

AMPLIFICADOR DE ÁUDIO CHAVEADO

F. Vincenzi R. S., C.A. Bissochi Jr, J.B. Vieira Jr, V.J. Farias e L. C. Freitas

Universidade Federal de Uberlândia – FEELT
Av. Segismundo Pereira, s/nº, Campus – Santa Mônica
CEP. 38.400-902 Uberlândia, MG - Brasil
E-mail: freitas@ufu.br

Resumo - Neste artigo são apresentados os arranjos topológicos utilizados para amplificação de sinais, inclusive de áudio, que estão sendo estudados pelo grupo de pesquisa em Eletrônica de Potência da UFU. As estruturas apresentam princípio de operação bastante simplificado, podendo ser descrito em apenas dois estágios. Devido à classe de operação chaveada, estes novos amplificadores apresentam rendimento maior se comparado com os amplificadores lineares disponíveis no mercado, assegurando, ainda, a qualidade do sinal de saída. O princípio de operação e a análise teórica são descritos e verificados por simulação e resultados experimentais.

Abstract – This paper presents some new topologies that are commonly employed in signal amplification, mainly in sound amplification, as they have been studied by the Power Electronics Research Group in Federal University of Uberlândia. The structures operating principle is relatively simple, which can be described in two stages. Due to the switching operating class, such new amplifiers present higher efficiency if compared to those ones available commercially, once that they assure the high quality of the output signal. The operating principle and the theoretical analysis are then described and verified via simulation and experimental results.

I. INTRODUÇÃO

Amplificadores de áudio de potência são primariamente classificados pela configuração topológica do estágio de saída. Esta classificação é baseada na quantidade de tempo em que os dispositivos semicondutores de saída operam durante cada ciclo. As principais classes de operação são:

- **Classe A** – Ocorre quando ambos dispositivos de saída conduzem continuamente ao mesmo tempo durante todo o ciclo. Deve-se destacar que este tipo de amplificador possui rendimento muito baixo devido ao fato que os componentes operam o tempo todo. Desta forma, são relativamente grandes, pesados e esquentam

muito. Entretanto é o amplificador que apresenta a menor distorção. Devido a estas características são largamente utilizados nos estágios de pré-amplificação, pois o nível de potência é reduzido.

- **Classe B** é o oposto do amplificador Classe A. Os dispositivos de saída não podem conduzir ao mesmo tempo, portanto cada um dos componentes é responsável pela amplificação da metade de cada ciclo. Em face do exposto a configuração Classe B possui alta eficiência, mas uma linearidade pobre, especialmente na região do “crossover”. Amplificadores Classe B são muito utilizados em equipamentos que usam pilhas tal como “walk-talk”, devido ao rendimento elevado.

- **Classe AB** – Ocorre aqui uma união, onde o estágio Classe A é utilizado como pré-amplificador e o Classe B como estágio de saída. É configurado de tal forma que os dois dispositivos de potência na saída ficam conduzindo uma fração da corrente nominal todo o tempo. Assim consegue-se eliminar a não linearidade na região do “crossover”. A eficiência global fica em torno dos 50%, com uma excelente linearidade, fazendo deste amplificador o projeto mais popular.

- **Classe D** é a classe dos amplificadores chaveados. Os dispositivos interruptores são rapidamente ligados e desligados pelo menos duas vezes durante um período e os componentes do estágio de saída não conduzem simultaneamente. Este tipo de amplificador possui um alto rendimento. A desvantagem desta classe é apresentar distorção e defasagem angular provocada pelo filtro passa baixa passivo de saída, utilizado para recompor a forma de onda original.

- **Classe G e H**. Um programa musical exige do amplificador uma potência média menor do que a necessária para reproduzir os níveis mais altos do sinal de entrada, que são os picos. Sendo assim, bastaria que o amplificador fosse capaz de fornecer a potência máxima por um curto intervalo de tempo. Baseado nesta característica desenvolveu-se os amplificadores classe G e H que realizam uma comutação entre fontes de alimentação, do nível de baixa tensão para um mais elevado, quando ocorrem os picos.

- **Classe I**. A topologia classe I consiste de um amplificador classe A (ou AB) alimentado por um amplificador classe D, combinando assim a linearidade

com o elevado rendimento. O sinal de áudio é aplicado simultaneamente ao amplificador classe A e classe D, sendo que o primeiro fornece potência à carga e o segundo alimenta o amplificador classe A.

II. TOPOLOGIAS

A Fig. 1(a) mostra um dos amplificadores chaveados de potência que opera com quatro chaves arranjadas na configuração “Half-Bridge”, onde duas fontes de corrente modulam a tensão sobre o capacitor de saída C. As Figuras 1(b) e 1(c) mostram os circuitos “full-bridge” alternativos, os quais podem produzir o mesmo resultado obtido pelo circuito da Fig.1(a) por meio de um controle apropriado.

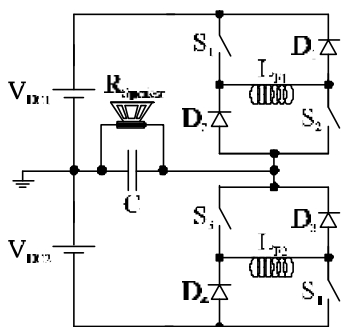


Figura 1(a) - Configuração “Half-bridge”.

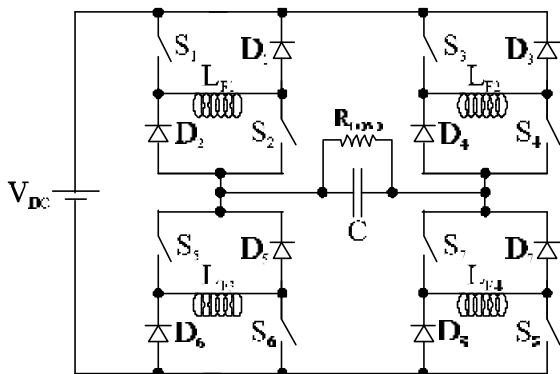


Figura 1(b) - Configuração “Full-Bridge”.

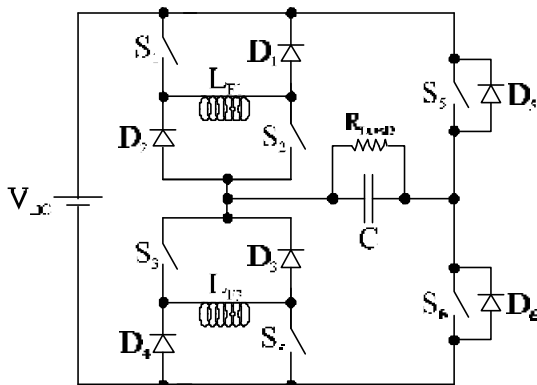


Figura 1(c) - “Full-Bridge” com duas fontes de corrente.

Pode-se observar no “full-bridge” da Fig. 1(b) que a máxima tensão nas chaves é metade da tensão da fonte de alimentação. Desta forma ela é muito atrativa para aplicações em alta tensão. A única diferença de projeto entre o conversor da Fig. 1(a) e 1(b) é o número de semicondutores, porque os indutores L_{F1} e L_{F4} podem ser enrolados no mesmo núcleo, o mesmo ocorre com L_{F2} e L_{F3} .

Visando reduzir a quantidade de semicondutores utilizados, a Fig. 2 ilustra uma configuração topológica original, que consiste de duas chaves de potência operando em alta frequência, dois pares de indutores acoplados, um capacitor, onde, da mesma forma, é imposta a forma de onda de saída desejada e dois diodos rápidos.

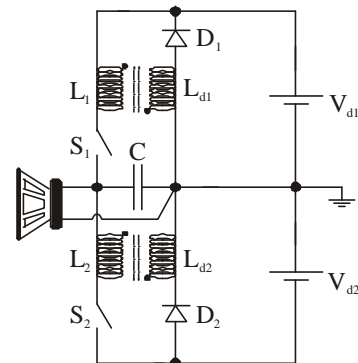


Figura 2 – Amplificador usando indutores acoplados.

Estes conversores podem ser usados em diversas aplicações, como as apresentadas em seguida:

- Reator Eletrônico – “Ballast”;
- Acionamento de Motores;
- Estabilizador de Tensão Série;
- Amplificador de Áudio;
- Conversores DC/DC Multi-Níveis;
- Reguladores AC/AC.

III. PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO

Será apresentado o princípio de funcionamento para os conversores mostrados na Fig. 1(a) e na Fig. 2. Ressalta-se que a operação está resumida em apenas dois estágios.

A. Conversor “Half-Bridge”

O primeiro estágio tem início quando as chaves S_1 e S_2 fecham fazendo com que a tensão sobre o capacitor cresça, devido à fonte de corrente superior, composta por V_{DC1} e L_{F1} . Neste caso, a tensão no capacitor ΔV_C aumenta, como indicado na Fig. 3. Durante este estágio, se há energia armazenada no indutor L_{F2} , os diodos D_3 e D_4 são polarizados diretamente e assim, esta energia retorna para a fonte

de alimentação V_{DC2} passando pelo capacitor C. Isto contribui para aumentar a tensão ΔV_C .

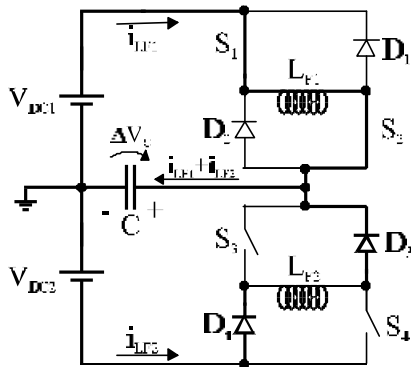


Figura 3 – “Half-Bridge” no 1º estágio de operação.

O segundo estágio de operação é o complemento do primeiro. Quando as chaves S_3 e S_4 são fechadas, a fonte de corrente inferior (V_{DC2} e L_{F2}) força a tensão no capacitor a decrescer, com está indicado na figura 4 pelo sentido de ΔV_C . O comportamento dos diodos é o mesmo descrito anteriormente. Se não há energia no indutor L_{F1} , não haverá contribuição para o decréscimo da tensão no capacitor.

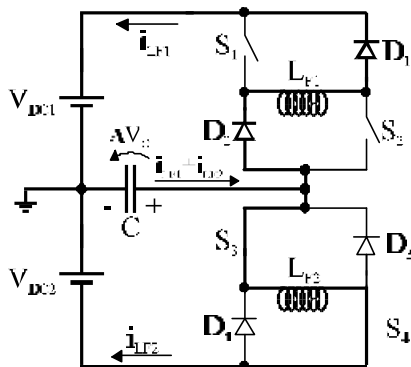
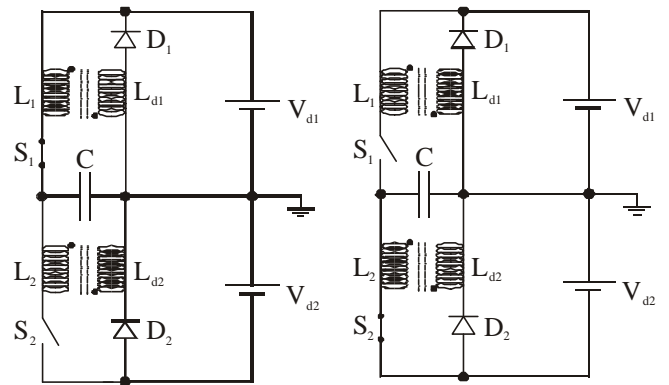


Figura 4 – “Half-Bridge” no 2º estágio de operação.

B. Amplificador Utilizando Indutores Acoplados

Durante o primeiro estágio a chave S_1 está conduzindo e S_2 abre, conforme mostra a Fig. 5(a). Desta forma, a fonte de corrente L_1 carrega o capacitor C. Uma vez que a frequência de ressonância é muito menor que a frequência de chaveamento, i_{L1} aumenta linearmente e, assim, a tensão sobre o capacitor aumenta da mesma forma. A corrente de desmagnetização de L_2 flui através de seu indutor acoplado L_{d2} .

No segundo estágio, ilustrado pela Fig. 5(b), a chave S_2 está conduzindo, enquanto S_1 está desligada. A fonte de corrente L_2 força a tensão sobre o capacitor C a decrescer. Da mesma forma, a corrente de desmagnetização de L_1 flui através do indutor acoplado L_{d1} .



(a) Primeiro Estágio

(b) Segundo Estágio

Figura 5 – Estágio de operação do amplificador com indutores acoplados

IV. ESTRATÉGIA DE CONTROLE

Um controle extremamente simples da tensão sobre o capacitor C foi desenvolvido para o conversor “Half-Bridge” ilustrado na Fig. 1(a). É constituído basicamente por um comparador com um laço de histerese bastante estreito, como ilustra a Fig. 6.

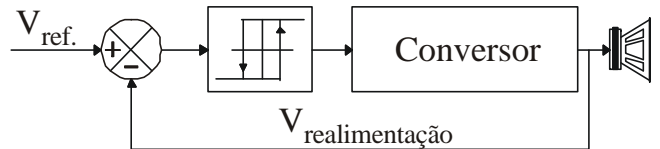


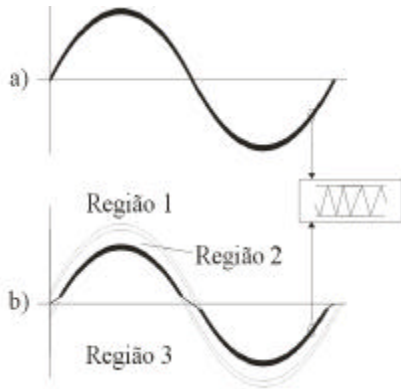
Figura 6 – Esquema do circuito de controle com laço de histerese.

Duas estratégias de controle distintas foram implementadas para impor a tensão desejada sobre o capacitor de saída na topologia que utiliza indutores acoplados (Fig. 2).

A primeira é composta somente por um estreito laço de histerese, conforme explicado acima. Deste modo, as chaves do amplificador operam de forma complementar.

A Fig. 7(b) mostra a outra técnica de controle utilizada. Nesta proposta, o sinal de entrada é duplicado e, posteriormente, estes sinais são levemente deslocados, um para cima e outro para baixo, em relação ao sinal original, pela adição de níveis de tensão adequados. Assim, surgem três regiões de controle distintas. Pode-se observar na figura o denominado controle por histerese duplo para uma onda senoidal de entrada.

A Tabela 1 mostra a lógica de controle das chaves, de acordo com o nível de tensão proveniente da realimentação.



**Figura 7 – (a) Controle por histerese simples.
(b) Controle por histerese dupla.**

Tabela 1 – Lógica de controle.

Região	S ₁	S ₂
1	ABERTA	FECHADA
2	ABERTA	ABERTA
3	FECHADA	ABERTA

V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para analisar e verificar a operação do circuito será apresentado os resultados de simulação para as topologias abordadas nas análises anteriores, ou seja, os amplificadores ilustrados pelas figuras 1(a) e 2.

A. Conversor “Half-Bridge”

O circuito da Fig. 1(a) foi simulado segundo os parâmetros mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros

$V_{DC1} = V_{DC2} = 12V$
$L_{F1} = L_{F2} = 1mH$
$C = 8\mu F$

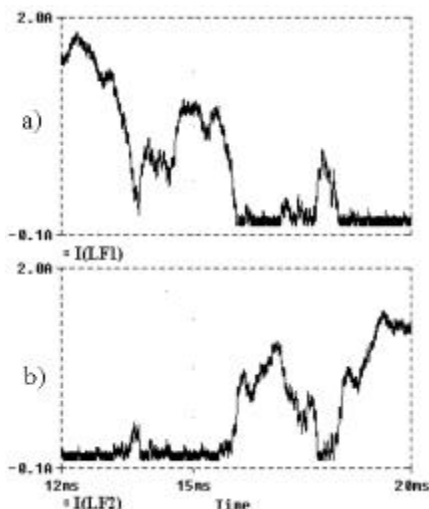
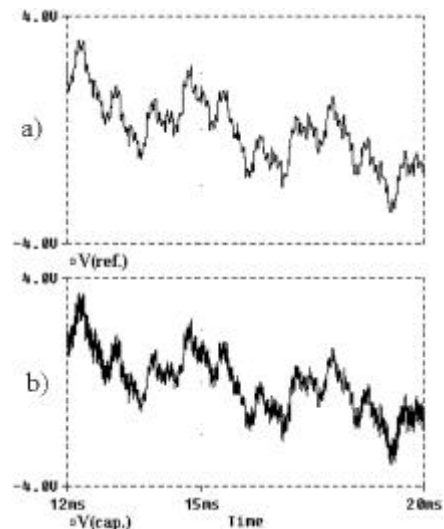


Figura 8 – Corrente nos indutores L_{F1} e L_{F2} .

A Fig. 8 mostra a corrente nos indutores L_{F1} e L_{F2} , onde pode-se observar, com a ajuda da Fig. 8, que existe corrente no indutor L_{F1} a partir do momento em que a tensão imposta sobre o capacitor é positiva. Por outro lado, para uma tensão negativa sobre o capacitor, a fonte de corrente inferior (L_{F2} e V_{DC2}) entra em atividade.

A Fig. 9 ilustra as formas de onda de entrada (a) e a tensão imposta sobre o capacitor de saída (b). Pode-se verificar, visualmente, que o circuito de controle faz com que a tensão modulada sobre o capacitor acompanhe fielmente o sinal de entrada.



**Figura 9 – (a) Sinal de referência.
(b) Tensão de saída imposta.**

B. Amplificador Utilizando Indutores Acoplados

A Tabela 3 contém os parâmetros utilizados na simulação da topologia ilustrada na Fig. 2.

Tabela 3 - Parâmetros

$V_{d1} = V_{d2} = 50V$
$L_1 = L_2 = L_{d1} = L_{d2} = 1mH$
$C = 10\mu F$
$R_C = 8\Omega$

A Fig. 10 mostra a comparação entre as formas de onda de entrada e a tensão imposta sobre o capacitor, cujos resultados foram obtidos utilizando o controle por histerese simples. O sinal de referência foi gerado pela seguinte expressão:

$$x(t) = 0,3 \cdot \sin(2\pi \cdot 20t) + 0,3 \cdot \sin(2\pi \cdot 100t) + 0,3 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 200t)$$

A Fig. 11 mostra a análise de Fourier da tensão imposta sobre o capacitor de saída, com a malha de realimentação operando com ganho de aproximadamente 50. Desta análise pode-se avaliar a coerência e a fidelidade do sinal de saída.

As correntes nos indutores L_1 e L_2 e na carga são mostradas na Fig. 12. Pode-se verificar que cada

indutor é responsável por modular a tensão de saída no seu respectivo semiciclo.

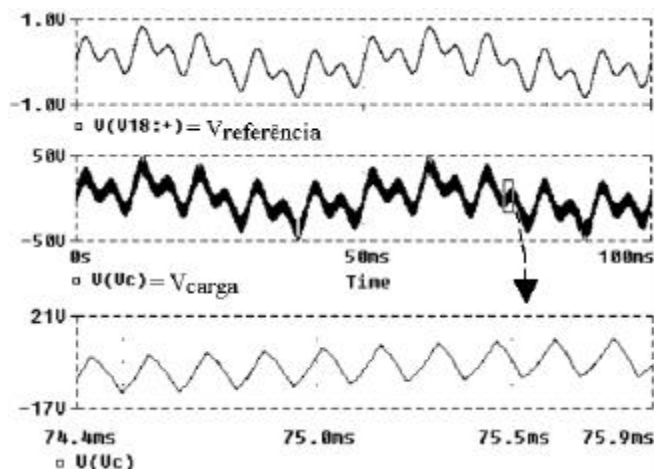


Figura 10 – Sinal de referência e Tensão de saída.

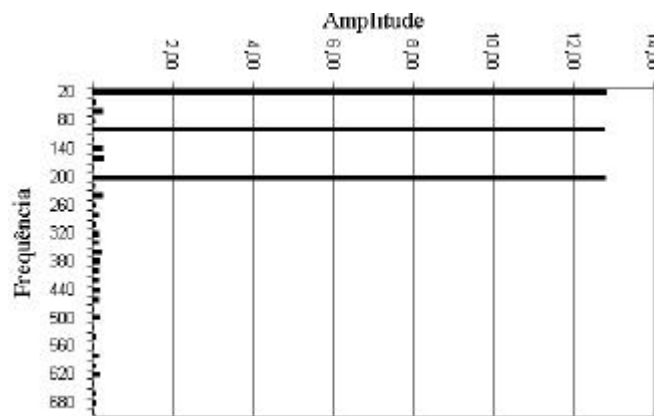


Figura 11- Análise de Fourier da tensão de saída.

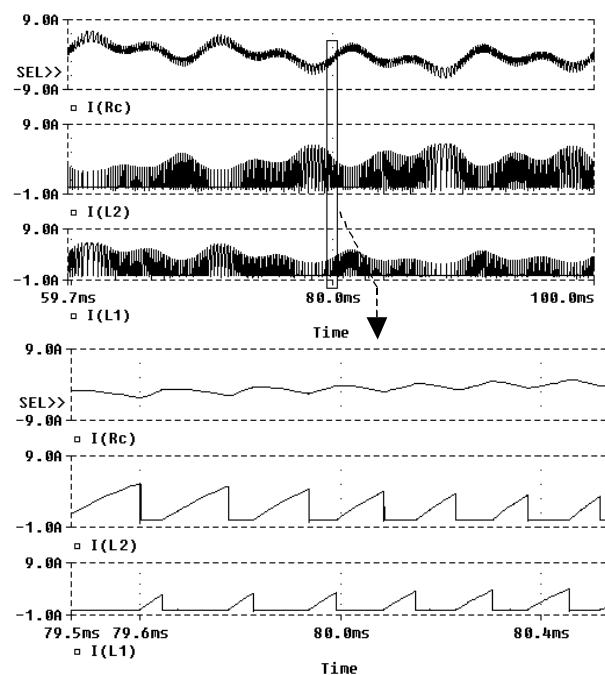


Figura 12–Corrente na carga e nos indutores L_1 e L_2 .

VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com o propósito de confirmar a análise teórica foram construídos os protótipos dos amplificadores “Half-Bridge” (Fig.1a) e com indutores acoplados (Fig.2).

A. Conversor “Half-Bridge”

A Tabela 4 contém os parâmetros usados durante os ensaios, para um protótipo de 10W. As chaves utilizadas são MOSFETs IRFZ 48 e os diodos MBR 1045.

Tabela 4 - Parâmetros

$V_{DC1} = V_{DC2} = 12V$
$L_{F1} = L_{F2} = 1mH$
$C = 8\mu F$

O sinal de referência foi extraído de um aparelho de “CD player”. A carga do amplificador é conectada em paralelo ao capacitor de saída e é composta por dois “sub-woofer” de 12”, dois “mid-range” de 6” e dois “tweeters”, todos com impedância característica de 8Ω .

A Fig. 13 mostra as correntes nos indutores, comprovando experimentalmente que cada fonte de corrente é responsável por modular a tensão de saída em seu respectivo semiciclo.

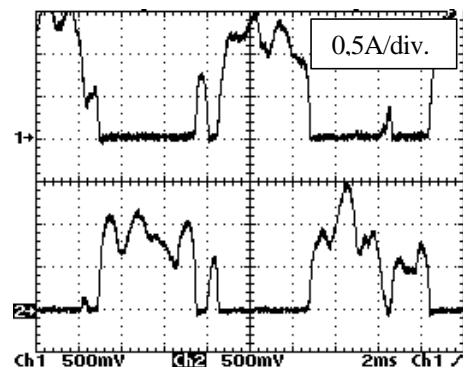


Figura 13 – Corrente nos indutores L_{F1} e L_{F2} .

O sinal de referência e a tensão imposta sobre o capacitor C são mostrados na Fig. 14, onde se pode observar que a tensão de saída segue o sinal de referência.

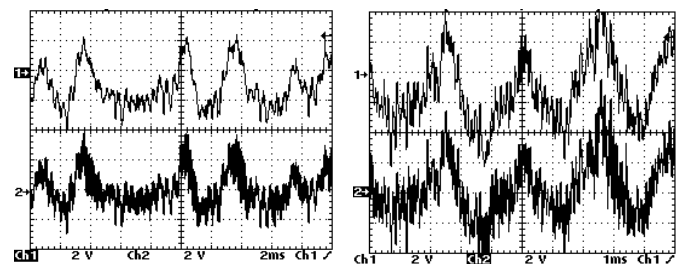


Figura 14 – Sinal de referência (canal 1) e tensão de saída (canal 2).

Para obter o sinal AM de 1.2kHz mostrado na Fig. 15, o amplificador opera com ganho de 50 e a tensão de entrada foi elevada para 70V. Os semicondutores foram substituídos para suportar a nova condição do ensaio.

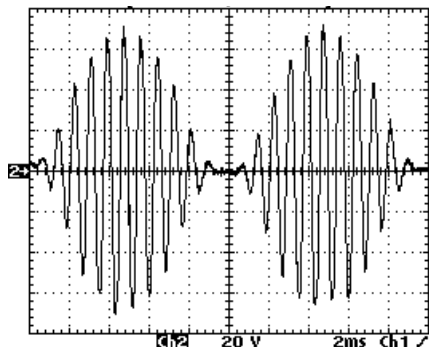


Figura 15 – Modulação AM de 1,2kHz.

Para um melhor entendimento do comportamento do conversor, foi montado o diagrama de Bode através de dados experimentais. No experimento uma onda senoidal com amplitude de 1V foi inserida ao amplificador, que opera com ganhos de 10, 20, 30, 40 e 50 e tensão na fonte simétrica de 70V. A Fig. 16 ilustra esta experimentação, cuja carga utilizada foi de 100Ω.

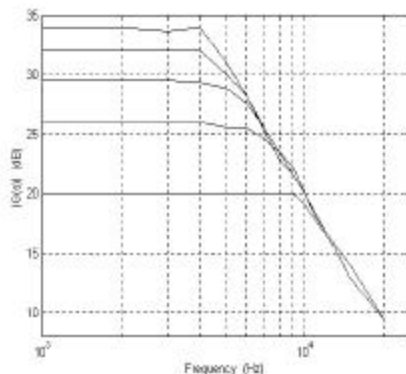


Figura 16 – Diagrama de Bode – “Half-Bridge”.

No diagrama de Bode acima se pode observar que a curva cai em uma taxa de aproximadamente 12dB/oct, caracterizando a resposta de um sistema de segunda ordem.

O amplificador “Half-Bridge” proposto opera com altas potências e altas tensões de saída, além de funcionar em toda condição de carga para o qual foi projetado.

B. Amplificador Utilizando Indutores Acoplados

O protótipo do conversor ilustrado na Fig. 2 foi construído segundo os parâmetros da Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros.

$L_1 = L_2 = L_{d1} = L_{d2} = 1\text{mH}$
$C = 5\mu\text{F}$

Pode-se adiantar que se conseguiu um rendimento de 80%, medido no momento em que o amplificador entregava 650W à carga e, deve-se salientar que para impor a tensão desejada na saída, o controle utilizado foi o de histerese dupla.

A Fig. 17 ilustra as formas de onda de corrente na carga, e nos indutores L_1 e L_2 . Pode-se observar que a corrente nos indutores é maior do que a solicitada pela carga, mostrando a existência do fluxo de potência reativa.

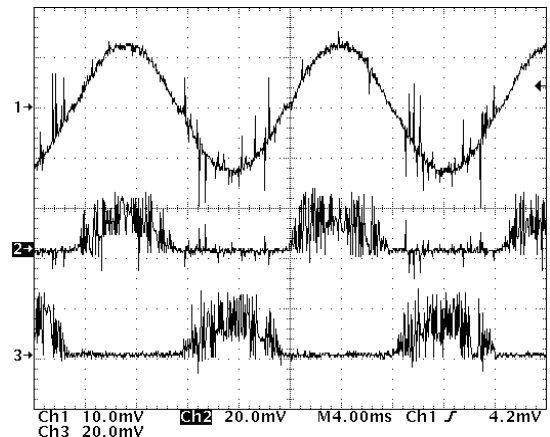


Figura 17 – Corrente de carga (canal 1 - 5A/div.)
Corrente no indutor L_1 (canal 2 - 10A/div.)
Corrente no indutor L_2 (canal 3 - 10A/div.)

O sinal de referência senoidal e a tensão de saída entregue a uma carga resistiva são mostrados na Fig. 18, com o amplificador operando com ganho de 20.

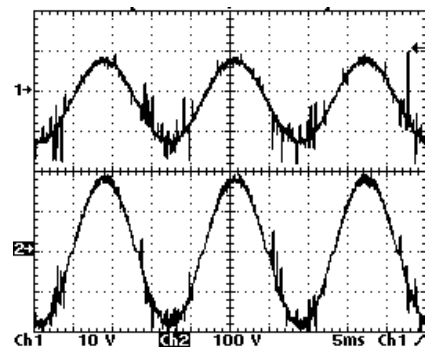


Figura 18 – Sinal de referência (canal 1 - 10V/div.)
Tensão de saída (canal 2 - 100V/div.)

Visando melhorar a compreensão deste amplificador, que utiliza indutores acoplados para circular a corrente desmagnetização (reativa), foi traçado o diagrama de Bode utilizando dados experimentais. Foi utilizado um sinal de referência senoidal de 2V de amplitude. O amplificador estava sendo alimentado por uma tensão de 70V nas fontes simétricas, o ganho de tensão foi ajustado em 10 e nenhuma carga foi conectada. Observa-se na Fig. 19

que a curva decai a uma taxa de aproximadamente 60dB/déc, o que caracteriza a resposta de um sistema de terceira ordem.

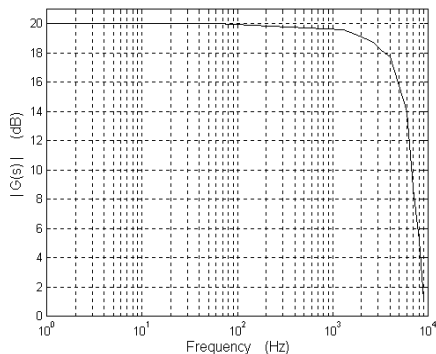


Figura 19 – Diagrama de Bode.

A frequência de corte é de aproximadamente 4kHz, que é considerada baixa quando se deseja amplificar todo o espectro de frequências audíveis. Os componentes L e C do circuito são quem determinam a frequência de corte e, portanto, podem ser modificadas para atender cada aplicação.

Para verificar a aplicação como amplificador de áudio, um sistema com três autôfalantes de 4Ω foram empregados.

A Fig. 20 mostra um trecho do programa musical, aplicado à entrada do amplificador, e a tensão de saída. A utilização do “software” “WaveStar”, versão 1.2.2, permitiu gerar o espectro harmônico do sinal de entrada (Fig. 21a) e da tensão de saída (Fig. 21b), para posterior análise. Nestes gráficos estão presentes apenas os conteúdos harmônicos associados à onda fundamental, cuja frequência foi calculada em 283Hz.

A taxa de distorção harmônica THD, para este trecho em estudo, apresentou valor calculado menor que 1%.

O mesmo ensaio foi realizado para um outro momento do programa musical, só que agora o “software” calculou a frequência da fundamental em 1.180Hz. Nesta experimentação, a taxa de distorção harmônica subiu para aproximadamente 10%. O aumento na THD é explicado pelas distorções que a baixa frequência de corte (Fig. 19) introduz.

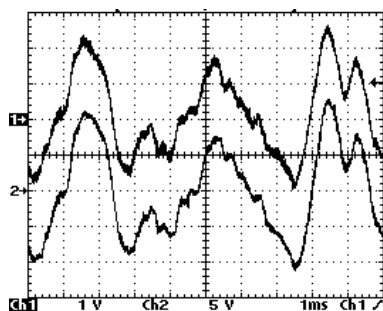


Figura 20–Sinal de entrada (canal 1 - áudio)
Tensão de saída (canal 2).

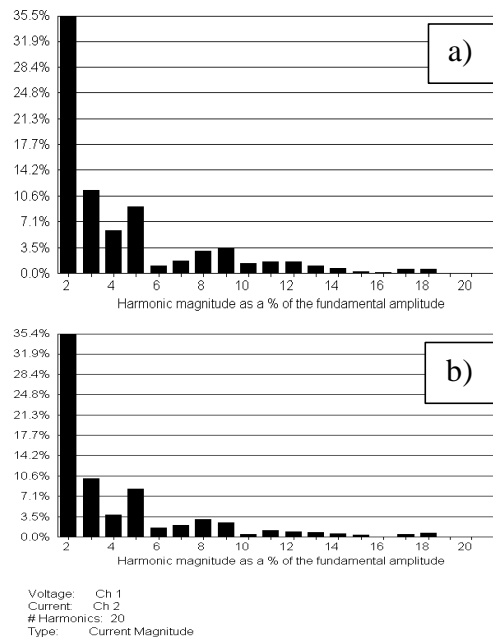


Figura 21 - (a) Espectro harmônico do sinal de entrada. (b) Espectro harmônico da tensão de saída.

VII. CONCLUSÕES

Novos amplificadores de áudio chaveados foram analisados neste artigo. A diferença topológica básica entre eles está associada ao método da devolução da energia reativa (corrente de desmagnetização) a fonte de alimentação.

Duas possibilidades de circuitos de controle também foram abordadas. A utilização da histerese dupla permitiu reduzir o fluxo de reativos e, conseqüentemente, o rendimento da estrutura aumenta.

Resultados de simulação e experimental foram apresentados para confirmar a boa performance dos amplificadores, onde se observou que a tensão de saída segue o sinal de referência dentro da faixa de projeto.

O amplificador com indutores acoplados apresentou uma grande dissipação de energia durante a comutação das chaves.

Para se manter um rendimento quase constante sobre toda faixa de operação, a tensão na fonte simétrica deve ser ligeiramente superior à tensão requerida pela carga (V_{Cap}), desta forma reduz-se as perdas por chaveamento e condução.

Frequência de corte mais elevada pode ser obtida mudando-se os valores de L e C do circuito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://www.cis.ohiostate.edu/hypertext/faq/usenet/AudioFAQ/part4/faq.html>
- [2] <http://www.passlabs.com/seclassa.htm>
- [2] Mohan, N.; Underland, T.M.; Robins, W.P.; “Power Electronics: Converters, Applications and Design”, John Wiley & Sons, Singapore, 1989.