

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

DANILO FERREIRA DE MELO

CIRCUITO RL EMULADO COM AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

CORNÉLIO PROCÓPIO
2019

DANILO FERREIRA DE MELO

CIRCUITO RL EMULADO COM AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Vander Teixeira Prado



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia de Controle e Automação



FOLHA DE APROVAÇÃO

Danilo Ferreira de Melo

Circuito RL emulado com amplificadores operacionais

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 08:00hs do dia 25/06/2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação no programa de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Vander Teixeira Prado - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Pedro Carvalhaes Dias - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Aline Emy Takiy De Oliveira - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

RESUMO

MELO, DANILO. F. **Projeto de Circuito RL, emulado com Amplificadores Operacionais**. 2019. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia de Controle e Automação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2019.

Circuitos utilizando resistores e indutores são amplamente empregados em máquinas e equipamentos, de pequeno ou grande porte. Também são utilizados para estudos e análise de sistemas dinâmicos de diferentes áreas, como elétricos, eletrônicos, térmicos, mecânicos e fluídicos. Devido à dificuldade de se encontrar valores comerciais diversificados de indutâncias, e algumas não idealidades, como a resistência interna, somados ao fato de que componentes com valores elevados de indutância para aplicações em baixas frequências são caros, volumosos e pesados, este trabalho propôs a emulação de um circuito RL sintetizando a indutância através de circuitos eletrônicos utilizando resistores, capacitores e amplificadores operacionais. Consideraram-se dois circuitos existentes na literatura e um circuito proposto. Observou-se grande concordância entre os circuitos emuladores e o circuito RL, tanto na simulação como na prática, limitando-se de maneira geral a baixas frequências, visto que os amplificadores operacionais não possuem a resposta desejada para frequências elevadas. Apesar de a resposta do circuito proposto apresentar oscilações em torno da resposta desejada, foi o circuito que teve melhor desempenho considerando-se a resposta ao regime permanente senoidal e resposta transitória a um degrau, além de permitir a leitura direta das tensões emuladas no resistor e no indutor, simultaneamente. Os resultados encontrados possibilitam prosseguir estudando o circuito e, com algumas novas etapas, chegar num circuito que emule de forma adequada um circuito RL ideal, com resultados mais próximos, quando comparado à utilização do indutor real.

Palavras-chave: Amplificadores Operacionais, Circuito RL, Indutor, Circuito RL emulado.

ABSTRACT

MELO, DANILO. F. **Project of RL Circuit, emulated with Operational Amplifiers.** 2019. 58 p. Term paper (Graduation) - Control and Automation Engineering. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2019.

Circuits using resistors and inductors are built in machines and equipment, small or large. They are also used for studies and analysis of dynamic systems of different areas, such as electrical, electronic, thermal, mechanical and fluidic. Due to the difficulty of finding the diversified trade numbers of inductances, and some non-ideal ones, such as internal resistance, coupled with the fact that components with inductance values for applications at low frequencies are expensive, bulky and heavy, this work is an emulation of an RL circuit synthesizing an inductance through circuits using resistors, capacitors and operational amplifiers. Data already in the literature and a proposed circuit were considered. Concordance between the emulator circuits and the RL circuit, both on time and in practice, is limited to low frequencies are often frequent, which tend not to use the frequency option for high frequencies. In spite of a circuit response, the response was improved considering a direct response to the permanent stress and the transient response to a degree, besides allowing a direct reading of the emulated voltages without resistor without inductor simultaneously. The results obtained allow to study the circuit and, with several new steps, arrive at a circuit that is suitable for an ideal RL circuit, with closer results when compared to the actual inductor.

Keywords: Operational Amplifier, RL Circuit, Inductor, Emulated RL circuit.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Circuito RL.....	14
Figura 2	Circuito RL utilizando o indutor emulado de Riordan modificado por Antoniou.....	16
Figura 3	Circuito RL utilizando o indutor emulado de Berndt.....	18
Figura 4	Circuito RL emulado proposto.....	20
Figura 5	Análise da resposta do circuito de Antoniou para $L=20\mu\text{H}$ e $f = 10\text{kHz}$	25
Figura 6	Tensão no Indutor para resposta ao regime permanente no circuito de Antoniou para: $L=21\text{mH}$ $f = 10\text{kHz}$	26
Figura 7	Análise da resposta do circuito Proposto para $L=21\text{mH}$ e $f = 10\text{kHz}$	26
Figura 8	Análise da resposta do circuito Proposto para $L=2\text{H}$ e $f = 1\text{kHz}$	27
Figura 9	Análise da resposta do circuito Proposto para $L=2\text{H}$ e $f = 1\text{kHz}$	28
Figura 10	Análise de tensão em regime transitório do circuito de Berndt para $L=21\text{mH}$	29
Figura 11	Análise de tensão em regime transitório do circuito de Antoniou para $L=21\text{mH}$	30
Figura 12	Análise de tensão em regime transitório do circuito Proposto para $L=21\text{mH}$	31
Figura 13	Tensão no resistor para resposta ao regime transitório no circuito Proposto para: R adicionado = 200Ω $L=21\text{mH}$	32
Figura 14	Tensão no resistor para resposta ao regime permanente no circuito Proposto para: R adicionado = $1\text{k}\Omega$ $L=2\text{H}$	32
Figura 15	Tensão no resistor para resposta ao regime permanente no circuito Proposto para: R adicionado = $100\text{k}\Omega$ $L=2\text{H}$	33
Figura 16	Zoom para figura 15.....	33
Figura 17	Fonte de alimentação CC.....	34
Figura 18	Gerador de sinais.....	35
Figura 19	Osciloscópio.....	35
Figura 20	Indutor utilizado com $L = 21\text{mH}$	36

Figura 21	Visão geral da bancada com os 3 circuitos montados.....	36
Figura 22	Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt (ch2) e circuito RL (ch1) para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 21\text{mH}$	37
Figura 23	Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt (ch2) e circuito RL (ch1) para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$.....	37
Figura 24	Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt (ch2) e circuito RL (ch1) para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$.....	38
Figura 25	Tensão no resistor para resposta em regime transitório no circuito de Berndt (ch2) e circuito RL (ch1) para: $L = 21\text{mH}$.....	38
Figura 26	Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniou (ch1) e circuito RL (ch2) para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 21\text{mH}$	39
Figura 27	Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniou (ch1) e circuito RL (ch2) para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$.....	39
Figura 28	Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniou (ch1) e circuito RL (ch2) para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$	40
Figura 29	Tensão no indutor para resposta em regime transitório no circuito de Antoniou (ch1) e circuito RL (ch2) para: $L = 21\text{mH}$.....	40
Figura 30	Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito Proposto (ch2) e circuito RL (ch1) para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 21\text{mH}$	41
Figura 31	Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito Proposto (ch2) e circuito RL (ch1) para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$	41
Figura 32	Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito Proposto (ch2) e circuito RL (ch1) para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$	42
Figura 33	Tensão no resistor para resposta em regime transitório no circuito Proposto (ch2) e circuito RL (ch1) para: $L = 21\text{mH}$.....	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	Delimitação do tema e justificativa.....	11
1.2	Objetivos.....	12
1.2.1	REGIME PERMANENTE SENOIDAL	12
1.2.2	Objetivos específicos.....	12
2	CIRCUITO RL E EMULAÇÃO.....	13
3	SIMULAÇÕES.....	23
3.1	REGIME PERMANENTE SENOIDAL	23
3.1.1	CIRCUITO DE BERNDT (1 AMPLIFICADOR)	23
3.1.2	CIRCUITO DE ANTONIOU (2 AMPLIFICADORES)	24
3.1.3	CIRCUITO PROPOSTO (3 AMPLIFICADORES)	24
3.2	REGIME TRANSITÓRIO.....	24
3.2.1	Circuito de Berndt.....	25
3.2.2	Circuito de Antoniou.....	26
3.2.3	Circuito proposto.....	27
4	COMPROVAÇÃO PRÁTICA DAS SIMULAÇÕES.....	34
5	CONCLUSÃO.....	43
6	REFERÊNCIAS.....	45
7	APÊNDICE A – Imagens das simulações realizadas.....	48

1 INTRODUÇÃO

A grande evolução da tecnologia atualmente está relacionada a pesquisas, desenvolvimentos de circuitos e componentes elétricos e eletrônicos. Dorf e Svoboda (2003) destacam a engenharia como atividade de resolver problemas sob restrições, combinando o estudo da matemática e das ciências naturais e sociais para direcionar forças da natureza em benefício da humanidade, tendo como objetivo final um projeto e/ou a produção de dispositivos ou equipamentos, os quais, muitas vezes, são compostos de circuitos elétricos.

Como engenheiro, seja no projeto ou desenvolvimento de um equipamento, seja na análise ou manutenção do mesmo, faz-se, então, necessário o estudo do funcionamento dos componentes de cada circuito. Em corrente contínua, capacitores e indutores armazenam energia. Em corrente alternada seu comportamento se assemelha com o dos resistores, opondo-se ao fluxo de corrente de acordo com a frequência de operação. Dependendo da topologia do circuito e do tipo de sinal aplicado, esses dispositivos podem apresentar diferentes comportamentos e serem utilizados em diversas aplicações.

Além de serem empregados nos equipamentos, os circuitos elétricos são muito utilizados para modelar sistemas de outras áreas. Dessa forma, pode-se estudar o comportamento de sistemas dinâmicos, isto é, analisar o comportamento em regime transitório e regime permanente, através de circuitos elétricos que são simples e relativamente baratos, e a partir dos resultados prévios, modelar um sistema mecânico, térmico ou fluídico, por exemplo. Portanto, a existência de sistemas e de soluções similares fornece ao analista a capacidade de estender soluções de um sistema para todos os outros sistemas com as mesmas equações diferenciais descritivas (DORF; BISHOP, 2012).

Diferentes sistemas são descritos pelo mesmo tipo de equação diferencial, alterando-se apenas o significado de cada variável, ou seja, apresentam similaridades. Dois sistemas físicos são análogos (duais) quando são descritos pelo mesmo modelo matemático, ou seja, pelo mesmo conjunto de equações diferenciais ou pela mesma função de transferência (SILVA, 2006).

Desta forma, outros sistemas podem ser modelados por circuitos elétricos. Este conceito não está restrito ao domínio elétrico, e pode ser expandido para outros domínios físicos. Algumas dessas relações estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Analogia entre o domínio elétrico e os demais domínios físicos através das variáveis generalizadas esforço, fluxo e deslocamento.

<i>Domínio</i>	<i>Esforço</i>	<i>Fluxo</i>	<i>Deslocamento</i>
Elétrico	Tensão	Corrente	carga
Térmico	Temperatura	Fluxo de calor	Entropia
Pneumático	Pressão	Fluxo volumétrico	Volume
Mecânico	Força	Velocidade	Posição

Fonte: Adaptado de Espindola (2006)

Finocchio e França (2009) propõem a modelagem térmica de transformadores a seco, usando analogia a um sistema composto por uma fonte de tensão alternada, um resistor e um capacitor. Prost et al. (2013) utilizaram um circuito RL (resistor-indutor) para simular o comportamento de um trem de pouso de uma aeronave, ao receber uma descarga elétrica de um raio.

Uma máquina elétrica síncrona, atuando como motor ou gerador, possui um modelo equivalente composto por um circuito RL. A partir da análise deste circuito, pode-se estudar o funcionamento e projetar controladores para melhorar o comportamento do motor/gerador (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006; LIN-SHI et al., 2009).

Um circuito RL é um sistema de primeira ordem, pois as equações que descrevem as tensões e correntes nos componentes são equações diferenciais de primeira ordem (NILSSON; RIEDEL, 2009).

Assim, um circuito RL pode ser utilizado no ensino em disciplinas da área de controle no lugar de kit's didáticos e equipamentos mais caros, utilizados para controle de posição e velocidade de motores DC, visando diminuir o tempo de estabelecimento e/ou reduzir o erro em regime permanente.

Neste contexto, torna-se extremamente importante a análise da resposta de um circuito RL a uma entrada degrau e a um sinal senoidal, para análise dos regimes transitório e permanente, a qual é vista na disciplina de Circuitos Elétricos do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal

do Paraná, Campus Cornélio Procópio (UTFPR - CP).

1.1 Delimitação do tema e justificativa

Encontra-se no mercado uma grande variedade de valores de resistores, os quais podem ser combinados para obter valores de resistências específicas. Apesar de ter uma menor variedade, quando comparada aos resistores, os capacitores também possuem muitas opções de valores comerciais. Ambos os componentes citados possuem baixo custo de aquisição.

Mesmo sendo amplamente utilizados, circuitos com indutores apresentam alguns problemas: (i) não se encontram facilmente uma gama considerável de valores comerciais; (ii) mesmo encontrando um valor próximo ao necessário, ainda existe uma resistência interna, devido ao fator construtivo do enrolamento; (iii) para aplicações de baixa frequência ou valores elevados de indutância, os indutores, geralmente, são volumosos, pesados e relativamente caros (PERTENCE, 2015)

Nos laboratórios da disciplina de circuitos elétricos, da UTFPR – CP, existem apenas três valores de indutância disponíveis: 21mH, 37,2mH e 58,2mH. Além das limitações de escolha para valores de indutância, os mesmos não correspondem ao valor especificado. Como resultado deste problema, temos respostas aproximadas, mas que divergem consideravelmente do valor simulado (RAMOS, 2017)

Problemas como a falta de exatidão, custo elevado e a baixa variação de valores de indutância, tornam relevante o estudo de emulação de circuitos RL utilizando-se amplificadores operacionais (AMP OPs).

Existem diferentes circuitos que realizam esta emulação de um circuito RL de forma direta, ou através da emulação de um indutor, sendo necessária a conexão com um resistor, tais como os propostos por Antoniou e Riordan (ANTONIOU; NAIDU, 1973). Existem também os *gyrators* de Deboo, Brugler, Hawley e Huelsman-Morse (SUTHERLAND, 1976).

Segundo Sedra e Smith (2007), o circuito emulador de Antoniou tem se destacado pelo fato de sua operação ser mais tolerante às propriedades não ideais

dos amplificadores operacionais.

Portanto, este trabalho propõem a utilização de um circuito composto por amplificadores operacionais, resistores e capacitores para emular um circuito RL.

Neste trabalho são comparados os resultados da resposta ao degrau e a um sinal senoidal para um circuito RL utilizando-se um indutor comercial, dois circuitos que emulam indutâncias, encontrados na literatura, e um circuito proposto.

1.2 Objetivos

Nessa seção são apresentados os objetivos do trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

Emular um circuito RL a partir de amplificadores operacionais, resistores e capacitores para análise dos regimes transitório e permanente.

1.2.2 Objetivos específicos

A partir do objetivo geral, tem-se como objetivos específicos:

- Estudar circuitos RL;
- Estudar amplificadores operacionais;
- Equacionar os diferentes circuitos existentes na literatura;
- Propor um circuito alternativo;
- Simular e comparar as diferentes configurações existentes;
- Comparar os resultados teóricos, simulados e experimentais.

2 CIRCUITO RL E EMULAÇÃO

Indutores são dispositivos compostos de espiras ou fios enrolados em torno de um núcleo, também chamados de bobinas, que tem como finalidade armazenar energia e criar um campo magnético em torno de si. Os indutores têm inúmeras aplicações em eletrônica e sistemas de potência, e são usados em fontes de tensão, transformadores, rádios, TVs, radares e motores elétricos. (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

Indutância é a propriedade segundo a qual um indutor se opõe à mudança do fluxo de corrente através dele, medida em Henrys (H) (ALEXANDER; SADIKU, 2013). É usada para calcular a tensão induzida por um campo magnético devido a uma corrente de valor variável, que atravessa os fios da bobina de um indutor. Esta propriedade depende das características físicas do indutor: número de espiras (N), área de secção transversal (A), permeabilidade magnética do núcleo (μ) e comprimento (l), as quais se relacionam por:

$$L = \frac{N^2 A \mu}{l} \quad (1)$$

O acúmulo de energia magnética em um indutor é explicado por existir uma interdependência entre a tensão nas extremidades do indutor e a corrente que circula por ele. Quando uma corrente elétrica atravessa um indutor, esta induz uma tensão em seus terminais. O valor dessa tensão no indutor é dado por:

$$v_L = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (2)$$

O indutor é um componente que se opõe à variação da corrente. Em corrente contínua (CC), a partir da equação (2), observa-se que se não há variação da corrente no indutor, a tensão no indutor, ou seja, a diferença de potencial entre os seus terminais, é nula. Portanto, neste caso o indutor se comporta como um curto-circuito.

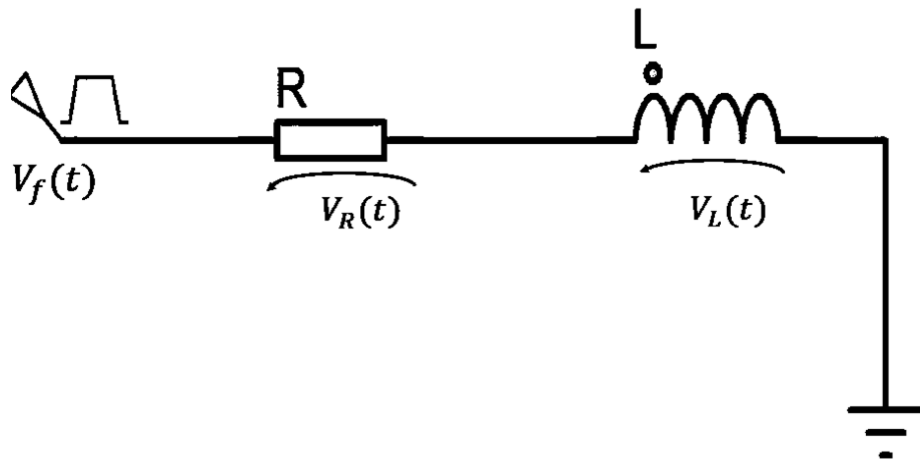
Um circuito RL é um sistema de primeira ordem, composto por um resistor e um indutor, uma vez que suas tensões e correntes são caracterizadas por equações diferenciais de primeira ordem.

A este circuito pode-se aplicar uma fonte de tensão, a qual pode ser CC (corrente contínua) ou CA (corrente alternada). No momento em que se aplica a tensão, isto é, altera-se o circuito, surgem correntes e tensões, as quais passado um determinado período, não se alteram mais. O período entre a aplicação de uma perturbação no circuito e o momento em que as correntes e tensões não mais se alteram chama-se regime transitório. Passado o transitório, tem-se o regime permanente.

Dado um circuito RL, como ilustrado na Figura 1, aplicando-se a Lei das Tensões de Kirchhoff (LTK), chega-se a:

$$v_f(t) = v_R(t) + v_L(t) \quad (3)$$

Figura 1: Circuito RL



Fonte: Autoria própria

Existem diferentes circuitos utilizando amplificadores operacionais (amp ops) que emulam circuitos RL diretamente ou emulam uma indutância a ser conectada a um resistor para formar o circuito RL. Amplificadores operacionais são circuitos já implementados na forma de um circuito integrado que apresentam elevado ganho em malha aberta para entrada diferencial, alta impedância de entrada e baixa impedância de saída, e excelente largura de banda (KULESZ, 1969).

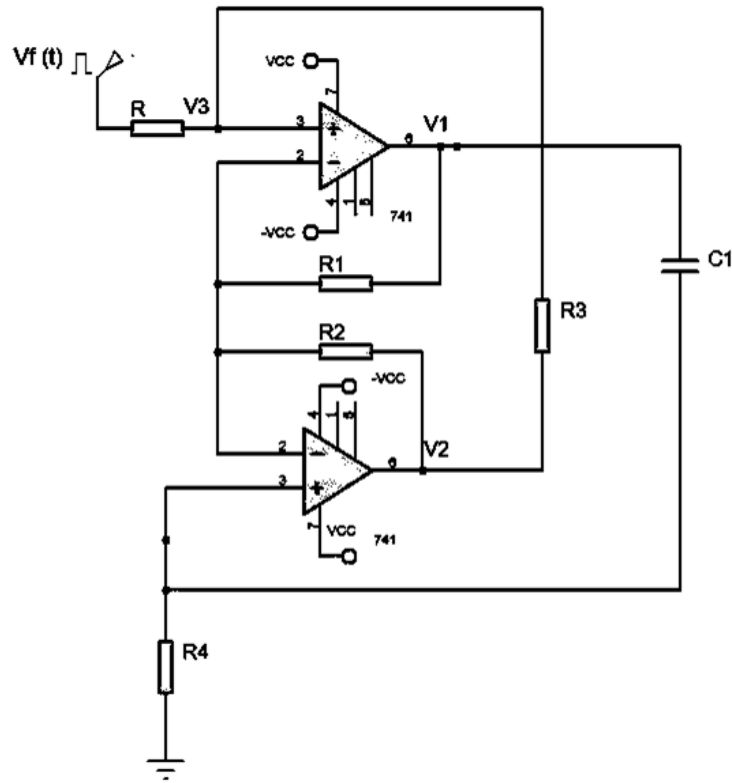
Segundo Kulesz (1969), a emulação proposta por Morse e Huelsman (1964) depende de valores de resistências exatamente iguais, o que impede a implementação da ideia. Já o trabalho proposto por Hawley (1966) é extremamente dependente da temperatura. Brugler (1966) e Deboo (1967) apresentam circuitos com melhores resultados, quando comparados aos citados anteriormente, contudo, ambos podem operar de forma instável para baixas frequências. Prescott (1966) emula uma indutância flutuante, isto é, que não necessita que um dos terminais da indutância no circuito esteja aterrada. Entretanto, também se apresenta instável em baixas frequências.

Ramos (2017) realizou estudos de dois emuladores de indutância: Riordan (1967) e Antoniou (1967). Segundo Kulesz (1969), o circuito de Riordan também está sujeito a limitações e instabilidade em baixas frequências.

Antoniou (1967) propôs 6 circuitos, dos quais um deles é apresentado em Ramos (2017), Hill e Horowitz (2015) e Sedra e Smith (2007), que elimina o problema de instabilidade em baixas frequências encontrado nos demais trabalhos. Contudo, ainda de acordo com Kulesz (1968), Antoniou (1968) apresenta uma modificação no circuito de Riordan, eliminando o problema da instabilidade do circuito original e resultando no melhor circuito dentre os trabalhos comentados. O circuito de Riordan modificado por Antoniou está ilustrado na Figura 2.

Considerando-se os amp ops ideais com realimentação negativa, a corrente de entrada em seus terminais é nula e o ganho diferencial de malha aberta é infinito, o que faz com que a tensão nas entradas inversora (v_-) e não inversora (v_+) sejam iguais, também conhecido como curto-virtual. Desta forma, pode-se dizer que a corrente no capacitor é dada por:

Figura 2: Circuito RL utilizando o indutor emulado de Riordan modificado por Antoniou



Fonte: Adaptado de Antoniou (1968).

$$i_C(t) = \frac{v_3(t)}{R_4} \quad (4)$$

A tensão na saída do amp op na parte superior do circuito pode ser escrita como:

$$v_1(t) = v_3(t) + v_{C1}(t) \quad (5)$$

A tensão na saída do amp op na parte inferior do circuito pode ser escrita como:

$$v_2(t) = v_3(t) + R_2 i_{R3} = v_3(t) + \frac{R_2 [v_3(t) - v_1(t)]}{R_1} \quad (6)$$

Substituindo-se (5) em (6), tem-se:

$$v_2(t) = v_3(t) - \left(\frac{R_2}{R_1}\right) v_{C1}(t) \quad (7)$$

A corrente no resistor R pode ser escrita como:

$$i_R(t) = \frac{[v_3(t) - v_2(t)]}{R_3} \quad (8)$$

Substituindo-se (7) em (8), tem-se:

$$i_R(t) = \left[\frac{R_2}{R_1 R_3}\right] v_{C1}(t) \quad (9)$$

Sabendo-se que a corrente no capacitor é dada por (DORF; SVOBODA 2007):

$$i_C(t) = \frac{C dv_C(t)}{dt} \quad (10)$$

Pode se escrever a tensão no capacitor como:

$$v_C(t) = \left(\frac{1}{C}\right) \int_0^t i_C(t) dt + v_C(0) \quad (11)$$

Substituindo-se (11) em (9), tem-se:

$$i_R(t) = \left[\frac{R_2}{R_3 R_1}\right] \left[\left(\frac{1}{C_1}\right) \int_0^t i_C(t) dt + v_C(0)\right] \quad (12)$$

Derivando-se ambos os lados da equação (12), chega-se a:

$$\frac{di_R(t)}{dt} = \left[\frac{R_2}{R_1 R_3 C_1}\right] i_C(t) \quad (13)$$

Substituindo-se (4) em (13), pode-se escrever:

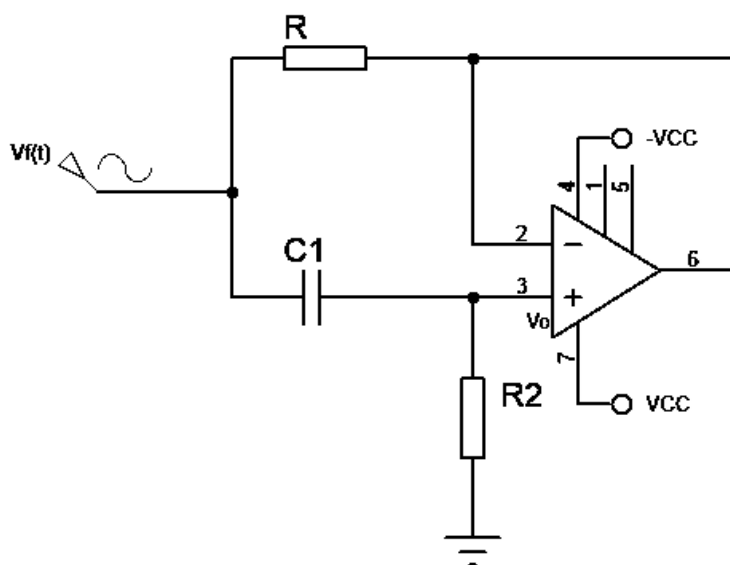
$$v_3(t) = \left[\frac{R_1 R_3 R_4 C_1}{R_2}\right] \frac{di_R(t)}{dt} \quad (14)$$

Por se tratar de um circuito série, $i_R(t) = i(t)$. Comparando-se (14) com (2), o circuito da Figura 2 emula um circuito RL com a seguinte relação:

$$L_{emulador} = \frac{R_1 R_3 R_4 C_1}{R_2} \quad (15)$$

Existe ainda outra forma de emular um circuito RL, utilizando apenas um amplificador operacional, proposto por Berndt e ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Circuito RL utilizando o indutor emulado de Berndt



Fonte: Adaptado de Berndt (1969).

Considerando o amp op ideal, a tensão de saída $v_0(t)$ é dada por:

$$v_0(t) = R_2 i_{C_1}(t) = R_2 C_1 \left(\frac{dv_{C_1}(t)}{dt} \right) \quad (16)$$

a qual pode ser escrita como:

$$v_0(t) = R_2 C_1 \left(\frac{dv_f(t)}{dt} \right) - R_2 C_1 \left(\frac{dv_0(t)}{dt} \right) \quad (17)$$

Integrando-se ambos os lados da equação (17) no tempo, e manipulando-se o resultado algebricamente, chega-se a:

$$\left(\frac{1}{R_2 C_1}\right) \int_0^t v_0(t) = v_f(t) - v_f(0) - v_0(t) - v_0(0) \quad (18)$$

Sendo $v_f(0) - v_0(0)$ a tensão no capacitor no instante $t = 0$, relacionada com a energia armazenada no capacitor. A equação (18) pode então ser escrita como:

$$\left(\frac{1}{R_2 C_1}\right) \int_0^t v_0(t) = v_f(t) - v_0(t) - v_c(0) \quad (19)$$

Aplicando-se a lei de ohm na equação (3), tem-se:

$$v_f(t) = Ri(t) + v_L(t) \quad (20)$$

Manipulando-se a equação (2), pode-se escrever a corrente no indutor como:

$$i_L(t) = \left(\frac{1}{L}\right) \int_0^t v_L(t) + i_L(0) \quad (21)$$

sendo $i_L(0)$ a corrente no indutor no instante $t = 0$, relacionada com a energia armazenada no indutor.

Sabendo-se que, por se tratar de um circuito série $i_L(t) = i_R(t) = i(t)$, e substituindo-se (21) em (20), chega-se a:

$$v_f(t) = \left(\frac{R}{L}\right) \int_0^t v_L(t) + Ri_L(0) + v_L(t) \quad (22)$$

E, portanto:

$$\left(\frac{R}{L}\right) \int_0^t v_L(t) = v_f(t) - v_L(t) - Ri_L(0) \quad (23)$$

Comparando-se (19) com (23), observa-se que o circuito da Figura 3 emula um circuito RL, sendo a tensão na saída do circuito ($v_o(t)$) a tensão sobre o indutor, com a relação:

$$L_{emulador} = RR_2 C_1 \quad (24)$$

Seguindo o mesmo procedimento, mas focando na tensão sobre o resistor, e

não na tensão sobre o indutor, como no caso anterior, substituindo-se (2) em (3), chega-se a:

$$v_R(t) = v_f(t) - \frac{L di_L(t)}{dt} \quad (25)$$

Aplicando-se a lei de Ohm, pode-se escrever (14) como:

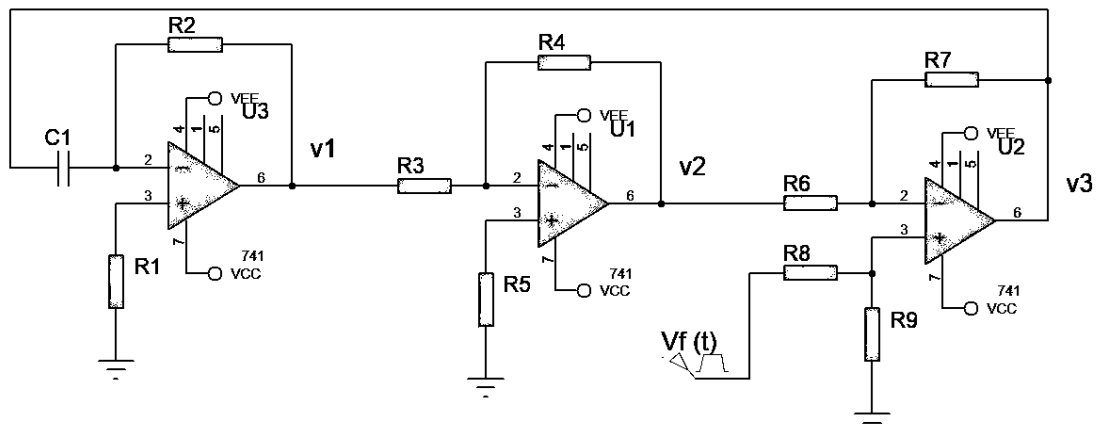
$$v_f(t) = v_R(t) + \frac{\left(\frac{L}{R}\right) dv_R(t)}{dt} \quad (26)$$

a qual pode ser expressa da forma:

$$v_R(t) = v_f(t) - \frac{\left(\frac{L}{R}\right) dv_R(t)}{dt} \quad (27)$$

A partir da equação (27), implementando-se, a partir de amplificadores operacionais, um derivador e um subtrator, pode-se emular um circuito RL, como ilustrado na Figura 4, sendo $v_R(t) = v_3$.

Figura 4: Circuito RL emulado proposto



Fonte: Autoria própria

Os resistores R_1 e R_5 são utilizados para reduzir os efeitos das correntes de *offset*, isto é, correntes de entrada CC para polarização do amp op, considerando-se as não idealidades do amp op.

Considerando-se os amp ops ideais, para o amp op da esquerda, na Figura 4, tem-se $v_+ = v_- = 0$, e, portanto:

$$i_{C1}(t) = C_1 \left(\frac{dv_3(t)}{dt} \right) = \frac{-v_1(t)}{R_2} \quad (28)$$

a qual pode ser escrita como:

$$v_1(t) = -R_2 C_1 \left(\frac{dv_3(t)}{dt} \right) \quad (29)$$

Para o amp op do meio, na Figura 4, tem-se:

$$\frac{v_1(t)}{R_3} = -\frac{v_2(t)}{R_4} \quad (30)$$

Logo:

$$v_2(t) = -\left(\frac{R_4}{R_3} \right) v_1(t) \quad (31)$$

Substituindo-se (29) em (31), chega-se a:

$$v_2(t) = \left(\frac{R_4}{R_3} \right) R_2 C_1 \left(\frac{dv_3(t)}{dt} \right) \quad (32)$$

Considerando-se o amp op da direita, na Figura 4, aplicando-se o teorema da superposição de efeitos, ao anular o efeito da tensão de entrada $v_i(t)$:

$$v_3(t) = -\left(\frac{R_7}{R_6} \right) v_2(t) \quad (33)$$

Anulando-se o efeito da entrada $v_2(t)$, considerando-se o curto-virtual, tem-se:

$$v_-(t) = \left[\frac{R_6}{R_6 + R_7} \right] v_3(t) = v_+(t) = \left[\frac{R_9}{R_8 + R_9} \right] v_f(t) \quad (34)$$

Da equação (34), pode-se escrever a tensão $v_3(t)$ como:

$$v_3(t) = \left(\frac{R_9}{R_6} \right) \left[\frac{R_6 + R_7}{R_8 + R_9} \right] v_f(t) \quad (35)$$

Por superposição de efeitos, a tensão $v_3(t)$ pode ser obtida pela soma das

equações (33) e (35):

$$v_3(t) = \left(\frac{R_9}{R_6}\right) \left[\frac{R_6 + R_7}{R_8 + R_9}\right] v_f(t) - \left(\frac{R_7}{R_6}\right) v_2(t) \quad (36)$$

Substituindo-se (32) em (36), tem-se:

$$v_3(t) = \left(\frac{R_9}{R_6}\right) \left[\frac{R_6 + R_7}{R_8 + R_9}\right] v_f(t) - \left(\frac{R_7}{R_6}\right) \left(\frac{R_4}{R_3}\right) R_2 C_1 \left(\frac{dv_3(t)}{dt}\right) \quad (37)$$

Escolhendo-se os valores de resistores de forma que $R_3 = R_4$ e $R_6 = R_7 = R_8 = R_9$, a equação (37) pode ser escrita como:

$$v_3 = v_f(t) - R_2 C_1 \left(\frac{dv_3(t)}{dt}\right) \quad (38)$$

Comparando-se (26) com (38), observa-se que o circuito da Figura 4 emula um circuito RL, sendo a tensão $v_3(t)$ a tensão sobre o resistor e a tensão $v_2(t)$ a tensão sobre o indutor, com a relação:

$$L_{emulador} = R R_2 C_1 \quad (39)$$

Comparando-se os circuitos da Figura 3 e 4, observa-se que o primeiro utiliza apenas um amplificador operacional, enquanto que o segundo utiliza três. Entretanto, este tem a vantagem de possibilitar o acesso às tensões sobre o resistor e o indutor simultaneamente. Para o caso da Figura 3, um amplificador operacional adicional deve ser inserido para obter a tensão no resistor, realizando-se a subtração entre a tensão da entrada e a tensão do indutor emulado.

3. SIMULAÇÕES

Os 3 circuitos apresentados foram simulados com intuito de comparar suas respostas aos sinais de entrada, comparando-se com o circuito RL utilizando um indutor ideal na simulação. De acordo com as aplicações e o equacionamento apresentado no Capítulo 2, foram simulados circuitos com o *software Proteus*, devido à disponibilidade de licença do mesmo na instituição e facilidade/versatilidade na sua utilização, considerando um indutor ideal e amplificadores operacionais que sintetizam um indutor, para os casos: (i) resposta em regime permanente senoidal; (ii) resposta ao degrau, ou seja, análise da resposta transitória de um circuito RL.

3.1 REGIME PERMANENTE SENOIDAL

Para estas simulações foram utilizados os três circuitos ilustrados nas Figuras 2 e 3 e 4, utilizando como sinal de entrada senoide de 1V de pico com três valores de frequência: de 10Hz, 1KHz e 10kHz. As resistências R' tiveram seus valores fixados em $1k\Omega$. As simulações têm como objetivo verificar limitações dos circuitos ou peculiaridades, como oscilações na resposta desejada ou defasagens entre as respostas do circuito RL real e sintético, como apresentado nos resultados desta seção.

De uma forma geral, os resultados entre os circuitos RL sintéticos e o circuito RL apresentaram resultados semelhantes, como pode ser visto no apêndice A deste trabalho. Sendo assim, este tópico apresenta apenas as análises dos casos mais relevantes para a discussão do projeto, como casos em que o circuito emulador apresentou resultados muito diferentes do circuito RL, considerando-se como referência o caso utilizando-se a indutância ideal. Adotou-se um padrão de cores para facilitar a compreensão dos gráficos das simulações, sendo a cor azul correspondente ao sinal de entrada, vermelho a resposta do circuito RL (indutor ideal), e verde dos circuitos RL sintéticos.

3.1.1 CIRCUITO DE BERNDT (1 AMPLIFICADOR)

Os resultados vistos em simulações, nas figuras A-1, A-2, A-7, A-8, A-13, A-14, A-19, A-20, A-25, A-26, A-31, A-32, A-37, A-38, A-43, A-44, A-49, A-50 (apêndice A), indicam uma boa performance para utilização do circuito de Berndt como circuito RL, o

qual demonstra uma boa semelhança entre as respostas do circuito emulador e do circuito desejado.

3.1.2 CIRCUITO DE ANTONIOU (2 AMPLIFICADORES)

Os resultados vistos em simulações, nas figuras A-3, A-4, A-9, A-10, A-15, A-16, A-21, A-22, A-27, A-28, A-33, A-34, A-39, A-40, A-45, A-46, A-51, A-52 (apêndice A) indicam uma boa performance para utilização do circuito de Antoniou como circuito RL, obtendo piores resultados em altas frequências, provavelmente devido às limitações do amp op em altas frequências. Destacam-se as respostas em 10kHz para as indutâncias de 20uH, da figura 5 com uma pequena defasagem na resposta do circuito de Antoniou, em relação ao circuito real, e de 21mH e 2H, ilustradas nas figuras 6 e 7, com resultados distintos entre as indutâncias emulada e a ideal.

3.1.3 CIRCUITO PROPOSTO (3 AMPLIFICADORES)

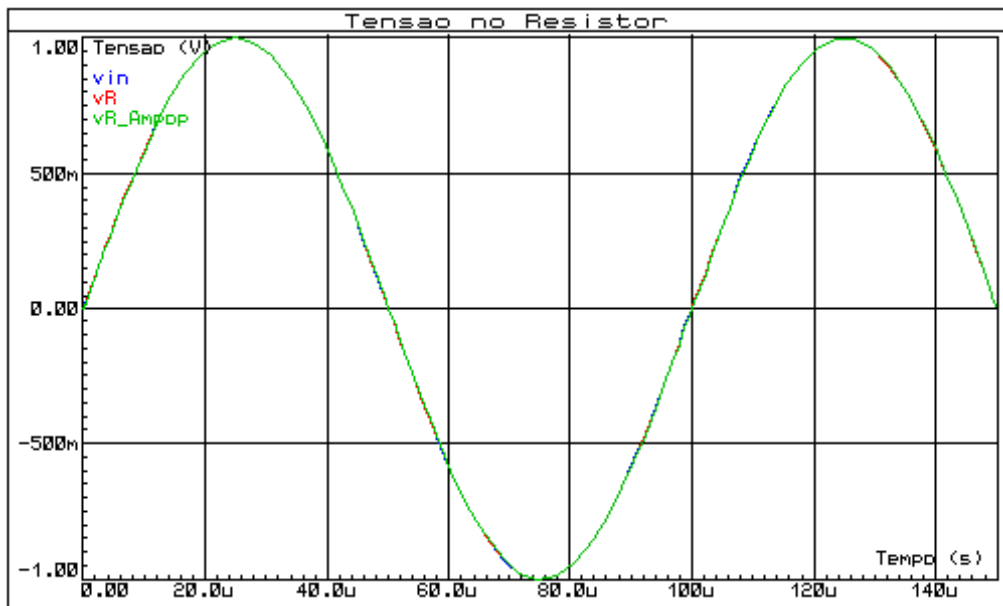
O circuito proposto, tem seus resultados ilustrados nas figuras A-5, A-6, A-11, A-12, A-17, A-18, A-23, A-24, A-29, A-30, A-35, A-36, A-41, A-42, A-47, A-48, A-53, A-54 (apêndice A). A grosso modo apresenta as mesmas características dos circuitos anteriores. Entretanto, observa-se que para alto valor de indutância ou altas frequências a resposta apresenta uma característica oscilatória, em torno do valor desejado, como destacado nas figuras 8 e 9.

De maneira geral, o circuito Berndt apresentou os melhores resultados simulados. O circuito de Antoniou apresentou problemas para frequências elevadas e o circuito proposto possui resposta coerente com a desejada, mas com característica oscilatória para alto valor de indutância e/ou altas frequências.

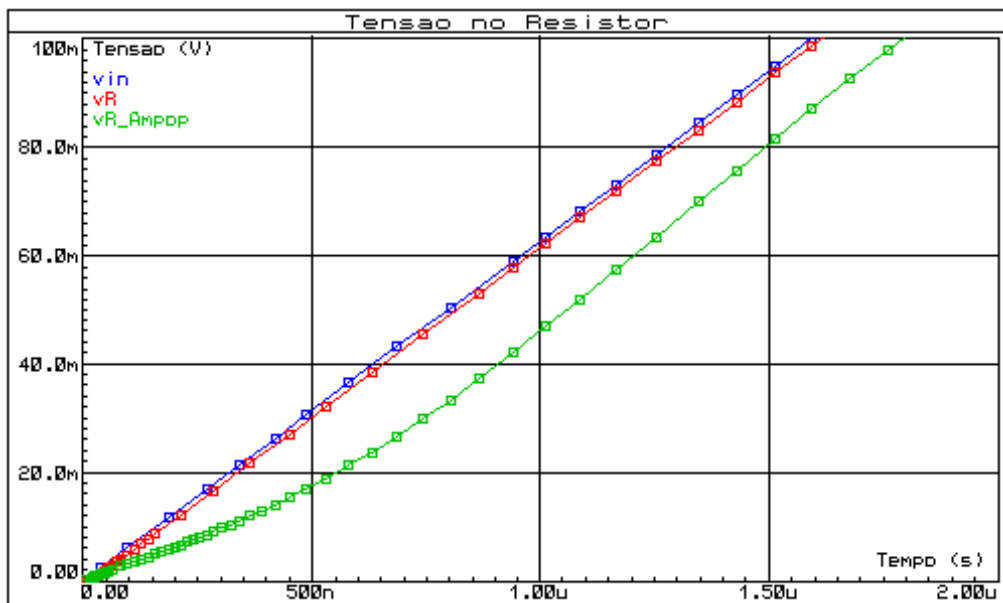
3.2 REGIME TRANSITÓRIO

Assim como no regime permanente, as simulações dos circuitos sintetizadores de indutância foram realizadas analisando as suas características em regime transitório, resposta ao degrau, comparando com as respostas de um circuito RL. Os resultados estão ilustrados no apêndice A (Figuras A-55 a A-63) e, nesta seção, os principais destaques são exibidos com objetivo de mostrar divergências entre os circuitos.

Figura 5- Análise da resposta do circuito de Antoniou para $L=20\mu\text{H}$ e $f=10\text{kHz}$



(a) Tensão no resistor para resposta ao regime permanente no circuito de Antoniou para: $L=20\mu\text{H}$ $f=10\text{kHz}$



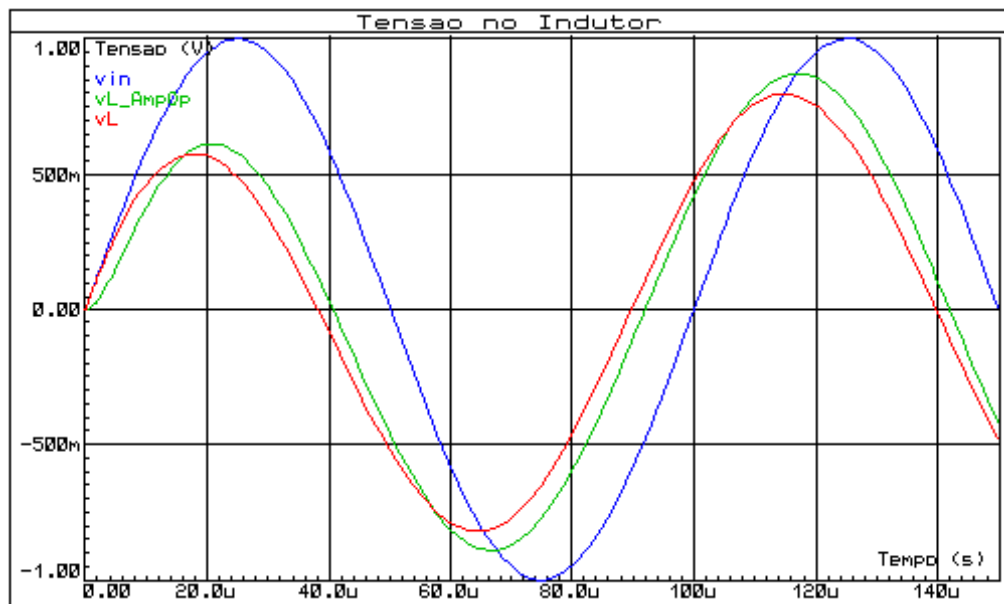
(b) Zoom da curva de Tensão no resistor para resposta ao regime permanente no circuito de Antoniou para: $L=20\mu\text{H}$ $f=10\text{kHz}$

Fonte: Autoria própria

3.2.1 Circuito de Berndt

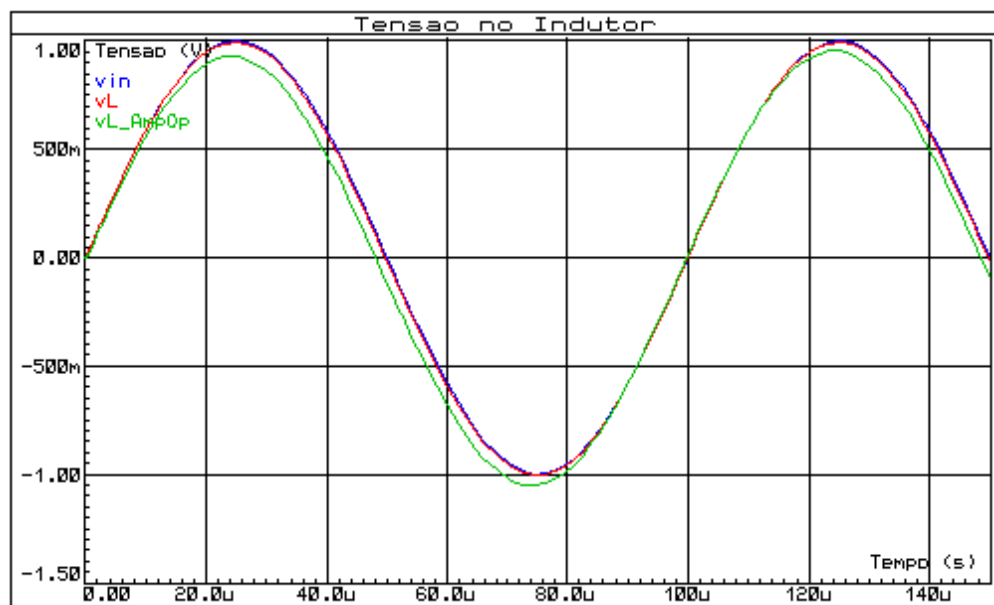
O circuito de Berndt, tem ótimos resultados, com uma pequena alteração (transitório do circuito de Berndt) no início do período a ser analisado, como destacado na Figura 10. Entretanto, a duração do transitório do circuito utilizado é muito menor que o transitório do circuito RL real, não comprometendo a análise do mesmo.

Figura 6- Tensão no Indutor para resposta ao regime permanente no circuito de Antoniou para:
 $L=21\text{mH}$ $f = 10\text{kHz}$



Fonte: Autoria própria

Figura 7- Tensão no Indutor para resposta ao regime permanente no circuito de Antoniou para:
 $L=2\text{H}$ $f = 10\text{kHz}$

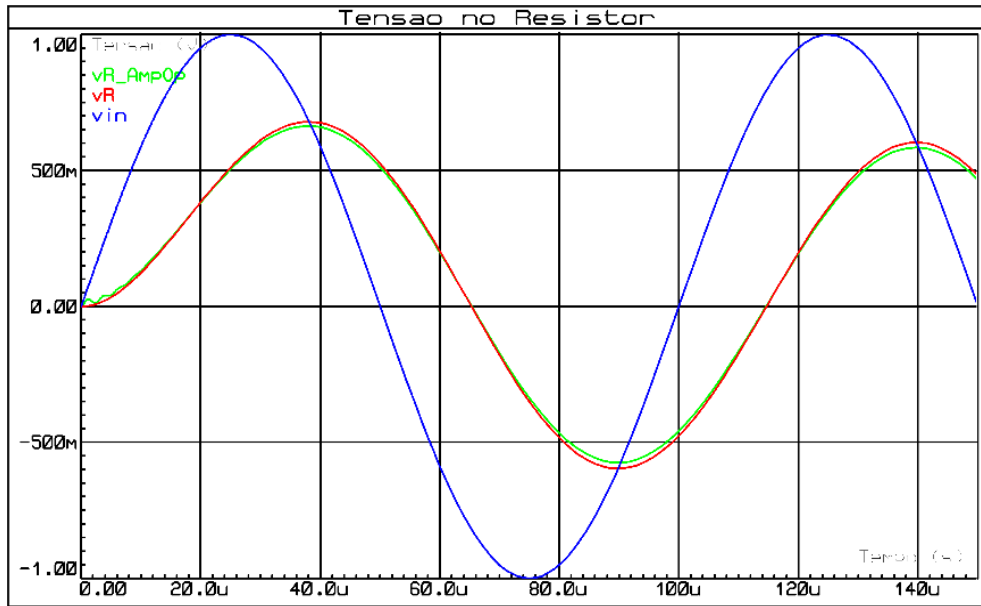


Fonte: Autoria própria

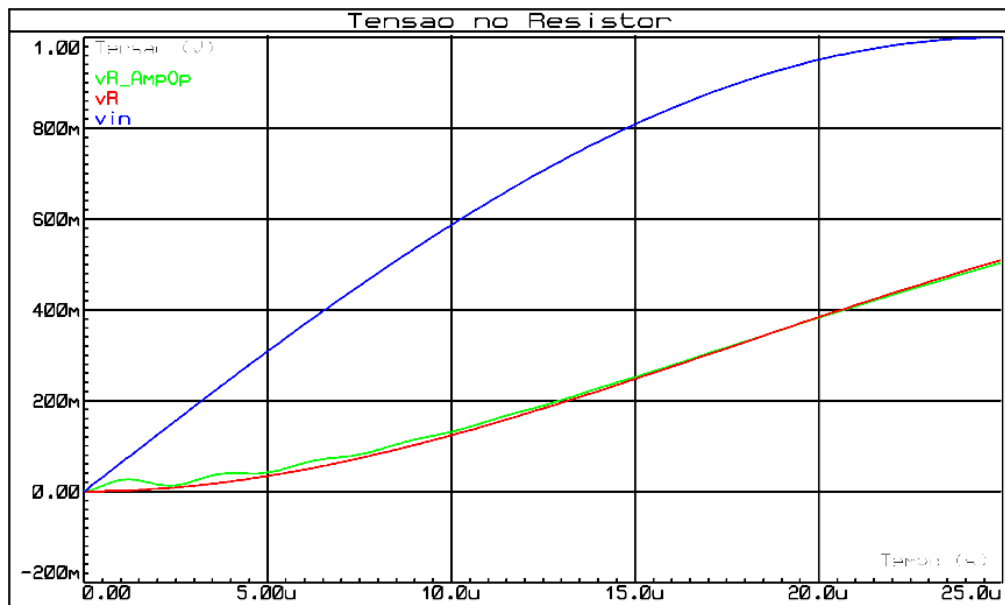
3.2.2 Circuito de Antoniou

O circuito de Antoniou, de maneira geral, apresentou resultados similares ao de Berndt. Entretanto, para a indutância de 21mH, o transitório do circuito emulado teve uma duração significativa (aproximadamente 45 μs) quando comparado ao transitório do

Figura 8- Análise da resposta do circuito Proposto para $L=21\text{mH}$ e $f=10\text{kHz}$



(a) Tensão no resistor para resposta ao regime permanente no circuito Proposto para: $L=21\text{mH}$ $f=10\text{kHz}$



(b) Zoom da curva de Tensão no resistor para resposta ao regime permanente no circuito Proposto para: $L=21\text{mH}$ $f=10\text{kHz}$

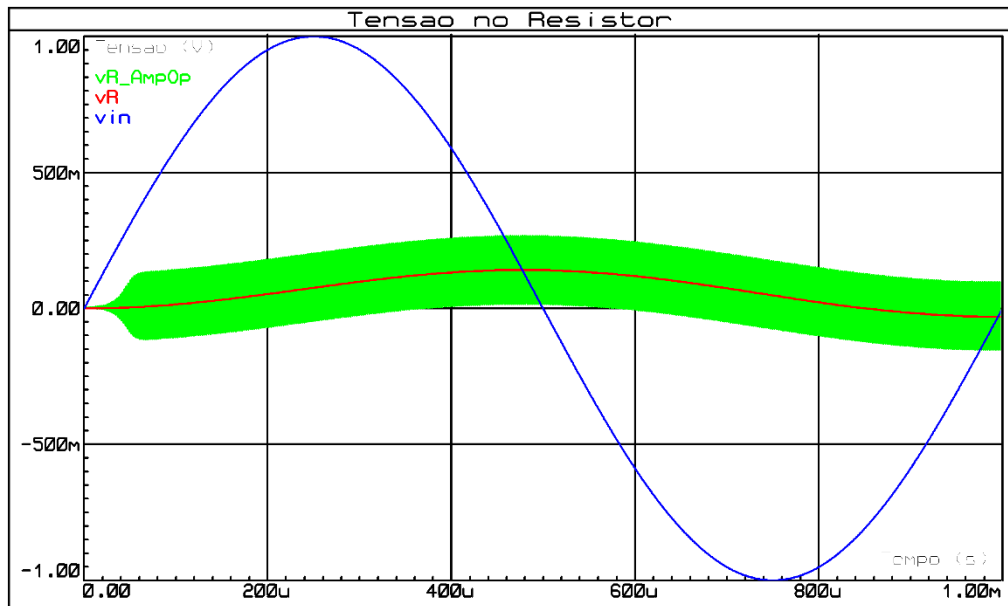
Fonte: Autoria própria

sistema RL analisado (aproximadamente $110\mu\text{s}$), comprometendo a análise desejada, como ilustrado na Figura 11.

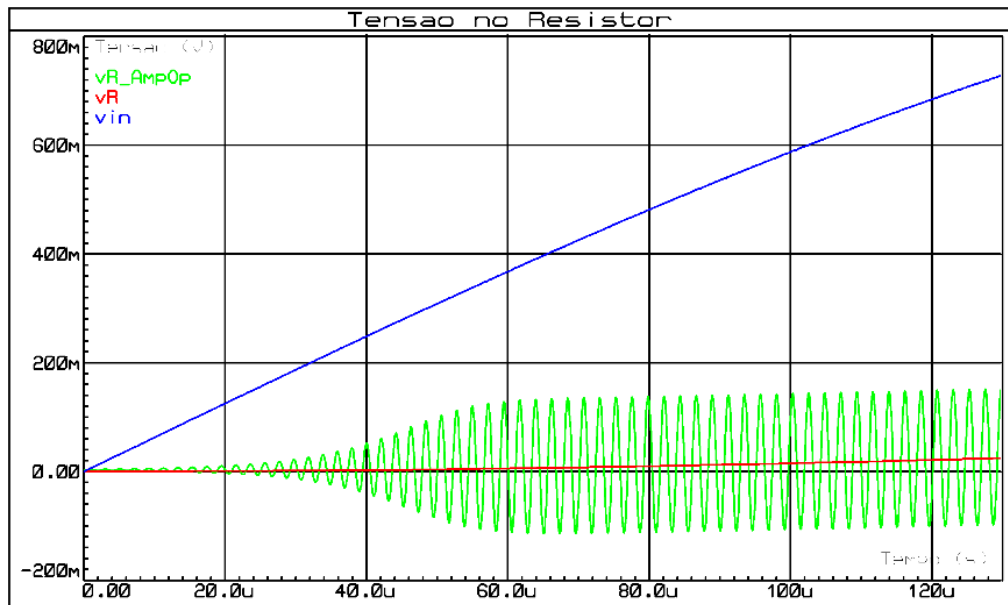
3.2.3 Circuito Proposto

Com exceção do caso da indutância de $20\mu\text{H}$ (Figura A-63), todos os resultados apresentados seguem a resposta desejada. Entretanto, assim como no regime

Figura 9- Análise da resposta do circuito Proposto para $L=2H$ e $f=1kHz$



(a) Tensão no resistor para resposta ao regime permanente no circuito Proposto para: $L=2H$ $f=1kHz$



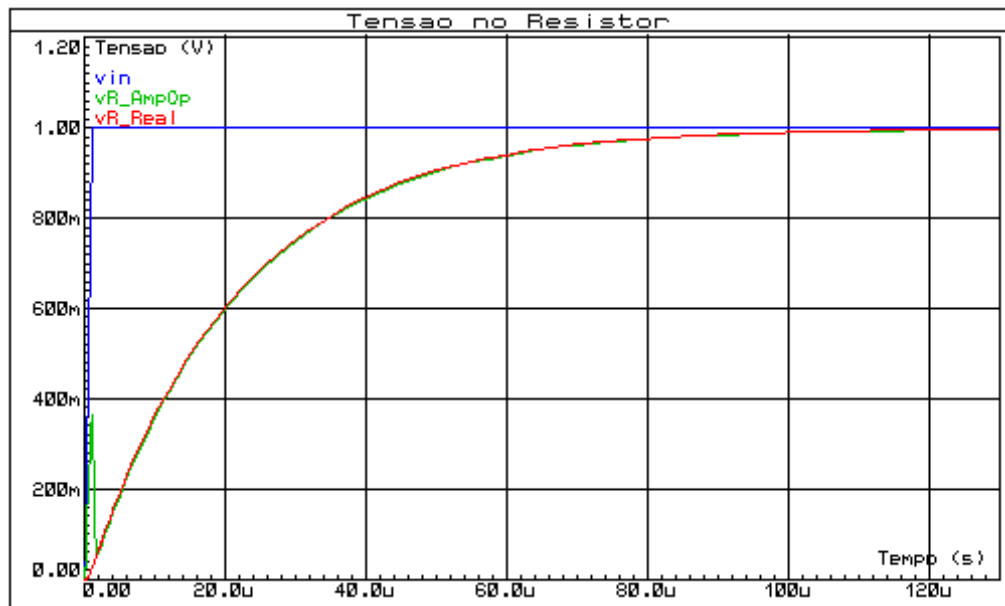
(b) Zoom da curva de Tensão no resistor para resposta ao regime permanente no circuito Proposto para: $L=2H$ $f=1kHz$

Fonte: Autoria própria

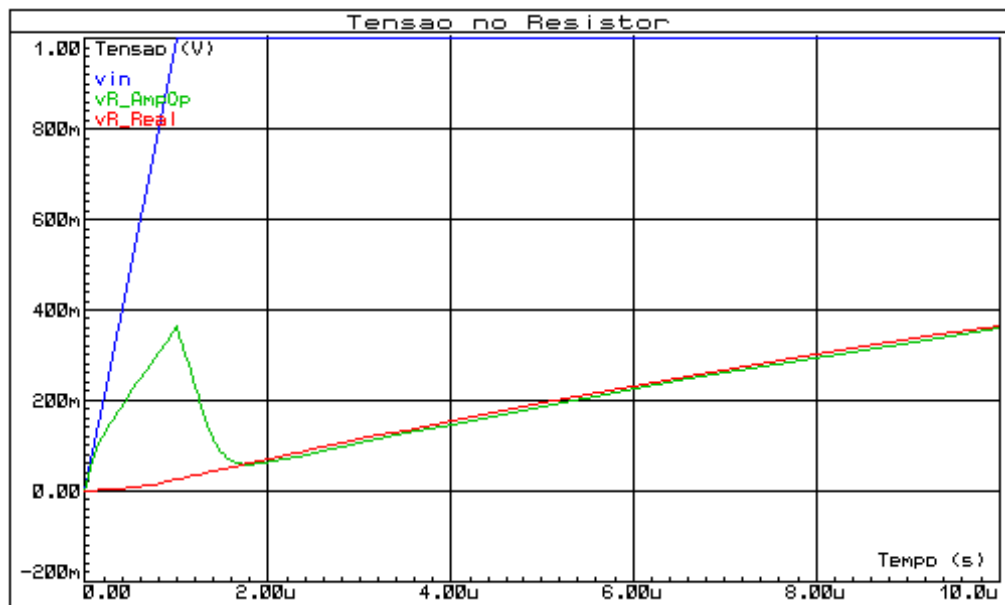
permanente, nota-se uma resposta oscilatória em torno da resposta desejada, como ilustrado na Figura 12.

No decorrer do trabalho observou-se que é possível amenizar as oscilações do circuito proposto adicionando um resistor na saída do terceiro amplificador operacional, antes da realimentação. O valor adotado para o resistor foi escolhido de maneira aleatória. Os resultados podem ser vistos nas figuras 13 a 16.

Figura 10- Análise de tensão em regime transitório do circuito de Berndt para $L=21\text{mH}$



(a) Tensão no resistor para resposta ao regime transitório no circuito de Berndt para: $L=21\text{mH}$

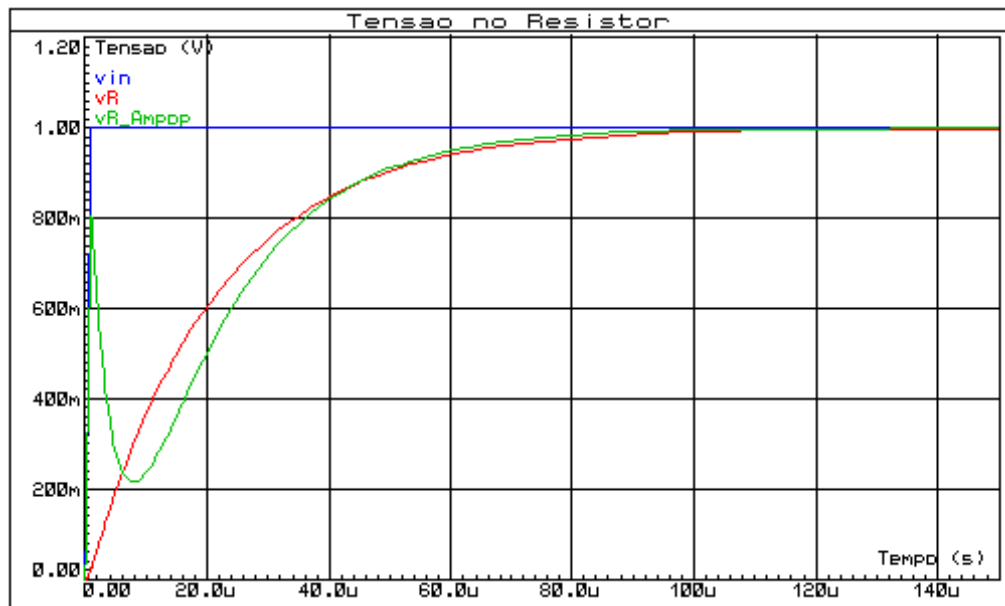


(b) Zoom da curva de Tensão no resistor para resposta ao regime transitório no circuito de Berndt para: $L=21\text{mH}$

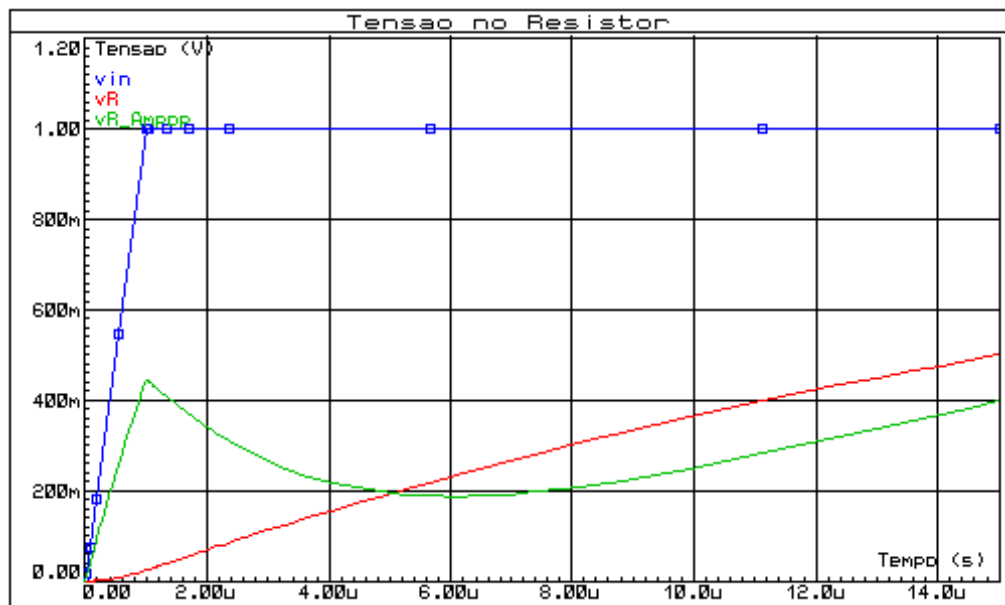
Fonte: Autoria própria

Existe um valor de resistor que melhora a resposta para o regime transitório, como observado. Entretanto, embora as oscilações tenham diminuído, aumentou-se a defasagem entre a resposta obtida e a desejada. Já para o regime permanente, observou-se que, quanto maior o valor do resistor adicionado, menor é a oscilação, como ilustrado nas Figuras 14 e 15. Em uma escala mais aproximada (figura 16), podemos visualizar o comportamento da tensão no resistor do circuito emulado.

Figura 11- Análise de tensão em regime transitório do circuito de Antoniou para $L=21\text{mH}$



(a) Tensão no resistor para resposta ao regime transitório no circuito de Antoniou para: $L=21\text{mH}$

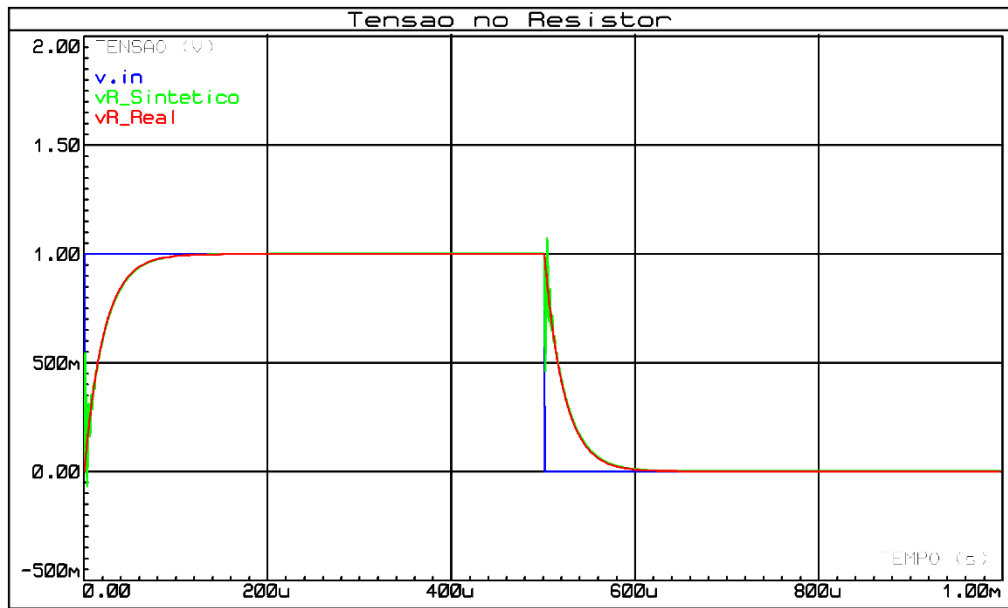


(b) Zoom da curva de Tensão no resistor para resposta ao regime transitório no circuito de Antoniou para: $L=21\text{mH}$

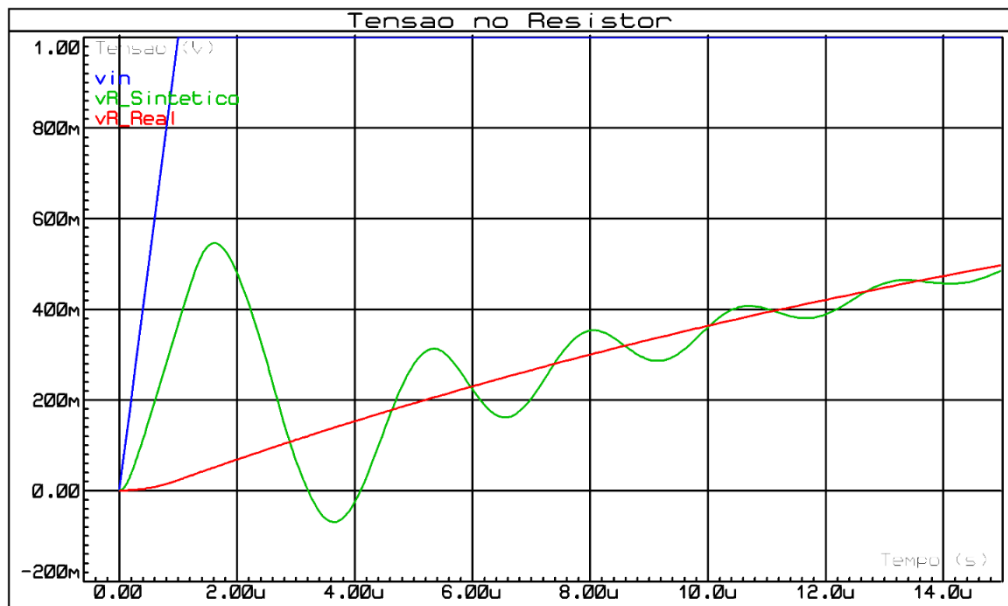
Fonte: Autoria própria

Os resultados das simulações foram satisfatórios. Todos os circuitos analisados alcançaram um alto nível de eficiência. Este fato tem grande importância, pois comprova as teorias dos circuitos vistos na literatura, e também nos permite prosseguir com os estudos do circuito proposto.

Figura 12- Análise de tensão em regime transitório do circuito Proposto para $L=21\text{mH}$



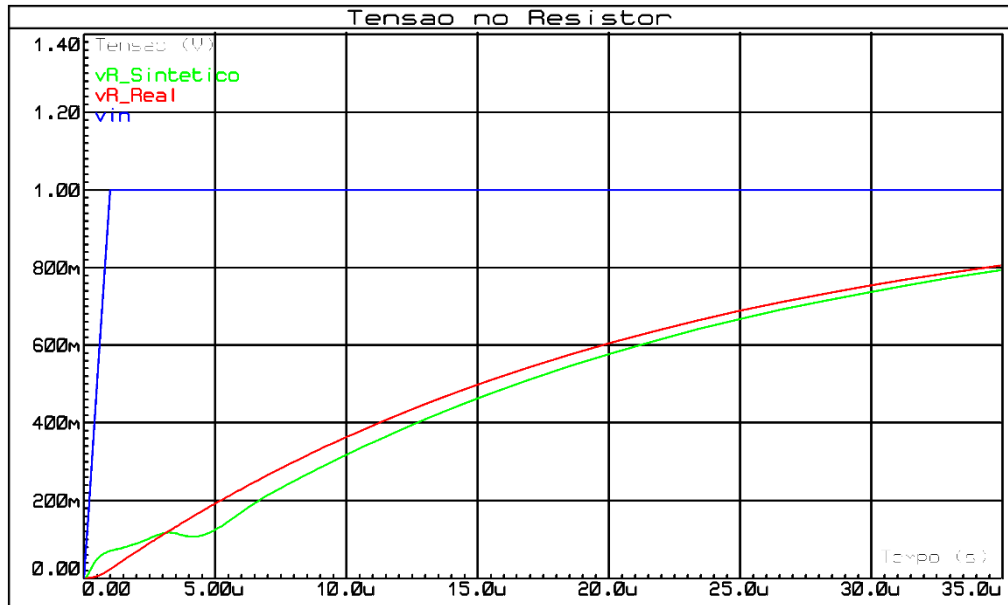
(a) Tensão no resistor para resposta ao regime transitório no circuito Proposto para: $L=21\text{mH}$



(b) Zoom da curva de Tensão no resistor para resposta ao regime transitório no circuito Proposto para: $L=21\text{mH}$

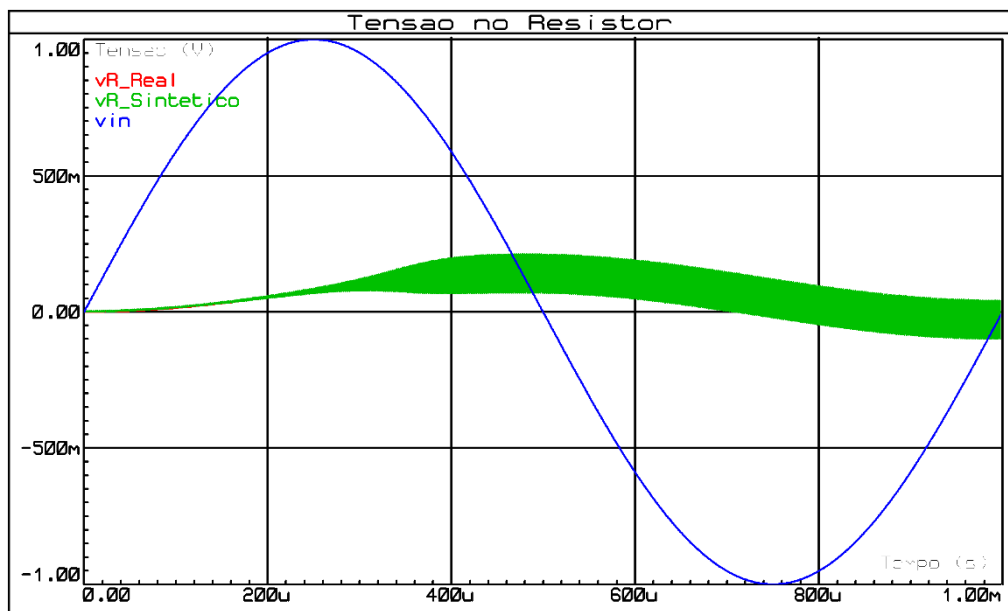
Fonte: Autoria própria

Figura 13- Tensão no resistor para resposta ao regime transitório no circuito Proposto para: R adicionado = 200Ω L= 21mH



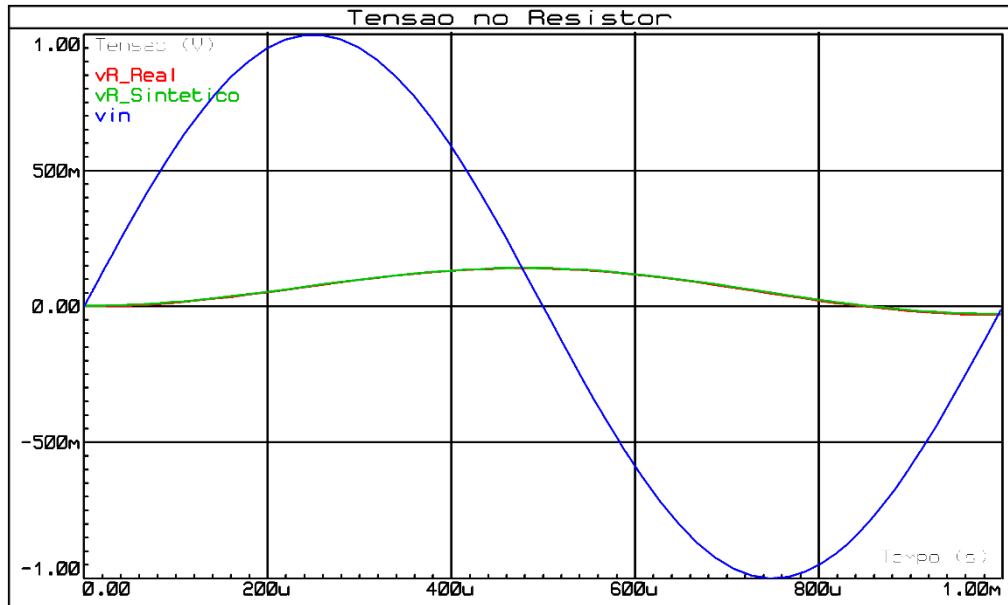
Fonte: Autoria própria

Figura 14- Tensão no resistor para resposta ao regime permanente no circuito Proposto para: R adicionado = $1\text{k}\Omega$ L= 2H e $f=1\text{kHz}$



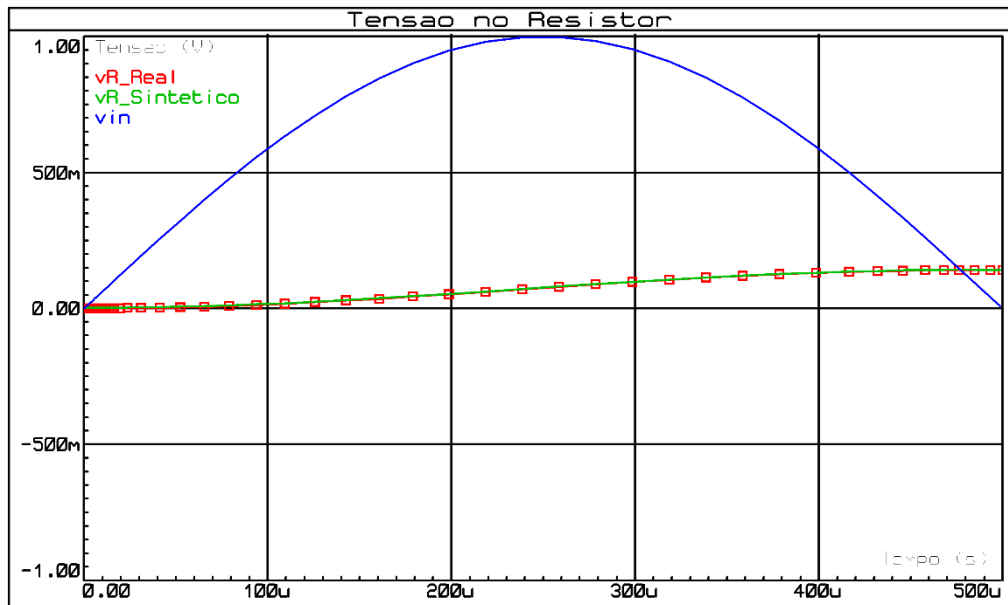
Fonte: Autoria própria

Figura 15- Tensão no resistor para resposta ao regime permanente no circuito Proposto para: R adicionado = 100kΩ L=2H e f= 1kHz



Fonte: Autoria própria

Figura 16: Zoom para figura 15



Fonte: Autoria própria

4. COMPROVAÇÃO PRÁTICA DAS SIMULAÇÕES

A parte experimental do trabalho foi desenvolvida no laboratório G-104 do Departamento de Engenharia Elétrica da UTFPR-CP. Montou-se os circuitos emuladores de indutância, e o circuito RL no *protoboard* para que fossem feitas as devidas medições. Nas atividades realizadas, foram utilizados apenas materiais disponibilizados pela UTFPR-CP, e estas são ilustradas nas figuras 17 a 21.

Foram utilizados os seguintes materiais:

- *Protoboard*;
- Resistores;
- Capacitor de 220nF;
- Osciloscópio;
- Indutor de 21mH
- Gerador de Sinais;
- Amplificadores Operacionais 741;
- Fonte de alimentação.

Por dispor-se apenas da indutância real de 21mH, consideraram-se somente os circuitos utilizando/emulando este valor de indutor.

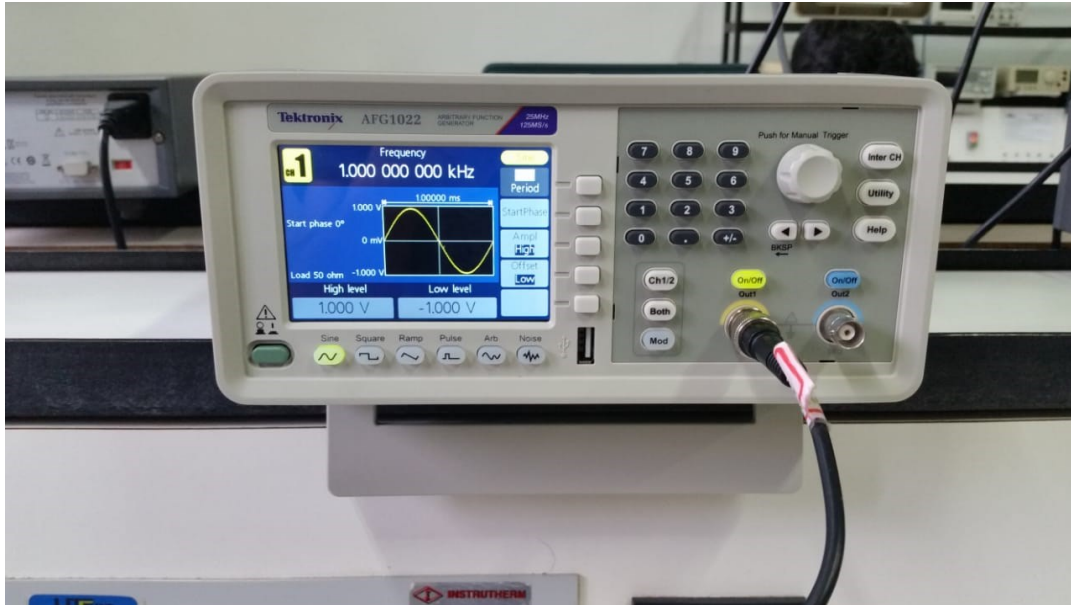
Figura 17- Fonte de alimentação CC



Fonte: Autoria própria

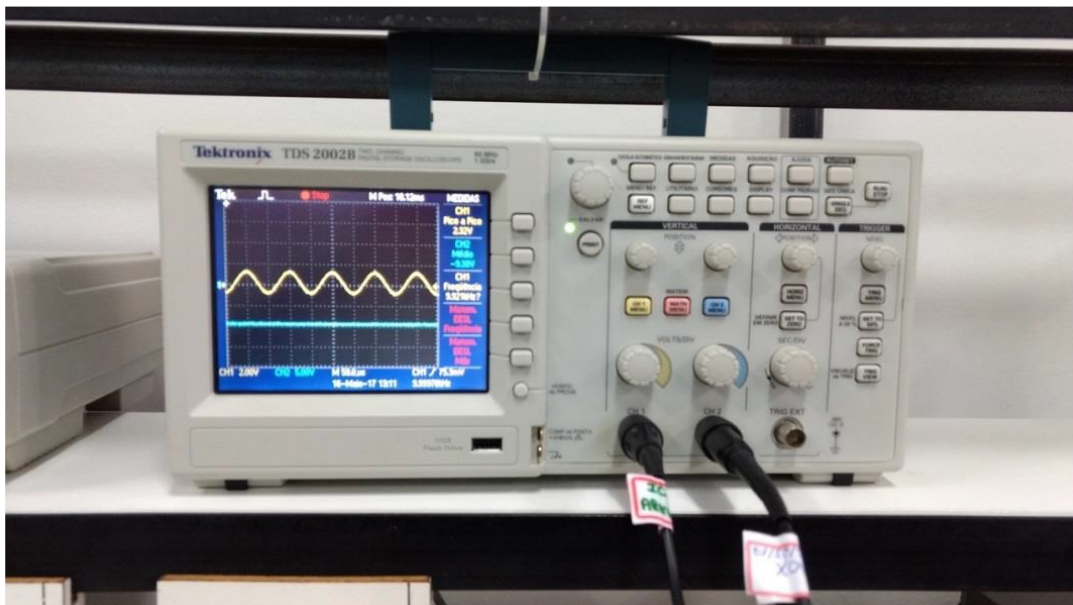
Os resultados foram salvos e coletados pelo próprio sistema do osciloscópio. A análise tem importância na identificação de limitações reais dos circuitos, ou até mesmo para selecionar melhor qual circuito utilizar em determinada situação.

Figura 18- Gerador de sinais



Fonte: Autoria própria

Figura 19- Osciloscópio



Fonte: Autoria própria

Os resultados do circuito de Berndt, vistos nas figuras 22 a 25, tiveram alta compatibilidade entre o circuito real e o emulado para as frequências de 10Hz e 1kHz. Embora foi o circuito que apresentou melhor concordância entre os resultados nas simulações, na prática, tanto para a frequência de 10kHz como para a resposta ao degrau, os resultados apresentaram diferenças significativas.

Figura 20- Indutor utilizado com $L = 21\text{mH}$



Fonte: Autoria própria

Figura 21- Visão geral da bancada com os 3 circuitos montados

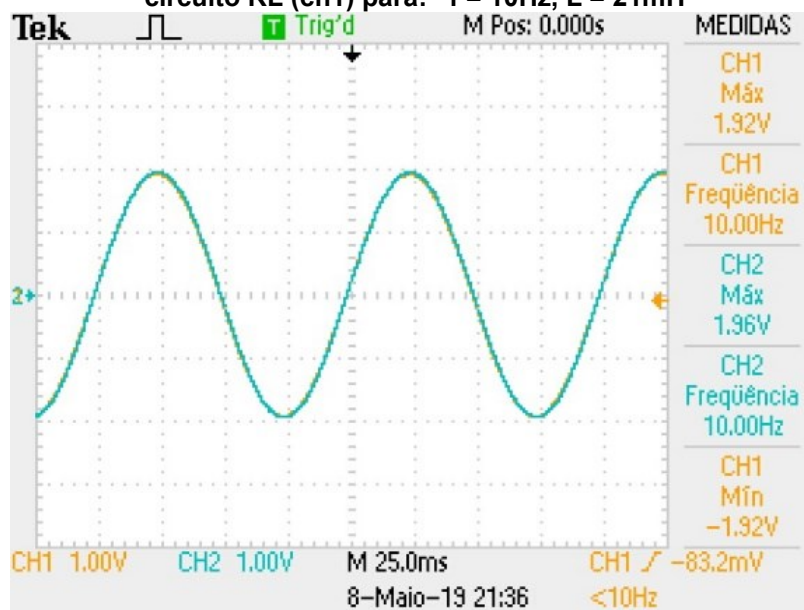


Fonte: Autoria própria

Em algumas literaturas o circuito de Berndt é classificado como um circuito com limitações, uma das causas foi descrita em um artigo (D.S. JAYALALITHA, 2013), atribuindo essas limitações aos amplificadores operacionais. O ganho dos amplificadores

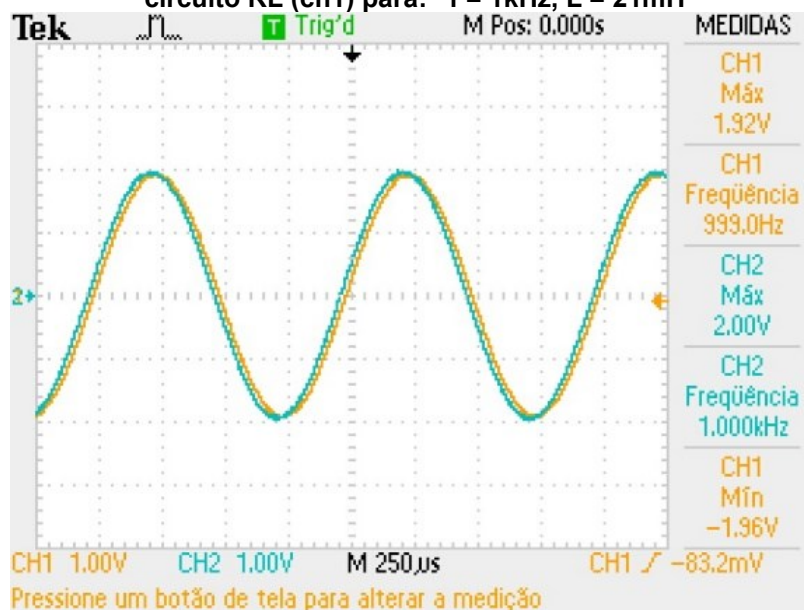
operacionais tem variações relacionadas a frequência e temperatura. Portanto, este tipo de circuito, não pode ser utilizado para a ampla gama de frequências.

Figura 22: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt (ch2) e circuito RL (ch1) para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 21\text{mH}$



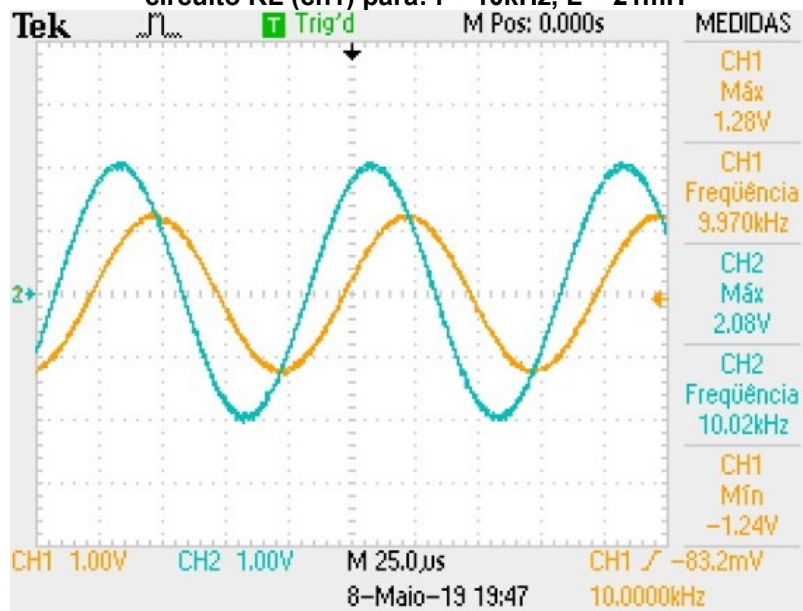
Fonte: Autoria própria

Figura 23: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt (ch2) e circuito RL (ch1) para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$



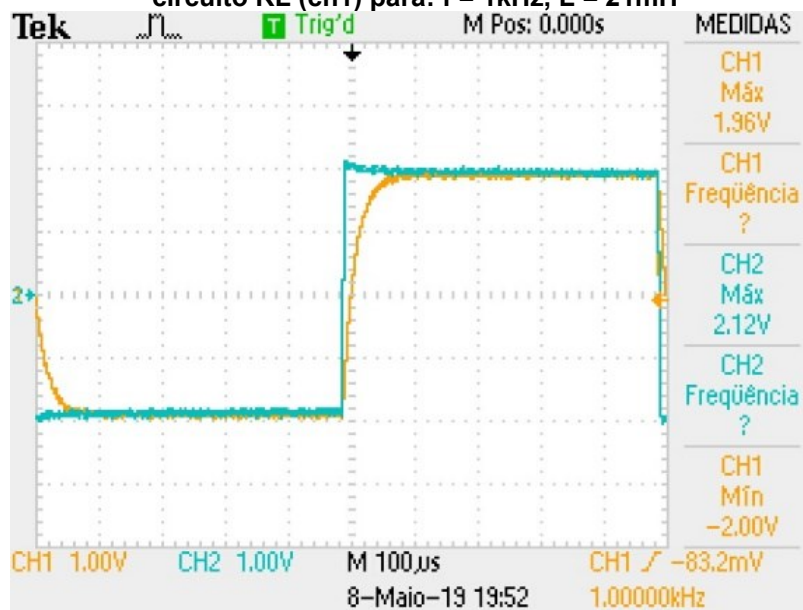
Fonte: Autoria própria

Figura 24: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt (ch2) e circuito RL (ch1) para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$



Fonte: Autoria própria

Figura 25: Tensão no resistor para resposta em regime transitório no circuito de Berndt (ch2) e circuito RL (ch1) para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$

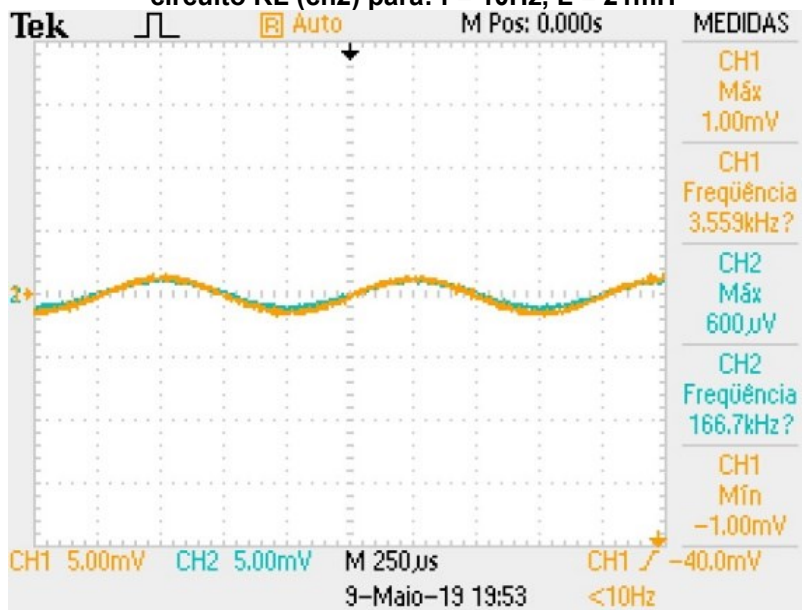


Fonte: Autoria própria

Os resultados do circuito de Antoniou, ilustrados nas figuras 26 a 29, tem formas de onda diferentes dos demais, devido aos dados colhidos, que são de tensão no indutor e não no resistor. Há uma grande concordância da resposta prática com a resposta simulada, tendo bons resultados para a indutância emulada para baixas frequências (10Hz e 1kHz). Na frequência de 1kHz observa-se um ruído que, a princípio, não se pode concluir se é proveniente do circuito ou mesmo da montagem em protoboard e dos

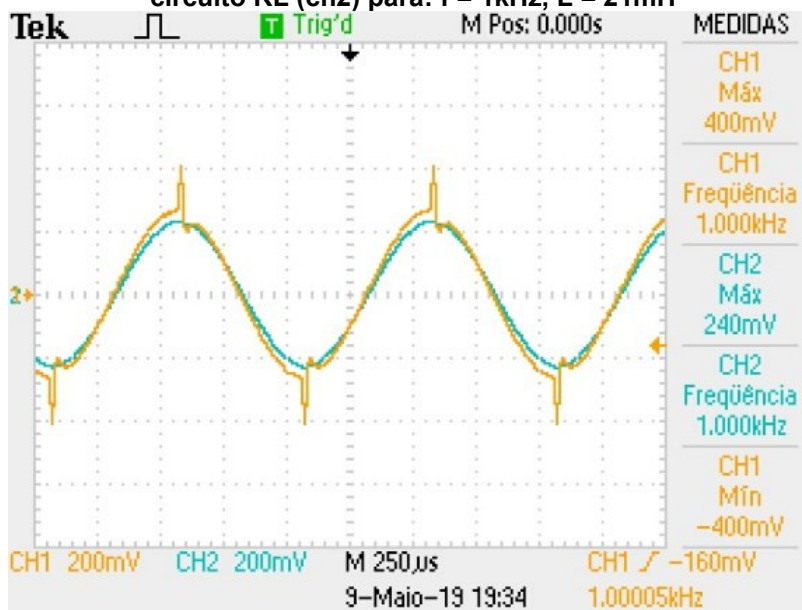
equipamentos utilizados. Embora o resultado para 10kHz seja diferente entre o circuito real e o emulado, o resultado obtido é muito semelhante ao observado na simulação (Figura 6). Também, apesar de na simulação a resposta transitória do circuito emulado ser distinta do caso ideal, na prática apresenta-se grande concordância entre os casos emulado e real.

Figura 26: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniou (ch1) e circuito RL (ch2) para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 21\text{mH}$



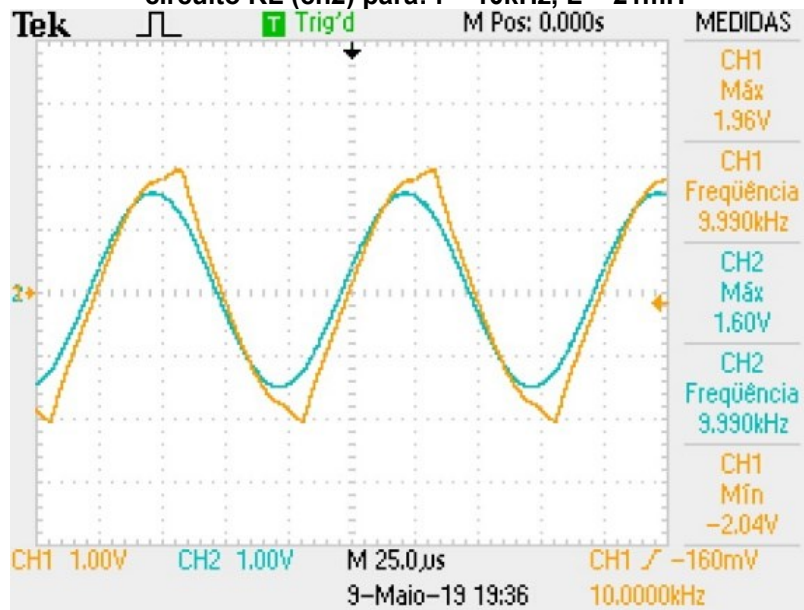
Fonte: Autoria própria

Figura 27: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniou (ch1) e circuito RL (ch2) para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$



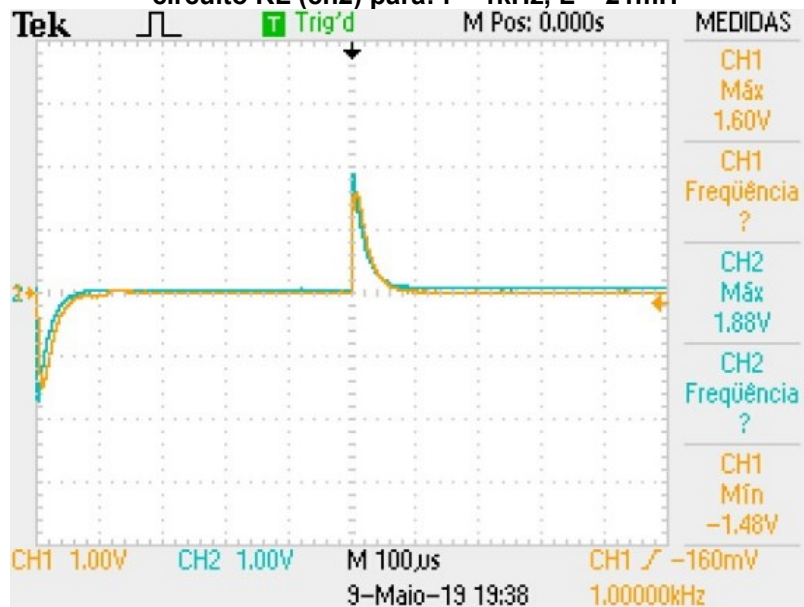
Fonte: Autoria própria

Figura 28: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniou (ch1) e circuito RL (ch2) para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$



Fonte: Autoria própria

Figura 29: Tensão no indutor para resposta em regime transitório no circuito de Antoniou (ch1) e circuito RL (ch2) para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$

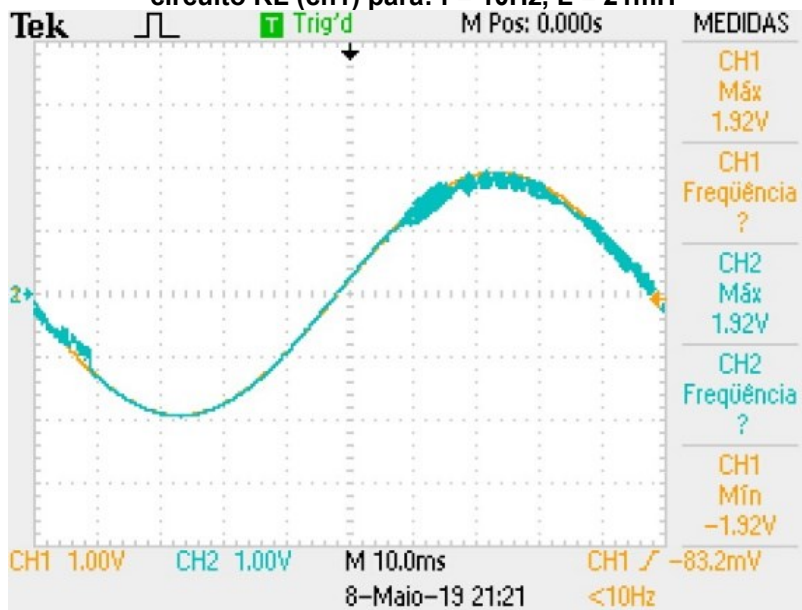


Fonte: Autoria própria

O circuito proposto obteve bons resultados, como pode ser observado nas Figuras 30 a 33, aproximando-se com notoriedade da curva do circuito RL real. Porém, como já observado nas simulações, a resposta do circuito emulador apresenta oscilações em torno da resposta desejada. Todavia, como discutido no final do capítulo 3, as oscilações

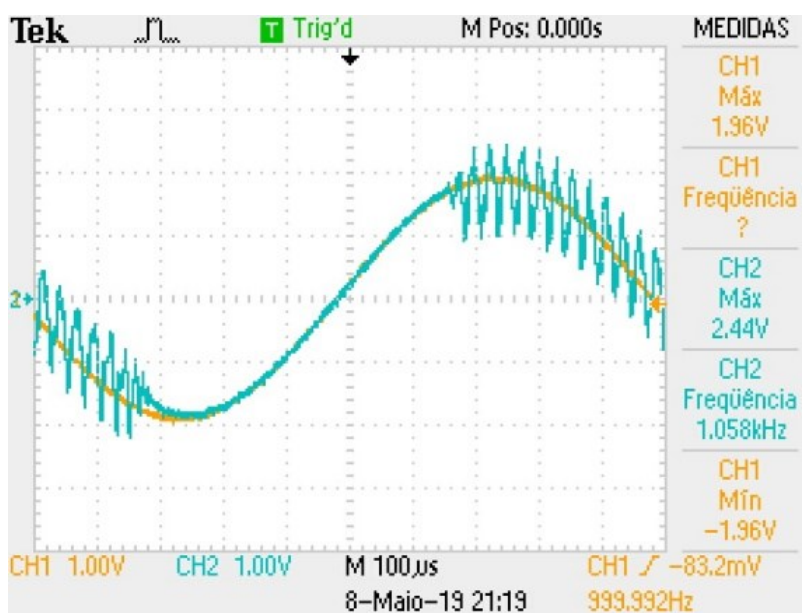
podem ser reduzidas com a utilização de uma resistência adicional no circuito. Como o objetivo deste trabalho não é analisar a redução das oscilações (justificativa e dimensionamento da resistência) entende-se que o circuito proposto tem potencial para emulação do circuito RL e, a partir de um trabalho considerando-se esta resistência, pode-se comparar melhor o resultado deste com os demais circuitos propostos na literatura.

Figura 30: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito Proposto (ch2) e circuito RL (ch1) para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 21\text{mH}$



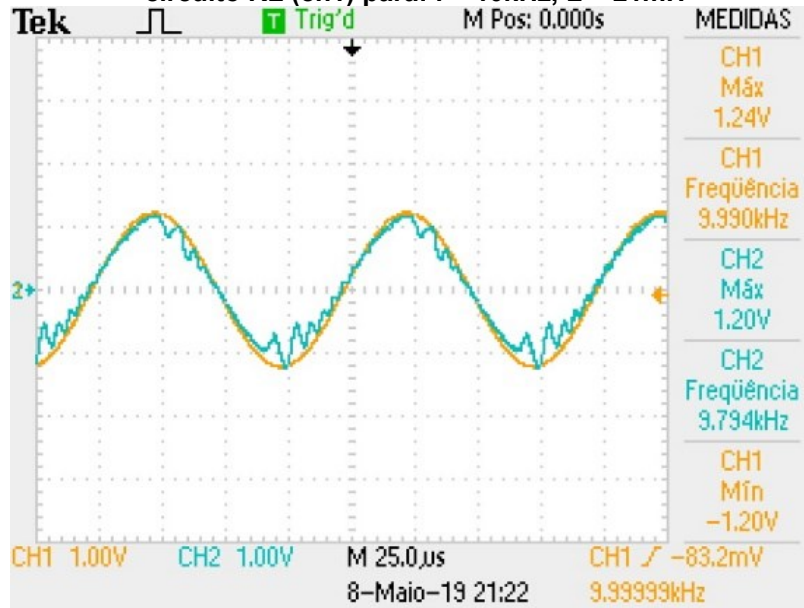
Fonte: Autoria própria

Figura 31: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito Proposto (ch2) e circuito RL (ch1) para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$



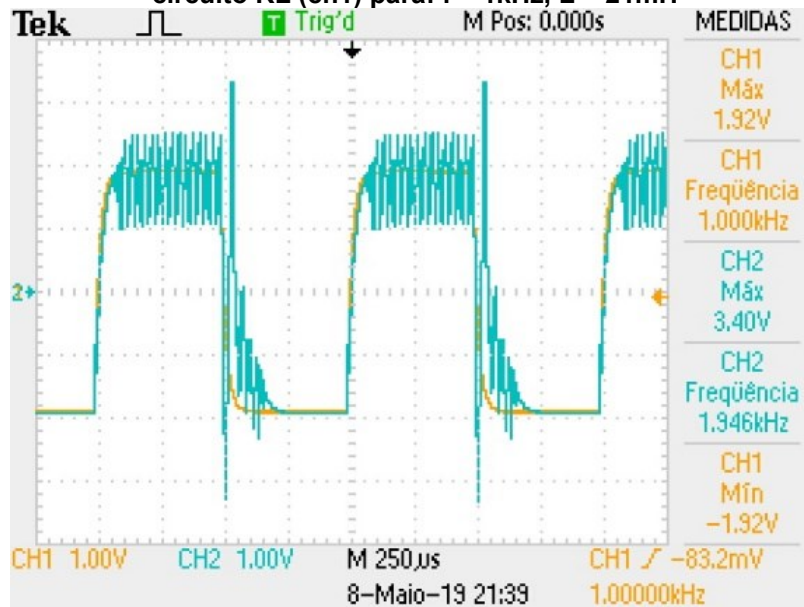
Fonte: Autoria própria

Figura 32: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito Proposto (ch2) e circuito RL (ch1) para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$



Fonte: Autoria própria

Figura 33: Tensão no resistor para resposta em regime transitório no circuito Proposto (ch2) e circuito RL (ch1) para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$



Fonte: Autoria própria

5.CONCLUSÃO

O trabalho propôs o projeto de um circuito alternativo que emule um circuito RL, com uma indutância sintetizada através de circuitos eletrônicos utilizando resistores, capacitores e amplificadores operacionais. Sendo assim, foram estudados diversos circuitos na literatura que possibilitam a substituição de um indutor físico por um sintético. O destaque de dois circuitos possibilitou o equacionamento no capítulo 2, simulados no capítulo 3 e experimentados no capítulo 4.

Os resultados de todos estes processos comprovam a teoria, e assim, com base nos resultados simulados e experimentais, é possível afirmar que para respostas em regime permanente, um circuito RL pode ser substituído pelo circuito de Berndt com frequências limitadas, inferiores a 10kHz. Embora com resultados inferiores na simulação, na prática o circuito de Antoniou tem desempenho equivalente ao de Berndt, sendo limitado a frequências elevadas. Entretanto, apresenta melhor comportamento no regime transitório, isto é, mais próximo do circuito RL real, do que o circuito de Berndt.

O circuito proposto obteve oscilações na resposta, em torno da resposta desejada, tanto na simulação quanto na prática. Apesar da oscilação, o circuito proposto teve ótimas respostas, tanto para regime permanente quanto ao regime transitório. Se não existissem as oscilações, provavelmente poderia ser considerado o mais indicado para substituição do circuito RL.

Durante o processo de análise, entendimento e simulação, percebeu-se que as oscilações podem ser minimizadas com a adição de um resistor na saída do último amp op do circuito proposto. Entretanto, entende-se que a análise dessa redução de oscilação, assim como dimensionamento da resistência é tema para outro trabalho e fica como sugestão para trabalhos futuro.

Comparando-se com os três circuitos, o circuito de Berndt utiliza apenas um amp op, o de Antoniou dois e o circuito proposto três. Entretanto, este tem a vantagem de possibilitar o acesso às tensões sobre o resistor e o indutor simultaneamente.

Destacam-se como contribuições deste trabalho a análise teórica com o equacionamento dos circuitos RL e dos circuitos que emulam um circuito RL e a comprovação da possibilidade de se emular um circuito RL sem utilização do indutor, permitindo inclusive valores elevados de indutância, que poderão somar em disciplinas de análise de circuitos RL, assim como disciplinas que utilizam circuito RL como exemplo de aplicação do conceito em si.

Além das contribuições do trabalho na área de conhecimento do mesmo, atingindo os objetivos e gerando conhecimentos e resultados positivos durante seu desenvolvimento, este trabalho possui grande importância na formação do aluno, uma vez que foram aplicados conceitos vistos no curso de Engenharia de Controle e Automação, como em circuitos elétricos 1 e 2, na aplicação das leis de Ohm e Kirchhoff, análise de transitório e regime permanente de circuitos RL, eletrônica com utilização de amplificadores operacionais, cujo tema é de interesse para disciplinas seguintes, como controle 1 e 2, por exemplo na análise e síntese de controladores para sistemas de primeira ordem, emulação de indutância para desenvolvimento de sistemas de primeira e segunda ordens; assim como a interação com diversas ferramentas, como Proteus. Proporcionou também maior familiaridade com a prática, montando circuitos e empregando os equipamentos de medição.

6. REFERÊNCIAS

ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O. **FUNDAMENTOS DE CIRCUITOS ELÉTRICOS**. 5ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2013

ANTONIOU, A., "Gyrators Using Operational Amplifiers," *Electronics Letters*, V. 3, No. 8, pp. 350-353, August 1967.

ANTONIOU, A., "New Gyrator Circuits Obtained by Using Nullors," *Electronic Letters*, V. 4, No. 5, March 1968.

BERNDT, D. F.; Dutta Roy, S. C. (1969), "Inductor simulation with a single unity gain amplifier", *IEEE Journal of Solid State Circuits*, SC-4: 161-162

BRUGLER, J. S., "RC Synthesis with Differential-Input Operational Amplifiers," in "Papers on Integrated Circuit Synthesis," compiled by Newcomb, R. W., and Rao, T. N., Stanford University, Stanford, California, Technical Report 6560-4, pp. 116-130, June 1966.

DEBOO, G. J., "Application of a Gyrator-Type Circuit to Realize Ungrounded Inductors," *IEEE Trans. Circuit Theory*, V. CT-14, No. 1, pp. 101-102, March 1967.

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. **SISTEMAS DE CONTROLE MODERNOS**. 12ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013

DORF, Richard C.; SVOBODA, James A. **INTRODUÇÃO AOS CIRCUITOS ELÉTRICOS**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003

FINOCCHIO, M. A. F.; FRANÇA, J. A. Modelo Térmico Para Transformadores a Seco e Previsão da Temperatura de Topo In: VI ENDITEC - Encontro Nacional de Difusão

Tecnológica, Medianeira – Paraná, 2009.

FITZGERALD, A. E.; UMANS, Stephen D.; KINGSLEY Jr, Charles. MÁQUINAS ELÉTRICAS – COM INTRODUÇÃO À ELETRÔNICA DE POTÊNCIA. 6ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2006

HAWLEY, I. H., "A Gyrator Realization Using Operational Amplifiers," in "Papers on Integrated Circuit Synthesis," compiled by Newcomb, R. W. , and Rao, T. N. , Stanford University, Stanford, California , Technical Report 6560-4, pp. 61-92, June 1966.

HUELSMAN, L. P., Theory and Design of Active RC Circuits , pp. 176-177, McGraw-Hill, 1968.

KULESZ, James John. A STUDY OF GYRATOR CIRCUITS. 1969. 95f. Thesis (Master Of Science In Electrical Engineering) - Naval Postgraduate School, 2014.

MORSE, A. S. and HUELSMAN, L. P., "A Gyrator Realization Using Operational Amplifiers," IEEE Trans. Circuit Theory, V. CT-11, No. 2, pp. 277-278, June 1964.

NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A. Circuitos Elétricos. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

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

PRESCOTT, A. J., "Loss-Compensated Active Gyrator Using Differential- Input Operational Amplifiers," Electronics Letters, V. 2, No. 7, pp. 283-284, July 1966.

PROST, D.; ISSAC, F.; VOLPERT, T.; PARMANTIER, J.P.; QUENUM, W. Lightning-Induced Current Simulation Using RL Equivalent Circuit: Application to an Aircraft Subsystem Design. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 55, NO. 2, APRIL 2013

RAMOS, Matheus S. G. Projeto de uma década de indutância sintetizada através de amplificadores operacionais. 2017. 98f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

RIORDAN, R. H. S., "Simulated Inductors Using Differential Amplifiers," *Electronic Letters*, V. 3, No. 2, pp. 50-51, February 1967.

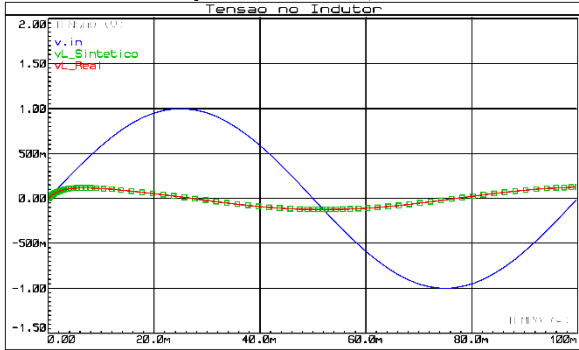
SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C. *Microeletrônica*. 5ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

SUTHERLAND, W. C. The Practical Operational-Amplifier Gyrator Circuit for Inductorless Filter Synthesis. 1976. National Aeronautics and Space Administration - NASA, George C. Marshall Space Flight Center Marshall Space Flight Center, Alabama, 1976.

APÊNDICE A – Imagens das simulações realizadas

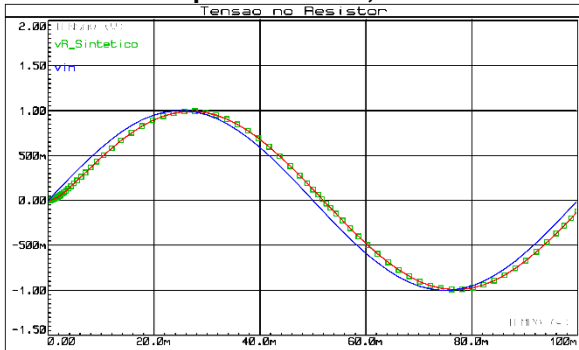
Frequência 10Hz - Indutância 2H

Figura A-1: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt e RL para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 2\text{H}$



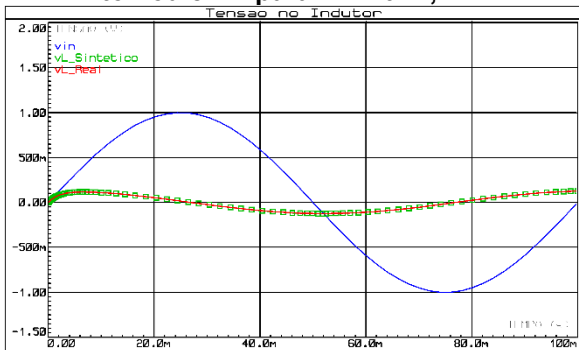
Fonte: Autoria própria

Figura A-2: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt e RL para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 2\text{H}$



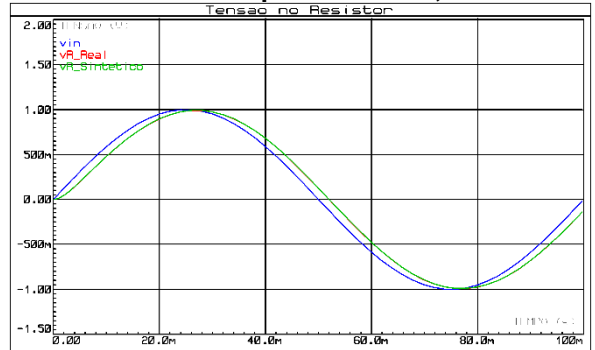
Fonte: Autoria própria

Figura A-3: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniou e RL para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 2\text{H}$



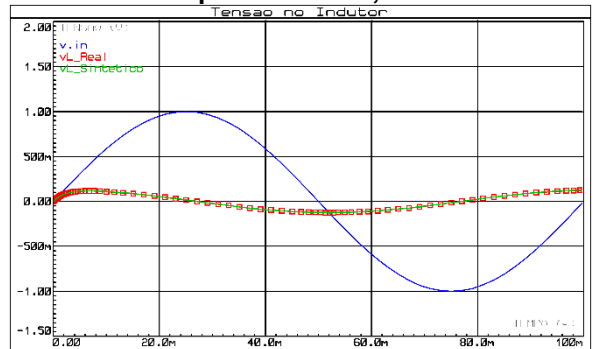
Fonte: Autoria própria

Figura A-4: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniou e RL para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 2\text{H}$



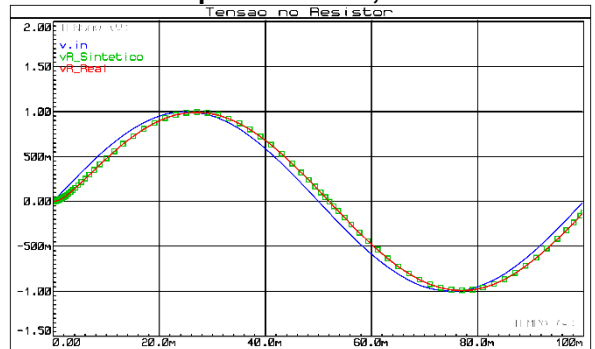
Fonte: Autoria própria

Figura A-5: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito Proposto e RL para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 2\text{H}$



Fonte: Autoria própria

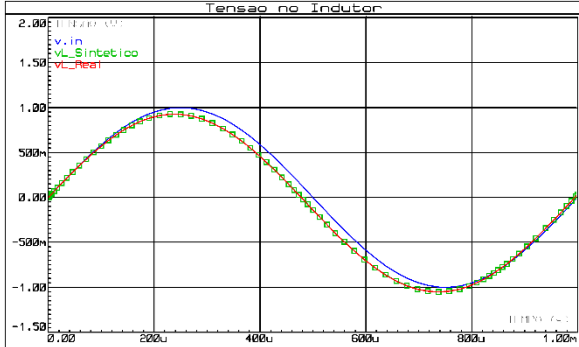
Figura A-6: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito Proposto e RL para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 2\text{H}$



Fonte: Autoria própria

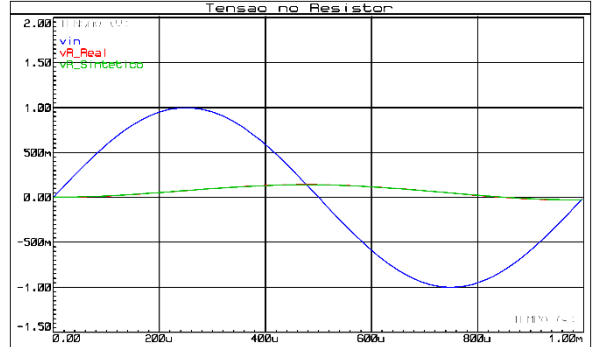
Frequência 1kHz - Indutância 2H

Figura A-7: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt e RL para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 2\text{H}$



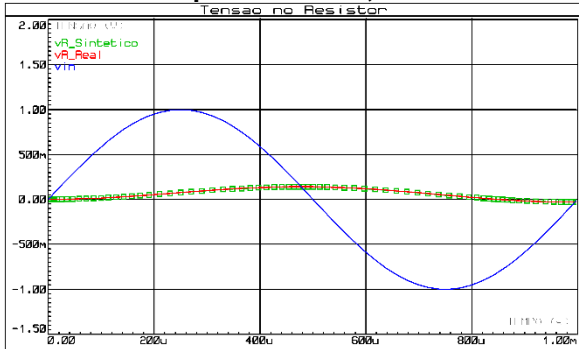
Fonte: Autoria própria

Figura A-10: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniou e RL para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 2\text{H}$



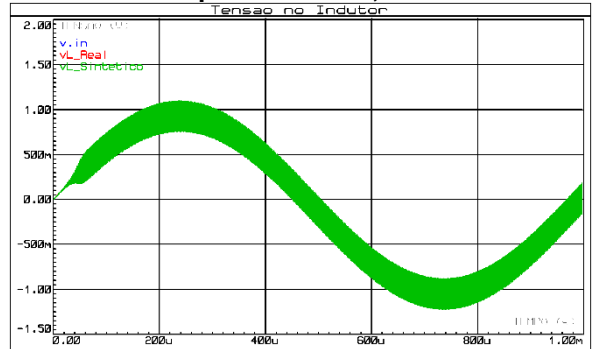
Fonte: Autoria própria

Figura A-8: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt e RL para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 2\text{H}$



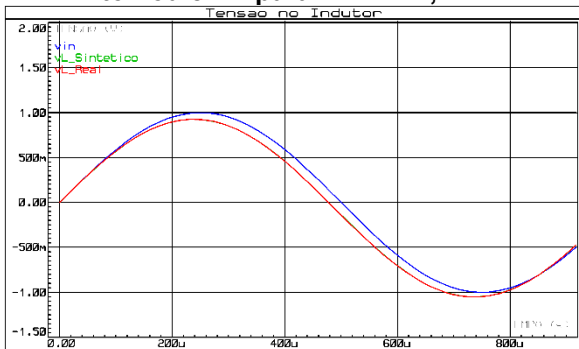
Fonte: Autoria própria

Figura A-11: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito Proposto e RL para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 2\text{H}$



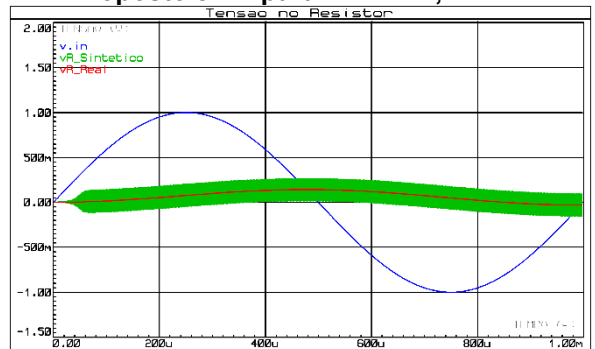
Fonte: Autoria própria

Figura A-9: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniou e RL para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 2\text{H}$



Fonte: Autoria própria

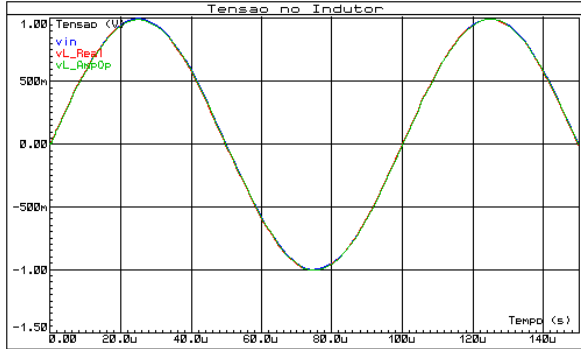
Figura A-12: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito Proposto e RL para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 2\text{H}$



Fonte: Autoria própria

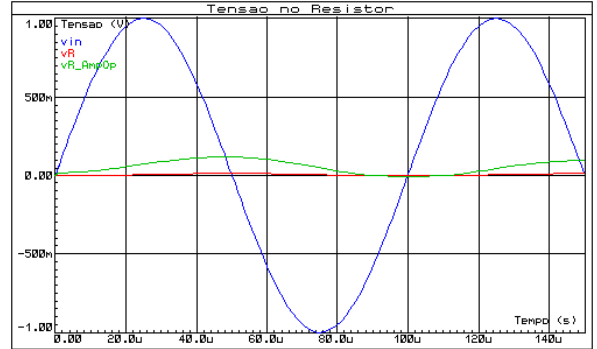
Frequência 10kHz - Indutância 2H

Figura A-13: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt e RL para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 2\text{H}$



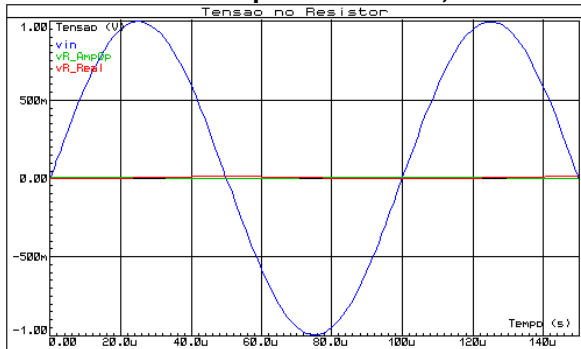
Fonte: Autoria própria

Figura A-16: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniu e RL para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 2\text{H}$



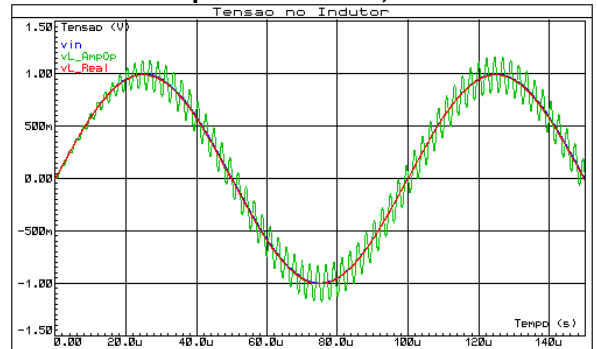
Fonte: Autoria própria

Figura A-14: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt e RL para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 2\text{H}$



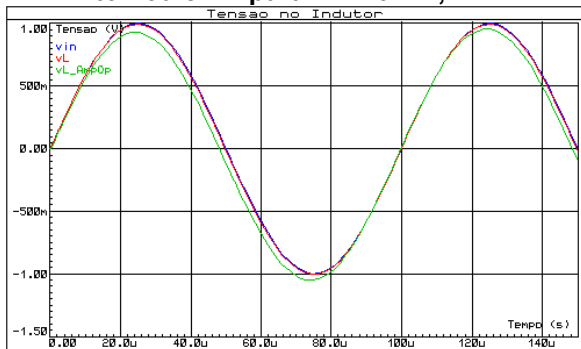
Fonte: Autoria própria

Figura A-17: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito Proposto e RL para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 2\text{H}$



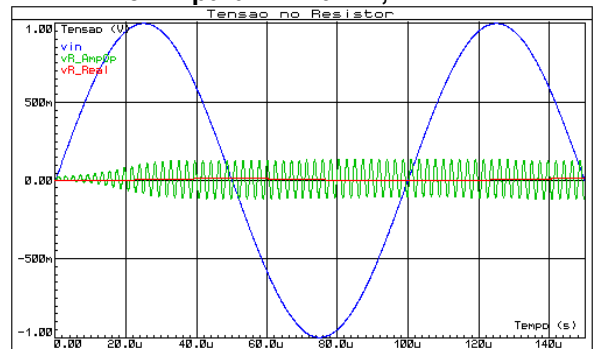
Fonte: Autoria própria

Figura A-15: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniu e RL para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 2\text{H}$



Fonte: Autoria própria

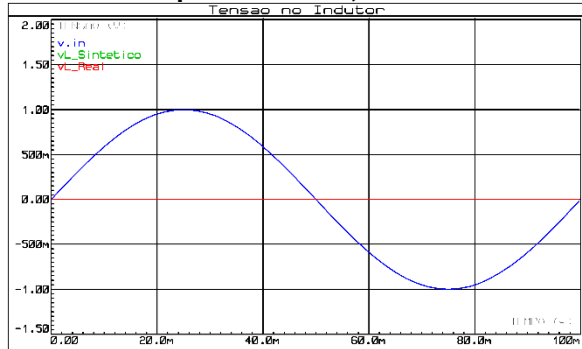
Figura A-18: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no Proposto e RL para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 2\text{H}$



Fonte: Autoria própria

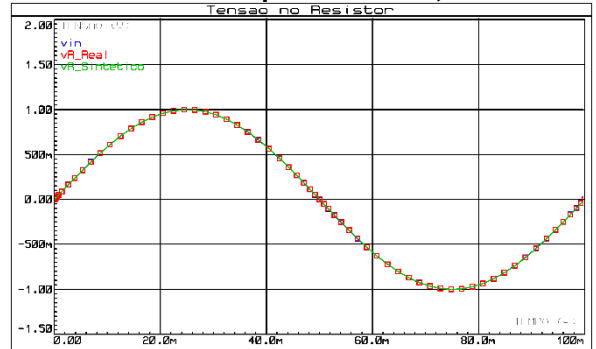
Frequência 10Hz - Indutância 21mH

Figura A-19: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt e RL para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 21\text{mH}$



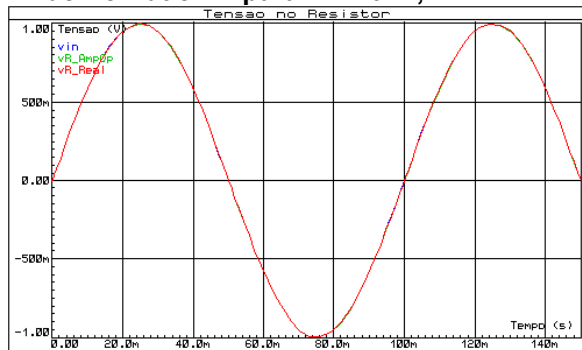
Fonte: Autoria própria

Figura A-22: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniou e RL para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 21\text{mH}$



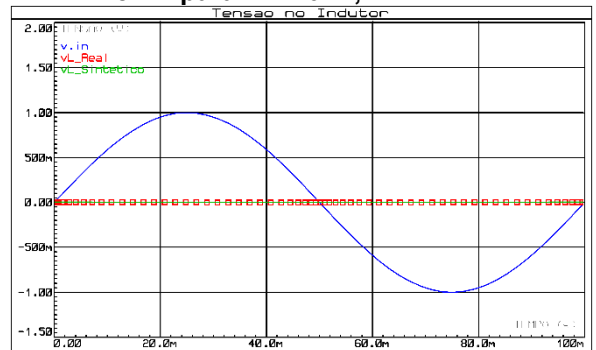
Fonte: Autoria própria

Figura A-20: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt e RL para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 21\text{mH}$



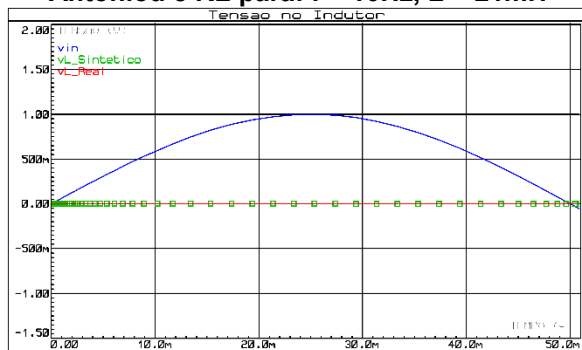
Fonte: Autoria própria

Figura A-23: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito Proposto e RL para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 21\text{mH}$



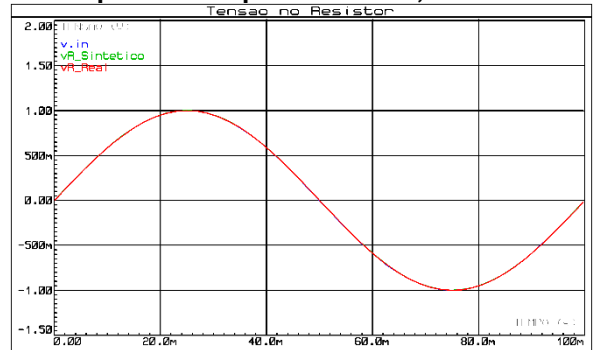
Fonte: Autoria própria

Figura A-21: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniou e RL para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 21\text{mH}$



Fonte: Autoria própria

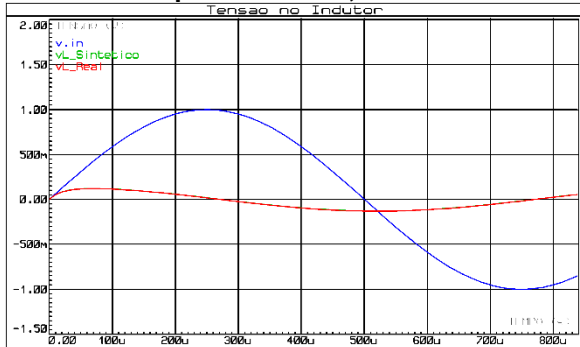
Figura A-24: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito Proposto e RL para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 21\text{mH}$



Fonte: Autoria própria

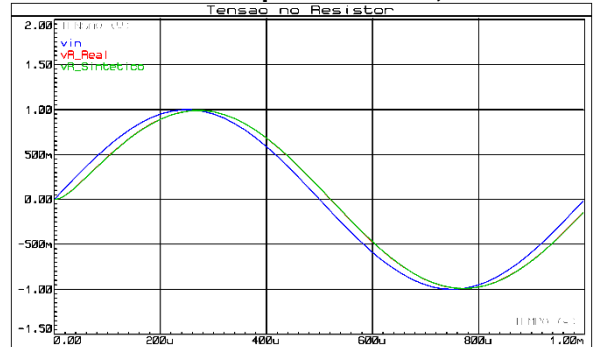
Frequência 1kHz - Indutância 21mH

Figura A-25: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt e RL para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$



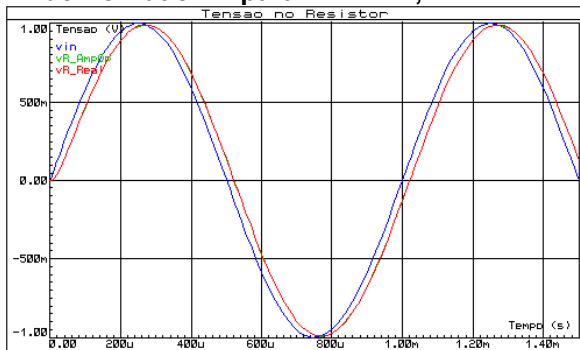
Fonte: Autoria própria

Figura A-28: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniou e RL para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$



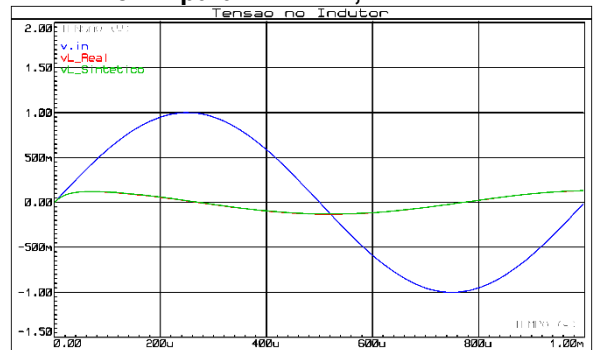
Fonte: Autoria própria

Figura A-26: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt e RL para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$



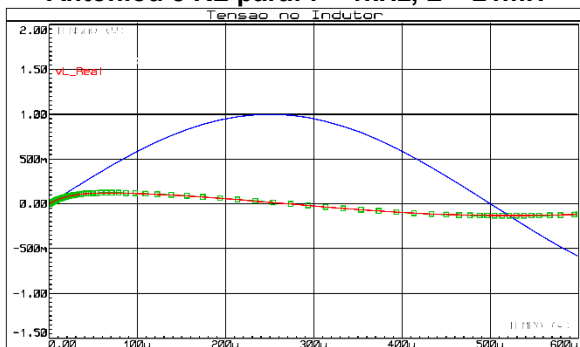
Fonte: Autoria própria

Figura A-29: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito Proposto e RL para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$



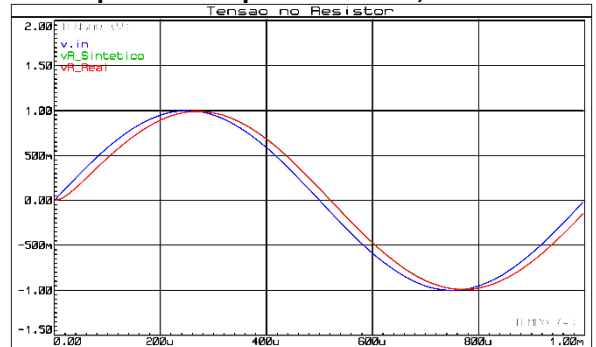
Fonte: Autoria própria

Figura A-27: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniou e RL para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$



Fonte: Autoria própria

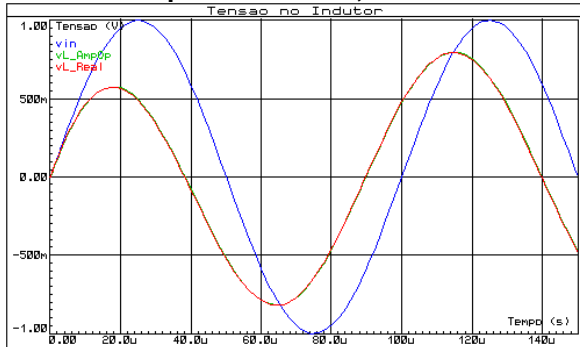
Figura A-30: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito Proposto e RL para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$



Fonte: Autoria própria

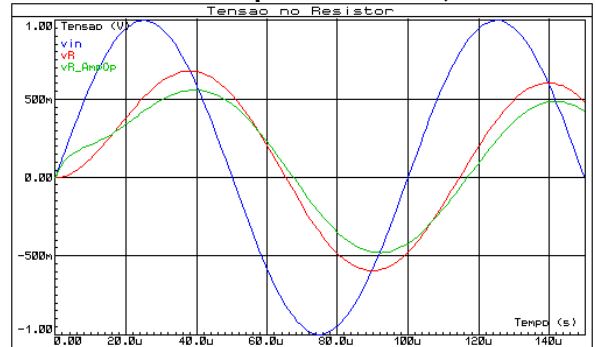
Frequência 10kHz - Indutância 21mH

Figura A-31: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt e RL para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$



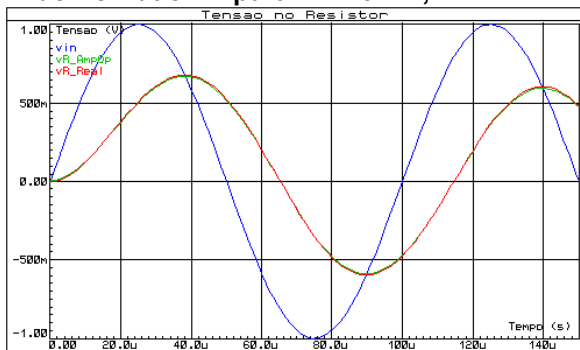
Fonte: Autoria própria

Figura A-34: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniou e RL para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$



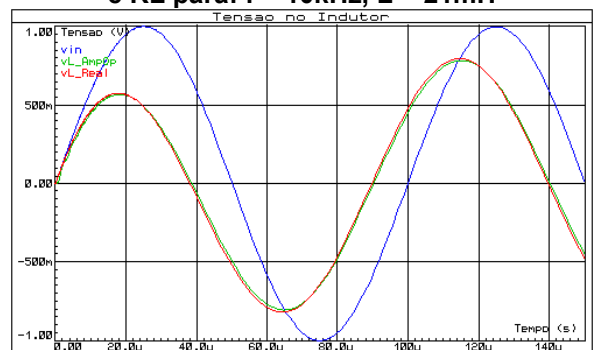
Fonte: Autoria própria

Figura A-32: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt e RL para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$



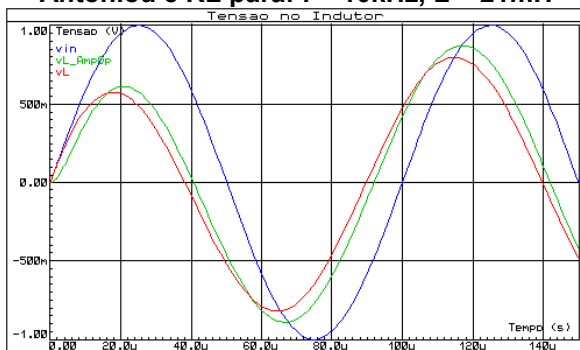
Fonte: Autoria própria

Figura A-35: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito Proposto e RL para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$



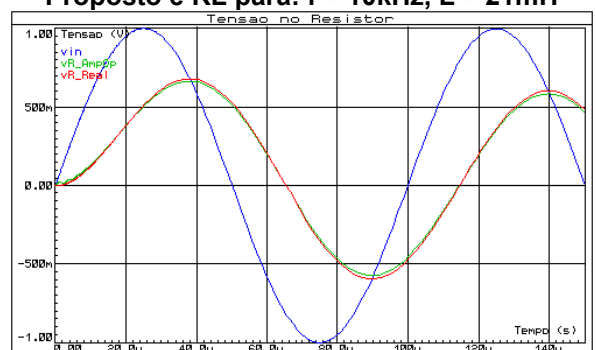
Fonte: Autoria própria

Figura A-33: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniou e RL para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$



Fonte: Autoria própria

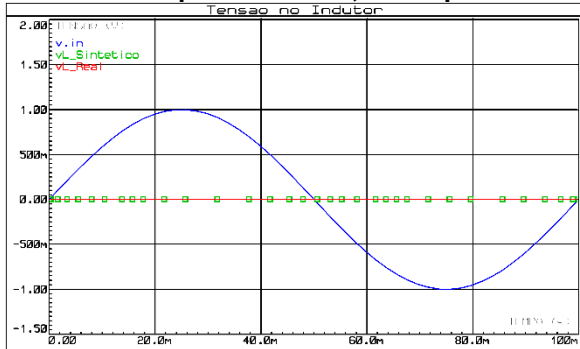
Figura A-36: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito Proposto e RL para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 21\text{mH}$



Fonte: Autoria própria

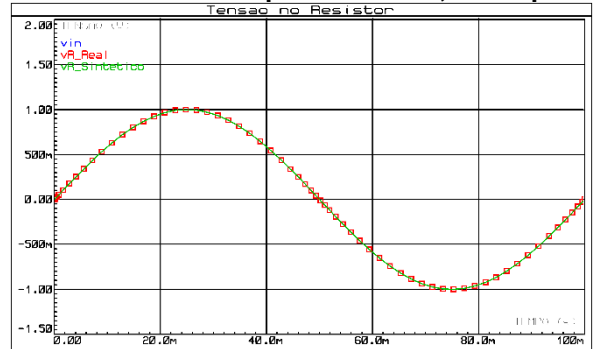
Frequência 10Hz - Indutância 20μH

Figura A-37: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt e RL para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 20\mu\text{H}$



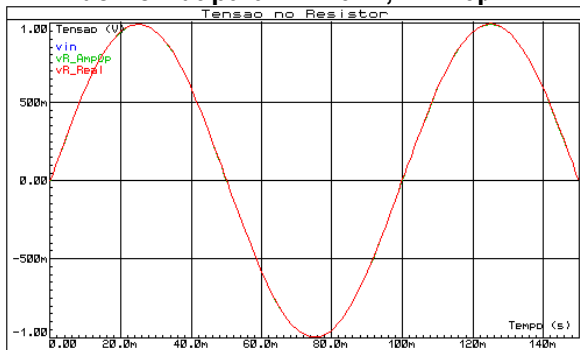
Fonte: Autoria própria

Figura A-40: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniou e RL para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 20\mu\text{H}$



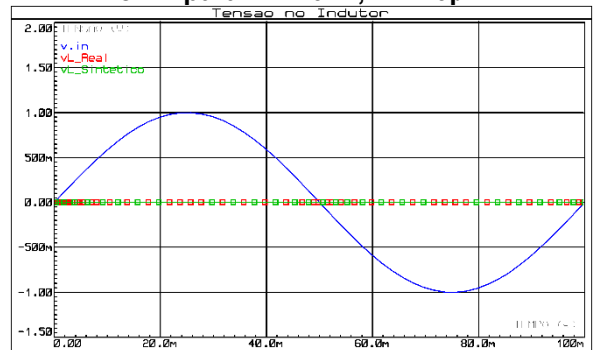
Fonte: Autoria própria

Figura A-38: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 20\mu\text{H}$



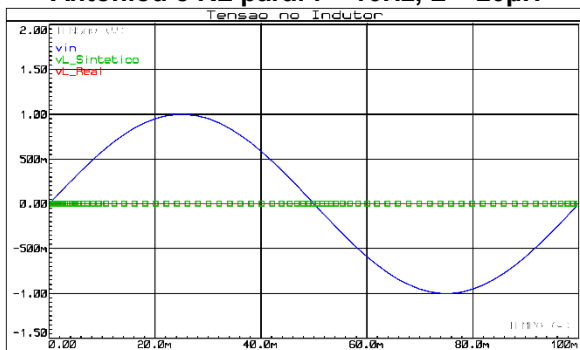
Fonte: Autoria própria

Figura A-41: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito Proposto e RL para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 20\mu\text{H}$



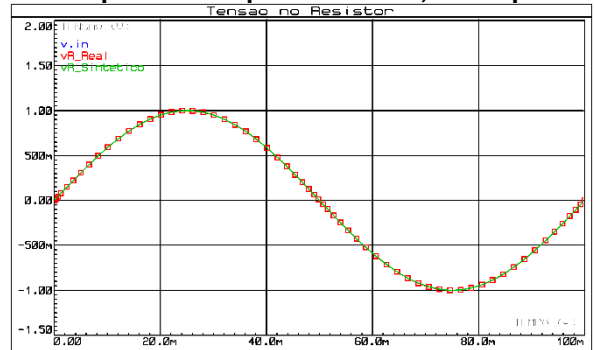
Fonte: Autoria própria

Figura A-39: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniou e RL para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 20\mu\text{H}$



Fonte: Autoria própria

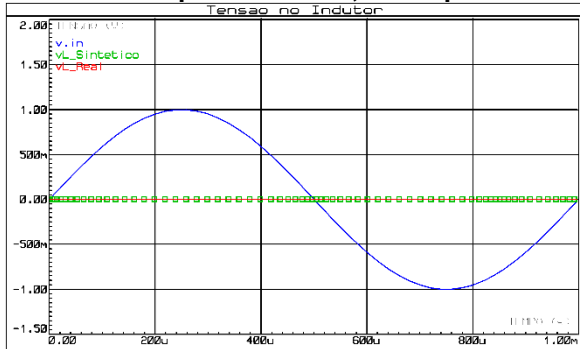
Figura A-42: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito Proposto e RL para: $f = 10\text{Hz}$, $L = 20\mu\text{H}$



Fonte: Autoria própria

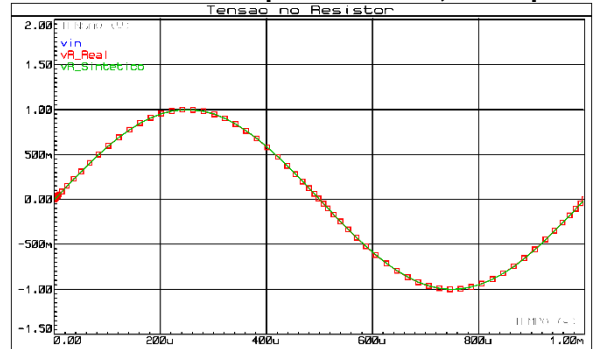
Frequência 1kHz - Indutância 20μH

Figura A-43: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt e RL para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 20\mu\text{H}$



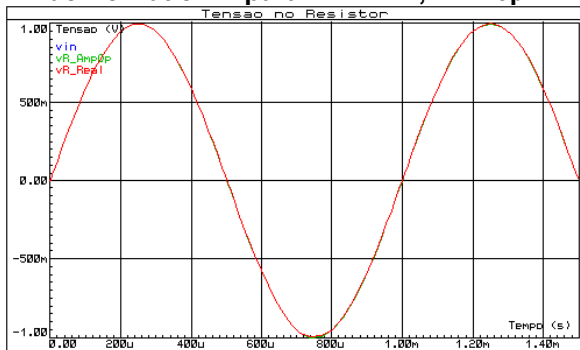
Fonte: Autoria própria

Figura A-46: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniou e RL para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 20\mu\text{H}$



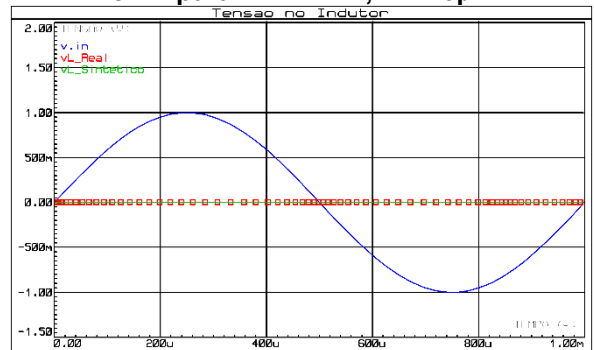
Fonte: Autoria própria

Figura A-44: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt e RL para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 20\mu\text{H}$



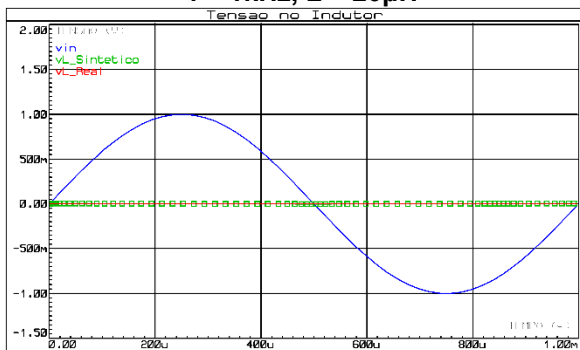
Fonte: Autoria própria

Figura A-47: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito Proposto e RL para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 20\mu\text{H}$



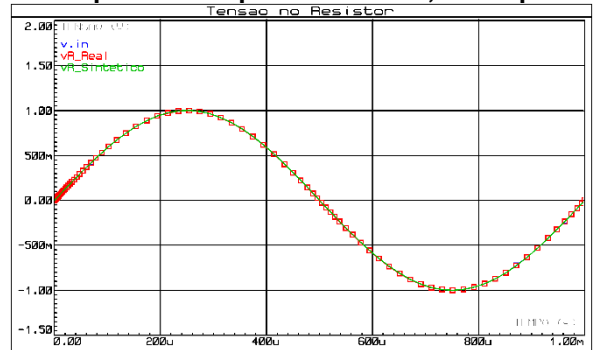
Fonte: Autoria própria

Figura A-45: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito 2 RL para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 20\mu\text{H}$



Fonte: Autoria própria

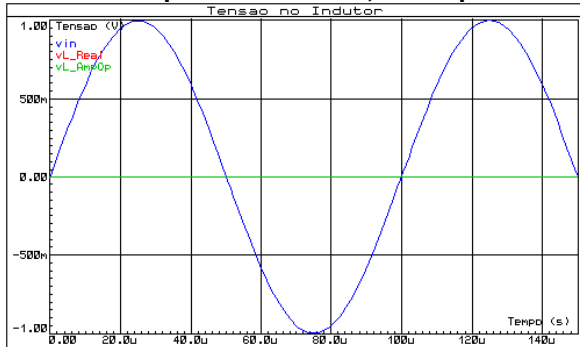
Figura A-48: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito Proposto e RL para: $f = 1\text{kHz}$, $L = 20\mu\text{H}$



Fonte: Autoria própria

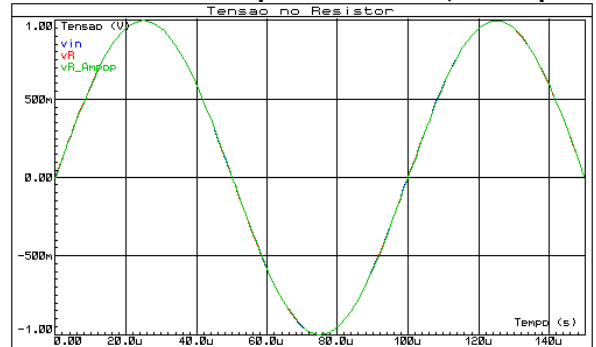
Frequência 10kHz - Indutância 20μH

Figura A-49: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt e RL para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 20\mu\text{H}$



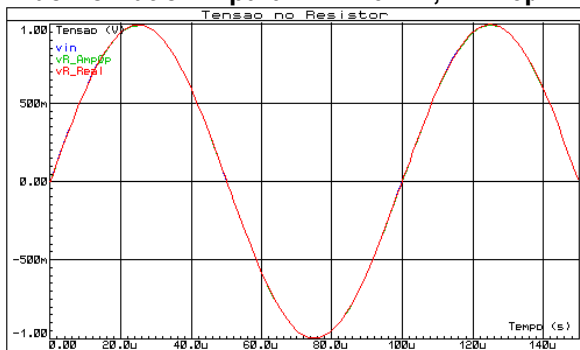
Fonte: Autoria própria

Figura A-52: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniou e RL para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 20\mu\text{H}$



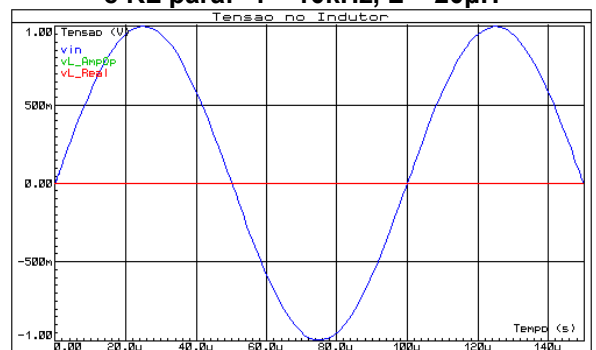
Fonte: Autoria própria

Figura A-50: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito de Berndt e RL para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 20\mu\text{H}$



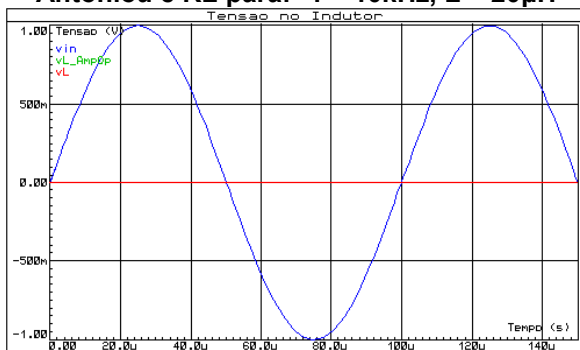
Fonte: Autoria própria

Figura A-53: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito Proposto e RL para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 20\mu\text{H}$



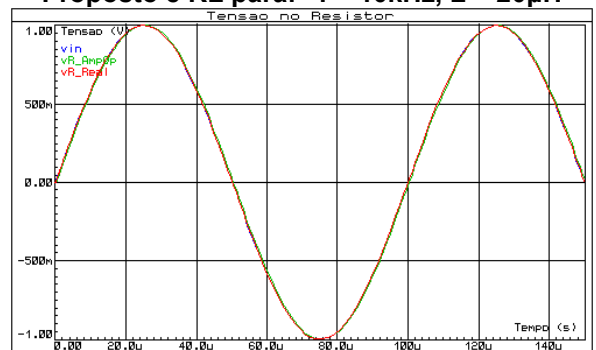
Fonte: Autoria própria

Figura A-51: Tensão no indutor para resposta em regime permanente no circuito de Antoniou e RL para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 20\mu\text{H}$



Fonte: Autoria própria

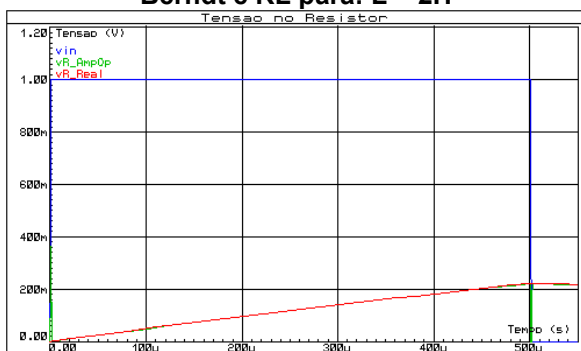
Figura A-54: Tensão no resistor para resposta em regime permanente no circuito Proposto e RL para: $f = 10\text{kHz}$, $L = 20\mu\text{H}$



Fonte: Autoria própria

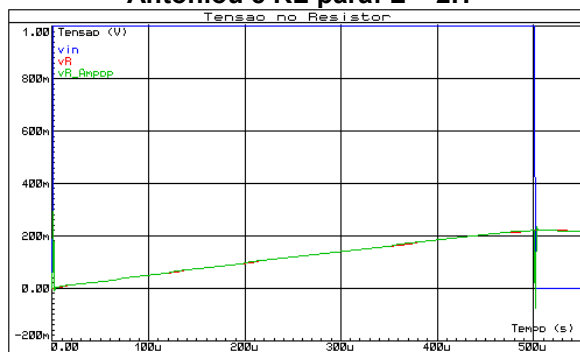
Regime Transitório

Figura A-55: Tensão no resistor para resposta em regime transitório no circuito de Berndt e RL para: $L = 2H$



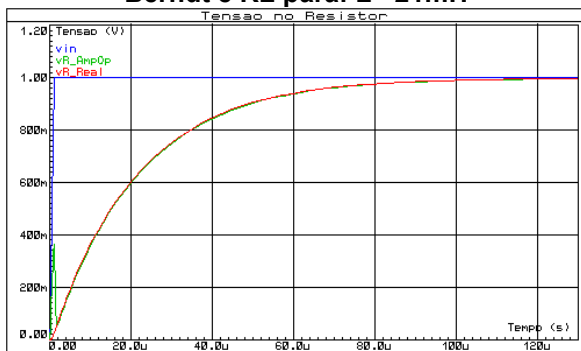
Fonte: Autoria própria

Figura A-58: Tensão no resistor para resposta em regime transitório no circuito de Antonioui e RL para: $L = 2H$



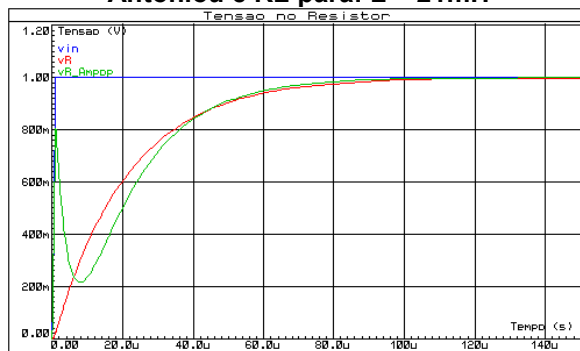
Fonte: Autoria própria

Figura A-56: Tensão no resistor para resposta em regime transitório no circuito de Berndt e RL para: $L = 21mH$



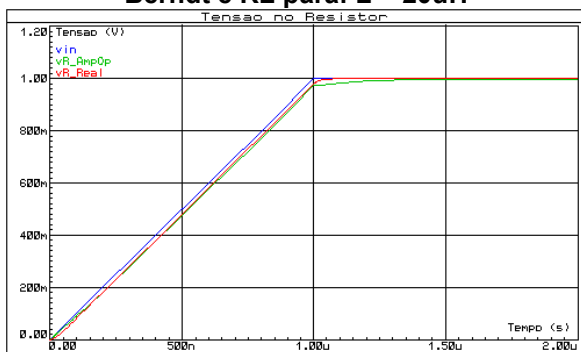
Fonte: Autoria própria

Figura A-59: Tensão no resistor para resposta em regime transitório no circuito de Antonioui e RL para: $L = 21mH$



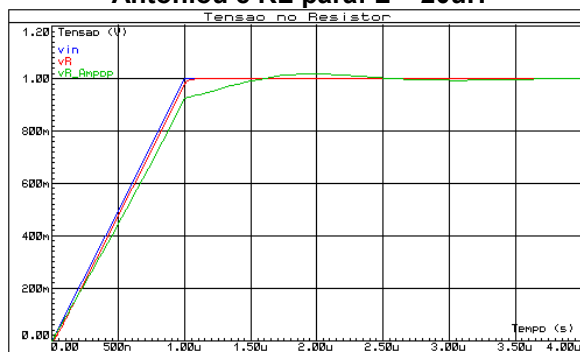
Fonte: Autoria própria

Figura A-57: Tensão no resistor para resposta em regime transitório no circuito de Berndt e RL para: $L = 20uH$



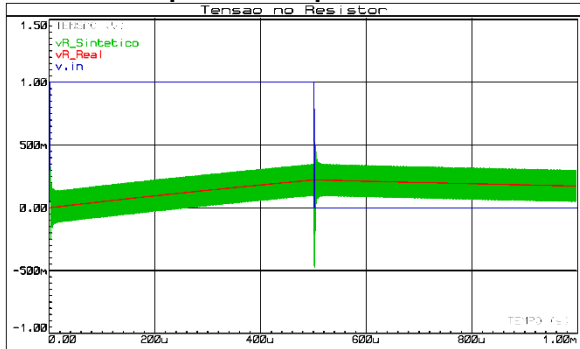
Fonte: Autoria própria

Figura A-60: Tensão no resistor para resposta em regime transitório no circuito de Antonioui e RL para: $L = 20uH$



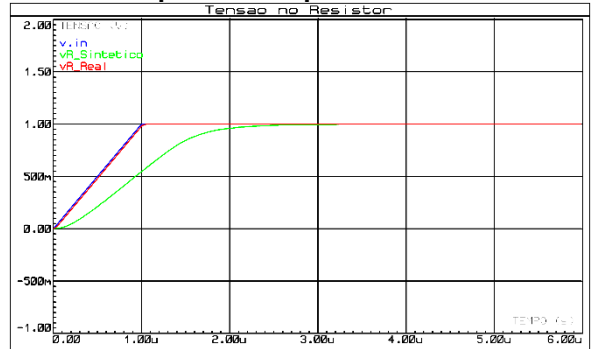
Fonte: Autoria própria

Figura A-61: Tensão no resistor para resposta em regime transitório no circuito Proposto e RL para: L = 2H



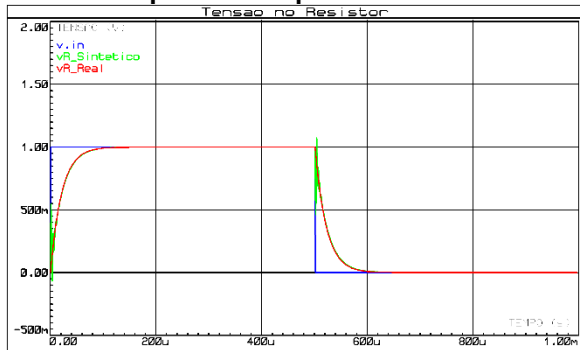
Fonte: Autoria própria

Figura A-63: Tensão no resistor para resposta em regime transitório no circuito Proposto e RL para: L = 20uH



Fonte: Autoria própria

Figura A-62: Tensão no resistor para resposta em regime transitório no circuito Proposto e RL para: L = 21mH



Fonte: Autoria própria