

Modelagem da Resposta em Frequência de um Sistema de Comunicação por Luz Visível

João Paulo S. Brum
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria - RS, Brasil
Email: joaobrum@gedre.ufsm.br

Felipe Loose
e Lucas Teixeira
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria - RS, Brasil

Marco A. Dalla Costa
e Vitalio A. Reguera
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria - RS, Brasil

Resumo—Esse trabalho tem como objetivo a modelagem de um sistema de comunicação por luz visível utilizando função de transferência no domínio da frequência e por meio de circuitos elétricos no domínio do tempo. Consequentemente, é possível obter onde estão os limites da comunicação relativas à largura de banda, através da análise de cada circuito em separado. Os parâmetros utilizados para as modelagens foram obtidos através de estudos da literatura, utilizados nos modelos para simulação. Finalmente, conclui-se que com um resistor e capacitor de realimentação fixos no circuito de recepção do sinal, comprova-se que o limitante é o próprio receptor, visto que os as frequências associadas aos polos deste são menores que a do transmissor. Por fim, valida-se o procedimento de modelagem através de resultados experimentais.

Palavras-chaves – Comunicação por Luz Visível, Comparativo, Função de Transferência, Lâmpadas LED, Resposta em Frequência

I. INTRODUÇÃO

O sistema de comunicação sem fio tem como recurso importante uma determinada banda de frequência no espectro eletromagnético. Para a transmissão de dados, utiliza-se certos comprimentos de onda deste espectro em um canal de frequência bem definido. Em função do aumento de dispositivos que se comunicam por meio de ondas de rádio para acesso à rede, as faixas de frequências utilizadas para este fim acabam saturadas como um canal de comunicação. Neste contexto, busca-se apresentar uma alternativa de espectro eletromagnético, utilizando a parcela correspondente à luz visível para comunicação. Desta forma, a tecnologia dos LEDs (diodos emissores de luz - *Light Emitting Diodes*), possui grande vantagem em relação a temperatura de cor e vida útil, comparado a lâmpadas incandescentes e fluorescentes [1]. Também, simultaneamente a isto, o surgimento de interruptores semicondutores que permitem a realização de comutação rápida de dispositivos de potências [2] [3], podendo ser adequado ao desenvolvimento da comunicação ao possibilitar taxas de transmissão de dados suficientemente altas [4]. Esta tecnologia tem como base a modulação da intensidade luminosa, ou seja, a variação de luminosidade instantânea nos LEDs, para enviar dados e recebe-los através de um receptor sensível a luz, como por exemplo fotodiodos.

Atualmente, junto a esta tecnologia, emergem algumas vantagens interessantes, tais como [5]:

- Confinamento de um link em um ambiente fechado, sendo possível cada ambiente ter sua própria rede de comunicação, sem causar interferência a ambientes adjacentes;
- Segurança de dados, visto que a luz não atravessa paredes;
- Reutilização das instalações elétricas dos sistemas de iluminação atuais.

Neste artigo, é proposta a modelagem de um sistema completo de comunicação baseado em luz visível, contendo um transmissor, um canal de comunicação e um receptor. Dessa forma, através da função de transferência no domínio da frequência, é possível estimar analiticamente a resposta de cada parte do sistema, comparando-as com resultados experimentais e analisando as limitações impostas pela tecnologia.

O artigo está organizado da seguinte maneira. Na seção 2, é modelado cada componente do sistema de comunicação, dividido em transmissor, canal e receptor. Na seção 3, contém os resultados obtidos e discussão dos mesmos. Por fim, na seção 4, aborda-se uma conclusão geral sobre o trabalho.

II. MODELOS LINEARES

Um modelo de comunicação por luz visível pode ser dividido em transmissor, canal óptico e um receptor óptico. Essa representação pode ser visualizada na Fig. 1. A partir disso, é possível modelar separadamente cada bloco como um sistema linear e invariante no tempo, utilizando circuitos equivalentes com variáveis de saída como fontes dependentes na entrada de cada bloco em análise. Desta forma, tem-se que a representação do sistema pode ser determinada por um conjunto de funções de transferência, em uma abordagem de entrada/saída.

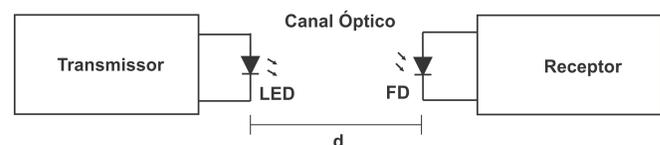


Figura 1. Diagrama de blocos de um sistema de comunicação por luz visível, separados por uma distância "d".

A. Modelo Linear do Transmissor

O modelo do transmissor é composto por um circuito de amplificador de potência, capaz de gerar um estímulo com nível de corrente adequado para os LEDs variando sua intensidade luminosa. De acordo com o trabalho de [6], estima-se que a frequência de corte do LED branco baseado em cobertura de fósforo encontra-se em torno de 2 a 3 MHz. Esse modelo pode ser dividido em duas partes, uma para corrente, e outra para o fluxo luminoso. Portanto, conforme mostra a Fig. 2, é possível simular a resposta em frequência da corrente que passa pelo LED.

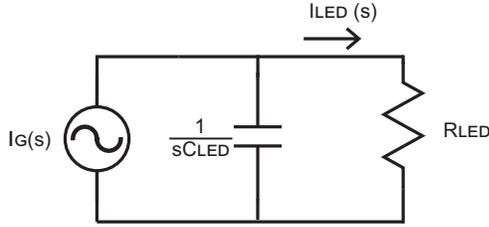


Figura 2. Modelo CA linear do transmissor

Na Fig. 2 apresenta-se o modelo de circuito elétrico que relaciona a conversão da corrente elétrica para sinais de luz gerados pelo LED. $I_G(s)$ é o valor de saída do amplificador de potência, representado por uma fonte de corrente alternada, R_{LED} é relacionado com o ganho corrente/tensão do LED, enquanto C_{LED} é um parâmetro que descreve a limitação da frequência em 3MHz, representando a dinâmica do fósforo. Por fim, $I_{LED}(s)$ representa a saída do sistema.

A segunda parte do conjunto consiste no circuito de transformação amperes-lumens, ou seja, uma transformação de valores de corrente em valores de fluxo luminoso. O circuito está exemplificado na Fig. 3.

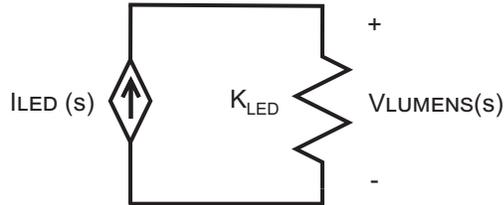


Figura 3. Modelo CA linear do transmissor, relacionando amperes e lumens.

Nessa situação, é possível observar no circuito, que $V_{lumens}(s)$ é dada pela Equação 1.

$$V_{lumens}(s) = K_{LED} \cdot I_{LED}(s) \quad (1)$$

onde K_{LED} é a relação de transformação de corrente em fluxo luminoso, representado como uma resistência e portanto sem dinâmica em frequência.

Diante do modelo de transformação, é possível representar o transmissor utilizando o par R_{LED} e C_{LED} como um filtro passa-baixas de primeira ordem, cuja a variável de saída é representada em lumens. A função de transferência que caracteriza o transmissor é dada pela Equação 2.

$$H_{TX}(s) = \frac{K_{LED}}{R_{LED}C_{LED}s + 1} \quad (2)$$

onde o polo associado é apresentado em 3.

$$p1 = \frac{-1}{2\pi R_{LED}C_{LED}} \quad (3)$$

Utilizando a Equação 3, é possível encontrar o valor de C_{LED} para uma frequência de corte de 3MHz, de acordo com os valores apresentado na literatura.

B. Modelo Linear do Canal de Comunicação

O canal de comunicação óptico pode ser modelado utilizando um circuito elétrico, através de uma resistência do canal R_{CANAL} , assim como uma capacitância de canal C_{CANAL} e uma fonte dependente $V_{lumens}(s)$ que represente a saída do transmissor. Conforme apresenta trabalho de [7], a constante de tempo do canal de comunicação é dada na ordem de nanossegundos, resultando em uma largura de banda na faixa dos GHz. Por esta razão, para sinais de conteúdo em frequência inferiores à frequência de corte do canal, modela-se o mesmo a partir de um fator linear, sendo este representado somente pela sua resistência. Assim, o canal pode ser representado como um filtro de ganho estático, conforme visualizado na Fig. 4.

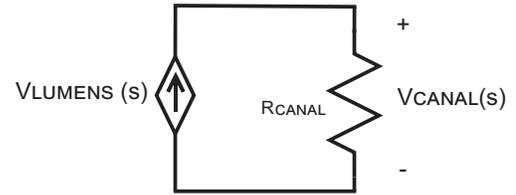


Figura 4. Modelo CA linear do canal óptico

Desse modo, a função transferência que modela o comportamento desse circuito, é representada na equação 4.

$$H_{CANAL}(s) = R_{CANAL} \quad (4)$$

Para um canal óptico de comunicação sem fio, a atenuação deste é demonstrado pela equação 5 [8]:

$$G(0) = R_{CANAL} = \begin{cases} \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} \cos^m(\phi) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), & 0 < \psi \leq FOV \\ 0, & \psi > FOV \end{cases} \quad (5)$$

onde, m é a ordem de emissão de Lambert, d é a distância entre transmissor e receptor, A é a área ativa do fotodiodo, a qual será abordada na seção do receptor, ψ é o ângulo de incidência,

ϕ é o ângulo de irradiação, $T_s(\psi)$ é o ganho do filtro óptico e $g(\psi)$ é o ganho do concentrador. Esta equação representa o ganho CC do canal óptico, sendo utilizada principalmente para estimar o nível de atenuação do sinal de comunicação em função da distância entre transmissor e receptor.

Por simplicidade, para o presente trabalho, que $T_s(\psi)g(\psi) = 1$ e transmissor e receptor alinhados entre si. Esta configuração implica que $\phi = \psi = 0$. Assim, obtém-se um ganho K , conforme equação 6.

$$G(0) = R_{CANAL} = \frac{(m+1)A}{2\pi d^2} = \frac{K}{d^2} \quad (6)$$

Este é o fator que modela a resistência de canal, representada na Fig. 4. Como a área do sensor é muito pequena, esse valor terá uma ordem de magnitude de 10^{-6} , causando sempre uma atenuação na magnitude do sinal, caindo com o quadrado da distância. Para fins de simplificação, o valor de K é adotado como 1 neste estudo: $R_{CANAL} = \frac{1}{d^2} \Omega$.

C. Modelo Linear do Receptor

Por fim, o circuito receptor consiste em um fotodiodo e um amplificador de trans-impedância, o qual transforma sinais de corrente do sensor em sinais de tensão na saída. O modelo CA linear desse receptor pode ser visto conforme a Fig. 5.

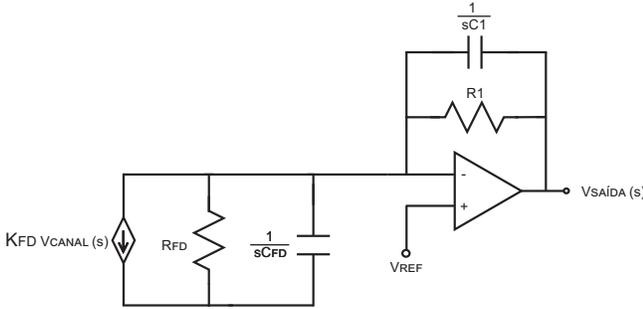


Figura 5. Modelo CA linear do fotodiodo e do amplificador de trans-impedância

Conforme evidenciado anteriormente, R_{FD} é a resistência do fotodiodo [9] na ordem de megaohms, considerando nesse caso, um caso de circuito aberto e não influenciando no resultado final. Além disso, K_{FD} é uma relação de transformação entre lumens e amperes, C_{FD} representa a capacitância do fotodiodo, $R1$ é o resistor de ganho do amplificador e $C1$ é o capacitor de realimentação, utilizado para alcançar a estabilidade do circuito, considerando as outras dinâmicas internas do amplificador operacional.

Assim, é possível obter a função transferência do circuito, dada pela equação 7.

$$H_{RX}(s) = \frac{R1}{s^2 \frac{R1(C_{FD}+C1)}{Aol \cdot pa} + s(R1C1) + 1} \quad (7)$$

Os parâmetros Aol e pa são retirados do *datasheet* [10] do amplificador operacional LM7171, denominados ganho em

malha aberta e frequência do polo do dispositivo, respectivamente. Finalmente, o último parâmetro representado na Fig. 5 é a tensão de referência V_{REF} , esta define a tensão de polarização do fotodiodo.

Os polos associados ao receptor podem ser encontrados por:

$$p2 = \frac{-(R1C1) + \sqrt{(R1C1)^2 - \frac{4R1(C_{FD}+C1)}{Aol \cdot pa}}}{\frac{4\pi R1(C_{FD}+C1)}{Aol \cdot pa}} \quad (8)$$

$$p3 = \frac{-(R1C1) - \sqrt{(R1C1)^2 - \frac{4R1(C_{FD}+C1)}{Aol \cdot pa}}}{\frac{4\pi R1(C_{FD}+C1)}{Aol \cdot pa}} \quad (9)$$

Constata-se pelas Equações 8 e 9 que o receptor terá apenas 2 polos, o que limita, portanto, a largura de banda possível do sinal processado.

D. Modelo Linear do Sistema Completo

O modelo linear CA do sistema completo é a união de todas as partes já apresentadas nas subseções anteriores, conforme as Fig. 2, 3, 4 e 5. A partir disso, pode-se relacionar as funções transferência para cada modelo em separado e consolidá-las em uma função de transferência para o sistema completo.

Por esta razão, é possível utilizar as equações 2, 4 e 7, obtendo a seguinte expressão para a função de transferência do modelo completo do sistema $H_{SIS}(s)$, conforme apresenta a equação 10. Os polos dessa equação serão os mesmos encontrados pelas equações 3, 8 e 9.

$$H_{SIS}(s) = H_{TX} \cdot H_{CANAL} \cdot H_{RX} \quad (10)$$

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Simulação

Os valores dos parâmetros utilizados no modelo matemático e na simulação foram retirados dos *datasheets* dos componentes reais utilizados ou adotados conforme descrito anteriormente. Estes, podem ser visualizados na tabela I. As simulações compreenderam o uso dos softwares utilizados foram *MATLAB* e *LTspice*.

Tabela I
PARÂMETROS UTILIZADOS EM SIMULAÇÃO E MODELO ANALÍTICO

Parâmetro	Valor
R_{LED}	2.34 Ω
C_{LED}	22.67 nF
K_{LED}	4603 Ω
K_{CH}	1
K_{FD}	10.8×10^{-9}
R_{FD}	2 G Ω
C_{FD}	25 pF
R1	150k Ω
C1	2pF
Aol	85 dB
pa	70.6 kHz

A Fig. 1 mostra em diagrama de blocos como é dado a disposição de transmissor e receptor, separados por uma

distância "d", pela qual a luz irá se propagar (canal de comunicação). Os componentes utilizados como modelo real para simulação foram:

- LED BXRC-50C4000-F-24-Bridgelux [11];
- Fotodiodo de silício BPW34 [12];
- Amplificador Operacional LM7171 Very High Speed, High Output Current, Voltage Feedback Amplifier [10];

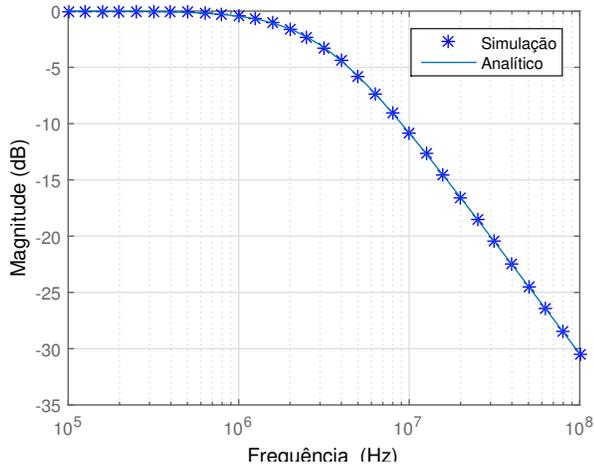


Figura 6. Resultado da resposta em frequência de um LED branco, relacionando corrente de entrada e corrente de saída.

A Fig. 6 mostra a resposta em frequência do LED branco. É possível ver que a largura de banda dessa componente do sistema é de aproximadamente 3 MHz, com decaimento característico de primeira ordem (-20 dB por década, dado pelo modelo utilizado). A largura de banda é definida pela presença da camada de fósforo utilizada na cobertura do LED [6].

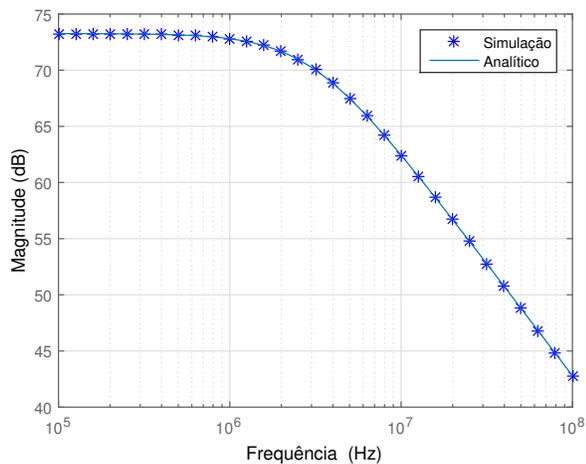


Figura 7. Resposta em frequência de um LED branco na relação Ampères-Lumens.

Além disso, na Fig. 7 é possível perceber a transformação entre a corrente emitida pelo LED e o fluxo luminoso, dada pela constante K_{LED} .

A Fig. 8 evidencia que, utilizando a saída do circuito transmissor como entrada no canal óptico de comunicação, é possível observar a entrada de uma nova variável no problema, a distância. Como já mencionado na seção 2.B, a resistência do canal é modelada como o fator de atenuação do canal, este dependente do inverso do quadrado da distância.

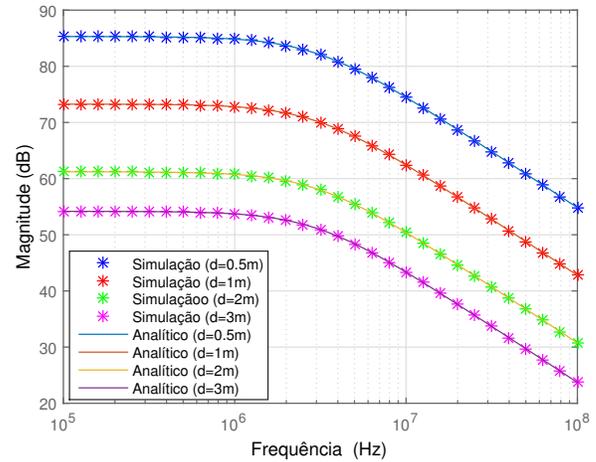


Figura 8. Resposta em frequência na entrada do fotodiodo.

A simulação mostra que para as distâncias utilizadas (0.5, 1, 2 e 3 m), quanto mais perto o transmissor estiver do receptor, menor será a atenuação (ou maior será o ganho do sistema). Também é importante ressaltar que o canal não influencia na dinâmica da resposta em frequência, sendo esta uma assunção verdadeira quando os sinais transmitidos encontram-se muito abaixo da frequência de corte prevista no modelo matemático da propagação (faixa dos GHz).

Por fim, a luz incide no fotodiodo, gerando uma corrente no semiconductor. A constante K_{FD} é usada para relacionar a transformação dos sinais luminosos em corrente elétrica. Por fim, com base na saída do canal, o sinal incidente serve de entrada do amplificador de trans-impedância, conforme mostra a Fig. 5.

Assim, é possível relacionar a entrada do sistema de comunicação (a corrente que passa pelos LEDs) pela saída do circuito receptor (a tensão no amplificador), de forma a representar a série de transformações que o sinal de enviado passa para chegar ao receptor. Na Fig. 9, mostra-se a atenuação em função do quadrado da distância, e as frequências resultantes dos 3 polos que atenuam os sinais, as quais são calculadas pelas equações 3, 8 e 9, e tem como resultado $p1 = -3$ MHz, $p2 = -522.9$ kHz e $p3 = -14.97$ MHz. Os dois últimos são oriundos do receptor, evidenciando a limitação do sinal de saída.

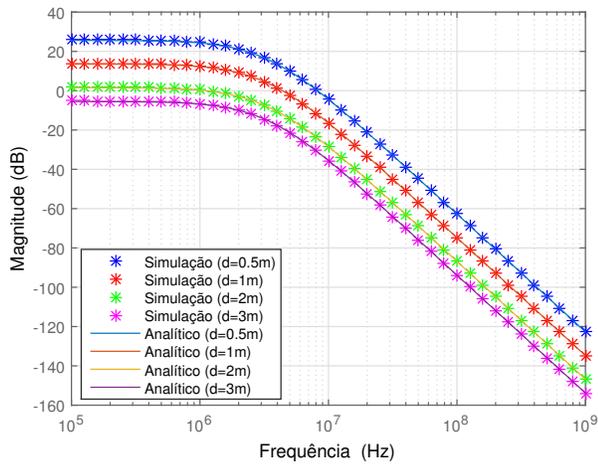


Figura 9. Resposta em frequência de um sistema de Comunicação por Luz Visível

B. Experimental

A validação do modelo é feita utilizando a resposta ao degrau do sistema completo, fixado a uma distância e dentro de uma caixa escura, eliminando a presença de ruídos externos. Assim, aplica-se um degrau na corrente do LED, analisando o comportamento da saída do sistema, evidenciado na Fig. 10.

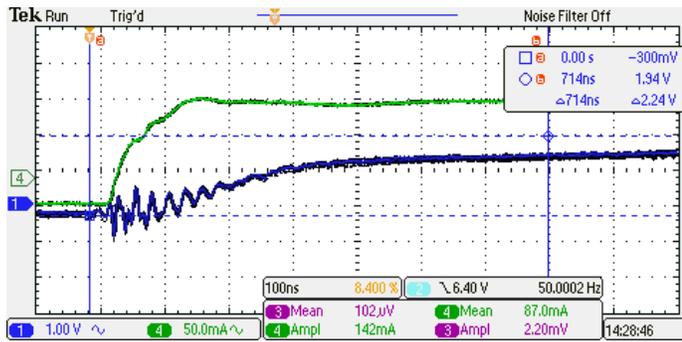


Figura 10. De cima para baixo: Degrau na corrente do LED (CH4); Resposta ao degrau na saída do receptor (CH1).

A partir disso, os dados são importados para o software MATLAB, a fim de filtrar as interferências externas, e comparar com o modelo simulado. O comparativo das respostas ao degrau do modelo teórico e experimental pode ser visualizado na Fig.11.

Após a validação da resposta ao degrau dos modelos, normaliza-se o ganho CC do sistema, e compara-se a resposta em frequência do mesmo, conforme apresenta a Fig. 12.

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um método de modelagem matemática para encontrar a resposta em frequência de um sistema de comunicação por luz visível, com o intuito de descobrir onde está a principal restrição na largura de banda do sistema. Verificou-se que o método analítico, usando a abordagem

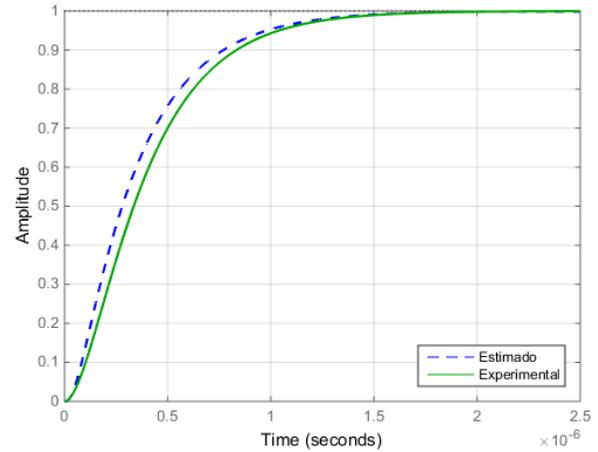


Figura 11. Resposta ao degrau do sistema completo, comparando o modelo estimado e experimental.

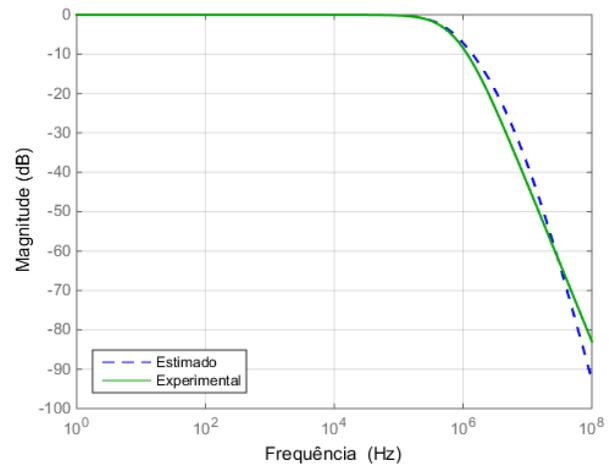


Figura 12. Resposta em frequência do sistema completo, comparando o modelo estimado e experimental.

entrada/saída de sistemas lineares invariantes no tempo, apresentou resultados muito próximos aos resultados experimentais obtidos, onde utilizou-se um sinal de entrada do tipo degrau ao sistema. Por esta razão, conclui-se que os modelos foram validados e o principal limitante do link de comunicação, analisando a largura de banda do sinal processado, encontra-se no receptor e na sua resposta em frequência individual.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao GEDRE - Inteligência em Iluminação, a Universidade Federal de Santa Maria - UFSM e a CAPES (Programa PIBIC - CNPq, N° 043402), pelo suporte e estrutura durante os estudos.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Schratz, C. Gupta, T. Struhs, and K. Gray, "A new way to see the light: Improving light quality with cost-effective led technology," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 22, no. 4, pp. 55–62, 2016.
- [2] E. Schubert, *Light-Emitting Diodes*. Cambridge University Press, 2006.
- [3] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system using led lights," *IEEE transactions on Consumer Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 100–107, 2004.
- [4] F. Loose, L. Teixeira, R. Duarte, M. Costa, and C. Barriquello, "On the use of the intrinsic ripple of a buck converter for Visible Light Communication in LED drivers," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2018.
- [5] P. Pathak, X. Feng, P. Hu, and P. Mohapatra, "Visible Light Communication, Networking and Sensing: A Survey, Potential and Challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, no. c, pp. 1–1.
- [6] H. Li, X. Chen, B. Huang, D. Tang, and H. Chen, "High bandwidth visible light communications based on a post-equalization circuit," *IEEE photonics technology letters*, vol. 26, no. 2, pp. 119–122, 2014.
- [7] K. Lee, H. Park, and J. R. Barry, "Indoor channel characteristics for visible light communications," *IEEE communications letters*, vol. 15, no. 2, pp. 217–219, 2011.
- [8] F. R. Gfeller and U. Bapst, "Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation," *Proceedings of the IEEE*, vol. 67, no. 11, pp. 1474–1486, 1979.
- [9] P. R. Thompson and T. C. Larason, "Method of measuring shunt resistance in photodiodes," in *Measurement Science Conference*, vol. 400, 2001.
- [10] T. Instruments, "Lm7171 : Very high speed, high output current, voltage feedback amplifier."
- [11] Bridgelux, "Bridgelux vero 18 array series."
- [12] Vishay, "Silicon pin photodiode - bpw34."