Sociedade de Engenharia de Áudio Artigo de Convenção Apresentado na X Convenção Nacional

8 - 10 de Maio de 2006, São Paulo, SP

Este artigo foi reproduzido do original entregue pelo autor, sem edições, correções e considerações feitas pelo comitê técnico deste evento. Outros artigos podem ser adquiridos através da Audio Engineering Society, 60 East 42nd Street, New York, New York 10165-2520, USA, <u>www.aes.org</u>. Informações sobre a seção brasileira podem ser obtidas em <u>www.aesbrasil.org</u>. Todos os direitos reservados. Não é permitida a reprodução total ou parcial deste artigo sem autorização expressa da AES Brasil.

Revisão 04 - 05 - 2006

Atenuação do Som no Ar por Absorção

Homero Sette Silva

Eletrônica Selenium S. A. 92.480-000, Nova Santa. Rita, RS

homero@selenium.com.br

RESUMO

Parte da energia de uma onda sonora, ao propagar-se pelo ar, é absorvida pelo meio, fenômeno que não deve ser confundido com a diluição da energia, causada pelo aumento da distância da fonte, que no caso de uma propagação esférica faz com que a superfície da frente de onda aumente com o quadrado da distância, o que dilui a energia disponível na conhecida taxa de 6 dB com o dobro da distância.

As perdas por absorção, objeto do presente trabalho, geralmente desprezíveis em baixas freqüências, tornam-se significativas na ultima década do espectro de áudio. Alem da dependência com a distância, a freqüência e a temperatura, a atenuação é muito influenciada pela umidade, sendo que valores extremamente baixos de umidade relativa (10 a 20 %) produzem um acentuado pico na atenuação.

A atenuação imposta pelo ar, e a diluição da energia, quando significativas, devem ser calculadas para a determinação do nível de pressão acústica no local, tanto em recintos fechados, quanto abertos.



INTRODUÇÃO

Parte da energia de uma onda sonora, ao propagar-se pelo ar, é absorvida pelo meio, fenômeno que não deve ser confundido com a diluição da energia, causada pelo aumento da distância da fonte, que no caso de uma propagação esférica faz com que a superfície da frente de onda $(4\pi r^2)$ aumente com o quadrado da distância, o que dilui a energia disponível na conhecida taxa de 6 dB com o dobro da distância (caindo para a metade no caso de uma onda cilíndrica).

As perdas por absorção, objeto do presente trabalho, geralmente desprezíveis em baixas freqüências, tornam-se significativas na ultima década do espectro de áudio. Alem da dependência com a distância, a freqüência e a temperatura, a atenuação é muito influenciada pela umidade, sendo que valores extremamente baixos de umidade relativa (10 a 20 %) produzem um acentuado pico na atenuação.

A atenuação imposta pelo ar, e a diluição da energia, quando significativas, devem ser calculadas para a determinação do nível de pressão acústica no local, tanto em recintos fechados, quanto abertos.

Quantidades Usadas na Análise:

 α_0 = Coeficiente de atenuação da relaxação vibratória do oxigênio em Neper/metro

 α_{N} = Coeficiente de atenuação da relaxação vibratória do nitrogênio em Neper/metro

 $\alpha_{_{Np}}$ = Coeficiente de atenuação em Neper/metro

 α_{dB} = Coeficiente de atenuação em dB/metro

- $A_{Npr} =$ Atenuação em Neper a r metros
- $A_{dBr} =$ Atenuação em dB a r metros
- F_{RO} = Freqüência de relaxação do oxigênio em Hz
- F_{RN} = Freqüência de relaxação do nitrogênio em Hz

f = Freqüência em Hz

- h = Concentração molar de vapor de água em %
- H = Umidade relativa do ar em %
- P_S = Pressão atmosférica em Pascal
- $P_{SO} = 101325 = Pressão atmosférica de referência (nível do mar), em Pascal$
- r = distância percorrida pela onda sonora em metros
- T_C = Temperatura em °C

 $T = 273,15 + T_C =$ Temperatura em Kelvin

 $T_{20} = 273,15 + 20 = 293,15 =$ Temperatura de Referência em Kelvin

 $T_T = 273,15 + 0,01 = 273,16 =$ Temperatura do ponto Triplo da água, em Kelvin (onde os estados sólido, liquido e gasoso podem coexistir em equilíbrio termodinâmico estável. A pressão atmosférica deve ser igual a 611,73 Pascal, o que equivale a 6 Milibares ou 0,006037 atmosferas).

Equacionamento

As equações utilizadas foram obtidas na referência (2) e estão organizadas conforme abaixo.

A concentração molar do vapor d'água **h** é dada pela equação (1.2), que depende da umidade relativa H (em %), do cociente entre a pressão de referência P_{SO} (igual a 101325 Pascal) e a pressão atmosférica P_S , também em Pascal, alem do expoente X, dado pela equação (1.1), função da temperatura T do ar e da temperatura do ponto triplo T_T da água, ambas em Kelvin, temperaturas essas já definidas anteriormente. O expoente X é representado separadamente para facilitar a notação da equação (1.2).

$$X = 10,79586 \cdot \left(1 - \frac{T_T}{T}\right) - 5,02808 \cdot Log_{10}\left(\frac{T}{T_T}\right) + \dots$$

As Figs. 1 a 3 mostram, respectivamente, os comportamentos com a temperatura das quantidades T/TT, 1 - T/TT e $Log_{10}(1 - T/TT)$ que determinam o aspecto de **X**, mostrado na Fig. 4, onde constatamos que essa variável cresce com a temperatura embora assuma valores negativos ao longo da faixa de temperatura representada, que foi de 0 a 50 °C.

A concentração molar de vapor de água h, em %, é dada pela equação (1.2).

O valor de h será importante para o cálculo das freqüências de relaxação do oxigênio e do nitrogênio.

Como podemos constatar, h é diretamente proporcional à umidade relativa do ar H, em %, inversamente proporcional à pressão atmosférica P_S e varia exponencialmente com X. As dependências de h com a temperatura e a pressão atmosférica podem ser vistas, respectivamente, nas Figs. 5 e 6.

(1.2)
$$h = H \cdot \frac{P_{SO}}{P_S} \cdot 10^X$$

Como uma onda sonora provoca uma variação de pressão no ar, o meio é comprimido e rarefeito durante a propagação, processo que introduz uma perda de energia sonora, uma vez que o ar não é um meio elástico perfeito.

"A viscosidade e a condução de calor são os efeitos dominantes no mecanismo da absorção somente nos gases monoatômicos. Nos gases diatômicos e poliatômicos o mecanismo principal é conhecido como relaxação térmica molecular.", conforme em ⁽³⁾.

Assim, a absorção do som no ar é muito influenciada pelo comportamento das moléculas de oxigênio e de nitrogênio, expresso por suas freqüências de relaxação dadas, respectivamente, pelas equações (1.3) e (1.4), abaixo.

(1.3)
$$F_{RO} = \frac{P_s}{P_{sO}} \cdot \left(24 + 4,41 \cdot 10^4 \cdot h \cdot \frac{0,05 + h}{0,391 + h} \right)$$

(1.4)
$$F_{RN} = \frac{P_s}{P_{so}} \cdot \sqrt{\frac{T_{20}}{T}} \cdot \left\{9 + 350 \cdot h \cdot e^{-6.142 \left[\sqrt[3]{\frac{T_{20}}{T}} - 1\right]}\right\}$$



As Figs. 7 e 11 mostram, respectivamente, que as freqüências de relaxação do oxigênio e do nitrogênio crescem com a concentração molar do vapor d'água, h, em porcentagem, e com a pressão atmosférica.

Nas Figs. 8 e 12 podemos constatar que as freqüências de relaxação do oxigênio e do nitrogênio elevam-se com a temperatura, sofrendo a do oxigênio pequeno decréscimo com o aumento da pressão atmosférica (tanto que a escala da temperatura teve que ser expandida, para que as curvas da pressão não ficassem sobrepostas) enquanto que a freqüência de relaxação do nitrogênio sofreu pequeníssimo acréscimo com o aumento da pressão.

Embora as duas freqüências de relaxação variem diretamente com a pressão atmosférica (devido ao termo P_s/P_{so}), existe uma dependência implícita com a pressão através de h, cujo valor diminui com o aumento da pressão.



Fig. 5 – Variação de h com a temperatura, para sete valores de pressão atmosférica e 40 % de umidade relativa do ar.

Fig. 6 – Variação de h com a pressão atmosférica, para sete valores de temperatura e 40 % de umidade relativa do ar.

As Figs. 9 e 13 mostram, respectivamente, que F_{RO} e F_{RN} aumentam com a temperatura, enquanto que F_{RO} sofre pequena redução com a pressão atmosférica enquanto que F_{RN} apresenta pequeníssimo aumento com a pressão.

Consultando as Figs. 10 e 14 vemos que F_{RO} e F_{RN} aumentam com a umidade relativa e a temperatura.

Os coeficientes da atenuação do som no ar, devidos ao oxigênio e ao nitrogênio são dados, respectivamente, em Neper/metro, pelas equações (1.5) e (1.6).

(1.5)
$$\alpha_{\rm o} = 0,01275 \cdot f^2 \cdot \left(\frac{T_{20}}{T}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{2239,1}{T}}}{F_{\rm RO} + \frac{f^2}{F_{\rm RO}}}\right)$$

(1.6)
$$\alpha_{\rm N} = 0,1068 \cdot f^2 \cdot \left(\frac{T_{20}}{T}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{3352}{T}}}{F_{\rm RN} + \frac{f^2}{F_{\rm RN}}}\right)$$

Observando as equações (1.5) e (1.6) vemos que os coeficientes de atenuação devidos ao oxigênio e ao nitrogênio sofrem uma forte dependência com a freqüência, uma vez que essa componente entra ao quadrado, mas, conforme veremos adiante, para freqüências superiores às suas respectivas relaxações, esses coeficientes tornam-se constantes com a freqüência.

Nas Figs. 15 a 18 temos a representação de α_0 , que é a parcela do coeficiente de atenuação do som no ar, devido à freqüência de relaxação do oxigênio, tendo a freqüência sido mantida constante em 10 kHz.

A Fig. 16 mostra que α_0 pode aumentar ou diminuir com a temperatura e sofrer pequenos acréscimos ou decréscimos, com a pressão atmosférica. A Fig. 17 foi expandida, para facilitar a observação, de modo

que podemos ver que α_0 passa por pontos de máximo entre 4 e 6 °C, para valores de pressão atmosférica variando de 700 a 1013 milibares. Nos dois casos a umidade relativa do ar foi igual a 50 %. Nessas condições, em torno de 3,5 °C o valor de α_0 variou muito pouco com a pressão.

A Fig. 18 mostra uma acentuada dependência da atenuação com a umidade, que é devida ao termo $\left(e^{-\frac{2239,1}{T}}\right) / \left(F_{RO} + \frac{f^2}{F_{RO}}\right)$, que contem a freqüência de relaxação do oxigênio, conforme podemos ver na Fig. 35. Na Fig. 36 vemos que o termo correspondente em α_N não causa um efeito semelhante.

Na Fig. 19 temos a representação de α_N , que é a parcela do coeficiente de atenuação do som no ar, devido à freqüência de relaxação do nitrogênio, que aumentou com a temperatura e sofreu um acréscimo insignificante com a pressão atmosférica, fato este que foi confirmado na Fig. 20 onde as sete curvas para diferentes valores de pressão, compreendidos entre 700 e 1013 milibares superpuseram-se, o que pode ser confirmado na vista explodida representada na Fig. 21.

Quanto à umidade, α_N cresceu com essa variável e aumentou com a temperatura, como podemos ver na Fig. 22, sem os pontos de máximo que aconteceram em α_0 .

Na Fig. 23 vemos o comportamento de α_0 com a freqüência, em função da umidade relativa do ar, para temperatura e pressão atmosférica constantes. O coeficiente α_0 aumenta com a freqüência. Para umidade relativa igual a 0 (ar seco) o valor de α_0 será nulo, não contribuindo para a atenuação do sinal.

Nas Figs. 24 e 25 temos o comportamento de α_0 com a freqüência, em função da temperatura, para umidade e pressão atmosférica constantes. Inicialmente, α_0 aumenta com o quadrado da freqüência e depois praticamente torna-se constante. Isso ocorre quando f $\gg F_{RO}$ situação em que a equação (1.5) transforma-se em (1.7), que é independente da freqüência.

(1.7)
$$\alpha_{\rm O} = 0.01275 \cdot \left(\frac{T_{20}}{T}\right)^{2.5} \cdot F_{\rm RO} \cdot e^{-\frac{2239.1}{T}}$$
 válida para f $\gg F_{\rm RO}$

Fato semelhante vai acontecer com α_N , dado por (1.6), que se transformará em (1.8), conforme podemos ver nas Figs. 26, 27 e 28.

(1.8)
$$\alpha_{\rm N} = 0.1068 \cdot \left(\frac{T_{20}}{T}\right)^{2.5} \cdot F_{\rm RN} \cdot e^{-\frac{3352}{T}}$$
 válida para f $\gg F_{\rm RN}$

Os coeficientes da atenuação total, em Neper/metro e dB/metro, estão representados nas equações (1.9) e (1.11), respectivamente e serão usados para calcular a atenuação do som no ar a uma certa distância da fonte.

(1.9) $\alpha_{Np} = \alpha_F + \alpha_O + \alpha_N$ onde α_F é dado por (1.10), e não depende da umidade do ar.

(1.10)
$$\alpha_{\rm F} = 1.84 \cdot 10^{-11} \cdot f^2 \cdot \left(\frac{P_{\rm SO}}{P_{\rm S}}\right) \cdot \sqrt{\frac{T}{T_{20}}}$$

$$(1.11) \quad \alpha_{dB} = 20 \cdot \text{Log}_{10}(e) \cdot \alpha_{Np} \simeq 8,6859 \cdot \alpha_{Np}$$

Na Fig. 29 vemos que $\alpha_{\rm F}$ aumenta acentuadamente com a freqüência e muito pouco com a temperatura, diminuindo com a pressão, conforme a Fig. 30. Essas conclusões são confirmadas nas Figs. 31 e 32. As Figs. 33 e 34 mostram o comportamento do coeficiente de atenuação do ar, $\alpha_{\rm Np}$, em Neper/metro,

em função da temperatura e de suas componentes α_0 , α_F e α_N , para 50 % de umidade relativa do ar, freqüência de 10 kHz e pressão atmosférica, respectivamente igual a 1013 e 700 milibares.

Como podemos constatar, a componente dominante é $\alpha_{_{\rm O}}$, seguida de $\alpha_{_{\rm F}}$ e $\alpha_{_{\rm N}}$.

Nas Figs. 37 e 38 temos a representação de $\alpha_{_{Np}}$, e de suas componentes, em escala loglog, em função da freqüência.

O coeficiente de atenuação α_{Np} , em Neper/metro, é praticamente igual a α_N , até um pouco antes da freqüência de relaxação do nitrogênio, F_{RN} .

Daí em diante, α_{Np} tende para α_{O} , até a freqüência de relaxação do oxigênio, F_{RO}, a partir da qual passa a confundir-se com α_{E} , geralmente já na região de ultra-som.

Para obtermos a atenuação total, a uma dada distância \mathbf{r} (em metros), basta multiplicar o coeficiente de atenuação pela distância desejada, conforme (1.12) e (1.13).

(1.12) $A_{Npr} = r \cdot \alpha_{Np}$; (1.13) $A_{dBr} = r \cdot \alpha_{dB}$

A absorção do som, pelo ar, influencia no tempo de reverberação em recintos de volumes elevados (ou nas altas freqüências mesmo em pequenos ambientes), de acordo com a equação (1.14).

(1.14)	$T = \frac{0,161 \cdot V}{1}$	$T_{R} =$ Tempo de reverberação em s
	$A_{R} = A + 8 \cdot \alpha_{Np} \cdot V$	$V = Volume do recinto, em m^3$
		A = Superfície do recinto em m^2

Tabela 1 – Comportamento das variáveis envolvidas na atenuação do som, no ar.									
Variáveis Explícitas									
Х	h	F _{RO}	F _{RN}	$\alpha_{\rm F}$	Î	αο	$\alpha_{_{N}}$	$\boldsymbol{\alpha}_{_{Np}}$, $\boldsymbol{\alpha}_{_{dB}}$	A_{Npr} , A_{dBr}
T^{\nearrow}	T^{\nearrow}	h	h	f^{\nearrow}		$f_{\rightarrow}^{\nearrow}$	$\mathrm{f}^{\nearrow}_{\rightarrow}$	\mathbf{f}^{\nearrow}	\mathbf{f}^{\nearrow}
	H^{\nearrow}	P_s^{\nearrow}	$\leftarrow P_s$	$P_{s\searrow}$		F _{RO} ∖∠	F_{RNS}	F _{RO} S	F _{RO}
	$P_{s \searrow}$		$T \rightarrow$	$T \rightarrow$	•	T	T	F _{RN}	F _{RN}
									T
									r
			V	ariáveis	Imp	lícitas			•
Х	h	F_{RO}	F_{RN}	$\alpha_{_{\rm F}}$		α_{o}	$\alpha_{_N}$	$\boldsymbol{\alpha}_{_{Np}}$, $\boldsymbol{\alpha}_{_{dB}}$	$A_{_{Npr}}$, $A_{_{dBr}}$
T^{\nearrow}	T^{\nearrow}	T^{\nearrow}	T^{\nearrow}	f^{\nearrow}		$f_{\rightarrow}^{\nearrow}$	$f_{\rightarrow}^{\nearrow}$	\mathbf{f}^{\nearrow}	\mathbf{f}^{\nearrow}
	H^{\nearrow}	H^{\nearrow}	H^{\nearrow}	P _s		$T \searrow$	T	T	T
	$P_{s \searrow}$	$\leftarrow P_s$	$P_s \rightarrow$	$T \rightarrow$		H^{\nearrow}_{\searrow}	H^{\nearrow}	H^{\nearrow}_{\searrow}	H_{\searrow}^{\nearrow}
$\leftarrow \mathbf{P}_{\mathrm{S}} \rightarrow \qquad \mathbf{P}_{\mathrm{S}} \rightarrow \qquad \mathbf{P}_{\mathrm{S}}$								$P_{s\searrow}^{\nearrow}$	$P_{s\searrow}^{\nearrow}$
Variações									
	7					\rightarrow		\leftarrow	
Direta significativa		Inv	Inversa significativa		I	Direta insignificante		Inversa insignificante	
2			$\leftarrow \rightarrow$			\nearrow		∕ ←	
Direta significativa.		Dire	Direta insignificante,			Direta signific	ativa,	Direta significativa,	
Inversa significativa		a Inve	Inversa insignificante			Direta insignif	icante	Inversa insignificante	



Fig. 7 – Freqüência de Relaxação do Oxigênio, em função de h, para sete valores de pressão atmosférica.



Fig. 9 – Freqüência de Relaxação do Oxigênio, em função da pressão atmosférica, para sete valores de temperatura e 40 % de umidade relativa do ar.



Fig. 8 – Freqüência de Relaxação do Oxigênio, em função da temperatura, para sete valores de pressão atmosférica e 40 % de umidade relativa do ar.



Fig. 10 – Freqüência de Relaxação do Oxigênio, em função da umidade relativa, para sete valores de temperatura e pressão atmosférica igual a 1013 mb.



Fig. 11 – Frequencia de Relaxação do Nitrogenio, en função de h, para sete valores de pressão atmosférica.



Fig. 13 – Freqüência de Relaxação do Nitrogênio, em função da pressão atmosférica, para sete valores de temperatura e 40 % de umidade relativa do ar.



Fig. 12 – Freqüência de Relaxação do Nitrogênio, em função da temperatura, para sete valores de pressão atmosférica e 40 % de umidade relativa do ar.



Fig. 14 – Freqüência de Relaxação do Nitrogênio, em função da umidade relativa, para sete valores de temperatura e pressão atmosférica igual a 1013 mb.



Fig. 15 – α_0 , em função da pressão atmosférica, para sete valores de temperatura, com 50 % de umidade relativa do ar e 10 kHz.



Fig. 17 – α_0 , em função da temperatura, para sete valores de pressão atmosférica, com 50 % de umidade relativa do ar e 10 kHz, representação expandida.



Fig. 16 – α_0 , em função da temperatura, para sete valores de pressão atmosférica, com 50 % de umidade relativa do ar e 10 kHz.



Fig. 18 – α_0 , em função da umidade relativa do ar, para sete valores de temperatura, pressão atmosférica igual a 1013 milibares.



Fig. 19 – $\alpha_{\rm N}$, em função da pressão atmosférica, para sete valores de temperatura, com 50 % de umidade e 10 kHz.



Fig. 21 – $\alpha_{\rm N}$, em função da temperatura, para sete valores de pressão atmosférica, com 50 % de umidade relativa do ar e 10 kHz, representação expandida.



Fig. 20 – α_N , em função da temperatura, para sete valores de pressão, com 50 % de umidade do ar e 10 kHz.



Fig. 22 – α_N , em função da umidade do ar, para sete valores de temperatura, e pressão igual a 1013 milibares.



Fig. 23 – α_0 , em função da freqüência, para sete valores de umidade, a 40 °C e 1013 milibares.



Fig. 25 – α_0 , em função da freqüência, para sete valores de temperatura, a 15 % de umidade e 1013 milibares.



Fig. 24 – α_0 , em função da freqüência, para sete valores de temperatura, a 15 % de umidade e 1013 milibares.



Fig. 26 – α_N , em função da freqüência, para sete valores de umidade, a 40 °C e 1013 milibares.



Fig. 27 – $\alpha_{\rm N},$ em função da freqüência, para sete valores de temperatura, a 15 % de umidade e 1013 milibares.



Fig. 29 – α_F , em função da freqüência, para sete valores de temperatura, a 15 % de umidade e 1013 milibares.



Fig. 28 – $\alpha_{\rm N}$, em função da freqüência, para sete valores de temperatura, a 15 % de umidade e 1013 milibares.



Fig. 30 – α_F , em função da freqüência, para sete valores de pressão, a 40 °C e 1013 milibares.



Fig. 31 – $\alpha_{\rm F}$, em função da pressão atmosférica, para sete valores de temperatura, e freqüência igual a 10 kHz.



Fig. 33 – $\alpha_{\rm Np}$, em função de suas componentes e da temperatura, para 50 % de umidade, 10 kHz e 1013 mb.



Fig. 32 – $\alpha_{\rm F}$, em função da temperatura, para sete valores de pressão atmosférica, e freqüência igual a 10 kHz.



Fig. 34 – α_{Np} , em função de suas componentes e da temperatura, para 50 % de umidade, 10 kHz e 700 mb.



Fig. 35 – Componente de $\alpha_{\rm O}$ responsável pelos pontos de atenuação máxima.





freqüência, para 25 °C e 15 % de umidade relativa do ar, mostrando a freqüência de relaxação do nitrogênio.



Fig. 36 – A componente correspondente de $\alpha_{\rm N}$ não produz picos na atenuação.



Fig. 38 – $\alpha_{\rm Np}$ e suas componentes, em função da

freqüência, para 25 °C e 15 % de umidade, mostrando as freqüências de relaxação do nitrogênio e do oxigênio.

Exemplo:

A atenuação por absorção do ar, a 25 metros de distância, na freqüência de 10 kHz, ao nível do mar, a uma temperatura de 40° C com 60 % de umidade relativa pode ser obtida conforme abaixo.

$$\begin{split} T &= 273,15 + T_C = 273,15 + 40 = 313,15 \text{ K} \\ X &= 10,79586 \cdot \left(1 - \frac{273,16}{313,15}\right) - 5,02808 \cdot \text{Log}_{10} \left(\frac{313,15}{273,16}\right) + ... \\ &+ 1,50474 \cdot 10^{-4} \cdot \left[1 - 10^{-8,29692} \left(\frac{313,15}{273,16} - 1\right)\right] + ... \\ &+ 0,42873 \cdot 10^{-3} \cdot \left[-1 + 10^{4,76955} \left(1 - \frac{273,16}{313,15}\right)\right] - 2,2195983 \\ X &= 10,79586 \cdot (1 - 0,8723) - 5,02808 \cdot \text{Log}_{10} (1,1464) + ... \\ &+ 1,50474 \cdot 10^{-4} \cdot \left[1 - 10^{-1,2147}\right] + ... \\ &+ 0,42873 \cdot 10^{-3} \cdot \left[-1 + 10^{0,6091}\right] - 2,2195983 \\ X &= 1,3787 - 0,2984 \cdot \text{Log}_{10} (1,1464) + ... \\ &+ 1,50474 \cdot 10^{-4} \cdot \left[1 - 10^{-8,29692(1,1464 - 1)}\right] + ... \end{split}$$

+ 0,42873
$$\cdot 10^{-3} \cdot \left[-1 + 10^{4,76955 \cdot (1 - 0,8723)} \right] - 2,2195983$$

$$X = 1,3786 - 0,2983 + \dots$$

+
$$1,50474 \cdot 10^{-4} \cdot [0,9390] + \dots$$

+ 0,42873
$$\cdot 10^{-3} \cdot [3,0652] - 2,2195983$$

 $X = 1,0803 + \dots$

$$+ 1,4130 \cdot 10^{-4} + \dots$$

+ $1,3141 \cdot 10^{-3}$ - 2,2195983

X = -1,1378

h =
$$H \cdot \frac{P_{so}}{P_s} \cdot 10^x = 60 \cdot \frac{101325}{101325} \cdot 10^{-1,1378} = 4,3695$$

$$F_{RO} = \frac{P_{S}}{P_{SO}} \cdot \left(24 + 4,41 \cdot 10^{4} \cdot h \cdot \frac{0,05 + h}{0,391 + h} \right) = 1 \cdot \left(24 + 4,41 \cdot 10^{4} \cdot 4,3695 \cdot \frac{0,05 + 4,3695}{0,391 + 4,3695} \right)$$

 $F_{RO} = 178870 \text{ Hz}$

$$F_{RN} = \frac{P_{S}}{P_{SO}} \cdot \sqrt{\frac{T_{20}}{T}} \cdot \left\{9 + 350 \cdot h \cdot e^{-6,142 \cdot \left[\sqrt[3]{\frac{T_{20}}{T}} - 1\right]}\right\} = 1 \cdot \sqrt{\frac{293,15}{313,15}} \cdot \left\{9 + 350 \cdot 4,3695 \cdot e^{-6,142 \cdot \left[\sqrt[3]{\frac{293,15}{313,15}} - 1\right]}\right\}$$

$$F_{RN} = 0.9675 \cdot \left\{9 + 350 \cdot 4.3695 \cdot e^{-6.142 \cdot [-0.02176]}\right\} = 0.9675 \cdot \left\{9 + 350 \cdot 4.3695 \cdot e^{0.1336}\right\}$$

 $\mathrm{F_{RN}} \ = \ 0,9675 \cdot \left\{9 \ + \ 1747,92\right\} \ = \ 1699,5 \ \mathrm{Hz}$

$$\alpha_{0} = 0,01275 \cdot f^{2} \cdot \left(\frac{T_{20}}{T}\right)^{2,5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{2239,1}{T}}}{F_{RO} + \frac{f^{2}}{F_{RO}}}\right) = 0,01275 \cdot 10000^{2} \cdot \left(\frac{293,15}{313,15}\right)^{2,5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{2239,1}{313,15}}}{178870 + \frac{10000^{2}}{178870}}\right)^{2,5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{2239,1}{313,15}}\right)^{2,5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{2239,1}{313$$

 $\alpha_{\rm o} = 0.01275 \cdot 10000^2 \cdot 0.8479 \cdot \left(\frac{0.0007847}{178870 + 559.065}\right) = 1081072, 5 \cdot \left(4.373 \cdot 10^{-9}\right) = 0.004727 \text{ Np/m}$

$$\alpha_{\rm N} = 0.1068 \cdot f^2 \cdot \left(\frac{T_{20}}{T}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{3352}{T}}}{F_{\rm RN} + \frac{f^2}{F_{\rm RN}}}\right) = 0.1068 \cdot 10000^2 \cdot \left(\frac{293.15}{313.15}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{3352}{313.15}}}{1699.5 + \frac{10000^2}{1699.5}}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{3352}{313.15}}}{1699.5 + \frac{10000^2}{1699.5}}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{3352}{313.15}}}{1699.5 + \frac{10000^2}{1699.5}}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{3352}{313.15}}}{1699.5 + \frac{10000^2}{1699.5}}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{1000}{313.15}}}{1699.5 + \frac{10000^2}{1699.5}}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{10000}{313.15}}}{1699.5 + \frac{10000^2}{1699.5}}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{10000}{313.15}}}{1699.5 + \frac{10000^2}{1699.5}}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{10000}{313.15}}}{1699.5 + \frac{10000^2}{1699.5}}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{1000}{313.15}}}{1699.5 + \frac{10000^2}{1699.5}}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{1000}{313.15}}}{1699.5 + \frac{10000^2}{1699.5}}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{1000}{313.15}}}{1699.5 + \frac{10000^2}{1699.5}}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{1000}{313.15}}}{1699.5 + \frac{10000}{1699.5}}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{1000}{313.15}}}{1699.5 + \frac{10000}{1699.5}}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{1000}{313.15}}}{1699.5 + \frac{10000}{1699.5}}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{1000}{313.15}}}{1699.5 + \frac{10000}{1699.5}}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{1000}{313.15}}}{1699.5 + \frac{1000}{1699.5}}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{1000}{313.15}}}{1699.5 + \frac{10000}{1699.5}}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{e^{-\frac{1000}{313.15}}}{1699.5 + \frac{10000}{1699.5}}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{1000}{1699.5}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{1000}{1699.5}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{1000}{1699.5}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{1000}{1699.5}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{1000}{1699.5}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{1000}{1699.5}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{1000}{169.5}\right)^{2.5} \cdot \left(\frac{1000}{169.5}\right)$$

$$\alpha_{\rm N} = 0,1068 \cdot 10000^2 \cdot 0,8479 \cdot \left(\frac{0,00002245}{60540,33}\right) = 0,1068 \cdot 10000^2 \cdot 0,8479 \cdot 3,7086 \cdot 10^{-10}$$

 $\alpha_{_N} = 0.003358 \text{ Np/m}$

$$\alpha_{Np} = 1,84 \cdot 10^{-11} \cdot f^2 \cdot \left(\frac{P_{SO}}{P_S}\right) \cdot \sqrt{\frac{T}{T_{20}}} + \alpha_O + \alpha_N$$

$$\alpha_{Np} = 1,84 \cdot 10^{-11} \cdot 10000^2 \cdot \left(\frac{101325}{101325}\right) \cdot \sqrt{\frac{313,15}{293,15}} + 0,004727 + 0,003358$$

$$\alpha_{Np} = 1.84 \cdot 10^{-11} \cdot 10000^2 \cdot 1.0336 + 0.004727 + 0.003358 = 0.009988 \text{ Np/m}$$

 $\alpha_{dB} = 20 \cdot Log_{10}(e) \cdot \alpha_{ND} \simeq 8,6859 \cdot \alpha_{ND} = 8,6859 \cdot 0,009988 = 0,08676 \text{ dB/m}$

 $A_{Npr} = r \cdot \alpha_{Np} = 25 \cdot 0,009988 = 0,2497$ Neper

 $A_{dBr} = r \cdot \alpha_{dB} = 25 \cdot 0,08676 = 2,169 \text{ dB}$

	Atenuação Ar				
Γ	Atenuação do Ar				Fechar / Sair
	1 - Temperatura Ambiente (ºC) <mark>40,00</mark>	Aceita	Contador 0	Frequencia (Hz)	Distancia (m) 25,000
	2 - Pressão Atmosf. (mBar) 1013,00	Aceita	Coef Alfa (Np/m) 0,0100	Coef (dB/m) 0,0868	Atenuação Total (dB) 2,1689
	3 - Umidade Relativa (%) <mark>60,00</mark> 4 Distancis Descieda (metros)	Aceita	Freq Relax 02 (Hz) :	Alfa O2 (Np/m) :	
	25,000 5 Frequencia (Hertz)	Aceita	Freq. Relax Ni (Hz) : 1699,54	Alfa Ni (Np/m) :	
	10000,00	Aceita			
	Calcular Transfere	Recalcular			

Fig. 39 – Tela gerada pelo programa Air Aten.

Software

Os cálculos anteriores são bastante trabalhosos para serem feitos sem a ajuda de um computador.

O autor desenvolveu uma rotina no Matlab, que foi convertida pelo Eng. Walter Ullmann em um programa compilado em C que está disponível no site da Selenium <u>www.selenium.com.br</u> em \Trabalhos\AES.

O arquivo comprimido deve ser copiado para um diretório à escolha do usuário e ali descompactado. Basta rodar o arquivo executável (que necessita dos demais arquivos que o acompanham).

Na Fig. 39 vemos a tela do programa, com os valores do exemplo, e na Tabela 2 temos uma listagem, colocada na área de transferência, através do botão Transfere.

Tabela 2 - Resultados obtidos com o Programa Air Aten								
Temp. °C	P. Atm. mB	Umidade %	Distância m	Freqüência Hz	α _{Np} Np/m	A _{Npr} Np	$lpha_{_{dB}}$ dB/m	A _{dBr} dB
40,00	1013,00	60,00	25,000	10000,00	0,00999	0,2497	0,08676	2,1689

Gráficos em 3D

Utilizando o programa desenvolvido no MatLab diversas figuras foram geradas de modo a permitir uma melhor visualização do comportamento da atenuação em função da temperatura e da umidade.

O que mais chama a atenção é o acentuado pico no coeficiente de atenuação (e, por conseguinte, na atenuação a uma distância qualquer) que acontece para baixos valores de umidade relativa e elevados valores de temperatura, o que pode ser visto nas representações tri dimensionais das Figs. 39 a 42.

Gráficos em 2D

Na Fig. 44 vemos a representação do coeficiente de atenuação do ar α_{dB} , em dB por metro, em função da umidade relativa do ar, para diversos valores de freqüência variando de 1 k Hz a 21 kHz. Nesses gráficos, onde a pressão atmosférica foi mantida igual a 1013 milibares e a temperatura valia 40 °C, fica evidente a elevada atenuação que ocorre em uma faixa de baixos valores de umidade.

De um modo geral, a atenuação aumenta com a freqüência.

A Fig. 45 representa, também, o coeficiente de atenuação, mas expresso em Neper por metro.

As Figs. 46 a 49, semelhantes à Fig. 44, representam α_{dB} para temperaturas de 0, 10, 20 e 30 °C onde constatamos que o pico da atenuação fica mais aguçado com a elevação da temperatura.

A Fig. 50 representa o comportamento do coeficiente de atenuação α_{dB} , em dB/m, em função da temperatura e da umidade, para uma pressão atmosférica de 1013 milibares e freqüência igual a 10 kHz. Nesse gráfico podemos ver que uma variação na umidade do ar de 0 para 5 % alterou acentuadamente o coeficiente de atenuação. No entanto, valores de umidade assim tão baixos provavelmente não serão encontrados em situações freqüentes.

Na Fig. 51 vemos o comportamento ainda de α_{dB} , para uma pressão atmosférica de 1013 milibares e temperatura igual a 40 °C.

As Figs. 52 e 53 mostram o comportamento de α_{dB} , respectivamente em função da freqüência e da pressão atmosférica, para 40 % de umidade relativa enquanto que as Figs. 54 e 55 ilustram, os comportamentos da referida variável em função da pressão atmosférica, para 10 kHz, respectivamente para 20 % e 40 % de umidade relativa do ar.

Representação em três dimensões do coeficiente de atenuação em dB/m para as seguintes condições: Temperatura = 40 °C; Umidade Relativa = 60 %; Pressão Atmosférica = 1013 milibares; Freq. = 10 kHz.





Fig. 40 – Gráfico 3D com o coeficiente de atenuação visto de topo. Quanto mais clara a cor, maior o valor.

Fig. 41 – Representação em 3D do coeficiente de atenuação que é máximo no ar seco e quente.



Fig. 42 – Representação em 3D do coeficiente de atenuação que é máximo no ar seco e quente. Vista de outro ângulo.



Fig. 43 – Representação em 3D do coeficiente de atenuação que é máximo no ar seco e quente. Vista de outro ângulo.



Coeficientes de Atenuação em dB/m para 1013 milibares, em função da umidade e da freqüência.



Coeficientes de Atenuação em dB/m para 1013 milibares, em função da umidade e da freqüência.







Fig. 50 - Representação do coeficiente de atenuação em dB/m, em função da temperatura e da umidade para as seguintes condições: Pressão Atmosférica = 1013 milibares e Freqüência = 10 kHz.



Fig. 51 - Representação do coeficiente de atenuação em dB/m, em função da freqüência e da umidade para as seguintes condições: Pressão Atmosférica = 1013 milibares e Temperatura = 40 °C.

Representação do coeficiente de atenuação em dB/m, para 40 % de Umidade Relativa.



Representação do coeficiente de atenuação em dB/m, em função da pressão atmosférica e da temperatura, para 10 kHz.



Atenuação com a Distância, em dB

A absorção do ar pode produzir profundas alterações na equalização do sinal em função da freqüência, da distância, da temperatura e da umidade do ar.

Quanto maiores a freqüência e a distância, mais acentuada será a atenuação.

Na Fig. 56 vemos o que aconteceria com sinais de 2 Hz a 20 kHz propagando-se por distâncias compreendidas entre 1 e 100 metros, para 50 % de umidade, 30 °C de temperatura e 1013 milibares de pressão atmosférica.

A 25 m de distância teremos uma atenuação por absorção de aproximadamente 2 dB em 9 kHz que sobe para 8 dB nessa mesma freqüência.



Fig. 56 – Atenuação por absorção, em dB, em função da freqüência, para distâncias variando de 1 a 100 metros, com 60 % de umidade relativa do ar, 30 °C de temperatura e pressão atmosférica igual a 1013 milibares.



Fig. 57 – Atenuação por divergência, em dB, para fontes esféricas (diluição da energia), em função da freqüência, para distâncias variando de 1 a 100 metros.



Fig. 58 – Atenuação por divergência, em dB, para fontes cilíndricas (diluição da energia), em função da freqüência, para distâncias variando de 1 a 100 metros.



Fig. 59 – Atenuação total em dB, por absorção e diluição, para fonte esférica, em função da freqüência, para distâncias variando de 1 a 100 metros, com 60 % de umidade, 30 °C de temperatura e pressão atmosférica igual a 1013 milibares.

No entanto, não podemos nos esquecer que, alem da atenuação pela absorção do som no ar, existe a atenuação por divergência, ou seja, pela diluição da energia que se distribui por uma frente de onda cada vez maior.

Para os casos de fontes esféricas e cilíndricas essas atenuações, em função da distância, são dadas, respectivamente, pelas equações (1.15) e (1.16), que estão representadas nas Figs. 57 e 58.

(1.15) $A_{dB} = 20 \cdot \log_{10}(r)$ para fonte esférica e (1.16) $A_{dB} = 10 \cdot \log_{10}(r)$ para fonte cilíndrica



Fig. 60 – Atenuação total em dB, por absorção e diluição, para fonte cilíndrica, em função da freqüência, para distâncias variando de 1 a 100 metros, com 60 % de umidade, 30 °C de temperatura e pressão atmosférica igual a 1013 milibares.

Uma onda esférica seria resultante de uma fonte pontual, irradiando em campo livre. Na prática, a onda gerada por uma caixa acústica em campo livre, onde o cociente entre seu perímetro e o comprimento de onda da maior freqüência de interesse é muito pequeno, satisfaz esse requisito. As caixas destinadas à reprodução dos graves geralmente enquadram-se nessa situação, pelo menos quando analisadas individualmente, o que pode não ser o caso de uma "parede" de caixas, pelas suas avantajadas dimensões.

A reflexão do chão é um fator que altera a atenuação por diluição da energia, mas, pela facilidade em estimá-la costuma-se desconsiderar esse fato, admitindo-se uma atenuação que aumenta em 6 dB cada vez que a distância dobra. As ondas cilíndricas seriam aquelas geradas por sistemas do tipo line array, quando ideais, o que daria uma atenuação de 3 dB com o dobro da distancia.



Fig. 61 – Atenuação por absorção, em dB, em função da freqüência, para distâncias variando de 1 a 100 metros, com 20



Fig. 62 – Atenuação total em dB, por absorção e diluição, para fonte esférica, em função da freqüência, para distâncias variando de 1 a 100 metros, com 20 % de umidade, 30 °C de temperatura e pressão atmosférica igual a 1013 milibares.



Fig. 63 – Atenuação total em dB, por absorção e diluição, para fonte cilíndrica, em função da freqüência, para distâncias variando de 1 a 100 metros, com 20 % de umidade, 30 °C de temperatura e pressão atmosférica igual a 1013 milibares.

Nas Figs. 61, 62 e 63 vemos que a atenuação aumenta para baixos valores de umidade relativa do ar.

Nas Figs. 64 e 65 constatamos que a atenuação, em função da freqüência, aumentou ligeiramente com o acréscimo na pressão atmosférica.



Fig. 64 – Atenuação por absorção, em dB, em função da freqüência, para distâncias variando de 1 a 100 metros, com 20 % de umidade relativa do ar, 30 °C de temperatura e pressão atmosférica igual a 900 milibares.



Fig. 65 – Atenuação por absorção, em dB, em função da freqüência, para distâncias variando de 1 a 100 metros, com 20 % de umidade relativa do ar, 30 °C de temperatura e pressão atmosférica igual a 700 milibares.

Conclusão:

A atenuação do som no ar, por absorção deve ser levada em conta, em muitas situações, para predição e correção da equalização a ser aplicada no sinal, dirigido a uma certa distância. Assim, as caixas acústicas direcionadas para o fundo da arena podem ter uma equalização diferente das demais, para compensar a maior atenuação das altas freqüências.

Em casos como esse, o efeito da divergência (diluição da energia na frente de onda) deve ser acrescentado à atenuação para a determinação correta do nível de pressão acústica a ser atingido em determinado ponto. O software que acompanha o presente trabalho facilita sobremaneira esta tarefa.

Bibliografia:

 1 - Calculation Methods for the Physical Properties of Air Used in the Calibration of Microphones Knud Rasmussen
 Department of Acoustic Technology – Technical University of Denmark - 1997
 Disponível em: http://www.dat.dtu.dk/docs/PL11b-RAP.PDF

2 - Absorption of Sound by Air: A Personal Calculator Program Benjamim Bernfeld JAES Vol. 28 N° 7/8 , Jul/Ago de 1980

3 – Acoustical Properties of Air versus Temperature and Pressure Gavin R. Putland JAES Vol. 42 N° 11, Nov de 1994

4 – Níveis de Ruído no Interior de Trens Metropolitanos – Caso São Paulo Jacqueline de Toledo Laje Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Estadual de Campinas em 2003 e disponível em http://libdigi.unicamp.br/document/?code=vtls000305143

5 – Environmental Effects on the Speed of Sound Dennis A. Bohn JAES Vol. 36 N° 4, Abril de 1988

6 – Multi-purpose Acoustic Sensor Dipen N. Sinha Los Alamos National Laboratory, disponível em http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/02/naturalgas/5-3.pdf

7 – The effect of Humidity Upon the Absorption of Sound in a Room and a Determination of the Coefficient of Absorption of Sound in Air
Vern O. Knudsen
Rev. Mod. Phys. 24, 108 (1952)

Agradecimentos:

O Autor agradece:

Ao Engenheiro Walter Ullmann (<u>walter_ullmann@hotmail.com</u>), pela elaboração do software Air Aten, em linguagem C, que acompanha o presente trabalho;

À Eletrônica Selenium S. A. pelos recursos colocados à disposição do Autor, que a exime de quaisquer responsabilidades quanto às informações aqui veiculadas, da inteira responsabilidade do Autor.