

# Análise de topologias para concepção de um receptor voltado à comunicação por luz visível

Guilherme Silveira  
Centro de Tecnologia  
Universidade Federal de Santa Maria  
Santa Maria, Brasil  
guilherme.silveira@acad.ufsm.br

Vitor Padoin  
Centro de Tecnologia  
Universidade Federal de Santa Maria  
Santa Maria, Brasil  
vitor.padoin@acad.ufsm.br

Schaiane Machado  
Centro de Tecnologia  
Universidade Federal de Santa Maria  
Santa Maria, Brasil  
schaiane.machado@acad.ufsm.br

Ramon Panazollo  
Centro de Tecnologia  
Universidade Federal de Santa Maria  
Santa Maria, Brasil  
ramon.panazollo@acad.ufsm.br

Lucas Teixeira  
Colégio Técnico Industrial de Santa  
Maria  
Universidade Federal de Santa Maria  
Santa Maria, Brasil  
lucas.teixeira@ufsm.br

Marco A. Dalla Costa  
Centro de Tecnologia  
Universidade Federal de Santa Maria  
Santa Maria, Brasil  
marcodc@gdre.ufsm.br

**Resumo**— A comunicação por luz visível (VLC - Visible Light Communication) é uma tecnologia que está cada vez mais presente em diversas aplicações. Para que haja o enlace de comunicação VLC, há a necessidade de um circuito transmissor e de um circuito receptor. O primeiro é composto pela fonte emissora de luz, em que a corrente elétrica é modulada, implicando na modulação da luz emitida; enquanto o segundo, converte o sinal óptico recebido para um sinal elétrico. No entanto, existe a necessidade de amplificar o sinal elétrico obtido para melhor processamento em sistemas digitais. Em questão disso, o presente trabalho compara três tipos de topologias, com amplificador realimentado em tensão (VF - *Voltage Feedback*), amplificador realimentado em corrente (CF - *Current Feedback*), e amplificador dedicado, ambas empregadas em circuitos receptores voltados para a comunicação por luz visível, em que foram analisados o ganho e a largura de banda. São apresentadas as justificativas de escolhas dos principais componentes do circuito receptor, como dos três modelos de amplificadores empregados. Na sequência, a topologia que utiliza um amplificador operacional realimentado em corrente tem seu desempenho experimentalmente validado, atendendo os requisitos estipulados, alcançando uma largura de banda de 32 MHz para uma transimpedância de 2200 Ohms e capaz de atingir uma largura de banda máxima de 79 MHz para uma transimpedância de 470 Ohms. Por fim, os demais resultados experimentais adquiridos são expostos.

**Palavras-chaves**— Comunicação por Luz Visível, Circuito Receptor VLC, Transimpedância, Instrumentação, Amplificador Operacional, Realimentação em Corrente, Fotodiodo

## I. INTRODUÇÃO

A comunicação por luz visível (VLC - Visible Light Communication) é uma tecnologia caracterizada por conciliar iluminação e comunicação. Essa tecnologia vem sendo indicada para substituição ou complementação das comunicações de curto alcance sem fios em situações com razoável direcionalidade na comunicação. Ela encontra potencial em aplicações médicas, em automação, entre veículos, em ambientes sensíveis a emissões eletromagnéticas e com o espectro magnético de radiofrequência já sobrecarregado para telecomunicações, de realidade aumentada, e localização indoor [1] [2] [3] [4]. Para tal, são utilizadas ondas eletromagnéticas dentro do espectro da luz visível (entre 380 nm e 780 nm) para enviar dados em comunicação sem fios direcionais. Recentemente têm-se dedicado cada vez mais pesquisas nessa área, devido à oportunidade de utilizar maiores larguras de banda na

transmissão de dados usando LEDs, reutilizando a infraestrutura presente nos sistemas de iluminação artificiais e tirando proveito de uma faixa do espectro eletromagnético não-licenciado.

Os elementos principais que compõem o sistema de VLC são o transmissor e receptor, como pode-se observar no esquema apresentado na Fig. 1. O transmissor pode ser uma luminária LED ou um diodo laser (LD - *Laser Diode*), capaz de converter sinais elétricos em sinais luminosos, possibilitando a transmissão de dados a partir de variações da intensidade da luz. Essas variações ocorrem em alta frequência de forma a não serem perceptíveis ao olho humano. O receptor é a parte do sistema que recebe o sinal óptico e o converte em sinal elétrico, para que seja possível recuperar os dados transmitidos. A função principal do sistema é a iluminação; portanto, espera-se que todo o processo de transmissão de dados não impacte de forma negativa seu desempenho, seja afetando eficácia de conversão de energia ou qualidade de iluminação.

No receptor, com o objetivo de detectar as variações de intensidade que representam a informação através da VLC, foi utilizado como sensor de luz um fotodiodo. Este é construído por um diodo (junção P-N) que permite a passagem de corrente elétrica de acordo com o estímulo luminoso incidente na região ativa, sempre que a energia do fóton estiver dentro da banda de sensibilidade característica do semicondutor. Nessa situação, existe corrente reversa na junção P-N, aproximadamente proporcional a intensidade da luz incidente. No entanto, os sinais elétricos convertidos pelo fotodiodo possuem baixa intensidade, tipicamente 10  $\mu$ A para 500 lx de luminância incidente, e por conta disso, há a necessidade de converter para tensão elétrica e amplificá-los para que seja possível o processamento em sistemas digitais, bem como avaliar a dinâmica do sistema de comunicação. Esta etapa de processamento analógico é tipicamente realizada com circuitos que utilizam amplificadores operacionais realimentados em tensão [5] [6] [7] [8], amplificadores operacionais realimentados em corrente ou amplificadores de transimpedância especificamente projetados para esta função.

Por conseguinte, o presente trabalho tem como objetivo apresentar requisitos de projeto e topologias de circuito adequadas para o projeto de um receptor de sinais para VLC. Assim, após a escolha de um sensor de luz, também foram analisadas três topologias de circuitos para instrumentação, a fim de comparar as diferentes respostas dinâmicas, o que está

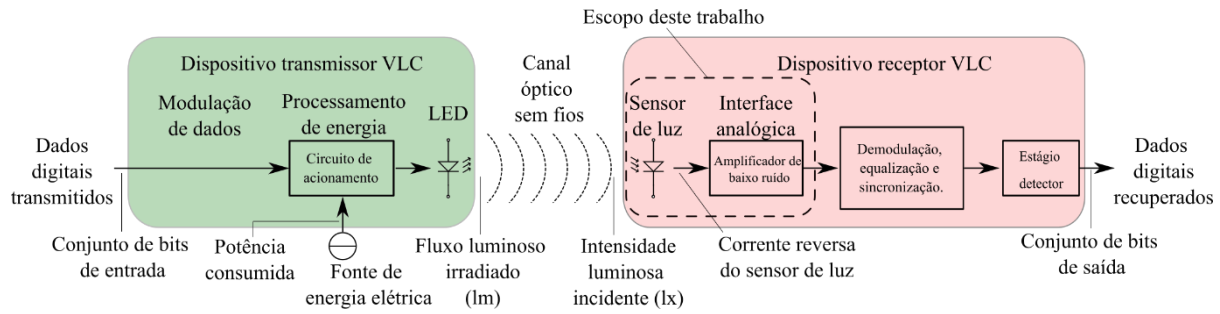


Fig. 1. Visão geral de um enlace de VLC, destaque para os blocos que estão no escopo deste trabalho no receptor

apresentado no capítulo Método. Na sequência, no capítulo Resultados Experimentais, as medições confirmam o desempenho e permitem uma análise focada na construção de um receptor prático. Por fim, em Conclusões, são apresentados os principais resultados e uma síntese de aspectos pertinentes à escolha e a construção de um receptor para sinais usados em VLC.

## II. MÉTODO

As métricas de desempenho estabelecidas para a escolha dos componentes levaram em conta o ganho na conversão (transimpedância) e resposta dinâmica determinada pela frequência de corte do sinal processado. De modo a não limitar a resposta em frequência do sistema de comunicação, definiu-se uma resposta dinâmica, para o circuito receptor, que supere a frequência de corte típica de LEDs recobertos por fósforo (brancos) comumente usados em iluminação de propósito geral. As especificações desejadas para este estágio de conversão entre tensão e corrente são: i. largura de banda mínima de 20 MHz; ii. transimpedância mínima de 2000 Ohms (converter e amplificar sinais de 50  $\mu$ A para 100 mV); iii. rejeição do nível de corrente contínua (DC) e iv. resposta espectral dentro da luz visível.

Em um primeiro momento, foi feita a seleção do sensor de luz, o qual deve atender às especificações estipuladas. Após isso, são apresentadas três topologias de circuitos amplificadores adequados para a conversão de sinais de corrente para tensão, usados como estágio de entrada da parte eletrônica (interface - frontend - analógico) do receptor óptico.

### A. Seleção do Sensor de Luz

Para o receptor implementado buscou-se perceber variações de iluminância entre 100 lx e 500 lx e sinais modulados instantaneamente em profundidade de até 100% (níveis 0 e 500 lx médio e 0 e 1000 lx instantâneos). Desta forma, o receptor escolhido foi o modelo BPW34 da Vishay, apresentado na Fig. 2, por apresentar as especificações desejadas: i. responsividade dentro da faixa de luz visível; ii. largo ângulo de recepção (redução de 50% da corrente gerada ao receber luz com 60° de inclinação); iii. baixa capacitância parasita (cerca de 13 pF com tensão reversa de 15 V); iv. preço compatível com a finalidade que está sendo proposta (US\$ 0,708) e v. tempo de subida e descida compatíveis com a resposta dinâmica desejada.

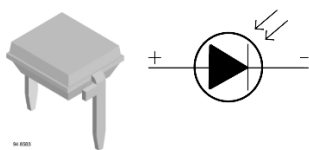


Fig. 2. Fotodiodo BPW34 (esquerda) e o seu símbolo correspondente (direita).

### B. Circuito Eletrônico Interface Analógica

Ao converter sinais ópticos em sinais elétricos, os fotodiodos geram corrente elétrica na ordem de microamperes, o que dificulta a medição direta e conversão analógico-digital, realizado em amperímetros e osciloscópios.

Para transformar os sinais gerados pelo fotodiodo em tensões com magnitudes compatíveis com faixas dinâmicas típicas é necessário um circuito amplificador de transimpedância que tenha dinâmica adequada para o que se espera receber de sinais de comunicação. Circuitos amplificadores bastante sofisticados e com elevado custo no mercado podem ser empregados para garantir que o ponto limitante do receptor não seja a instrumentação. Porém, em casos onde a largura de banda do transmissor é bastante limitada, como acontece em transmissores VLC que utilizam LEDs recobertos por fósforo, não é necessário utilizar fotodiodos e circuitos de amplificação com grande largura de banda, pois boa parte dessa banda não é utilizada.

Tendo em vista essa preocupação, a presente seção traz uma análise de três circuitos amplificadores de transimpedância. Nela são abordados os princípios de operação e são apresentadas simulações elétricas de dois modelos de amplificadores com suas respectivas topologias. Há vários elementos amplificadores, bem como topologias, que podem ser utilizadas para transformar a corrente gerada pelo fotodiodo em tensão e amplificar o sinal para níveis de magnitude desejados. Quando a transimpedância desejada é razoavelmente baixa, menor que 100 Ohms, pode-se utilizar um resistor simples como conversor corrente-tensão. No entanto, para valores maiores, este arranjo simples compromete severamente a dinâmica do sistema, uma vez que a constante de tempo  $\tau$ , formada pela resistência do resistor e pela capacitância intrínseca do fotodiodo, se torna maior.

Outra solução utilizada para esse fim é o amplificador operacional (Op Amp - *Operational Amplifier*) com realimentação de tensão (VF - *Voltage Feedback*). Na Fig. 3 (a) esse tipo de topologia é apresentada. Nesta configuração de realimentação o ganho de tensão equivale à razão entre os resistores R2 (resistor de realimentação) e R1. Quando usado como amplificador de transimpedância, o resistor R1 é removido e a transimpedância é definida pelo resistor R2. Esse amplificador é chamado de VF porque amplifica a diferença de tensão entre suas entradas [9].

Sabe-se que o amplificador operacional com VF está sujeito a uma limitação dinâmica na qual o produto do ganho de tensão da realimentação pela frequência de corte resultante é aproximadamente constante. Este produto é conhecido como parâmetro Gain-Bandwidth (GBW) do amplificador.

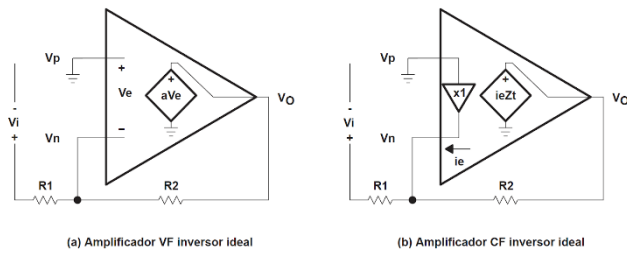


Fig. 3. Diferença entre amplificador operacional com VF (a) e com CF (b) de forma simplificada.

Portanto, um maior valor de transimpedância implica em uma menor frequência de corte, o que demonstra esse compromisso.

A fim de avaliar a dinâmica dessa topologia de circuito na recepção de um sinal luminoso junto a um fotodiodo, foi escolhido o amplificador operacional LM7171 da Texas Instruments, na configuração de inversor, para realização de uma simulação elétrica no software LTSpice XVII com o circuito conforme apresentado na Fig. 4. O circuito é alimentado com 5 V e, para a resistência, R2 são utilizados três valores, 2200 Ohms, 1000 Ohms e 150 Ohms a fim de analisar cenários diferentes. Ao realizar a simulação do componente obteve-se aproximadamente 3,4 MHz de largura de banda para ganho de 2200 Ohms, aproximadamente 7,4 MHz para ganho de 1000 Ohms e aproximadamente 65 MHz com o resistor de 150 Ohms. Como descrito anteriormente, há uma grande redução na banda do sistema com o aumento do ganho devido ao GBW ser aproximadamente constante.

Outro tipo de amplificador comumente usado em aplicações de transimpedância é o amplificador operacional com realimentação de corrente (CF - Current Feedback), ilustrado na Fig. 3 (b), que recebe esse nome por amplificar a diferença de corrente entre suas entradas.

Quando aplicado em circuito, com topologia similar à anterior, apresentada na Fig. 5, e considerando-se a faixa de valores de transimpedância desejada, um amplificador de transimpedância implementado com um amplificador operacional com CF possui tanto o ganho de tensão como de transimpedância definido pela resistência de realimentação, de forma similar ao amplificador operacional com VF.

O amplificador operacional com CF se diferencia do amplificador operacional com VF principalmente por não estar diretamente sujeito à limitação de GBW constante, o que faz com que a frequência de corte do amplificador, para alguns valores de ganho, seja maior. Dessa forma é possível projetar circuitos amplificadores com ganho elevado sem reduzir proporcionalmente a largura de banda do sistema.

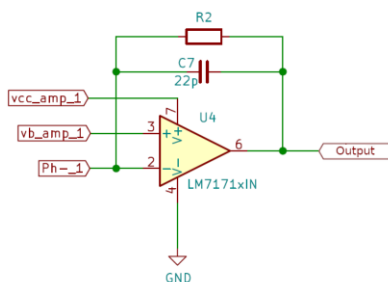


Fig. 4. Circuito de instrumentação com amplificador operacional com VF.

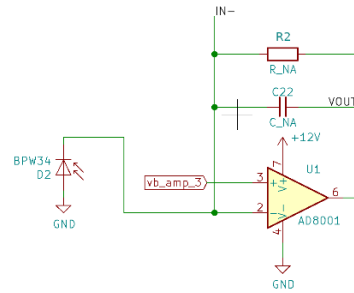


Fig. 5. Circuito de instrumentação com amplificador operacional com CF.

Em simulação, usando modelos SPICE também no software LTSpice XVII, com alimentação de 12 V, para ganho de transimpedância de 470 Ohms obteve-se aproximadamente 183 MHz de largura de banda. Já para 2200 Ohms e 4700 Ohms de ganho a banda foi de 200 MHz e 87 MHz respectivamente. Nota-se com isso que, mesmo dobrando o ganho do sistema a largura de banda não é drasticamente reduzida como acontece no amplificador anterior.

Ao simular mais pontos que relacionam a frequência de corte com o ganho de transimpedância dos dois modelos de amplificador operacional, conforme apresentado na Fig. 6, nota-se que de fato há uma região de operação do amplificador AD8001 onde o GBW não se aproxima de um valor constante, o que colabora com as afirmações feitas anteriormente.

Além da opção de implementação utilizando os amplificadores operacionais, existe também a possibilidade da utilização de amplificadores de transimpedância projetados especificamente para esse fim. Um destes amplificadores é o MAX3665 da MAXIM que foi desenvolvido para aplicações em comunicações com fibra óptica. O modelo em questão possui ganho de transimpedância fixo de 8000 Ohms e largura de banda de 470 MHz, parâmetros bem superiores aos mínimos desejáveis que foram definidos para este trabalho. Porém, apesar de atender a esses requisitos, o dispositivo foi projetado para rejeitar baixas frequências, de 0 a 300 kHz aproximadamente, o que é adequado para a aplicação para a qual foi concebido. Assim, amplificadores com essa resposta espectral não são interessantes para sistemas VLC que utilizam transmissores ópticos com largura de banda estreita, como é o caso dos LEDs recobertos por fósforo, pois isso compromete uma parcela significativa da banda útil para comunicação.

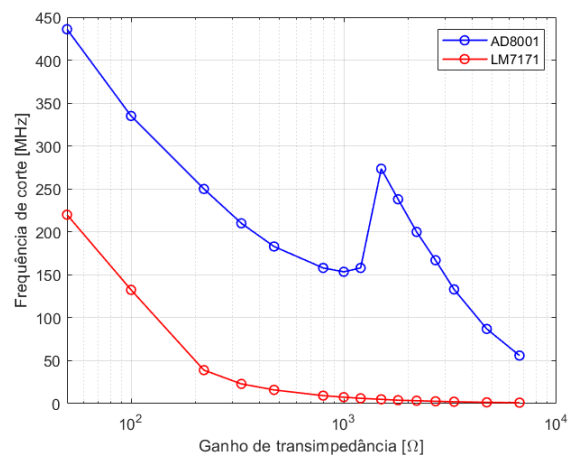


Fig. 6. Relação da frequência de corte com o ganho de transimpedância simulada para os amplificadores operacionais com VF e com CF.

A fim de comparar diretamente os parâmetros de cada amplificador operacional, foi elaborada a Tabela I, a seguir.

TABELA I. COMPARATIVO DOS 3 CIRCUITOS - SUMÁRIO COMPARATIVO ENTRE AS TRÊS TOPOLOGIAS DE CIRCUITOS AMPLIFICADORES DE TRANSIMPEDÂNCIA

Modelo	Transimpedância ( $\Omega$ )	Banda do sistema (MHz)
LM7171	2200	0 - 3,4
	1000	0 - 7,4
	150	0 - 65
AD8001	4700	0 - 87
	2200	0 - 200
	470	0 - 183
MAX3665	8000	0,3 - 470

### C. Escolha de Circuito para Caracterização Experimental

As três topologias anteriormente apresentadas foram comparadas na prática em um primeiro protótipo. Alguns pontos que foram analisados valem ser ressaltados. Para um aumento do ganho do amplificador realimentado em tensão a largura de banda é reduzida proporcionalmente. Isso limita consideravelmente a viabilidade do circuito, considerando a alta transimpedância desejada (2000 Ohms), e de forma simultânea atingir a largura de banda especificada (20 MHz).

A topologia que usa um transdutor específico tem um desempenho que excede as expectativas, com uma largura de banda de 470 MHz para um ganho de 8000. No entanto, esse valor de ganho é fixo, impossibilitando o ajuste, além de rejeitar sinais na banda de 0 Hz a 300 kHz, considerando o caso específico do transdutor MAX3665 projetado para aplicação em comunicação com fibra óptica. Essa é uma clara desvantagem para aplicação em VLC de banda estreita.

A topologia que usa o amplificador realimentado em corrente, por não estar sujeita ao mesmo compromisso entre largura de banda e transimpedância típica do amplificador realimentado em tensão, tem potencial de atender simultaneamente as especificações de largura de banda e transimpedância estipuladas até então.

Optou-se, portanto, pelo projeto e construção do receptor VLC empregando para tanto o amplificador de modo corrente AD8001 e a topologia de circuito apresentada na Fig. 5. Os resultados experimentais obtidos são apresentados no capítulo Resultados Experimentais.

### D. Método de Teste do Receptor Óptico

Afim de evitar que o circuito transmissor fosse o limitante do sistema de comunicação óptica, optou-se pelo uso de um transmissor com uma resposta dinâmica mais rápida e, para tanto, foi usado como fonte de luz um LD presente em gravadores de DVD, que excede 300 MHz de largura de banda. A escolha de empregar um LD deve-se a uma melhor dinâmica com maior frequência de corte em comparação aos

LEDs. Isso ocorre, entre outros fatores, em virtude do tempo de vida mais curto dos portadores nos LDs [10].

Uma vez que se desejou testar o receptor óptico e não o canal de comunicação, o circuito receptor foi construído em uma mesma placa de circuito impresso na qual a fonte de luz está instalada. Isso garantiu a manutenção do alinhamento entre fonte de luz e sensor durante os testes. Também, para garantir que a dinâmica da fonte de luz não fosse a limitação dinâmica durante o teste do receptor, um circuito de acionamento rápido com frequência de corte excedendo 180 MHz foi construído, mostrado à esquerda na Fig. 7.

## III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para os testes experimentais, uma fonte de tensão digital foi usada para alimentar o circuito do driver do LD em 12 V, da fabricante Icel, modelo PS 4100 e uma fonte de mesmo modelo para o controle do nível DC do LD em 3,9 V. Uma fonte de tensão independente modelo EMG 18136 foi empregada para a alimentação do circuito em receptor em 12 V.

O fotodiodo foi reversamente polarizado em aproximadamente 15 V, que corresponde a uma capacitância parasita com cerca de 13,2 pF, conforme indicado pela folha de dados do fabricante.

### A. Análise da Resposta em Frequência

A análise de resposta em frequência do circuito receptor foi obtida com o uso do analisador de espectro, da fabricante Rigol, modelo DSA1030A. O sinal de referência gerado pelo analisador de espectro foi aplicado ao LD juntamente com o nível DC para a polarização em torno do ponto de operação desejado. A largura de banda atingida foi de 79 MHz, como apresentado na Fig. 8, para uma transimpedância de 470 Ohms.

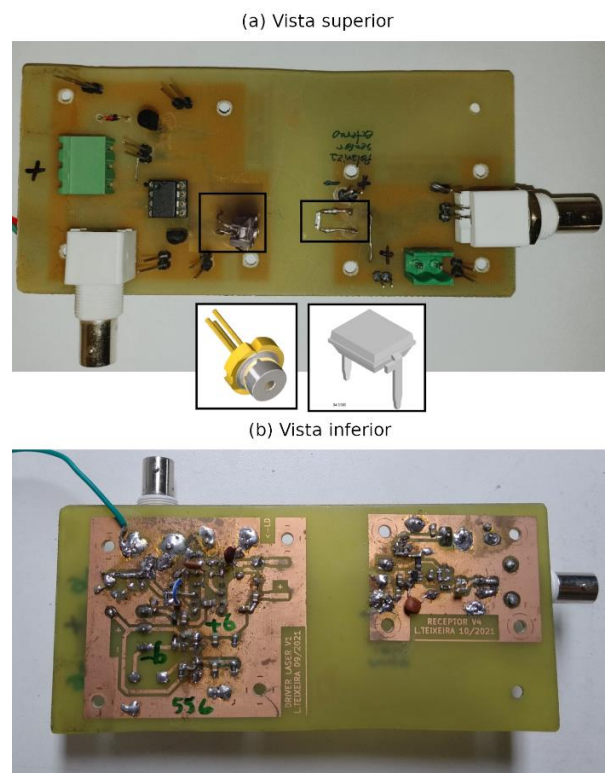


Fig. 7. Protótipo do receptor óptico para VLC com destaque no sensor de luz ((a) direita). Integrado à mesma placa de circuito impresso está o circuito de acionamento do LD (esquerda).

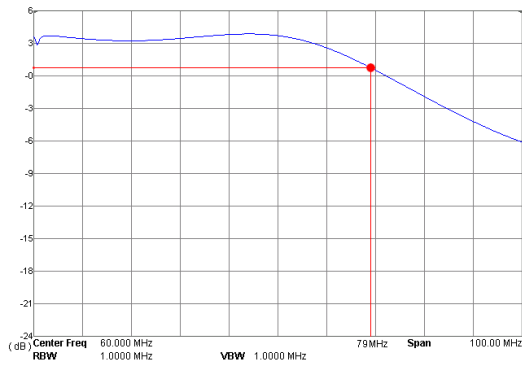


Fig. 8. Resposta em frequência do enlace transmissor-receptor óptico.

### B. Transimpedância X Largura de Banda

A transimpedância do circuito receptor foi modificada dentro em uma faixa de valores por meio da troca do resistor R2 do receptor. A largura de banda encontrada para cada valor de ganho é apresentada na Tabela II.

TABELA II. MEDIDAS EXPERIMENTAIS CONSIDERANDO DIFERENTES TRANSIMPEDÂNCIAS

Transimpedância resultante (Ohms)	Largura de banda = -3 dB em relação à medida em 10 MHz (MHz)
470	79
2200	32
3300	30
4700	22

A partir da Tabela II, constata-se que o circuito receptor atende a largura de banda mínima desejada de 20 MHz para até um ganho 2,35 vezes maior que o estipulado (2000 Ohms).

Considerando os recursos disponíveis, não foi possível determinar neste caso se a primeira limitação dinâmica durante os testes é resultado da dinâmica lenta da fonte de luz, do receptor ou uma combinação de ambos. Ainda assim, pode-se afirmar que as medidas determinaram que a largura de banda de resposta do receptor VLC projetado não é inferior ao mostrado na Tabela II. Cabe ponderar também que as estimativas de dinâmica simuladas, cujos resultados são apresentados no capítulo Método, não consideram elementos parasitas de maior ordem contemplados na validação experimental.

## IV. CONCLUSÕES

Esse trabalho apresentou uma revisão dos aspectos principais na concepção de um receptor para sinais luminosos aplicado a VLC. O experimento confirmou a expectativa de que se pode atender aos requisitos estabelecidos usando o sensor de luz escolhido modelo BPW34 adequado para um receptor capaz de detectar sinais na banda visível.

Além disto, também se explorou e se comparou nesse trabalho o princípio de operação e desempenho de três topologias de interface analógica para tratamento dos sinais gerados pelo sensor de luz. A solução de amplificador de

transimpedância usando um amplificador operacional realimentado em corrente foi apontada como mais adequada à aplicação entre as comparadas. Embora os resultados experimentais usando esse circuito mostraram resposta dinâmica mais lenta do que os resultados de simulação apontaram, ainda assim demonstrou-se a efetividade de operação do receptor.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), ao Colégio Técnico de Industrial de Santa Maria (CTISM) e ao Grupo de pesquisa GEDRE pelo apoio e auxílio para com a pesquisa desenvolvida. Esse estudo foi apoiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código 001, Programa PROEX, PIBIC/CNPq, PRPGP/UFSM, INCT-GD, CAPES proc 23038.000776/2017-54, CNPq proc 465640/2014-1, FAPERGS proc 17/2551-0000517-1.

## REFERÊNCIAS

- [1] D. C. O'Brien, "Visible Light Communications: Challenges and potential," IEEE Photonic Society 24th Annual Meeting, 2011, pp. 365-366, doi: 10.1109/PHO.2011.6110579.
- [2] T. Yamazato et al., "Vehicle Motion and Pixel Illumination Modeling for Image Sensor Based Visible Light Communication," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 33, no. 9, pp. 1793-1805, Sept. 2015, doi: 10.1109/JSAC.2015.2432511.
- [3] M. Khan and J. Chakareski, "Visible Light Communication for Next Generation Untethered Virtual Reality Systems," 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCW.2019.8757099.
- [4] S. H. Oh and J. G. Kim, "VLC Positioning by DNN via WkNN in Indoor Environment," 2022 Thirteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 2022, pp. 450-453, doi: 10.1109/ICUFN55119.2022.9829653.
- [5] K. K. Bhat, P. Gowda, S. R. and M. J., "Design and Development of a Visible Light Communication Module for Vehicular Technology," 2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON), 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/INOCON50539.2020.9298338.
- [6] W. Greives and H. Kulhandjian, "Design and Experimentation of a Low-cost Receiver for Visible Light Communications," 2020 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/LATINCOM50620.2020.9282291.
- [7] J. M. P. Merino, "Implementación de prototipo localización indoor mediante VLC," Universidad Carlos III de Madrid - Departamento de Ingeniería Telemática, 2020.
- [8] N. A. Quadir, M. A. Awan, M. Abdallah and B. Wang, "An Active Inductor Based TIA with Ambient Light Rejection for VLC Applications," 2021 IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), 2021, pp. 882-885, doi: 10.1109/MWSCAS47672.2021.9531926.
- [9] J. Karki, "Voltage Feedback Vs Current Feedback Op Amps Application Report," 1998, Texas Instruments.
- [10] L. Teixeira, F. Loose, C. H. Barriquello, J. Marcos Alonso, V. A. Reguera and M. A. Dalla Costa, "The illumination design space using laser diodes in visible light communication," 2021 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2021, pp. 1-8, doi: 10.1109/IAS48185.2021.9677254.