Slew-Rate

Marcelo Barros – Departamento de Física da Universidade Federal de São Carlos (DF-UFSCar) e consultor da HotSound – Amplificadores Profissionais

Publicado em 11/2001 – Revista Áudio, Música & Tecnologia n. 122

Resumo

O *Slew-rate* é uma das mais valiosas especificações em amplificadores e neste artigo proponho demonstrar sua importância diretamente das definições matemáticas. Desde que é uma taxa de variação por excelência, faremos uso do cálculo diferencial, numa primeira abordagem não rigorosa em forma gráfica, e logo em seguida de forma mais rigorosa com o método analítico usual. A teoria é extensiva a qualquer outro circuito analógico destinado a processar grandes sinais.

1. Sobre a necessidade de introduzir uma nova especificação

Slew-rate, ou taxa de variação, é uma especificação das mais importantes em amplificadores e em qualquer circuito de áudio, tais como processadores, mesas de som, etc., porém em amplificadores sua importância é maior, devido às altas amplitudes geradas. A não observância de um valor mínimo de *slew-rate* pode ocasionar distorções bastante desagradáveis.

O termo *slew-rate* originou-se da teoria dos amplificadores operacionais[3], assim que tornou-se clara a necessidade de conhecer a rapidez com que estes circuitos poderiam lidar com os sinais elétricos de grande amplitude.

Nos dias atuais surgiu uma certa controvérsia, entre autores, quanto ao uso do termo "*slew-rate*"; alguns[5] sugerindo que fosse substituído pela quantidade, de fato mais direta, "*slew-limit*". Mas como "*slew-rate*" já se encontra bem difundido e para evitar possíveis confusões, omitiremos a quantidade "*slew-limit*" em favor da mais conhecida "*slew-rate*".

Em nossa descrição, faremos uso de ferramentas matemáticas tão simples quanto possíveis[1]. Para um leitor mais apressado ou não interessado nestas definições, sugiro ir direto ao tópico 3.

2. Fundamentos acerca da taxa de variação

Antes de qualquer coisa é necessário entender o que significa taxa de variação no seu sentido matemático. Trata-se de um conceito simples mas importante, que faz parte do nosso dia-a-dia. Como exemplo, devemos considerar que a velocidade de um automóvel é expressa como uma taxa de variação, tal como

$v = 100km/h$

Ela significa que a cada hora o automóvel varia 100km em sua posição. Uma forma mais elucidativa é a interpretação geométrica. Podemos assim dizer que o espaço *s* (distância percorrida neste caso) varia como uma função do tempo *t*, neste caso 100km a cada 1h, ou graficamente:

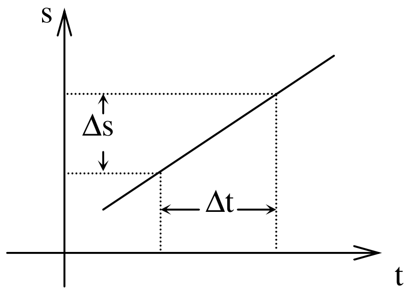

Figura 1

E podemos expressar por

$v = \Delta s/\Delta t$ (1.1), onde Δ significa variação

Diz-se que a velocidade é a taxa de variação temporal do espaço, ou a taxa de variação do espaço com respeito ao tempo. Pode ainda ser pensada como a inclinação exibida pelo gráfico espaço-tempo.

No caso deste exemplo, tudo é muito simples, pois que a função é *linear*, ou seja, o gráfico *é uma reta*, assim basta substituir:

$$v = (v_{final} - v_{inicial})/(t_{final} - t_{inicial}) = 100km/1h = 100km/h$$

O que conduz ao resultado familiar de 100km/h, uma taxa claramente constante ao longo do tempo. Lembre-se que a função é linear, ou seja, seu gráfico é uma reta.

Podemos estender o mesmo raciocínio para sinais elétricos. Vamos assim supor um sinal de teste do tipo senoidal, ou aproximadamente, um tom de flauta doce, examinado ao osciloscópio.

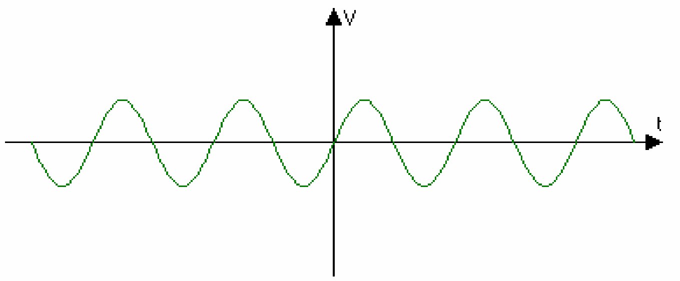

figura 2

A imagem que vemos no osciloscópio é nada mais do que a representação temporal da tensão (ou seja um gráfico tensão-tempo). Vemos que ela varia sinusoidalmente ao longo do tempo, e podemos provar que ela é exatamente uma função do tipo seno/cosseno, ou uma *combinação linear* de funções desse tipo. Mas, o mais importante agora é perceber que sua taxa de variação não é mais linear, mas varia de ponto a ponto, ao longo do tempo, e isso nos impede de utilizar (1.1) a fim de calculá-la.

Porém, lançando mão de ferramentas matemáticas poderosas, como o cálculo diferencial[1], podemos fazê-lo com muita facilidade. Veremos o processo.

Consideremos um trecho do gráfico. Estamos interessados em conhecer a taxa de variação em um único ponto. O gráfico não é uma reta, assim como medir a inclinação de algo que é, essencialmente, curvo?

A técnica consiste em se traçar uma reta que toca o gráfico *num único ponto*, o ponto que estamos interessados. A essa reta dá-se o nome de reta *tangente* ao gráfico no ponto em questão.

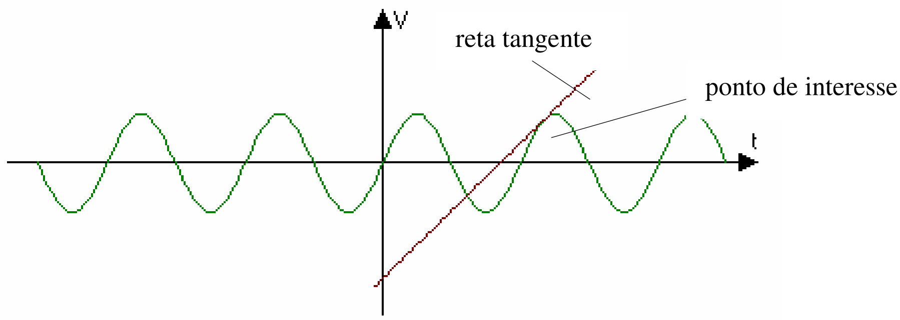

figura 3

A inclinação desta reta tangente pode ser então calculada da maneira usual, fornecendo assim, a *taxa de variação instantânea* da curva, num dado ponto.

Observe que não é mais possível falar em taxa de variação apenas, mas em *taxa de variação instantânea*, pois que para cada ponto da função teremos um valor diferente.

A técnica de se traçar retas tangentes a curvas foi descoberta, pela primeira vez, no século XVII, por *Sir* Isaac Newton e consiste no seguinte processo matemático.

Dada uma certa curva, representada por uma certa função *f*, estamos interessados em conhecer a taxa de variação instantânea (ou inclinação) da curva num certo ponto **t**, genérico.

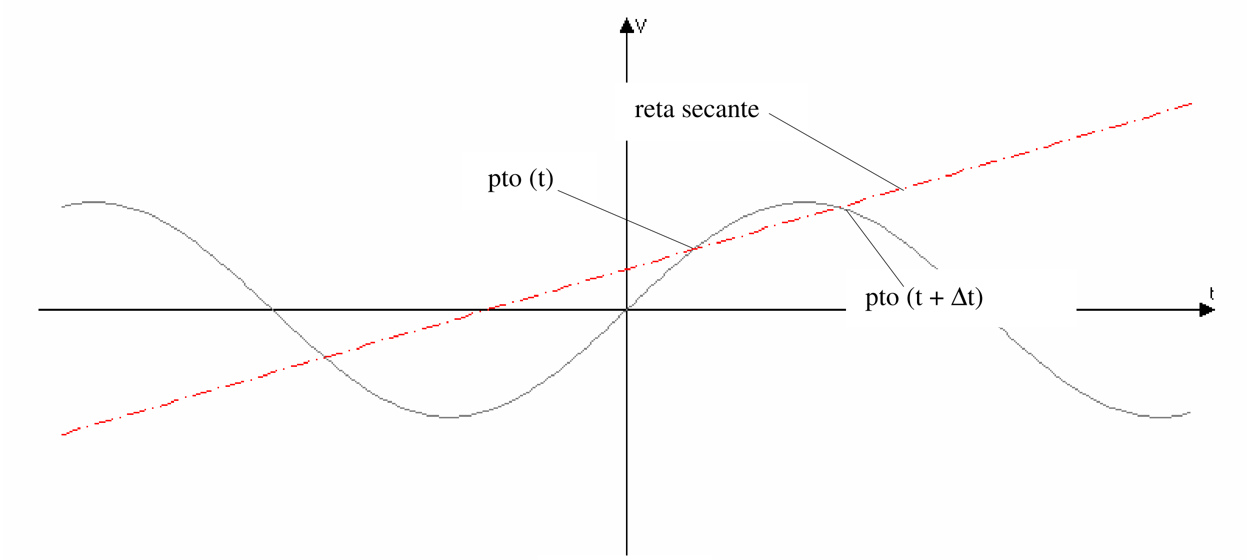

Figura 4

Traçamos uma reta através deste ponto *t* e de um outro ponto, um pouco adiante, que chamaremos $t+\Delta t$ (Δt é um pequeno acréscimo). A esta reta, que fornece a taxa de variação *média*, chamaremos reta *secante*.

A taxa de variação (*slew-rate*) da reta secante é, pela expressão usual (1.1):

$$SR_{sec} = \Delta f(t)/\Delta t = [f(t+\Delta t)- f(t)]/[(t+\Delta t-t)] = [f(t+\Delta t)- f(t)]/(\Delta t) \qquad (1.2)$$

Contudo, esta não é uma boa aproximação para a taxa de variação em *t*, pois ela compreende uma região relativamente grande. Se diminuirmos progressivamente o acréscimo Δt, aumentaremos a precisão cada vez mais e chegaremos, no limite em que Δt se aproxima de zero ($\Delta t \to 0$), na inclinação da reta tangente, pois o ponto Δt estará infinitamente próximo de *t*, e assim poderemos, com segurança garantir que, [$t, f(t)$] e [$\Delta t, f(\Delta t)$] *quase* se tocam.

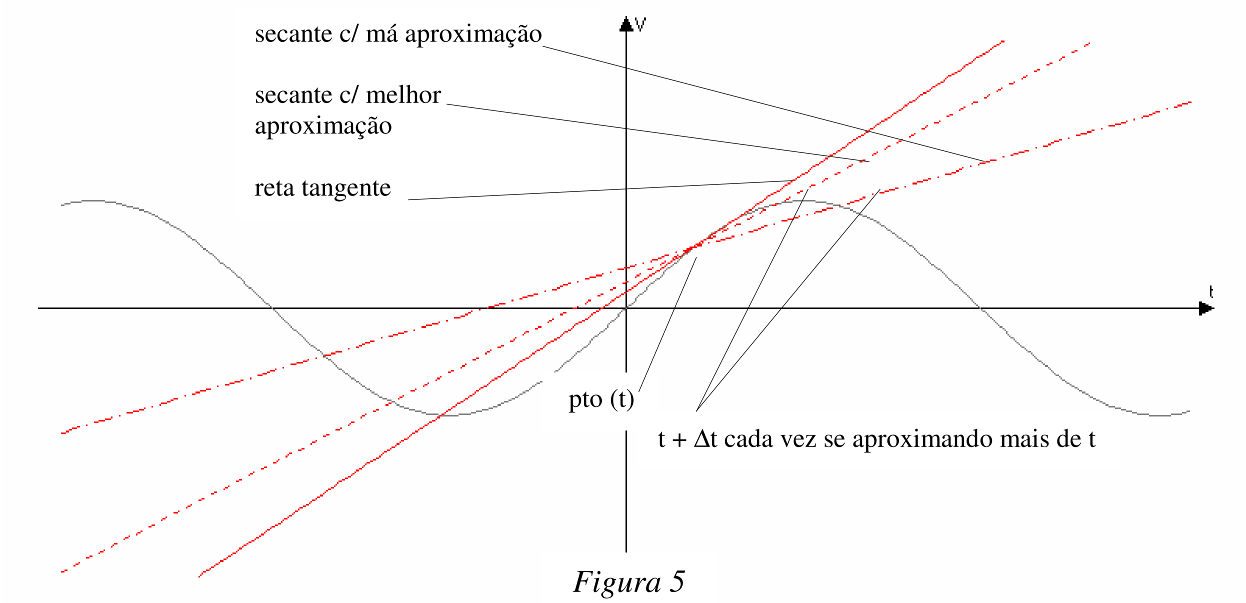

Figura 5

Matematicamente o processo é:

$$\lim_{\Delta x \to 0} [f(t+\Delta t) - f(t)]/(\Delta t) = d[f(t)]/dt = SR \qquad (1.3)$$

Onde *SR* é a *taxa de variação instantânea* da curva no ponto *t*. A operação $d[f(t)]/dt$ é chamada *derivada de f com respeito a t*.

Aplicando o operador derivada ao sinal senoidal de teste do tipo $\upsilon_{(t)} = A\ sen(\omega t)$,(que nada mais é do que a representação matemática do sinal de teste da figura 2, onde *A* representa a amplitude, ω é a freqüência angular e *t* o tempo), podemos encontrar todas as taxas de variação possíveis para esta função:

$$d[sen(\omega t)]/dt = cos(\omega t)\omega$$

Não provaremos a passagem $d[sen(\omega t)]/dt = cos(\omega t)\omega$, mas o processo é essencialmente o descrito em (1.3); (aos interessados lembramos que aqui foi utilizada a regra da cadeia do cálculo diferencial[1], razão pela qual surge um ω fora da função).

Se $d[sen(\omega t)]/dt = cos(\omega t)\omega$ podemos facilmente encontrar a maior taxa de variação possível, já que a função cosseno é periódica e tem inclinação máxima (ou mínima) em 0, π, 2π,... (ou seja, em $\eta\pi$ c/ $\eta \in N$), e esse valor máximo é sempre unitário (1 ou –1); assim

$$\upsilon_{(t)} = A\ sen(\omega t)$$

$$d[\upsilon_{(t)}]/dt = A\ cos(\omega t)\omega$$

Como o cosseno tem valor máximo em 0, π, 2π,..., fazemos $t = 0$, assim o fator $cos(\omega t) = 1$, e substituindo temos:

$$SR = d[\upsilon_{(t)}]/dt = A\omega;\ \text{em}\ t = 0$$

Como $\omega = 2\pi f$, a equação fica:

$$\boldsymbol{SR_{(A_{max}, f_{max})} = A_{max}\ 2\pi f_{max}} \qquad \mathbf{(1.4)}$$

Sendo A_{max} a amplitude máxima do sinal de teste e f_{max} a maior freqüência deste sinal.

Assim (1.4) representa a maior taxa de variação (*slew-rate*) possível para uma tensão que varia sinusoidalmente com o tempo, em função da amplitude e da freqüência.

3. Aplicando as definições

A expressão (1.4) nos revela que o *slew-rate* é uma função a duas variáveis e estas variáveis estão intimamente relacionadas a dois fatores essenciais em amplificadores: **1.** A máxima amplitude do sinal. **2.** A maior freqüência possível (ou largura de banda). Essas dependências podem ser facilmente relacionadas pela expressão (1.4).

É necessário que os circuitos elétricos que irão processar o sinal sejam capazes de manipular essas variações no tempo, mais precisamente, que eles sejam suficientemente rápidos para não alterarem o sinal original. Na figura 6 podemos ver como um sinal é modificado por um circuito que possua um *slew-rate* inferior ao do próprio sinal.

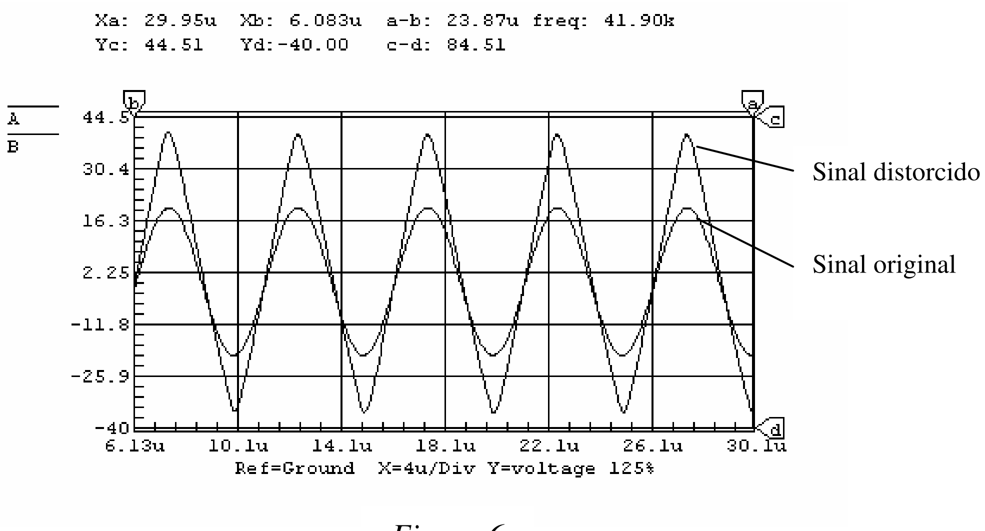

Figura 6

Caso a taxa de variação do sinal a ser amplificado/processado seja maior do que a taxa máxima de variação do circuito, teremos o que se usualmente se chama de *distorção por limitação do slew-rate*. A forma original da onda tende a um formato triangular, como pode ser visto na figura, e componentes que não existiam no sinal original irão se somar e aparecer na saída. A superposição (combinação linear) da fundamental com os componentes harmônicos irão formar a onda distorcida e esta pode ser extremamente desagradável para os ouvidos. A condição para que isso não ocorra é

$SR_{amp} \geq SR_{sinal}$ (2.1)

Internacionalmente, adota-se como um bom padrão de engenharia uma *SR* quatro vezes superior ao que seria matematicamente necessário.

Não mostraremos aqui porque os circuitos amplificadores são limitados em termos de taxa de variação. Esta análise exige alguma teoria de circuitos elétricos e não é nossa intenção no momento. Ao invés disso, vamos apontar as conseqüências mais diretas desse tipo de distorção e a importância de se ter valores apropriados de *slew-rate*, a fim de evitar esses transtornos. Essencialmente, as necessidades não serão sempre as mesmas já que, como vimos, a *SR* exibe uma dependência com a amplitude máxima e com a freqüência máxima a ser respondida pelo amplificador (ou outro equipamento qualquer de áudio). Veremos alguns exemplos.

Exemplo 1:

Um amplificador tem que responder, para que atinja sua potência máxima, a uma amplitude de $10V_p$ e possui uma $SR = 0{,}5V/us$. Qual a maior freqüência com que ele poderá trabalhar sem exibir distorção por limitação de *slew-rate*?

A condição é dada por (2.1):

$SR_{amp} \geq SR_{sinal}$

E podemos manipular (1.4) para obter:

$f_{max} = SR \times 10^6 / 2\pi A_{max}$ (2.2) onde as dimensões são: *slew-rate* em Volts/microsegundo: [*SR*] = V/*u*s, amplitude máxima = tensão de pico em Volts: [V_p] = V e freqüência em Hertz: [f] = Hz. O fator 10^6 que aparece no numerador é necessário para que se possa exibir o resultado nas unidades usuais. Inserindo estes valores em (2.2), obtemos:

$$f_{max} = (0{,}5V/us \times 10^6)/(2\pi \times 10V_p) = 7.960Hz = 7{,}96kHz$$

Vemos assim que esse amp não poderá responder (em $10V_p$) a nenhum sinal com freqüência maior do que 7,96kHz sem sofrer distorção. O procedimento inverso também é válido, pois podemos fixar a largura de banda que julgarmos conveniente e calcular qual a amplitude máxima teríamos disponível, sem distorção, na saída. Manipulando (2.2), obtemos:

$$A_{max} = SR \times 10^6/2\pi f_{max} \qquad (2.3)$$

Supondo que uma largura de banda de 20kHz nos seja apropriada. Assim como antes, inserimos os valores em (2.3) para obter:

$$A_{max} = (0{,}5V/us \times 10^6)/(2\pi \times 20.000Hz) = 3{,}98V_p$$

Não podemos utilizar este amp com uma tensão de saída maior do que $3{,}98V_p$, sob pena de existir distorção no sinal de saída; isto é claro, se quisermos utilizá-lo até uma freqüência de 20kHz.

Vamos agora aplicar estes resultados a amplificadores típicos do áudio profissional.

Exemplo 2:

Um amp de 1.000Wrms/canal @ 2Ω será utilizado num trabalho full-range, com banda passante de 20kHz. Qual a *slew-rate* necessária?

Se ele desenvolve 1.000Wrms @ 2Ω, então devemos calcular a amplitude máxima de um sinal de teste senoidal presente em sua saída. Manipulando a lei de Ohm, obtemos:

$$P = (E)^2/R_L \Leftrightarrow P \cdot R_L = E^2 \Leftrightarrow E_{rms} = (P \cdot R_L)^{1/2}$$

No entanto a tensão assim obtida é a tensão eficaz ou rms. Nesse caso, nos interessa a tensão de pico (lembrando que as tensões medidas em multímetros comuns sempre são exibidas em valores rms, para um sinal permanente senoidal). Assim devemos multiplicar o resultado por $(2)^{1/2}$.

$$V_P = A_{max} = (2)^{1/2}(P_{rms}R_L)^{1/2} = (P_{rms}2R_L)^{1/2} \qquad (2.4)$$

Inserindo os dados, obtemos:

$$V_P = A_{max} = [(1.000W)\times 2\times(2\Omega)]^{1/2} = 63{,}25V$$

Utilizando diretamente (1.4)

$$SR = (A_{max}\, 2\pi f_{max})/10^6$$

e inserindo os valores, obtemos:

$$SR = (63{,}25V\times 2\pi\times 20.000Hz)/10^6 = 7{,}94V/us$$

Internacionalmente, é recomendado que esse valor mínimo seja multiplicado por 4, obtendo assim: 31,7V/us, mas acredito que o dobro já seja o suficiente para garantir total ausência de distorção por limitação de *slew-rate*, assim ~15V/*u*s já seria um ótimo valor.

Através destes exemplos fica claro que *slew-rate* não é uma especificação do tipo “quanto mais, melhor”, basta termos um valor coerente com a aplicação a que se destina o amp (função da amplitude máxima e da freqüência máxima). Um eventual acréscimo não carecerá de qualquer significação[2].

Tabelas poderão ser elaboradas pelos leitores a fim de verificar a melhor faixa de atuação de seus amps, bem como conferir as especificações de um novo equipamento a ser adquirido, para certificar-se que o mesmo se adequará as suas necessidades. Para tanto, basta utilizar as fórmulas que foram aqui deduzidas, consultar os exemplos resolvidos e praticar um pouco de matemática.

Para finalizar, devo acrescentar que verifiquei, ao longo de algum tempo, que em alguns comerciais e artigos envolvendo amplificadores tem-se dito que um certo amp possuía um alto *slew-rate* por empregar uma baixa (ou alta) taxa de realimentação negativa. Esse argumento, naturalmente, não possui o menor fundamento. Neste artigo não daremos uma demonstração rigorosa, mas podemos, qualitativamente, analisá-lo.

A realimentação negativa não tem como interferir na taxa de variação ou na largura de faixa *para grandes sinais*[4]. Até que a tensão de saída varie, não há sinal de realimentação e nenhum benefício (ou sacrifício) devido à realimentação negativa pode ser obtido. Esse simples raciocínio pode ser reforçado com a idéia de que a malha de realimentação só pode amostrar um evento *que já ocorreu*! Assim a realimentação negativa, tão necessária em outros aspectos, tem pouca influência no regime transiente.

A demonstração é complexa e não caberia aqui.

Referências:

1. *Kaplan, Wilfred,* “Cálculo Avançado”, Vol 1, Editora Edgard Blücher Ltda, 1972;
2. *G. Randy Slone*, “High-Power Audio Amplifier Construction Manual”, McGraw-Hill, 1999;
3. *Jacob Millman & Christos Halkias*, “Integrated Electronics”, McGraw-Hill, 1972;
4. *Albert Paul Malvino*, “Electronic Principles”, McGraw-Hill, 1993;
5. *Ben Duncan*, “High Performance Audio Powers Amplifiers”, Butterworth-Heinemann, 1996.