



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS (UNISINOS)
ESCOLA POLITÉCNICA
ELETRÔNICA ANALÓGICA

KLAUS PEREIRA BECKER
GABRIEL SILVEIRA MARQUES

LABORATÓRIO 3:
Integrador e Diferenciador com Amplificador Operacional

SÃO LEOPOLDO / RS

2025

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS (UNISINOS)

KLAUS PEREIRA BECKER

GABRIEL SILVEIRA MARQUES

LABORATÓRIO 3:

Integrador e Diferenciador com Amplificador Operacional

Atividade prática apresentada como requisito à obtenção de uma das notas parciais da disciplina de Eletrônica Analógica do curso de Engenharia da Computação da Universidade do Vale do Rio Dos Sinos.

Prof. Rubem Dreger

SÃO LEOPOLDO / RS

2025

Sumário

	Páginas
1 Introdução	4
2 Referencial Teórico	4
2.1 Características dos Amplificadores Operacionais	4
2.2 Circuito Integrador	5
2.3 Circuito Diferenciador	5
2.4 Limitações Práticas	6
3 Metodologia	6
3.1 Circuito Integrador	6
3.2 Circuito Diferenciador	11
4 Conclusão	15

1 Introdução

Amplificadores operacionais são blocos fundamentais em sistemas analógicos, permitindo a implementação de funções matemáticas como integração e diferenciação de sinais. As configurações de integrador e diferenciador são amplamente aplicadas em instrumentação, controle e processamento de sinais.

Este experimento tem como objetivo analisar o comportamento de circuitos integrador e diferenciador utilizando amplificadores operacionais. Serão investigados aspectos como frequência de corte, resposta em frequência e forma de onda de saída para diferentes sinais de entrada.

O estudo envolve a montagem prática dos circuitos, análise das formas de onda e comparação entre os resultados teóricos e experimentais, visando compreender o funcionamento e as limitações reais dessas topologias.

2 Referencial Teórico

Amplificadores operacionais (AmpOps) são dispositivos eletrônicos amplamente utilizados em sistemas analógicos. Seu modelo ideal assume ganho infinito em malha aberta, impedância de entrada infinita e impedância de saída nula. Na prática, embora possuam limitações, os AmpOps reais apresentam características suficientes para desempenhar funções de amplificação, filtragem, operação matemática e condicionamento de sinais com alta precisão.

2.1 Características dos Amplificadores Operacionais

Um amplificador operacional típico possui duas entradas: uma inversora (e_-) e uma não-inversora (e_+), além de uma única saída. Quando configurado com realimentação negativa e operando dentro da região linear, o circuito ajusta automaticamente a saída para manter as tensões nas entradas virtualmente iguais ($e_+ \approx e_-$).

Esse fenômeno é conhecido como curto virtual. Diferente de um curto real, em que há fluxo de corrente entre os pontos, no curto virtual a diferença de potencial é zero, mas a corrente entre as entradas é nula, devido à alta impedância de entrada do amplificador. Ou seja, os terminais estão no mesmo potencial elétrico, mas não há conexão física ou condução de corrente entre eles.

Essa condição permite simplificar a análise de circuitos com AmpOps, aplicando diretamente leis de Kirchhoff assumindo que $e_+ = e_-$ e que nenhuma corrente entra pelas entradas do amplificador.

Dando sequência aos conceitos, podemos destacar algumas características importantes dos amplificadores operacionais:

- Alta impedância de entrada (Z_{in}), minimizando o carregamento da fonte;

- Baixa impedância de saída (Z_{out}), permitindo acoplamento eficiente com cargas subsequentes;
- Largura de banda limitada e dependente do ganho;
- Saturação da saída limitada pelas tensões de alimentação.

Essas propriedades tornam os AmpOps ideais para a implementação de circuitos como integradores e diferenciadores.

2.2 Circuito Integrador

O integrador é um circuito que realiza a operação matemática de integração, ou seja, a saída é proporcional à integral da entrada em relação ao tempo. O circuito integrador típico utiliza um amplificador operacional com um resistor e um capacitor na malha de realimentação, como mostrado na Figura 1.

Nesse modelo de circuito, temos como sinal de entrada padrão uma onda quadrada, considerando esse cenário, quando temos um nível lógico alto na entrada, o capacitor começa a carregar, e a tensão de saída varia linearmente.

Dessa forma, temos que a tensão de saída é dada por:

$$V_{out}(t) = -\frac{1}{RC} \int V_{in}(t) dt \quad (1)$$

Este circuito também pode ser visto como um filtro passa-baixa, onde a frequência de corte é determinada pela constante de tempo do circuito, que é o produto da resistência (R) e da capacitância (C):

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_f C} \quad (2)$$

Para frequências muito superiores a f_c , o capacitor passa a se comportar como curto, e o circuito realiza a integração do sinal. Para frequências muito baixas, o ganho torna-se constante, assemelhando-se a um amplificador inversor.

2.3 Circuito Diferenciador

No diferenciador, a configuração é invertida em relação ao integrador. O capacitor é colocado na entrada do amplificador operacional, e o resistor na malha de realimentação. A tensão de saída é proporcional à taxa de variação da tensão de entrada, ou seja, a derivada da entrada em relação ao tempo.

$$V_{out}(t) = -RC \frac{dV_{in}(t)}{dt} \quad (3)$$

Trata-se de um filtro passa-alta com frequência de corte igualmente dada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4)$$

Em frequências muito superiores a f_c , o circuito realiza a diferenciação do sinal. Em frequências muito baixas, o ganho se estabiliza e o circuito se comporta como um amplificador inversor.

2.4 Limitações Práticas

Embora a teoria assuma comportamento ideal, diversos fatores afetam a performance real dos circuitos:

- Ruído e offset de entrada;
- Ganho finito em malha aberta;
- Saturação da saída;
- Resposta em frequência limitada.

A análise experimental é fundamental para validar o comportamento dos circuitos em condições reais, permitindo comparar os resultados com as previsões teóricas e compreender suas limitações práticas.

3 Metodologia

3.1 Circuito Integrador

O circuito utilizado nesta etapa da atividade prática é um amplificador operacional configurado como integrador. Ele é composto por um resistor na entrada e um capacitor na malha de realimentação negativa. Essa configuração é mostrada na Figura 1, onde também está indicada a pinagem do CI LM741, que foi utilizado na montagem do circuito.

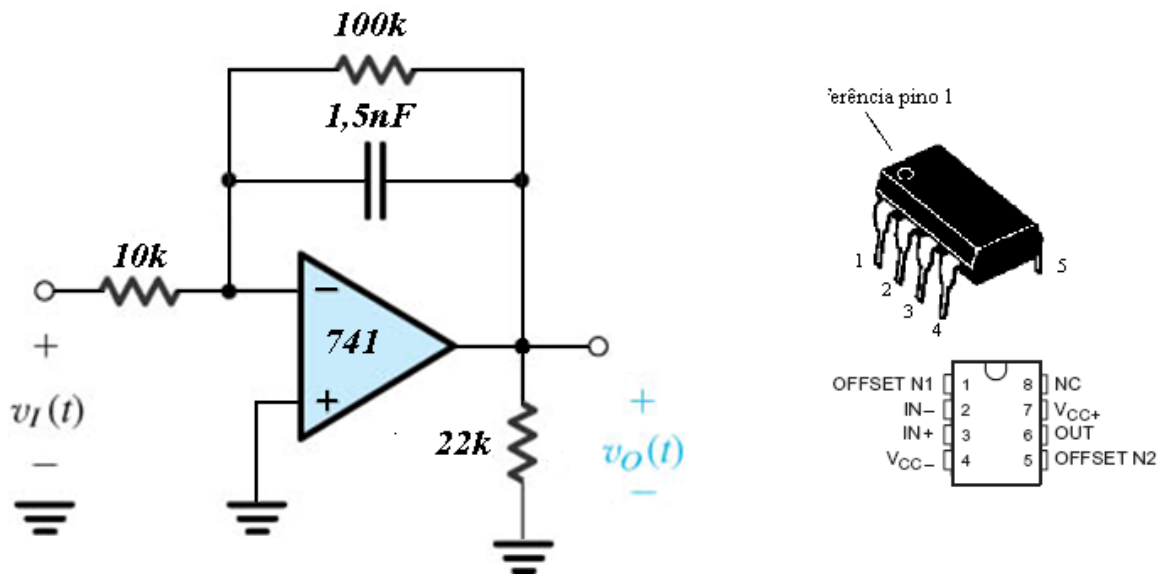


Figura 1: Circuito integrador com AmpOp e pinagem do CI.

Inicialmente, foi realizado o cálculo da frequência de corte teórica do circuito, considerando os valores dos componentes utilizados. O resistor utilizado na malha de realimentação foi de $100\text{ k}\Omega$, e o capacitor foi de $1,5\text{ nF}$. A frequência de corte do circuito integrador é dada pela relação:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_f C} \quad (5)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot 100\text{ k}\Omega \cdot 1,5\text{ nF}} \quad (6)$$

$$f_c = 1061\text{ Hz} \quad (7)$$

Dessa forma, temos que teoricamente, o circuito integrador deve apresentar um ganho de -3 dB na frequência de 1061 Hz . Para frequências inferiores, o circuito deve se comportar como um amplificador inversor, enquanto para frequências superiores, o circuito deve se comportar como um filtro passa-baixa, com um ganho de -20 dB/decada .

Juntamente disso, foi realizada a montagem do circuito integrador, conforme a Figura 1. O circuito foi alimentado com tensões de $+12\text{ V}$ e -12 V , e o sinal de entrada foi uma onda quadrada de 1 V_p . A partir disso, foi ajustada a frequência do sinal de entrada até que a tensão de saída do circuito fosse reduzida a $0,707\text{ V}_p$. Essa frequência corresponde à frequência de corte do circuito integrador, como pode ser observado na Figura 2.

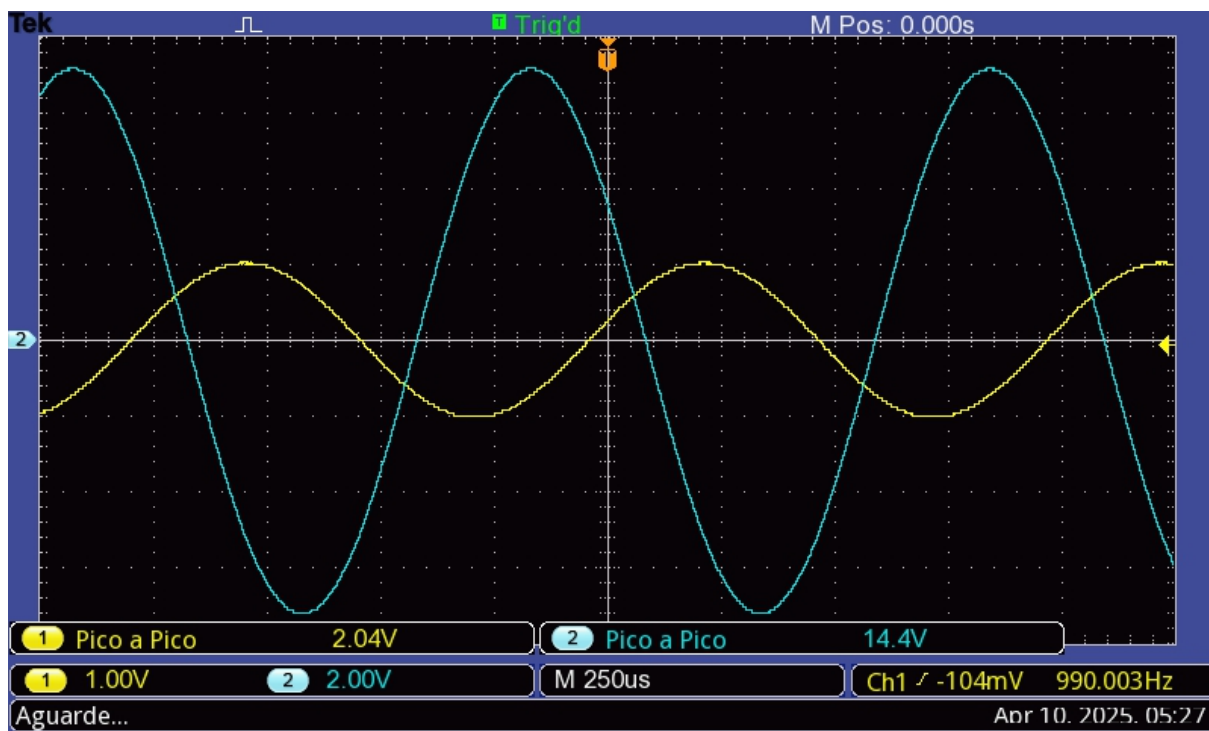


Figura 2: Frequência de corte medida do circuito integrador.

Onde obtivemos a seguinte relação entre a frequência de corte calculada e a frequência de corte medida:

Tabela 1: Frequência de corte do circuito integrador.

Parâmetro	Teórico	Prático
f_c	1061 Hz	990 Hz

Pode-se observar que a frequência de corte medida está próxima da frequência de corte teórica, o que indica que o circuito está funcionando conforme o esperado, a diferença entre os valores pode ser atribuída a fatores como tolerância dos componentes, ruído e offset de entrada do amplificador operacional.

Sendo assim, se aplicarmos um sinal de entrada com frequência menor que a frequência de corte, o circuito se comporta como um amplificador inversor, como pode ser observado na Figura 3. Para isso, foi utilizado um sinal de entrada de 2 V_{pp} e uma frequência de 100 Hz.

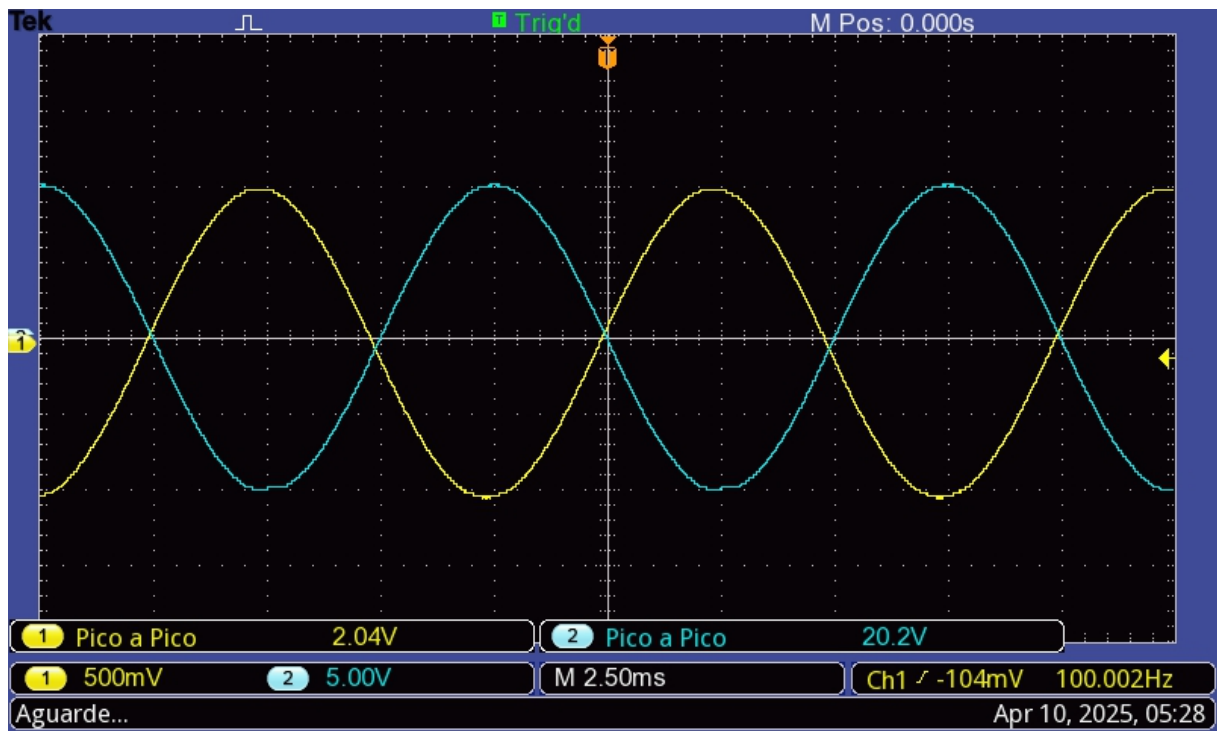


Figura 3: Sinal de entrada de 100 Hz e 1 V_p .

Como pode ser observado, a tensão de saída do circuito, nesse caso, onde o circuito opera como um amplificador inversor, é de -20 V_{pp} . Isso confirma que o circuito se comporta como um amplificador inversor para frequências inferiores a f_c , pois está diretamente relacionado com a relação entre a tensão de entrada e a tensão de saída do circuito integrador, que para frequências menores que a frequência de corte é de -20 dB .

Entretanto, para frequências superiores a f_c , o circuito se comporta como um filtro passa-baixa, com um ganho de -20 dB/decada . Para iniciar a análise do circuito, foi aplicado uma onda quadrada de 1 V_{pp} e uma frequência de 10 vezes maior que a frequência de corte, ou seja, 10 kHz . A tensão de saída do circuito foi medida e comparada com a tensão de entrada, como pode ser observado na Figura 4.

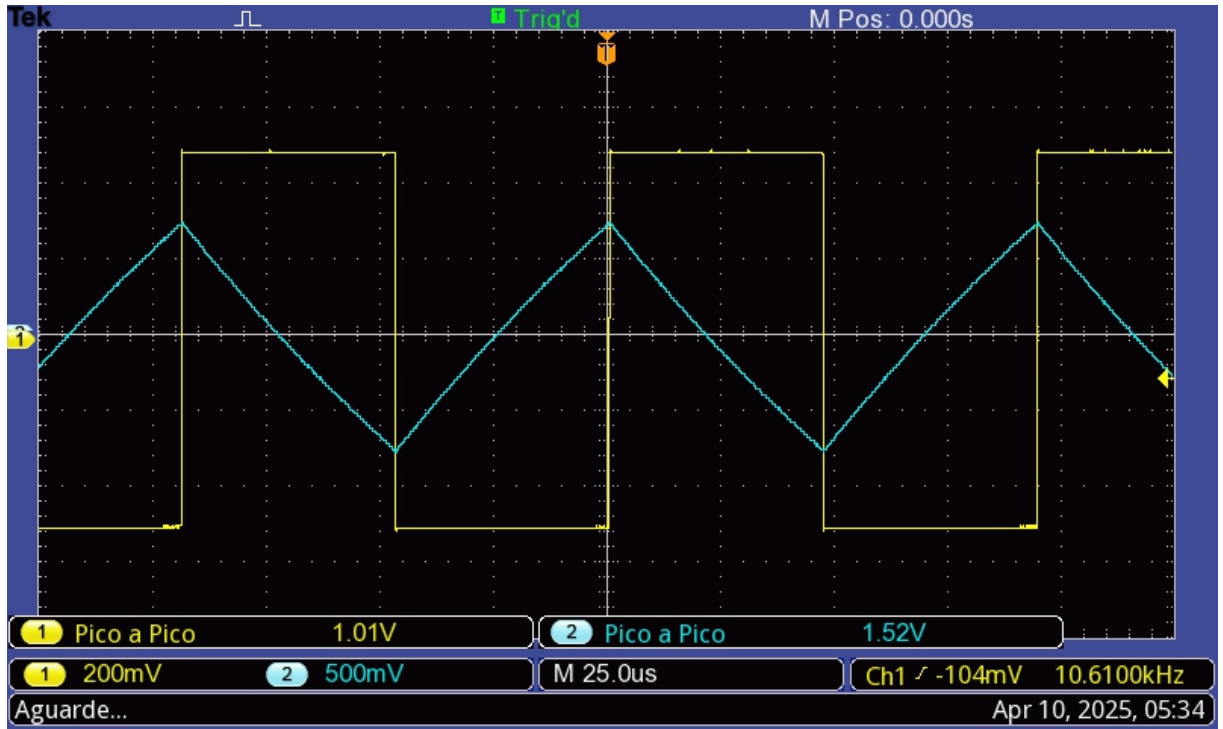


Figura 4: Sinal de entrada de 10 kHz e 1 V_{pp}.

Nesse caso, podemos claramente observar que o sinal de saída nesse cenário é correlato a integral do sinal de entrada, o que confirma o funcionamento do circuito integrador. Além disso, podemos observar que a tensão de saída do circuito é de 1,5 V_{pp}, o que confirma que o circuito se comporta como um filtro passa-baixa, com um ganho de -20 dB/decada . Pois segue a teoria, a qual nos indica a seguinte relação entre a tensão de entrada e a tensão de saída do circuito integrador:

$$V_{opp} = \frac{V_{ipp}}{4fRC} \quad (8)$$

$$V_{opp} = \frac{1 \text{ V}_{pp}}{4 \cdot 10 \text{ kHz} \cdot 10 \text{ k}\Omega \cdot 1,5 \text{ nF}} \quad (9)$$

$$V_{opp} = 1,5 \text{ V}_{pp} \quad (10)$$

Da mesma forma, podemos fazer os cálculos para uma frequência de 5 kHz, onde a tensão de entrada foi de 1 V_{pp} e a tensão de saída é dada por:

$$V_{opp} = \frac{V_{ipp}}{4fRC} \quad (11)$$

$$V_{opp} = \frac{1 \text{ V}_{pp}}{4 \cdot 5 \text{ kHz} \cdot 10 \text{ k}\Omega \cdot 1,5 \text{ nF}} \quad (12)$$

$$V_{opp} = 3,3 \text{ V}_{pp} \quad (13)$$

Ao aplicarmos um sinal de entrada de 1 V_{pp} e uma frequência de 5 kHz , podemos observar na Figura 5 que a tensão de saída do circuito é de $3,1\text{ V}_{pp}$, o que confirma mais uma vez o comportamento do circuito integrador, visto que essa diferença entre os valores pode ser atribuída a fatores como tolerância dos componentes, ruído entre outras variáveis.

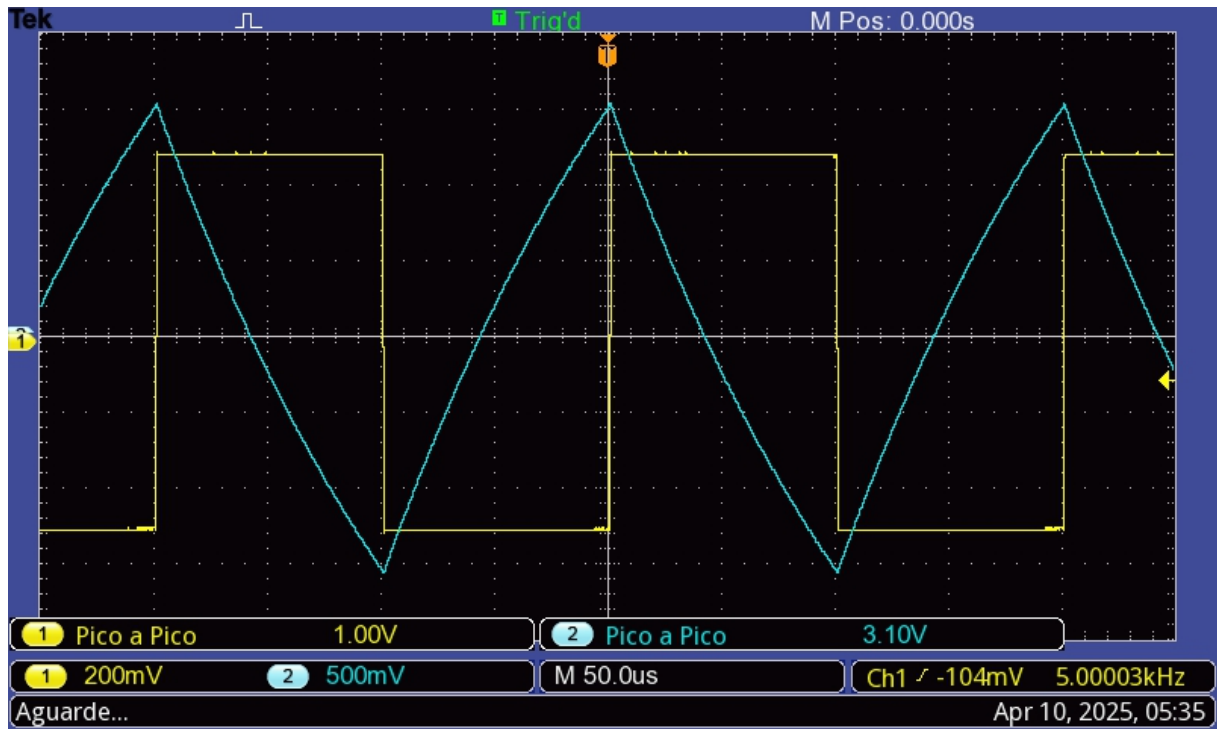


Figura 5: Sinal de entrada de 5 kHz e 1 V_{pp} .

Sendo assim, podemos comprovar que o circuito integrador se comporta como um filtro passa-baixa, com um ganho de -20 dB/decada , para frequências superiores a f_c , e como um amplificador inversor de -20 dB para frequências inferiores a f_c . Além disso, podemos notar que quanto mais perto da frequência de corte, maior a diferença entre os valores teóricos e práticos, o que pode ser atribuído ao fato de que perto dessa região o circuito começa a apresentar perdas de sinal, e o capacitor começa a se comportar como um curto, o que pode gerar uma diferença entre os valores teóricos e práticos.

3.2 Circuito Diferenciador

O circuito utilizado nesta etapa da atividade prática é um amplificador operacional, o mesmo utilizado na etapa anterior, configurado como diferenciador. Ele é composto por um capacitor na entrada e um resistor na malha de realimentação negativa. Essa configuração é mostrada na Figura 6.

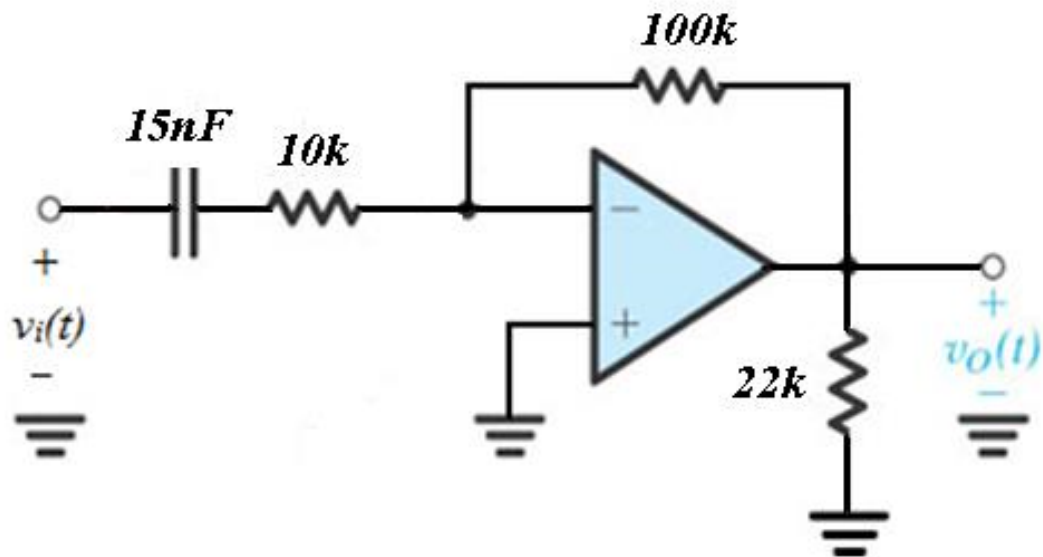


Figura 6: Circuito diferenciador com AmpOp e pinagem do CI.

Inicialmente, foi realizado o cálculo da frequência de corte teórica do circuito, considerando os valores dos componentes utilizados. O resistor utilizado foi de $10\text{ k}\Omega$, e o capacitor foi de 15 nF . A frequência de corte do circuito diferenciador é dada pela relação:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (14)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot 10\text{ k}\Omega \cdot 15\text{ nF}} \quad (15)$$

$$f_c = 1061\text{ Hz} \quad (16)$$

Dessa forma, temos que teoricamente, o circuito diferenciador deve apresentar um ganho de -3 dB na frequência de 1061 Hz . Para frequências superiores a f_c , o circuito deve se comportar como um amplificador inversor, enquanto para frequências inferiores, o circuito deve se comportar como um filtro passa-alta, com um ganho de -20 dB/decada .

Juntamente disso, foi realizada a montagem do circuito diferenciador, conforme a Figura 6. O circuito foi alimentado com tensões de $+12\text{ V}$ e -12 V , e o sinal de entrada foi uma onda quadrada de 1 V_p . A partir disso, foi ajustada a frequência do sinal de entrada até que a tensão de saída do circuito fosse reduzida a $0,707\text{ V}_p$. Essa frequência corresponde à frequência de corte do circuito diferenciador, como pode ser observado na Figura 7.

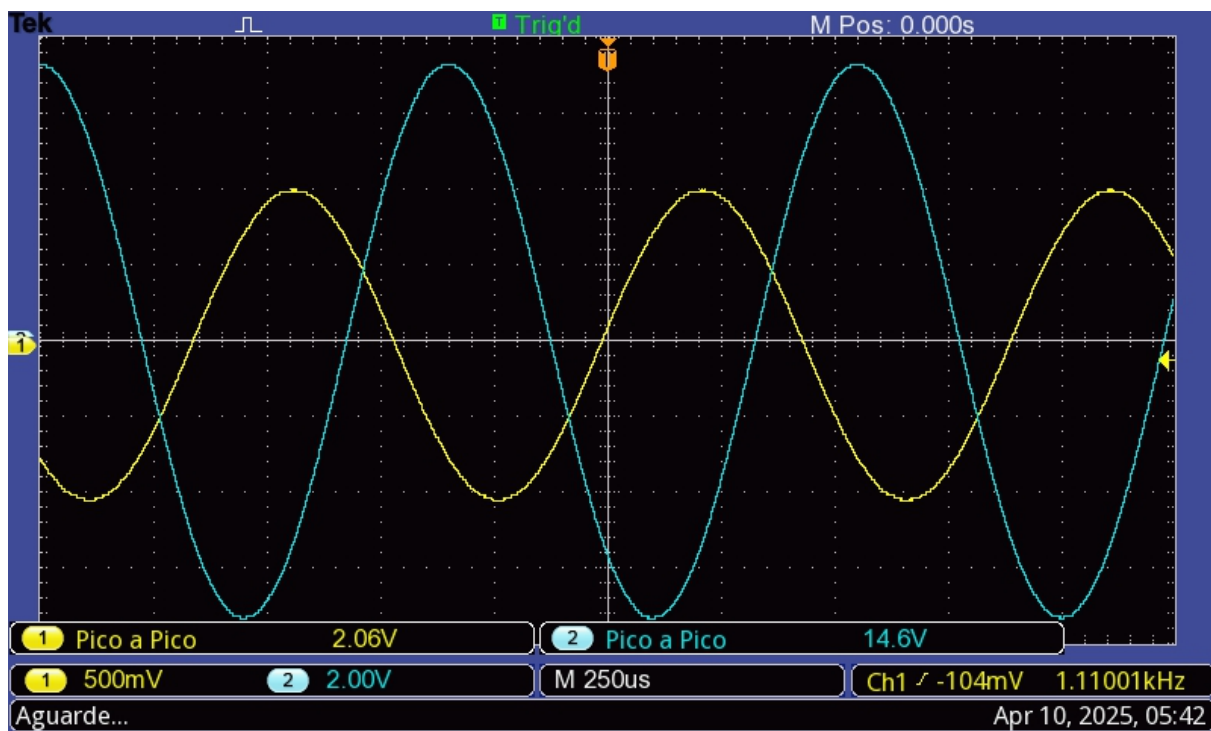


Figura 7: Frequência de corte medida do circuito diferenciador.

Onde obtivemos a seguinte relação entre a frequência de corte calculada e a frequência de corte medida:

Tabela 2: Frequência de corte do circuito diferenciador.

Parâmetro	Teórico	Prático
f_c	1061 Hz	1110 Hz

Pode-se observar que a frequência de corte medida está próxima da frequência de corte teórica, o que indica que o circuito está funcionando conforme o esperado, a diferença entre os valores pode ser atribuída a fatores como tolerância dos componentes, ruído e offset de entrada do amplificador operacional.

Sendo assim, se aplicarmos um sinal de entrada com frequência maior que a frequência de corte, o circuito se comporta como um amplificador inversor, como pode ser observado na Figura 8. Para isso, foi utilizado um sinal de entrada de 1 Vpp e uma frequência de 10 vezes maior que a frequência de corte, ou seja, 11 kHz. A tensão de saída do circuito foi medida e comparada com a tensão de entrada, como pode ser observado na Figura 8.

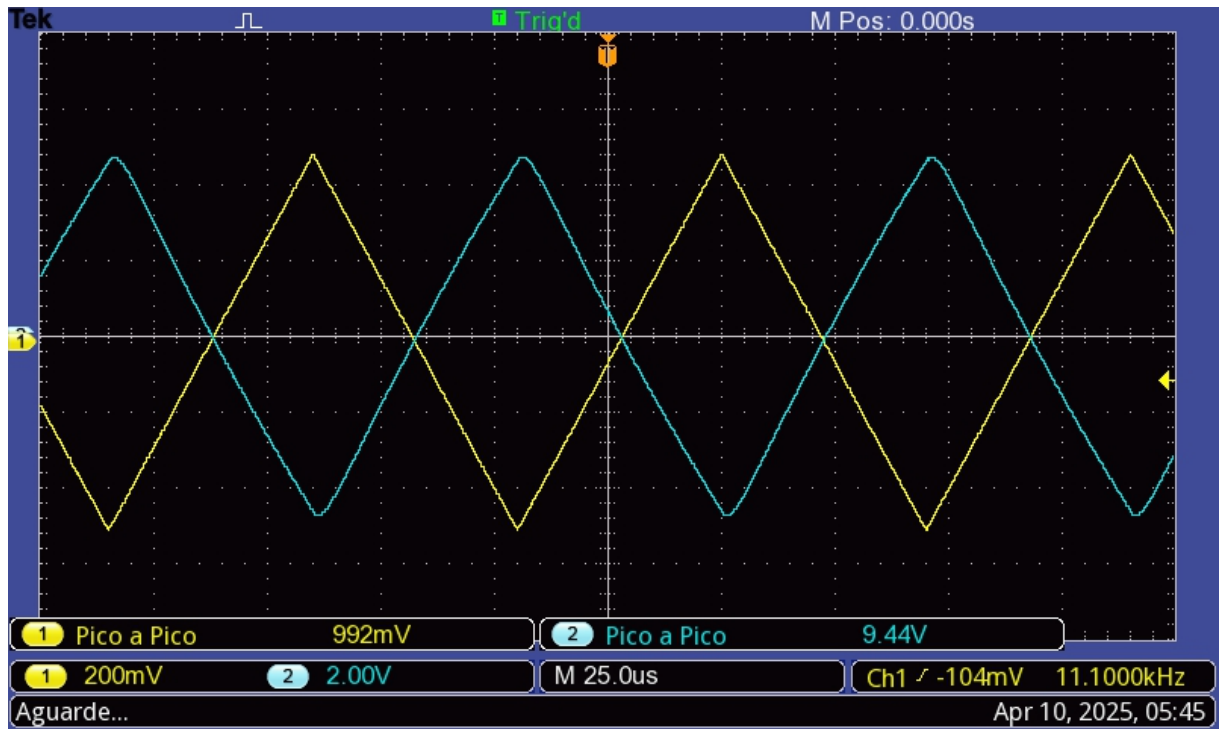


Figura 8: Sinal de entrada de 11 kHz e 1 V_{pp}.

Nesse caso, temos que tensão de saída foi de 9,4 V_{pp}, o que confirma que o circuito se comporta como um amplificador inversor, visto que a relação entre a tensão de entrada e a tensão de saída do circuito diferenciador, para frequências superiores a f_c , é de -20 dB .

Agora, se pegarmos esse mesmo sinal triangular de entrada e alterarmos a frequência dele para a 10 vezes menor que a frequência de corte, ou seja, 100 Hz, podemos observar na Figura 9 que a forma de onda da saída do circuito é a derivada do sinal de entrada, o que confirma o funcionamento do circuito diferenciador.

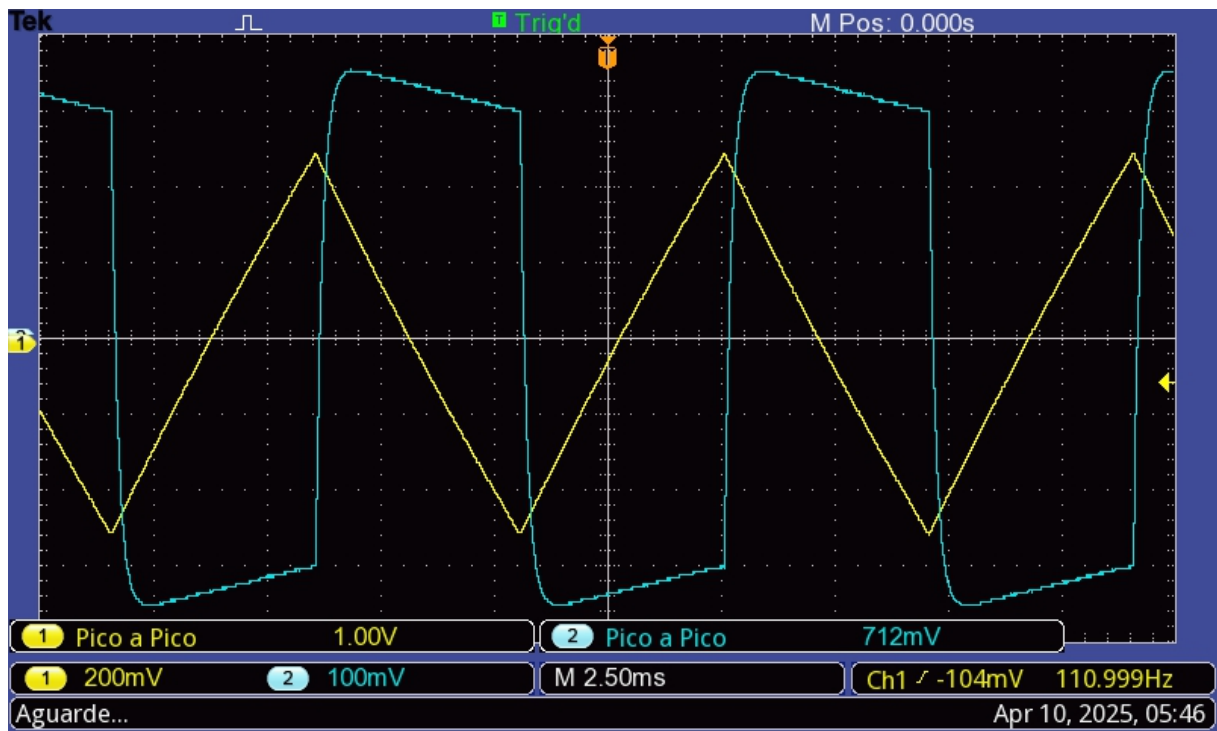


Figura 9: Sinal de entrada de 100 Hz e 1 V_{pp}.

Da mesma forma que no circuito integrador, podemos observar que a resposta em frequência do circuito diferenciador é dada pela relação entre a tensão de entrada e a tensão de saída do circuito, que para frequências superiores a f_c é igual $20\log_{10}(\frac{R_f}{R})$, e para frequências inferiores a f_c é igual a -20 dB/decada .

4 Conclusão

A prática permitiu analisar o comportamento de circuitos com amplificadores operacionais configurados como integrador e diferenciador, destacando suas respostas em frequência. O integrador atuou como um filtro passa-baixa, atenuando os sinais de alta frequência e mantendo o ganho elevado para baixas frequências. Já o diferenciador demonstrou um comportamento inverso, funcionando como um filtro passa-alta, com ganho crescente conforme a frequência aumenta, até atingir uma limitação imposta pelas características reais dos componentes.

Na região próxima à frequência de corte, observamos que o desempenho ideal previsto em teoria começa a ser comprometido. Para o integrador, essa transição marca o início da queda de ganho, o que reduz a resposta a sinais mais rápidos. Apesar disso, o circuito ainda opera de forma estável, apenas com menor amplitude. Por outro lado, no diferenciador, a região da frequência de corte representa um ponto crítico: além de amplificar o sinal desejado, o circuito também amplifica ruídos de alta frequência e pode facilmente atingir saturação, tornando-se instável.

Esses efeitos são consequência das limitações práticas dos amplificadores operacionais, como o slew rate, a largura de banda finita e a resposta em frequência não ideal. No diferenci-

ador, o capacitor na entrada intensifica a sensibilidade a variações abruptas, tornando o circuito vulnerável a oscilações e ruídos. No integrador, o resistor de entrada e o capacitor no feedback suavizam o sinal, conferindo maior robustez ao circuito em situações práticas.

Portanto, ao projetar filtros ativos com amplificadores operacionais, é essencial considerar o comportamento próximo à frequência de corte. Ignorar esses efeitos pode levar a distorções indesejadas ou até falhas no sistema. A análise experimental reforça a importância de ajustes finos nos componentes e da consideração das especificações reais dos operacionais para garantir um desempenho confiável em aplicações reais.

Referências

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Eletrônica: Teoria e Aplicações**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

MALVINO, A. P.; BATES, D. J. **Eletrônica: volume 2**. São Paulo: Makron Books, 2007.