

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA CAPACITÂNCIA DE FOTODIÓDOS EM AMPLIFICADORES DE TRANSIMPEDÂNCIA

Sanny Souza Marques (UFS) E-mail: sannysmarques@hotmail.com

Gustavo Moreira Lessa (UFPE) E-mail: gml3@cin.ufpe.br

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise da influência da capacitância associada a fotodiodos no desempenho de amplificadores de transimpedância, com ênfase na resposta em frequência, estabilidade e comportamento dinâmico. Os resultados demonstram, quantitativamente, que o aumento da capacitância do fotodiodo compromete significativamente a largura de banda e a estabilidade de amplificadores, especialmente quando utilizados componentes de uso genérico. A comparação com amplificadores dedicados evidencia um compromisso direto entre desempenho e custo, permitindo identificar limites práticos dessa aplicação.

Palavras-chave: Fotodiodo, capacitância, transimpedância, amplificador operacional.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF PHOTODIODE CAPACITANCE ON TRANSIMPEDANCE AMPLIFIERS

Abstract: This work presents an analysis of the influence of photodiode-associated capacitance on the performance of transimpedance amplifiers, with emphasis on frequency response, stability, and dynamic behavior. The results demonstrate quantitatively that increasing photodiode capacitance significantly degrades the bandwidth and stability of amplifiers, especially when using general-purpose components. A comparison with dedicated amplifiers highlights a direct trade-off between performance and cost, allowing the identification of practical application limits for this approach.

Keywords: Photodiode, capacitance, transimpedance, operational amplifier.

1. Introdução

Amplificadores de transimpedância (TIAs) são amplamente utilizados em sistemas de aquisição de sinais baseados em sensores de corrente, como fotodiodos, convertendo correntes de baixa amplitude em níveis de tensão adequados (GRAEME, 1996). Essa topologia é fundamental em aplicações de comunicações ópticas e instrumentação biomédica (STRASSE, 2020).

Embora em determinadas aplicações utilize-se o sinal em corrente contínua, em outros contextos, como detecção sensível à fase ou detectores de interrupção de feixe, o sinal de interesse é localizado em frequências mais elevadas. Nesses casos, a preservação da componente AC e a rejeição de offsets são fundamentais para a obtenção de uma relação sinal-ruído superior (MEADE, 1983).

Devido à presença da junção pn , o fotodiodo apresenta capacitância parasita intrínseca proporcional à sua área ativa. Em aplicações que demandam maior sensibilidade, o uso de dispositivos maiores implica aumento dessa capacitância, o que degrada a resposta em frequência e compromete a estabilidade do TIA (ATEF, 2015).

Para mitigar esses efeitos, existem amplificadores operacionais dedicados a aplicações de

transimpedância, os quais incorporam técnicas específicas de compensação de frequência, elevada largura de banda e baixo ruído de corrente. Embora essas soluções ofereçam desempenho superior, seu custo elevado e, em alguns casos, sua limitada disponibilidade podem inviabilizar sua utilização em aplicações nas quais a relação custo-benefício é um fator determinante.

Como alternativa, amplificadores operacionais de uso geral e baixo custo podem ser empregados, desde que atendam a requisitos mínimos, como baixa corrente de polarização e tensão de offset reduzida. Essa abordagem, contudo, impõe limitações importantes, especialmente em relação à estabilidade e largura de banda.

Dessa forma, é relevante quantificar os limites práticos do uso de amplificadores operacionais de baixo custo em TIAs. Este trabalho realiza uma análise comparativa, por meio de simulações computacionais, do impacto da capacitância do fotodiodo no desempenho do circuito, confrontando dispositivos de uso geral com amplificadores dedicados, a fim de avaliar os compromissos entre custo, estabilidade e largura de banda.

2. Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho é baseada em simulações computacionais, realizadas no *software LTspice*. Essa abordagem permite analisar o circuito nos domínios da frequência e do tempo, isolando o efeito da capacitância no desempenho do TIA.

Entretanto, os resultados obtidos estão sujeitos às limitações inerentes aos modelos adotados. Em particular, efeitos não ideais presentes em implementações físicas, como ruído, variações de temperatura e tolerâncias de componentes, não são considerados. Dessa forma, os resultados apresentados devem ser interpretados como uma análise teórica e comparativa, sendo a validação experimental um passo futuro relevante para a consolidação das conclusões.

2.1 Modelagem do Fotodiodo

Para a realização das simulações, foi adotado o modelo equivalente clássico de um fotodiodo, amplamente descrito na literatura (RAZAVI, 2013). O circuito equivalente completo do dispositivo é ilustrado na Figura 1.

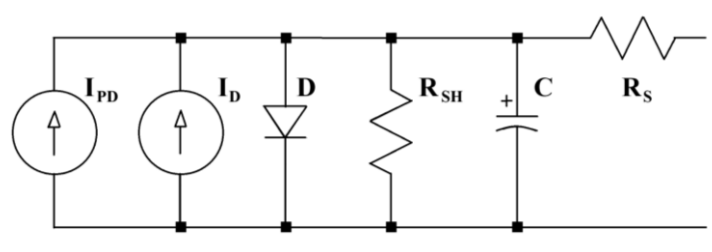


Figura 1 – Circuito equivalente do fotodiodo.

A fonte de corrente I_{PD} representa a corrente fotogerada, proporcional à intensidade luminosa. O diodo D modela a junção pn do fotodiodo. A capacitância de junção C está associada à região de depleção e exerce influência direta sobre a resposta em frequência e a estabilidade de TIAs. Ela depende, além de outros fatores, da tensão de polarização reversa aplicada ao fotodiodo, podendo ser reduzida por meio do aumento dessa tensão, o que resulta em maior largura de banda e tempos de resposta menores.

Considerando o escopo deste trabalho, alguns parâmetros do modelo foram desconsiderados, uma vez que seus efeitos são pouco relevantes para a análise de

estabilidade e resposta em frequência do TIA. Em particular, a corrente de escuro I_D , valor gerado na ausência de luz, afeta o nível de *offset*, mas não exerce influência significativa na dinâmica em frequência. A resistência de *shunt* R_{SH} pode ser desprezada considerando seu típico valor elevado em fotodiodos comerciais. De forma similar, a resistência em série R_S , associada às conexões e aos fios, tende a ser muito pequena e também pode ser desconsiderada.

Dessa forma, o modelo do fotodiodo foi simplificado para uma fonte de corrente ideal em paralelo com uma capacitância variável, preservando os elementos dominantes para a análise proposta.

2.2 Configuração do Amplificador de Transimpedância

A Figura 2 apresenta a configuração do TIA utilizada nas simulações deste trabalho.

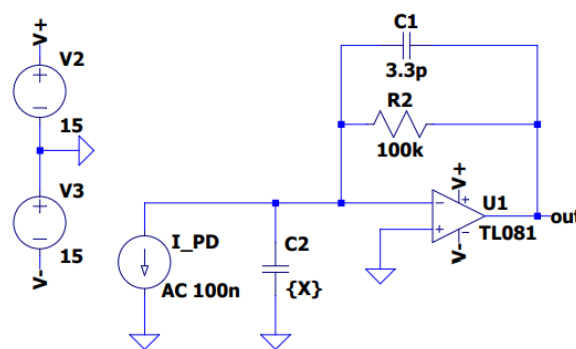


Figura 2 – Configuração do amplificador de transimpedância utilizado nas simulações.

O circuito opera no modo fotocondutivo, no qual o fotodiodo é polarizado reversamente. Essa configuração é amplamente empregada em aplicações que exigem maior largura de banda, uma vez que a polarização reversa reduz a capacitância de junção do fotodiodo, resultando em tempos de resposta menores e melhor desempenho em altas frequências (GRAEME, 1996).

A corrente gerada pelo fotodiodo I_{PD} é convertida em tensão por meio da resistência de realimentação R_2 , estabelecendo, no regime ideal, a relação linear

$$V_{OUT} = - I_{PD} \cdot R_2. \quad (1)$$

A capacitância de realimentação C_1 é empregada como elemento de compensação do TIA, tendo como principal função garantir a estabilidade da malha de realimentação frente à presença da capacitância de entrada e das capacitâncias parasitas do amplificador operacional.

Ressalta-se que a inclusão de C_1 não elimina os efeitos da capacitância de entrada, mas estabelece uma condição mínima de estabilidade, permitindo avaliar de forma realista os limites práticos de operação do circuito. Dessa forma, a análise realizada neste trabalho considera o comportamento do amplificador mesmo sob compensação, refletindo cenários típicos de projeto.

Além disso, a capacitância introduz um comportamento equivalente a um filtro passa-baixas, cuja frequência de corte f_c pode ser aproximada por

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R_2 \cdot C_1}, \quad (2)$$

sendo R_2 e C_1 resistência e capacitância de realimentação no circuito.

Neste trabalho, os valores de R_2 e C_1 foram escolhidos de modo a estabelecer uma frequência de corte em torno de 482 kHz, buscando preservar uma parcela significativa do conteúdo espectral de interesse. Para abranger diferentes condições de operação, foram analisadas especificações típicas de fotodiodos comerciais e níveis de iluminação realistas. Com tais dados, definiu-se que a corrente de entrada a ser utilizada deveria manter-se no intervalo de 100 nA a 50 μ A.

2.3 Definição da Capacitância de Entrada

A capacitância de entrada no TIA foi variada de forma paramétrica ao longo das simulações. Para a definição do intervalo de análise, foram considerados valores típicos reportados em fotodiodos comerciais, abrangendo desde capacitâncias da ordem de poucos picofarads, características de dispositivos de pequena área ativa operando sob alta polarização reversa, até valores mais elevados, associados a fotodiodos de maior área ativa, com baixa tensão de polarização e na presença de capacitâncias parasitas adicionais no circuito de entrada.

Dessa forma, foram adotados valores de capacitância de 1 pF, 10 pF, 100 pF, 300 pF, 500 pF, 1 nF e 5 nF, de modo a cobrir, de forma abrangente, diferentes regimes de operação.

2.4 Amplificadores Operacionais Avaliados

Com o objetivo de comparar o desempenho de TIAs implementados com dispositivos de diferentes classes e custos, foram selecionados três amplificadores operacionais, cujas principais características relevantes para esta aplicação são apresentadas na Tabela 1. Os parâmetros escolhidos incluem o produto ganho-largura de banda, a corrente de polarização de entrada, corrente e tensão de *offset* e custo médio, por serem diretamente relacionados à estabilidade, precisão e viabilidade do uso.

Tabela 1 – Comparação entre amplificadores operacionais avaliados.

Parâmetro	TL081	OPA320	OPA380
Ganho-largura de banda (GBW)	3 MHz	20 MHz	90 MHz
Corrente de polarização de entrada	30 pA	0,2 pA	3 pA
Tensão de <i>offset</i> de entrada	3 mV	40 μ V	4 μ V
Corrente de <i>offset</i> de entrada	5 pA	0,2 pA	6 pA
Custo médio	R\$ 1,31	R\$ 24,03	R\$ 27,71

Fonte: Autoria própria com base nos dados apresentados nas referências, março de 2025.

Os valores de custo correspondem a estimativas médias obtidas em distribuidores comerciais online em janeiro de 2026. O TL081 representa uma solução de uso geral e baixo custo, amplamente disponível. Embora não seja projetado para aplicações de

transimpedância em altas frequências, sua baixa corrente de polarização permite seu uso em aplicações de baixa corrente e requisitos moderados de largura de banda.

Por outro lado, os amplificadores OPA320 e OPA380 são projetados para aplicações com sensores de corrente, apresentando maior produto ganho-largura de banda (GBW), além de baixos valores de offset. Essas características resultam em maior precisão e melhor estabilidade, mesmo na presença de capacitâncias de entrada elevadas.

Em TIAs, a largura de banda efetiva não é definida apenas pelo GBW do amplificador, sendo limitada pela interação entre a resistência de realimentação e a capacitância total de entrada. O aumento dessa capacitância introduz polos adicionais na malha, reduzindo a largura de banda e a margem de fase. Assim, o desempenho pode ser significativamente inferior ao previsto pelo GBW, tornando sua escolha um fator crítico de projeto.

2.5 Análises Realizadas

Foram realizadas simulações no domínio da frequência e no domínio do tempo, com o objetivo de avaliar o desempenho dinâmico e a estabilidade do amplificador de transimpedância sob diferentes valores de capacitância de entrada.

A análise da resposta em frequência foi conduzida por meio de simulações AC de pequenos sinais, permitindo a obtenção dos diagramas de Bode de magnitude e fase do circuito. Nessas simulações, a capacitância foi variada de forma paramétrica, possibilitando a avaliação de sua influência sobre a largura de banda, o ganho em altas frequências e a margem de fase do sistema.

Adicionalmente, foram realizadas simulações no domínio do tempo utilizando sinais de corrente senoidais, com o objetivo de ilustrar o comportamento dinâmico do amplificador em condições práticas. Nessa etapa, foi adotado um valor fixo de capacitância, enquanto a frequência do sinal foi variada, permitindo a comparação direta da resposta do circuito em diferentes condições de operação.

A análise DC não foi considerada, uma vez que a capacitância de entrada não exerce influência sobre o comportamento estático do circuito.

3. Resultados e Discussão

3.1 Resposta em frequência

Foram obtidos os diagramas de Bode de magnitude e fase do TIA a partir de uma análise em regime de pequenos sinais, considerando uma corrente de entrada equivalente a 10 μA . Esse valor foi escolhido por representar uma condição típica de iluminação média em aplicações práticas, dentro da faixa de operação previamente definida. Para o ganho adotado, espera-se uma tensão de saída de aproximadamente 1 V, correspondente a 0 dB no diagrama de magnitude.

A Figura 3 apresenta o diagrama de magnitude da resposta em frequência do TIA implementado com o amplificador operacional TL081, para diferentes valores de capacitância de entrada. Observa-se que, para valores reduzidos de capacitância, 1 pF e 10 pF (azul escuro e verde claro, respectivamente), a resposta em frequência permanece relativamente estável.

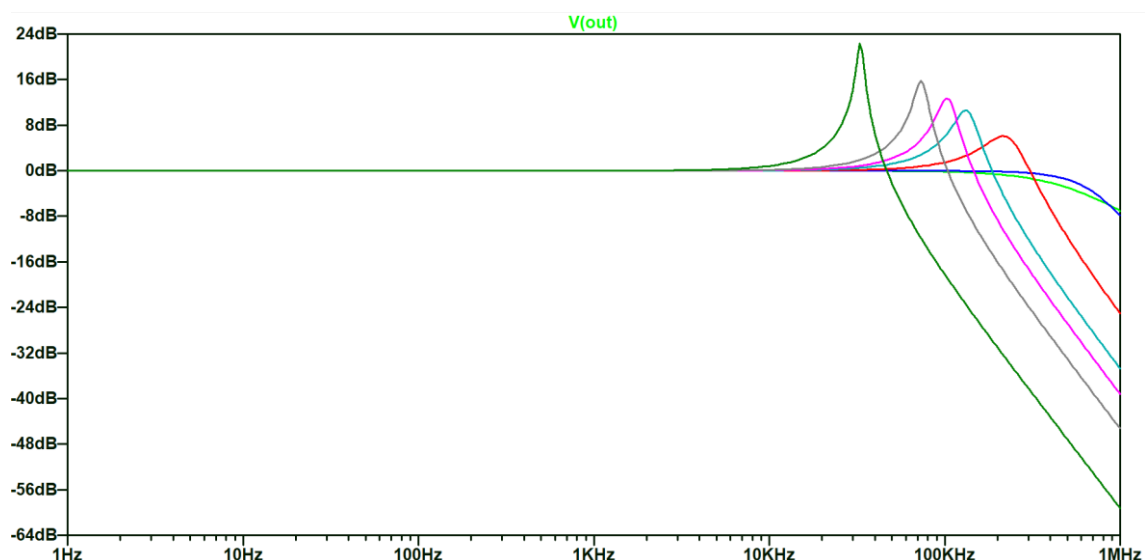


Figura 3 – Diagrama de magnitude para diferentes valores de capacitância de entrada utilizando o TL081.

Entretanto, à medida que a capacitância aumenta, ocorre o surgimento de picos de ganho em altas frequências. Para a maior capacitância analisada (verde escuro), observa-se um pico de aproximadamente 22,1 dB em 33,2 kHz, equivalente a um aumento de cerca de 13 vezes na amplitude, caracterizando comportamento ressonante e proximidade de instabilidade. Ademais, a Figura 4 apresenta o diagrama de fase correspondente à configuração com o TL081. Para o maior valor de capacitância analisado (verde escuro), a fase atinge aproximadamente 180° em torno de 70 kHz, o que caracteriza uma condição crítica de estabilidade, com margem de fase reduzida e elevada suscetibilidade a oscilações.

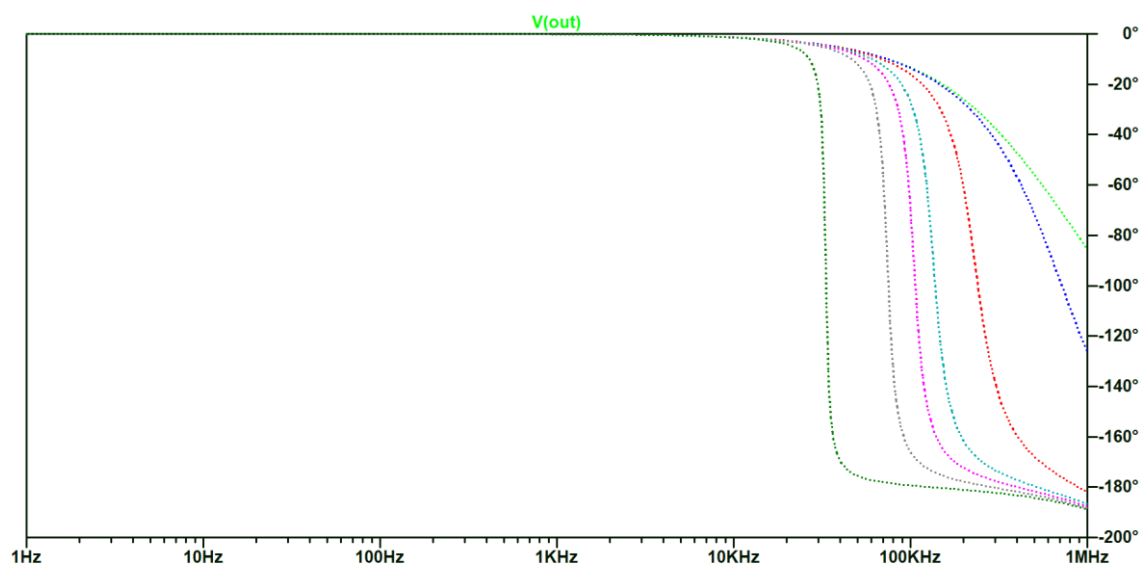


Figura 4 – Diagrama de fase para diferentes valores de capacitância de entrada utilizando o TL081.

Esses comportamentos estão diretamente associados à interação entre a capacitância de entrada e o produto ganho-largura de banda limitado do amplificador operacional, que resulta na introdução de polos adicionais na malha de realimentação. Esse efeito implica que amplificadores de uso geral, como o TL081, tornam-se inadequados para aplicações

envolvendo fotodiodos com capacitâncias moderadas ou elevadas, especialmente em sistemas que operam em frequências mais altas, podendo levar à amplificação indesejada de ruído e até à oscilação do circuito.

Em contrapartida, no caso do OPA380, como mostra a Figura 5, observa-se uma resposta significativamente mais estável frente ao aumento da capacitância, com menor redução da largura de banda e picos de ganho mais controlados.

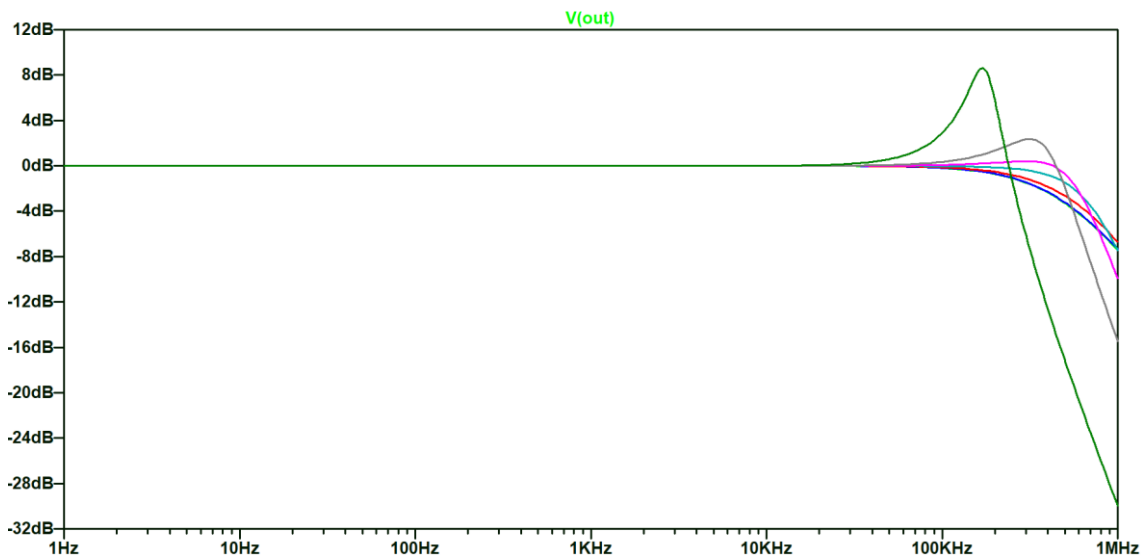


Figura 5 – Diagrama de magnitude para diferentes valores de capacitância de entrada utilizando o OPA380.

Para o maior valor de capacitância analisado (verde escuro), identifica-se um pico de aproximadamente 8,6 dB na frequência de 170 kHz. Esse valor corresponde a um aumento de amplitude de aproximadamente 2,6 vezes, indicando uma resposta ressonante significativamente menos pronunciada e maior robustez da malha de realimentação. Já a Figura 6 apresenta o diagrama de fase correspondente à configuração com o OPA380. A fase, por sua vez, atinge aproximadamente 180° apenas em torno de 1 MHz, indicando uma margem de fase significativamente superior à observada no TL081, mesmo na presença de capacitâncias elevadas.

Esse comportamento evidencia a eficácia de amplificadores projetados especificamente para aplicações de transimpedância, cuja arquitetura interna é otimizada para lidar com capacitâncias de entrada elevadas. Na prática, isso se traduz em maior previsibilidade do comportamento do circuito, menor necessidade de ajustes finos de compensação e maior robustez frente a variações de componentes e condições de operação.

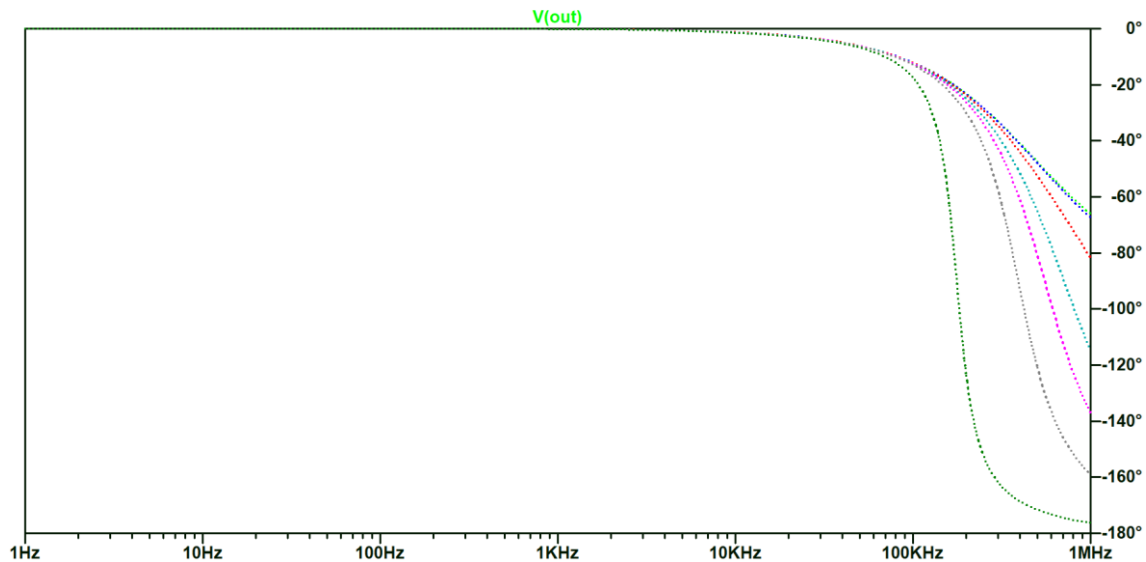


Figura 6 – Diagrama de fase para diferentes valores de capacitância de entrada utilizando o OPA380.

3.2 Domínio do tempo

As simulações no domínio do tempo foram realizadas com o objetivo de avaliar o comportamento do TIA frente a sinais senoidais em condições representativas de operação. Para isso, foi aplicada uma corrente de entrada senoidal com amplitude de 1 μA , enquanto a frequência do sinal foi variada em três valores: 50 kHz, 100 kHz e 200 kHz.

A fim de simplificar a análise e isolar os efeitos dinâmicos associados à largura de banda e à estabilidade do circuito, foi fixado um único valor de capacitância, de 100 pF. Esse valor foi escolhido por representar uma condição na qual os efeitos da capacitância do fotodiodo tornam-se perceptíveis, conforme indicado pela análise em frequência, além de representar um valor facilmente encontrado em circuitos com fotodiodos.

Nessa etapa, o sinal de corrente de entrada está representado pelo traço rosa, V_{out} (verde) corresponde à saída do circuito com o amplificador TL081, $V_{\text{out}2}$ (azul) à saída do circuito com OPA380 e $V_{\text{out}3}$ (vermelho) à saída do circuito com OPA320.

A Figura 7 apresenta as respostas dos circuitos para o sinal de entrada com frequência de 50 kHz. Observa-se que, nessa condição, os três amplificadores analisados apresentam respostas bastante semelhantes, com amplitudes próximas ao valor nominal esperado de 100 mV. O TL081 apresenta uma tensão máxima de aproximadamente 104 mV, resultando em um erro relativo de cerca de 4%, ainda aceitável para aplicações de baixa exigência em frequência. Por outro lado, os amplificadores OPA380 e OPA320 mantêm-se próximos ao valor esperado de 100 mV.

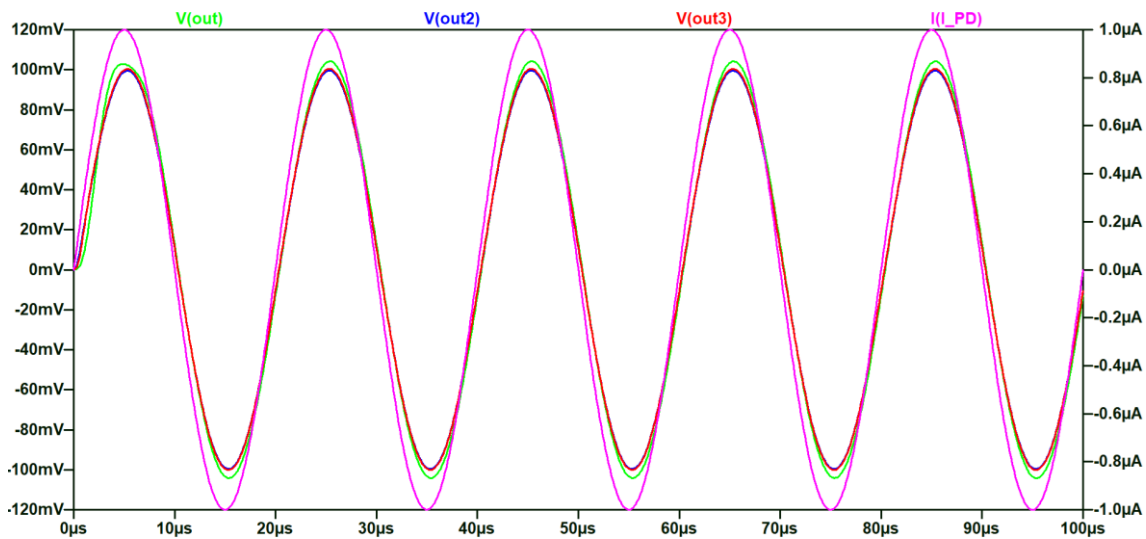


Figura 7 – Resposta para uma corrente senoidal de entrada de amplitude de 1 μA e frequência de 50 kHz.

Na frequência de 100 kHz, apresentada na Figura 8, há um aumento significativo na diferença entre as respostas dos amplificadores. O TL081 atinge uma tensão máxima de aproximadamente 118,8 mV, passando a aproximadamente 18% de erro relativo.

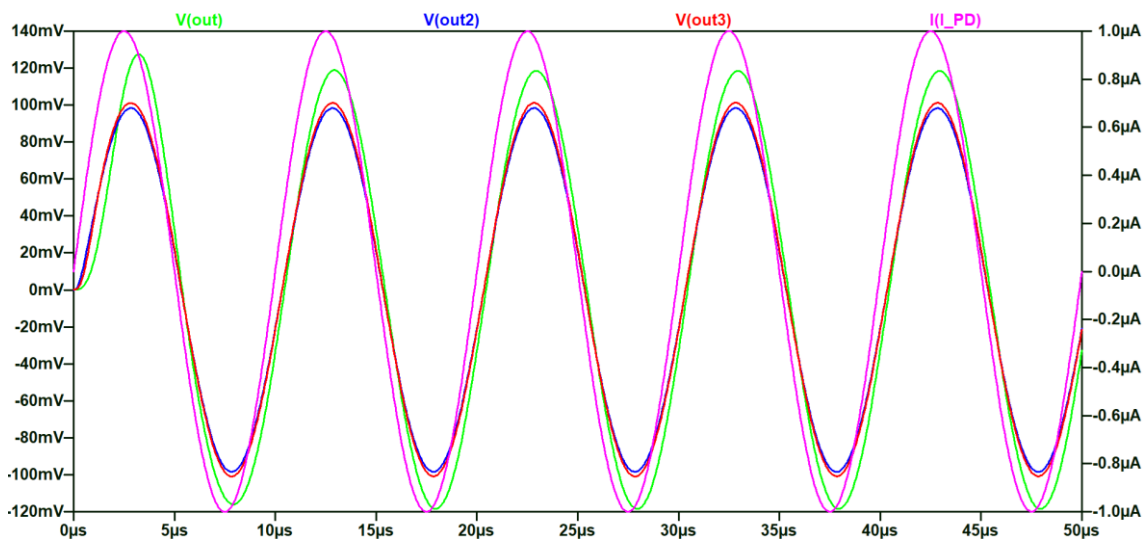


Figura 8 – Resposta para uma corrente senoidal de entrada de amplitude de 1 μA e frequência de 100 kHz.

Para a frequência de 200 kHz, apresentada na Figura 9, a degradação do desempenho do TL081 torna-se severa. A tensão de saída atinge aproximadamente 195,7 mV, enquanto os amplificadores dedicados mantêm amplitudes próximas ao valor esperado. Nesse caso, o erro relativo do TL081 aproxima-se de 95%, além de apresentar maior atraso do sinal, indicando forte amplificação indesejada associada a efeitos ressonantes e perda de estabilidade da malha de realimentação.

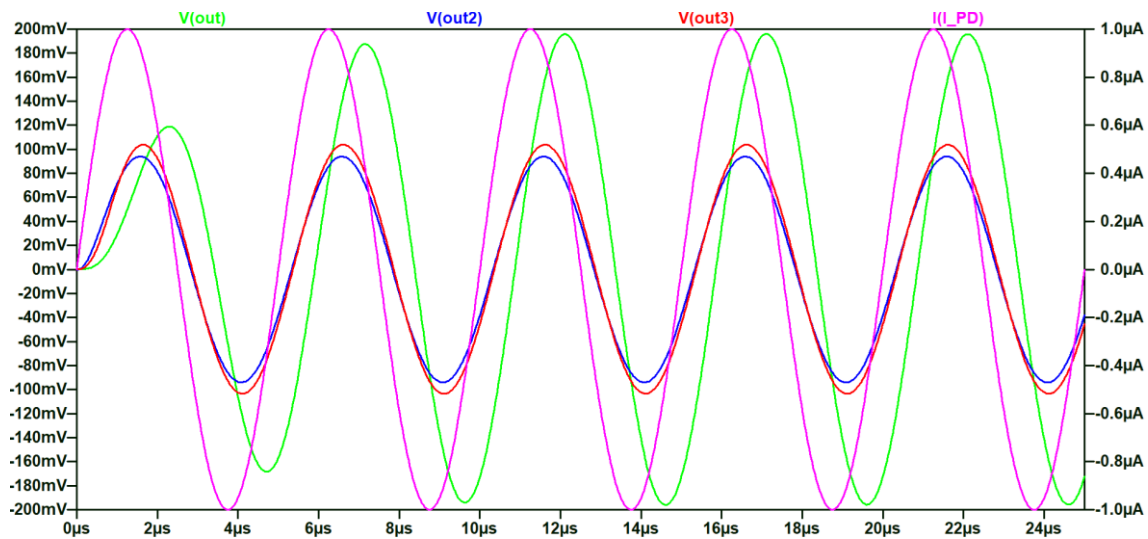


Figura 9 – Resposta para uma corrente senoidal de entrada de amplitude de 1 μA e frequência de 200 kHz.

Esse comportamento decorre diretamente do pico de ganho observado na análise em frequência. A amplificação excessiva do sinal, associada ao aumento do atraso de fase, indica operação em regime próximo à instabilidade. Em aplicações práticas, esse tipo de comportamento compromete severamente a fidelidade do sinal, podendo resultar em saturações e degradação significativa da relação sinal-ruído.

4. Conclusão

Esse trabalho analisou a influência da capacitância de fotodiodos no desempenho de TIAs, com foco na largura de banda, estabilidade e resposta dinâmica. Os resultados obtidos por simulação evidenciam que o aumento da capacitância de entrada provoca redução da largura de banda, surgimento de picos de ganho e diminuição da margem de fase, podendo levar o sistema a condições próximas da instabilidade.

Verificou-se que amplificadores operacionais de uso geral, frequentemente adotados por seu baixo custo, apresentam desempenho adequado apenas em condições restritas, caracterizadas por baixas capacitâncias e frequências moderadas. Em cenários mais exigentes, observa-se degradação significativa da resposta, comprometendo a estabilidade e a fidelidade do sinal. Em contrapartida, amplificadores dedicados a aplicações de transimpedância, embora possam apresentar custos superiores a 18 vezes em relação a dispositivos de uso geral, demonstram maior robustez e previsibilidade, mantendo comportamento estável mesmo na presença de capacitâncias elevadas.

Esses resultados indicam que a escolha do amplificador operacional é um fator crítico de projeto, exigindo a avaliação do compromisso entre custo e desempenho, especialmente em aplicações de maior largura de banda.

Como trabalhos futuros, propõe-se a validação experimental dos resultados, bem como a investigação de técnicas de compensação que permitam ampliar a faixa de operação de amplificadores de baixo custo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

Referências

- ANALOG DEVICES.** *LTspice Simulator*. Disponível em: <https://www.analog.com/ltspice>. Acesso em: 22 dez. 2025.
- BEHZAD RAZAVI.** *Fundamentals of Microelectronics*. Wiley, 2nd edition, 2013.
- JERALD G. GRAEME.** *Photodiode Amplifiers: Op Amp Solutions*. McGraw-Hill, New York, 1996.
- M. ATEF, H. ZIMMERMANN.** *Optical Receiver Concepts for Optical Design*. Springer, 2015.
- M. L. MEADE.** *Lock-in Amplifiers: Principles and Applications*. Peter Peregrinus Ltd, 1983.
- MOUSER ELECTRONICS.** *Distribuidor eletrônico online de componentes*. Disponível em: <https://www.mouser.com>. Acesso em: 6 jan. 2026.
- S. M. SZE, KWOK K. NG.** *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley-Interscience, 3rd edition, 2006.
- TEXAS INSTRUMENTS.** *TL081 JFET-Input Operational Amplifier Datasheet*. Texas Instruments, 2023.
- TEXAS INSTRUMENTS.** *OPA320 Precision Operational Amplifier Datasheet*. Texas Instruments, 2024.
- TEXAS INSTRUMENTS.** *OPA380 Transimpedance Amplifier Datasheet*. Texas Instruments, 2023.
- W. A. D. STRASSE, S. F. PICHORIM, P. NOHAMA.** *Funcionamento e aplicabilidade do fotodiodo na engenharia biomédica*. Revista Kur'yt'yba, 1:1–10, 2020.