

## Utilizando o Calculador Etelj SPL Salas

Homero Sette

15 - 01 - 2013

Este utilitário permite o cálculo do nível de pressão sonora (SPL) em dB, a uma distância  $r$ , em metros, em função da sensibilidade da caixa, a 1 Watt @ 1 metro, da potência elétrica aplicada, em Watts, das dimensões internas da sala e do seu coeficiente de absorção médio (ou do tempo de reverberação).

Caso a **sensibilidade da caixa** não seja conhecida o calculador oferece diversas opções para a obtenção deste parâmetro, sendo elas:

**2 - Sensibilidade do falante** a 1 Watt @ 1 metro, em dB, e o número de falantes por caixa;

**3 - Eficiência do falante em %;**

### 4 - Parâmetros Thiele-Small

$F_s$  - Frequência de ressonância do falante, ao ar livre, em Hz;

$V_{as}$  - Volume equivalente do falante, em litros,

$Q_{es}$  - Fator de qualidade elétrico do falante.

Como  $Q_{es} = Q_{ts}$  na falta do primeiro parâmetro podemos utilizar o segundo.

### 5 - Parâmetros Tradicionais

$R_E$  - Resistência Ôhmica da bobina, em Ohms;

$\beta_L$  - Fator de Força em Tesla · metro;

$M_{ms}$  - Massa do conjunto móvel, em gramas;

$S_D$  - Área efetiva do cone (diafragma) em  $cm^2$ .

Para garantir a consistência dos resultados, em todas as opções de cálculo, quando necessário será utilizado o falante representado por seus parâmetros Thiele-Small e Convencionais, mostrados na tabela ao lado.

### Exemplos de Utilização

Nos exemplos abaixo uma caixa, recebendo 500 Watts será instalada em uma sala medindo internamente 9 x 4 x 15, respectivamente correspondendo a Largura, Altura e Profundidade, estando as dimensões em metros.

O SPL resultante será avaliado a uma distância de 10 metros.

O coeficiente médio de absorção da sala foi admitido como  $\alpha = 0,15$ , o que corresponde a um recinto com pouco ou nenhum tratamento acústico.

Caso a **sensibilidade da caixa** não seja conhecida, poderemos calculá-la adicionando  $10 \cdot \log(N_F)$  à **sensibilidade do falante**, onde  $N_F$  corresponde ao numero de falantes por caixa. No caso de 2 falantes haverá um acréscimo de 3 dB, cálculos estes feitos automaticamente pelo programa.

Para os falantes utilizados no exemplo a **sensibilidade da caixa** será igual a  $96 + 3 = 99$  dB.

Se necessário o programa calculará a **sensibilidade do falante** a partir da sua eficiência percentual ou dos parâmetros Thiele-Small ou ainda dos Tradicionais, conforme a disponibilidade dos dados informados pelo usuário. Feito isto será calculada a **sensibilidade da caixa**, informação indispensável para a determinação do nível de SPL a uma dada distância.

Os falantes de baixa frequência, montados em uma mesma caixa, são considerados **acoplados**, o que provavelmente não seria o caso com drivers ou tweeters. O acoplamento (ou não) depende da distância entre os centros dos transdutores (ou caixas) relativamente aos comprimentos de onda das frequências de interesse.

Falante Utilizado		
Parâmetros Thiele - Small		
$F_s$	40	Hz
$V_{as}$	150	L
$Q_{es}$	0,4	-
$Q_{ts}$	0,35	-
$Q_{ms}$	2,8	-
Parâmetros Tradicionais		
$\beta_L$	23,78	T · m
$R_E$	6,0	$\Omega$
$S_D$	1000	$cm^2$
$M_{ms}$	150	g
$C_{ms}$	105,5	$\mu m / N$
Sensibilidade em dB		96
Eficiência %		2,3

**Calculador Etelj - SPL EM SALAS**

Largura:  metros

Altura:  metros

Profundidade:  metros

Distância Caixa - Ouvinte:  metros

$\alpha$  ou  $RT_{60}$ :

Potência Aplicada:  Watts

Selecione uma opção:

Fator de Diretividade: Meio Espaço

Tela de Abertura do Calculador Etelj de SPL em Salas.

No caso de caixas de graves, se estas estiverem empilhadas juntas, serão consideradas **acopladas**. No entanto, se estiverem distantes (em cada lado do palco) estarão **desacopladas**. Duas caixas acopladas, cada uma recebendo a mesma potência, contribuirão com um acréscimo de 6 dB no SPL: 3 dB pelo acoplamento e mais 3 dB pela duplicação da potência aplicada ao conjunto.

## Escolhendo as Opções

Diversas opções podem ser escolhidas pelo usuário conforme mostram as telas que se seguem:

**Calculador Etelj - SPL EM SALAS**

Largura:  metros

Altura:  metros

Profundidade:  metros

Distância Caixa - Ouvinte:  metros

$\alpha$  ou  $RT_{60}$ :

Potência Aplicada:  Watts

Selecione uma opção:

Fator de Diretividade: Meio Espaço

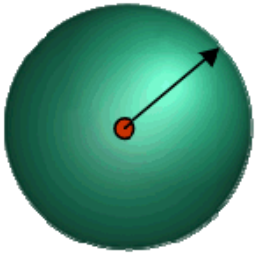
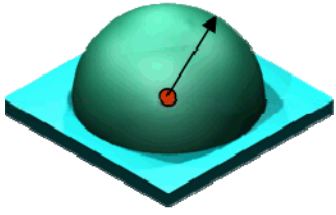
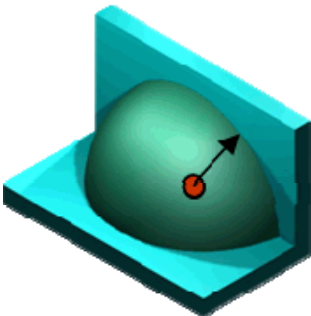

Opções de entrada do Coeficiente de Absorção  $\alpha$  ou do Tempo de Reverberação  $RT_{60}$ , no Calculador Etelj de SPL em Salas.



Opções de Sensibilidade da Caixa, Sensibilidade do Falante, Eficiência do Falante, Parâmetros Thiele-Small ou Parâmetros Tradicionais, no Calculador Etelj de SPL em Salas.




Opções de montagem da caixa em Espaço Completo, Meio Espaço, 1/4 de Espaço e 1/8 de Espaço, no Calculador Etelj de SPL em Salas.

			
<b>Espaço Completo</b> $Q = 2^0 = 1$ ; <b>DI = 0 dB</b>	<b>Meio Espaço</b> $Q = 2^1 = 2$ ; <b>DI = 3 dB</b>	<b>Um quarto de espaço</b> $Q = 2^2 = 4$ ; <b>DI = 6 dB</b>	<b>Um oitavo de espaço</b> $Q = 2^3 = 8$ ; <b>DI = 9 dB</b>
<p>Opções de montagem da caixa, com relação a planos refletores.</p> <p><a href="http://www.sengpielaudio.com/calculator-soundpower.htm">http://www.sengpielaudio.com/calculator-soundpower.htm</a></p>			

## SPL - Sensibilidade da Caixa

### Entrada de dados

**Calculador EteJ - SPL EM SALAS**



Largura:  metros  
 Altura:  metros  
 Profundidade:  metros  
 Distância Caixa - Ouvinte:  metros

$\alpha$  ou  $RT_{60}$ :   
 $\alpha$ :

Potência Aplicada:  Watts

Selecione uma opção:

Sensibilidade da Caixa:  dB

Fator de Diretividade:

## SPL - Sensibilidade do Falante

### Entrada de dados

**Calculador EteJ - SPL EM SALAS**



Largura:  metros  
 Altura:  metros  
 Profundidade:  metros  
 Distância Caixa - Ouvinte:  metros

$\alpha$  ou  $RT_{60}$ :   
 $\alpha$ :

Potência Aplicada:  Watts

Selecione uma opção:

Sensibilidade do Falante:  dB

Número de Falantes:

Fator de Diretividade:

### CALCULADOR ETELJ - SPL - RESULTADOS OBTIDOS

SPL 120.91 dB	
Volume da Sala:	532 m <sup>3</sup>
Área da Sala:	474 m <sup>2</sup>
Largura:	7 m
Altura:	4 m
Profundidade:	19 m
Coefficiente de Absorção - $\alpha$ :	0.15
Tempo de Reverberação - $RT_{60}$ :	1.2 s
Constante da Sala - R:	83.65 m <sup>2</sup>
Distância Crítica - $D_C$ :	1.82 m
Distância Caixa-Ouvinte:	10 m
Ouvinte no Campo:	Reverberante
Freq. de Schroeder - $F_{SC}$ :	95.17 Hz
Potência na Caixa:	500 W
Sensibilidade da Caixa:	99 dB
Fator de Diretividade - Q:	2
Índice de Diretividade - DI:	3
Contribuição da Potência no SPL:	27 dB
Contribuição da Sens. do Fal. no SPL:	99 dB
Contribuição do Q no SPL:	0 dB
Contribuição da Distância no SPL:	-20 dB
Contribuição do Campo Reverb no SPL:	14.9 dB

### Saída de dados

### CALCULADOR ETELJ - SPL - RESULTADOS OBTIDOS

SPL 120.92 dB	
Volume da Sala:	532 m <sup>3</sup>
Área da Sala:	474 m <sup>2</sup>
Largura:	7 m
Altura:	4 m
Profundidade:	19 m
Coefficiente de Absorção - $\alpha$ :	0.15
Tempo de Reverberação - $RT_{60}$ :	1.2 s
Constante da Sala - R:	83.65 m <sup>2</sup>
Distância Crítica - $D_C$ :	1.82 m
Distância Caixa-Ouvinte:	10 m
Ouvinte no Campo:	Reverberante
Freq. de Schroeder - $F_{SC}$ :	95.17 Hz
Potência na Caixa:	500 W
Sensibilidade da Caixa:	99 dB
Sensibilidade do Falante:	96 dB
Nº de Falante:	2
Fator de Diretividade - Q:	2
Índice de Diretividade - DI:	3
Contribuição da Potência no SPL:	27 dB
Contribuição da Sens. do Fal. no SPL:	99 dB
Contribuição do Q no SPL:	0 dB
Contribuição da Distância no SPL:	-20 dB
Contribuição do Campo Reverb no SPL:	14.9 dB

### Saída de dados

## SPL - Parâmetros Thiele - Small

### Entrada de dados

**Calculador Eteij - SPL EM SALAS**

Largura:  metros

Altura:  metros

Profundidade:  metros

Distância Caixa - Ouvinte:  metros

$\alpha$  ou RT<sub>60</sub>:

Potência Aplicada:  Watts

Selecione uma opção:

F<sub>s</sub> (Freq. de Ressonância):  Hz

Vas (Vol. equiv. do falante):  Litros

Q<sub>es</sub> (Fator de qualidade elétrico):

Número de Falantes:

Fator de Diretividade:



## SPL - Parâmetros Tradicionais

### Entrada de dados

**Calculador Eteij - SPL EM SALAS**

Largura:  metros

Altura:  metros

Profundidade:  metros

Distância Caixa - Ouvinte:  metros

$\alpha$  ou RT<sub>60</sub>:

Potência Aplicada:  Watts

Selecione uma opção:

$\beta$ L (Fator de Força):  T·m

R<sub>E</sub> (Resistência ôhmica):   $\Omega$

S<sub>D</sub> (Área efetiva do cone):  cm<sup>2</sup>

Mms (Massa móvel da suspensão):  g

Número de Falantes:

Fator de Diretividade:



### CALCULADOR ETELJ - SPL - RESULTADOS OBTIDOS

**SPL 120.56 dB**

Volume da Sala:	532 m <sup>3</sup>
Área da Sala:	474 m <sup>2</sup>
Largura:	7 m
Altura:	4 m
Profundidade:	19 m
Coefficiente de Absorção - $\alpha$ :	0.15
Tempo de Reverberação - RT <sub>60</sub> :	1.2 s
Constante da Sala - R:	83.65 m <sup>2</sup>
Distância Crítica - D <sub>C</sub> :	1.82 m
Distância Caixa-Ouvinte:	10 m
Ouvinte no Campo:	Reverberante
Freq. de Schroeder - F <sub>SC</sub> :	95.17 Hz
Potência na Caixa:	500 W
Sensibilidade da Caixa:	99 dB
Sensibilidade do Falante:	96 dB
Eficiência do Falante:	2.3 %
Nº de Falante:	2
Fator de Diretividade - Q:	2
Índice de Diretividade - DI:	3
Contribuição da Potência no SPL:	27 dB
Contribuição da Sens. do Fal. no SPL:	98.7 dB
Contribuição do Q no SPL:	0 dB
Contribuição da Distância no SPL:	-20 dB
Contribuição do Campo Reverb no SPL:	14.9 dB
Freq. de Ressonância - F <sub>S</sub> :	40 Hz
Volume Equivalente - Vas:	150 litros
Fator de Qualidade Elétrico - Qes:	0.4

### Saída de dados

### CALCULADOR ETELJ - SPL - RESULTADOS OBTIDOS

**SPL 120.64 dB**

Volume da Sala:	532 m <sup>3</sup>
Área da Sala:	474 m <sup>2</sup>
Largura:	7 m
Altura:	4 m
Profundidade:	19 m
Coefficiente de Absorção - $\alpha$ :	0.15
Tempo de Reverberação - RT <sub>60</sub> :	1.2 s
Constante da Sala - R:	83.65 m <sup>2</sup>
Distância Crítica - D <sub>C</sub> :	1.82 m
Distância Caixa-Ouvinte:	10 m
Ouvinte no Campo:	Reverberante
Freq. de Schroeder - F <sub>SC</sub> :	95.17 Hz
Potência na Caixa:	500 W
Sensibilidade da Caixa:	99 dB
Sensibilidade do Falante:	96 dB
Eficiência do Falante:	2.3 %
Nº de Falante:	2
Fator de Diretividade - Q:	2
Índice de Diretividade - DI:	3
Contribuição da Potência no SPL:	27 dB
Contribuição da Sens. do Fal. no SPL:	98.7 dB
Contribuição do Q no SPL:	0 dB
Contribuição da Distância no SPL:	-20 dB
Contribuição do Campo Reverb no SPL:	14.9 dB
Fator de Força - $\beta$ L:	23.78 T·m
Resistência Ôhmica - R <sub>E</sub> :	6.0 $\Omega$
Área Efetica do Cone - S <sub>D</sub> :	150 m <sup>2</sup>
Massa Móvel - Mms:	1000 g

### Saída de dados

## SPL - Eficiência % do Falante

### Entrada de dados

**Calculador Etelj - SPL EM SALAS**



Largura:  metros  
Altura:  metros  
Profundidade:  metros  
Distância Caixa - Ouvinte:  metros

$\alpha$  ou  $RT_{60}$ :   
 $\alpha$ :

Potência Aplicada:  Watts

Selecione uma opção:

Eficiência do Falante:  %  
Número de Falantes:

Fator de Diretividade:

CALCULADOR ETELJ - SPL - RESULTADOS OBTIDOS	
<b>SPL 120.56 dB</b>	
Volume da Sala:	532 m <sup>3</sup>
Área da Sala:	474 m <sup>2</sup>
Largura:	7 m
Altura:	4 m
Profundidade:	19 m
Coeficiente de Absorção - $\alpha$ :	0.15
Tempo de Reverberação - $RT_{60}$ :	1.2 s
Constante da Sala - R:	83.65 m <sup>2</sup>
Distância Crítica - $D_C$ :	1.82 m
Distância Caixa-Ouvinte:	10 m
Ouvinte no Campo:	Reverberante
Freq. de Schroeder - $F_{SC}$ :	95.17 Hz
Potência na Caixa:	500 W
Sensibilidade da Caixa:	99 dB
Sensibilidade do Falante:	96 dB
Eficiência do Falante:	2.3 %
Nº de Falante:	2
Fator de Diretividade - Q:	2
Índice de Diretividade - DI:	3
Contribuição da Potência no SPL:	27 dB
Contribuição da Sens. do Fal. no SPL:	98.6 dB
Contribuição do Q no SPL:	0 dB
Contribuição da Distância no SPL:	-20 dB
Contribuição do Campo Reverb no SPL:	14.9 dB

### Saída de dados

## Fundamentos Teóricos

O nível de pressão acústica em um recinto fechado, produzido por uma potência elétrica  $W_E$ , aplicada em uma caixa com sensibilidade de referencia  $SPL_{1W@1m}$  (medida em meio espaço), a  $r$  metros de distância, é dado pela equação de Hopkins-Stryker, abaixo representada em sua forma básica, onde:

$$SPL_{(WE@rm)} = SWL + 10 \cdot \text{Log} \left( \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

$$SPL_{(WE@rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{1W@1m} + 10 \cdot \text{Log}(2 \cdot \pi) + 10 \cdot \text{Log} \left( \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot r^2} + \frac{4}{R} \right)$$

SWL = Nível de Potência Acústica em dB

Q = Fator de diretividade da montagem da caixa:

Q = 1, espaço completo ; Q = 2, meio espaço; Q = 4, 1/4 de espaço; Q = 8, 1/8 de espaço.

R = Constante da sala, em metros quadrados.

Como  $\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot r^2}$  representa o campo direto e  $\frac{4}{R}$  o campo reverberante, quando  $R = \infty$  inexistente reverberação o que indica estar a caixa acústica ao ar livre, ou em um recinto totalmente absorvente, situação esta representada por  $\alpha = 1$ . Por este motivo foi necessária a equação de Eyring, uma vez que a de Sabine não é capaz de fornecer um tempo de reverberação nulo para  $\alpha = 1$ , conforme mostra a tabela a seguir. Assim, a equação de Sabine (e suas derivações) será usada para pequenos valores de absorção, ou seja,  $0 \geq \alpha \leq 0,2$  enquanto que a de Eyring para ambientes mais amortecidos, onde  $0,2 > \alpha \leq 1$ .

Coeficiente de Absorção Médio $\alpha$	
Sabine	Eyring
$0 \geq \alpha \leq 0,2$	$0,2 > \alpha \leq 1$
Constante da Sala R	
$R = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot S \approx \alpha \cdot S$	$R = \frac{S \cdot L_N (1 - \alpha)}{\alpha - 1}$
Tempo de Reverberação $RT_{60}$	
$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{R \cdot (1 - \alpha)} = \frac{0,161 \cdot V}{\alpha \cdot S}$	$RT_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{-S \cdot \text{Log}_N(1 - \alpha)} = \frac{0,161 \cdot V}{S \cdot \text{Log}_N\left(\frac{1}{1 - \alpha}\right)}$

Conforme o exposto acima, o SPL ao ar livre pode ser obtido fazendo  $R = \infty$  na equação abaixo:

$$SPL_{(WE@rm)} = SWL + 10 \cdot \text{Log} \left( \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot r^2} + \frac{4}{R} \right) = SWL + 10 \cdot \text{Log} \left( \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot r^2} + \frac{4}{\infty} \right) = SWL + 10 \cdot \text{Log} \left( \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \right)$$

$$SPL_{(WE@rm)} = SWL + 10 \cdot \text{Log} \left( \frac{1}{2 \cdot \pi} \right) + 10 \cdot \text{Log} \left( \frac{Q}{2} \right) + 10 \cdot \text{Log} \left( \frac{1}{r^2} \right)$$

$$SPL_{(WE@rm)} = SWL - 10 \cdot \text{Log}(2 \cdot \pi) + 10 \cdot \text{Log} \left( \frac{Q}{2} \right) - 20 \cdot \text{Log}(r)$$

Como  $SWL = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{1W@1m} + 10 \cdot \text{Log}(2 \cdot \pi)$  , vem:

$$SPL_{(WE@rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{1W@1m} + 10 \cdot \text{Log}(2 \cdot \pi) - 10 \cdot \text{Log}(2 \cdot \pi) + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{Q}{2}\right) - 20 \cdot \text{Log}(r)$$

$$SPL_{(WE@rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{1W@1m} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{Q}{2}\right) - 20 \cdot \text{Log}(r)$$

Que é a equação do SPL ao ar livre, com a taxa de atenuação (diluição da energia) que varia 6 dB com o dobro da distância.

$$SPL_{(WE@rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{1W@1m} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{2}{2}\right) - 20 \cdot \text{Log}(r)$$

Para montagem em meio espaço, teremos:

$$SPL_{(WE@rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{1W@1m} - 20 \cdot \text{Log}(r)$$

### Distância Crítica $D_C$

Esta distância é aquela onde o campo direto e o reverberante contribuem igualmente e pode ser obtida igualando as expressões de ambos e fazendo  $r = D_C$  :

$$\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot D_C^2} = \frac{4}{R} \Rightarrow D_C = \sqrt{\frac{Q \cdot R}{16 \cdot \pi}}$$

Assim, para além da distância crítica estaremos no campo reverberante e aquém no campo direto, onde o SPL praticamente não depende da sala, apenas da distância, da potência aplicada e da sensibilidade da caixa.

No campo reverberante o SPL não dependerá da distância, mantendo-se constante, sendo influenciado pela sala, pela potência aplicada e a sensibilidade da caixa.

### Outra equação para o SPL

Manipulando algebricamente a equação de Hopkins-Stryker,  $SPL_{(WE@rm)} = SWL + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot r^2} + \frac{4}{R}\right)$ , o Autor obteve outra, equivalente, que se mostrou conveniente para determinadas finalidades:

$$SPL_{(WE@rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W@1m)} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{Q}{2}\right) - 20 \cdot \text{Log}(r) + 10 \cdot \text{Log}\left(1 + \frac{r^2}{D_C^2}\right)$$

Para mostrar a equivalência de ambas, calcularemos o SPL a 10 metros, produzido por uma caixa com 99 dB de sensibilidade, alimentada por 500 Watts e montada próxima a um plano refletor, em uma sala com  $R = 83,65 \text{ m}^2$ . Conforme podemos constatar os resultados produzidos por ambas foram iguais.

$$SWL = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{1W@1m} + 10 \cdot \text{Log}(2 \cdot \pi)$$

$$SWL = 10 \cdot \text{Log}(500) + 99 + 10 \cdot \text{Log}(2 \cdot \pi) = 27 + 99 + 8 = 134 \text{ dB}$$

$$SPL_{(WE@rm)} = SWL + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot r^2} + \frac{4}{R}\right)$$

$$SPL_{(WE@rm)} = 134 + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^2} + \frac{4}{83,65}\right) = 134 + 10 \cdot \text{Log}(0,00159 + 0,0478)$$

$$SPL_{(WE@rm)} = 134 + 10 \cdot \text{Log}(0,0494) \approx 134 - 13,1 = 120,9 \text{ dB}$$

$$SPL_{(WE@rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W@1m)} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{Q}{2}\right) - 20 \cdot \text{Log}(r) + 10 \cdot \text{Log}\left(1 + \frac{r^2}{D_C^2}\right)$$



$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(500) + 99 + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{2}{2}\right) - 20 \cdot \text{Log}(10) + 10 \cdot \text{Log}\left(1 + \frac{10^2}{1,82^2}\right)$$

$$SPL_{(WE @ rm)} = 27 + 99 + 0 - 20 + 14,9 = 120,9 \text{ dB}$$

Utilizando a nova equação proposta vamos analisar três situações particulares de grande interesse:

## 1 - Campo Reverberante

$$\text{No Campo Reverberante } r \gg D_c \Rightarrow 10 \cdot \text{Log}\left(1 + \frac{r^2}{D_c^2}\right) \approx 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{r^2}{D_c^2}\right)$$

$$D_c^2 = \frac{Q \cdot R}{16 \cdot \pi} \Rightarrow 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{r^2}{D_c^2}\right) = 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{r^2}{\frac{Q \cdot R}{16 \cdot \pi}}\right) = 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{16 \cdot \pi \cdot r^2}{Q \cdot R}\right)$$

$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{Q}{2}\right) - 20 \cdot \text{Log}(r) + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{16 \cdot \pi \cdot r^2}{Q \cdot R}\right)$$

$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} - 20 \cdot \text{Log}(r) + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{Q}{2} \cdot \frac{16 \cdot \pi \cdot r^2}{Q \cdot R}\right)$$

$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} - 20 \cdot \text{Log}(r) + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{8 \cdot \pi \cdot r^2}{R}\right) \quad (\text{Não depende do Q da montagem})$$

$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{1}{r^2}\right) + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{8 \cdot \pi \cdot r^2}{R}\right)$$

$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{1}{r^2} \cdot \frac{8 \cdot \pi \cdot r^2}{R}\right)$$

$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{8 \cdot \pi}{R}\right) \quad (\text{Não depende da distância } r)$$

Desse modo, no Campo Reverberante, ou seja, para  $r \gg D_c$  o SPL em qualquer ponto será constante, dependendo apenas da sala, da potência aplicada na caixa e da sua sensibilidade.

## 2 - Campo Direto

$$\text{No campo direto } r \ll D_c \Rightarrow 10 \cdot \text{Log}\left(1 + \frac{r^2}{D_c^2}\right) \approx 10 \cdot \text{Log}(1) \approx 0$$

$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{Q}{2}\right) - 20 \cdot \text{Log}(r) + 10 \cdot \text{Log}\left(1 + \frac{r^2}{D_c^2}\right)$$

$$SPL_{(WE @ rm)} \approx 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{Q}{2}\right) - 20 \cdot \text{Log}(r) + 0 \quad (\text{Não depende da Sala})$$

$$SPL_{(WE @ rm)} \approx 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{Q}{2}\right) - 20 \cdot \text{Log}(r)$$

No Campo Direto, ou seja, para  $r \ll D_c$  o SPL é função da potência aplicada na caixa, da sua sensibilidade, do Q da montagem e da distância  $r$ .

### 3 - Distância Crítica

$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{Q}{2}\right) - 20 \cdot \text{Log}(r) + 10 \cdot \text{Log}\left(1 + \frac{r^2}{D_C^2}\right)$$

$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{Q}{2}\right) - 20 \cdot \text{Log}(D_C) + 10 \cdot \text{Log}\left(1 + \frac{D_C^2}{D_C^2}\right)$$

$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{Q}{2}\right) - 20 \cdot \text{Log}(D_C) + 10 \cdot \text{Log}(1 + 1)$$

$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}(Q) - 10 \cdot \text{Log}(2) - 20 \cdot \text{Log}(D_C) + 10 \cdot \text{Log}(2)$$

$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}(Q) - 20 \cdot \text{Log}(D_C)$$

$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}(Q) - 10 \cdot \text{Log}(D_C^2)$$

$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{Q}{D_C^2}\right)$$

$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{Q}{D_C^2}\right) \quad \text{Como } D_C = \sqrt{\frac{Q \cdot R}{16 \cdot \pi}} \Rightarrow D_C^2 = \frac{Q \cdot R}{16 \cdot \pi}$$

$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{Q}{\frac{Q \cdot R}{16 \cdot \pi}}\right) \quad \text{(Não depende do Q)}$$

$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{16 \cdot \pi}{R}\right) = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 17 - 10 \cdot \text{Log}(R)$$

Na Distância Crítica, ou seja, para  $r = D_C$  o SPL dependerá da sala, da potência aplicada na caixa e da sua sensibilidade. A tabela abaixo resume as situações acima:

#### Equação Geral

$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{Q}{2}\right) - 20 \cdot \text{Log}(r) + 10 \cdot \text{Log}\left(1 + \frac{r^2}{D_C^2}\right)$$

#### Casos Particulares

**Campo Reverberante** ( $r \gg D_C$ ) Só depende da Sala (**R**) além da Potência e da Sensibilidade da Caixa

$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{8 \cdot \pi}{R}\right)$$

**Campo Direto** ( $r \ll D_C$ ) Só depende do **Q** e do **r** além da Potência e da Sensibilidade da Caixa

$$SPL_{(WE @ rm)} \approx 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{Q}{2}\right) - 20 \cdot \text{Log}(r)$$

**Distância Crítica** ( $r = D_C$ ) Só depende da Sala (**R**) além da Potência e da Sensibilidade da Caixa

$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 10 \cdot \text{Log}\left(\frac{16 \cdot \pi}{R}\right)$$

$$SPL_{(WE @ rm)} = 10 \cdot \text{Log}(W_E) + SPL_{(1W @ 1m)} + 17 - 10 \cdot \text{Log}(R)$$

## A Equação de Schroeder

As equações de Sabine e Eyring são válidas para frequências acima do limiar dado pela equação de Schroeder:  $F_{sc} = 2000 \cdot \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}}$  (segundos e  $m^3$ ), a partir da qual o campo reverberante começa a existir.

Abaixo dessa frequência dominam as ondas estacionárias, que provocam distribuições irregulares do campo sonoro (pontos de máximo e mínimo), sendo a sala considerada *Pequena*.

Acima de  $F_{sc}$  o ambiente comporta-se como uma *Grande Sala*, onde as ondas estacionárias acontecem em tão grande numero que as diferenças entre os pontos de máximo e mínimo na amplitude tornam-se imperceptíveis.

Para os valores utilizados nos exemplos, teremos:

$$F_{sc} = 2000 \cdot \sqrt{\frac{RT_{60}}{V}} = 2000 \cdot \sqrt{\frac{1,2}{532}} \approx 95 \text{ Hz}$$

## BIBLIOGRAFIA

- [1] - Sound System Engineering, segunda edição, 1994  
Don Davis e Carolyn Davis  
Howard W. Sams & Co.
- [2] - Acústica Técnica  
Ennio Cruz da Costa  
Editora Edgard Blücher Ltda., 2004
- [3] – Manual Prático de Acústica  
Sólon do Valle  
Editora Música e Tecnologia, 2006
- [4] – Master Handbook of Acoustics  
F. Alton Everest and Kan Pholmann  
Mac Graw-Hill Companies, 2009



Homero Sette é Gerente de Projetos da Etelj.



Pedro Henrique é Gerente de Sistemas de Informação da Etelj.

Este calculador foi desenvolvido por Pedro Henrique Pereira utilizando as linguagens PHP, JQUERY, CSS e Java Script a partir das equações e do fluxograma fornecidos pelo Prof. Homero Sette.  
Os Autores e a Etelj esperam que esta iniciativa seja útil a toda a comunidade do áudio.