



Workshop Técnico

AES Brasil 2007

AMPLIFICADORES DIGITAIS

Marcelo H. M. Barros

*GMD - Grupo de Materiais e Dispositivos, Departamento de Física e Engenharia Física
Universidade Federal de São Carlos, 13565-905, São Carlos, São Paulo*

HotSound. Ind. Com. de Equipamentos Eletrônicos Ltda, 13.270-294, Valinhos, São Paulo



Universidade Federal de São Carlos




Programa de Pós-Graduação
em Física



Sumário

1. *Classes de Operação em Amplificadores;*
2. *Perdas de Energia – Topologias Lineares (Classe AB) ;*
3. *Perdas de Energia – Topologias Chaveadas Classes AD/BD;*
4. *Classes Lineares (A/B/AB) versus Classe D;*
5. *Fontes de Alimentação;*
6. *A Eficiência Global;*
7. *Analogia – Conversor DC/DC e Amplificador Classe D;*
8. *A Técnica de Modulação PWM (pulse-width modulation);*
9. *A Técnica de Modulação PDM (pulse-density modulation) - O esquema 1-bit sigma-delta (SDM) como uma forma de PDM;*
10. *Técnica PWM versus Técnica PDM;*
11. *Espectros;*
12. *As Principais Imperfeições das Topologias Chaveadas;*
13. *As Principais Causas de Imperfeições nas Topologias Chaveadas;*
14. *THD e Shoot-Through versus Dead-Time;*
15. *Efeitos do Filtro de Reconstrução Sobre a Eficiência;*
16. *Dificuldades Adicionais nas Medidas de Performance;*
17. *O método FCC de Correção para Topologias Chaveadas Classes AD/BD no Esquema Sigma-Delta. (Apresentado no 4º Congresso /10ª Convenção Nacional da AES Brasil 2006);*
18. *Bibliografia.*





Classes de Operação em Amplificadores (do ponto de vista da eficiência)

Topologias puramente lineares

Classes A, B, AB e suas variantes
Eficiências práticas de 20 à 60%

Modos de operação

Classes G, H e suas variantes (empregando células lineares)
Eficiências práticas de 70 à ~85%

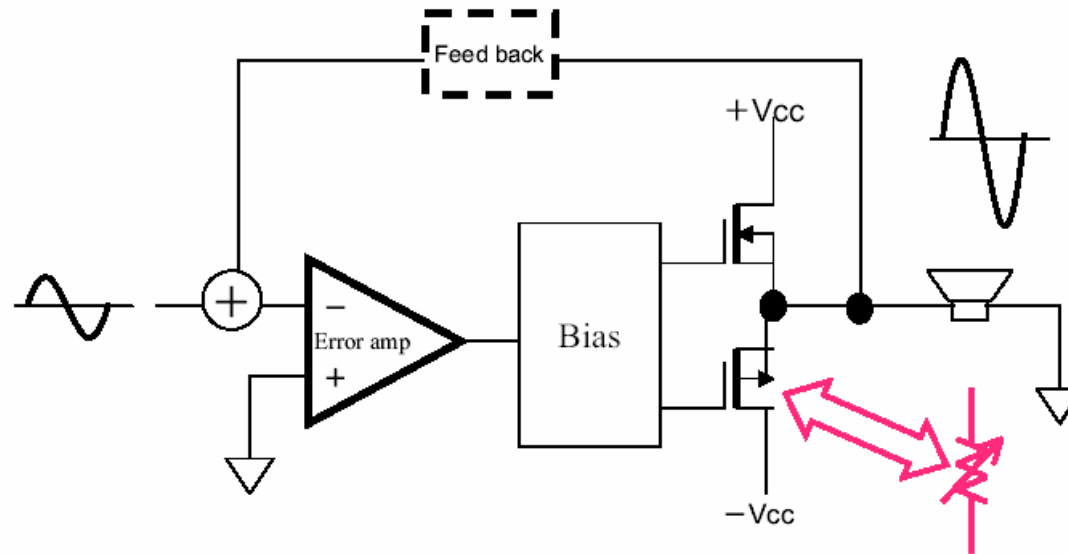
Híbridos

Classes I, classe TD (Lab. Gruppen)
Eficiências práticas de 70 à 90%

Chaveados (digitais)

Classes AD/BD, geralmente com modulação PWM, classe I(Crown), etc
A eficiência é geralmente maior que 90% (95% é possível hoje em dia)

Perdas de Energia - Topologias Lineares (Classe AB)

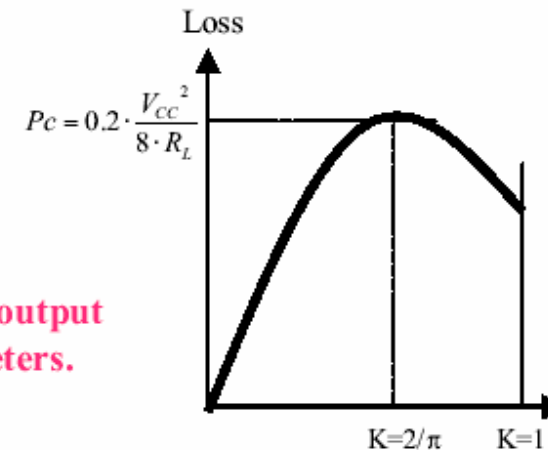


Loss in class AB

$$P_c = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{\pi} \frac{V_{cc}}{2} (1 - K \sin \omega \cdot t) \frac{V_{cc}}{2 \cdot R_L} K \sin \omega \cdot t \cdot d\omega \cdot t$$

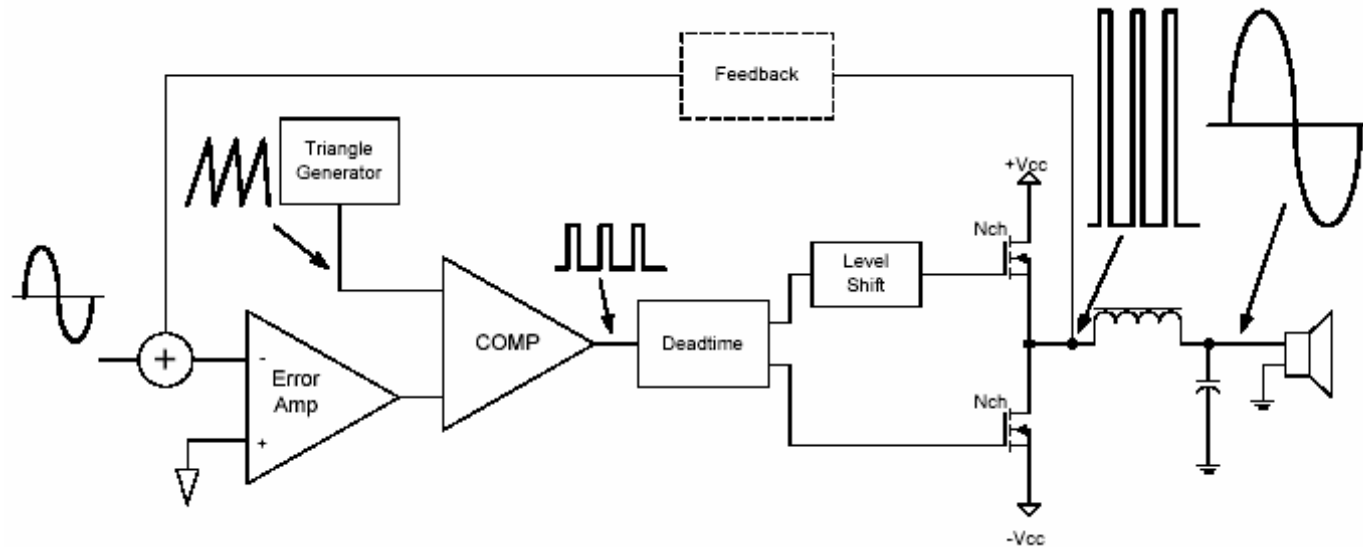
$$= \frac{V_{cc}^2}{8\pi \cdot R_L} \cdot \left(\frac{2K}{\pi} - \frac{K^2}{2} \right)$$

← **Regardless of output device parameters.**



- ✓ A eficiência (prática) em classe AB fica em torno de 60%
- ✓ A eficiência em classe H pode alcançar 80% ou mais

Perdas de Energia - Topologias Chaveadas Classes AD/BD



Loss in Class D

$$P_{TOTAL} = P_{SW} + P_{cond} + P_{gd}$$

$$P_{cond} = \frac{R_{DS(ON)}}{R_L} \cdot P_O \quad P_{gd} = 2 \cdot Q_g \cdot V_{GS} \cdot f_{PWM}$$

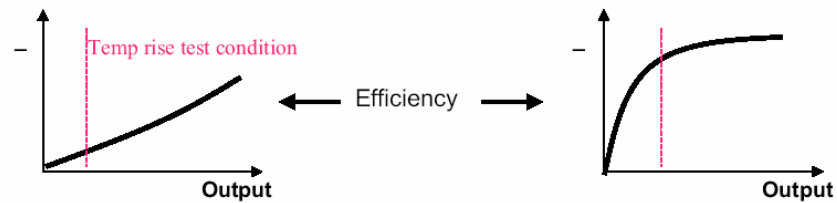
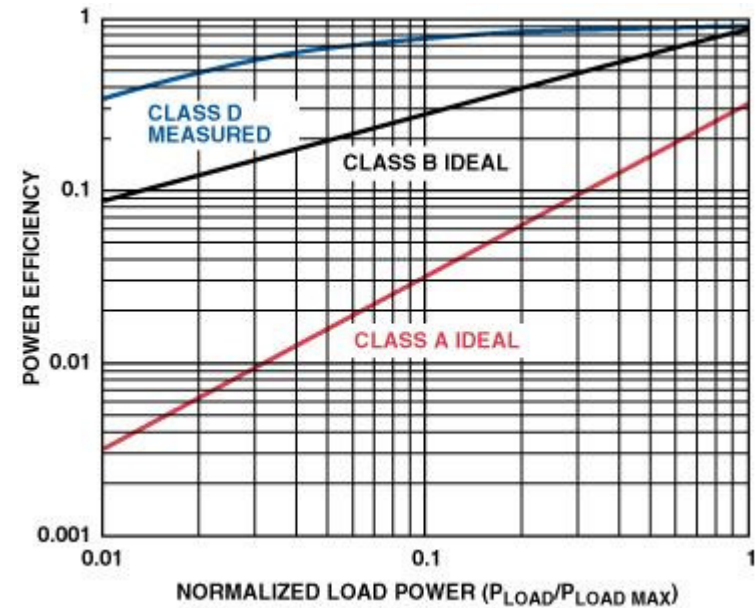
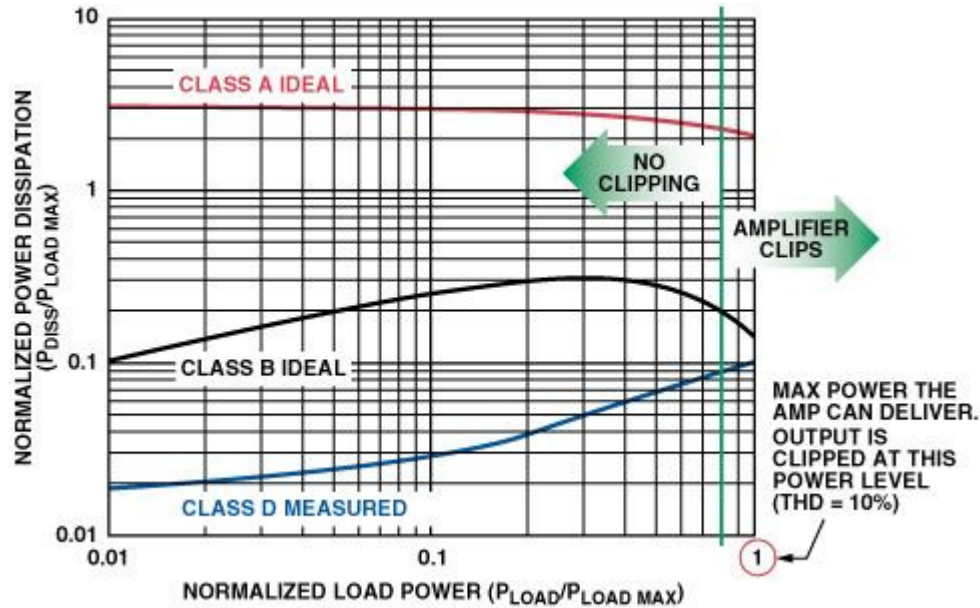
$$P_{SW} = C_{OSS} \cdot V_{BUS}^2 \cdot f_{PWM} + I_D \cdot V_{DS} \cdot t_f \cdot f_{PWM}$$



K is a ratio of Vbus and output voltage.

- ✓ A eficiência em classe D só depende dos dispositivos, não há impedimento teórico para $\eta = 100\%$
- ✓ Hoje, na prática, pode-se alcançar $\eta \approx 95\%$.

Classes Lineares (A/B/AB) versus Classe D

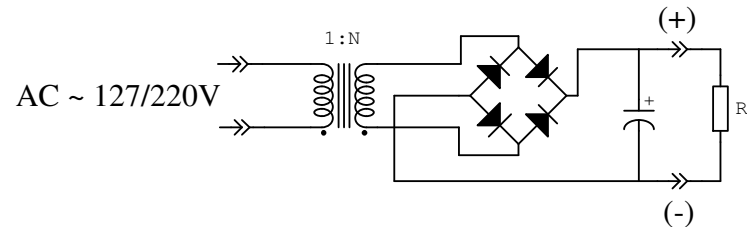


Constant over V_{bus}	←	Gain	→	Proportional to V_{bus}
Good	←	PSRR	→	0 dB
Always from supply to load	←	Direction of energy flow	→	Both way Creates V_{bus} pumping phenomena

Fontes de Alimentação

Convencionais, com transformadores de 60Hz

A baixa frequência (60Hz) impõe um grande volume e peso ao núcleo, ocorrem grandes perdas por histerese, por correntes de Foucault e ohmicas (no fio).

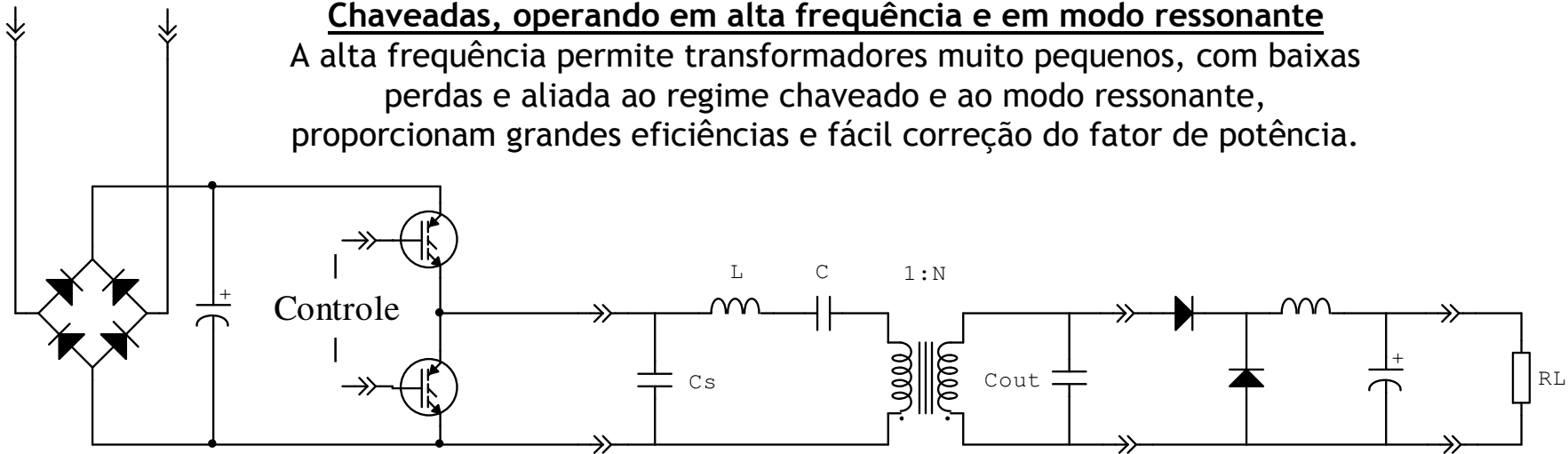


Resultado - Fontes volumosas, pesadas, com baixa eficiência - geralmente da ordem de 60% e baixo fator de potência ($\approx 0,5$)

AC ~ 90-240V

Chaveadas, operando em alta frequência e em modo ressonante

A alta frequência permite transformadores muito pequenos, com baixas perdas e aliada ao regime chaveado e ao modo ressonante, proporcionam grandes eficiências e fácil correção do fator de potência.



Resultado - Fontes compactas, leves, de alta eficiência ($>90\%$) e com possível alto fator de potência ($>0,95$).



A Eficiência Global

(Fonte de alimentação + Estágio de Potência + Sistemas Auxiliares)

Globalmente, temos que considerar a eficiência da fonte de alimentação, a eficiência do estágio de potência e a energia gasta nos sistemas auxiliares; assim:

$$\eta_G = \eta_f \times \eta_p$$

Exemplos

Amp classe AB com fonte linear

$$\eta_p = 0,6 \text{ e } \eta_f = 0,6 \rightarrow \eta_G = \mathbf{36\%}$$

Amp classe H com fonte linear

$$\eta_p = 0,8 \text{ e } \eta_f = 0,6 \rightarrow \eta_G = \mathbf{48\%}$$

Amp classe H com fonte chaveada

$$\eta_p = 0,80 \text{ e } \eta_f = 0,95 \rightarrow \eta_G = \mathbf{76\%}$$

Amp híbrido com fonte chaveada

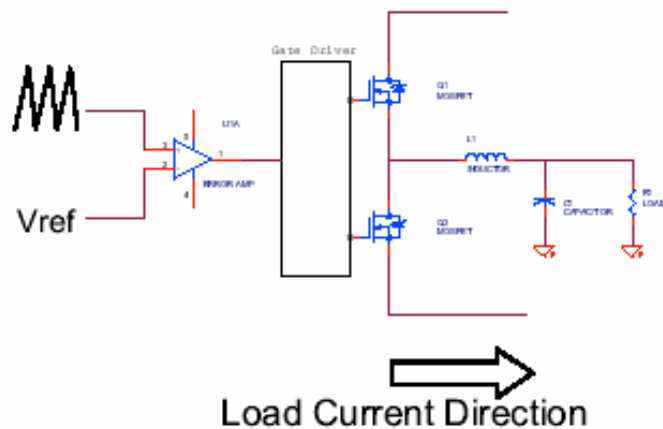
$$\eta_p = 0,82 \text{ e } \eta_f = 0,95 \rightarrow \eta_G = \mathbf{78\%}$$

Amp digital (classe BD) com fonte chaveada

$$\eta_p = 0,92 \text{ e } \eta_f = 0,95 \rightarrow \eta_G = \mathbf{87\%}$$

Analógia - Conversor DC/DC chaveado e Amplificador Classe D

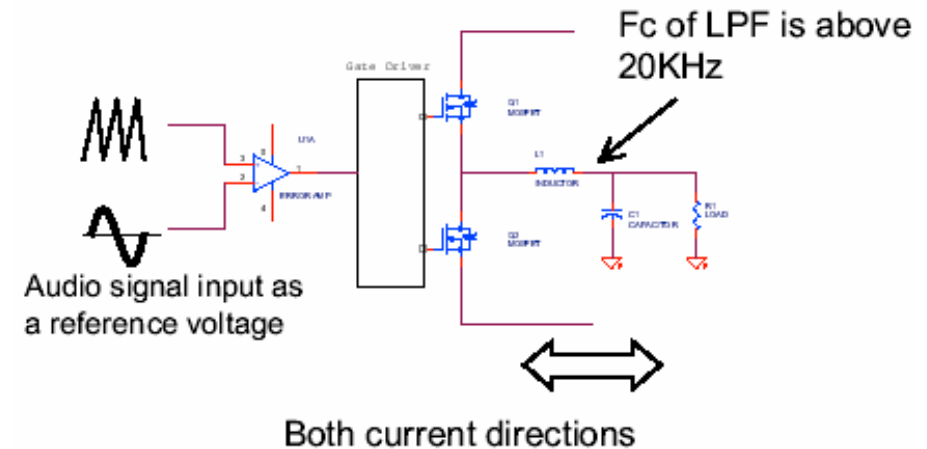
Buck converter



Duty ratio is fixed

- Independent optimization for HS/LS
- Low RDS(ON) for longer duty, low Qg for shorter duty

Class D amplifier

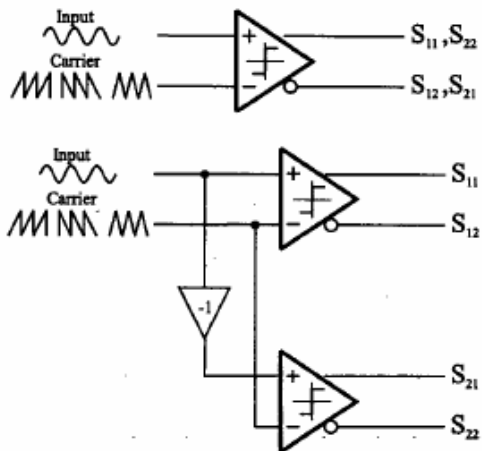
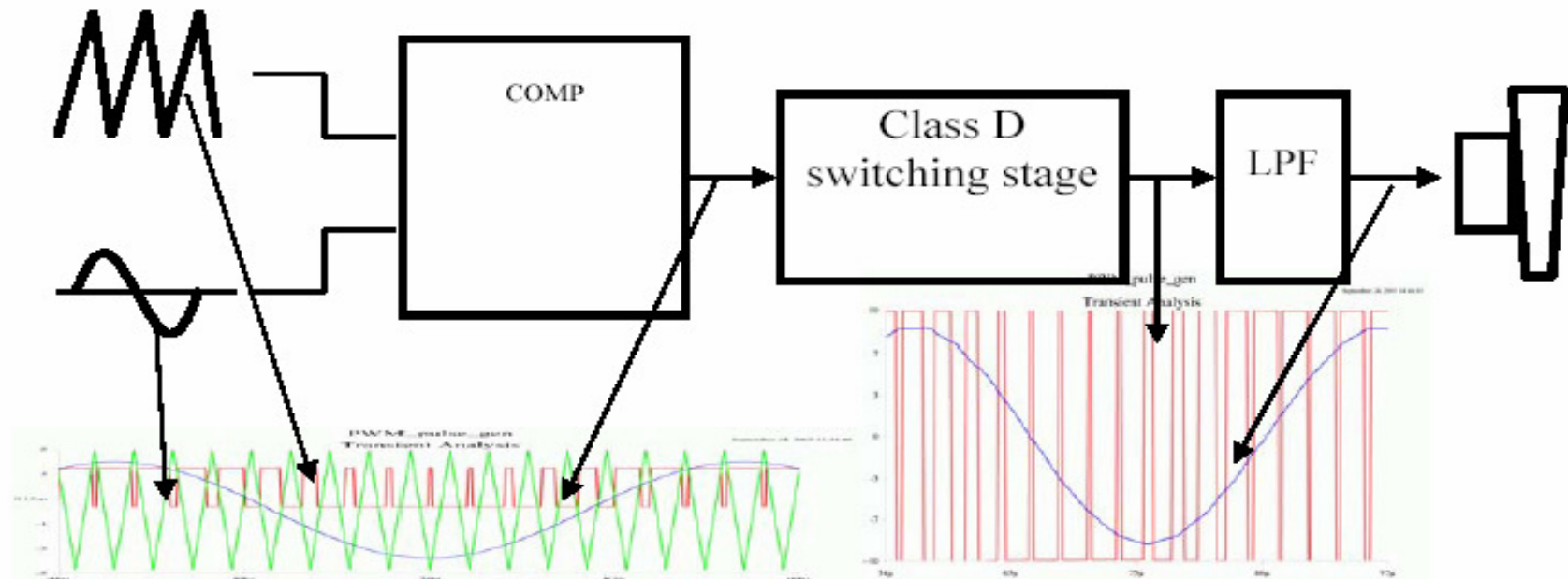


- Influence of dead time is different
- Dead time needs to be very tight

Duty varies but average is 50%

- Same optimization for both MOSFETs
- Same Rds(on) required for both sides

A Técnica de Modulação PWM (*pulse-width modulation*)



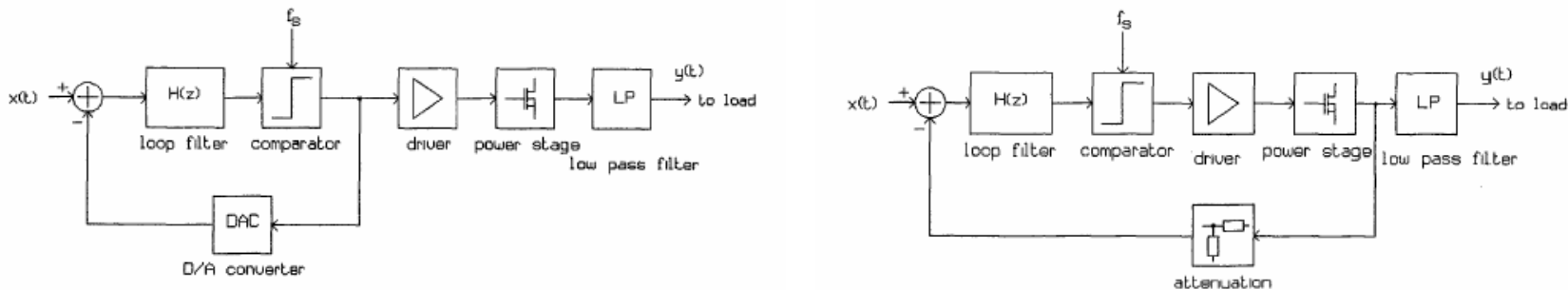
$$x_{AD}(t) = MU \cos(\omega t) + 4U \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0(Mm\pi/2)}{m\pi} \sin\left(m \frac{\pi}{2}\right) \cos(m\omega_c t)$$

$$+ 4U \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=\pm 1}^{\pm\infty} \frac{J_n(Mm\pi/2)}{m\pi} \sin\left[(m+n) \frac{\pi}{2}\right] \cos(m\omega_c t + n\omega t)$$

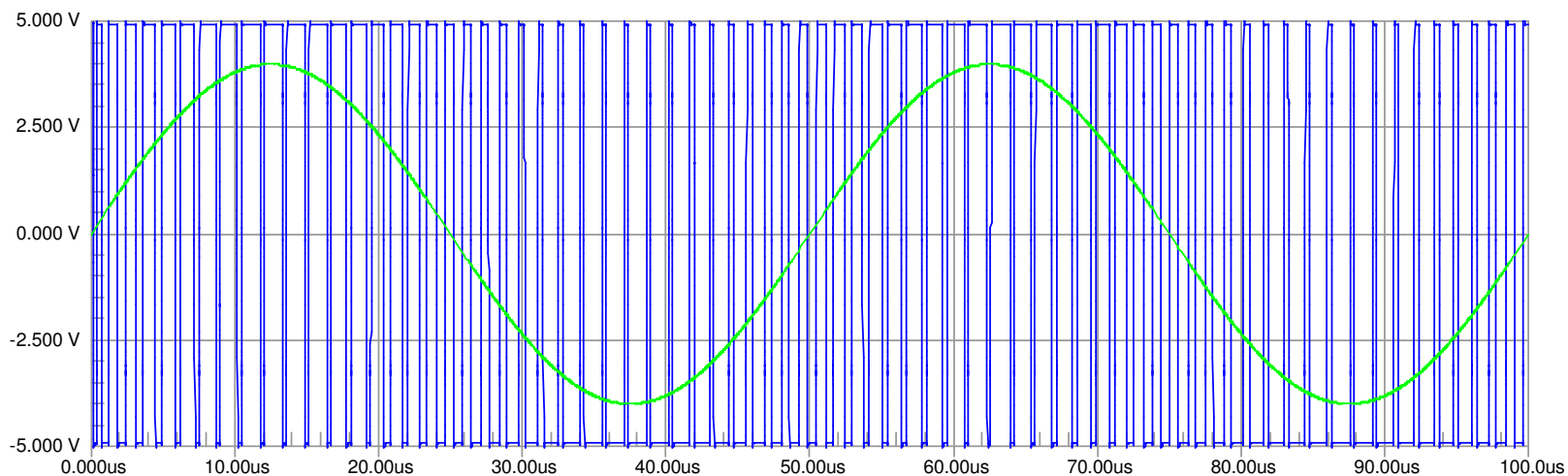
$$x_{BD}(t) = MU \cos(\omega t) - 4U \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=\pm 1}^{\pm\infty} \frac{J_n(mM\pi/2)}{m\pi} \sin\left[(m+n) \frac{\pi}{2}\right] \sin\left(n \frac{\pi}{2}\right) \sin\left[(m\omega_c + n\omega)t - n \frac{\pi}{2}\right]$$

A Técnica de Modulação PDM (*pulse-density modulation*)

O esquema 1-bit sigma-delta (SDM) como uma forma de PDM

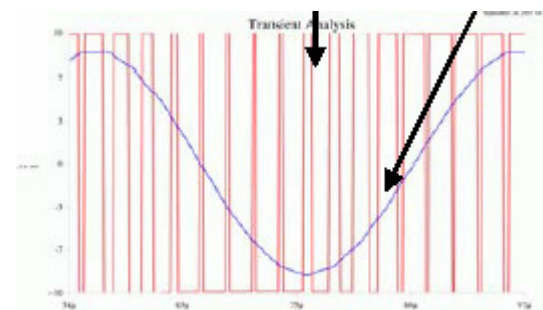


A: r16_2
B: v2_1



✓ O esquema sigma-delta já representa uma boa melhora em relação ao esquema PWM. Por esse motivo é utilizado na maioria dos conversores A/D atuais.

✓ Principal atrativo → os erros e o ruído de modulação são deslocados para dentro do espectro superior inaudível.





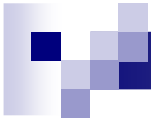
PWM versus PDM

PWM

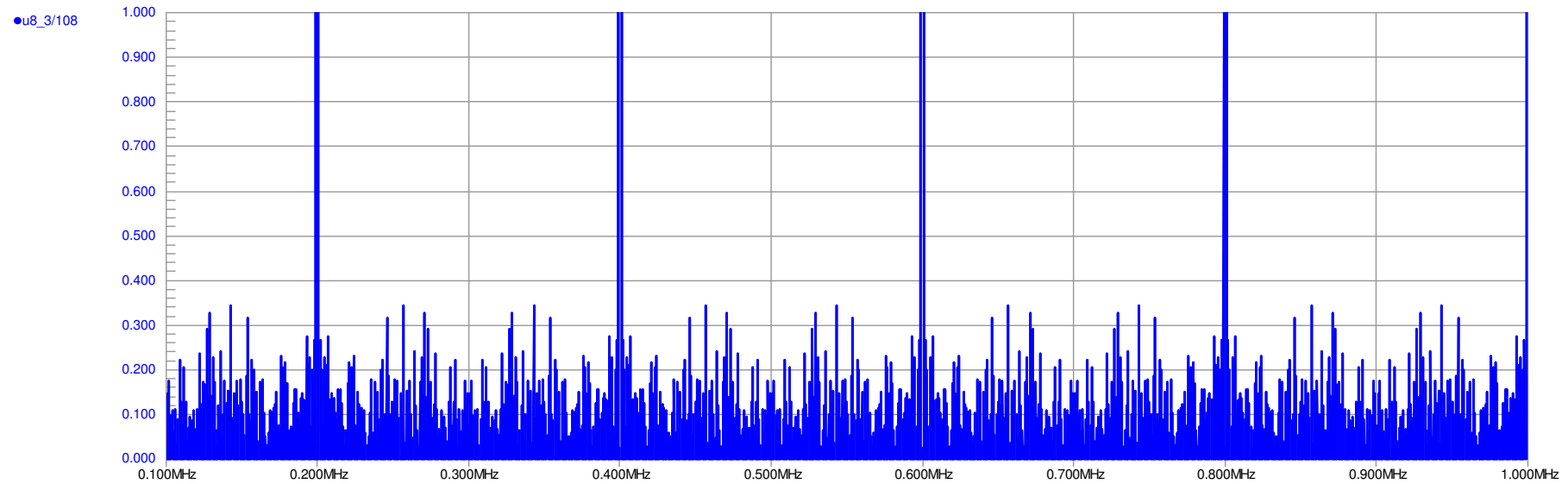
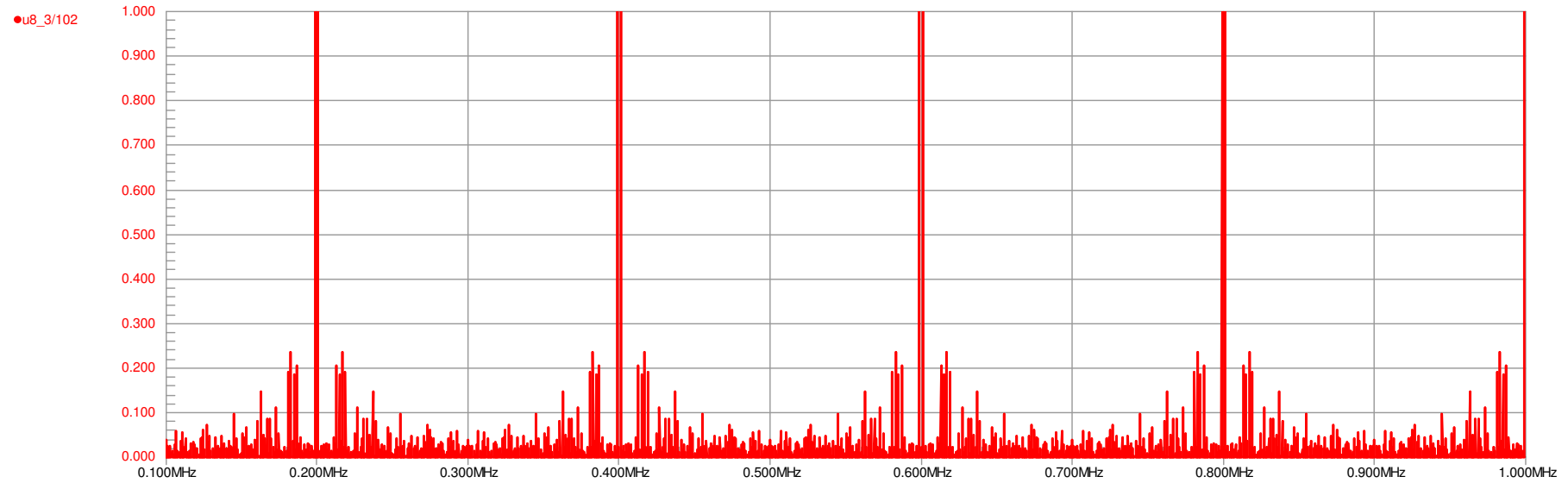
- ✓ O processo inerentemente adiciona distorção dentro do espectro audível;
- ✓ O espectro é constituído essencialmente por tones e sobretones, com alta emissão eletromagnética (EMI);
- ✓ Com $M \gg 1$ o intervalo entre pulsos se torna muito pequeno, podendo se tornar = 0. Essa é uma “região proibida”. Solução: reduzir a potência máxima para um valor abaixo da máxima admissível pela alimentação;
- ✓ Dificuldade de correção. As técnicas de realimentação negativa adicionam distorção e devem ser limitadas. Baixa performance global.

PDM

- ✓ O processo inerentemente desloca os erros de quantização, de propagação e algumas outras imperfeições para a porção superior do espectro (região inaudível);
- ✓ O espectro não é formado apenas por tones e sobretones, mas é distribuído por uma grande região, o que diminui muito a emissão eletromagnética;
- ✓ Não existem problemas para $M = 1$, pois o intervalo mínimo entre amostras é de $1/F_s$;
- ✓ Facilidade de se implementar técnicas de realimentação negativa, a fim de melhorar a performance global.



Espectros



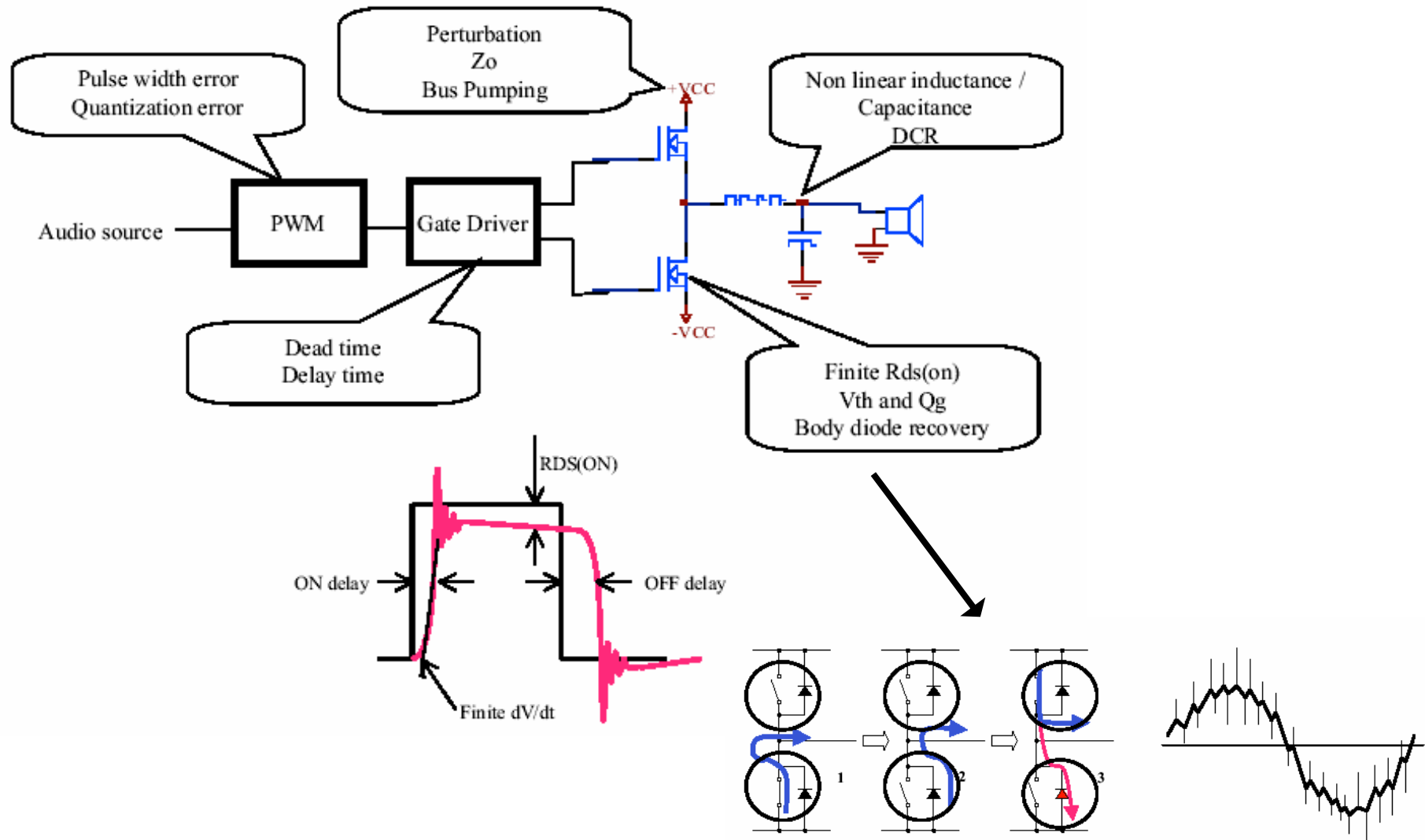


As Principais Imperfeições das Topologias Chaveadas

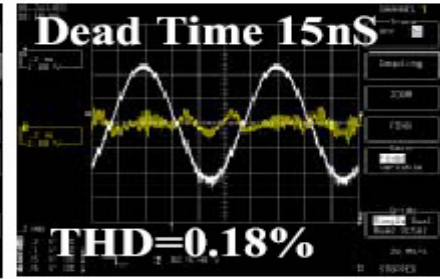
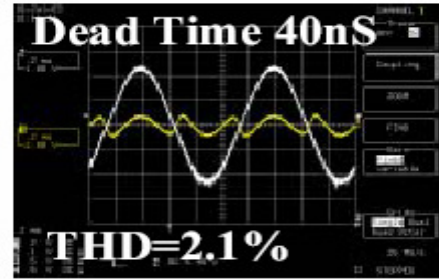
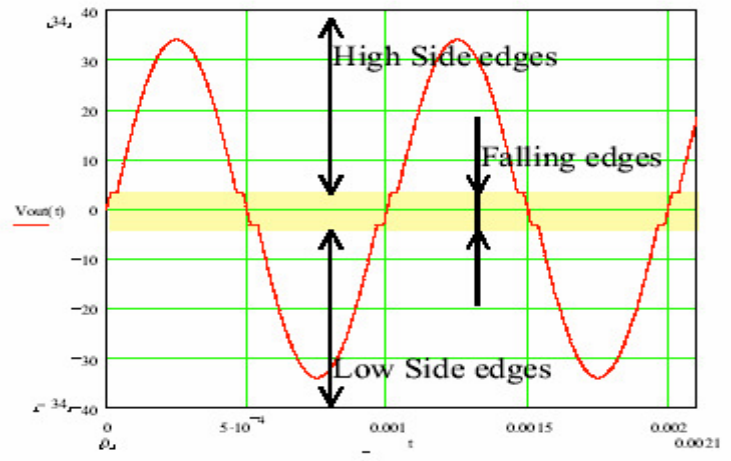
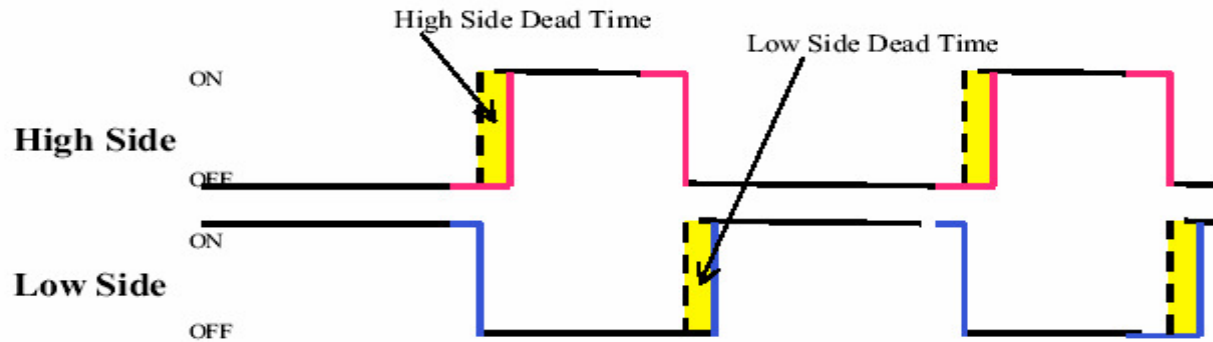
Em geral, os amps digitais sofrem dos seguintes problemas:

- ✓ Distorção harmônica alta (THD > 1%);
 - ✓ Ruído de fundo alto (SNR < 80B);
 - ✓ Baixo Damping (50 ou menos);
- ✓ Resposta de frequências irregular;
- ✓ Grande rotação de fase, latência;
 - ✓ Baixo slew rate;
- ✓ Emissão excessiva de rádio-frequência (alta EMI);

As Principais Causas de Imperfeições nas Topologias Chaveadas



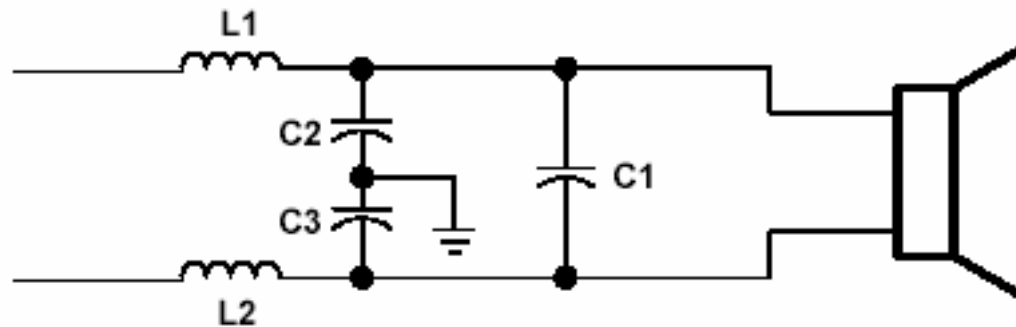
THD e Shoot-Through *versus* Dead-Time



Note: THD (Total Harmonic Distortion) is a means to measure linearity with sinusoidal signal.

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots}}{V_{fundamental}}$$

Efeitos do Filtro de Reconstrução Sobre a Eficiência



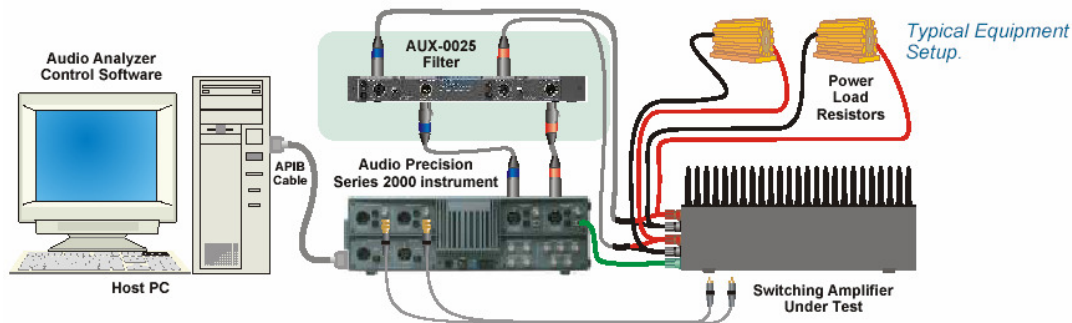
$$i_{L(pk-pk)} = \frac{T_{SW} \times V_{DD}}{2 \times L} = \frac{V_{DD}}{2 \times L \times f_{SW}}$$

$$P_{Filter} = \frac{i_{L(pk-pk)}^2 \times R}{6}$$

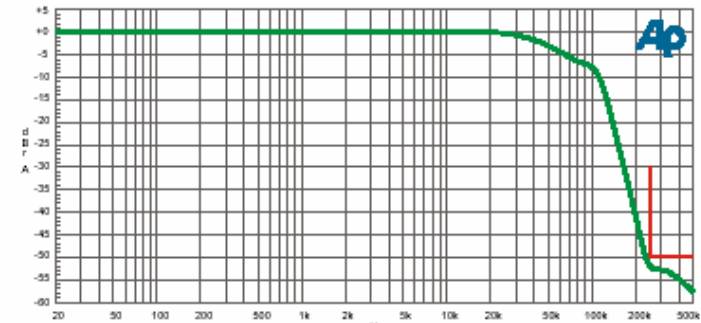
$$P_{Filter} = \frac{(V_{DD})^2}{24 \times L^2 \times f_{SW}^2} \times \left(DCR_{filter L} + ESR_{filter C} + (2 \times R_{DS(on)}) + ESR_{supply C} \right)$$

Dificuldades Adicionais nas Medidas de Performance

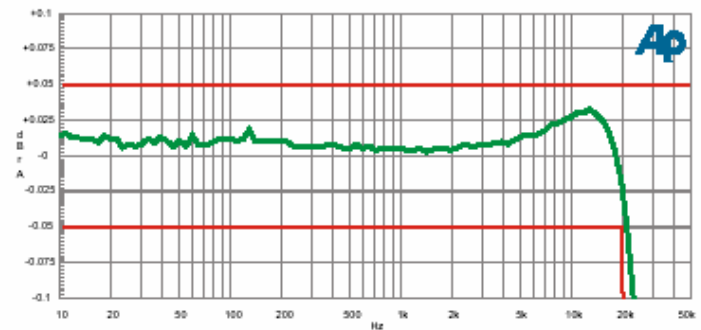
- ✓ Nos amplificadores lineares os analisadores de áudio podem ser conectados diretamente.
- ✓ Nos amplificadores digitais é necessário inserir um filtro externo especial, como o Audio Precision AUX-0025, a fim de remover as componentes de variação rápida. Adicionalmente, deve ser utilizado outro filtro (desta vez interno) de acordo com o protocolo AES17.



Filter Response Characteristics



Response showing attenuation beyond the audio band.



Pass-band response showing flatness out to 20 kHz.



O método FCC de Correção para Topologias Chaveadas Classes AD/BD no Esquema PDM 1-bit Sigma-Delta

Apresentado no 4º Congresso / 10ª Convenção Nacional da AES Brasil em Maio de 2006

É o cálculo variacional aplicado na otimização dos parâmetros do conformador de ondas (loop filter) a fim de melhorar a performance de todas as figuras de mérito do amplificador digital sigma-delta classe AD ou BD.

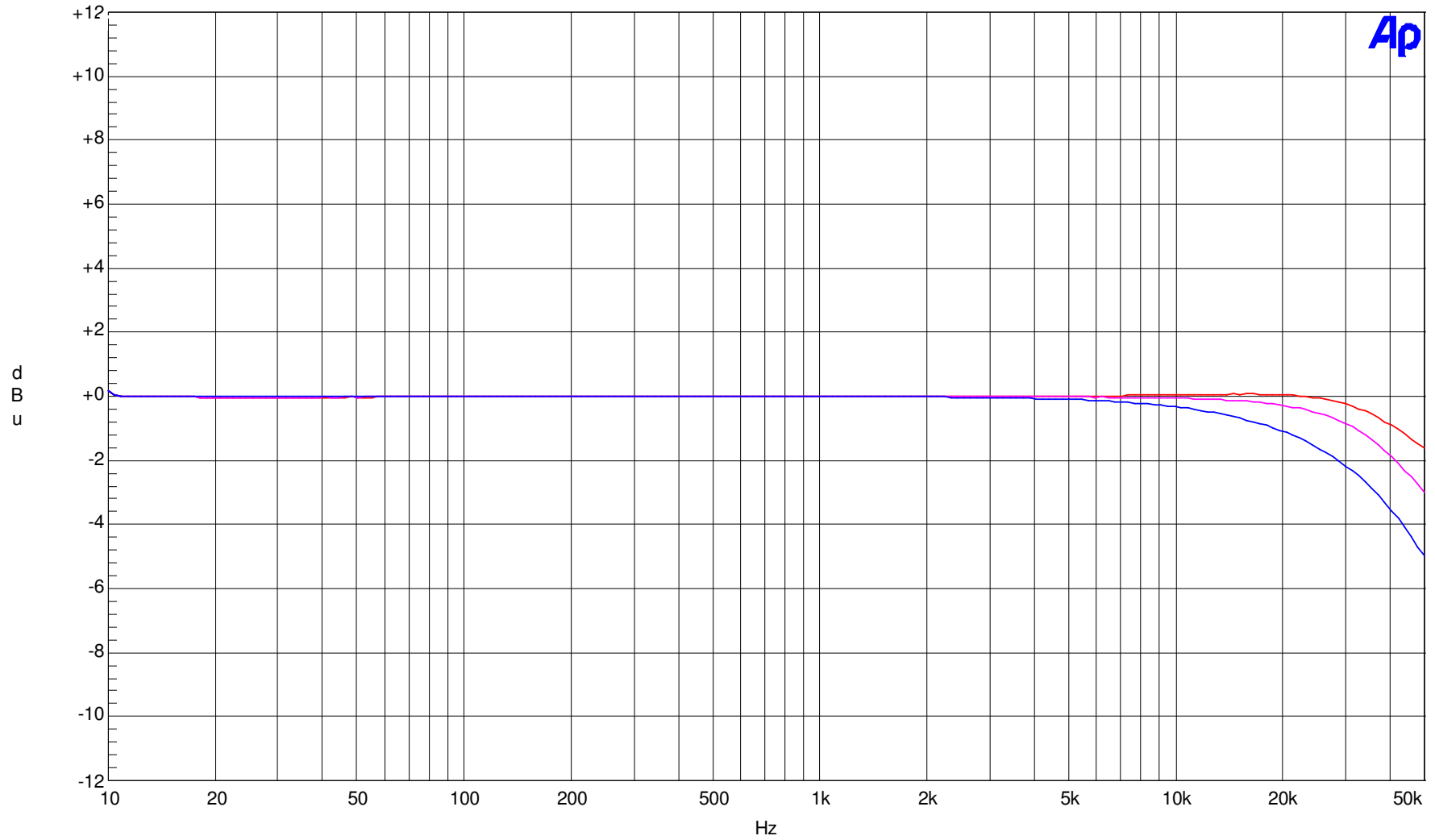
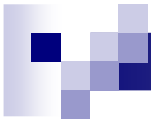
Amplificador classe BD em esquema PWM com $F_s = 192\text{KHz}$:

Potência max. de ~ 2.000Wavg;
Damping factor ~ 28 @ 8 ohms;
THD+N (média potência): 0,9%;
Slew-rate de 5V/us;
SNR = 82dB;
Resp. Freq. deficiente em altas freq., muito atraso (-90deg @ 30kHz);
Eficiência do estágio de potência ~ 95%.

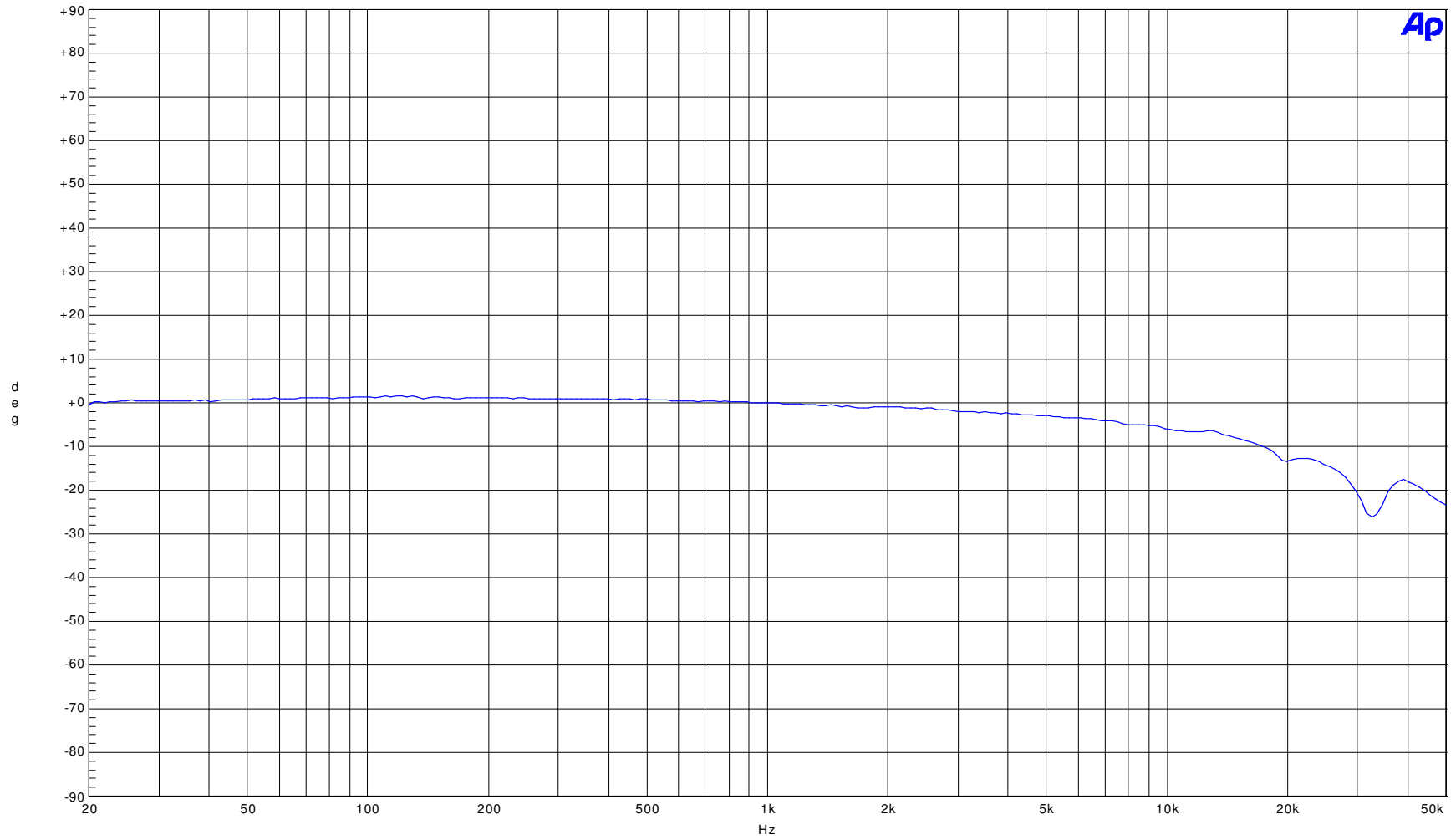
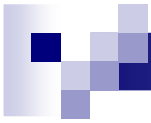
Amplificador classe BD em esquema SDM com conformador de ondas FCC ($i=3$):

Potência max. de ~ 2.000Wavg;
Damping factor ~ 400 @ 8 ohms;
THD+N (média potência): 0,009%;
Slew-rate de 25V/us;
SNR = 109,8dB;
Resp. Frequências plana, pouco atraso, dependente apenas do filtro de rec.);
Eficiência do estágio de potência ~ 92%.

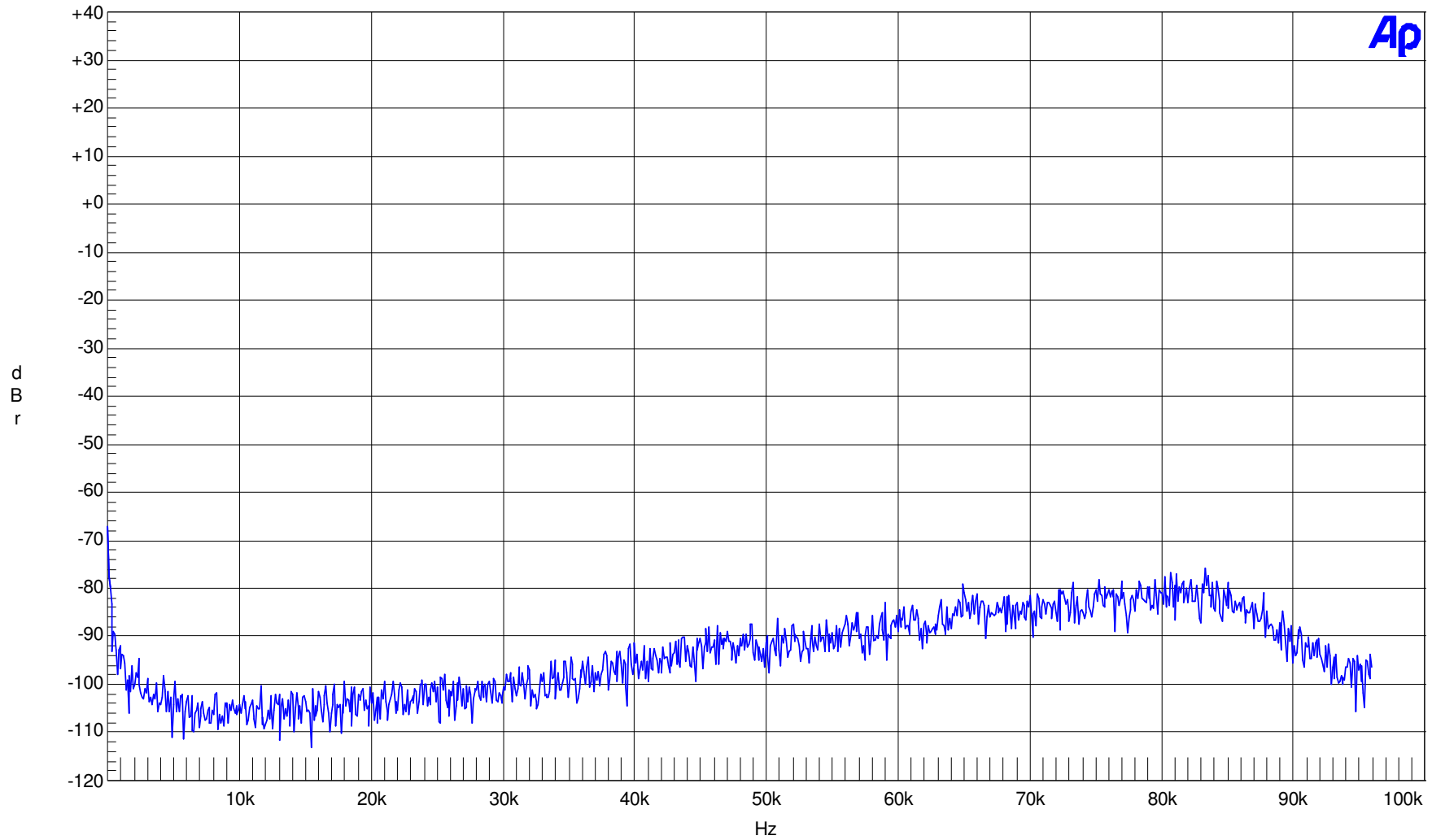
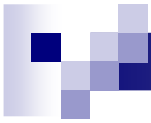
A seguir alguns resultados para o esquema SDM com 2000Wavg de saída



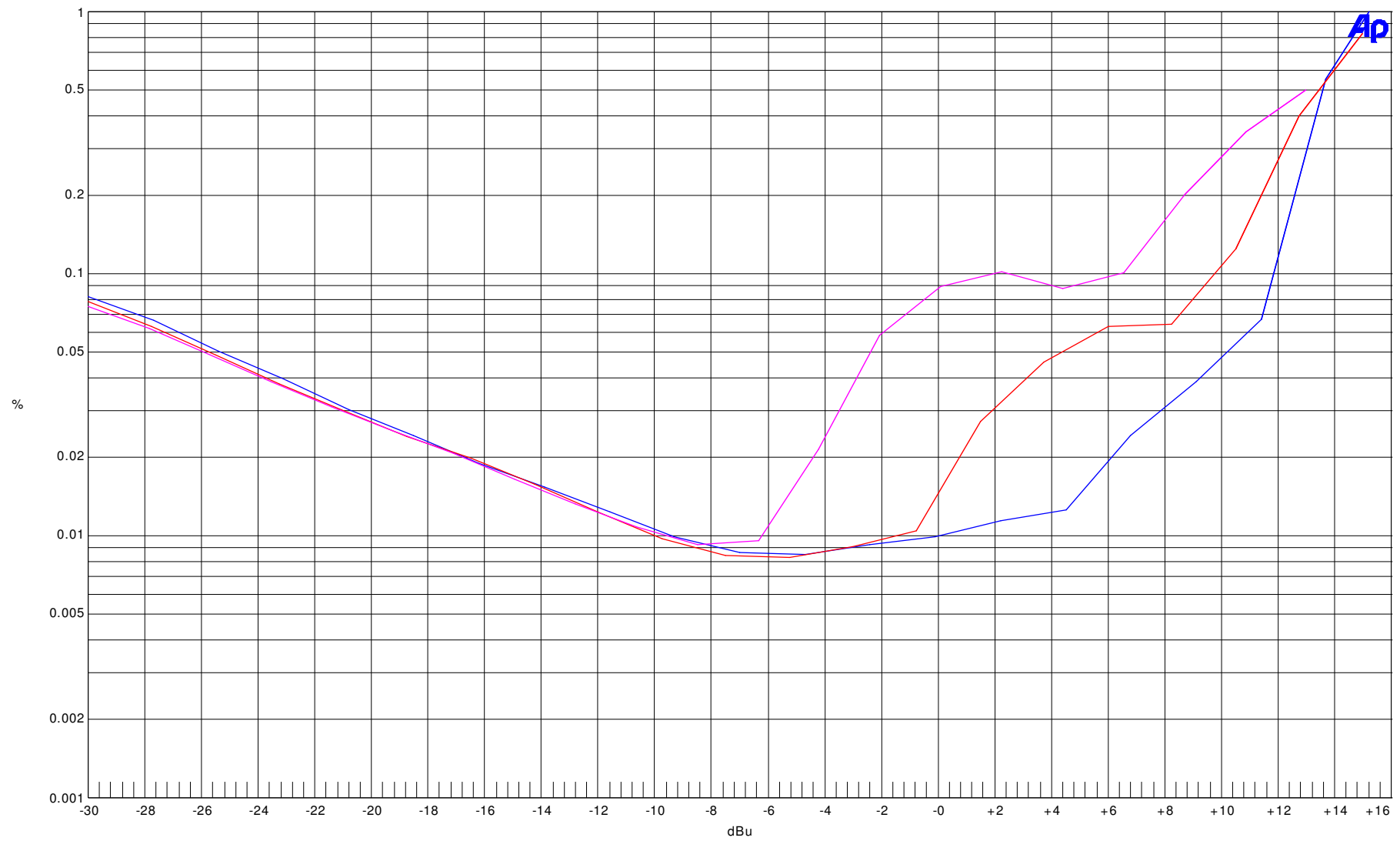
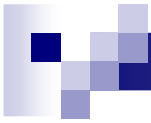
Resposta de frequências @ 8Ω, 4Ω e 2Ω



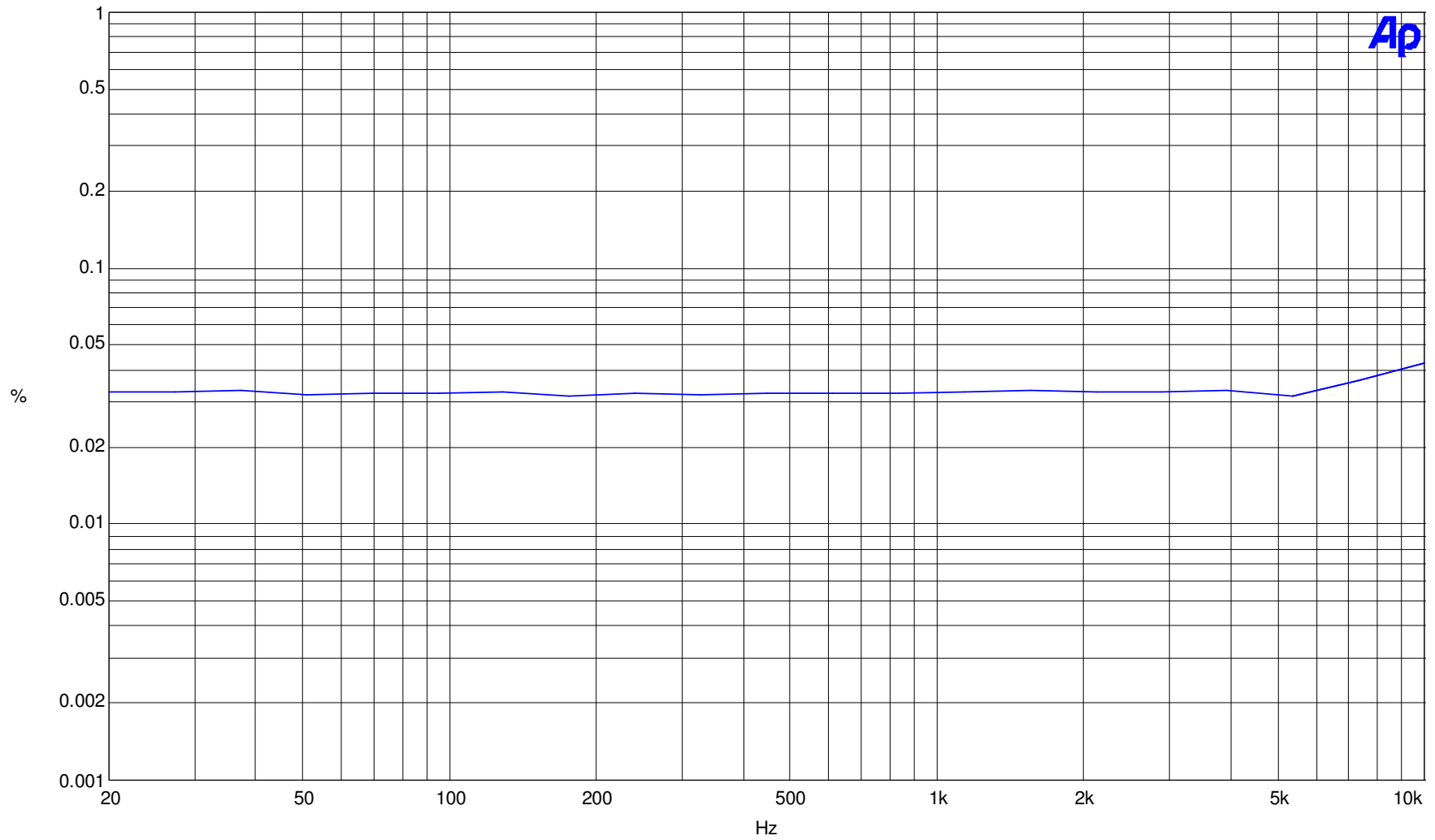
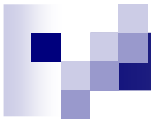
Resposta de fase @ 8Ω - Latência de 4us



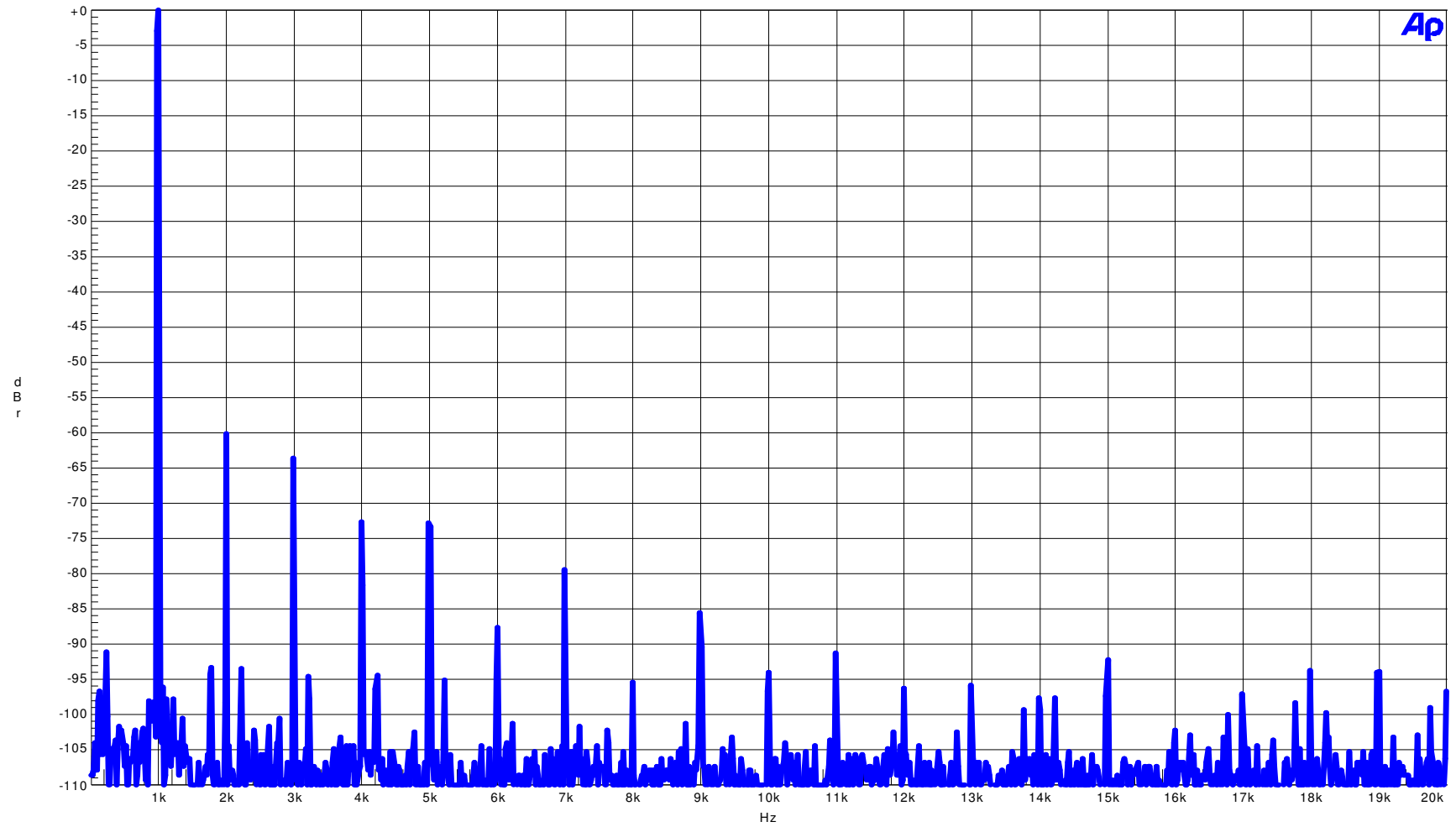
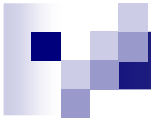
Ruído residual de fundo. SNR = 109,8dB, sem filtros de ponderação. dBr = dBu.



THD+N *versus* amplitude @ 8Ω, 4Ω e 2Ω (1kHz)



THD+N *versus* frequência a -8dB da max. potência @ 2Ω



Análise espectral da distorção harmônica @ -1dB da max. potência



Bibliografia

- i. Attwood, Brian E.; “Very High Fidelity Quartz Controlled PWM (class D) Stereo Amplifiers for Consumer and Professional Use”, An Audio Engineering Society PrePrint, 1978;
- ii. International Rectifier, Application Note AN-978, “HV Floating MOS-Gate Driver ICs.”;
- iii. Attwood, Brian E.; “Design Parameters Important for the Optimization of Very-Fidelity PWM Audio Amplifiers”, An Audio Engineering Society PrePrint, 1982;
- iv. Vanderkooy, J.; “New Concepts in Pulse-Width Modulation”, An Audio Engineering Society PrePrint, 1994;
- v. Klugbauer-Heilmeier, Josef; “A Sigma Delta Modulated Switching Power Amp”, An Audio Engineering Society Preprint, preprint 3227,1992;
- vi. Barros, M.H.M., “O Método FCC de Correção para Amplificadores Chaveados Operando no Esquema Sigma Delta - Resultados Fundamentais”, Audio Engineering Society Brazil Section, 2006;
- vii. Hofer, B., “Measuring Switch-Mode Power Amplifiers”, Write paper, Audio Precision, Inc., 2003.

Agradecimentos



Universidade Federal de São Carlos



Programa de Pós-Graduação
em Física



Brazil Section