



Circuitos Elétricos 1
Prof. Juliano Scholz Slongo
10/06/2025
Laboratório #2

Gabriel dos Santos Schmitz & Henrique Acaio de Souza Farias
(RA: 2487438 & 2399040)

Este documento foi criado usando L^AT_EX
<https://github.com/gabrielzschmitz/uni/tree/main/circuitos-1/lab2>.

1 Introdução

Esta atividade tem como objetivo consolidar os conceitos fundamentais da análise de circuitos elétricos, com foco na aplicação de Amplificadores Operacionais (AmpOps). Esses dispositivos são essenciais em diversas configurações, como amplificadores inversores, não-inversores, somadores e integradores. Busca-se, assim, compreender tanto o funcionamento teórico quanto o comportamento prático dos AmpOps, integrando análise analítica, implementação e medições em laboratório.

A fundamentação teórica que sustenta esta atividade pode ser encontrada nas obras: *Fundamentos de circuitos elétricos* [1], *Análise de circuitos em engenharia* [2], *Introdução à análise de circuitos* [3], *Introdução aos circuitos elétricos* [4], *Circuitos elétricos* [5] e *Análise de circuitos em engenharia* [6], que abordam em profundidade os princípios da análise de circuitos elétricos.

Além do embasamento teórico, a atividade visa proporcionar aos futuros engenheiros uma vivência prática no uso de instrumentos de medição, essenciais para a caracterização e avaliação do comportamento de circuitos eletrônicos. Por meio da realização deste experimento em laboratório, espera-se que os alunos desenvolvam competências técnicas importantes, como a interpretação de resultados experimentais e a aplicação eficaz dos métodos de análise de circuitos em corrente contínua (DC).

2 Análise Teórica do Circuito 1

Para a realização da análise teórica do circuito 1, foi adotada a metodologia de análise nodal.

No circuito, a tensão V_A representa a tensão no nó entre o resistor R_4 e a entrada inversora do amplificador operacional, sendo também a tensão aplicada sobre o resistor R_4 .

A tensão V_3 corresponde à tensão no nó de saída do amplificador, que está conectada diretamente ao resistor de carga R_L , portanto, é a tensão aplicada sobre esse resistor.

A corrente I_L representa a corrente que circula através do resistor de carga R_L , sendo calculada pela relação:

$$I_L = \frac{V_3}{R_L}$$

onde R_L possui valor fixo de 100Ω .

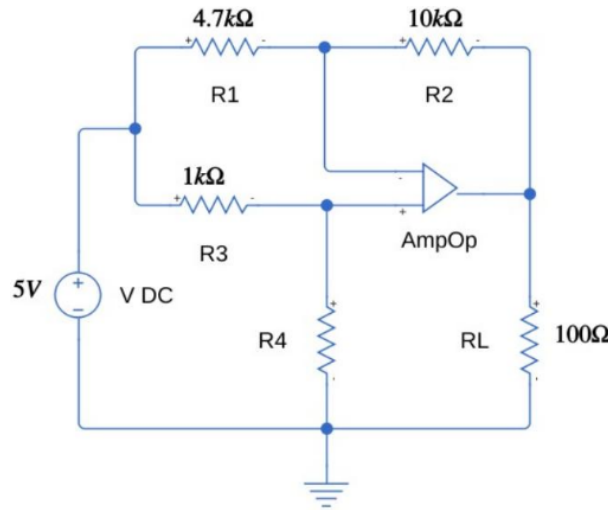


Fig. 1: Circuito 1 para análise em laboratório

O circuito 1 foi analisado para três valores de R_4 . A seguir são apresentados os cálculos completos via análise nodal.

2.1 Para $R_4 = 4,7k\Omega$

Nó v_a :

Aplicando a Lei de Kirchhoff dos nós:

$$\frac{v_a}{4,7k} + \frac{v_a - 5}{1k} = 0$$

Multiplicando a equação por 4700 para eliminar os denominadores:

$$1000v_a + 4700(v_a - 5) = 0$$

$$1000v_a + 4700v_a - 23500 = 0$$

$$5700v_a = 23500$$

$$v_a = \frac{23500}{5700} = 4,1226V$$

Nó v_3 :

$$\frac{4,1226 - v_3}{4,7k} + \frac{v_3}{10k} = 0$$

Multiplicando por 47000 (MMC):

$$10000(4,1226 - v_3) + 4700v_3 = 0$$

$$41226 - 10000v_3 + 4700v_3 = 0$$

$$-5300v_3 = -41226$$

$$v_3 = \frac{41226}{5300} = 2,256V$$

Corrente i_L :

$$i_L = \frac{v_3}{100} = \frac{2,256}{100} = 0,02256A$$

2.2 Para $R_4 = 10k\Omega$

Nó v_a :

$$\frac{v_a}{10k} + \frac{v_a - 5}{1k} = 0$$

Multiplicando por 10000:

$$1000v_a + 10000(v_a - 5) = 0$$

$$1000v_a + 10000v_a - 50000 = 0$$

$$11000v_a = 50000$$

$$v_a = \frac{50000}{11000} = 4,5454V$$

Nó v_3 :

$$\frac{4,5454 - v_3}{4,7k} + \frac{v_3}{10k} = 0$$

MMC = 47000:

$$10000(4,5454 - v_3) + 4700v_3 = 0$$

$$45454 - 10000v_3 + 4700v_3 = 0$$

$$-5300v_3 = -45454$$

$$v_3 = \frac{45454}{5300} = 3,5778V$$

Corrente i_L :

$$i_L = \frac{v_3}{100} = \frac{3,5778}{100} = 0,03577A$$

2.3 Para $R_4 = 1k\Omega$

Nó v_a :

$$\begin{aligned}\frac{v_a}{1k} + \frac{v_a - 5}{1k} &= 0 \\ (1 + 1)v_a &= 5 \\ 2v_a &= 5 \\ v_a &= \frac{5}{2} = 2,5V\end{aligned}$$

Nó v_3 :

$$\frac{2,5 - v_3}{4,7k} + \frac{v_3}{10k} = 0$$

MMC = 47000:

$$10000(2,5 - v_3) + 4700v_3 = 0$$

$$25000 - 10000v_3 + 4700v_3 = 0$$

$$-5300v_3 = -25000$$

$$v_3 = \frac{25000}{5300} = -2,810V$$

Corrente i_L :

$$i_L = \frac{v_3}{100} = \frac{-2,810}{100} = -0,02810A$$

3 Análise Teórica do Circuito 2

Na análise teórica do circuito 2, também foi utilizada a metodologia de análise nodal para determinar os valores de tensão e corrente.

A tensão V_S corresponde à tensão na saída do amplificador operacional, que também é a tensão aplicada sobre o resistor de carga R_L , conectado diretamente à saída do circuito.

A corrente I_L representa a corrente que circula através do resistor de carga R_L , sendo determinada pela relação:

$$I_L = \frac{V_S}{R_L}$$

onde R_L possui valor fixo de 100Ω .

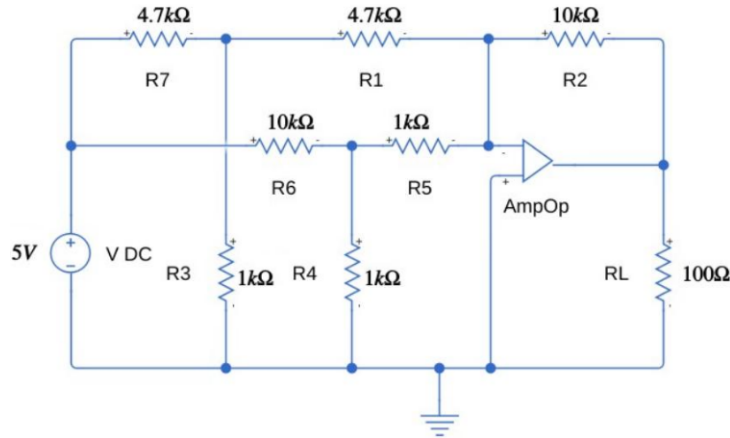


Fig. 2: Circuito 2 para análise em laboratório

Nó de saída (v_s):

Aplicando a Lei de Kirchhoff no nó da saída:

$$\frac{v_s}{1k} + \frac{v_s - 5}{4,7k} + \frac{v_s}{10k} = 0$$

Multiplicando por 47000:

$$47000 \frac{v_s}{1k} + 10000(v_s - 5) + 47000 \frac{v_s}{10k} = 0$$

$$47v_s + 10000(v_s - 5) + 4,7v_s = 0$$

$$(47 + 4,7 + 10000)v_s - 50000 = 0$$

$$10051,7v_s = 50000$$

$$v_s = \frac{-50000}{10051,7} = -3,9688V$$

Corrente i_L :

$$i_L = \frac{v_s}{100} = \frac{-3,9688}{100} = -0,039688A$$

4 Simulação Computacional

Com o objetivo de validar os resultados teóricos obtidos por meio da análise dos circuitos, foi realizada uma simulação computacional utilizando o ambiente Simulink do MATLAB. Essa etapa visa não apenas verificar a coerência dos valores calculados, mas também proporcionar maior familiaridade com ferramentas de simulação amplamente utilizadas na engenharia elétrica.

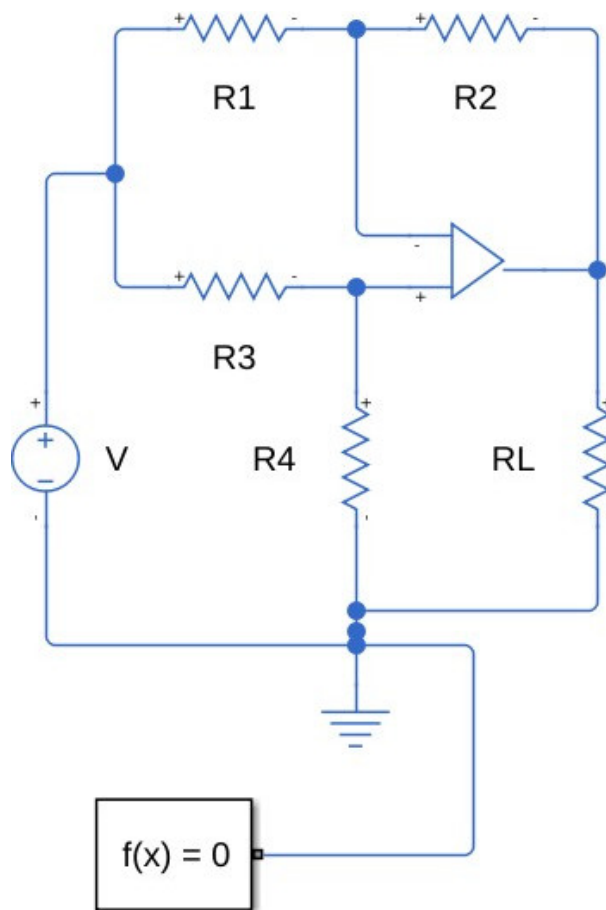


Fig. 3: Circuito 1 recreado no Matlab

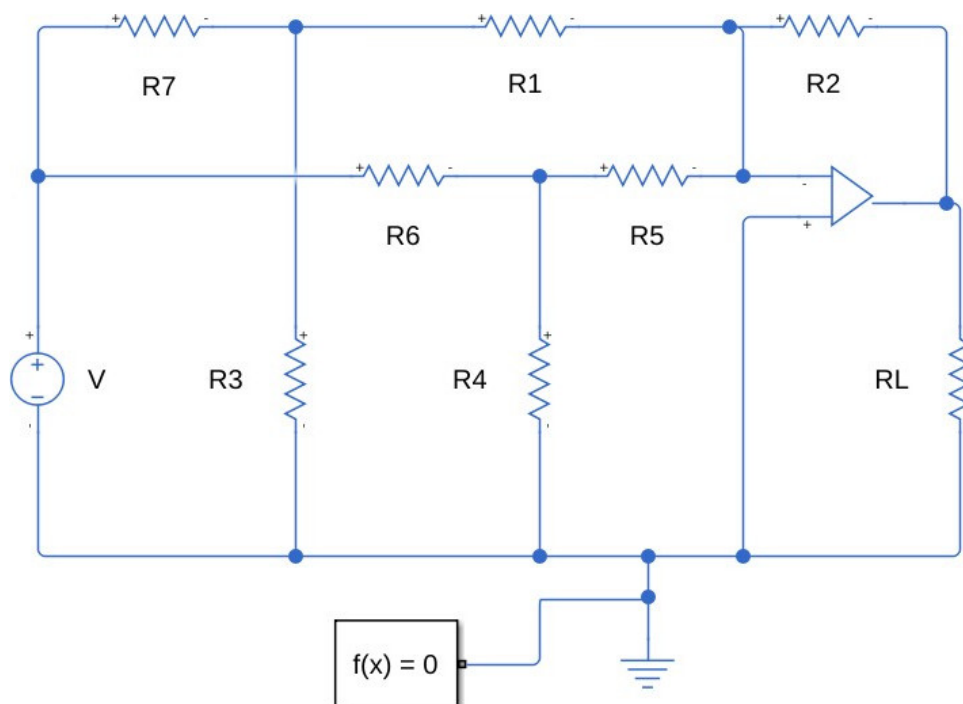


Fig. 4: Circuito 2 recreado no Matlab

Inicialmente, os circuitos foram remontados no Simulink de forma a refletir fielmente o arranjo teórico.

Foram utilizados componentes eletrônicos como resistores, fontes de tensão, amplificadores operacionais e referência elétrica, todos configurados de acordo com os parâmetros estabelecidos. As Figuras 3 e 4 apresentam a montagem dos circuitos no ambiente de simulação.

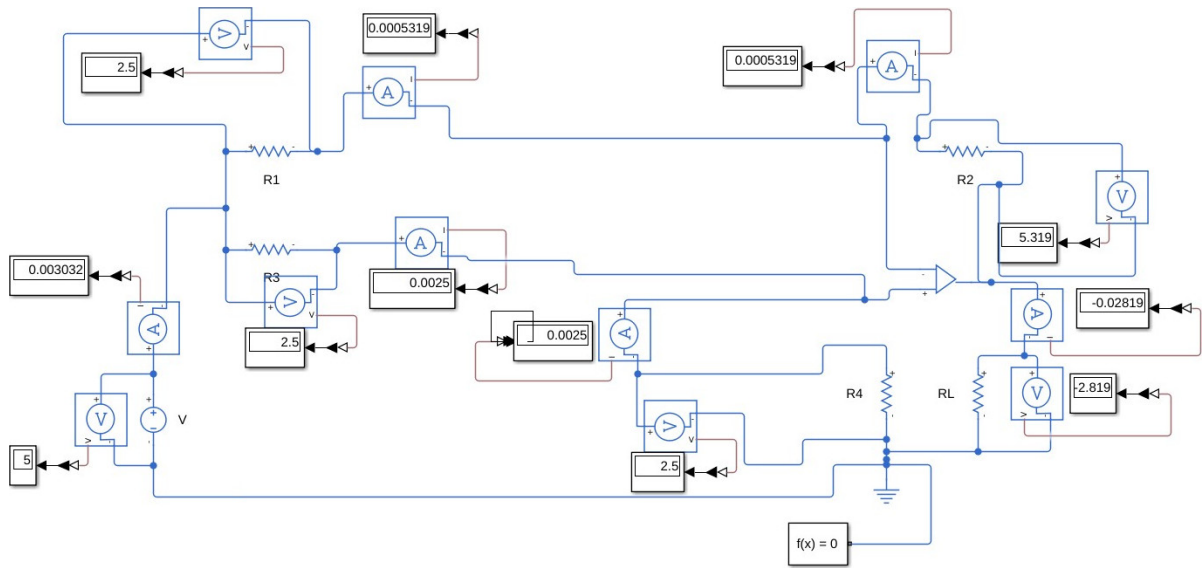


Fig. 5: Circuito 1 ($R4=1k$) com a adição de amperímetros e voltímetros ligados à displays

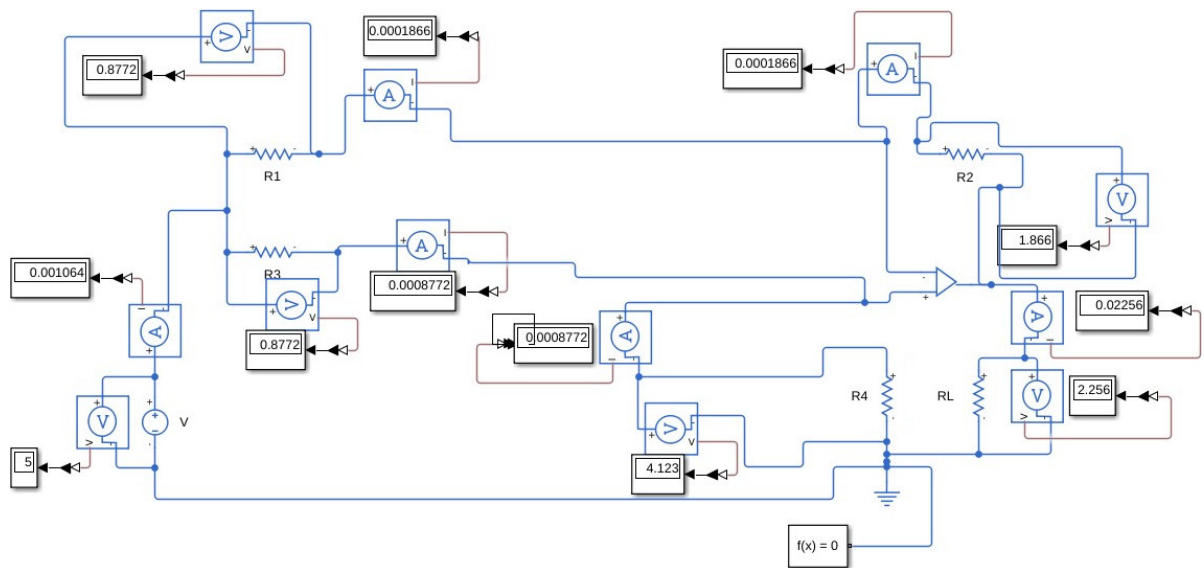


Fig. 6: Circuito 1 ($R4=4.7k$) com a adição de amperímetros e voltímetros ligados à displays

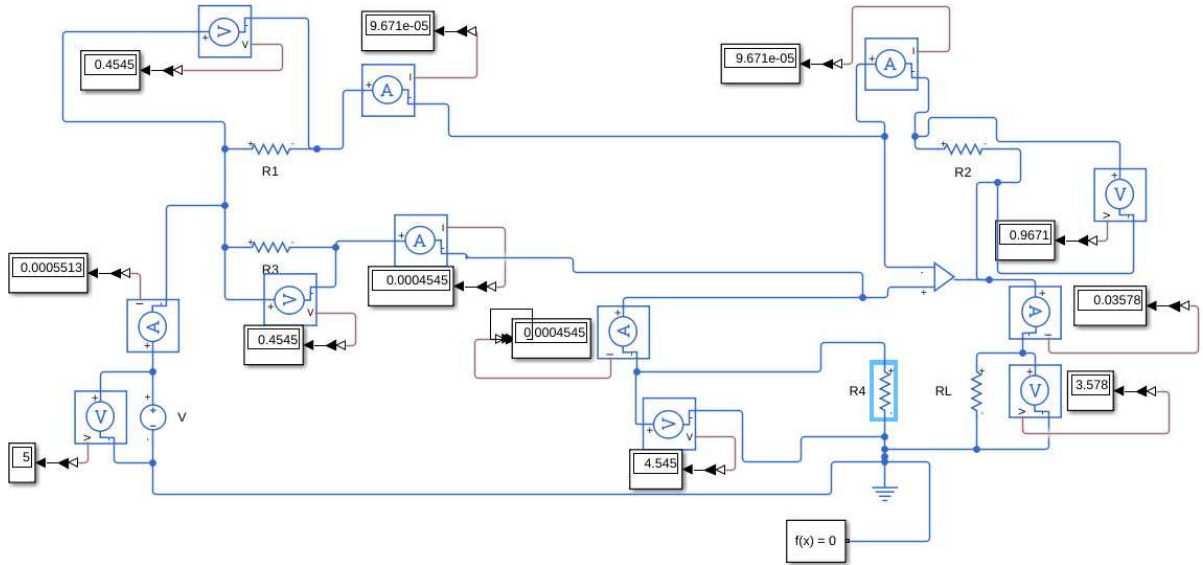


Fig. 7: Circuito 1 ($R_4=10k$) com a adição de amperímetros e voltmíetros ligados à displays

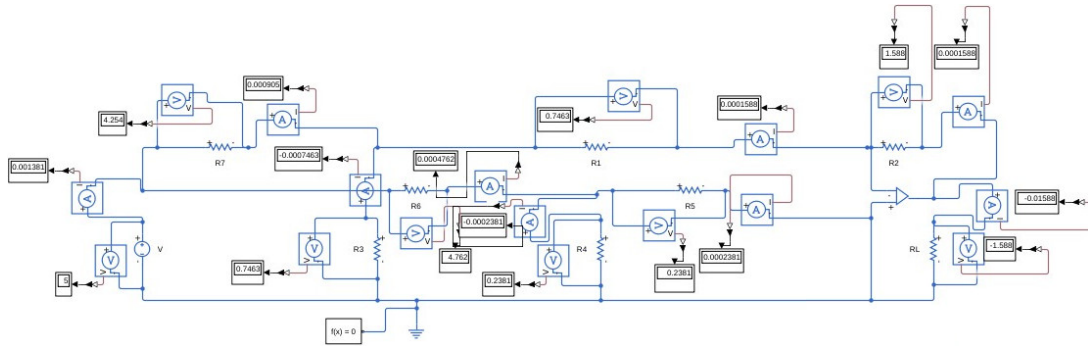


Fig. 8: Circuito 2 com a adição de amperímetros e voltmíetros ligados à displays

Após a simulação, os resultados obtidos para as tensões, correntes e potências nos diversos elementos do circuito foram registrados, conforme ilustrado nas Figuras 5, 6 e 7 para R_4 igual a 1k, 4.7k e 10k respectivamente no circuito 1 e na Figura 8 para o circuito 2. Esses valores foram posteriormente organizados em tabelas comparativas com os dados teóricos e os dados obtidos em medições reais. A boa concordância entre os resultados simulados e teóricos reforça a consistência da análise e evidencia a confiabilidade da simulação como ferramenta de apoio ao estudo de circuitos elétricos, além da assertividade da análise realizada por nós.

5 Experimento Laboratorial

Nesta etapa, o circuito proposto foi montado fisicamente em bancada utilizando componentes reais disponíveis no laboratório.

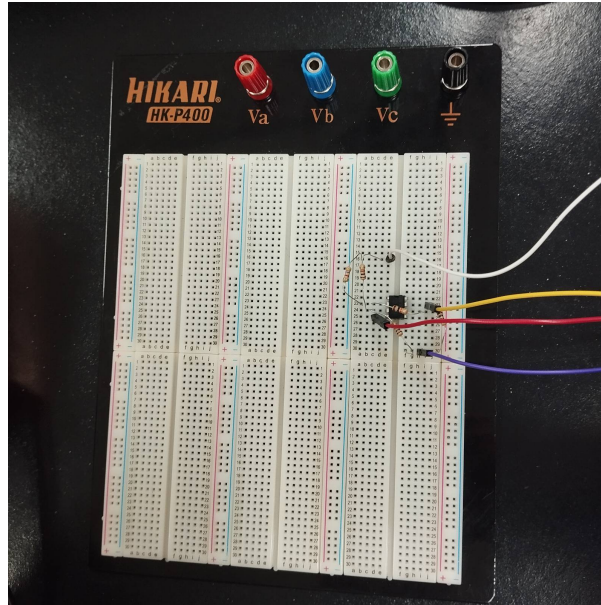


Fig. 9: Circuito 1 montado em laboratório

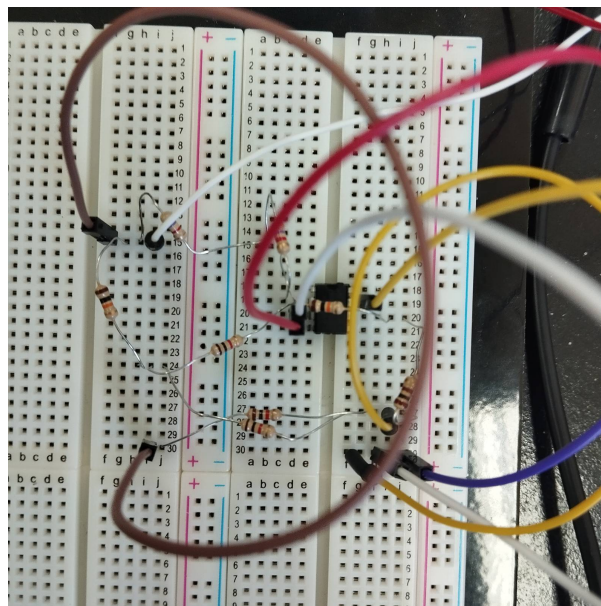


Fig. 10: Circuito 2 montado em laboratório

Na realização do experimento prático, foram utilizados componentes reais cujos valores apresentam pequenas variações em relação aos valores nominais especificados no projeto teórico.

Os resistores apresentaram tolerâncias típicas de fabricação, o que explica as pequenas diferenças observadas. A fonte de tensão também apresentou uma leve variação, fornecendo 5,08V em vez dos 5,00V ideais.

A tabela a seguir resume a comparação entre os valores teóricos e os valores reais medidos dos componentes:

- R_3 : 1k Ω (teórico) \rightarrow 0,97k Ω (real)
- R_4 : 1k Ω (teórico) \rightarrow 0,98k Ω (real)
- R_1 : 4,7k Ω (teórico) \rightarrow 4,61k Ω (real)
- R_4 : 4,7k Ω (teórico) \rightarrow 4,61k Ω (real)

- R_2 : $10\text{k}\Omega$ (teórico) \rightarrow $9,78\text{k}\Omega$ (real)
- R_4 : $10\text{k}\Omega$ (teórico) \rightarrow $9,78\text{k}\Omega$ (real)
- R_L : 100Ω (teórico) \rightarrow 115Ω (real)
- Fonte de tensão: $5,00\text{V}$ (teórico) \rightarrow $5,08\text{V}$ (real)

Essas discrepâncias ocorrem principalmente devido às tolerâncias de fabricação dos resistores, que geralmente variam entre 1% e 5%, dependendo do componente. Além disso, o resistor de carga R_L apresentou uma variação significativa, passando de 100Ω para 115Ω , o que impacta diretamente os valores das correntes medidas.

A variação da tensão da fonte também contribui para pequenas diferenças nos resultados práticos em relação aos teóricos e simulados. Apesar dessas variações, os resultados obtidos são considerados satisfatórios, uma vez que estão dentro dos limites aceitáveis para um experimento prático de laboratório.

6 Resultados

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir da análise teórica, da simulação computacional e da montagem prática dos circuitos propostos.

Os dados estão organizados em tabelas comparativas, permitindo observar as diferenças e semelhanças entre os valores teóricos, simulados e reais, tanto das tensões nos nós principais quanto das correntes no resistor de carga. Essa comparação é fundamental para validar a análise teórica frente aos comportamentos prático e simulado dos circuitos.

Resistor	Resultado Teórico			Resultado Simulado			Resultado Real		
	VA (V)	V3 (V)	IL (A)	VA (V)	V3 (V)	IL (A)	VA (V)	V3 (V)	IL (A)
$R_4 = 4,7\text{k}\Omega$	4,1226	2,256	0,02256	4,123	2,256	0,02256	4,05312	2,332	0,02313
$R_4 = 1\text{k}\Omega$	2,5	-2,810	-0,028	2,5	-2,819	-0,028	2,6231	-2,703	-0,027
$R_4 = 10\text{k}\Omega$	4,5454	3,5778	0,03577	4,545	3,578	0,03678	4,6130	3,4532	0,03443

Tabela 1: Comparação dos resultados teóricos, simulados e reais das tensões V_a , V_3 e corrente I_L do circuito 1.

Resultado Teórico		Resultado Simulado		Resultado Real	
VS (V)	IL (A)	VS (V)	IL (A)	VS (V)	IL (A)
-3,9688	-0,0396	-3,97	-0,0397	-4,0532	-0,04134

Tabela 2: Comparação dos resultados teóricos, simulados e reais da tensão V_S e corrente I_L do circuito 2.

7 Análise dos Resultados

Após a realização das análises nas três modalidades — teórica, simulação e experimento real —, observou-se que os valores obtidos foram, de modo geral, bastante próximos entre si, o que indica uma boa coerência dos resultados. Essa consistência valida tanto os cálculos realizados quanto os modelos simulados. No entanto, algumas discrepâncias entre os resultados foram observadas e podem ser explicadas por diferentes fatores, tanto práticos quanto teóricos.

No **Circuito 1**, um aspecto importante identificado foi a necessidade de ajustar a tensão da fonte que alimentava o amplificador operacional para que os resultados obtidos experimentalmente fossem congruentes com os valores esperados da análise teórica e da simulação. Especificamente, foi necessário variar a tensão de alimentação entre 4V e 12V, dependendo do valor adotado para o resistor R_4 . Esse ajuste foi essencial devido às limitações físicas dos amplificadores operacionais, que não conseguem operar corretamente se a tensão de saída se aproxima dos limites da alimentação. Enquanto na análise teórica e na simulação os amplificadores são considerados ideais (sem limitações de saturação, corrente de saída ou tensão de alimentação), no experimento real esses fatores influenciam diretamente o comportamento do circuito.

Além disso, ao inserir na simulação do MATLAB os valores reais dos componentes utilizados no experimento — considerando as variações medidas, como resistores com pequenas diferenças em relação aos seus valores nominais —, os resultados simulados apresentaram uma taxa de erro de até 5% em relação às simulações feitas com os valores teóricos ideais. Essa diferença é justificada principalmente pelas tolerâncias dos componentes (que, embora pequenas, impactam diretamente nas tensões e correntes), além das limitações físicas do próprio amplificador operacional, como offset de entrada, corrente de polarização, resistência de saída e limitação de faixa linear de operação.

É importante destacar que tanto os cálculos teóricos quanto os modelos simulados assumem um circuito idealizado, no qual os resistores possuem exatamente seus valores nominais, as fontes são ideais e os fios e conexões possuem resistência, capacitância e indutância desprezíveis. Já no experimento real, todos esses fatores físicos — inevitáveis na prática — afetam os resultados. Além disso, variáveis externas como ruído eletromagnético, interferências do ambiente, imprecisão dos instrumentos de medição e até variações térmicas (que podem alterar ligeiramente a resistência dos componentes) também contribuem para pequenas discrepâncias observadas.

Somam-se ainda aos fatores práticos as limitações associadas aos métodos numéricos das simulações. Embora o MATLAB utilize métodos altamente precisos, ele ainda está sujeito a erros de arredondamento, discretização e precisão de ponto flutuante, o que pode gerar pequenas diferenças nos resultados, especialmente quando o sistema é muito sensível às variações de parâmetros.

Portanto, a análise dos resultados demonstra que, apesar das pequenas variações, todos os métodos — teórico, simulado e experimental — apresentaram valores consistentes entre si, dentro de uma margem de erro aceitável, o que valida o modelo proposto. Além disso, o processo evidencia a importância de se considerar as limitações dos componentes e dos instrumentos quando se faz a transição de um modelo ideal para um circuito real, reforçando a compreensão prática dos conceitos teóricos aplicados na análise de circuitos.

8 Conclusão

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a simulação computacional se mostra uma ferramenta extremamente útil para a análise teórica de circuitos, permitindo validar conceitos, prever comportamentos e antecipar resultados. No entanto, ela trabalha com modelos idealizados, que desconsideram as imperfeições e limitações físicas presentes no mundo real.

Por outro lado, a realização do experimento prático em laboratório evidencia a influência de fatores como tolerâncias dos componentes, ruídos, limitações dos dispositivos (como amplificadores operacionais), variações na tensão de alimentação, além de erros associados aos instrumentos de medição. Esses efeitos, embora muitas vezes desprezados na fase de projeto teórico, são determinantes para o funcionamento real dos circuitos.

Apesar dessas diferenças, observou-se que os resultados obtidos nas três abordagens — teórica, simulada e experimental — apresentaram boa concordância entre si, com uma margem de erro dentro do esperado, validando tanto os modelos desenvolvidos quanto a metodologia aplicada. Isso reforça que a simulação é uma etapa fundamental no desenvolvimento de projetos, especialmente para validar conceitos e antecipar possíveis ajustes. Contudo, é indispensável realizar a verificação prática, uma vez que apenas os testes experimentais permitem observar os efeitos das não idealidades, garantindo assim a precisão e a confiabilidade do circuito no seu funcionamento real.

Portanto, a integração entre análise teórica, simulação e experimentação prática é essencial para o desenvolvimento eficiente e robusto de projetos em eletrônica, proporcionando uma compreensão completa dos circuitos e preparando o projetista para lidar com os desafios e limitações do mundo real.

Referências

- [1] Charles K. Alexander and Matthew N. O. Sadiku. *Fundamentos de circuitos elétricos*. 3rd ed. São Paulo, SP: McGraw-Hill, 2008, pp. xxi, 901. ISBN: 9788585804977.
- [2] William Hart Hayt Junior, Jack E. Kemmerly, and Steven M. Durbin. *Análise de circuitos em engenharia*. 7th ed. São Paulo, SP: McGraw-Hill, 2008, pp. xxii, 858. ISBN: 9788577260218.
- [3] Robert L. Boylestad. *Introdução à análise de circuitos*. 12th ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2012, pp. xiii, 962. ISBN: 9788564574205.
- [4] James A. Svoboda and Richard C. Dorf. *Introdução aos circuitos elétricos*. 9th ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2016, pp. xx, 873. ISBN: 9788521630760.
- [5] James William Nilsson and Susan A. Riedel. *Circuitos elétricos*. 10th ed. São Paulo, SP: Pearson Education do Brasil, 2016, p. 873. ISBN: 9788543004785.
- [6] J. David Irwin. *Análise de circuitos em engenharia*. 4th ed. São Paulo, SP: Makron Books, 2000, pp. xvi, 848. ISBN: 8534606935.