

MEDIDAS E ESPECIFICAÇÕES VS. AVALIAÇÕES SUBJETIVAS: O CASO DOS AMPLIFICADORES A VÁLVULA “SINGLE ENDED”

Eduardo B. E. de Lima
Audiopax Sistemas Eletroacústicos Ltda.
R. Alvaro Alvim 31/1302
Rio de Janeiro, RJ 22031-010 BRASIL
audiopax@rionet.com.br

Resumo – Este artigo mostra um exemplo em que as especificações e medidas tradicionais se revelam aparentemente inadequadas para caracterizar a qualidade sonora subjetiva. O caso dos amplificadores a válvula com saída singela (“*single ended*”) é analisado e algumas razões para esta inadequação são apresentadas.

Abstract – This article shows an example where the traditional specifications and measurements do not seem to correlate well to the subjective sonic quality. The case of amplifiers using tubes in single ended output stage configuration is analysed and some reasons for the aparent contradiction are shown.

1. INTRODUÇÃO

Equipamentos de áudio podem se destinar a várias aplicações. Este fato acaba definindo alguns segmentos distintos de mercado. Equipamentos para sonorizações de grandes eventos ou para monitoração em estúdio, por exemplo, representam duas áreas distintas. Muitas outras podem ser definidas e entre elas a dos equipamentos destinados a reprodução doméstica de alto nível se destaca como sendo, provavelmente, a mais controversa. A busca da melhor audição possível aliada a menores restrições de peso, espaço, consumo e de outros detalhes práticos permitem a estes equipamentos apresentar implementações impensáveis em outras áreas do áudio. Embora esta característica permita que inúmeros excessos possam acontecer, esta enorme atividade de experimentação pode ser de grande utilidade para descobrir possíveis melhorias no áudio em geral.

Também deve-se ressaltar que a questão das diferenças subjetivas, principalmente entre amplificadores a válvula e a transistores vem de muito tempo [1].

Esta longa apresentação se faz necessária pois o aparecimento na cena do áudio “high end” dos amplificadores a válvula com saída singela (“*single ended*”) está entre os mais improváveis eventos. Quem

poderia imaginar que no início do século 21 muitas pessoas estariam ouvindo música com amplificadores a válvula? E ainda mais, sem usar estágio de saída em contrafase nem realimentação negativa global.

Estes amplificadores, em geral, possuem características pouco comuns tais como baixa potência, alta distorção harmônica e alta impedância de saída. Em resumo, todas as características que um bom amplificador não deveria ter segundo a visão técnica convencional. É realmente muito estranho que algo que vai tão fortemente de encontro à maneira estabelecida de projetar, montar e principalmente avaliar amplificadores tenha conseguido sobreviver e, na verdade, ganhar espaço nos últimos anos no competitivo mercado de áudio *high-end*.

Segundo relato de todas as revistas que cobrem este segmento, quem tem a oportunidade de ouvir um bom amplificador *single ended* (SE) junto com caixas apropriadas fica invariavelmente admirado com o resultado sonoro obtido. Como é possível que algo produza um som tão musical e ao mesmo tempo exiba medidas tão absurdamente ruins na bancada de testes? Tentar imaginar que as pessoas ficam encantadas com o que ouvem simplesmente porque gostam de distorção ou de som “colorido” é uma suposição que deve ser avaliada cuidadosamente. Não parece razoável que pessoas acostumadas a escutar música ao vivo possam simplesmente não perceber tais distorções.

2. UM POUCO DE HISTÓRIA

No início da década de noventa começaram a surgir as primeiras referências nas principais revistas sobre estes amplificadores. O circuito básico *single ended* é a maneira mais simples e direta de conectarmos uma válvula. Portanto nos primórdios existiam apenas rádios e gramofones com amplificadores *single ended*. Na década de trinta foi inventada a conexão *push-pull* (PP). Esta permite que se obtenha com duas válvulas mais que o dobro da potência com distorção harmônica substancialmente menor. Ou seja muito mais potência e menos distorção. Daí em diante todos os sistemas vendidos para uso doméstico com alguma pretensão a

ser bom usavam os estágios de saída em *push-pull*. Na área comercial e profissional a situação era semelhante com uma importante exceção. A Western Electric, firma americana ligada a AT&T e aos Laboratórios Bell fornecia para praticamente todos os cinemas os sistemas de som na forma de equipamentos alugados. Seu modelo mais simples e mais popular consistia de um amplificador *single ended*, o modelo 91, que usando uma válvula WE300B fornecia cerca de 10 watts para os cinemas da época. Os amplificadores domésticos continuaram a evoluir, sempre com estágios de saída em *push-pull*, sendo a introdução do amplificador Williamson, por volta de 1947 através da revista inglesa *Wireless World*, o marco fundamental dos modernos amplificadores *push-pull* a válvula que dominariam a década de 50 e 60 até o estabelecimento do transistor.

Embora envolto em certo mistério, parece que durante os anos 60 alguns colecionadores japoneses começaram a ligar os seus amplificadores modelo 91. Em certas situações o resultado era totalmente inesperado, pois o resultado subjetivo obtido era muito bom. A partir daí começaram a surgir réplicas e depois evoluções do circuito original da Western Electric. Esta forma de ouvir música parece ter ficado restrita ao Japão e países vizinhos por muito tempo vindo mais tarde a se difundir na França, Inglaterra e Itália. Nos Estados Unidos a década de 90 viu surgir clubes e periódicos (como *Sound Practices*, *Glass Audio*, *Valve*, etc..) tratando de válvulas e com forte ênfase em circuitos SE e não tardou que alguns fabricantes se estabelecessem e comesçassem a produzir amplificadores dentro desta nova e ao mesmo tempo muito antiga configuração.

3. O QUE É UM *SINGLE ENDED* ?

A topologia de um amplificador SE é muito próxima daquela de um pré-amplificador minimalista a válvula com transformador de saída. Pouco há a explicar sobre um estágio de saída em *single ended*. Trata-se da ligação mais simples possível para uma válvula de potência. Nas figuras 1 e 2 estão os circuitos básicos de um amplificador *single ended* e de um *push-pull* com inversor catodino.

Podemos ver que no amplificador SE existem apenas dois estágios, um estágio com ganho de tensão e o estágio de saída. Já no caso do amplificador PP vemos o estágio com ganho de tensão seguido de um estágio inversor de fase, cuja função é fornecer o sinal invertido para uma das válvulas do estágio final de potência em relação ao sinal para a outra válvula de saída. Esta inversão é essencial para o funcionamento de um estágio de saída *push-pull*.

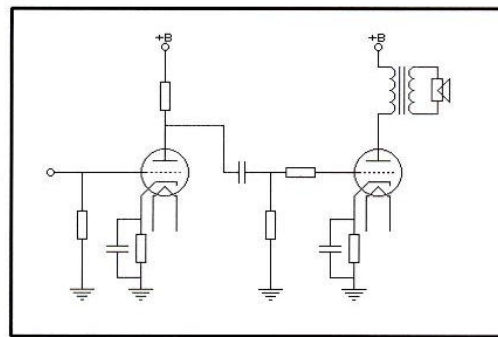


FIGURA 1 amplificador *single ended*

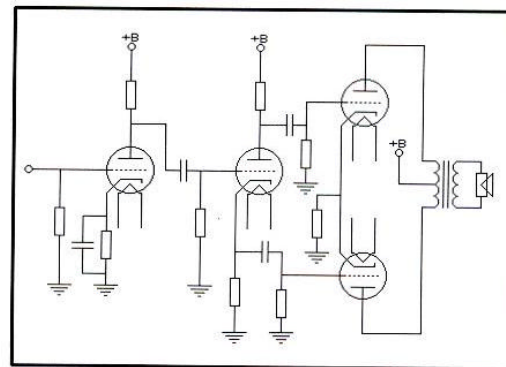


FIGURA 2 amplificador *push-pull*

4. OS PROBLEMAS DE UM AMPLIFICADOR SE

Os amplificadores SE típicos e considerados subjetivamente superiores exibem medidas de distorção harmônica muito altas. Valores entre 0.5 e 1% para potência ao redor de 1 Watt e valores entre 5 e 12% para valores de potência em torno de 10W são o usual. Isto chega a assustar quem se habituou a ler valores mais próximos de 0.1% na potência máxima como algo corriqueiro.

A impedância de saída acima de 2 ohms, em geral, também assusta. Isto corresponde na saída de 8 ohms a um fator de amortecimento sempre inferior a 4. Amplificadores normais exibem fatores de amortecimento sempre acima de 20 chegando em certos casos a mais de 1000. Estes valores muito baixos de fator de amortecimento podem tornar imprevisíveis a resposta de frequência do conjunto caixa / amplificador pois a impedância de entrada da caixa passará a ter efeito sobre a resposta de frequência total [2].

Estas duas sérias deficiências são sempre lembradas na tentativa de provar que estes amplificadores não poderiam soar bem. Neste artigo trataremos apenas do problema da audibilidade do elevado valor da distorção harmônica total.

5. A DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL (THD)

Ao analisarmos a ficha técnica de um amplificador de áudio podemos observar que a potência e a distorção harmônica total são as especificações primeiro citadas. Geralmente de forma destacada. Talvez pareça estranho questionar isto, mas a verdade é que tais especificações parecem guardar muito pouca relação com a qualidade sonora de um sistema.

O que é afinal a distorção harmônica ? As imperfeições de um amplificador se manifestam de diversas formas. Uma delas é o ruído, que é a presença de energia em faixas de frequências que, em princípio, não têm relação alguma com o conteúdo do sinal amplificado. Outra forma é a distorção harmônica. Aqui trata-se do aparecimento de sinais que guardam uma relação harmônica com o sinal original. Relação harmônica, neste caso, significa que os sinais acrescentados são múltiplos da frequência que deve ser amplificada. Portanto, se falarmos de uma frequência de 1000 Hz, seu segundo harmônico será 2000 Hz, seu terceiro será 3000 Hz e assim por diante.

Por uma característica básica de sua natureza muitos sistemas, sejam eles sistemas elétricos, mecânicos ou acústicos, tendem a produzir harmônicos. Isto é verdade não só para amplificadores como para instrumentos musicais. Contudo nos instrumentos musicais este fenômeno não é considerado distorção. Ele é, na verdade, parte importante do que conhecemos como timbre do instrumento. As diferentes quantidades de harmônicos produzidos por um violino e uma flauta, ao tocar a mesma nota, é que nos permitem, junto com outras características como ataque, sustentação e decaimento, identificar e apreciar a beleza de cada um dos instrumentos. Quando um amplificador introduz harmônicos por sua conta está, na verdade, alterando o timbre original do instrumento reproduzido.

6. O SISTEMA DE ÁUDIO IDEAL

Qual seria um sistema ideal ? Parece fácil concluir que seria um sistema sem distorção alguma. Mas será que para isto todos os componentes de um sistema de áudio deveriam ser perfeitos ? Na verdade talvez possamos apenas afirmar que o sistema ideal seria aquele que reproduzisse, ao atingir os nossos ouvidos, o sinal original sem distorções. Uma das formas de obtermos isso seria fazer com que todos os elementos do sistema fossem perfeitos. Um CD perfeito, um pré-amplificador perfeito, amplificadores perfeitos e caixas perfeitas. Seria muito útil analisarmos alguns aspectos, de quão próximo estamos do ideal em cada uma das partes do nosso sistema e principalmente como as diversas imperfeições de cada parte se relacionam. Será aqui apresentado o caso da distorção harmônica nas caixas

acústicas e dos amplificadores de potência, em especial nos SE.

7. A DISTORÇÃO HARMÔNICA NAS CAIXAS ACÚSTICAS

Raramente vemos especificações de distorção nas fichas técnicas de caixas acústicas. Isto provavelmente tem várias razões e entre elas a de que os seus valores são tipicamente muito mais elevados que em qualquer outro componente do sistema de som. Um outro problema seria explicar que a especificação de distorção, para ser de alguma utilidade, deveria ser feita em relação à potência acústica irradiada e não em relação à potência elétrica consumida.

Distorção entre 1% e 5%, dependendo da frequência, para uma saída acústica por volta de 90 dB, é relativamente comum. Claro que as melhores caixas procuram reduzir este nível porém estamos ainda muito longe de conseguir, com a atual tecnologia, valores comparáveis aos dos amplificadores típicos.

Uma das características da distorção dos alto falantes é que ela se compõe, em geral, de harmônicos de baixa ordem. Ela é constituída predominantemente de segundo e terceiro harmônicos. Os harmônicos superiores, proporcionalmente, só começam a aparecer em níveis maiores já próximo ao limite dos alto-falantes. Em geral, em baixos níveis, a distorção é composta apenas por segundo harmônico, sendo ele o responsável pelo elevado valor medido da THD.

8. A DISTORÇÃO HARMÔNICA NOS AMPLIFICADORES SE

Amplificadores SE são a aparente antítese do que seria o amplificador ideal. Exibem altos valores de THD, porém uma das características da distorção dos amplificadores SE é que se compõe, em geral, basicamente de harmônicos de baixa ordem. Ela se constitui predominantemente de segundo e terceiro harmônicos. Os harmônicos superiores, proporcionalmente, só começam a aparecer em níveis maiores já próximos ao limite do amplificador. Em geral, em baixos níveis a distorção é composta apenas por segundo harmônico, sendo ele o responsável pelo elevado valor medido da THD.

9. SOMANDO E MULTIPLICANDO DISTORÇÕES

Pode-se perceber que a elevada distorção dos amplificadores SE típicos têm aproximadamente a mesma ordem de grandeza da distorção da maioria das caixas acústicas de média e alta eficiência. Além disto suas distorções possuem características similares, com

a predominância dos harmônicos de baixa ordem, principalmente o segundo.

Podemos olhar o que acontece com a distorção de segundo harmônico ao ser produzida em um dispositivo - o amplificador - e a seguir passar por outro dispositivo - a caixa acústica - que também produz o mesmo tipo de distorção. Qual será a distorção na saída do segundo dispositivo? A resposta está no apêndice 2 e a seguir tento resumir o seu significado intuitivo. Assumindo que os dois dispositivos, amplificador e caixa, produzam apenas segundo harmônico em igual quantidade (por exemplo 1%), qual seria a distorção total do sinal após ter passado por ambos? O resultado dependerá da diferença de fase com que é gerado este segundo harmônico em relação à frequência inicial (fundamental) em cada um dos dispositivos. Esta diferença de fase pode ser qualquer uma entre 0° e 360° ou entre -180° e $+180^\circ$ se assim preferirmos considerar - Se os dois dispositivos geram a distorção da mesma forma, com a mesma relação de fase entre a distorção e a fundamental, o resultado será, como parece normal, 2% de distorção de segundo harmônico.

- Uma diferença de 30° na relação de fase do segundo harmônico com a fundamental, entre os dois dispositivos, produzirá um total de 1,93% de distorção.

- Uma diferença de 60° produzirá 1,73%.

- 90° produzirá 1,41%.

- 120° produzirá 1%. Isto é, a mesma quantidade de distorção produzida por apenas um dos dispositivos.

- 150° terá como resultado 0,52%, ou seja a distorção final será cerca da metade da distorção de um deles.

- Finalmente uma relação de 180° produzirá uma distorção final de segundo harmônico nula.

Mas qual seriam a probabilidade de obtermos este cancelamento total de distorção de segundo harmônico entre dois dispositivos tão diferentes como um amplificador e uma caixa acústica? Mínima, da mesma maneira que seriam muito poucas as chances de obtermos a soma total de 2%. Como pudemos ver, se a diferença entre as fases estiver entre -120° e $+120^\circ$ existirá um aumento da distorção final em relação a distorção de apenas um dos dispositivos até um máximo de 2%. Se a diferença estiver entre -120° e -180° ou entre $+120^\circ$ e $+180^\circ$ teremos uma redução da distorção total para níveis abaixo dos níveis de distorção de um dos dispositivos até um mínimo de zero. Claro está que nada garante que a audibilidade da distorção siga linearmente estes números e existe até uma grande possibilidade de que a redução de distorção seja mais claramente percebida que seu aumento, especialmente se estivermos falando de altos valores, como 5%, em cada um dos dispositivos.

Quais são as chances de aumento ou redução. Pode-se começar com a suposição de que não existe nenhum

comportamento preferido para a fase da distorção em nossos dispositivos. Existiria então cerca de 66% de probabilidade de aumento da distorção do sistema total em relação a distorção de um dispositivo (no nosso caso, a caixa). Isto é fácil de concluir verificando que temos 240° dos 360° totais correspondendo a um aumento. De forma complementar será obtido 33% de probabilidade de diminuirmos a distorção do sistema em relação a distorção da caixa sozinha. No mundo real tanto caixas acústicas como amplificadores exibem tendências, que não são aleatórias como a suposição anterior, exibindo preferência por determinados comportamentos em certas faixas de frequências. Se ao lado disto for utilizado o fato de que a inversão de polaridade entre o amplificador SE e a caixa muda 180° a relação entre as distorções dos dois dispositivos, ficaria aumentada, para cada frequência observada, para 66% a probabilidade de redução da distorção do sistema em relação à distorção da caixa apenas. Claro que as coisas não poderiam ser tão simples assim. Foi descrito um caso ideal. Precisamos ter em mente três suposições que foram inicialmente feitas. Primeiro, está sendo analisado o caso de apenas uma frequência. Quando altera-se a polaridade da conexão esta fica alterada para todas as frequências. Segundo, foi assumido níveis de distorção de segundo harmônico iguais, no amplificador e na caixa e na verdade se a distorção do amplificador for da mesma ordem de grandeza porém sempre menor que a da caixa a probabilidade de redução de distorção em relação a distorção da caixa apenas aumenta. Terceiro, foi assumido que a inversão de polaridade e a conseqüente mudança na carga que a caixa apresenta para o amplificador, não alteraria a geração de distorção. Embora não inteiramente verdade as duas últimas condições são suposições razoáveis. Isto, com certeza, permite que o que foi descrito ocorra parcialmente toda vez que ligamos um amplificador SE a uma caixa acústica. As vezes o resultado é simplesmente música.

Aqui deve ser feito um parênteses para deixar claro que a multiplicação de distorção de segundo harmônico gera também pequenas quantidades de terceiro e quarto harmônicos. Isto, porém, ocorre em quantidades verdadeiramente minúsculas nos níveis normais de audição. Além disto o total cancelamento teórico depende de algumas considerações envolvendo componentes DC como pode ser visto no apêndice. Cancelamento de distorção de ordens mais elevadas (terceira em diante) embora possíveis, são mais difíceis de analisar embora possam ocorrer de forma parcial.

Toda esta análise é válida para uma frequência. A variação da distorção com a frequência e a forma como no mundo real a distorção muda com os diversos níveis de potência, são fundamentais para a utilização efetiva destes efeitos. De qualquer maneira, tudo isto mostra

porque, se determinadas condições forem respeitadas, os amplificadores SE podem formar sistemas que na verdade possuem baixa distorção onde realmente importa, ao chegar aos ouvidos.

Nas figuras pode-se ver um exemplo do que pode ocorrer na prática. A figura 3 mostra o gráfico da distorção, na faixa entre 100 Hz e 1000 Hz, de uma caixa de alta eficiência com distorção por volta de 2% , quando medida com 2,83Vrms (equivalentes a 1W em 8 Ohms). Isto foi medido com um amplificador convencional com menos que 0,05% de distorção nesta mesma condição do teste. A figura 4 mostra o gráfico da distorção quando a caixa é acionada por um SE com uma média de 0,8% de distorção. Pode-se observar o nítido aumento da distorção entre 150 e 300 Hz e uma diminuição por volta de 900 Hz. A figura 5 mostra o resultado após ser feita uma inversão na polaridade da ligação. Nota-se claramente a redução na região de frequência mais baixa assim como um aumento entre 800Hz e 900Hz. Nota-se também uma relevante redução na distorção média em relação a caixa tocada por um amplificador que poderia ser considerado “perfeito”, como o da figura 5.

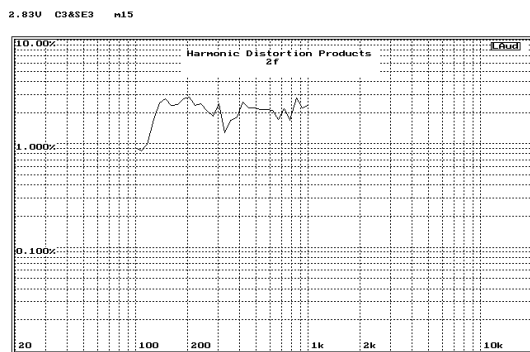


FIGURA 3 – caixa e amplificador “perfeito”

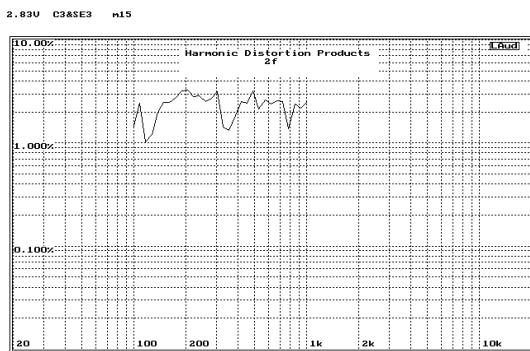


FIGURA 4 – caixa e amp. SE com distorção

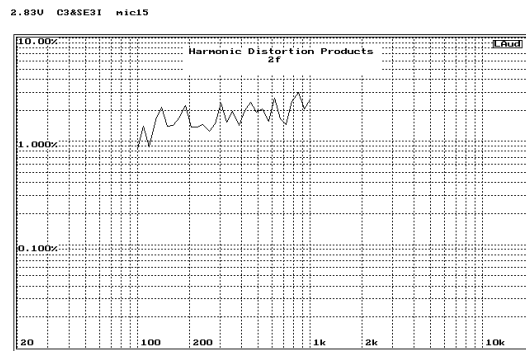


FIGURA 5 – caixa e amp. SE com fase invertida

10. A REDUÇÃO DA DISTRORÇÃO NÃO-LINEAR

A forma mais comum de redução da distorção não linear é o emprego da realimentação negativa. No caso dos alto-falantes existem enormes dificuldades para o emprego desta, beirando a impossibilidade quando falamos das frequências mais elevadas onde o alto-falante não preserva o movimento pistônico. O uso de uma pré-distorção complementar surge como alternativa. Na verdade pode ser observado que a redução de distorção não-linear através de uma pré-distorção complementar é uma técnica muito antiga. Referências a estas técnicas em várias aplicações eletrônicas datam a antes de 1940 [3]. A primeira referência a possibilidade de usarmos uma pré-distorção para corrigirmos alto-falantes que consegui encontrar data da década de 50 [4]. Nas últimas duas décadas muito se tem feito para estudar a possibilidade de usarmos processamento digital de sinais para projetar equipamentos para reduzir a distorção não-linear dos alto-falantes[5][6]. Até aqui, no entanto estas técnicas nunca foram implementadas de forma comercial consistente. A impressão que estariam limitadas às baixas frequências e variações de nível restritas parece inibir os esforços práticos. Porém o caso dos amplificadores SE a válvula e sem realimentação negativa parece apontar na direção contrária. A avaliação da possibilidade de redução na distorção de segundo harmônico que foi apresentada na seção anterior ajuda a compreender porque a ocorrência desta redução pode ser mais frequente do que seria esperado. Como sugere um dos comentários sobre a redução da distorção não-linear através de uma pré-distorção [4], este efeito parece ser mais fácil de sintetizar do que de analisar [7]. O caso dos amplificadores SE a válvulas parece se enquadrar nesta afirmação.

11. CONCLUSÕES

O desempenho inesperado do tipo de amplificador considerado, levando em conta as especificações e medidas de distorção harmônica total que apresentam pode começar a ser explicado se for considerado o sistema composto pelo amplificador e pela caixa acústica como um todo. Em determinadas circunstâncias a redução na distorção não-linear obtida pela pré-distorção complementar pode ser a explicação para pelo menos parte da aparente contradição entre as medidas e o desempenho sonoro subjetivo.

APÊNDICE – COMO A DISTORÇÃO SE SOMA OU MULTIPLICA

Pode-se ver o que acontece quando conectamos dois dispositivos um após o outro. Primeiro será examinado o caso de um amplificador ideal sem distorção seguido por uma caixa acústica que produz distorção de segundo harmônico. A seguir será mostrado o caso em que o amplificador também produz distorção de segundo harmônico na mesma configuração.

Caso 1: Dispositivo número um é um amplificador perfeito.

Para uma entrada $x = E \cos \omega t$
(onde, $\omega = 2\pi f$, f = frequência e E = amplitude) (1)

A saída será:

$$y = Ax \rightarrow y = AE \cos \omega t, \text{ onde } A \text{ é o ganho.} \quad (2)$$

Este seria o famoso caso do hipotético “fio perfeito com ganho”. Usando esta saída como entrada no segundo dispositivo (caixa acústica) que produz distorção de segundo harmônico pode-se ver qual será a saída do sistema completo (w):

$$w = By + ce^{i\theta} y^2, \quad (3)$$

onde B é o ganho, c é o fator que varia com a quantidade de distorção de segundo harmônico e elevado a $i\theta$ representa a fase θ , assumida constante para cada ω .

Substituindo (2) em (3):

$$w = BAE \cos \omega t + ce^{i\theta} A^2 E^2 \cos^2 \omega t \quad (4)$$

Usando identidades trigonométricas:

$$w = BAE \cos \omega t + \frac{A^2 E^2 c e^{i\theta}}{2} + \frac{A^2 E^2 c e^{i\theta}}{2} \cos 2\omega t \quad (\text{saída}) \quad (5)$$

O primeiro termo representa o sinal original apenas multiplicado por BA , o segundo termo (que é independente da frequência (ω)) representa a componente contínua e o terceiro termo é a distorção de segundo harmônico com amplitude de $A^2 E^2 c/2$ e a fase θ . Deve-se lembrar que o ângulo de fase θ é função da frequência porém ao se olhar para apenas uma frequência pode ser considerado uma constante.

Caso 2: Quando o sistema é composto por um amplificador e uma caixa acústica que produzem ambos distorção de segundo harmônico qual será a saída?

y é a saída do amplificador para a mesma entrada (1):

$$y = Ax + de^{i\phi} x^2 \rightarrow y = AE \cos \omega t + de^{i\phi} E^2 \cos^2 \omega t \quad (6)$$

onde d é o fator dependente da quantidade de segundo harmônico e ϕ é o ângulo de fase do segundo harmônico em relação a fundamental no amplificador. Usando as mesmas identidades trigonométricas:

$$y = AE \cos \omega t + \frac{E^2 d e^{i\phi}}{2} + \frac{E^2 d e^{i\phi}}{2} \cos 2\omega t \quad (7)$$

O segundo termo corresponde a um sinal contínuo. Em alguns casos, dependendo de onde a distorção é gerada e qual o acoplamento usado com o segundo dispositivo, podemos ignorá-lo. Para os amplificadores que estamos tratando, por usar acoplamento a transformador, este é exatamente o caso. Por isso este termo pode ser cancelado quando se trata da maior parte das frequências. Portanto pode-se considerar que a saída será:

$$y = AE \cos \omega t + \frac{E^2 d e^{i\phi}}{2} \cos 2\omega t \quad (\text{saída}) \quad (8)$$

Esta é a saída do amplificador que será usada como entrada da caixa acústica.

Substituindo (8) em (3) será obtida a equação:

$$w = BAE \cos \omega t + \frac{BE^2 d e^{i\phi}}{2} \cos 2\omega t + ce^{i\theta} (AE \cos \omega t + \frac{E^2 d e^{i\phi}}{2} \cos 2\omega t)^2 \quad (9)$$

Expandindo e rearranjando os termos:

$$w = (BAE + \frac{c d e^{i(\theta+\phi)}}{2} AE^3) \cos \omega t + (\frac{BE^2 d e^{i\phi}}{2} + A^2 E^2 \frac{c e^{i\theta}}{2}) \cos 2\omega t +$$

$$\frac{AE^3 cd e^{i(\theta+\phi)}}{2} \cos 3\omega t +$$

$$\frac{E^4 cd^2 e^{i\theta}}{8} \cos 4\omega t +$$

$$A^2 E^2 \frac{c e^{i\theta}}{2} + \frac{E^4 cd^2 e^{i\theta}}{8}$$

O segundo termo representa a distorção de segundo harmônico. Será reduzido a zero se:

$$\left(\frac{BE^2 d e^{i\phi}}{2} + \frac{A^2 E^2 c e^{i\theta}}{2} \right) = 0$$

Para que isto aconteça é necessário que:

$$B d = A^2 c \text{ and that } \phi - \theta = 180^\circ .$$

Isto significa que será preciso um amplificador que produza a mesma quantidade de distorção de segundo harmônico a uma dada potência que a caixa acústica quando está é acionada por esta mesma potência e que a fase relativa entre as distorções seja 180° .

Talvez mais importante é o fato que se o amplificador e as caixas têm níveis de distorção semelhantes e se a diferença de fase relativa for entre 120° e 180° ou entre -120° e -180° será obtida uma redução na distorção de segundo harmônico do sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. O. Hamm, Tube vs. Transistors. Is There an Audible Difference? , Journal of the Audio Engineering Society pg 267 Abril 1973
- [2] E. B.E. de Lima, SE Amplifier Output Impedance (parte I e II), Revista Glass Audio 3/97 e 6/97
- [3] A. J. H. Van der Ven, Output Stage Distortion, The Wireless Engineer – 08/1939 pg.383
- [4] J. R. MacDonald, Nonlinear Distortion Reduction by Complementary Distortion, IRE Transactions on Audio – Sept/Oct 1959 pg.128
- [5] H. Shurer, Linearization of Electroacoustic Transducers, PHD Thesis University of Twente Enschede, Holanda
- [6] H. Shurer, Exact Input-Output Linearization of an Electrodynamical Loudspeaker, Audio Engineering Society Convention 101 Preprint 4334, Outubro 96
- [7] R. A. Greiner, “Comments on ‘Nonlinear Distortion Reduction by Complementary Distortion’,” IRE Transactions on Audio – Jan-Feb 1960 pg.34.