

Fator de Amortecimento

Uma Abordagem Introdutória

Rosalfonso Bortoni, M.Eng.

rosalfonso@hotmail.com

***Resumo:** Uma abordagem introdutória é feita sobre Fator de Amortecimento, levando em consideração a interligação entre amplificadores de potência e alto-falantes (caixas acústicas). São apresentados aspectos práticos e reais dos efeitos de cabos (fios) e alinhamento de caixas acústicas. Demonstra-se que, na maioria das vezes, Fatores de Amortecimento extremamente elevados (>1000, em amplificadores) não têm qualquer influência prática sobre as características resultantes em um sistema de sonorização, seja ele de pequeno ou grande porte.*

Introdução

Há muito se fala em Fator de Amortecimento... parâmetro muito discutido desde a época dos amplificadores valvulados, pois indiretamente trata da impedância de saída do amplificador de potência. Pela definição, o Fator de Amortecimento (D) (*Damping Factor*, ou simplesmente *Damping*) nada mais é do que um número que expressa a razão entre a impedância de carga (Z_L) e a impedância de saída do amplificador (Z_O) [1,2].

$$D = \frac{Z_L}{Z_O} \quad (1)$$

Como pode ser visto em [2, pág. 37], tanto a impedância de saída do amplificador, como a impedância do alto-falante (caixa acústica), variam com a frequência; dessa forma, esse parâmetro é comumente expresso considerando-se as impedâncias nominais de ambas as partes, onde essas impedâncias passam a ser representadas por resistências de carga (R_L) e saída do amplificador (R_O), respectivamente.

$$D = \frac{R_L}{R_O} \quad (2)$$

No caso dos amplificadores de potência, são escolhidas impedâncias obtidas em baixas frequências (50 Hz, por exemplo), pois nessa região do espectro os amplificadores apresentam, relativamente, baixíssima impedância de saída, o que leva a elevados números de fatores de amortecimento (números elevados agradam aos apelos do marketing). Por exemplo, um mesmo amplificador pode ter os seguintes fatores de amortecimento: $D=1000 @ 8\Omega / 50\text{Hz}$, $D=400 @ 8\Omega / 400\text{Hz}$ e $D=100 @ 8\Omega / 1\text{kHz}$.

Embora de maneira bastante simples, a equação (2) nos mostra quantas vezes a resistência de saída do amplificador é menor que a resistência de carga... e para entendermos um pouco mais o significado dessa simples razão, recorreremos aos trabalhos de A. N. Thiele publicados há 40 anos atrás [1].

Das Teorias de Thiele

Em [1], Thiele propõe um método para projeto de caixas acústicas *bass reflex* onde a curva de resposta em frequência do sistema alto-falante/caixa acústica é ajustada através da escolha adequada do volume e da sintonia da caixa, e do fator de mérito total do sistema (Q_t); lembrando que o fator de mérito é proporcional ao inverso do fator de amortecimento. Nesse trabalho, Thiele ajusta as características do sistema *bass reflex* através do ajuste da impedância de saída do amplificador de potência.

A Figura 1 mostra o circuito equivalente elétrico, simplificado, do sistema *bass reflex* [1].

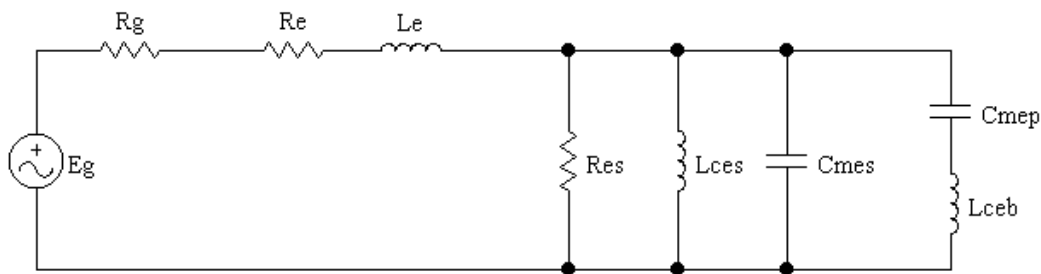


Figura 1 – Circuito elétrico equivalente do sistema *bass reflex*.

Onde:

- E_g - Tensão de saída do gerador (amplificador), em aberto
- R_g - Resistência de saída do gerador (amplificador)
- R_e - Resistência elétrica da bobina móvel
- L_e - Indutância da bobina móvel
- R_{es} - Resistência mecânica do conjunto móvel (refletida para o lado elétrico)
- L_{ces} - Compliância mecânica do conjunto móvel (refletida para o lado elétrico)
- C_{mes} - Massa mecânica do conjunto móvel (refletida para o lado elétrico)

- C_{mep} - Massa acústica do ar no pórtilco (refletida para o lado elétrico)
 L_{ceb} - Compliância acústica da caixa (refletida para o lado elétrico)

Se a resistência de saída do amplificador é considerada (pois R_g está em série com R_e), o fator de mérito elétrico do alto-falante (Q_{es}) passa a ser o fator de mérito elétrico do sistema (Q_e). Assim,

$$Q_e = Q_{es} \cdot \left(1 + \frac{R_g}{R_e} \right) \quad (3)$$

Conseqüentemente, o fator de mérito total do alto-falante (Q_{ts}) passa a ser o fator de mérito total do sistema (Q_t).

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_e} + \frac{1}{Q_{ms}} \quad (4)$$

onde Q_{ms} é o fator de mérito mecânico do alto-falante. Notem que na equação (4) Q_{ms} permaneceu inalterado.

Antes de prosseguirmos, devemos fazer algumas observações:

1. Na figura 1, embora o circuito represente o sistema *bass reflex* "visto" pelos terminais da bobina móvel (lado elétrico), há uma independência total entre as partes elétrica (R_g , R_e , L_e), mecânica (R_{es} , L_{ces} , C_{mes}) e acústica (C_{mep} , L_{ceb}), sendo possível o ajuste do sistema atuando-se em uma, ou mais, dessas partes;
2. Na parte acústica o ajuste pode ser feito variando-se o volume interno (L_{ceb}) e/ou a sintonia (C_{mep}) da caixa (através do pórtilco ou duto);
3. Na parte mecânica o ajuste pode ser feito variando-se a massa (C_{mes}) do conjunto móvel (acrescentando massa ao cone, usualmente) e;
4. Na parte elétrica o ajuste pode ser feito variando-se a resistência elétrica total do circuito ($R_g + R_e$), através do ajuste da resistência de saída do amplificador (R_g).

Durante o desenvolvimento de seu trabalho, Thiele demonstra que variando-se o fator de mérito elétrico total (Q_t) é possível ajustar a resposta em freqüência para se ter mais ou menos reforço na região dos graves; para cada dobro de Q_t tem-se um pico com 6 dB de ganho, e para cada divisão por dois de Q_t tem-se um vale com 6 dB de atenuação. Além disso, Thiele afirma que para manter a resposta dentro de uma variação de ± 1 dB, deve-se manter o fator de mérito total (Q_t) dentro de uma variação de $\pm 10\%$.

Se considerarmos que a variação existente em Q_t ocorre exclusivamente devido à resistência de saída do amplificador (em caso extremo, pois o próprio alto-falante tem variação nessa ordem de grandeza [3]), podemos determinar o fator de amortecimento mínimo necessário de

modo a não provocar variações maiores que ± 1 dB na curva de resposta em frequência do sistema *bass reflex*.

Observando várias especificações técnicas de alto-falantes [3], podemos ver que o fator de mérito elétrico de um falante é muitas vezes menor do que seu próprio fator de mérito mecânico, ou seja $Q_{es} \ll Q_{ms}$; e mesmo tendo variações de até 100% em Q_{es} essa situação ($Q_{es} \ll Q_{ms}$) continua sendo respeitada. Portanto, podemos afirmar:

$$Q_t \cong Q_e \quad \text{e} \quad Q_{ts} \cong Q_{es} \quad \text{para} \quad Q_e \ll Q_{ms} \quad (5)$$

Mas, dividindo (3) por Q_{es}

$$\frac{Q_e}{Q_{es}} = 1 + \frac{R_g}{R_e} \quad (6)$$

e nas considerações de (5),

$$\frac{Q_t}{Q_{ts}} \cong \frac{Q_e}{Q_{es}} = 1 + \frac{R_g}{R_e} \quad (7)$$

ou, de outra forma,

$$\frac{Q_t}{Q_{ts}} - 1 \cong \frac{Q_e}{Q_{es}} - 1 = \frac{R_g}{R_e} \quad (8)$$

Se, agora, considerarmos $R_L = R_e$, temos:

$$\frac{R_g}{R_e} = \frac{R_o}{R_L} = \frac{1}{D} \quad (9)$$

O que resulta em

$$\frac{Q_t}{Q_{ts}} - 1 \cong \frac{1}{D} \quad (10)$$

A partir de (10), podemos constatar que uma variação de 10% em Q_t , em relação à Q_{ts} , devido à consideração da resistência de saída do amplificador, resulta em um fator de amortecimento aproximadamente igual a 10!

$$\frac{Q_t}{Q_{ts}} - 1 \cong \frac{1}{D} \Rightarrow 1,1 - 1 \cong \frac{1}{D} \therefore D \cong \frac{1}{1,1 - 1} = \frac{1}{0,1} = 10$$

Da mesma forma, variações em Q_t de 1% ou 100% significam fatores de amortecimento aproximadamente iguais a 100 ou 1, respectivamente, nas considerações deste trabalho.

Para exemplificar o fato, fizemos uma série de simulações baseadas nos *softwares* encontrados em [4]. Inicialmente, geramos, a partir de parâmetros genéricos, mas reais, uma curva de resposta plana para um sistema *bass reflex*. Mantendo os resultados inalterados (F_s , V_{as} , Q_{ms} , V_b e F_b), variamos Q_t e, proporcionalmente, Q_e . Os resultados são apresentados nas Figuras 2 a 11.

Na Figura 3 podemos ver que, para um fator de amortecimento igual à aproximadamente 20 (equação (10)), a variação na resposta em frequência é mínima; na Figura 4 podemos constatar, graficamente, a afirmação de Thiele: " ± 1 dB para $\pm 10\%$ em Q_t ". Para uma variação de 100% em Q_t , portanto o dobro, temos um pico de 6 dB de ganho (Figura 11).

Entrando com cada uma das variações utilizadas nas Figuras 2 a 11 na equação (10), podemos calcular os respectivos fatores de amortecimento; com os resultados, montamos uma tabela (Tabela 1).

Tabela 1		
Figura	$Q_t/Q_{ts} - 1$ (%)	D^*
2	0	∞
-----	0,05	2000
-----	0,1	1000
-----	0,2	500
-----	0,3	333
-----	0,4	250
-----	0,5	200
-----	1	100
-----	2	50
-----	3	33,3
-----	4	25
3	5	20
4	10	10
5	15	6,67
6	20	5
7	30	3,33
8	40	2,5
9	50	2
10	80	1,25
11	100	1
* Considerando as resistências de saída do amplificador e de entrada da caixa		

Ou, graficamente, podemos representar a equação (10) através das Figuras 12 (escala linear) e 13 (escala logarítmica).

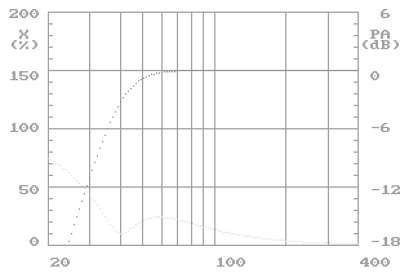


Figura 2 – Variação em Q_t de 0% ($Q_t/Q_{ts} = 1$)

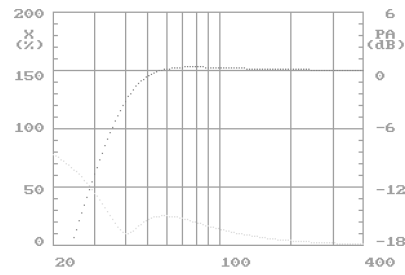


Figura 3 – Variação em Q_t de 5% ($Q_t/Q_{ts} = 1,05$)

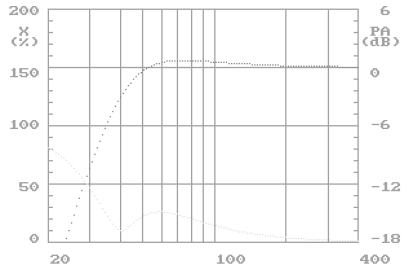


Figura 4 – Variação em Q_t de 10% ($Q_t/Q_{ts} = 1,10$)

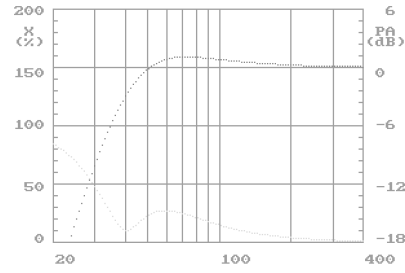


Figura 5 – Variação em Q_t de 15% ($Q_t/Q_{ts} = 1,15$)

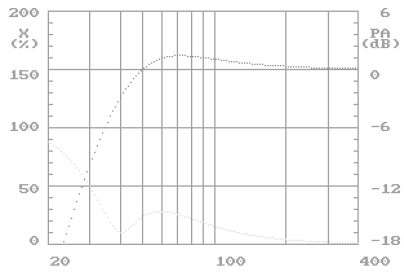


Figura 6 – Variação em Q_t de 20% ($Q_t/Q_{ts} = 1,20$)

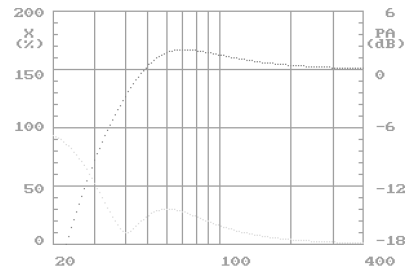


Figura 7 – Variação em Q_t de 30% ($Q_t/Q_{ts} = 1,30$)

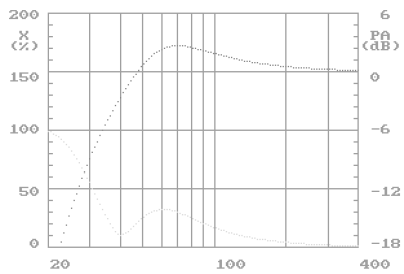


Figura 8 – Variação em Q_t de 40% ($Q_t/Q_{ts} = 1,40$)

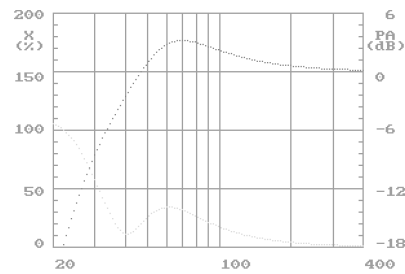


Figura 9 – Variação em Q_t de 50% ($Q_t/Q_{ts} = 1,50$)

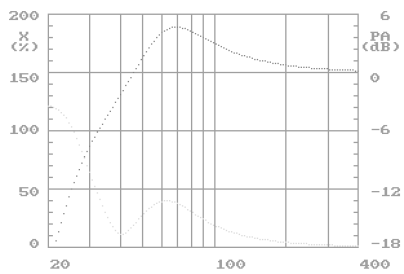


Figura 10 – Variação em Q_t de 80% ($Q_t/Q_{ts} = 1,80$)

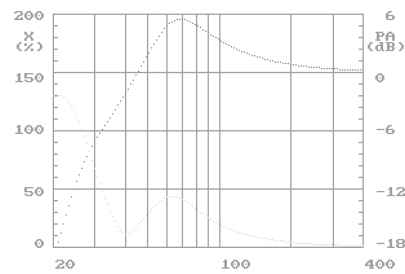


Figura 11 – Variação em Q_t de 100% ($Q_t/Q_{ts} = 2$)

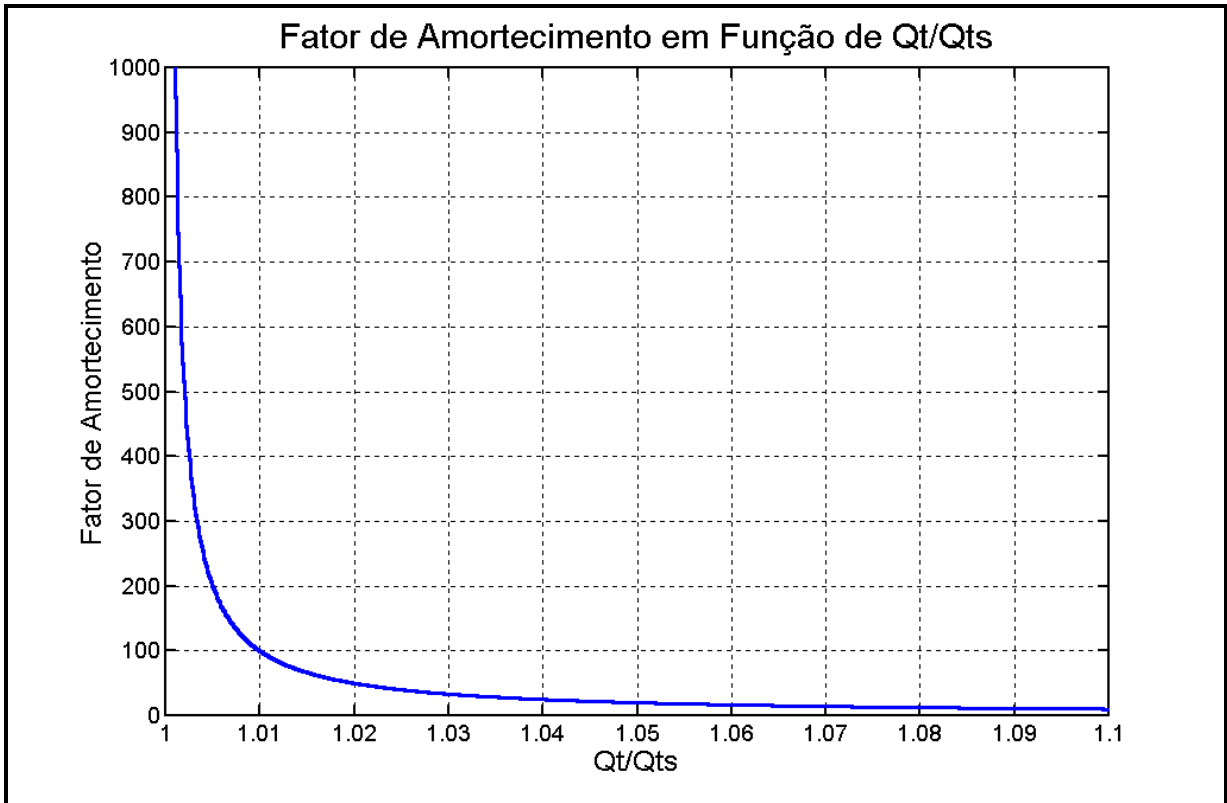


Figura 12 – Gráfico de D em função de Q_t/Q_s (escala linear)

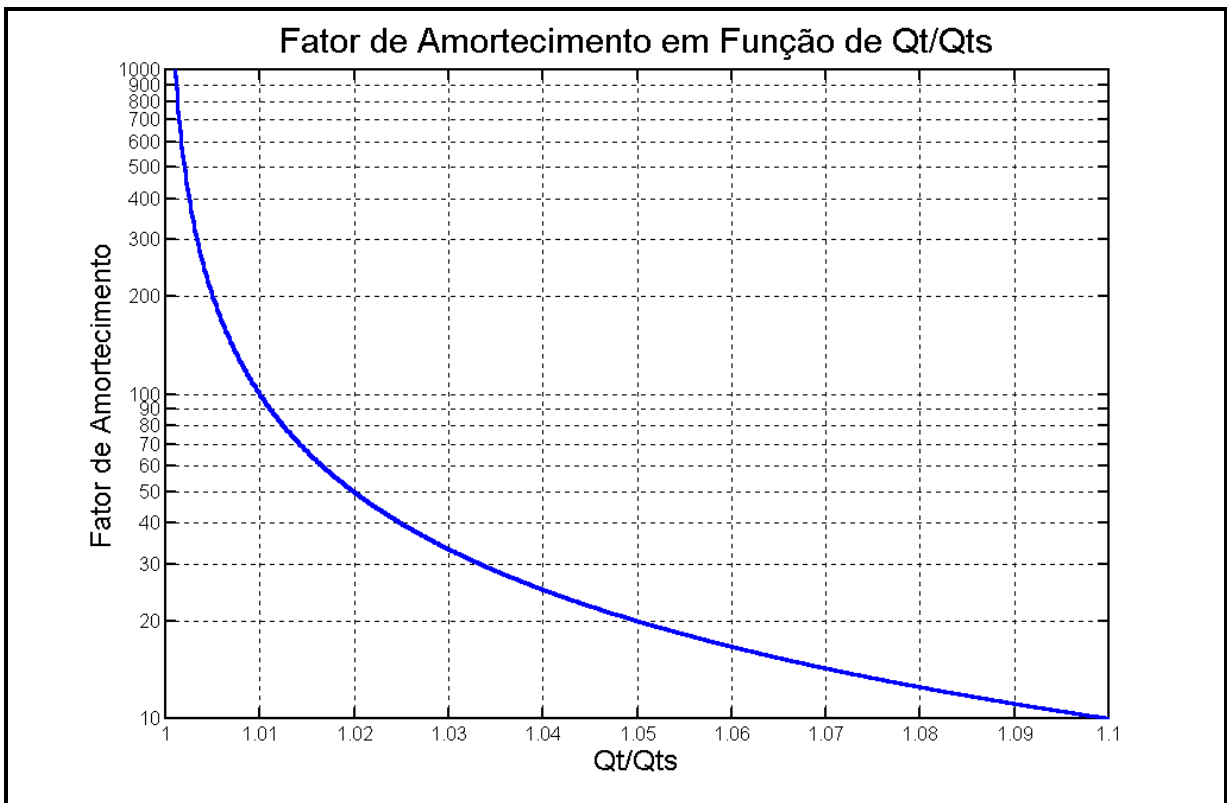


Figura 13 – Gráfico de D em função de Q_t/Q_s (escala logarítmica)

Na Figura 3, onde o fator de amortecimento é aproximadamente igual a 20, a variação na curva de resposta foi desprezível, ficando abaixo de 1 dB. Dessa forma, podemos deduzir que fatores de amortecimento acima desse valor não terão influência sobre o sistema, sob o ponto de vista da resposta em frequência.

O Efeito dos Cabos (fios)

Até então consideramos apenas o efeito da impedância de saída do amplificador de potência sobre a resposta em frequência do sistema, em função do fator de amortecimento. No entanto, e na prática, somos obrigados a interligar essas duas partes através de cabos (fios) que, apesar de serem chamados de "condutores", apresentam uma resistência elétrica; essa resistência é proporcional ao comprimento e inversamente proporcional à bitola (espessura) do fio [5,6].

Refazendo a Figura 1, agora considerando a resistência do fio (R_{fio}), temos (Figura 14):

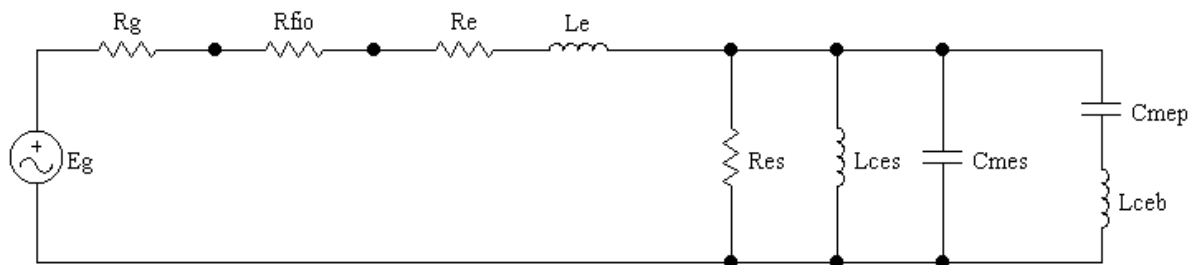


Figura 14 – Circuito elétrico equivalente do sistema *bass reflex* considerando a resistência do fio condutor.

Por analogia às equações (2), (3) e (10), escrevemos:

$$D_s = \frac{R_L}{R_O + R_{fio}} \quad (11)$$

$$Q_e = Q_{es} \cdot \left(1 + \frac{R_g + R_{fio}}{R_e} \right) \quad (12)$$

e

$$\frac{Q_t}{Q_{ts}} - 1 \cong \frac{1}{D_s} \quad (13)$$

Dessa forma, definimos o "fator de amortecimento do sistema" (D_s), que leva em consideração uma parte fundamental em um sistema de sonorização: os condutores (fios).

A análise que segue trata do efeito do fio sobre o fator de amortecimento resultante.

Dividindo a equação (11) por R_L , resulta em

$$D_s = \frac{1}{\frac{R_O}{R_L} + \frac{R_{fio}}{R_L}} \quad (14)$$

Mas $R_O/R_L = 1/D$, então

$$D_s = \frac{1}{\frac{1}{D} + \frac{R_{fio}}{R_L}} \quad (15)$$

A equação (15) nos dá o fator de amortecimento do sistema em função do fator de amortecimento do amplificador (D , declarado pelo fabricante), da resistência de carga (R_L , declarada juntamente com o fator de amortecimento) e da resistência do fio (R_{fio}).

Para exemplificar, vamos considerar um amplificador cujo fator de amortecimento é especificado como sendo $D = 1000$ @ $R_L = 8\Omega$ e $f = 50\text{Hz}$ e utilizaremos um fio cuja resistência total (do par) é $R_{fio} = 0,1\Omega$. Da equação (15), obtemos:

$$D_s = \frac{1}{\frac{1}{D} + \frac{R_{fio}}{R_L}} = \frac{1}{\frac{1}{1000} + \frac{0,1}{8}} \cong 74 !!!$$

Ou seja, o que teoricamente deveria ser 1000, na prática não passou de 75. Isso ocorreu devido à grande diferença existente entre as resistências de saída do amplificador (R_O) e a resistência total do fio (R_{fio}). Não devemos nos esquecer que o fator de amortecimento do amplificador nada mais é do que uma forma indireta de especificar sua impedância (aquí, resistência) de saída. No nosso caso $R_O = R_L/D = 8/1000 = 0,008\Omega$, e dessa forma $R_{fio} \gg R_O$; ou seja, R_{fio} predomina sobre R_O , pois estão em série (Figura 14).

A partir da equação (15) podemos montar uma família de curvas para o fator de amortecimento do sistema (D_s) em função do fator de amortecimento do amplificador (D) e da razão R_{fio}/R_L (Figura 15). Cada uma das curvas (em cores diferentes) representa o fator de amortecimento do amplificador, para valores iguais a 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000 e 10000. À direita, no eixo horizontal (R_{fio}/R_L), temos o máximo da escala feito igual a 1 (um), diminuindo à medida que "caminhamos" para a esquerda, e chegando ao mínimo que é 0,000001, ou seja, um milionésimo. Podemos traduzir isso da seguinte forma: à medida que "caminhamos" para a esquerda, no eixo horizontal (R_{fio}/R_L), a resistência total (par) do fio vai diminuindo com relação à resistência de carga (R_L), independentemente dos valores (vejam, é uma razão entre duas grandezas). Dessa forma fica clara a predominância da resistência do fio (R_{fio}) sobre o fator de amortecimento do sistema (D_s) à medida que seu valor se aproxima do valor da resistência de carga (R_L), ou seja quando a razão $R_{fio}/R_L \rightarrow 1$ (tende a 1). A Figura 15 nos mostra, por exemplo, que para $R_{fio}/R_L = 0,01 = 1/100$ o fator de amortecimento do sistema (D_s) resultante fica entre 50 e 100, para amplificadores com fatores de amortecimento (D) entre 100 e 10000!

Considerando que um fio de cobre de 1 mm^2 tem uma resistência de $0,017784 \Omega/\text{m}$ [5,7], podemos saber a resistência total em função do comprimento e da bitola praticadas (Figura 16); além, também, de podermos calcular o fator de amortecimento do sistema (D_s) resultante para cada par de fios que estará sendo (ou será) utilizado. Vejam Figuras 17 a 23.

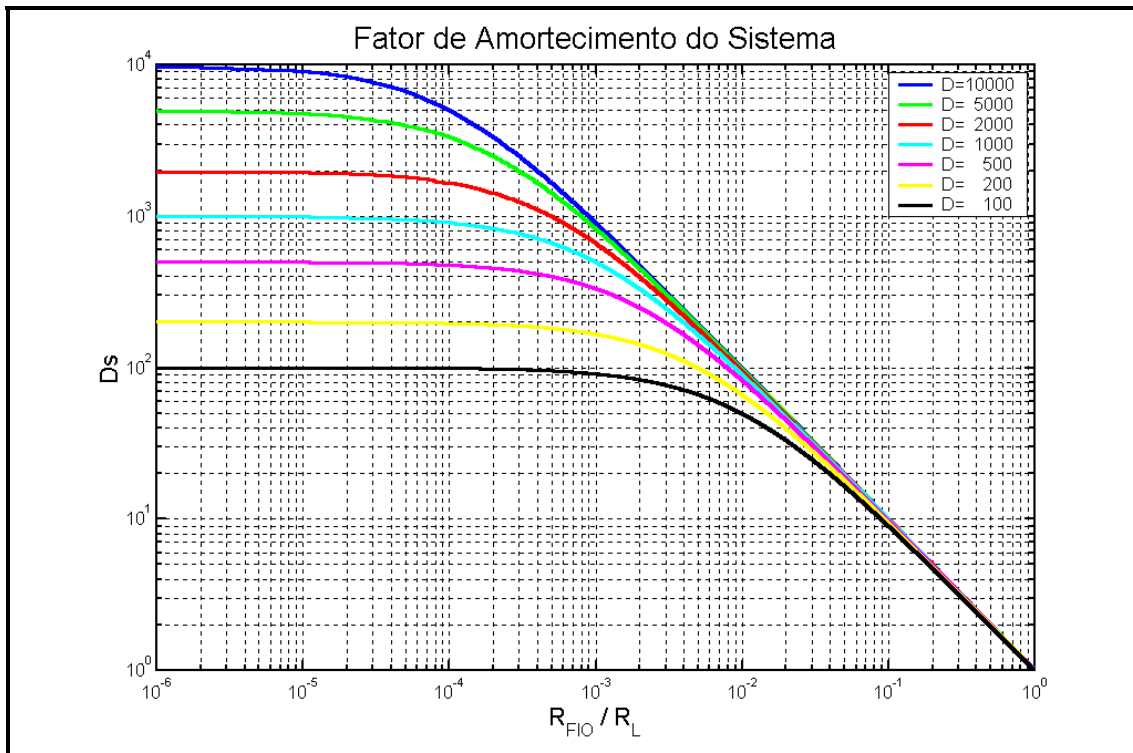


Figura 15 – Fator de amortecimento do sistema (D_s) em função do fator de amortecimento do amplificador (D) e da razão R_{fio}/R_L

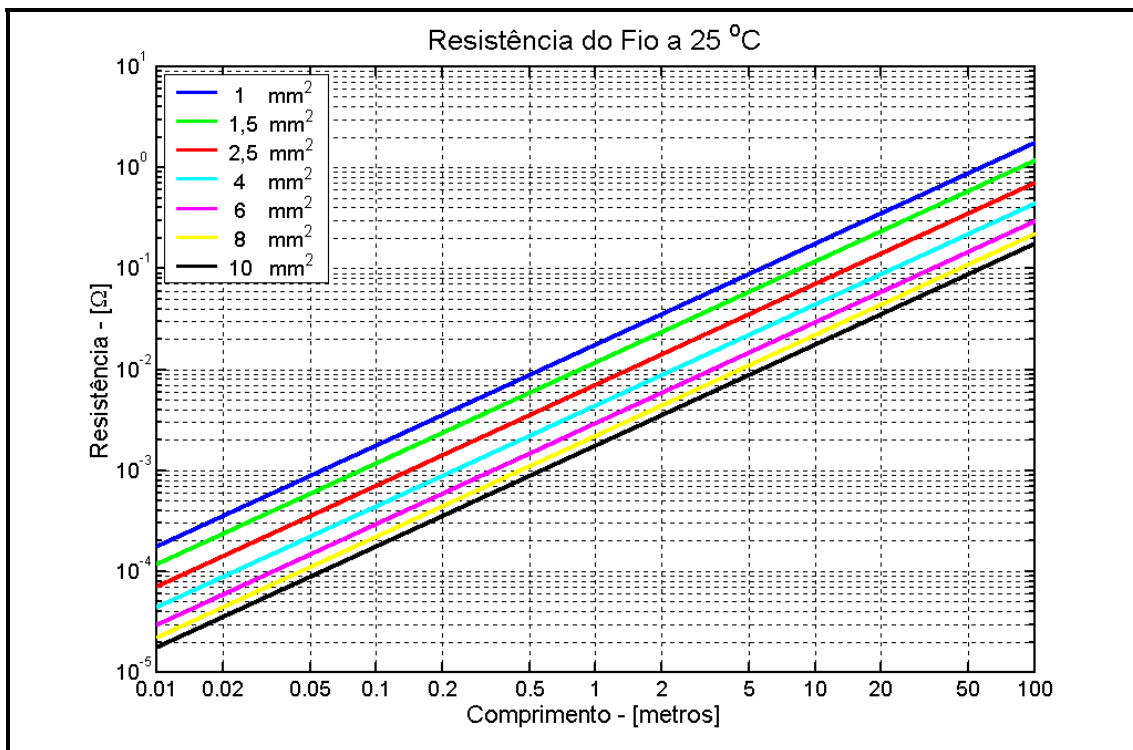


Figura 16 – Resistência elétrica dos fios de cobre em função do comprimento e da bitola

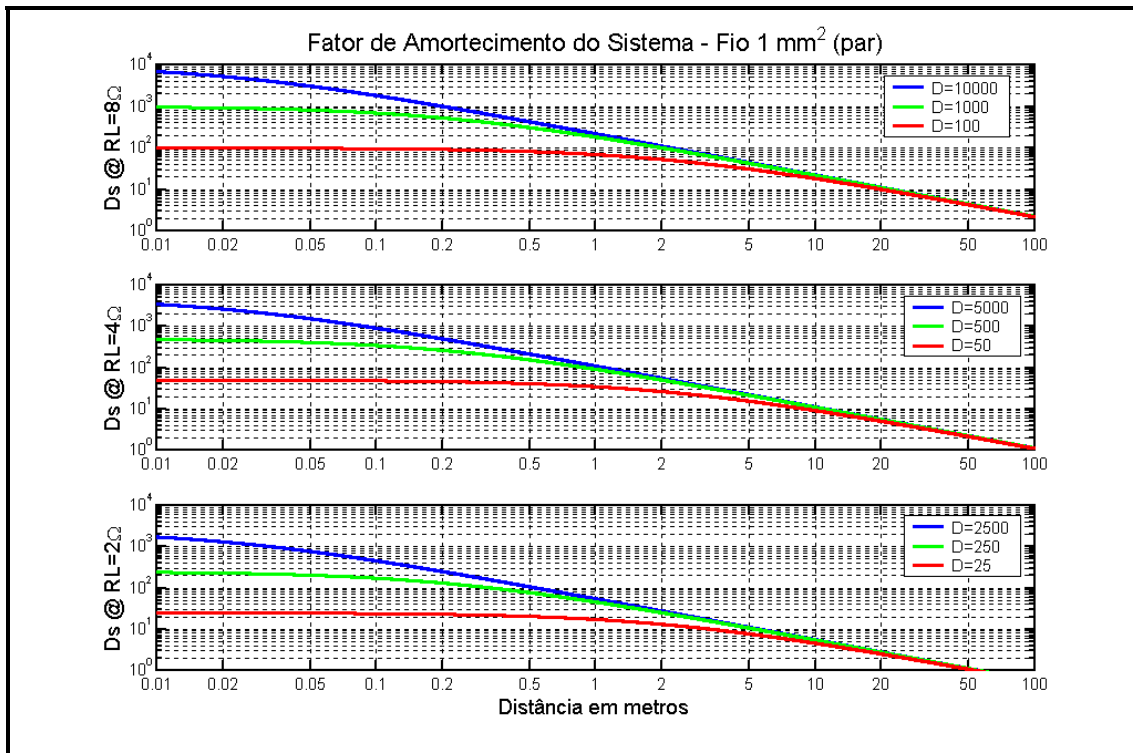


Figura 17 – Fator de amortecimento do sistema (D_s) em função do fator de amortecimento do amplificador (D) e do comprimento do par de fios de cobre de 1 mm^2

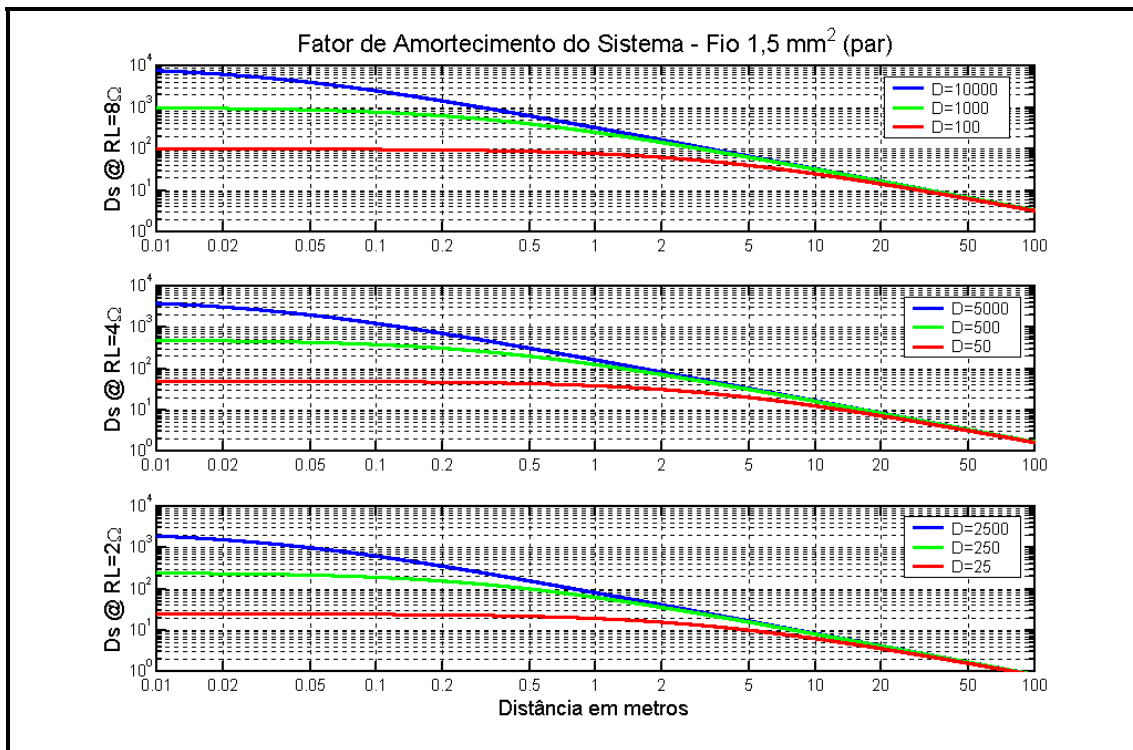


Figura 18 – Fator de amortecimento do sistema (D_s) em função do fator de amortecimento do amplificador (D) e do comprimento do par de fios de cobre de $1,5 \text{ mm}^2$

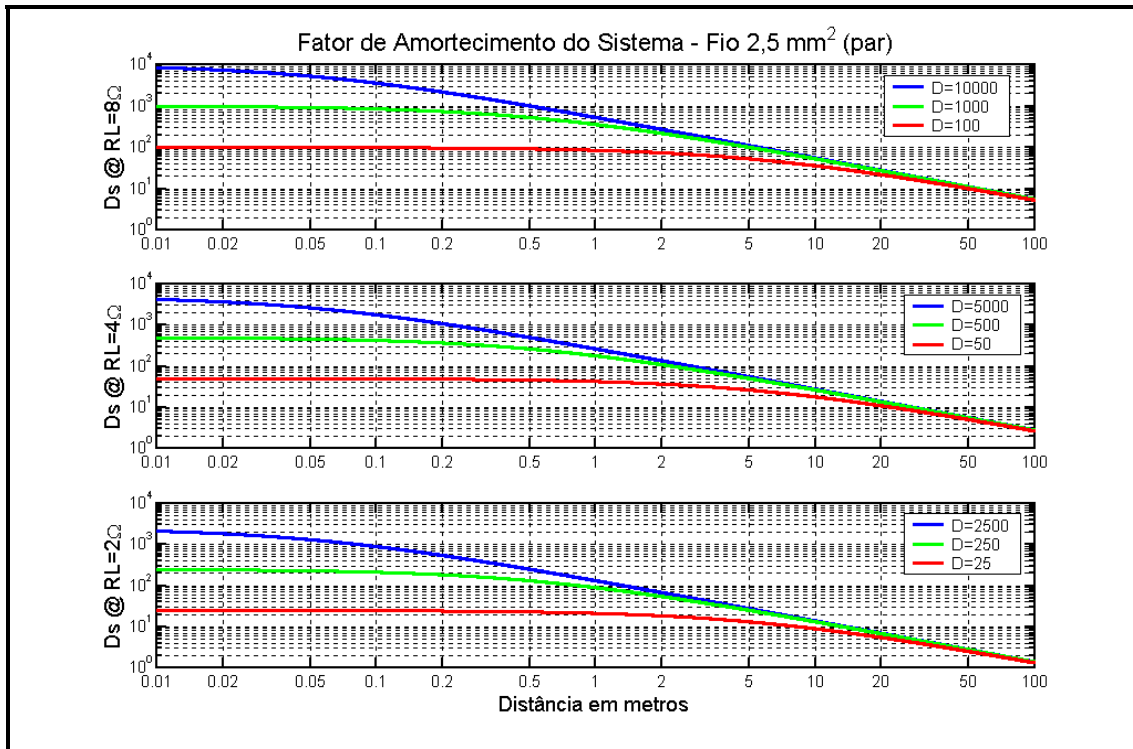


Figura 19 – Fator de amortecimento do sistema (D_s) em função do fator de amortecimento do amplificador (D) e do comprimento do par de fios de cobre de 2,5 mm²

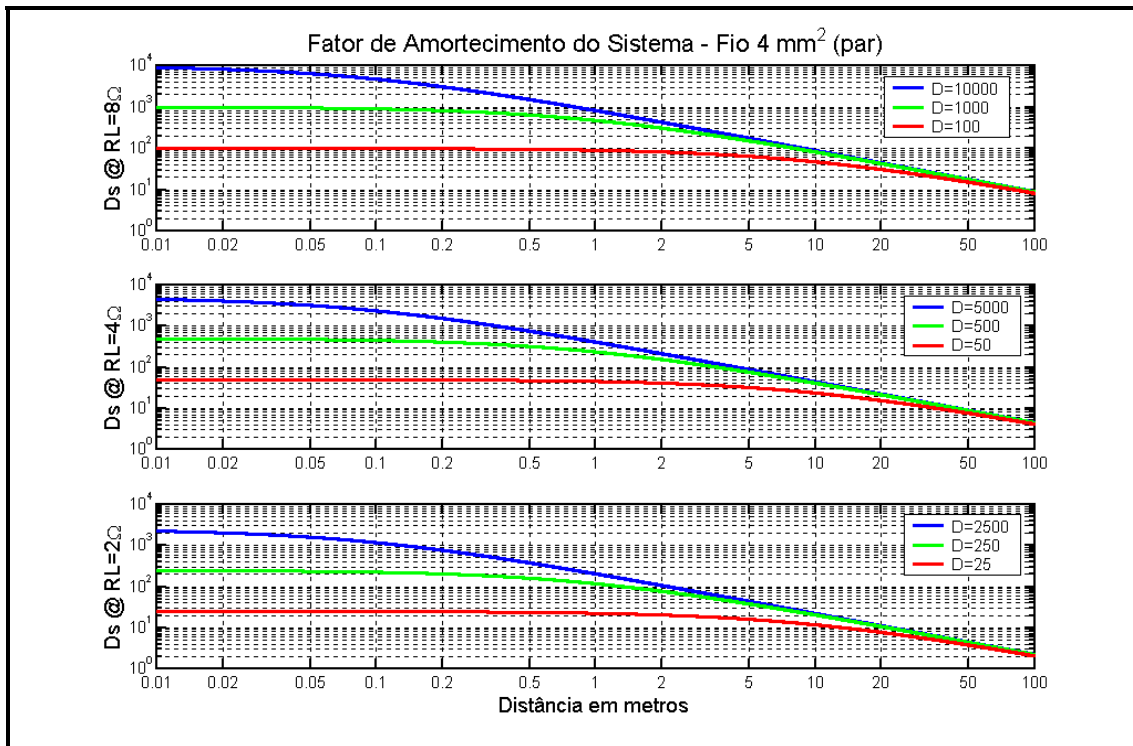


Figura 20 – Fator de amortecimento do sistema (D_s) em função do fator de amortecimento do amplificador (D) e do comprimento do par de fios de cobre de 4 mm²

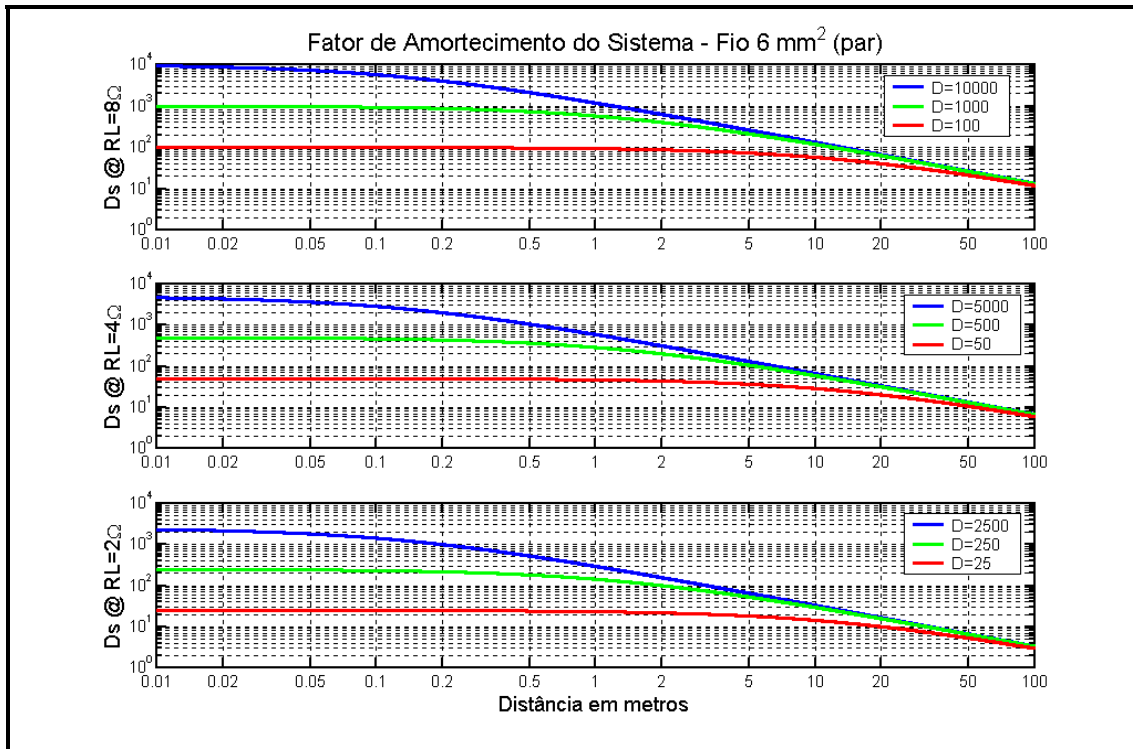


Figura 21 – Fator de amortecimento do sistema (D_s) em função do fator de amortecimento do amplificador (D) e do comprimento do par de fios de cobre de 6 mm²

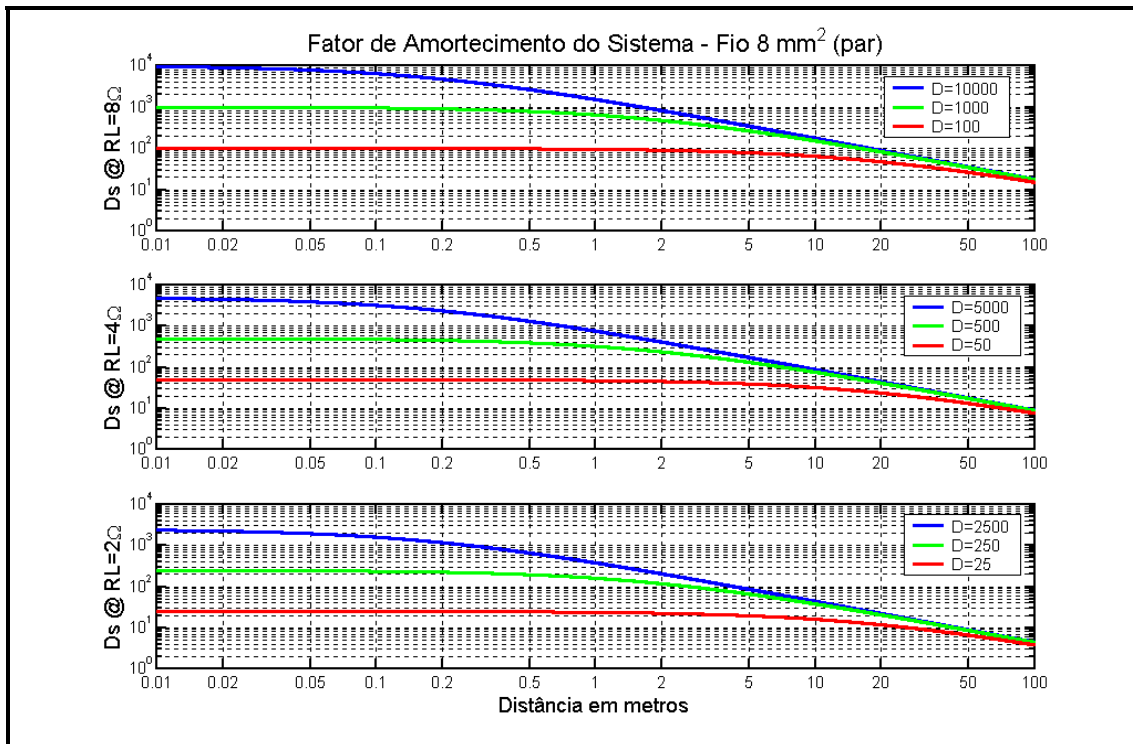


Figura 22 – Fator de amortecimento do sistema (D_s) em função do fator de amortecimento do amplificador (D) e do comprimento do par de fios de cobre de 8 mm²

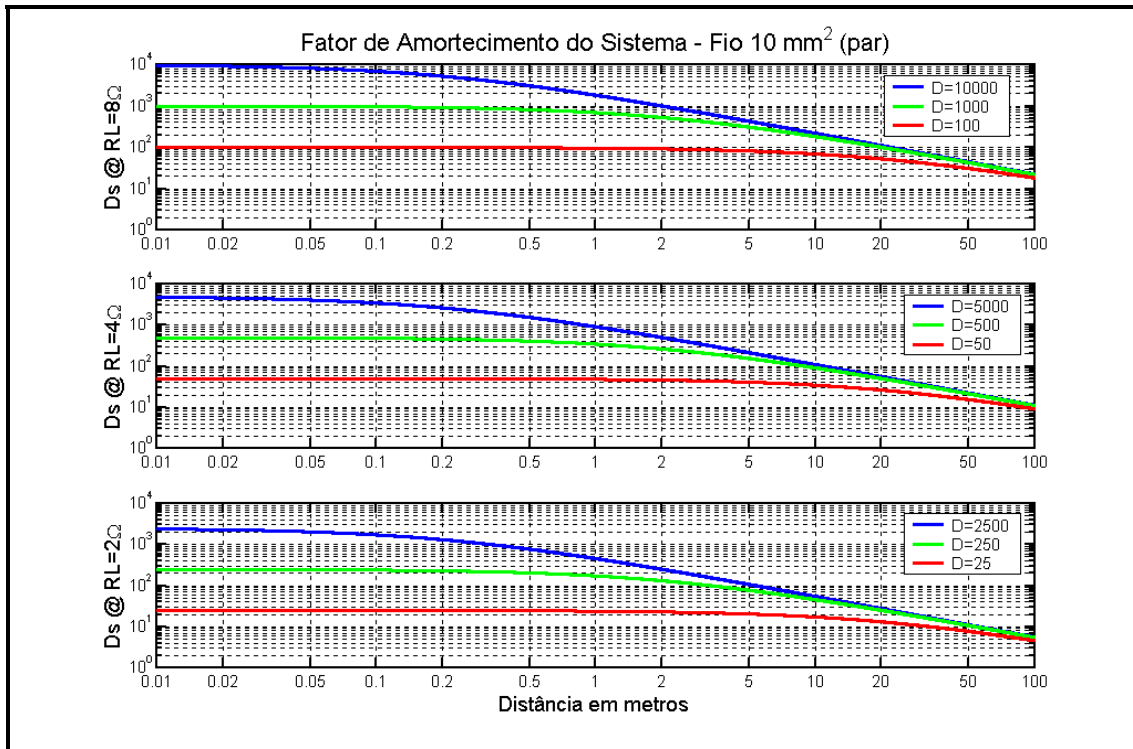


Figura 23 – Fator de amortecimento do sistema (D_s) em função do fator de amortecimento do amplificador (D) e do comprimento do par de fios de cobre de 10 mm^2

Para exemplificar, vamos considerar uma carga com impedância nominal dita de 2Ω . Se utilizarmos um par de fios de 6 mm^2 a uma distância de 5 m (Figura 21), teremos fatores de amortecimento do sistema (D_s) resultantes iguais a, aproximadamente, 20 , 60 e 70 , para amplificadores com fatores de amortecimento (D) iguais a 100 , 1000 e 10000 , respectivamente. Notem que os valores de D_s ficaram na ordem de algumas dezenas (20 a 70) enquanto que os amplificadores têm valores de D entre 100 e 10000 ! E segundo as afirmações de Thiele, qualquer um desses resultados (de D_s) seriam perfeitamente aceitáveis. Além disso, podemos concluir que não há, na prática, qualquer diferença significativa entre se usar amplificadores com baixos ou elevados fatores de amortecimento (D), nas considerações deste trabalho.

Para calcularmos a resistência total de um par de fios de cobre, em função da sua bitola e seu comprimento, usamos a equação abaixo:

$$R_{\text{fio}} = 0,035568 \times \frac{L}{B} \quad (16)$$

Onde L é o comprimento do fio em metros e B é a bitola do fio em mm^2 . A equação (16) já fornece o resultado em ohms e já considera o par de fios.

Conclusão

Os Fatores de Amortecimento especificados em amplificadores de potência nos fornecem, indiretamente, as impedâncias de saída desses equipamentos. Essas impedâncias (aqui tratadas como resistências, por simplificação e sem perda de generalização) podem ter influência direta sobre o alinhamento de caixas acústicas, se suas ordens de grandeza forem significativas em relação às impedâncias de carga. Da mesma forma, os fios que fazem as interligações entre amplificadores e caixas acústicas também têm suas contribuições sobre o resultado final do Fator de Amortecimento do Sistema. Demonstrou-se, aqui, que os elevados (>1000) fatores de amortecimento dos amplificadores de potência têm pouca influência sobre o resultado final, nas considerações deste trabalho.

Agradecimentos

Queremos agradecer a todos que direta, ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho. Ao Prof. Homero Sette pela leitura dos manuscritos e sugestão quanto à inclusão das Figuras 12 e 13.

Biografia do Autor

Rosalfonso Bortoni é Engenheiro Eletrônico pelo INATEL e Mestre em Engenharia Elétrica pela UFSC. Atualmente faz seu Doutorado nessa mesma universidade, integra o Grupo de Pesquisa em Comunicações sem Fio (*Wireless*) do INATEL, é consultor e projetista de equipamentos de áudio, colaborador do IAV e instrutor da Eletrônica Selenium S.A.

Referências Bibliográficas

- [1] A. N. Thiele, "Loudspeakers in Vented Boxes: Parts I and II," I.R.E. Radio and Electronics Engineering Convention, Sydney, March 1961. Publicado também no JAES em 1971 e disponível em AES Loudspeakers Anthology #1;
- [2] Ben Duncan, *High Performance Audio Power Amplifiers*, Newnes, 1997;
- [3] Especificações Técnicas de Alto-falantes (qualquer fabricante);
- [4] Homero Sette, *Análise e Síntese de Alto-falantes e Caixas Acústicas pelo Método de Thiele-Small*, H. Sheldon, 1996;
- [5] Glen Ballou, *Handbook for Sound Engineers: The New Audio Cyclopidia*, Howard W. Sams & Company, First Edition, 1988;
- [6] Catálogos de fabricantes de fios condutores elétricos;
- [7] Ruy Monteiro, comunicações particulares.