

*FATOR DE POTÊNCIA, PFC
E SUA IMPORTÂNCIA
NOS SISTEMAS DE SONORIZAÇÃO*

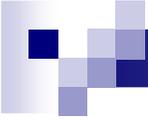
Marcelo Barros, M.Sci

Next Pro, Valinhos, São Paulo



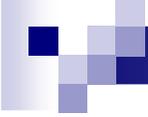
Sociedade de Engenharia de Áudio
Palestra em Congresso

São Paulo – 14/05/2014



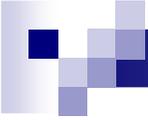
Os objetivos da palestra → ser capaz de responder:

- i. O que é **Fator de Potência** e por que ele é importante?
- ii. Se não levarmos em consideração o **Fator de Potência** nas grandes instalações elétricas, problemas poderão surgir?
 - iii. O que é **PFC** ? Para que serve? Onde se aplica?
- iv. O **PFC** traz benefícios **REAIS** para o trabalho em sonorização?



O básico - definir e usar corretamente as grandezas:

- i. Energia e Trabalho [kWh];
- ii. Diferença de Potencial ou "voltagem" [V];
 - iii. Eficiência;
- iv. Potência [W] , [VA] ou [VAR];



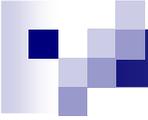
Por que temos três Potências possíveis?

Se a corrente for alternada (AC), a potência poderá assumir valores positivos ou negativos;

Interpretação física:

Potência positiva: energia fluindo na direção fonte → máquina

Potência negativa: energia fluindo na direção máquina → fonte



O triângulo das Potências

Potência Ativa (P): a que gera Trabalho, o "lucro"
→ Watt (W);

Potência Reativa (Q): o "prejuízo"
→ Volt-Ampère-reactivo (VAR);

Potência (total) Aparente (N): a que circula pela interface gerador-máquina, o "investimento" → Volt-Ampère (VA);

$$N = P + Q$$

(investimento = lucro + prejuízo)

Definição de Fator de Potência

$$FP = \frac{\textit{potência_ativa}}{\textit{potência_aparente}} = \frac{P}{N} \rightarrow \frac{\textit{"lucro"}}{\textit{"investimento"}}$$

~~$$FP = \cos \varphi$$~~

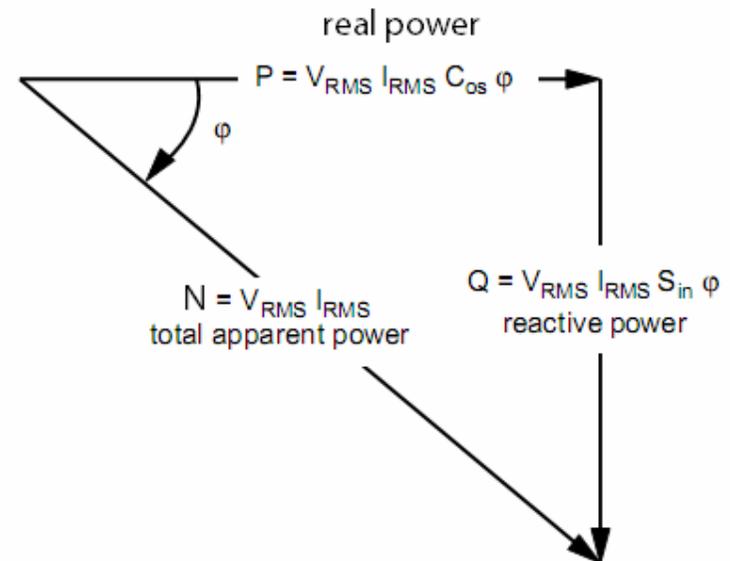
Incompleta!

Não serve!

Essa aproximação, universalmente conhecida, é válida somente se a tensão e a corrente forem ambas senoidais, o que não é verdade para equipamentos que possuem retificadores, como as fontes de alimentação AC/DC de qualquer tipo.

$$FP = \frac{\text{potência_ativa}}{\text{potência_aparente}} = \frac{P}{N}$$

$$FP = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T V(t)I(t)dt}{V_{rms} I_{rms}}$$



Se a tensão for senoidal e a corrente exibir uma forma qualquer, porém periódica, podemos expandir a corrente em uma série de Fourier.

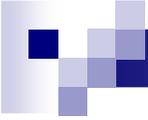
$$FP \approx \frac{\cancel{V_{rms}} I_{1_rms} \cos \varphi}{\cancel{V_{rms}} \sqrt{(I_{1_rms} \cos \varphi)^2 + (I_{1_rms} \sin \varphi)^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{n_rms}^2}} = \frac{I_{1_rms}}{I_{rms}} \cos \varphi$$

Fator de distorção Fator de deslocamento (fase)

$$FP = \frac{I_{rms1}}{I_{rms}} \cos \varphi$$

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \cos \varphi$$

Dessa forma, aparece um termo relacionando o valor RMS da fundamental da corrente com a corrente RMS total, que nada mais é que a distorção harmônica da corrente.



Exemplo prático n. 1

Um amplificador de áudio consome 1kVA (1000VA) de potência aparente N , e possui $FP = 0,6$. Qual parcela dessa potência de fato estará disponível para ele trabalhar? Em outras palavras: **qual é a sua Potência Ativa?**

$$FP = \frac{P}{N}$$

$$P = FP \times N$$

$$P = 0,6 \times 1000 = 600W$$

Ou seja, de 1000VA retirados da rede AC, o equipamento consegue utilizar somente 600W, ou **60%** !



Para onde foram os outros 40% ?

Para lugar nenhum! Esta é a Potência Reativa!

(fica somente circulando entre fonte-máquina, podendo gerar aquecimento e desgaste nos cabos e conectores)

Neste exemplo:

$N = 1000 \text{ VA}$: o "investimento"

$P = 600 \text{ W}$: o "lucro"

$Q = 400 \text{ VAR}$: o "prejuízo"



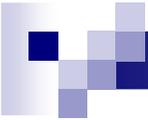
Exemplo prático n. 2

Em um trabalho emprega-se um amplificador de áudio possuindo um fator de potência $FP = 0,98$. Mede-se que tal amplificador, enquanto trabalha, consome a potência aparente $N = 1kVA$ para a atividade em questão. Se tal amplificador fosse trocado por outro, de mesma potência, mas com $FP = 0,6$; qual seria o seu consumo em potência aparente (N), para executar o mesmo serviço?

Necessário antes calcular a potência ativa (P) desenvolvida pelo primeiro amplificador:

$$FP = \frac{P}{N}$$

$$P = FP \times N = 0,98 \times 1000 = 980W$$

Se (a fonte) do segundo amp faz o mesmo Trabalho, então a Potência ativa deste é igual à Potência ativa do primeiro:

$$FP = \frac{P}{N}$$
$$N = \frac{P}{FP} = \frac{980}{0,6} = 1630VA = 1,63kVA$$

Resultado: para a mesma missão:

Amp c/ $FP=0,98$ exige 1kVA

Amp c/ $FP=0,6$ exige 1,63kVA → 63% a mais!

E as correntes nos cabos e conectores?

Fator de distorção Fator de deslocamento

$$FP = \frac{I_{rms1}}{I_{rms}} \cos \varphi$$

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \cos \varphi$$



3 amplificadores-exemplo

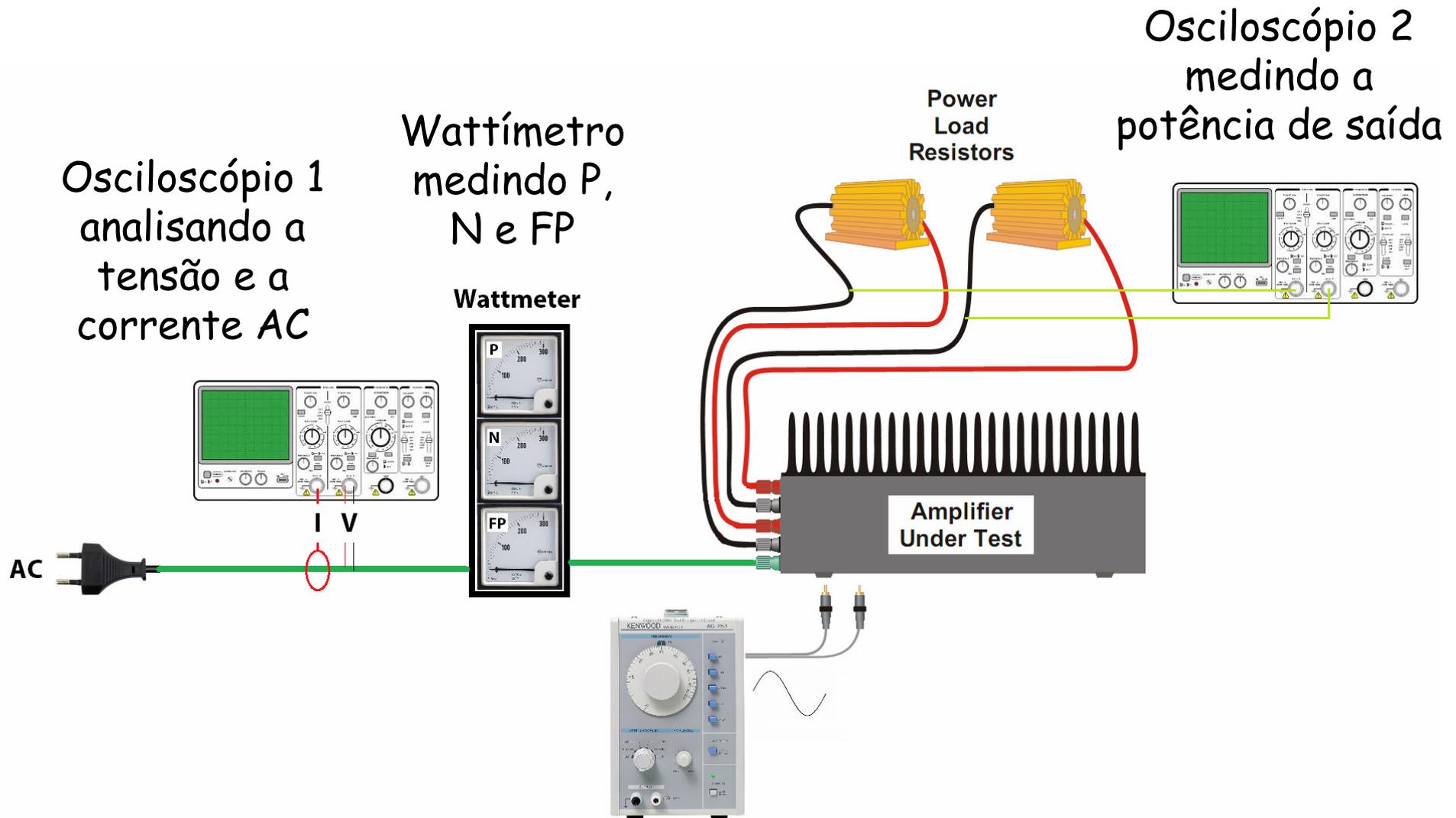
(representando 3 gerações de amplificadores - os mais encontrados em campo)

G-1 (1ª geração): amp classe AB, com fonte tradicional (transformador/retificador/filtros), bi-volt;

G-2 (2ª geração): amp classe D, com fonte chaveada, sem correção do FP (s/ PFC), bi-volt;

G-3 (3ª geração): amp classe D, com fonte chaveada ressonante e com correção do FP (PFC), universal;

O Setup de medições



Osciloscópio 1
analizando a
tensão e a
corrente AC

Wattímetro
medindo P,
N e FP

Wattmeter

Power
Load
Resistors

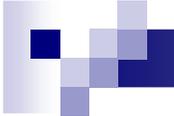
Osciloscópio 2
medindo a
potência de saída

Amplifier
Under Test

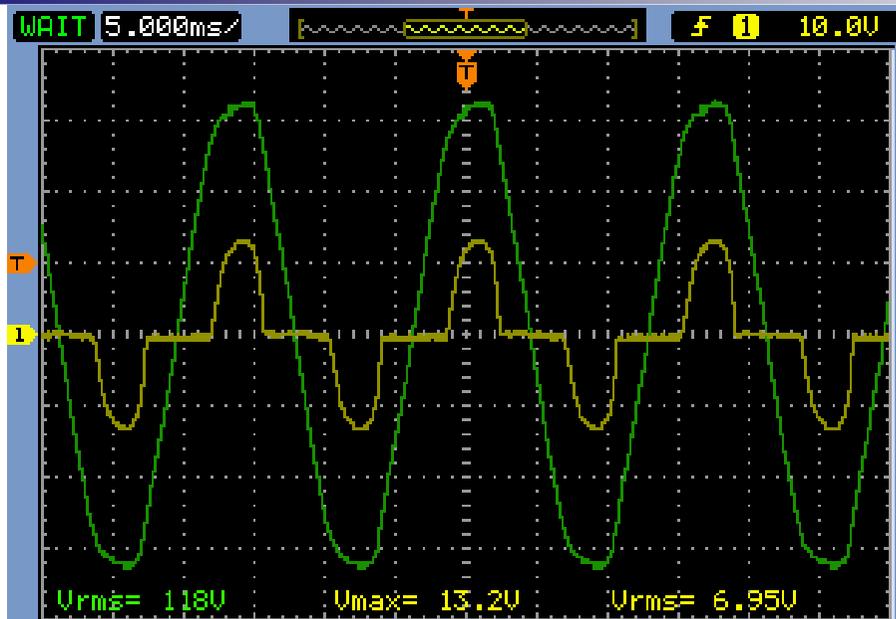
Gerador de áudio @ 1khz senoidal contínuo



Tomando cada um dos amplificadores em separado e aumentando o volume do gerador de áudio até que o Wattímetro indique um consumo de exatamente 1000W (1kW), pode-se retirar os seguintes dados (as telas são do osciloscópio 1, mostrando a tensão e a corrente AC):



G-1



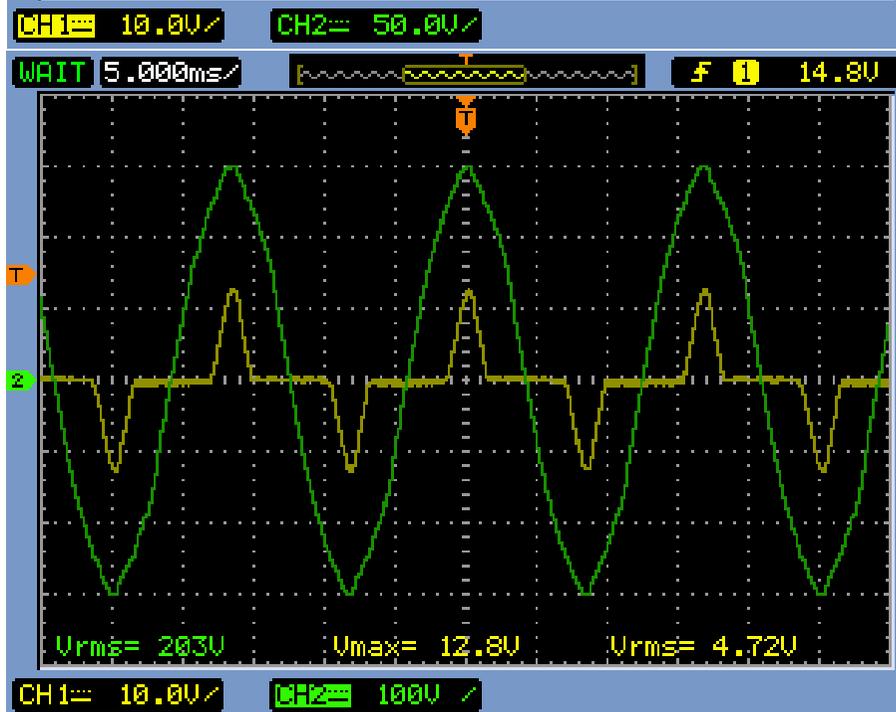
$$P = 1,00\text{kW} @ 118V_{\text{RMS}}$$

$$FP = 0,905$$

$$N = 1,10\text{kVA}$$

$$I_{\text{RMS}} = 6,95\text{A}$$

$$I_{\text{PEAK}} = 13,2\text{A}$$



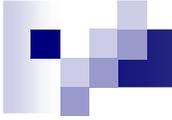
$$P = 1,00\text{kW} @ 203V_{\text{RMS}}$$

$$FP = 0,804$$

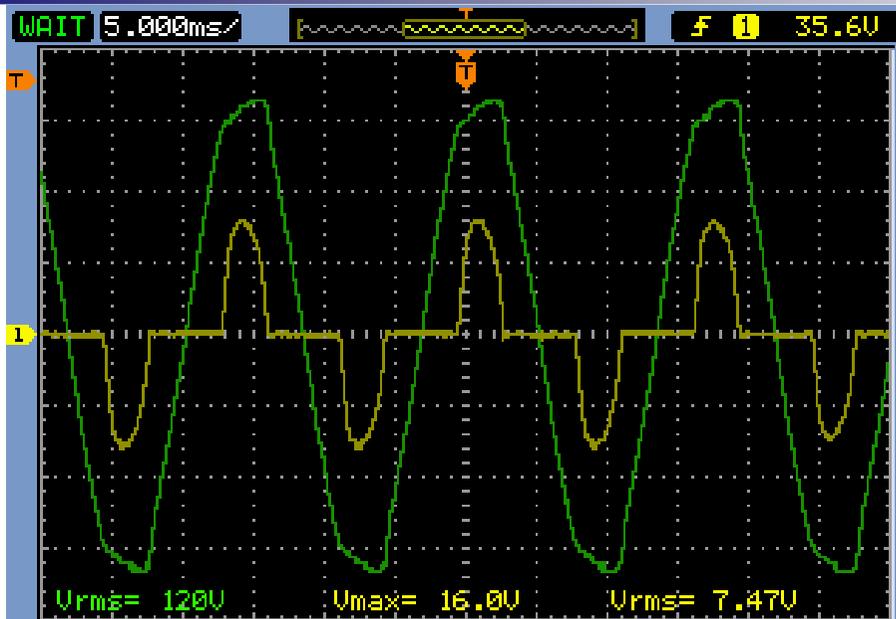
$$N = 1,25\text{kVA}$$

$$I_{\text{RMS}} = 4,72\text{A}$$

$$I_{\text{PEAK}} = 12,8\text{A}$$



G-2



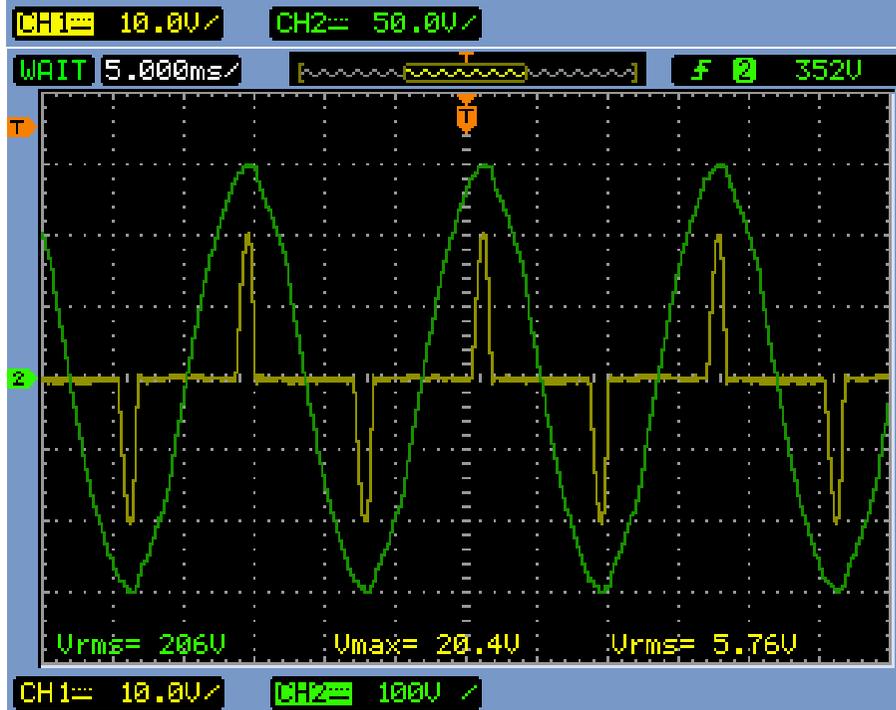
$$P = 1,00\text{kW} @ 120V_{\text{RMS}}$$

$$FP = 0,837$$

$$N = 1,22\text{kVA}$$

$$I_{\text{RMS}} = 7,47\text{A}$$

$$I_{\text{PEAK}} = 16\text{A}$$



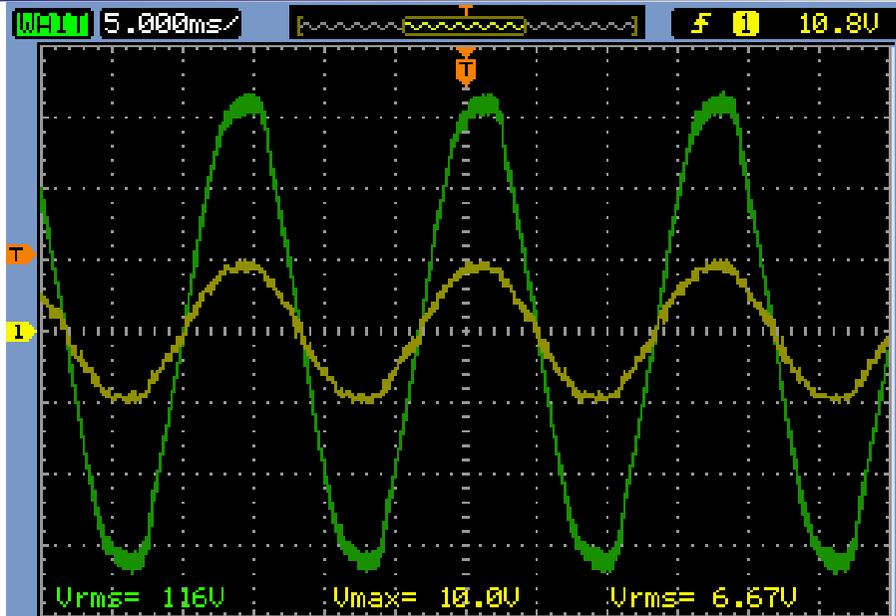
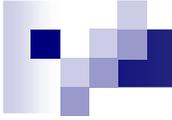
$$P = 1,00\text{kW} @ 206V_{\text{RMS}}$$

$$FP = 0,631$$

$$N = 1,59\text{kVA}$$

$$I_{\text{RMS}} = 5,76\text{A}$$

$$I_{\text{PEAK}} = 20,4\text{A}$$



$$P = 1,00\text{kW} @ 116V_{\text{RMS}}$$

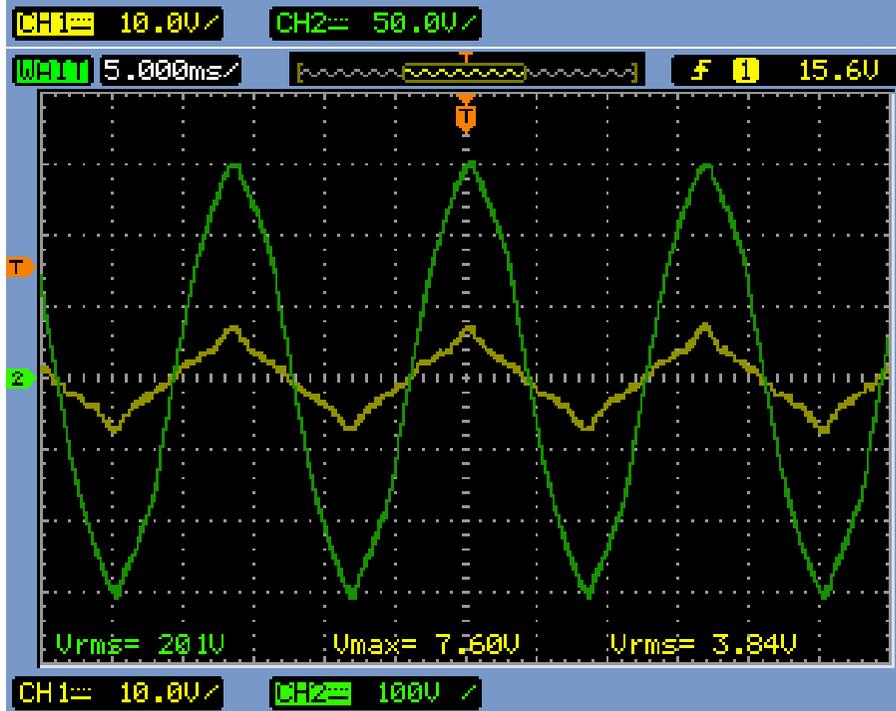
$$\text{FP} = 0,998$$

$$N = 1,00\text{kVA}$$

$$I_{\text{RMS}} = 6,67\text{A}$$

$$I_{\text{PEAK}} = 10\text{A}$$

G-3



$$P = 1,00\text{kW} @ 201V_{\text{RMS}}$$

$$\text{FP} = 0,986$$

$$N = 1,01\text{kVA}$$

$$I_{\text{RMS}} = 3,84\text{A}$$

$$I_{\text{PEAK}} = 7,60\text{A}$$

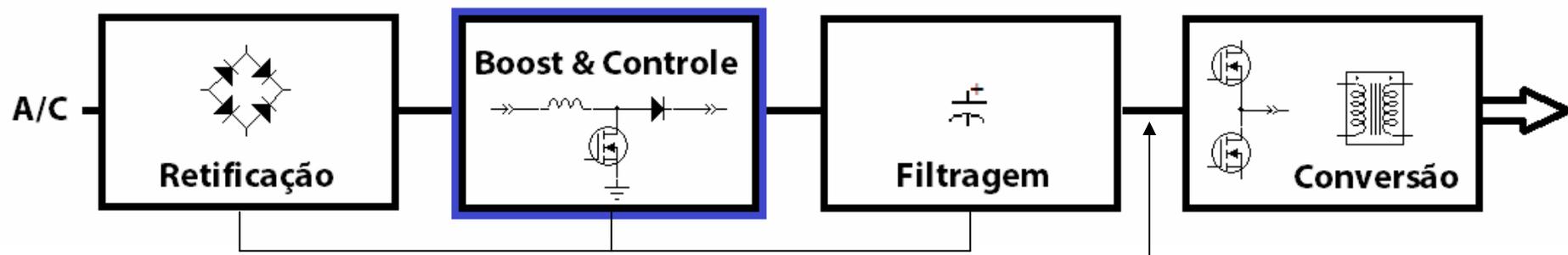
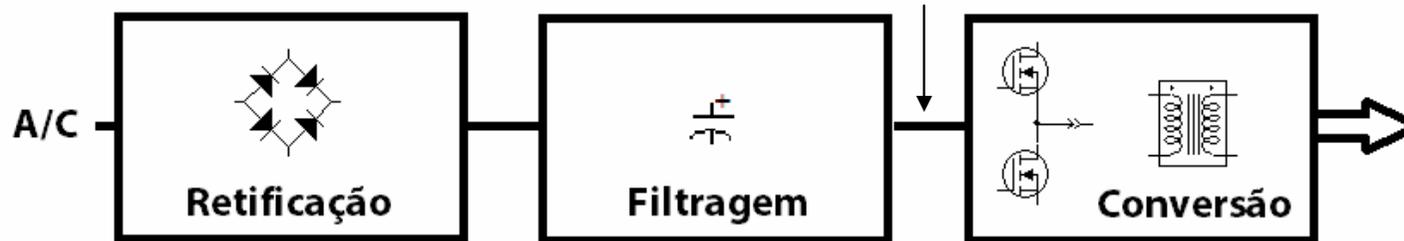
Todos com $P = 1,00\text{kW}$ @ 220V	G-1	G-2	G-3
FP	0,804	0,631	0,986
N	1,25kVA	1,59kVA	1,01kVA
I_{RMS}	4,72A	5,76A	3,84A
I_{PEAK}	12,8A	20,4A	7,60A

Conclusão: quando o FP diminui, tanto a potência aparente como as correntes aumentam muito!

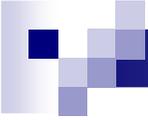
O que é PFC ? (Power Factor Correction)

É um conversor AC-DC de baixa distorção, alimentando um conversor DC-DC chaveado convencional.

Fonte sem PFC: a tensão DC aqui depende da rede AC



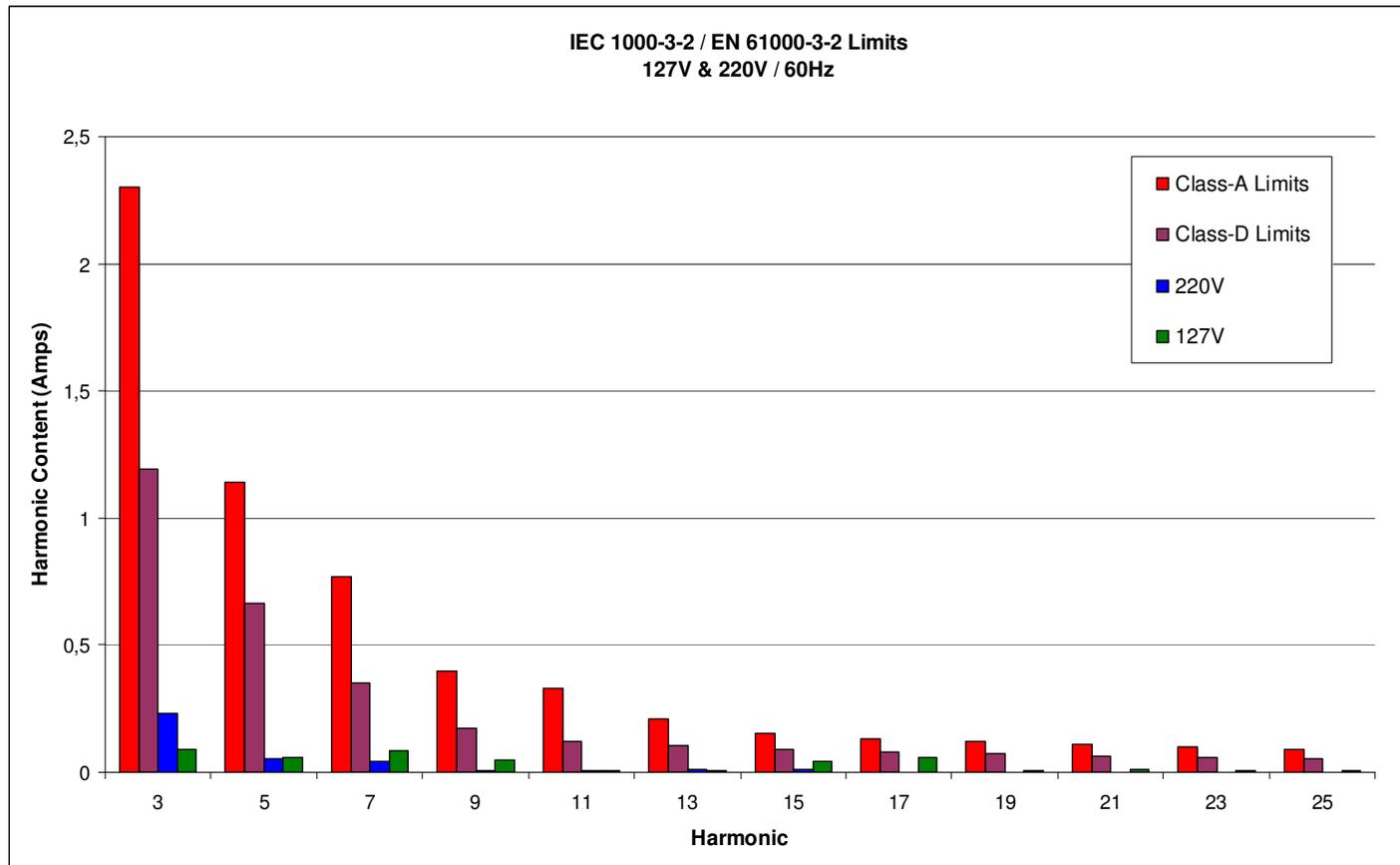
PFC Com PFC: a tensão DC aqui agora é regulada!



Quais as vantagens trazidas pelo PFC?

- i. Aumenta a disponibilidade de potência;
- ii. Melhora a qualidade da energia elétrica da instalação;
 - iii. Reduz o consumo de energia;
- iv. Aumenta a segurança das instalações → redução das correntes;
- v. Capacidade universal → o mesmo desempenho em qualquer lugar do mundo (100-260V | 47-63Hz);

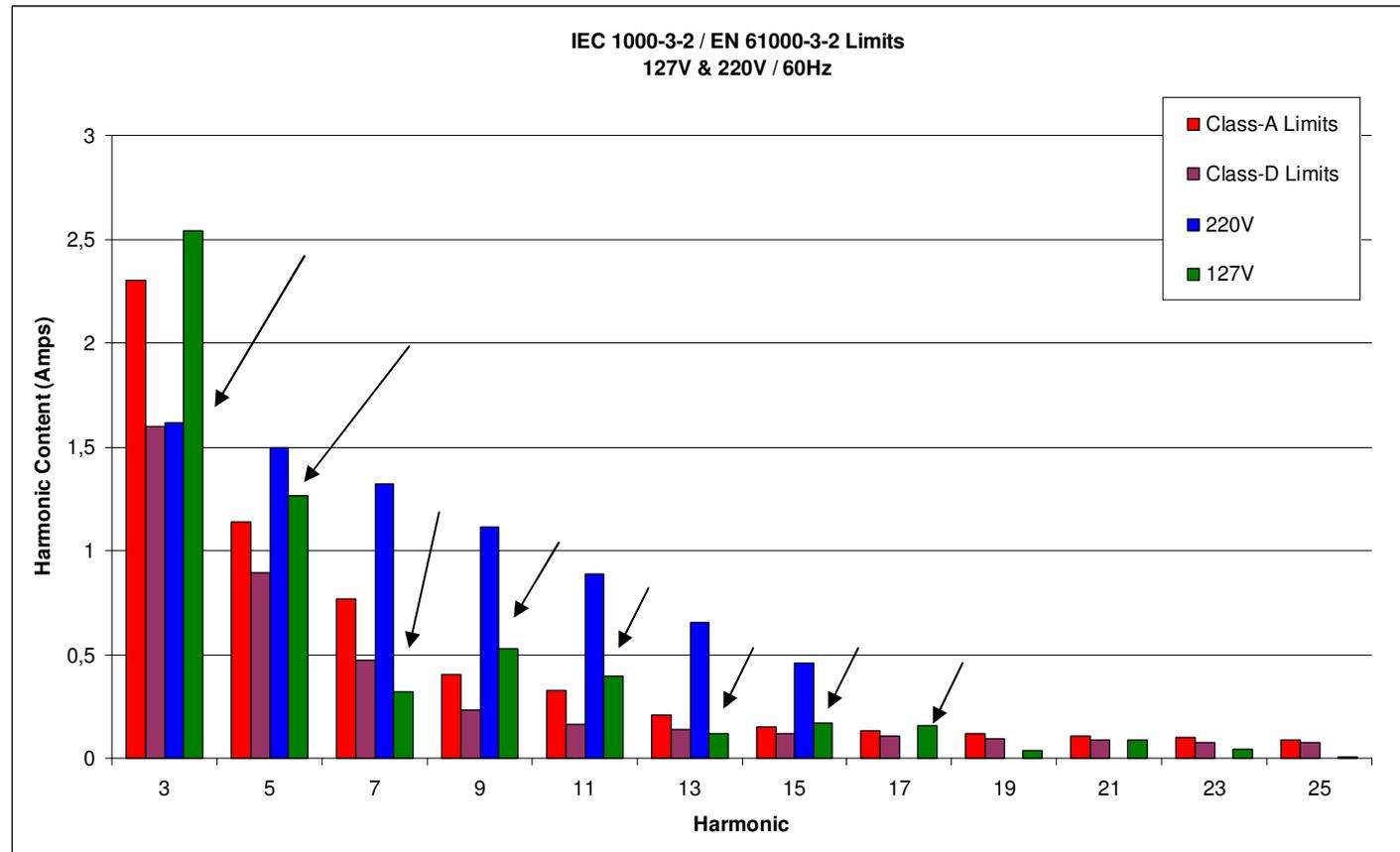
Qualidade da energia - distorção injetada na rede AC



Uma fonte chaveada com PFC: FP= 0,960 @ 220V e 0,991 @ 127V

($P_{saída} \approx 400W$)

Qualidade da energia - distorção injetada na rede AC



A mesma fonte chaveada sem PFC: FP = 0,598 @ 220V e 0,820 @
127V ($P_{saída} \approx 400W$)



Estendendo o conceito de Eficiência (η)

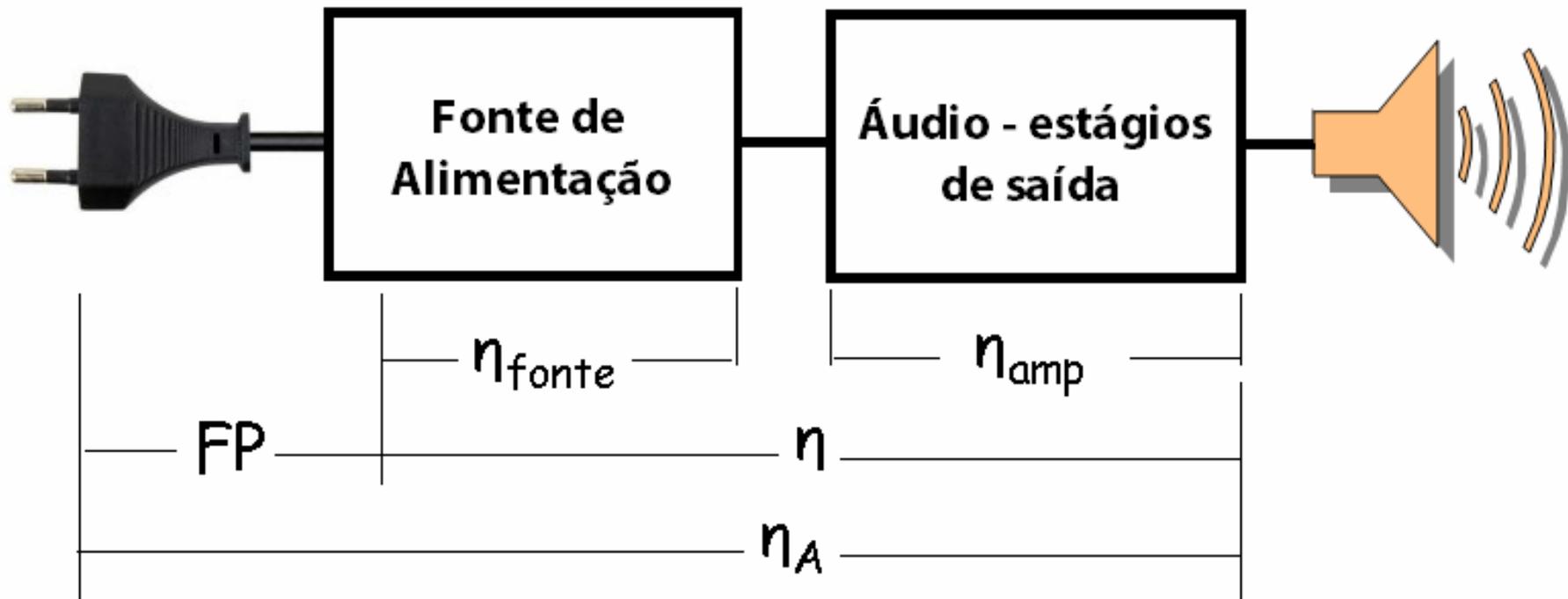
A Eficiência "ampla" (η_A)

A Eficiência tradicional (η) é uma relação tipo lucro-investimento quando ocorre conversão de energia.

Por ex: energia elétrica (investimento) sendo convertida em energia mecânica (lucro), gera calor (perdas).

No caso dos amplificadores de áudio:

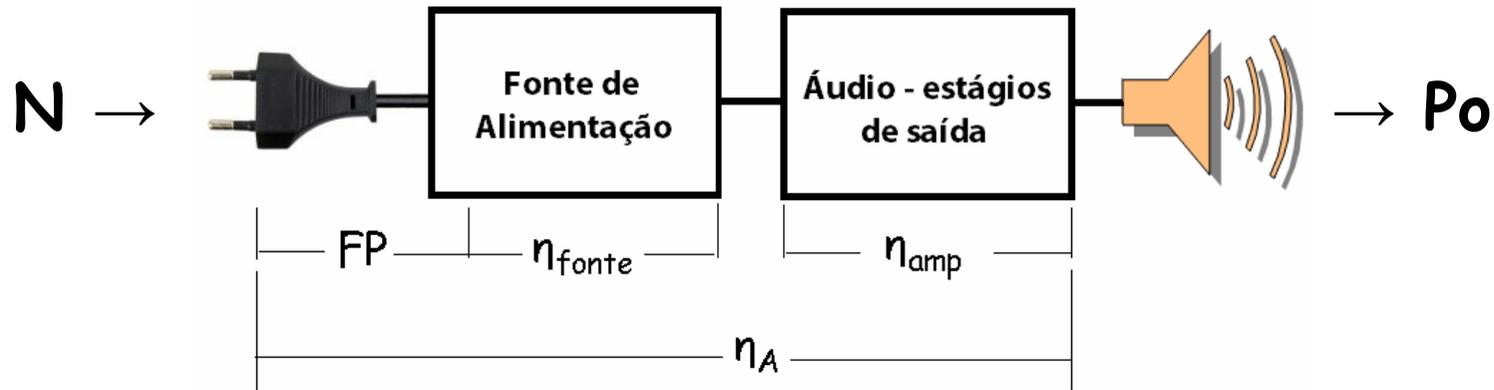
$$\eta = \frac{\textit{lucro}}{\textit{investimento}} = \frac{P_o}{P}$$



Estendendo o conceito tradicional de eficiência para incluir o Fator de Potência:

Por intuição $\rightarrow \eta_A = FP \times \eta = \frac{\textit{lucro}}{\textit{investimento}} = \frac{P_o}{N}$

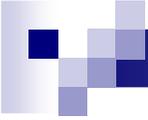
Checando:



$$\eta_A = FP \times \eta_{\text{fonte}} \times \eta_{\text{amp}}$$

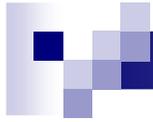
$$\eta_A = \frac{P}{N} \times \frac{P_{\text{out_fonte}}}{P} \times \frac{P_o}{P_{\text{out_fonte}}}$$

$$\eta_A = \frac{P_o}{N}$$



A Eficiência "ampla" (η_A) nos mostra a real relação lucro-investimento em um amplificador, já que considera o "lucro" (potência de saída do amp - P_o) relacionada ao investimento efetivo (potência aparente - N), que é o que foi pago de fato e quase sempre disponível em quantidade limitada.

$$\eta_A = \frac{\text{lucro}}{\text{investimento}_{\text{efetivo}}} = \frac{P_o}{N}$$



Aplicando na Prática

1º cenário: fornecimento limitado de energia
(por ex. um trio elétrico)



Utilizando os 3 amplificadores-exemplo com um fornecimento limitado de energia, neste exemplo:

$N = 2\text{kVA}$, igual p/ os 3 casos;

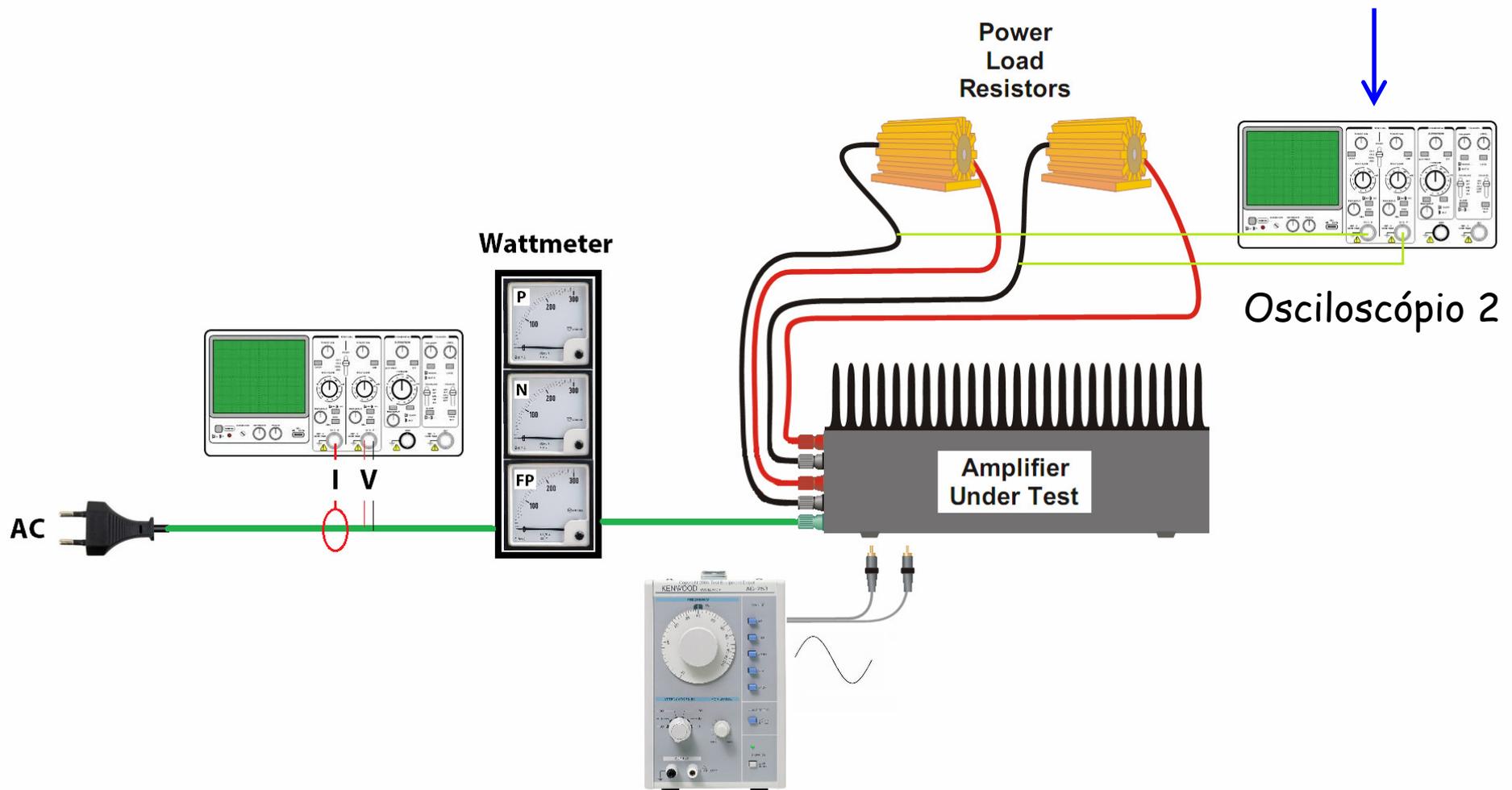
E verificar qual será a potência de saída P_o disponível em cada um deles;

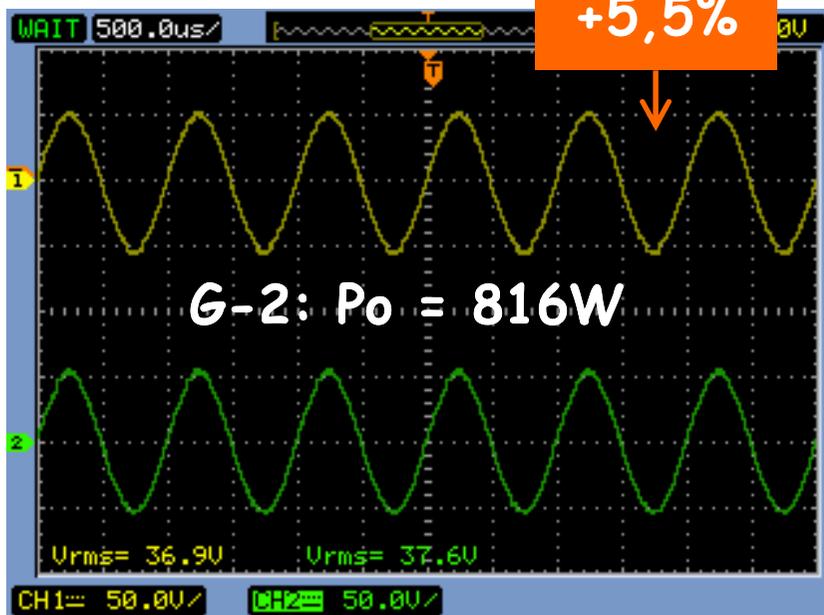
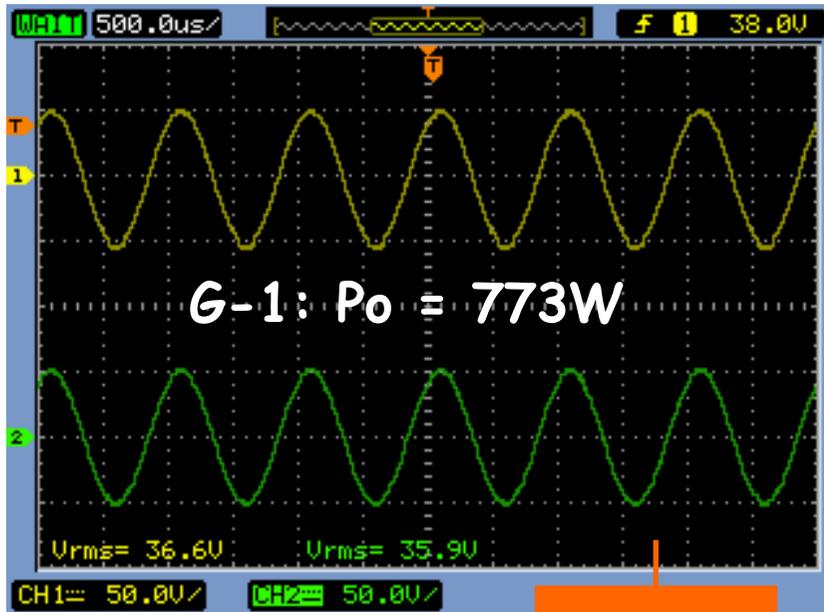
E a partir de P_o e $N = 2\text{kVA}$ calcularemos a eficiência ampla η_A para cada caso;

$$\eta_A = \frac{P_o}{N}$$

OBJETIVO → analisar o significado de "disponibilidade de potência".

Novamente utilizaremos o mesmo set-up de teste; para cada caso aumentamos o volume do gerador de áudio até que o Wattímetro marque $N = 2\text{kVA}$. Então medimos a potência de saída (as telas seguintes são do osciloscópio 2).



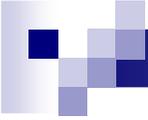


Potência Aparente (N)

disponível:

$N = 2kVA$

	G-1	G-2
η	0,481	0,647
FP	0,804	0,631
$\eta_A = \eta \times FP$	0,387	0,408

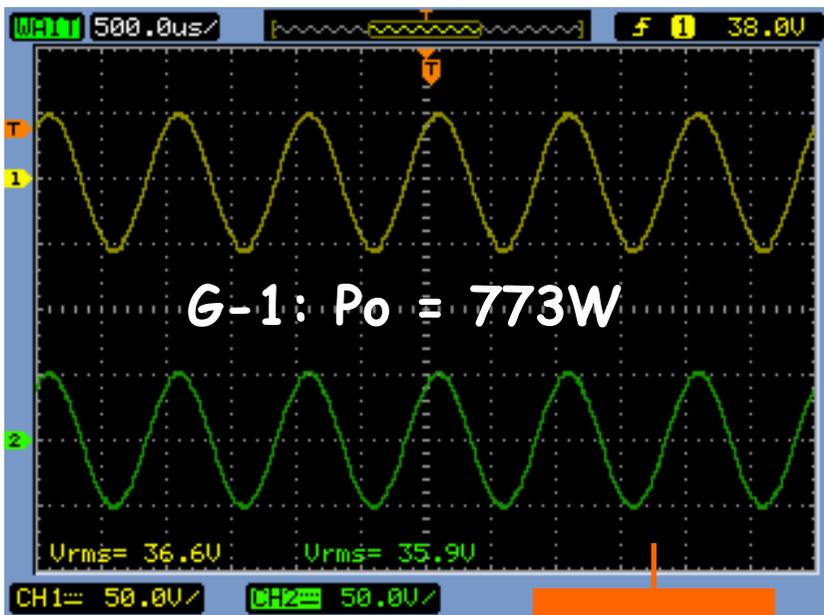
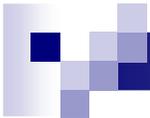


Resultado: vemos que passando do amplificador **G-1** (bem tradicional) para o amplificador **G-2** (bastante moderno) não há uma grande melhora no resultado, embora a eficiência tradicional (η) nos leve a pensar que deveria haver!

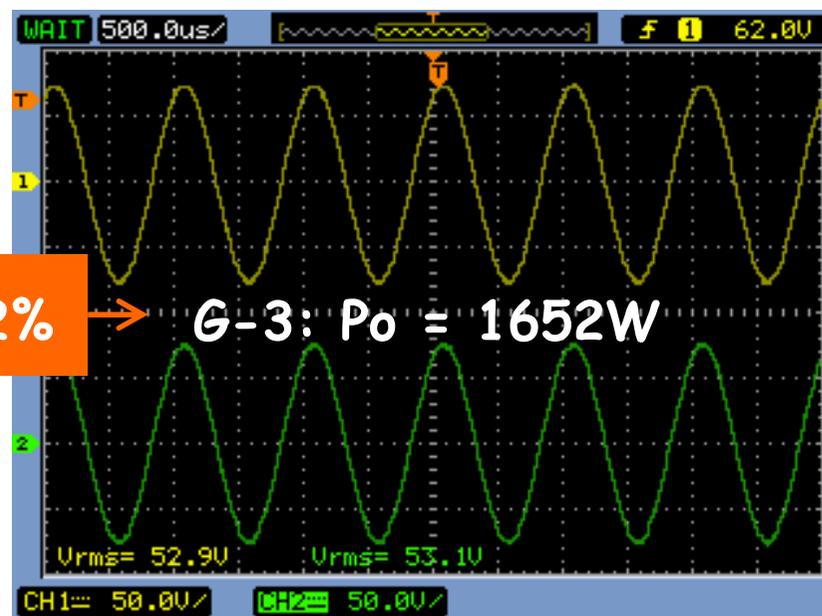
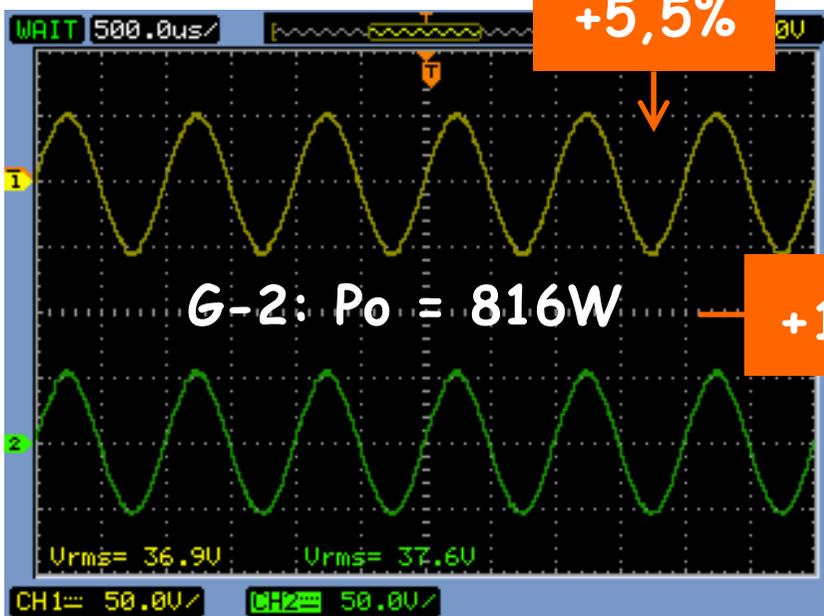
Mas observando a eficiência ampla η_A , vemos que a mesma aumentou apenas 5,5%, embora a eficiência tradicional η tenha aumentado bem mais; explicando esse resultado "decepcionante".

Conclusão: o rendimento "amplo" do amp **G-2** não aumentou como esperado devido ao seu Fator de Potência ter piorado muito.

Agora incluindo o amplificador **G-3** na comparação:



Potência Aparente (N)
disponível:
 $N = 2kVA$



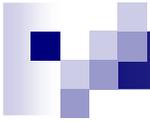
	G-1	G-2	G-3
η	0,481	0,647	0,838
FP	0,804	0,631	0,986
$\eta_A = \eta \times FP$	0,387	0,408	0,826

Exemplo prático: utilizando gerador e cabeamento p/ 40kVA, teríamos as seguintes potências de saída disponíveis:

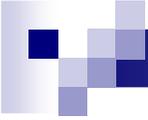
	G-1	G-2	G-3
P_o	15.480W	16.320W	33.040W



Com a introdução do amplificador
G-3, vemos que o PFC aumentou
em 56% a disponibilidade de
Potência!



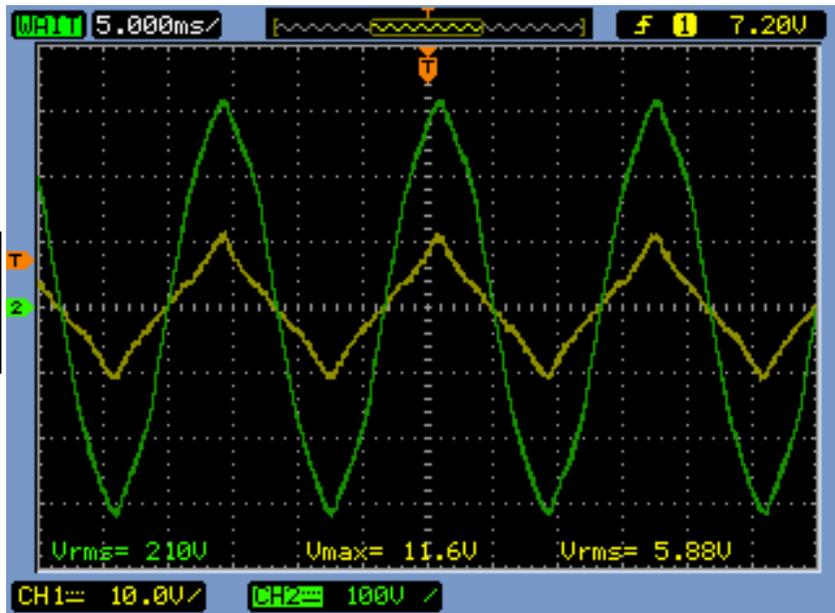
2º cenário: fornecimento ilimitado de energia



Se a energia estivesse fartamente disponível, o que aconteceria se obrigássemos os amps **G-2 e G-3** a entregarem a mesma **potência de saída?** (neste exemplo = 1380W)

Como ficariam a Potência Aparente consumida por cada um deles? E as correntes AC solicitadas? (telas do osciloscópio 1)

G-3



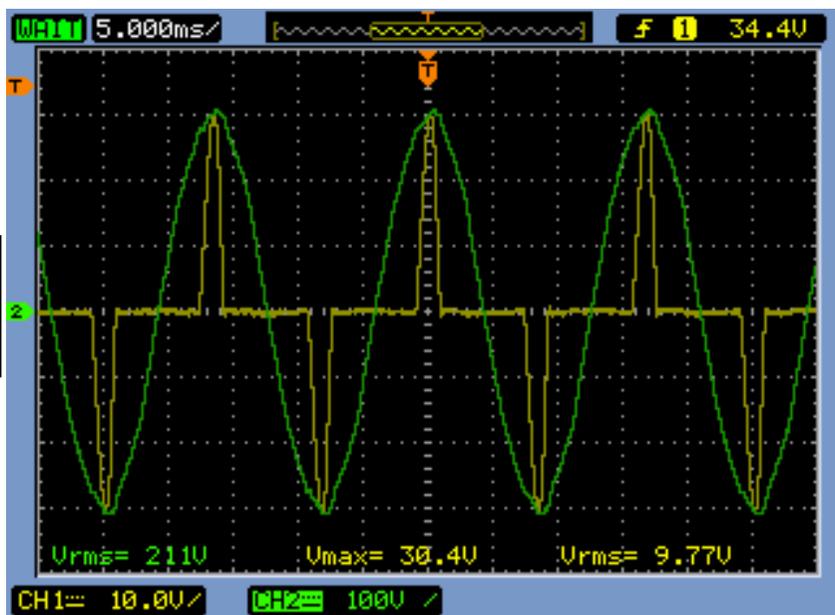
$$P_o = 1380W, FP = 0,990$$

$$N = 1,67kVA, \eta_A = 0,826$$

$$I_{RMS} = 5,88A$$

$$I_{PEAK} = 11,6A$$

G-2

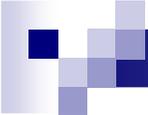


$$P_o = 1380W, FP = 0,641$$

$$N = 2,82kVA, \eta_A = 0,489$$

$$I_{RMS} = 9,77A$$

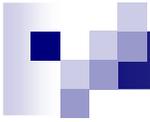
$$I_{PEAK} = 30,4A$$



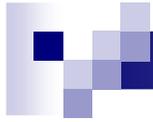
	G-3 → G-2	Aumento de:	
N	1,67kVA	2,82kVA	69%
I_{RMS}	5,9A	9,8A	66%
I_{PEAK}	11,6A	30,4A	162%

Exemplo prático, P.A. com 20 amplificadores

	G-3	G-2
N	33,4kVA	56,4kVA
I_{RMS}	118A	196A
I_{PEAK}	232A	608A



**3º cenário: alimentação com voltagens abaixo
dos valores nominais**



O PFC provê capacidade UNIVERSAL

(mesmo desempenho final, mesmo com variações de
tensão e frequência);

Faixa universal típica: 100-260Vac | 47-63Hz;

A ANEEL (Brasil) considera regulamentar -10% nas
tensões padronizadas de baixa tensão
(127V/220V/380V).

Exemplo

Um set-up qualquer de amps do tipo não-universal, com a rede em 198V, ao invés de 220V (-10%):

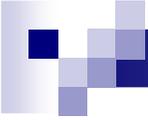
$$P_{FINAL} = \frac{V_{REAL}^2}{V_{NOMINAL}^2} \times P_{NOMINAL}$$

$$P_{FINAL} = \frac{198^2}{220^2} \times P_{NOMINAL}$$

$$P_{FINAL} = 0,81 \times P_{NOMINAL}$$

↑

Com 198V, só restará disponível 81% da potência nominal de "fábrica"!



Conclusões: o que PFC nos amplificadores traz de bom para o trabalho de sonorização?

- i. Reduz o consumo de energia e aumenta a disponibilidade de potência;
- ii. Aumenta a segurança das instalações → redução das correntes circulantes nos cabos e conetores de AC;
- iii. Melhora a qualidade da energia elétrica da instalação, pois evita que equipamentos vizinhos sejam prejudicados;
- iv. Capacidade universal → o equipamento poderá ter o mesmo desempenho, mesmo em redes fora do padrão.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Edminister, Joseph A.; "Circuitos Elétricos", McGraw-Hill, 1991;

Wuidart, L.; "Understanding Power Factor", ST-Microelectronics
Application Note AN-824, 2003;

Fairchild Semiconductor; "Power Factor Correction (PFC) Basics",
Application Note AN-42047, 2004;

Agradecimentos



Brazil Section