



UMA PROPOSTA DE ESTUDO DE AMPLIFICADORES ELETRÔNICOS DE CLASSE G

A PROPOSAL FOR THE STUDY OF CLASS G ELECTRONIC AMPLIFIERS

Vitor Nunes¹, Francisco José Arnold²

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v42p630-644.2023

RESUMO: Os livros textos de eletrônica analógica utilizados em cursos de engenharia usualmente apresentam o tema amplificadores eletrônicos restrito às principais classes: A, B e C. Essas classes estão identificadas com as eficiências dos amplificadores. Neste trabalho sugerimos uma atividade didática que extrapola os conteúdos normalmente apresentados nos livros textos por meio da associação de dois amplificadores, um de classe B e outro de classe C, gerando um amplificador de classe G. Esse amplificador tem sua eficiência determinada para diferentes níveis de sinal de entrada e em cargas resistivas. A atividade sugerida neste trabalho tem caráter complementar e introduz possibilidades diversas para variação do circuito, assim como agrega conceitos sobre a associação de amplificadores e chaveamento de circuitos. Este trabalho pode ser utilizado como referência no planejamento de atividades de laboratório ou como proposta de projetos em atividades práticas das disciplinas de Eletrônica Analógica.

PALAVRAS-CHAVE: classes de amplificadores; circuitos amplificadores; eficiência.

ABSTRACT: Textbooks used in engineering courses often present the topic electronic amplifiers restrict to the main classes: A, B and C. These classes are identified with the amplifier's efficiencies. In this work, we suggest a didactic activity that extrapolates the program content presented in the textbooks through the association of two amplifiers, one in class B and other in class C, resulting in class G amplifier. This amplifier has the efficiency determined for several amplitudes of input signal and under resistive loads. The activity proposed in this work has complementary character and introduces different possibilities for the circuit variations, as well as adds amplifier association concepts and circuit switching. This work can be used as a reference for the planing of laboratory activities or as a suggestion for projects in practical activities within the matter analogic electronic.

KEYWORDS: amplifiers classes; amplifiers circuits; efficiency.

¹ Graduando em Engenharia de Telecomunicações, Universidade Estadual de Campinas, Limeira-SP, v245551@dac.unicamp.br

² Prof. Dr. em Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira- SP, arnold@unicamp.br



INTRODUÇÃO

A disciplina Eletrônica Analógica está presente nas grades curriculares dos cursos de graduação em Engenharia Elétrica, Eletrônica, Telecomunicações, Mecatrônica e outros afins. Por ser uma disciplina de conteúdo básico para a formação do engenheiro, as inovações na forma de ministrar os conteúdos ou de proporcionar atividades complementares aos alunos se tornam recorrentes e estimuladas não apenas pelas novas diretrizes curriculares dos cursos de engenharia (DCN, 2019), mas também pela iniciativa de docentes que, em sintonia com a realidade da formação do engenheiro, buscam propor novos problemas para seus alunos.

O procedimento tradicional de ensinar eletrônica por meio de aulas teóricas e práticas vem sendo paulatinamente modificado com a adição de conteúdos que estimulem o aluno a se defrontar com outros problemas e a ampliar seu repertório de técnicas de resolução. Além disso, conteúdos que nem sempre estão presentes nos principais livros textos da disciplina podem ser utilizados para expandir os conhecimentos e gerar trabalhos em que novos procedimentos e aplicações são praticados e realizados. Portanto, assim como acontece com as demais disciplinas, metodologias inovadoras e conteúdos complementares são bem-vindos para melhorar a formação dos estudantes.

Os amplificadores eletrônicos de classe G podem se encaixar nessa proposta de novos conteúdos. As bibliografias principais, constantes nos programas das disciplinas de Eletrônica Analógica (BOGART, 2001; BOYLESTAD, 2013; HORENSTEIN, 1996; LALOND; ROSS, 1999; MALVINO, 1987; RODEN et al., 2002; SEDRA; SMITH, 2007), não trazem o tópico classe G, mas apenas os convencionais de classes A, B, AB, C e D. Na verdade, os amplificadores de classe G são constituídos por combinações entre essas classes de amplificadores. Alguns exemplos dessas combinações são encontrados em SELF (2006).

Este trabalho apresenta uma proposta de estudo de um amplificador de classe G com carga resistiva. A proposta tem finalidade didática, voltando-se para a compreensão das características de funcionamento dos amplificadores de classe G e seu comportamento, em relação à eficiência, para cargas resistivas, quando comparado com um amplificador de classe B, já proposto em outro trabalho (RAMOS; ARNOLD, 2021). Ademais, o tema dos amplificadores de classe G, por não estar convencionalmente presente dos livros textos, pode se tornar estimulante tanto para o desenvolvimento de projetos finais nas disciplinas quanto para a utilização como prática de laboratório em disciplinas Eletrônica Analógica e afins.



O trabalho se encontra dividido em quatro seções. A primeira delas é a seção de fundamentação teórica, em que são expostos os principais conceitos sobre amplificadores de classe G. Em seguida, tem-se a seção de desenvolvimento, na qual se descreve como o amplificador foi concebido e as medições que foram realizadas para a obtenção dos resultados dos testes propostos. Na seção de resultados e discussões são apresentados os resultados do modelo teórico e dos experimentos realizados. Esses resultados são comparados e discutidos. Finalmente, fecha-se o trabalho com as conclusões sobre as propostas realizadas.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Existem várias formas de se construir um circuito amplificador de classe G (SELF, 2006). Optou-se por utilizar a proposta analisada por Bortoni (1999), em razão de esta utilizar um número menor de transistores. Essa simplificação visa contribuir para a finalidade didática do trabalho.

Amplificadores Classe G

O diagrama esquemático do amplificador classe G que iremos estudar é baseado na sugestão de Bortoni (1999) e está representado na Figura 1. Todo amplificador de classe G possui, ao menos, duas fontes de alimentação. Nesse circuito estas fontes são simétricas e estão designadas como $\pm HV$ (fonte de alta tensão) e $\pm V$ (fonte de baixa tensão). O sinal de entrada a ser amplificado é designado por v_{in} e está acoplado ao amplificador por um capacitor, C , cuja reatância capacitiva é desprezível. Ao longo deste trabalho o sinal de entrada utilizado será senoidal e com frequência angular $\omega = 2\pi f$, em que f é a frequência em Hz. Os transistores Q_1 e Q_2 formam um par complementar e são polarizados, em classe B, pela fonte de baixa tensão. Por outro lado, Q_3 e Q_4 também formam um par complementar e são polarizados pela fonte de alta tensão, mas só irão conduzir quando o sinal de tensão na base for suficiente para fazer a junção base-emissor conduzir. Portanto, Q_3 e Q_4 formam um amplificador de classe C.

Todos os transistores estão polarizados por R_{1a} , R_{2a} , D_1 , D_2 , R_{2b} e R_{1b} , de modo que $R_{1a} = R_{1b}$, $R_{2a} = R_{2b}$ e os diodos, idealmente, possuem a mesma curva característica das junções base-emissor (BE) de Q_1 e Q_2 . Finalmente, os diodos D_3 e D_4 estabelecem os potenciais nos emissores de Q_3 e Q_4 para que sejam definidos

os acionamentos desses transistores e evitam que correntes fluam para a fonte de alimentação $\pm V$.

Os transistores estão polarizados, inicialmente, na região de corte. Durante o semiciclo positivo, enquanto a amplitude de v_{in} for inferior a $+V$, o potencial na base de Q_1 aumenta e esse transistor conduz, estabelecendo uma diferença de potencial na carga R_L próxima a v_{in} . Simultaneamente, Q_2 fica cortado. No semiciclo negativo, os papéis se invertem com Q_2 conduzindo e Q_1 em corte. Essa operação, portanto, é similar a de um amplificador classe B.

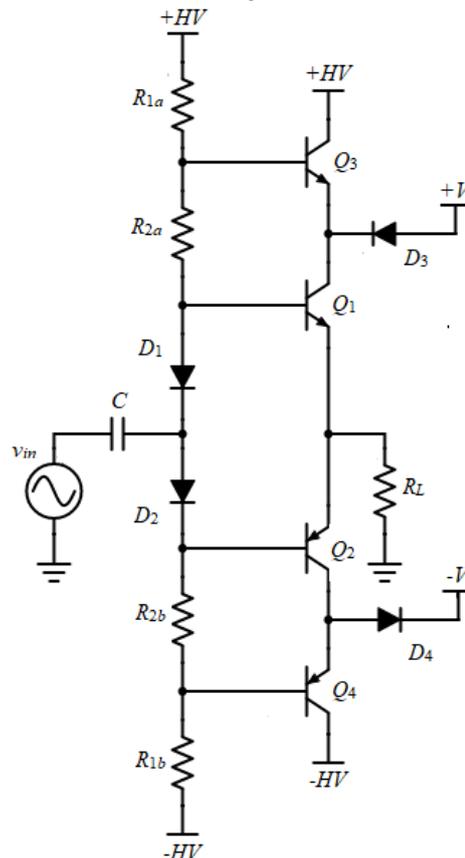
Se a amplitude de v_{in} tornar-se maior que $+V$, os transistores Q_3 e Q_4 se polarizam, respectivamente, nos semiciclos positivo e negativo.

Ao desconsiderar a tensão de saturação nos transistores ($V_{CEsat} = 0\text{ V}$), a tensão máxima de saída, V_{Lmax} , deve ser igual a HV . A tensão V será, portanto, uma fração $\alpha = V/HV$ de V_{Lmax} . As Equações 1 e 2 definem as tensões das fontes de alimentação.

$$V = \alpha V_{Lmax} \quad (1)$$

$$HV = V_{Lmax} \quad (2)$$

Figura 1 – Diagrama esquemático de um amplificador classe G com transistores bipolares



Fonte: elaborada pelos autores.



A potência total fornecida pelas fontes $\pm HV$ e $\pm V$ é designada por P_S e dada pela Equação 3:

$$P_S = 2VI_{S1}(\theta_T) + 2HVI_{S2}(\theta_T) \quad (3)$$

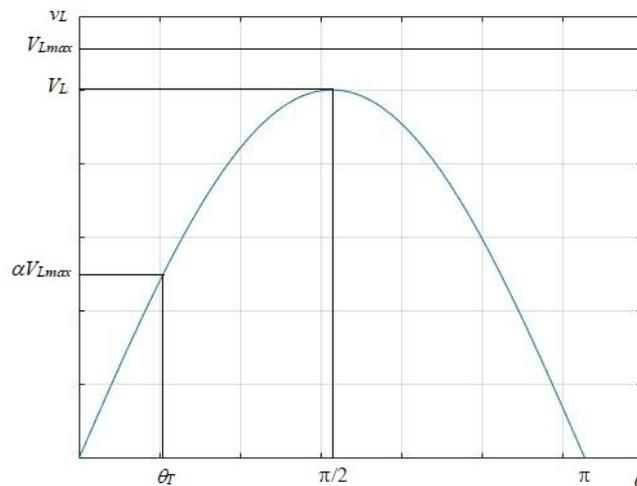
em que:

I_{S1} e I_{S2} são as correntes médias fornecidas pelas fontes V e HV ;

θ_T são as fases da tensão em que ocorre a ativação dos transistores Q_3 e Q_4 .

Na Figura 2, considerando-se um sinal senoidal qualquer na carga de amplitude V_L , está ilustrado o gráfico de v_L em função de θ e indicada a fase da tensão θ_T . A amplitude da tensão nessa transição é dada pela Equação 4.

Figura 2 – Forma da tensão de saída em função da fase com identificação da transição de estado dos transistores Q_3 (semiciclo positivo) e Q_4 (semiciclo negativo) na fase θ_T



Fonte: elaborada pelos autores.

$$V = V_L \text{sen}(\theta_T) \quad (4)$$

Substituindo (1) em (4) obtém-se

$$\theta_T = \text{sen}^{-1}\left(\alpha \frac{V_{Lmax}}{V_L}\right) \quad (5)$$

Sendo assim, caso a amplitude V_L esteja entre 0 e αV_{Lmax} , os transistores Q_1 e Q_2 operarão em classe B, e $\theta_T = \pi/2$, uma vez que Q_3 e Q_4 não estarão conduzindo. Se a amplitude do sinal de saída for maior que αV_{Lmax} e, evidentemente, menor que V_{Lmax} , θ_T será dada pela Equação 5.

Há, portanto, uma separação no fornecimento de corrente pelas fontes V e HV . A fonte V fornece corrente quando a fase for $0 < \theta < \theta_T$, cujo valor médio será dado pela Equação 6.



$$I_{S1}(\theta_T) = \frac{I_L}{\pi} \int_0^{\theta_T} \text{sen } \theta d\theta \quad (6)$$

$$= \frac{I_L}{\pi} (1 - \cos\theta_T)$$

A fonte HV fornece corrente quando a fase for $\theta_T < \theta < \pi/2$, cujo valor médio será dado pela Equação 7.

$$I_{S2}(\theta_T) = \frac{I_L}{\pi} \int_{\theta_T}^{\pi/2} \text{sen } \theta d\theta = \frac{I_L}{\pi} \cos\theta_T \quad (7)$$

A corrente que circula pelo circuito de polarização será desprezada por ser, geralmente, muito menor que a corrente pelos terminais de saída dos transistores.

Conhecendo-se, portanto, as correntes fornecidas pelas fontes de alimentação e sabendo-se que $I_L = V_L/R_L$, calcula-se a potência total fornecida por essas fontes, substituindo-se esses resultados na Equação 3.

$$P_S = \frac{2 V_L}{\pi R_L} V_{Lmax} [\alpha + (1 - \alpha)\cos\theta_T] \quad (8)$$

A eficiência do amplificador é obtida por $\eta = P_L/P_S$, em que $P_L = V_L^2/2R_L$ é a potência dissipada na carga.

$$\eta = \frac{\pi V_L}{4 V_{Lmax}} (\alpha + (1 - \alpha)\cos\theta_T)^{-1} \quad (9)$$

A potência dissipada pelos transistores (P_Q) também é facilmente calculada por meio de $P_Q = P_S - P_L$.

$$P_Q = P_S - \frac{V_L^2}{2R_L} \quad (10)$$

DESENVOLVIMENTO

O circuito utilizado para o desenvolvimento do experimento é composto por duas fontes simétricas: a fonte de alta tensão, designada por $\pm HV = 18 V$, e a fonte de baixa tensão, designada por $\pm V$. Foram feitos experimentos com esta fonte com



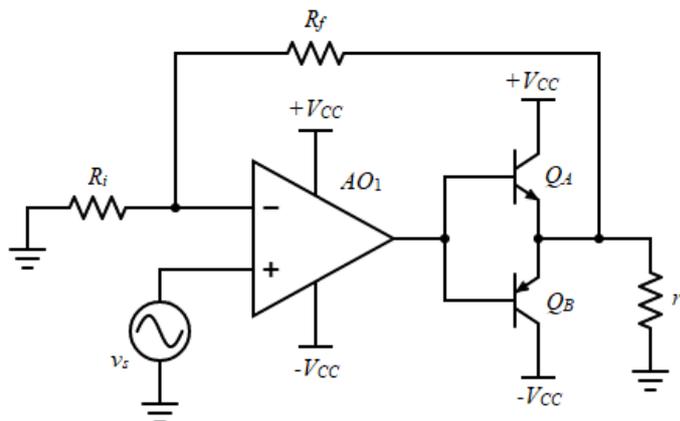
6 V, 9 V e 12 V. Um capacitor eletrolítico de $100 \mu\text{F} \times 25 \text{ V}$ foi utilizado para acoplar o sinal a ser amplificado na entrada do amplificador. O circuito de polarização é composto pelos resistores $R_{1a} = R_{1b} = 8,2 \text{ k}\Omega$, $R_{2a} = R_{2b} = 4,7 \text{ k}\Omega$ e $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ e pelos diodos D_1 , D_2 , D_3 e D_4 , todos do tipo 1N4148. Os transistores NPN, Q_1 e Q_3 são do tipo 2N3904 e BD135, respectivamente. Os transistores PNP Q_2 e Q_4 são do tipo 2N3906 e BD136, respectivamente. O par 2N3904 e 2N3906, assim como o BD135 e BD136, são transistores complementares.

Como utilizamos $+HV = 18 \text{ V}$ e o ganho de tensão do amplificador é próximo a 1, a saída do amplificador deveria apresentar valor máximo de amplitude $V_{Lmax} = 18 \text{ V}$ e, portanto, o sinal de entrada também deveria ter amplitude de 18 V. Os geradores de funções usados tipicamente em laboratórios de ensino, como o GW Instel SFG-2110, por nós utilizado, usualmente, não fornecem tensões com essa amplitude. Sendo assim, foi necessário construir um circuito pré-amplificador, baseado em amplificador operacional, para fazer a amplificação do sinal do gerador de funções. O diagrama esquemático deste pré-amplificador é mostrado na Figura 3.

Os componentes utilizados neste amplificador são: uma fonte de tensão simétrica $\pm V_{CC} = 18 \text{ V}$; um amplificador operacional CA3140 (AO_1); $R_i = 10 \text{ k}\Omega$; $R_f = 33 \text{ k}\Omega$; r_i é a impedância de entrada do amplificador da Figura 1, assim a tensão nesse componente é a mesma de v_{in} na Figura 1; e os transistores Q_A e Q_B , que são o par complementar BC337 e BC327, respectivamente.

O circuito do pré-amplificador é baseado na configuração não inversora usada com amplificadores operacionais (PERTENCE JR., 1996). Sendo assim, conforme a teoria desse circuito, o ganho de tensão (A_{vi}) deste circuito é de, aproximadamente, 4,3 ($A_{vi} = 1 + R_f/R_i$). Os transistores Q_A e Q_B estão ligados em *push-pull* e constituem um *buffer* de corrente para a saída. A queda de tensão nas junções base-emissor desses transistores produz uma pequena diminuição do ganho de tensão.

Figura 3 – Diagrama esquemático do pré-amplificador de tensão usado para alimentar o amplificador de classe G



Fonte: elaborada pelos autores.

Portanto, o conjunto experimental completo consiste no gerador de funções que fornece o sinal de entrada, do pré-amplificador da Figura 3 e do amplificador classe G apresentado na Figura 1.

Testes experimentais

Todos os testes experimentais foram realizados em um circuito montado cujo diagrama esquemático é mostrado na Figura 1. Preliminarmente ao procedimento experimental, o circuito foi simulado computacionalmente com o *software* LT Spice. Esse procedimento contribuiu significativamente para a definição dos componentes do circuito que foi implementado. O procedimento experimental foi orientado para a realização de um conjunto de medições que permitiram calcular a eficiência, de acordo com a Equação 9.

Nos experimentos foi usado como carga um resistor com resistência $R_L = 1 \text{ k}\Omega$. Aplicou-se na entrada do amplificador um sinal senoidal de frequência de 1 kHz com amplitudes que variaram entre 0 V e 16 V. O valor máximo da amplitude foi definido como aquele imediatamente inferior à constatação de distorção na saída do amplificador. O experimento consistiu em medir com um osciloscópio (usamos um Tektronix TDS2004C) as tensões de entrada (v_{in}) e saída (v_{RL}) do amplificador e as correntes médias, por intermédio de amperímetros digitais (usamos multímetros Instruterm MD-810), fornecidas pelas fontes +V e +HV, I_{s1} e I_{s2} , respectivamente. Descartou-se medir as correntes fornecidas pelas fontes complementares, de polaridade oposta, por supor que há plena simetria no circuito e, com isso, as fontes forneciam as mesmas correntes. A corrente pelo circuito de polarização (R_{1a} , R_{2a} ,



D_1 , D_2 , R_{2b} e R_{1b}) também foi monitorada por um amperímetro digital da mesma marca e modelo dos anteriormente informados.

Tal procedimento foi replicado para diferentes tensões da fonte $\pm V$ (6 V, 9 V e 12 V) com intuito de identificar os níveis de acionamento dos transistores de potência (Q_3 e Q_4) e avaliar possíveis influências desse parâmetro na eficiência do amplificador.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em todos os experimentos realizados, verificou-se que a corrente média pelo circuito de polarização manteve-se constante em 1 mA, tanto em corrente contínua (sem sinal de entrada) como com sinal de entrada de qualquer amplitude prevista. Diante disso, as tensões contínuas nas bases dos transistores permaneceram fixas, independentemente da tensão da fonte de alimentação $\pm V$. A Tabela 2 relaciona as tensões medidas nas bases dos transistores.

Tabela 2 – Tensões nas bases dos transistores em relação ao terminal de terra

	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
$V_B(V)$	0,6	-0,7	6,8	-7,0

Fonte: elaborada pelos autores.

Esse resultado implicou em acrescentar, aproximadamente, 18 mW na potência fornecida pelas fontes $\pm HV$ desde que se considere as correntes de base desprezíveis. Esse valor não foi computado no cálculo das potências e da eficiência.

As tensões nos emissores dos transistores são importantes para avaliar o ponto de disparo dos transistores de potência (Q_3 e Q_4). Evidentemente, essas tensões se modificam com $\pm V$. A Tabela 3 relaciona tais tensões.

Tabela 3 – Tensões nos emissores dos transistores em relação ao terminal de terra

$\pm V(V)$		Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
6,0	$V_E(V)$	0,0	0,0	6,2	-6,4
9,0	$V_E(V)$	0,0	0,0	8,4	-8,2
12,0	$V_E(V)$	0,0	0,0	11,3	-11,2

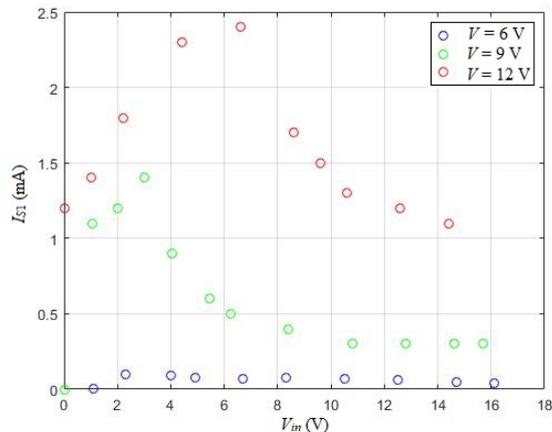
Fonte: elaborada pelos autores.

Uma análise conjunta das Tabelas 2 e 3 mostra que para $\pm V = 6,0$ V um pequeno sinal de entrada é suficiente para ligar Q_3 e Q_4 . Para os outros valores de $\pm V$ são necessários sinais de entrada de maior amplitude. As Figuras 4 e 5 mostram,



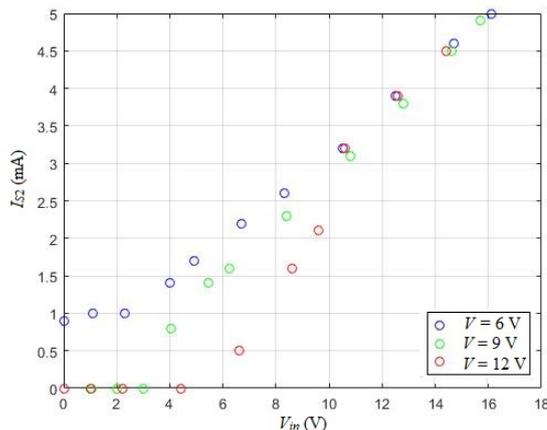
respectivamente, as correntes fornecidas pelas fontes I_{S1} e I_{S2} em função das amplitudes das tensões de entrada do amplificador, V_{in} .

Figura 4 – Corrente da fonte de baixa tensão em função da amplitude do sinal de entrada do amplificador classe G com carga resistiva



Fonte: elaborada pelos autores.

Figura 5 – Corrente da fonte de alta tensão em função da amplitude do sinal de entrada do amplificador classe G com carga resistiva



Fonte: elaborada pelos autores.

No resultado mostrado na Figura 4, observa-se que há um aumento da corrente I_{S1} em baixas amplitudes de V_{in} até que se alcance um valor máximo. Nessa faixa, simultaneamente, vê-se na Figura 5 que a corrente I_{S2} é 0 ou muito baixa (em torno de 1 mA quando $V = 6$ V). Aumentando-se a tensão de entrada, verifica-se um aumento progressivo e significativo de I_{S2} e uma diminuição de I_{S1} . Isso significa que a tensão de entrada foi suficiente para fazer os transistores de potência, Q_3 e Q_4 , conduzirem. Note que para $V = 6$ V, mesmo com amplitudes do sinal de entrada próximas a 0, já se verifica uma pequena condução de Q_3 e Q_4 (1 mA, aproximadamente). Essa condução é explicada pela polarização das junções

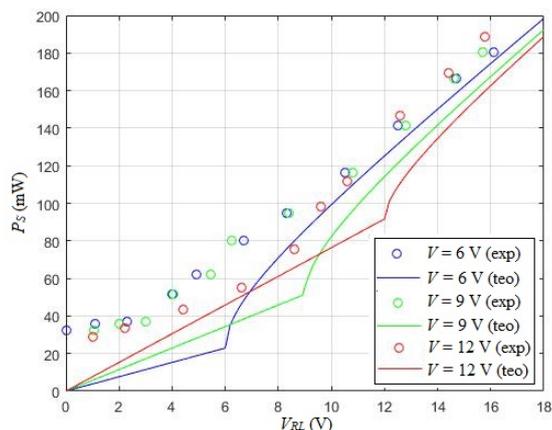


base-emissor desses transistores, que se encontra próxima ao limiar de condução. Conforme vemos nas Tabelas 2 e 3, para Q_3 $V_B = 6,8$ V e $V_E = 6,2$ V e para Q_4 $V_B = -7,0$ V e $V_E = -6,4$ V.

A tensão de saída máxima alcançada teve amplitude próxima a 16 V. Quando se aplicam tensões superiores aos 16 V, ocorre a saturação dos transistores e a distorção do sinal de saída. Teoricamente esperava-se os 18 V na saída acompanhando o limite estabelecido pela tensão de alimentação. A diferença constatada é devida ao circuito pré-amplificador, causada pelas quedas de tensão no amplificador operacional e nas junções base emissor dos transistores da configuração *push-pull*, e também às quedas de tensão nas junções base emissor dos transistores do amplificador classe G.

Na Figura 6 apresentamos o gráfico das potências totais fornecidas pelas fontes de alimentação $\pm V$ e $\pm HV$ em função da tensão de saída V_{RL} determinadas a partir do procedimento experimental (círculos) e da teoria (linhas contínuas), conforme previsto na Equação 11.

Figura 6 – Potência total fornecida pelas fontes de alimentação (experimental (círculos) e teórico (linhas contínuas)) em função da tensão de saída V_{RL}



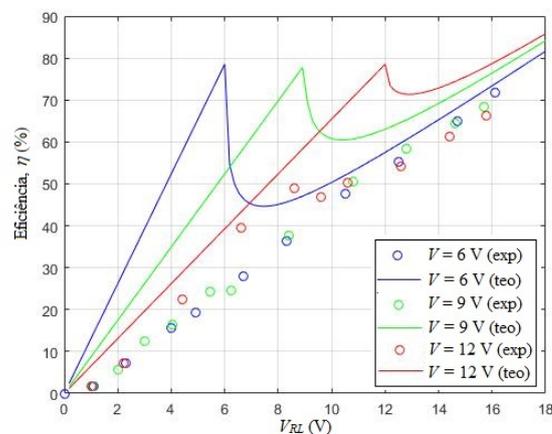
Fonte: elaborada pelos autores.

Verificamos nos gráficos da Figura 6 que as potências obtidas experimentalmente estão sempre com valores maiores que os previstos na Equação 11. Essa diferença pode ser atribuída à corrente de polarização dos transistores que no modelo teórico é desconsiderada, uma vez que se admite, convencionalmente, que a corrente pelos transistores de um amplificador classe B é nula. Na prática sempre se estabelece uma corrente mínima através desses transistores para evitar o efeito de *crossover*.

Verificamos também, na Figura 6, que no resultado experimental o acionamento dos transistores e o consequente fornecimento de potência pelas fontes $\pm HV$ ocorrem antes do nível de tensão de $\pm V$. Isso se deve à variação de tensão da entrada que se soma à polarização CC da base de Q_3 e Q_4 (6,8 V e -7,0 V, respectivamente). Por exemplo, quando $V = 9,0$ V, $V_{EQ3} = 8,4$ V e Q_3 passaria a conduzir quando $V_{BQ3} = 9,1$ V, portanto quando a entrada variar em 2,3 V, elevando o potencial da base de 6,8 V para 9,1 V, a condução deste transistor se inicia.

A eficiência do amplificador em função da tensão de saída está retratada na Figura 7, tanto pela determinação experimental (círculos) quanto pela teórica (linhas contínuas), por meio da Equação 12.

Figura 7 – Eficiência do amplificador (experimental (círculos) e teórico (linhas contínuas)) em função da tensão de saída V_{RL}



Fonte: elaborada pelos autores.

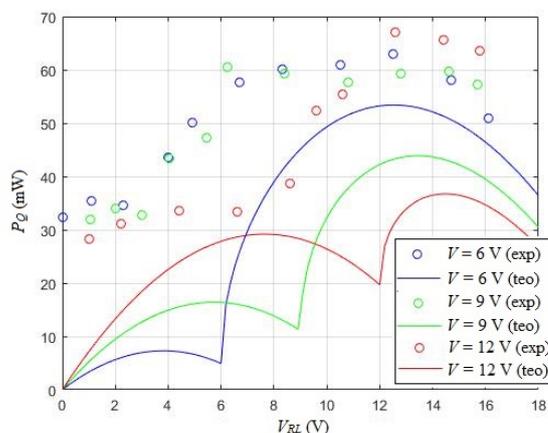
Na representação gráfica da eficiência teórica, fica evidente a variação da eficiência quando do acionamento da fonte de alta tensão. Pelas mesmas justificativas do chaveamento ocorrer para tensões inferiores a V , as variações de eficiência também foram detectadas nos experimentos realizados. No entanto, demonstraram-se mais discretos que os previstos pela teoria. Uma maior suavidade na transição de operação da fonte V para a fonte HV deve ser o motivo dessa variação menos aguda. Essa suavidade não é contemplada no modelo teórico.

Sob condições ideais, a teoria admite a máxima eficiência de um amplificador classe B como sendo de 78,5%, não considerando o consumo do circuito polarizador (espelho de corrente) (MALVINO, 1987). As eficiências máximas obtidas no amplificador classe G estudado alcançaram valores máximos superiores a 80%.



A Figura 8 apresenta os pontos experimentais (círculos) e a curva teórica (linhas contínuas) da potência total dissipada nos transistores em função da tensão de saída.

Figura 8 – Potência dissipada nos transistores (experimental (círculos) e teórico (linhas contínuas)) em função da tensão de saída V_{RL}



Fonte: elaborada pelos autores.

Em relação à potência dissipada pelos transistores, observações similares às feitas nos resultados já discutidos explicam que o ponto de mínimo das potências experimentais esteja ligado a uma tensão de saída menor que a prevista teoricamente. Da mesma forma, as potências obtidas experimentalmente são mais elevadas que as teóricas pois foram determinadas a partir das potências fornecidas pelas fontes de alimentação.

Cada uma das corcovas da representação gráfica da Figura 8 prioriza a dissipação de potência em um dos grupos de transistores. A primeira corcova, por ocorrer sob baixas tensões de saída, concentra as potências dissipadas nos transistores Q_1 e Q_2 (2N3904 e 2N3906, respectivamente). Os transistores Q_3 e Q_4 (BD135 e BD136) apresentam maior dissipação para tensões de saída elevadas, como representado na segunda corcova. Embora os transistores utilizados operem em pontos de trabalho distantes das suas regiões limítrofes de potência, nota-se que quanto menor for o valor de α , ou seja, quanto maior a diferença entre as tensões das fontes de alimentação, maior será a potência dissipada pelos transistores de potência elevada (Q_3 e Q_4).



CONCLUSÕES

Foi apresentado um estudo sobre o funcionamento de um circuito amplificador de classe G. Embora a ideia de associar amplificadores em cascata seja bastante difundida e convencionalmente explorada nas práticas convencionais de laboratório, além de amplamente abordada em livros textos usados nas disciplinas de Eletrônica Analógica, nos amplificadores classe G se introduz a ideia da comutação dos amplificadores para que cada um deles opere em uma faixa de tensões apropriada. Esse aspecto é incomum sob o ponto de vista tradicional de abordagem dos temas de eletrônica e, portanto, consiste na inovação da proposta deste trabalho em termos de ensino.

A eficiência de amplificadores classe A e B apresenta, respectivamente, comportamento quadrático e linear em relação à tensão de saída. Neste trabalho, verificou-se que a eficiência se estabelece como uma composição de funções, o que também representa, para finalidades de ensino, uma situação nova não mencionada nos livros textos.

Foi proposta uma metodologia convencional de análise da eficiência do amplificador, cujo principal diferencial é a introdução de duas fontes de alimentação. O número dessas fontes pode ser maior conforme conveniência e também pode ser uma proposta para futuros trabalhos.

As discussões mostram que há muitos pontos que podem ser aprofundados no desenvolvimento de um amplificador classe G. Essa diversidade torna este tipo de amplificador alvo de outras investigações que poderão ser exploradas em situações voltadas ao ensino de eletrônica. Outro ponto a ser explorado em um trabalho posterior é a inclusão de cargas com componentes resistivas e reativas, tendo em vista que os amplificadores de classe G podem ser aplicados em sistemas de áudio na emulação de alto-falantes.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado pelo Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Os autores agradecem o inestimável apoio desses órgãos de pesquisa governamentais.



REFERÊNCIAS

- BOGART JR., T. F. **Dispositivos e circuitos eletrônicos**. São Paulo: Makron Books, 2001.
- BORTONI, R. **Análise, Dimensionamento e avaliação de estágios de potência de amplificadores de áudio classes A, B, AB, G e H**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 1999.
- BOYLESTAD, R. **Dispositivos eletrônicos**. 11ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2013.
- DCN. Diretrizes Curriculares Nacionais para os Cursos de Graduação Em Engenharia, Ministério da Educação, Conselho Nacional de Educação, Câmara de Educação Superior, **Resolução nº 2, 24/4/2019**. 2019.
- HORENSTEIN, M. N. **Microeletrônica, circuitos e dispositivos**. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1996.
- LALOND, D. E.; ROSS, J. A. **Dispositivos e circuitos eletrônicos**. São Paulo: Makron Books, 1999.
- MALVINO, A. **Eletrônica**. São Paulo: McGraw-Hill, 1987.
- PERTENCE Jr., A. **Amplificadores operacionais e filtros ativos**. São Paulo: Makron Books, 1996.
- RAMOS, F. T.; ARNOLD, F. J. Uma abordagem didática para estudo de amplificadores eletrônicos, **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 40, p. 407-417, 2021.
- RODEN, M. S.; CARPENTER, G. L., WIESERMAN, W. R. **Electronic Design**. 4th Ed. Los Angeles CA: Discovery Press, 2002.
- SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microeletrônica**. 5ª ed. São Paulo: Person Prentice-Hall, 2007.
- SELF, D. **Self on Audio**. 2nd ed. Oxford: Newnes, 2006.