electronically Controllable Grounded Inductance Simulator. **The 2013 Biomedical Engineering International Conference**. p. 8–11, 2013.

VAN DER SLUIS, Lou. **Transients in power systems**. Wiley, 2001.

EMULATION OF INDUCTANCE FOR TRANSIENT ANALYSIS IN RLC CIRCUITS: THE ELECTRONICS AIDING THE ANALYSIS OF ELECTRICAL CIRCUITS.

Abstract: *In different areas of knowledge several dynamic systems can be mathematically modeled through electrical circuits composed of resistors, inductors and capacitors, also known as RLC circuits. This work presents the transient analysis of the response to the step of an RLC circuit from the emulation of the inductor through an electronic circuit composed of operational amplifiers, resistors and a capacitor. In addition to the problem of the low availability of commercial values of inductors and / or relatively high financial value of decades of inductance, the circuit used does not present the internal resistance of the winding and theoretically allows the adjustment of different inductance values, in practice, results are closer to the theoretical / simulated than when using an actual inductance, as demonstrated experimentally. Although it does not present the magnetic effect and depends on power supplies, emulation is important both in electrical circuits and in systems modeled by RLC circuits at low cost, high versatility in component adjustment, easy understanding and interdisciplinarity between electrical circuits and analogue electronics, strengthening the basic concepts of both areas in the same case study.*

Key-words: *RLC circuit. Electric circuits. Electronics. Emulation of inductance. Interdisciplinarity.*