



# Um estudo sobre o desempenho de amplificadores de áudio classe G

Palavras-Chave: Amplificadores eletrônicos, transdutores, eficiência

Autores(as):

Vitor Nunes R.A:245571 FT/UNICAMP

Rodrigo Luiz Ximenes (coorientador/a) FT/UNICAMP

Prof<sup>(a)</sup>. Dr<sup>(a)</sup>. Francisco José Arnold (orientador/a) FT/UNICAMP

## Introdução

O amplificador classe G [1-3] é um modelo de amplificador eletrônico que possui um alto desempenho quando é submetido aos efeitos resistivos e indutivos que as cargas piezelétricas produzem. Esse amplificador trabalha como um chaveamento de corrente para duas situações, quando o sinal de entrada possuir amplitudes altas e baixas. O modelo de estudo que foi proposto neste trabalho é a combinação de 2 estágios diferentes, um de classe B usado nas potências baixas e outro, de classe C, que opera em altas potências. O circuito estudado é apresentado na Figura 1 a seguir.

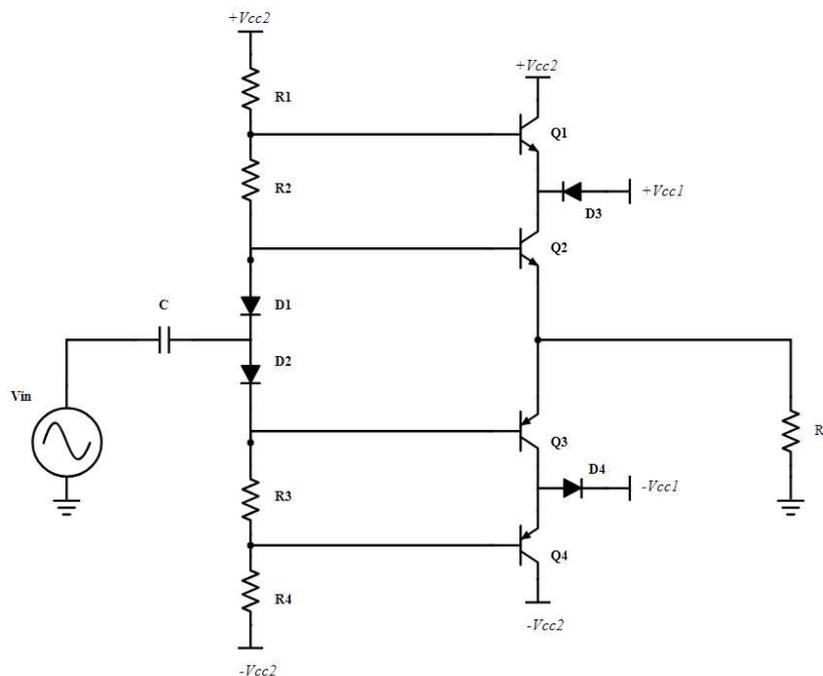


Figura 1 – Amplificador classe G.  
Fonte: Autor.

Isto traz vantagem aos amplificadores classe G, pois otimiza a eficiência do amplificador. Os amplificadores que possuem um rendimento muito alto são utilizados para acionar transdutores piezelétricos. Na Figura 2 é mostrado o circuito equivalente de Butterworth- Van Dyke (Modelo BVD) que é utilizado para emular o comportamento de um transdutor

piezelétrico. Usualmente, os transdutores são sintonizados agregando-se uma indutância  $L_0$  (para anular os efeitos de  $C_0$ ) em paralelo. A partir disso se obtém um circuito equivalente com comportamento similar ao de um circuito RL em série, mostrado na Figura 3 [4].

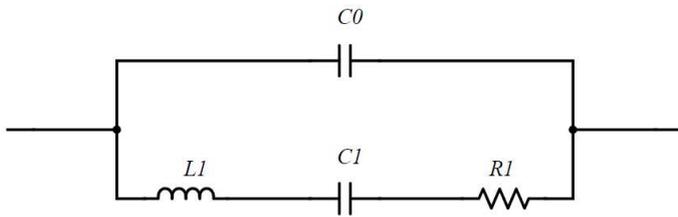


Figura 2 – Circuito equivalente BVD.  
Fonte: Autor.

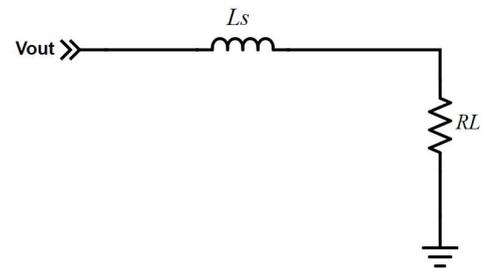


Figura 3 – Circuito RL em série.  
Fonte: Autor.

O objetivo deste projeto é estudar como o amplificador classe G se comporta em termos do balanço de potências quando está acionando um circuito equivalente de um transdutor piezelétrico.

## Metodologia e Desenvolvimento

A metodologia utilizada no trabalho foi desenhar no software a realizar o projeto prático de um amplificador classe G semelhante ao da Figura 1. Os componentes utilizados no amplificador foram calculados, simulados no software LTspice e montados em uma protoboard no Laboratório de instrumentação eletrônica (Labi-el) na Faculdade de Tecnologia.

O amplificador possui os seguintes componentes: 4 transistores ligados, sendo 2 para cada estágio de operação. 2N3904-npn (Q1) e 2N3906-pnp(Q4) para o estágio de alta potência e BD135-npn (Q2) e BD136-pnp(Q3) para o estágio de baixa potência; 4 diodos 1N4148 (D1 a D4); 2 resistores de 12k $\Omega$  (R1 e R4); 2 resistores de 2k2 $\Omega$  (R2 e R3); 1 capacitor de 100  $\mu$ F (C); uma carga de 500  $\Omega$  (RL) para produzir o efeito resistivo e um indutor de 8,6mH ( $L_s$ ) para produzir o efeito indutivo. As tensões para o amplificador são  $V_{cc1} = 8V$  e  $V_{cc2} = 18V$ .

Um circuito pré-amplificador de corrente, que pode ser visto na Figura 4, foi utilizado antes do estágio do classe G. Os componentes do amplificador de corrente são um Amplificador operacional CA3140, dois transistores BC337-npn ( $Q_A$ ) e BC327-pnp ( $Q_B$ ) que realizam uma operação *push-pull* e dois resistores  $R_f = 33k\Omega$  e  $R_i = 10k\Omega$  para realizar o ganho de corrente [4]. Os valores de  $+V_{cc}$  e  $-V_{cc}$  são +18V e -18V respectivamente. Este amplificador possui ganho de tensão de 4,3 aproximadamente.

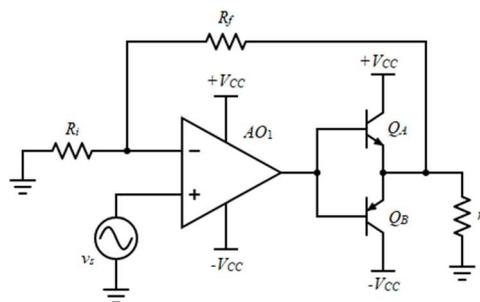


Figura 4 – Circuito amplificador de corrente  
Fonte: Autor.

O sinal do gerador de funções foi aplicado na entrada do pré-amplificador. As tensões de entrada e de saída do amplificador classe G foram monitoradas com um osciloscópio. Amperímetros foram utilizados para medir as correntes médias das fontes de alimentação. Foram realizadas medidas para tensões na entrada do amplificador classe G entre 0 V e 18V. As tensões médias entre os coletores e emissores dos transistores foram medidas com voltímetros. As potências fornecidas pelas fontes de alimentação ( $P_S$ ), a dissipada na carga ( $P_{RL}$ ) e a dissipada nos transistores ( $P_Q$ ) e a eficiência ( $\eta$ ) são determinadas com as Equações 1 a 4.

$$P_S = 2V_{CC1}I_{S1} + 2V_{CC2}I_{S2} \quad (1)$$

$$P_{RL} = \frac{V_{RL}^2}{2R_L} \quad (2)$$

$$P_Q = V_{CE}I_C \quad (3)$$

$$\eta = \frac{P_{RL}}{P_S} \quad (4)$$

Para a investigação do circuito com carga resistiva e reativa, no circuito da Figura 1 foi incluído uma indutância  $L_S$  em série com a resistência  $RL$ . A medidas das tensões na saída do amplificador e em  $RL$  permitem a determinação da fase ( $\theta$ ) entre tensão e corrente na carga ( $\tan\theta = 2\pi fL / RL$ ). A frequência do sinal de entrada usada foi de 8 kHz.

## Resultados e discussões

Os testes práticos do amplificador responderam de forma coerente as simulações e aos estudos teóricos realizados. Neste artigo são apresentados os resultados experimentais para cargas resistivas (Figuras 5 a 8) e para cargas resistivas e indutivas (Figuras 9 a 12).

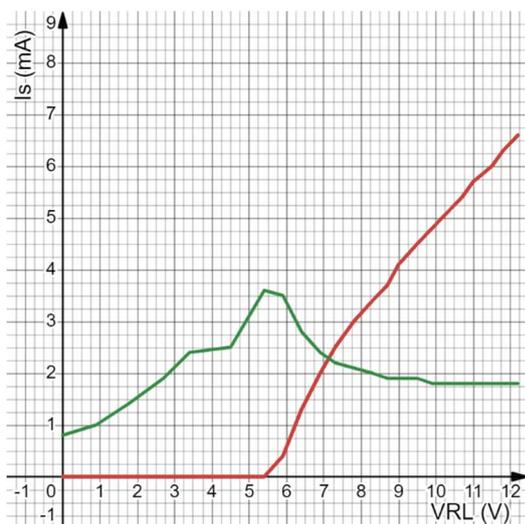


Figura 5 – Gráfico das correntes  $I_{S1}$ (verde) e  $I_{S2}$ (vermelho) em função da tensão na carga  $V_{RL}$ .

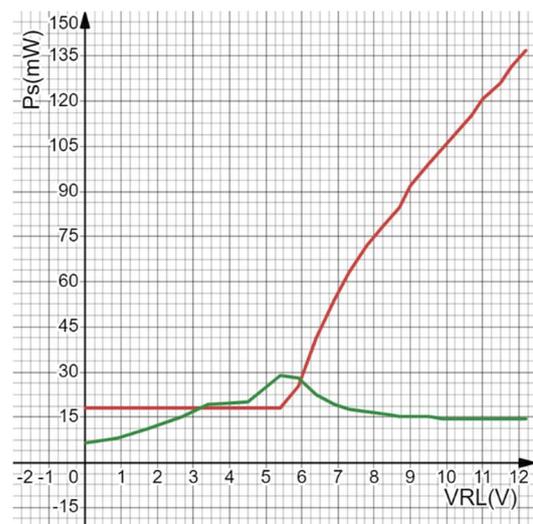


Figura 6 – Gráfico das potências da fonte  $P_{S1}$  (verde) e  $P_{S2}$  (vermelho) em função da tensão na carga  $V_{RL}$ .

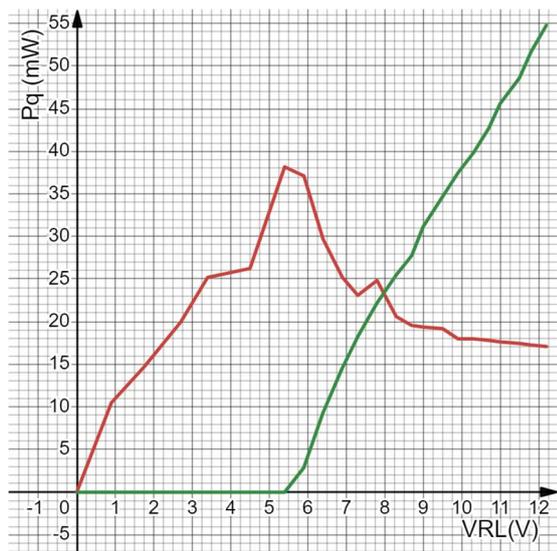


Figura 7 – Gráfico das potências dissipada nos transistores ( $P_Q$ ) Q1 e Q4(verde); Q2 e Q3(vermelho) em função da tensão na carga  $V_{RL}$ .

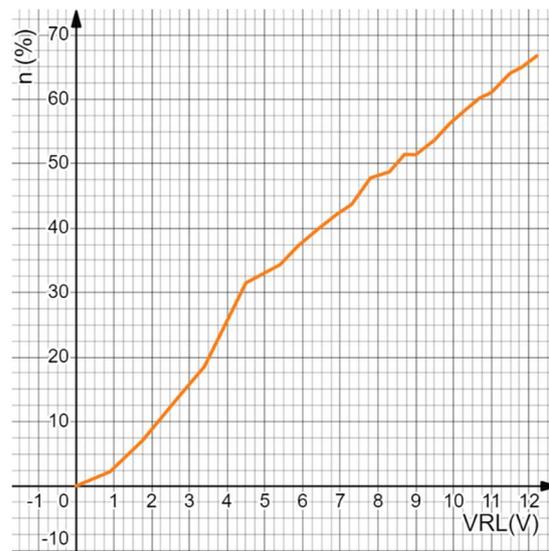


Figura 8 – Gráfico da eficiência ( $\eta$ ) em função da tensão na carga  $V_{RL}$ .

O comportamento das correntes  $I_{s1}$  (traço verde) e  $I_{s2}$  (traço vermelho) na Figura 5 ilustra a troca de estágio no amplificador classe G, pois o traço verde começa a aumentar em um momento muito próximo de quando o traço vermelho começa a diminuir. As potências na fonte (Figura 6) e nos transistores (Figura 7) também apresentam a troca de estágio.

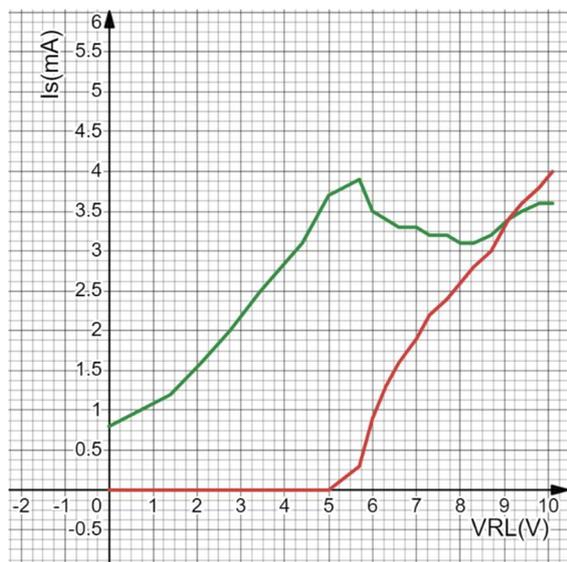


Figura 9 – Gráfico das correntes  $I_{s1}$  (verde) e  $I_{s2}$  (vermelho) em função da tensão na carga  $V_{RL}$ .

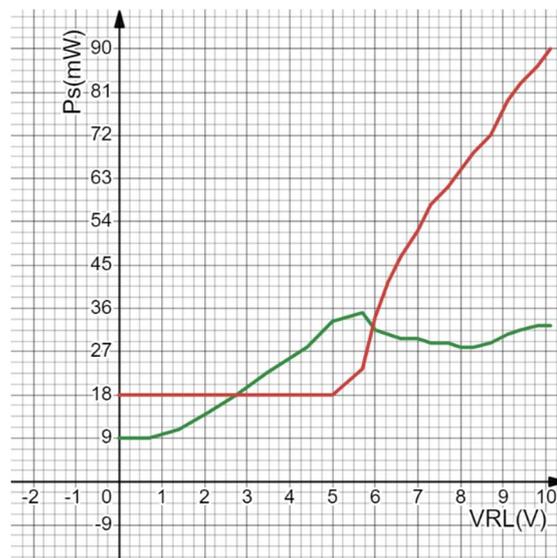


Figura 10 – Gráfico das potências da fonte  $P_{s1}$  (verde) e  $P_{s2}$  (vermelho) em função da tensão na carga  $V_{RL}$ .

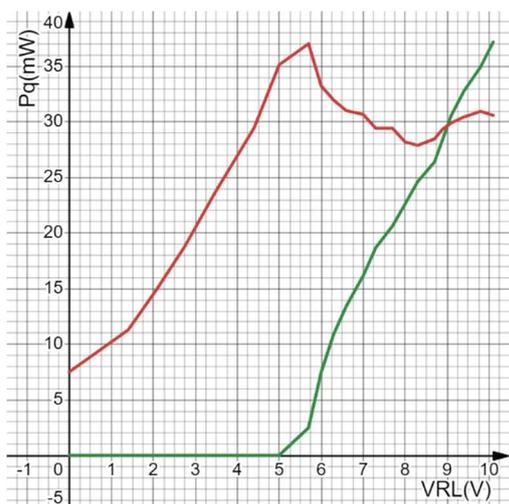


Figura 11 – Gráfico das potências dissipada nos transistores ( $P_Q$ ) Q1 e Q4(verde); Q2 e Q3(vermelho) em função da tensão na carga  $V_{RL}$ .

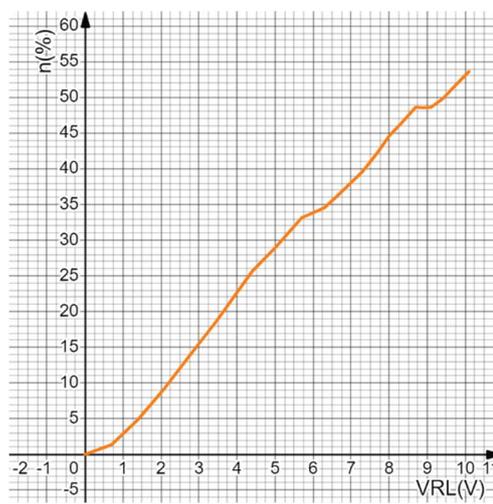


Figura 12 – Gráfico da eficiência ( $\eta$ ) em função da tensão na carga  $V_{RL}$ .

Como o circuito RL em série o indutor antecede o resistor, o sinal quando passa no Indutor  $L_s$  (Figura 3) sofre uma alteração na fase do sinal de  $39,2^\circ$ . O valor esperado na teoria é de  $40,86^\circ$ .

## Conclusões e perspectivas

Os resultados apresentam uma variação na corrente  $I_{s2}$  tardia em relação a corrente  $I_{s1}$ , isso acontece pelo fato que os transistores Q1 e Q4 são acionados no momento em que a tensão de entrada se aproxima do valor de  $V_{CC1}$ . O mesmo comportamento acontece para os gráficos da potência na fonte ( $P_s$ ) e potência dissipada nos transistores.

Logo, o primeiro estágio de tensão que varia entre 0V e 8V na entrada, os transistores Q2 e Q3 são acionados. No momento em que a o sinal na entrada do amplificador ultrapassa o valor de 8V ( $V_{CC1}$ ) os transistores Q1 e Q4 são acionados e a corrente  $I_{s2}$  começa a aumentar.

Na teoria, um amplificador classe G pode ultrapassar a sua eficiência em mais de 80% quando a potência na carga for máxima ( $P_{Lmax}$ ). Para cargas puramente resistivas, essa situação pode se aproximar do ideal para quaisquer condições de operação. Contudo, os resultados mostraram que a presença de cargas reativas (indutância) pode prejudicar o desempenho do amplificador em relação ao sinal de entrada.

## Bibliografia

- [1] R. Bortoni, Análise, Dimensionamento e avaliação de estágios de potência de amplificadores classes A, B, AB, G e H. Dissertação de mestrado em engenharia elétrica na Universidade Federal de Santa Catarina, abril de 1999.
- [2] P. Russo, G. Pillonnet, S. Taupin, N. Abouchi, F. Goutti, Efficiency Optimization of Class G Amplifiers: Impact of the Input Signals, Presented at the 133rd Convention (2012 October 26–29) San Francisco, CA, USA.
- [3] D. SELF, Self on Audio. 2nd ed. Oxford: Newnes, 2006.
- [4] F. J. Arnold, P. S. Martins, New insights into the mechanical pre-stressing of piezotransducers, J. Intell. Sys. Materials and Structures, 32(8), 867-879, (2021).