

## Sobre a Influência da Carga nos Amplificadores de Potência

Marcelo Barros (marcelo@hotsound.com.br) – Aluno do Departamento de Física da Universidade Federal de São Carlos (DF-UFSCar) e consultor da HotSound – Amplificadores Profissionais.

Publicado em 01-02-04/2000 – revista Backstage ns. 62, 63 e 65

### Resumo

O objetivo do presente artigo é de esclarecer um assunto ainda bastante obscuro no meio profissional, pois temas como: fator de amortecimento, distorção, potência, entre outros, já são assuntos devidamente “esmiuçados” em amplificadores. No entanto, em pouco conhecimento permanece o fato de que os amplificadores interagem com as suas cargas e têm seu comportamento grandemente influenciado por elas. Uma destas formas de interação ocorre quando alimentamos impedâncias fortemente reativas, ou seja, justamente as cargas que todos nós utilizamos: os alto-falantes.

### Objetivos

A motivação deste artigo é o preocupante quadro de que, poucos amplificadores são bons na interação com as cargas. (conforme citado e comentado pelo Prof. Homero Sette Silva na revista *Backstage*). Distorção harmônica, instabilidade e até queima do estágio de saída são comuns. O principal objetivo deste pequeno texto é levar à compreensão básica do fenômeno através de uma explanação simples, não pretendendo ser definitiva ou completa; visa elucidar o leitor, profissional de áudio ou não, de modo que se tenha sempre em mente esse fato ao adquirir-se uma ferramenta tão básica como um amplificador de potência.

Todavia, para que se compreenda bem este assunto, convém começar do início e seguir passo a passo o caminho que leva até ele.

### Uma primeira análise da amplificação - cargas resistivas

A grande maioria dos amplificadores de potência modernos trabalham na configuração amplificador de tensão, isto é, produzem na saída uma **onda de tensão** que é proporcional àquela aplicada em sua entrada e que representa o programa de áudio. Esta onda de tensão de saída tem usualmente grandes amplitudes de modo a gerar uma **onda de corrente** também de grande amplitude ao percorrer-se uma carga de valor ôhmico muito baixo, como alto-falantes por exemplo. Naturalmente, a impedância de saída de tais geradores (amps) deve ser bem mais baixa do que a impedância da carga, de outra maneira não seria possível gerar ondas de corrente de grandes amplitudes.

Considera-se, agora, um amplificador (fictício e que não se refere à nenhuma marca) recebendo um sinal senoidal e alimentando uma carga **puramente resistiva**<sup>[1]</sup>, ou seja, que não possui reatância (que caracteriza um comportamento reativo). Neste caso especial a carga aproveita toda energia fornecida pelo gerador (dissipa potência por efeito Joule, ou seja, toda energia é transformada em calor).

Tal fato ocorre porque que num circuito puramente resistivo não há **atraso** ou **defasagem** entre a onda de tensão e a onda de corrente, nesse caso, ambas senoidais; isso porque resistores não acumulam energia como os indutores e os capacitores, terminando por não interferirem nas formas de onda relativamente ao tempo (na verdade a explicação é mais profunda e como tantas mais que veremos adiante não caberiam na proposta deste artigo. Vamos

limitar-nos portanto à uma abordagem mais simples). Na figura 1 pode-se notar como as ondas de tensão e de corrente num circuito resistivo caminham perfeitamente juntas, estando assim, em fase.

A potência instantânea  $p(t)$  dissipada por uma resistência elétrica pode ser obtida pelo produto, ponto a ponto, entre  $v(t)$  e  $i(t)$ ; a expressão fica pois  $p(t)=v(t)\times i(t)$ . A figura 1 mostra a forma de onda da tensão e da corrente e como fica a forma de onda da potência.

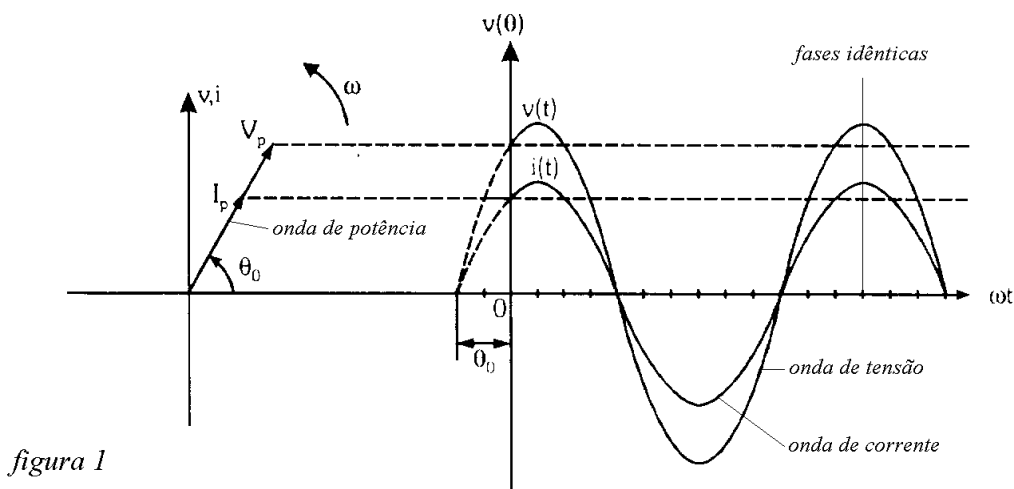


figura 1

Como resultado, a potência consumida por uma carga puramente resistiva é pulsante e **sempre positiva**, pois num mesmo instante a tensão e a corrente são positivas ou negativas (produto de 2 positivos ou 2 negativos = sempre positivo), lembrando que a carga está sendo percorrida por uma corrente alternada e senoidal.

A interpretação de **potência positiva** diz-nos que o receptor está **consumindo** a potência fornecida pela fonte. Potência **sempre** positiva significa portanto que a carga comporta-se **sempre** como um receptor, consumindo a potência fornecida pela fonte (amplificador), que por sua vez, comporta-se **sempre** como um gerador. Neste caso, como já foi visto, 100% da energia fornecida à carga é convertida em calor por efeito Joule.

Essa situação é extremamente confortável para o amplificador, visto que ele não toma conhecimento da carga, exceto pelo fato de estar fornecendo energia; contudo pode-se dizer que nesse caso não há **interação com a carga**, o desempenho do amplificador fica sendo apenas função dele próprio, importando muito pouco pois, a carga.

## Os alto-falantes

Mas afinal não se utilizam amplificadores de potência para alimentar resistores, mas sim para alimentar alto-falantes. É justamente neste momento que o processo torna-se mais complicado.

Os alto-falantes modernos são componentes eletrodinâmicos que, conforme demonstrou Neville Thiele, têm um comportamento idêntico (do ponto de vista elétrico) ao de um circuito ressonante paralelo do tipo RLC<sup>[2]</sup>, que pode ser visto na figura 2.

<sup>2</sup> Na verdade, do tipo RLC paralelo modificado, pois existem além dos componentes habituais mais um resistor e um indutor em série com o circuito, o que o leva a ter duas frequências de ressonância ao invés de apenas uma.

(O trabalho de Thiele, intitulado “Loudspeakers in Vented Boxes” posteriormente ampliado por Richard Small em sua tese de doutorado, constitui atualmente o principal pilar em que se apoiam as técnicas de análise de alto-falantes e caixas acústicas, conhecido como Teoria de Thiele-Small).

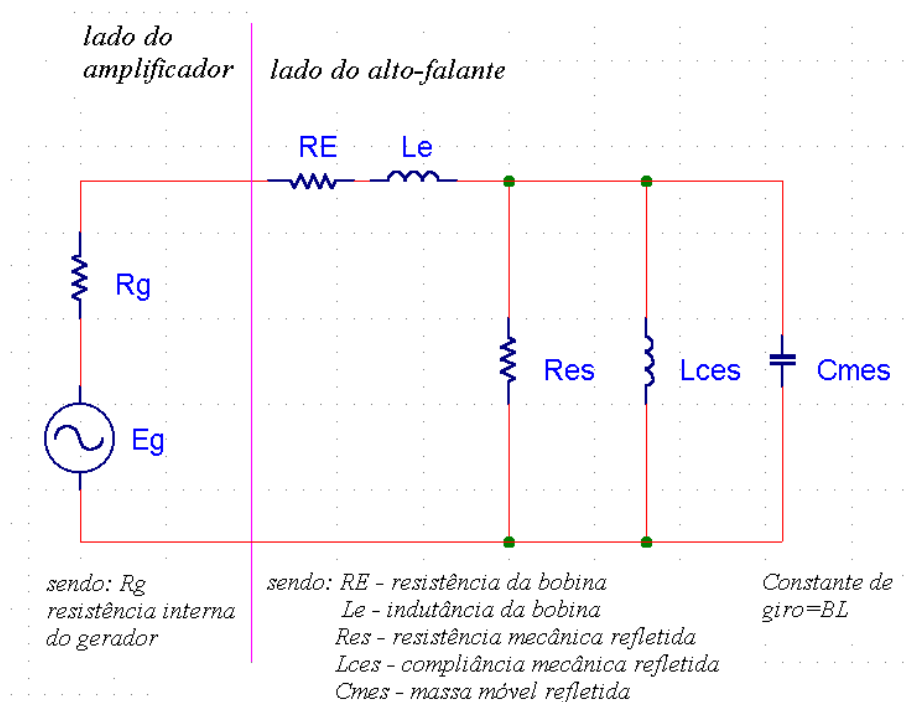


figura 2

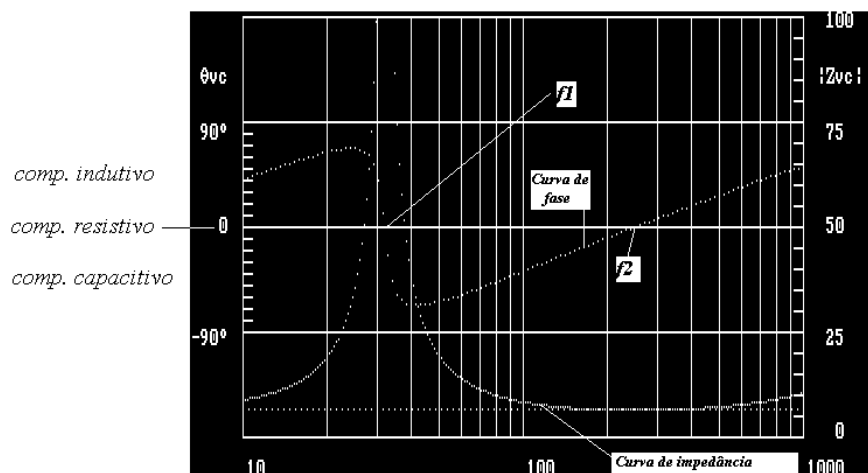
Aqui no circuito equivalente pode-se divisar dois lados envolvidos, o do amplificador representado por  $E_g$  e pela sua resistência interna  $R_g$  (que é responsável pelo valor do fator de amortecimento do amplificador) e o lado do alto-falante em que se encontra  $R_E$  representando a resistência do fio que constitui a bobina móvel e  $L_e$  que representa a indutância dessa mesma bobina.

Na seqüência deparamo-nos com as quantidades  $R_{es}$ ,  $L_{ces}$  e  $C_{mes}$  que são as características mecânicas do alto-falante (resistência mecânica, compliância e massa móvel). Esses parâmetros mecânicos estão, pelo conceito da dualidade, refletidos no seu circuito equivalente elétrico, podendo ser assim analisados de maneira mais fácil.

Esse tipo de circuito apresenta comportamento triplo a depender unicamente da frequência: capacitivo, indutivo e puramente resistivo, sendo que este último manifesta-se apenas nas suas **frequências de ressonância**.

Observando atentamente o gráfico da figura 5, pode-se notar que o alto-falante ao ar livre possui **duas** frequências de ressonância, ou fase zero (procurar na curva de fase):

A **primeira**, devido a  $C_{mes}$  e a  $L_{ces}$  é a mais importante, definida como sendo a **frequência de ressonância mecânica do alto-falante** ( $F_s$ ). Esta provoca um pico de máximo no módulo da impedância.



sendo:  $f_1$  - primeira ressonância  
 $f_2$  - segunda ressonância

figura 5

A **segunda** (normalmente desprezada na análise em baixas frequências) definida como **frequência de ressonância elétrica** é devido à associação da capacitância refletida **Cmes** com a indutância da bobina móvel **Le**. Esta provoca um pico de mínimo no módulo da impedância e ao redor deste se define o valor da **impedância nominal** do alto-falante, que assim possui comportamento novamente resistivo (para woofers isso ocorre tipicamente em torno de 300Hz).

Nas demais frequências, porém, o comportamento é **capacitivo** e **indutivo**, mas eletricamente se considera apenas um desses efeitos de cada vez. Ocorre desta maneira porque as duas propriedades anulam-se, permanecendo o efeito mais pronunciado, que chamamos resultante. Voltaremos a falar desse assunto mais adiante, em momento oportuno.

O que o amp então na realidade “enxerga” é justamente essa resultante. Uma carga que ora se comporta como um resistor (ressonância), ora como uma associação resistor/capacitor (fase negativa) e em outros momentos como uma associação resistor/indutor (fase positiva), a depender tão somente da frequência em questão. No caso de sinais musicais pode-se admitir a exibição desses 3 comportamentos simultaneamente, visto existirem inúmeras frequências (fundamentais e harmônicas) no sinal musical.

E como será que o amp “sente” isso? Para tanto, devemos rapidamente estudar algumas propriedades dos circuitos capacitivos e indutivos.

### Circuitos reativos – definição e análise da potência

Define-se como reativo qualquer circuito que apresente capacitância ou indutância, ou ainda ambos os efeitos combinados.

Capacitância é a propriedade apresentada pelos capacitores. Estes, por sua vez, são dispositivos que armazenam energia na forma de um **campo elétrico**.

Analogamente, indutância é a propriedade dos indutores que também armazenam energia, porém na forma de um **campo eletromagnético**.

Ao contrário dos resistores, nos capacitores (e nos indutores) ocorre uma **defasagem** ou **atraso** entre as ondas de corrente e tensão. Se for aplicado um certo valor de tensão em corrente contínua, observar-se-á que o capacitor leva um certo tempo para carregar-se e atingir o máximo valor da tensão entre seus terminais. Já a corrente tem valores altos logo de início, decrescendo à

medida que o capacitor carrega-se, tornando-se nula ao final. Daí, percebe-se porque a corrente não se encontra em fase com a tensão num capacitor.

Num indutor o processo é semelhante, apenas com as propriedades inversas, porém vamos limitar-nos aqui a descrever somente o efeito capacitivo, visto ser ele suficiente para o entendimento do artigo.

Se a tensão fosse alternada e senoidal esse processo repetir-se-ia a cada ciclo da onda, por isso a onda de tensão e a onda de corrente ficariam atrasadas entre si, exatamente 90 graus, num capacitor ideal (fig. 3).

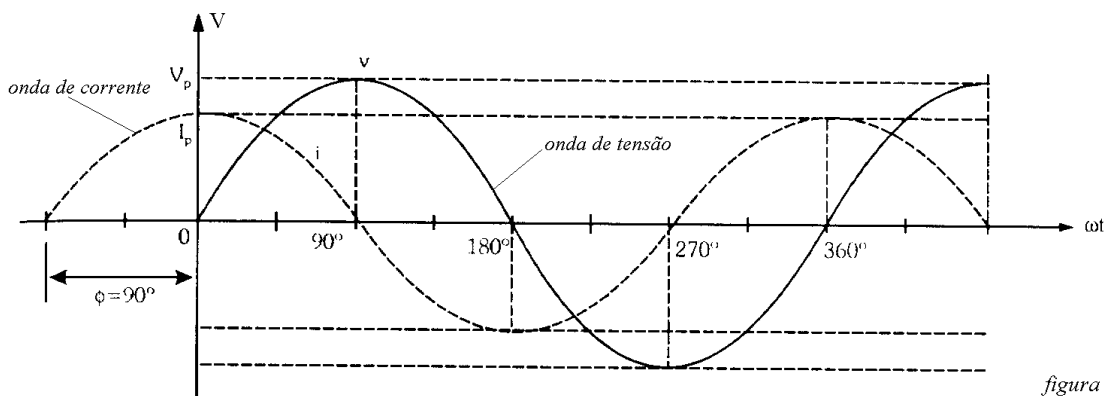


figura 3

Uma outra maneira de explicar tal processo, consiste em dizer que o capacitor opõe-se a **variações de tensão** entre seus terminais, levando sempre um certo tempo para adquirir o novo valor. Daí o fato de que num capacitor a tensão está sempre **atrasada** em relação à corrente (na figura esse atraso está representado pela letra grega  $\phi$  e vale  $90^\circ$ ).

Agora, assim como foi feito para um circuito resistivo, analisa-se a potência num circuito capacitivo. O amplificador, que recebe um sinal senoidal, alimenta uma carga puramente capacitiva (que pode ser um simples capacitor).

Através da expressão  $p(t)=v(t)\times i(t)$  pode-se levantar ponto a ponto o gráfico da potência instantânea na carga, ficando como mostra a figura 4.

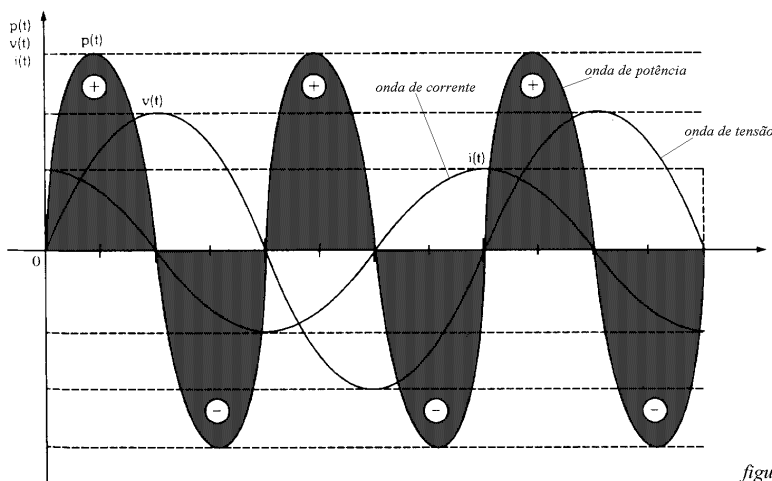


figura 4

A área hachurada corresponde à onda de potência, o que permite a conclusão de que em um circuito puramente capacitivo **não há dissipação de energia** (o mesmo ocorre em circuitos puramente indutivos).

Observando o gráfico da potência instantânea verifica-se que a potência é ora positiva, ora negativa, de forma que sua **potência média é nula**.

Já se definiu que potência positiva significa que a carga está **recebendo** energia do gerador que, nesse caso, é armazenada na forma de um campo elétrico (pois um capacitor não tem como dissipar energia como faria um resistor, ele na verdade só pode armazená-la).

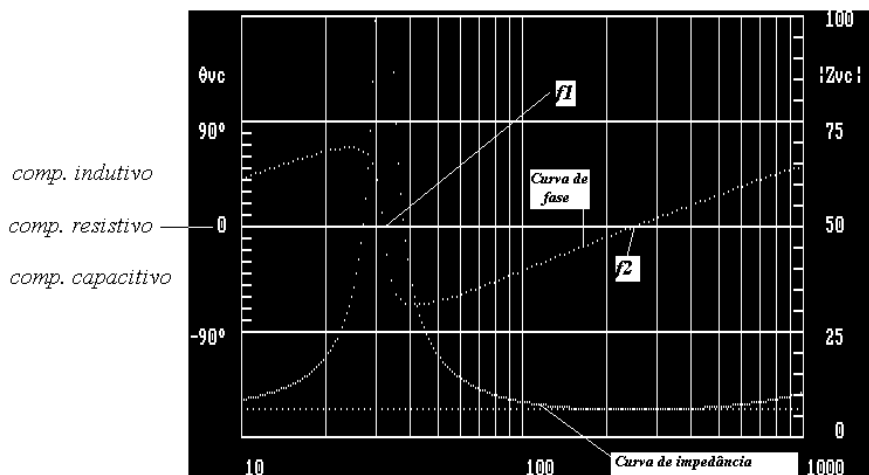
Potência negativa, por sua vez, significa que a carga está comportando-se como um gerador, **devolvendo** a energia armazenada ao circuito (quando um dispositivo tem potência negativa, significa que ele está perdendo energia em favor de um outro dispositivo a ele conectado; naturalmente isto se dá na forma de uma transferência).

Essa seqüência repete-se duas vezes em cada ciclo da tensão do gerador (amplificador). Dessa forma, a energia é sempre **trocada** entre o gerador e a carga, não havendo portanto **dissipação de potência** (na verdade isso só ocorre na sua totalidade se o capacitor for ideal. Todos os capacitores na prática apresentam alguma resistência interna, responsável por dissipar uma pequenina parcela da potência, aqui não considerada por ser extremamente pequena e não alterar a essência da argumentação).

Nota-se que a onda de potência num capacitor (ou indutor) continua sendo alternada e senoidal, porém tem o dobro da frequência das ondas de tensão e corrente que a originou.

### Os alto-falantes como componentes reativos e impedância complexa

Referindo-se novamente ao gráfico da curva de impedância e de fase de um alto-falante ao ar livre (fig 5), concentremo-nos na curva de fase que ao assumir ângulos negativos até  $-90^\circ$ , denotará comportamento capacitivo, sendo puramente capacitivo se o ângulo for exatamente  $-90^\circ$  (analogamente será indutivo para ângulos positivos).



sendo:  $f_1$  - primeira ressonância  
 $f_2$  - segunda ressonância

figura 5

Vê-se no gráfico que o ângulo assume vários valores não chegando, porém à exatamente  $-90^\circ$  (ou  $+90^\circ$ ). Isso revela a existência de uma parte resistiva, ou matematicamente, parte real<sup>[3]</sup>, responsável pela geração da **potência ativa**, que dissipa energia. A parte reativa, que em matemática chama-se imaginária<sup>[3]</sup>, é a responsável pela geração da **potência reativa** e não aproveita nenhuma energia fornecida pelo gerador, ou seja, não dissipa potência, mas apenas troca energia com o gerador.

Essa é uma das maneiras de definir-se **impedância**, que por sua vez, é um número complexo. Este possui uma quantidade real que representa uma resistência e uma quantidade imaginária, representando esta, uma reatância. A soma vetorial das duas partes do número complexo é conhecida como **módulo da impedância**. Tipicamente em alto-falantes o módulo da impedância vale 4 ou 8 Ohms, para frequências próximas da segunda frequência de ressonância.

Como conclusão, o alto-falante na maior parte das frequências é reativo, ou seja, existe impedância complexa (ângulo de fase diferente de zero), havendo portanto potência ativa e reativa coexistindo. Já foi demonstrado que potência ativa dissipa energia, mas potência reativa somente a troca com o gerador. Assim sendo, o falante aproveita apenas uma parcela da energia fornecida pelo gerador, pois somente a parte resistiva da carga dissipa potência.

Pode-se concluir que quanto mais a curva afasta-se do eixo zero, mais reativo será o alto-falante e mais energia será trocada com o gerador, em detrimento de uma cada vez menor parcela resistiva, que eficazmente aproveita potência.

Esta é a chave para a compreensão deste artigo. Se como carga usar-se alto-falantes, **sempre** haverá uma parte dela trocando energia com o amplificador, exceto apenas nas frequências de ressonância em que o comportamento é puramente resistivo.

### **E como ficam os amplificadores?**

Exige-se portanto que o amplificador lide com essa troca de energia (não há como evitar) que, por sua vez, representa um esforço bem maior do que simplesmente fornecer potência, havendo a necessidade de absorver-se a energia da descarga do circuito reativo, que é a carga. É possível agora, analisar o que pode acontecer ao sinal de áudio e ao próprio amplificador.

### **Distorção**

Os estágios de saída dos amps de grande potência quase sempre operam em push-pull e em simetria complementar (ou quase complementar em alguns circuitos), ou seja, existem dois “braços” ou “lados”, cada um contribuindo com um semiciclo da onda de corrente e de maneira alternada (estágios classe B e AB), de modo a refazer o sinal de áudio na saída (figura 6). Se o circuito não tiver um projeto bem elaborado, o esforço adicional provocado pela absorção de energia que retorna da carga fará com que o sinal não seja coerentemente amplificado e a onda de saída não mais corresponderá à onda de entrada, pois apresentará distorção.

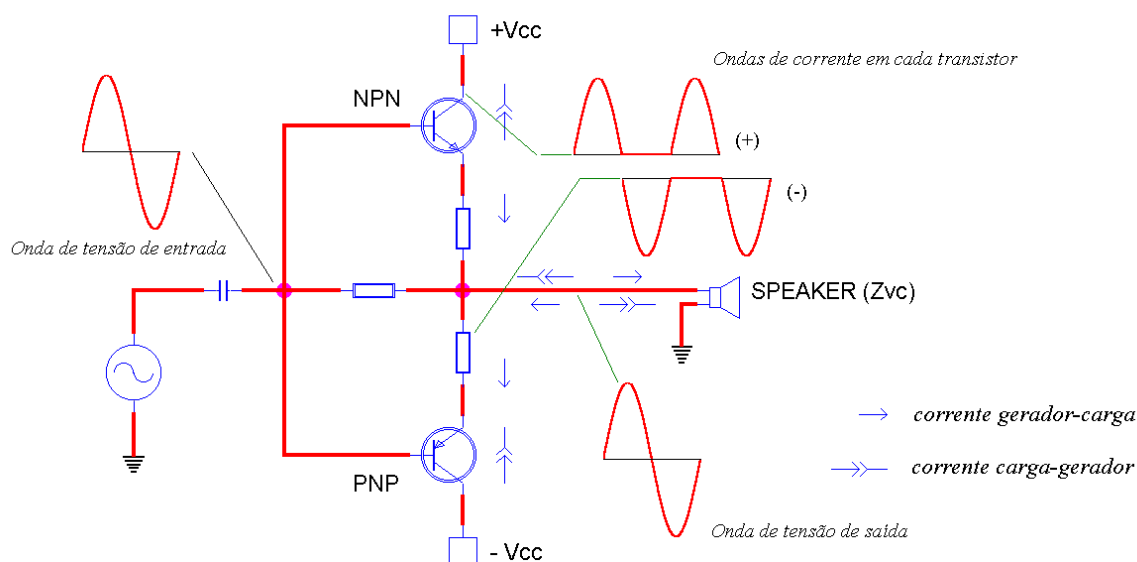
Os tipos de alterações geradas no áudio pelo amp mal projetado e/ou dimensionado que opere nessa condição, são difíceis de prever-se e muito sujeito às condições do uso/teste e da topologia do circuito, porém a presença de distorção harmônica deve ser considerada.

Pode-se verificar também que a alta impedância de saída (ou baixo fator de amortecimento) de alguns amps dificulta o desvio das ondas de descarga para um terra ac (+Vcc e -Vcc). A resistência interna alta faz com que a onda de descarga permaneça na saída do amplificador, sobrepondo-se à onda original e gerando “coloração” ou distorção.

Na figura 6, pode-se ver um exemplo simples de estágio de saída em classe B, e o desenvolvimento das tensões e correntes (apenas para ac).

A incapacidade de lidar com o esforço (troca de energia) pode levar o amplificador a um estado de total incoerência de funcionamento. Oscilação é possível, bem como a queima do estágio de saída.

<sup>3</sup> *Tal nomenclatura é utilizada numa especialidade matemática chamada **números complexos**.*



Estágio push-pull complementar de saída classe B em carga reativa (falante)

figura 6

## Subdimensionamento

No caso da queima a causa pode ser simplesmente fadiga excessiva quando a etapa de saída atinge seus limites operacionais.

Observe que essa situação de limites poderia ser alcançada com uma simples carga resistiva, bastando que para isso o amplificador fosse muito exigido ou que o valor ôhmico fosse muito baixo. Porém, a carga fortemente reativa fará com que essa extrema fadiga ocorra com muito mais facilidade, obtendo como resultado (muito provável) a possibilidade de queima do estágio de saída. Esse quadro é comum em amps que foram dimensionados a partir de uma carga resistiva.

Como foi visto, existe uma enorme diferença entre uma carga resistiva de  $2\Omega$  e outra reativa, também com  $2\Omega$ . No caso da primeira o gerador apenas fornece potência, sendo submetido a um certo esforço, porém no caso da segunda existe, além desse esforço, outro adicional a que o estágio de saída terá que se submeter para dissipar a energia devolvida pela carga reativa, conseqüentemente a etapa aquecerá mais e exigirá um dimensionamento mais avantajado e cuidadoso.

Deve-se considerar também que em cargas resistivas o valor ôhmico (no exemplo  $2\Omega$ ) é fixo, o que não acontece com cargas reativas (como alto-falantes), nesse caso, o **módulo da impedância** varia com a frequência, podendo atingir valores bem inferiores a  $2\Omega$ .

Normalmente dimensiona-se um amp a partir de uma carga resistiva sem levar em consideração que falantes e caixas acústicas são extremamente reativos; o estágio fica assim subdimensionado e corre sério risco de queima; para o usuário esse seria um fato inexplicável, já que seu amp “queimou-se sozinho” sem nenhuma falha no seu sistema de caixas e talvez até em volume baixo ou mediano. Lembre-se que somente a potência ativa gera trabalho aproveitável (som), porém a potência reativa existe e exige esforço do amplificador para dissipá-la.



## Oscilação

Outro problema muito encontrado em amps de marcas não idôneas, é a oscilação. Novamente aqui o efeito é muito mais pronunciado em cargas reativas, devendo-se considerar a importância de serem feitos testes com esse tipo de carga no trabalho de desenvolvimento de um amplificador.

Amps que em cargas resistivas não oscilam, podem perfeitamente oscilar em cargas fortemente reativas e provavelmente queimarão o estágio de saída (o que foi confirmado em testes).

## Uma análise mais profunda

Quando um amplificador oscila ocorre uma sucessão de fatos que levam à destruição do estágio de saída. Embora não estejam ainda fundamentadas em sua totalidade, pode-se fazer algumas suposições bastante seguras do que afinal de contas acontece.

Uma teoria cativante sugere que a queima ocorre devido a um efeito conhecido como **avalanche térmica**, sugestão esta feita pelo Eng. Rosalfonso Bortoni.

Para a justificativa, supõe-se um estágio de saída composto por apenas um par de transistores de potência operando em push-pull, sendo o exemplo válido também para estágios que contenham qualquer número de transistores, visto que são geralmente ligados em série e/ou paralelo.

O que acontece então é o seguinte:

Quando o circuito oscila, o diodo coletor da junção dos transistores de saída aquece provocando um aumento da corrente de coletor  $I_C$ , que na verdade depende principalmente da tensão  $V_{BE}$  (tensão entre base e emissor). Quando a tensão  $V_{BE}$  sobe, a corrente  $I_C$  também sobe em resposta (e de maneira muito mais pronunciada pois:  $I_C = I_B \times \beta_{cc}$ ). Com o aumento da temperatura o range dinâmico da transferência do transistor diminui e quando ele possuir tensão  $V_{BE}$  suficiente para vencer a barreira de potencial e levá-lo à região ativa, (tipicamente 0,7V)  $I_C$  será bem maior do que antes, o que aquecerá ainda mais o transistor. Tipicamente, num seguidor de emissor classe B ou AB, um aumento de 30°C na temperatura se não for compensado, será acompanhado de um aumento na corrente de coletor por um fator de 10 (isso é possível devido à reta de carga dc de um seguidor de emissor classe B ou AB ser essencialmente uma reta vertical, paralela ao eixo y, que representa a  $I_C$ . Desta maneira o ponto Q sofrerá grandes variações à menor variação de  $\beta_{cc}$  ou  $V_{BE}$ , o que sempre ocorre com a temperatura).

Com o transistor ainda mais quente  $I_C$  será ainda maior quando ele for à região ativa o que novamente elevará sua temperatura. Este ciclo realimentado progredirá até que o transistor atinja sua máxima corrente de coletor admissível, e então finalmente será destruído (entrará em curto). Observe que tal processo leva apenas alguns poucos segundos para acontecer.

É interessante notar que os circuitos de compensação térmica presente em todos os amplificadores push-pull de grande potência classes A, B, AB, G e H não são suficientemente rápidos para realizar a compensação e assim evitar a queima. A causa é devido principalmente ao fato de serem as trocas de calor processos físicos essencialmente lentos.

## Mais um problema

Um outro problema que aparentemente acompanha amps mal projetados e/ou dimensionados é o da **condução simultânea**, que pode surgir quando o circuito atinge os limites impostos pelo projeto e/ou pelos componentes.

Mais uma vez, considera-se que amps mal projetados e/ou dimensionados sempre terão esses limites drasticamente reduzidos, pois num projeto de alto nível procura-se atingir o máximo desempenho da configuração adotada e dos componentes utilizados, o que naturalmente não ocorreria em um trabalho com menor respaldo técnico. Convém lembrar que as cargas reativas sempre farão **qualquer amp** atingir seus limites antes das cargas resistivas.

Para entender o que acontece, antes de mais nada é preciso saber que sendo o estágio de saída push-pull, operando em classe B, AB, G ou H, os transistores entram na região ativa **um de cada vez** (pelo menos considerando a maior parte do tempo). Em outras palavras, quando um está na região ativa o outro está na região do corte.

Engenheiros e técnicos podem enxergar de outra maneira: essencialmente os dois transistores têm o seu ponto **Q** (quiescente) posicionado no extremo inferior da reta de carga ac, em  $V_{CE \text{ corte}}$ . Estágios classe AB posicionam o ponto **Q** um pouco acima de  $V_{CE \text{ corte}}$ , mas o funcionamento é semelhante. A tensão ac (sinal de áudio) aplicada às bases desloca o ponto **Q** para cima da reta de carga ac, porém, quando um deles é deslocado o outro permanece firme, próximo à  $V_{CE \text{ corte}}$ .

A condução simultânea é um fenômeno que surge principalmente pela falta de velocidade do circuito em processar sinais de frequência muito alta (acima de 20kHz), ou seja, há uma dificuldade do circuito em fazer a transição entre um estado e outro (quanto mais rápido, mais difícil).

Se a frequência do sinal for realmente alta o circuito poderá “confundir-se”, por assim dizer e permitir que os dois transistores conduzam corrente ( $I_C > I_{CQ}$ ) ao mesmo tempo, ou ainda que o ponto **Q** dos dois transistores posicionem-se bem acima de  $V_{CE \text{ corte}}$  num mesmo instante, podendo ser ambos destruídos caso  $I_C$  seja suficientemente alta.

É interessante notar que isso pode acontecer até sem carga alguma, mas há razões sutis para crer que em situação de fadiga a ocorrência seja bem maior, possivelmente até diminuindo o valor da frequência necessária para que o circuito “confunda-se”. Novamente, considera-se neste artigo que a carga reativa fará com que qualquer estágio de saída seja muito mais exigido.

Para a justificativa dessa hipótese é considerado apenas um par de transistores de saída. No entanto, convém lembrar que a explanação visa justificar fatos observados em testes de laboratório.

A explicação a ser dada é a seguinte:

Com o transistor no corte, seu  $V_{CE}$  (tensão entre coletor e emissor) é o próprio valor da fonte. Considera-se como exemplo  $V_{CC}=100V_{dc}$ . Ao encontrar o semiciclo positivo da onda de tensão de descarga do circuito reativo (que é a carga) o emissor “enxerga” um potencial que varia desde zero até +100V, e para isso, supõe-se que a onda tenha um valor de 200Vpp, o que é comum em alta potência. O  $V_{CE}$  assim seria no máximo o valor da própria fonte que é  $V_{CC}=100V$  (100V-0V) e no mínimo de 0V (100V-100V).

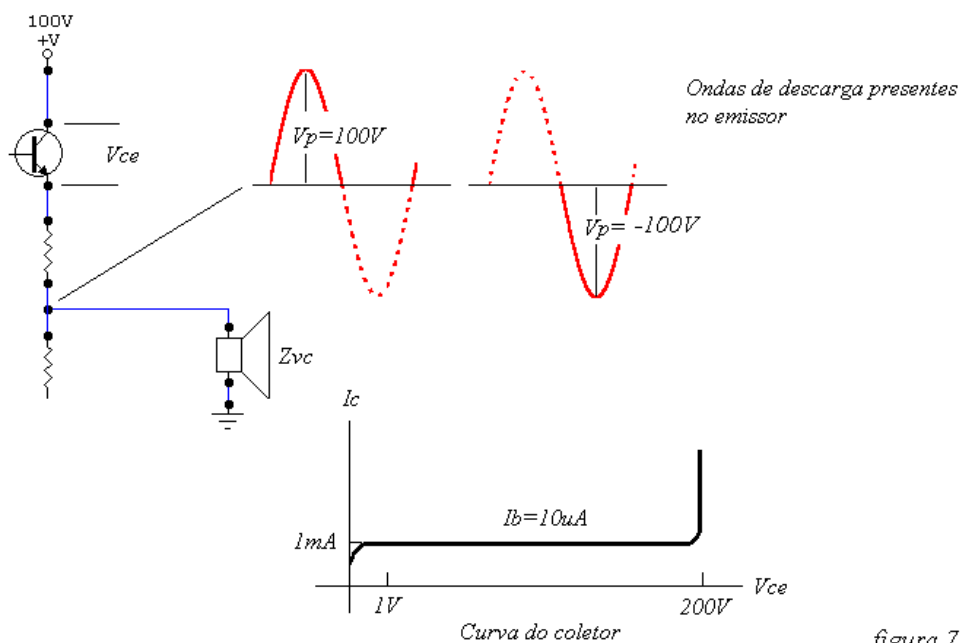


figura 7

Mas no semiciclo negativo da descarga a situação inverter-se-ia. O emissor veria no máximo 0V e no mínimo -100V e como  $100 - (-100) = 200$ , o  $V_{CE}$  teria o valor de 200V por um breve instante, perigosamente perto da região de ruptura, onde o funcionamento do transistor não é mais normal. Ex: o  $V_{CE}$  máximo dos transistores 2SC3281/2SA1302 = 200V. Esses modelos são muito empregados neste tipo de aplicação.

Analisando um gráfico da  $I_C$  (corrente de coletor) no domínio da  $V_{CE}$  (figura 7), nota-se que a  $I_C$  próxima da região de  $V_{CE}$  máxima sobe numa assíntota vertical, mostrando que poderia assumir qualquer valor (este efeito é conhecido como **multiplicação por avalanche**), o que bastaria para provocar sua destruição, talvez não imediata, mas abreviaria consideravelmente sua vida útil. Com a queima de um transistor do par (curto), o outro também seria destruído.

Entretanto, se o transistor ainda não se destruir estará conduzindo, pois por um breve instante existirá corrente apreciável no diodo coletor (na verdade uma onda de corrente de duração apenas momentânea). Com o outro transistor do par já conduzindo na região ativa, teríamos a condução simultânea independente do valor da frequência e que destruiria ambos, caso a corrente desenvolvida seja suficiente. Convém lembrar que estágios classe B, AB, G ou H geralmente não são dimensionados para suportar uma condução simultânea, o que ocorre normalmente em estágios classe A, sendo estes, portanto, naturalmente imunes a esse problema.

Para concluir, deve-se dizer que essa situação é aparentemente facilitada no caso do amplificador não possuir uma baixa resistência interna (baixa impedância de saída).

Observe que tanto a ocorrência de avalanche térmica (vista na edição anterior) como a de condução simultânea (nessa situação em específico) não passam de hipóteses ainda a serem confirmadas como **fatos**. Os sintomas são muito variáveis e sujeitos a condições, de maneira que não se pode ter muita certeza disso ou daquilo, no entanto ao que parece são as causas da queima de amps mal projetados e/ou dimensionados nas condições de extrema fadiga proporcionadas por

uma carga fortemente reativa. É claro que as pesquisas continuam, de modo que novas confirmações serão relatadas.

É importante salientar que as duas causas descritas (avalanche térmica e condução simultânea) são teses, mas o mau desempenho e as queimas dos estágios de saída não, estes sim são **fatos** e ocorreram inclusive nos testes realizados. O subdimensionamento é também fato comprovado e mereceu inclusive fazer parte da dissertação de mestrado do Eng. Rosalfonso Bortoni (UFSC).

Cabe aqui, portanto uma descrição das condições de teste a que foram submetidos alguns aparelhos comerciais e também circuitos experimentais e/ou de desenvolvimento.

-Sinais aplicados: ondas, senoidal e quadrada, na faixa de 1Hz à 100kHz.

-Cargas utilizadas: resistiva e puramente capacitiva com valores oscilando entre 1uF e 10uF.

-Regime de trabalho: variando entre baixo e o máximo, respeitando as limitações próprias de cada aparelho.

### **Caixas acústicas e crossovers passivos: o golpe final**

Porém, até agora neste artigo, considera-se como uma possível carga reativa prática somente o alto-falante ao ar livre. Na realidade a situação é ainda mais difícil, pois o esforço do estágio de saída é ainda maior quando se usam caixas acústicas com diagramas fasoriais mais complicados.

Levando-se em consideração que ninguém utiliza falantes ao ar livre, essa observação atinge todos os casos (exceto em situações onde se usam caixas closed-box do tipo fechada, pois o diagrama fasorial dessas caixas é semelhante ao de um falante ao ar livre).

Caixas bass-reflex teriam pelo menos mais duas frequências de ressonância e por consequência mais duas inversões de fase em relação ao falante ao ar livre (ou caixas closed-box). Caixas band-pass e caixas-corneta têm comportamento ainda mais complexo. Naturalmente o circuito equivalente de tais sistemas é algo bem mais complicado do que o apresentado na figura 2 (visto na primeira parte deste artigo).

Analogamente, falantes que possuem fator de qualidade total (Qts) mais altos, exigem mais dos amplificadores e expõem bem mais um eventual circuito mal dimensionado a falhas, pois são mais reativos do que outros possuidores de Qts mais baixos (normalmente um indicador de falantes de alta qualidade).

Assim se pode generalizar esse raciocínio para o sistema formado pela caixa+falante. Estes sempre exigirão mais dos amplificadores quanto maior for o fator de qualidade resultante do sistema (**Qt**), que por sua vez é função do falante e do alinhamento adotado.

Estendendo ainda mais, verifica-se que caixas acústicas com crossovers passivos apresentam forte reatância adicional, devido aos circuitos sintonizados formados por redes de capacitores e indutores. Os diagramas fasoriais dessas caixas seriam ainda mais complexos que se estivessem sem o crossover passivo. Naturalmente se este crossover passivo possuir alguma equalização ou Notch Filters, a situação tornar-se-á ainda mais problemática para o amplificador. O circuito equivalente desses sistemas pode ultrapassar a 16ª ordem.

### **Conclusão**

Cargas reativas impõem uma dificuldade aos amplificadores de potência que cargas resistivas jamais poderiam fazer sob iguais circunstâncias. As reativas, portanto exigirão um maior “preparo” dos amps, pode-se assim dizer, o que muitas vezes não acontece, pois os próprios fabricantes não as consideram no seu desenvolvimento e dimensionamento; também

acabam por não usá-las nos testes finais com os seus aparelhos e muitos deles sequer têm conhecimento do fato (nem todos são assim, felizmente).

Observei através de testes em alguns amps comerciais, que em aparelhos de marcas “estranhas” todos os problemas descritos anteriormente são comuns, possuem estágios mal dimensionados e ao conectar-se uma carga reativa apresentam grande alteração de comportamento. Viu-se que quando o circuito não é bem elaborado e/ou dimensionado, qualquer esforço requerido pela carga (como trocas de energia) fará com que o sinal não seja coerentemente amplificado, resultando assim numa distorção e até oscilação e queima, sendo uma das causas disso tudo, o fato de que, no período de desenvolvimento não se previu que a carga seria reativa e nos testes de prototipagem os amps não foram avaliados com cargas fortemente reativas, mas tão somente com cargas resistivas (se é que).

Mas na esmagadora maioria dos casos, isso acontece porque seus circuitos foram copiados de outros amplificadores. Frequentemente a topologia do circuito acaba sendo utilizada em aplicações e/ou condições para qual não foram previstos pelos projetistas originais, resultando assim num aparelho mal dimensionado e sujeito a problemas de todos os tipos já mencionados, principalmente à queima por fadiga excessiva (repetindo: isso chegou a acontecer nos testes).

Assim também como no desenvolvimento de amplificadores de potência estes fatos devem ser considerados pelos projetistas e tratados à parte. Muitos fabricantes testam seus amplificadores somente com cargas resistivas e por esse mesmo motivo mascaram o surgimento dos problemas. O projetista deve portanto submeter seu projeto a testes meticulosos, dentro e fora da faixa audível, com várias formas de onda e vários tipos de carga.

Da mesma maneira, os testes de longa duração feitos ao final da linha de montagem, normalmente em cargas resistivas, deveriam ser também realizados com cargas fortemente reativas, revelando com mais facilidade a existência de problemas (componentes e/ou montagem). O profissional de áudio e o público que afinal de contas são os maiores interessados agradecem.

Sempre bom lembrar: quando o usuário compra um equipamento, ele não está adquirindo simplesmente um monte de peças, e sim um trabalho de pesquisa e desenvolvimento. Se o fabricante deste equipamento não tiver condições de lidar com sua tecnologia (o que frequentemente ocorre), o desempenho e por consequência o investimento serão prejudicados.

Marcelo H. M. Barros (marcelo@hotsound.com.br), estuda Física na Universidade Federal de São Carlos – DF/UFSCar e é consultor da Hotsound.

#### Bibliografia:

1. Jacob Millman and Christos Halkias, *Integrated Electronics*, McGraw-Hill, 1972;
2. Albert Paul Malvino, *Electronic Principles*, McGraw-Hill, 1993;
3. Homero Sette Silva, *Análise e Síntese de Alto-falantes e Caixas Acústicas pelo Método de Thielle-Small*, H. Sheldon Ltda., 1996;
4. G. Randy Slone, *High-Power Audio Amplifier Construction Manual*, McGraw-Hill, 1999;
5. Rômulo Oliveira Albuquerque, *Circuitos em Corrente Alternada*, Editora Érica, 1997;
6. Correspondência particular entre o autor e Rosalfonso Bortoni.