Tutoriais de Áudio e Acústica

Estes tutoriais destinam-se a servir de apoio didático aos cursos na área de Música e Tecnologia do Departamento de Música da ECA-USP. O projeto está em andamento e qualquer contribuição no sentido de melhorar ou ampliar esse material será muito bem-vinda! Exceto quando houver indicação ao contrário, os texto são de autoria de Fernando Iazzetta (iazzetta@usb.br).

O material contido nos tutoriais pode ser livremente utilizado desde que seja citada a fonte.

Fernando Iazzetta

Índice

Introdução

O som existe apenas quando determinados tipos de perturbações no meio físico agem sobre o sistema auditivo, desencadeando um complexo processo perceptivo, com diversos estágios que vão do ouvido externo ao córtex cerebral.

O processo de produção sonora engloba três elementos:

a) **Fonte Geradora**: pode ser um instrumento musical, um motor ruidoso, um cone de alto-falante, ou qualquer outro dispositivo capaz de transformar algum tipo de energia em ondas sonoras; três elementos são geralmente identificados em relação à fonte sonora: 1) fonte primária de energia (que vai gerar a excitação que causará a vibração - por exemplo, o pinçar de uma corda, o sopro no orifício de uma flauta, a corrente eletrica que movimenta o cone de um alto-falante); 2) o elemento vibrante (aquele que efetivamente vibra - por exemplo, uma corda de um violino, a coluna de ar dentro de um instrumento de sopro, o cone de um altofalante); 3) ressonador (corpo cuja função principal é converter de modo mais eficiente as vibrações do elemento vibrante em ondas sonoras - por exemplo, a caixa de um piano, o tampo de um violino)

b) **Meio Propagador**: é o suporte que possibilita a propagação das ondas sonoras. Em princípio, qualquer material elástico (ar, água, metais, madeiras, etc.) está apto a permitir a propagação de ondas sonoras; existem também os obstáculos (paredes, vãos, superfícies, corpos, etc.) que interagem com o meio, alterando características das ondas sonoras;

c) **Receptor**: é o sistema que recebe e decodifica o estímulo proporcionado pela onda. Pode ser representado pelo sistema auditivo, ou outros meios de captação e registro sonoro como microfones e gravadores.

Som

Som pode ser entendido como uma variação de pressão muito rápida que se propaga na forma de ondas em um meio elástico. Em geral, o som é causado por uma vibração de um corpo elástico, o qual gera uma variação de pressão corresponde no meio à sua volta. Qualquer corpo elástico capaz de vibrar rapidamente pode produzir som e, nesse caso, recebe o nome de fonte sonora.

Em geral percebemos o som através de variações de pressão no ar que atingem nosso ouvido. Para que possamos perceber o som é necessário que as variações de pressão que chegam aos nossos ouvidos estejam dentro de certos limites de rapidez e intensidade. Se essas variações ocorrem entre 20 e 20.000 vezes por segundo esse som é potencialmente audível, ainda que a variação de pressão seja de alguns milionésimos de pascal.

Uma onda sonora pode ser representada em um gráfico bidimensional onde o eixo horizontal representa a passagem do tempo e o vertical a variação de pressão. Esse tipo de gráfico pode fornecer várias informações sobre o som.

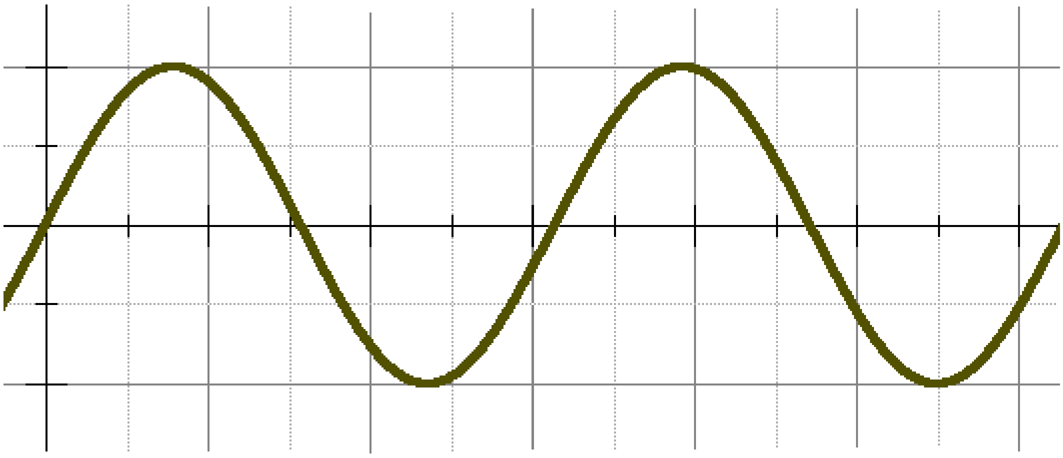


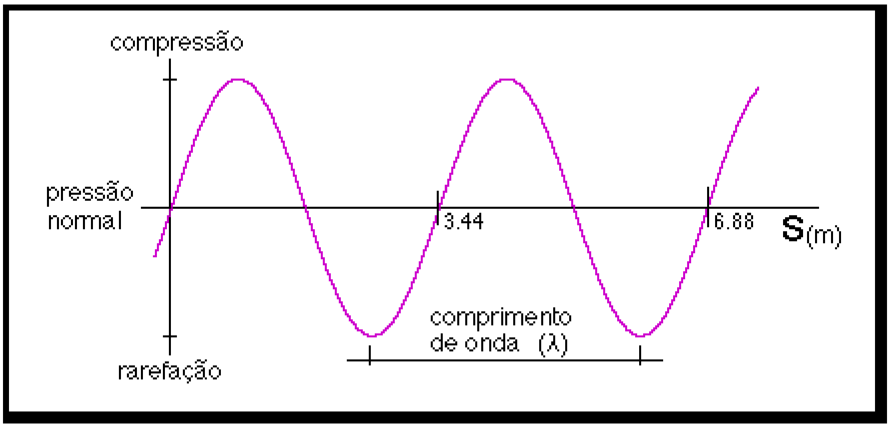
Gráfico de onda senóide

O gráfico acima mostra dois ciclos completos de oscilação de uma onda senoidal. O eixo horizontal representa a passagem do tempo enquanto que o vertical representa a variação de pressão em um determinado ponto do meio.

Os sons que ocorrem no meio ou que são gerados por instrumentos musicais são geralmente complexos. Entretanto, para se entender a complexidade sonora torna-se útil partir de um caso mais simples e genérico: o som senoidal, chamado som puro porque é desprovido de harmônicos e cujo nome é deve-se ao fato de poder ser representado pelo gráfico de uma função seno. Esse tipo de som não é gerado por instrumentos tradicionais nem é encontrado na natureza, mas pode ser conseguido artificialmente através de um sintetizador eletrônico.

Comprimento de Onda (λ)

As ondas sonoras que se propagam pelo meio têm uma certa extensão ou **comprimento de onda** (λ) que pode ser definido como a distância mínima em que um padrão temporal da onda (ou seja, um ciclo) se repete. Compare com o **período** (τ) que pode ser definido como o intervalo mínimo de tempo em que um padrão de vibração se repete em um certo ponto no espaço. Ou seja, o comprimento de onda está relacionado ao tamanho de um ciclo da onda sonora que se forma no **espaço**, enquanto que o período diz respeito ao **tempo** que esse mesmo ciclo leva para se formar.



O gráfico acima é um "instantâneo" de uma onda senóide onde o eixo vertical indica a variação de pressão, ou amplitude da onda, e o eixo horizontal o espaço. Note-se que o gráfico acima demonstra o padrão espacial de oscilação da pressão que ocorre no meio, medido em metros. (Não confundir com o gráfico que mostra o período da onda no qual o eixo horizontal se refere ao tempo!).

O padrão temporal da onda se move no espaço (com a velocidade de propagação). No tempo correspondente a um período (τ), a onda terá se deslocado exatamente o seu comprimento. Se a velocidade de propagação é dada pela distância percorrida dividida pelo tempo gasto, temos:

$$V = \frac{\textbf{distância percorrida}}{\textbf{tempo gasto}} \rightarrow V = \frac{\lambda}{\tau} \rightarrow V = \lambda . f$$

Por meio dessas relações podemos chegar a uma conexão quantitativa entre a representação espacial e temporal da onda, relacionando frequência, período (τ) e comprimento de onda (λ) de uma corda numa mesma expressão:

$$\lambda = \frac{1}{f} \cdot \sqrt{\frac{T}{d}}$$

Tabela de Comprimentos de Onda(λ)

Frequência (Hz)	**Comprimento de Onda (m)** **(vel. de propagação = 344 m/s)**
10	34,40
20	17,20
30	11,46
40	8,60
50	6,88
60	5,73
70	4,91
90	3,82

100	3,44
250	1,376
500	0,688
750	0,458
1000	0,344
1500	0,229
2000	0,172
2500	0,137
5000	0,0688
7500	0,0458
10000	0,0340
15000	0,0229
20000	0,0172

Tabela de Frequências, Períodos e Comprimentos de Onda

Referências:

Velocidade do Som (v): 344 m/s
Afinação: A = 440 Hz

Frequência:

$$f = \frac{1}{\tau}$$

Período:

$$\tau = \frac{1}{f}$$

Comprimento de Onda:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Frequência de intervalo:

$$f_i = f_0 \cdot \sqrt[12]{2^i} = f_0 \cdot 2^{\frac{i}{12}}$$

N°	Nota	Frequência (Hz)	Peroído (s)	Comprimento de Onda (m)
0	C -1	16.351597	0.061156	21.037701
1	C# -1	17.323914	0.057724	19.856941
2	D -1	18.354046	0.054484	18.74246
3	D# -1	19.445435	0.051426	17.690527
4	E -1	20.601725	0.04854	16.697632
5	F -1	21.826761	0.045815	15.760468
6	F# -1	23.124651	0.043244	14.875899
7	G -1	24.499718	0.040817	14.040977
8	G# -1	25.956537	0.038526	13.252921
9	A -1	27.5	0.036364	12.50909
10	A# -1	29.135233	0.034323	11.807011
11	B -1	30.867708	0.032396	11.144332
N°	Nota	Frequência (Hz)	Peroído (s)	Comprimento de Onda (m)
12	C 0	32.703194	0.030578	10.518849
13	C# 0	34.647823	0.028862	9.928473
14	D 0	36.708096	0.027242	9.371228
15	D# 0	38.890873	0.025713	8.845263
16	E 0	41.203442	0.02427	8.348817
17	F 0	43.653526	0.022908	7.880233
18	F# 0	46.249302	0.021622	7.43795
19	G 0	48.999424	0.020408	7.020491
20	G# 0	51.91309	0.019263	6.62646
21	A 0	55.	0.018182	6.254546
22	A# 0	58.270466	0.017161	5.903505
23	B 0	61.735416	0.016198	5.572166
N°	Nota	Frequência (Hz)	Período (s)	Comprimento de Onda (m)
24	C 1	65.40638	0.015289	5.259425
25	C# 1	69.295647	0.014431	4.964236
26	D 1	73.416199	0.013621	4.685615
27	D# 1	77.781746	0.012856	4.422632
28	E 1	82.406876	0.012135	4.174408
29	F 1	87.307053	0.011454	3.940117
30	F# 1	92.498604	0.010811	3.718975
31	G 1	97.998848	0.010204	3.510245
32	G# 1	103.82618	0.009631	3.31323

N°	Nota	Frequência (Hz)	Período (s)	Comprimento de Onda (m)
33	A 1	110.	0.009091	3.127273
34	A# 1	116.540947	0.008581	2.951752
35	B 1	123.470818	0.008099	2.786083
36	C 2	130.812775	0.007645	2.629713
37	C# 2	138.591324	0.007215	2.482118
38	D 2	146.832367	0.00681	2.342808
39	D# 2	155.563492	0.006428	2.211316
40	E 2	164.813782	0.006067	2.087204
41	F 2	174.614105	0.005727	1.970058
42	F# 2	184.997208	0.005405	1.859488
43	G 2	195.997711	0.005102	1.755122
44	G# 2	207.652344	0.004816	1.656615
45	A 2	220.	0.004545	1.563636
46	A# 2	233.081848	0.00429	1.475876
47	B 2	246.941635	0.00405	1.393042
N°	Nota	Frequência (Hz)	Período (s)	Comprimento de Onda (m)
48	C 3	261.625519	0.003822	1.314856
49	C# 3	277.182648	0.003608	1.241059
50	D 3	293.664734	0.003405	1.171404
51	D# 3	311.126984	0.003214	1.105658
52	E 3	329.627533	0.003034	1.043602
53	F 3	349.228241	0.002863	0.985029
54	F# 3	369.994385	0.002703	0.929744
55	G 3	391.995392	0.002551	0.877561
56	G# 3	415.304688	0.002408	0.828308
57	A 3	440.	0.002273	0.781818
58	A# 3	466.163788	0.002145	0.737938
59	B 3	493.883301	0.002025	0.696521
N°	Nota	Frequência (Hz)	Período (s)	Comprimento de Onda (m)
60	C 4	523.251099	0.001911	0.657428
61	C# 4	554.365234	0.001804	0.620529
62	D 4	587.329529	0.001703	0.585702
63	D# 4	622.253906	0.001607	0.552829
64	E 4	659.255127	0.001517	0.521801

65	F 4	698.456482	0.001432	0.492515
66	F# 4	739.988831	0.001351	0.464872
67	G 4	783.990845	0.001276	0.438781
68	G# 4	830.609375	0.001204	0.414154
69	A 4	880.	0.001136	0.390909
70	A# 4	932.327576	0.001073	0.368969
71	B 4	987.766602	0.001012	0.34826

N°	Nota	Frequência (Hz)	Período (s)	Comprimento de Onda (m)
72	C 5	1046.502075	0.000956	0.328714
73	C# 5	1108.730591	0.000902	0.310265
74	D 5	1174.659058	0.000851	0.292851
75	D# 5	1244.507935	0.000804	0.276414
76	E 5	1318.510254	0.000758	0.2609
77	F 5	1396.912964	0.000716	0.246257
78	F# 5	1479.977539	0.000676	0.232436
79	G 5	1567.981812	0.000638	0.21939
80	G# 5	1661.21875	0.000602	0.207077
81	A 5	1760.	0.000568	0.195455
82	A# 5	1864.654785	0.000536	0.184485
83	B 5	1975.533325	0.000506	0.17413

N°	Nota	Frequência (Hz)	Período (s)	Comprimento de Onda (m)
84	C 6	2093.004395	0.000478	0.164357
85	C# 6	2217.460938	0.000451	0.155132
86	D 6	2349.318115	0.000426	0.146425
87	D# 6	2489.015625	0.000402	0.138207
88	E 6	2637.020264	0.000379	0.13045
89	F 6	2793.825928	0.000358	0.123129
90	F# 6	2959.955078	0.000338	0.116218
91	G 6	3135.963135	0.000319	0.109695
92	G# 6	3322.4375	0.000301	0.103538
93	A 6	3520.	0.000284	0.097727
94	A# 6	3729.30957	0.000268	0.092242
95	B 6	3951.066895	0.000253	0.087065

N°	Nota	Frequência (Hz)	Período (s)	Comprimento de Onda (m)
96	C 7	4186.008301	0.000239	0.082179

97	C# 7	4434.921875	0.000225	0.077566
98	D 7	4698.636719	0.000213	0.073213
99	D# 7	4978.03125	0.000201	0.069104
100	E 7	5274.040039	0.00019	0.065225
101	F 7	5587.651367	0.000179	0.061564
102	F# 7	5919.910645	0.000169	0.058109
103	G 7	6271.92627	0.000159	0.054848
104	G# 7	6644.875	0.00015	0.051769
105	A 7	7040.	0.000142	0.048864
106	A# 7	7458.621094	0.000134	0.046121
107	B 7	7902.131836	0.000127	
N°	**Nota**	**Frequência (Hz)**	**Período (s)**	**Comprimento de Onda (m)**
108	C 8	8372.016602	0.000119	0.041089
109	C# 8	8869.844727	0.000113	0.038783
110	D 8	9397.270508	0.000106	0.036606
111	D# 8	9956.063477	0.0001	0.034552
112	E 8	10548.083008	0.000095	0.032613
113	F 8	11175.301758	0.000089	0.030782
114	F# 8	11839.820312	0.000084	0.029054
115	G 8	12543.855469	0.00008	0.027424
116	G# 8	13289.748047	0.000075	0.025885
117	A 8	14080.	0.000071	0.024432
118	A# 8	14917.242188	0.000067	0.023061
119	B 8	15804.263672	0.000063	0.021766
N°	**Nota**	**Frequência (Hz)**	**Período (s)**	**Comprimento de Onda (m)**
120	C 9	16744.033203	0.00006	0.020545
121	C# 9	17739.6875	0.000056	0.019392
122	D 9	18794.542969	0.000053	0.018303
123	D# 9	19912.125	0.00005	0.017276
124	E 9	21096.166016	0.000047	0.016306
125	F 9	22350.605469	0.000045	0.015391
126	F# 9	23679.640625	0.000042	0.014527
127	G 9	25087.710938	0.00004	0.013712
128	G# 9	26579.496094	0.000038	0.012942
129	A 9	28160.	0.000036	0.012216
130	A# 9	29834.4863280	0.000034	0.01153
131	B 9	31608.527344	0.000032	0.010883

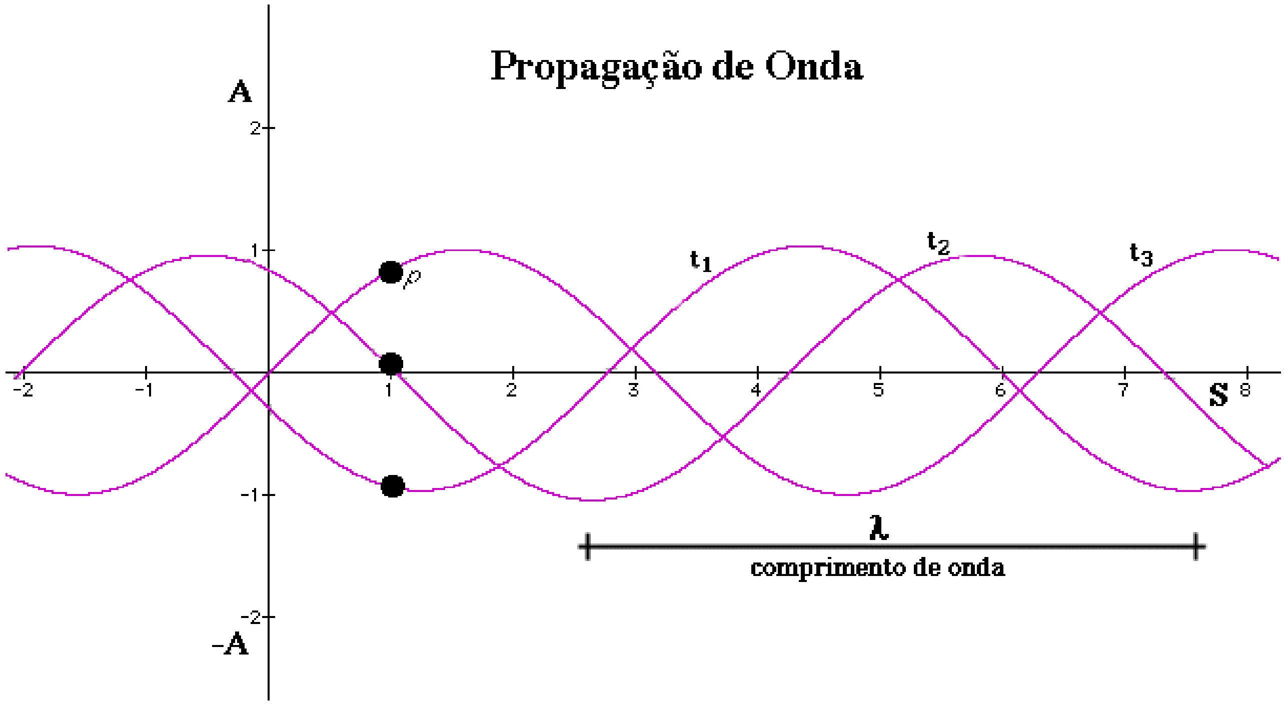
Propagação de Ondas

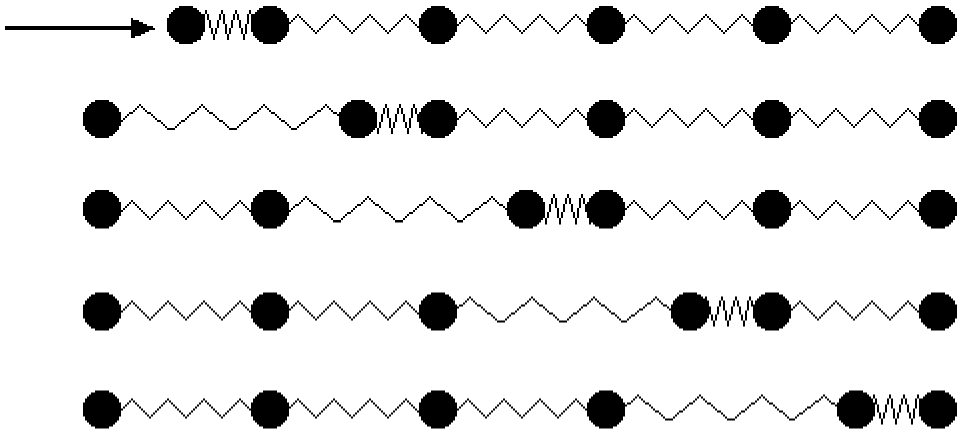
Se um distúrbio é gerado em algum ponto do meio, as partes que se movimentam atuam sobre as partes vizinhas, transmitindo parte desse movimento e fazendo com que essas partes se afastem temporariamente de sua posição de equilíbrio. Dessa maneira, o distúrbio é transmitido para novas porções do meio, gerando uma propagação do movimento.

As ondas sonoras se propagam em um meio material - sólido, líquido ou gasoso. Esse meio pode ser unidimensional, como uma corda esticada; bidimensional, como a membrana de um tambor; ou tridimensional como a atmosfera.

É importante notar que o que se propaga é o movimento e não as partículas do meio, já que estas apenas oscilam próximas às suas posições de repouso. Uma das propriedades interessantes de uma onda é que ela pode **transportar energia ou informação de um lugar a outro do meio, sem que o meio seja transportado**.

No gráfico abaixo, está representada um onda que se propaga da esquerda para a direita nos instantes t_1, t_2 e t_3. No entanto, uma partícula qualquer *p* localizada no espaço (representado pelo eixo horizontal) permanece aproximadamente na mesma posição e não se propaga com a onda.

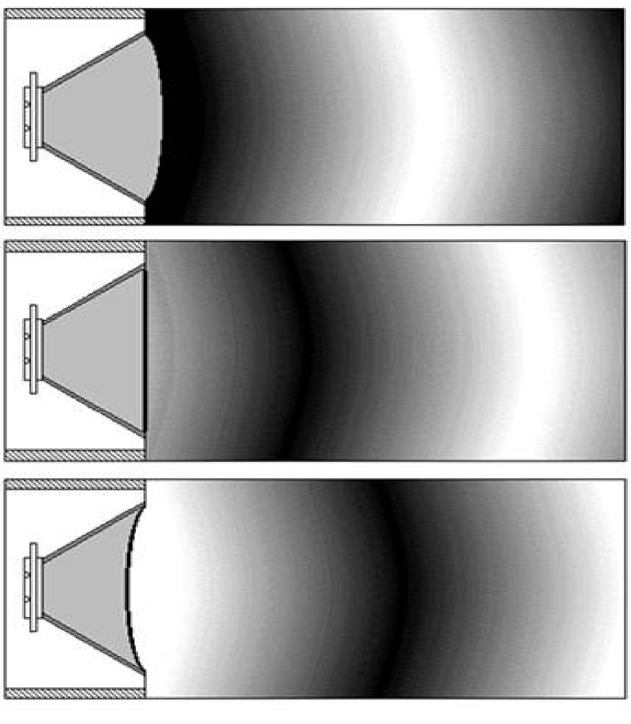




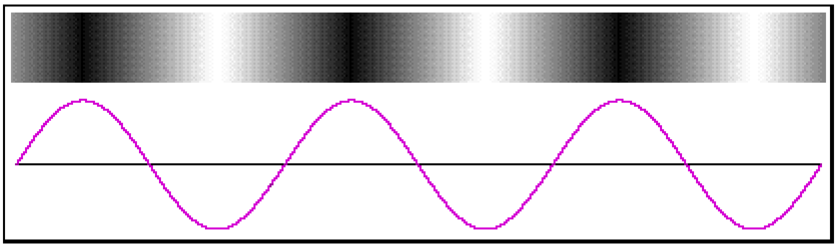
A figura acima mostra um conjunto de esferas conectadas por meio de molas e seu comportamento em momentos sucessivos. Ao se aplicar uma força em uma das esferas, haverá um deslocamento na direção da força aplicada que se propagará pelas outras esferas. A velocidade da propagação dependerá da massa (densidade) das esferas e da rigidez (elasticidade) da mola. Neste caso, o movimento se propaga na mesma direção da força aplicada sendo portanto chamado de **propagação longitudinal**.

Ao se dedilhar uma corda esticada de um instrumento musical, geram-se ondas que se propagam pela corda a partir do ponto em que se aplicou o impulso na direção de suas extremidades. Nesse caso as ondas se propagam transversalmente à força aplicada (**propagação transversal**).

No gráfico abaixo, o cone de um alto-falante se movimenta alternadamente para frente e para trás produzindo sucessivos pulsos de compressão e rarefação de ar, que se propagam em forma de onda:



Graficamente, esse movimento de compressão e rarefação pode ser representado por uma onda, onde a parte acima do eixo horizontal representa a compressão e a parte abaixo do eixo representa a rarefação:



Velocidade de Propagação de Ondas

A velocidade da propagação da onda depende de duas características do meio:

- ***Densidade*: refere-se à quantidade de massa existente em uma porção unitária do meio. É medida em kg/m, kg/m^2, ou kg/m^3.**
- ***Elasticidade*: toda vez que uma parte do meio é deslocada de sua posição de equilíbrio ou repouso por um agente externo, surge uma força que tende a trazer essa parte para a posição inicial.**

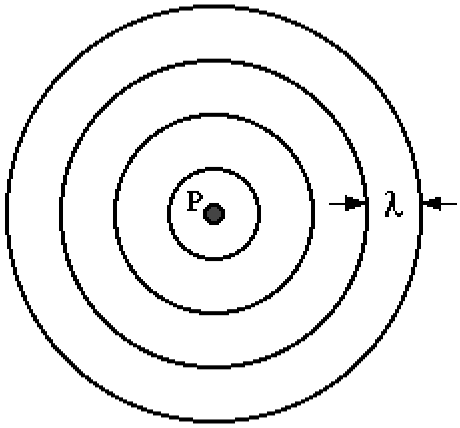
Numa corda, a velocidade de propagação de uma onda é proporcional à raiz quadrada da tensão e inversamente proporcional à raiz quadrada da densidade. Ou seja, aumentenado-se a tensão, aumenta-se a velocidade da propagação e aumentando-se a densidade da corda, a velocidade diminui.

Para uma corda, a velocidade de propagação é dada por:

$$V = \sqrt{\frac{T}{d}}$$

Sendo T (elasticidade) calculada em newtons, e D (densidade) calculada em kg/m.

Em uma superfície, se o meio é homogêneo e a velocidade de propagação é igual em todas as direções, as ondas serão circulares e suas frentes (*wave fronts*) estarão separadas por um comprimento de onda (λ).



Propagação em uma Superfície homogênea

Para um gás, a velocidade pode ser dada por ,

$$V = \sqrt{\frac{\gamma p}{\delta}}$$

onde γ é uma constante (1,4 para o ar); *p* é a pressão (newton/m^2) e δ a densidade (kg/m^3).

A uma temperatura de 0° Celsius, e pressão de 1.013×10^5 newtons/m^2 e a velocidade de propagação do som é de 331,5 m/s.

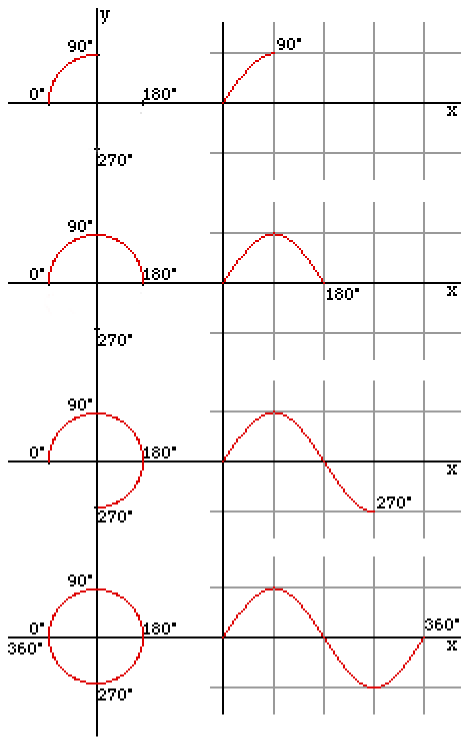
Quando a temperatura sobe, o gás se expande, a pressão se mantém e a densidade diminui e portanto a velocidade aumenta. Esse aumento é aproximadamente da ordem de 0,6 metros por segundo para cada grau centígrado. Por exemplo, para se achar a velocidade a uma temperatura de 20°, soma-se (0,6x20) à temperatura referente à 0°:

(0,6x20) + 332 = 344 m/s

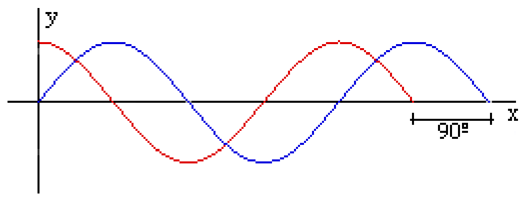
A variação de pressão não influencia a velocidade, apesar da equação levar a pressão em conta. Isso porque quando a pressão aumenta, a densidade (e a elasticidade) aumenta proporcionalmente (isso se a temperatura permance constante). Nos líquidos, a velocidade é muito maior porque o aumento de densidade é compensado por um aumento na elasticidade.

Fase

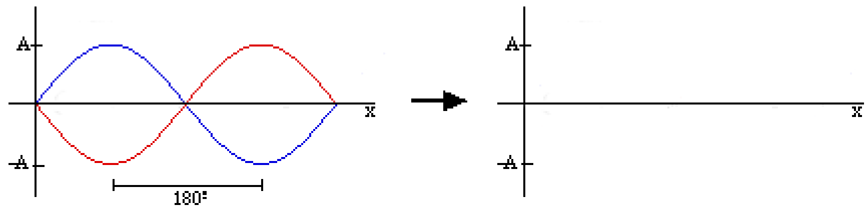
Uma onda senoidal pode ser entendida como um movimento circular que se propaga ao longo de um eixo, o qual pode representar uma distância ou tempo, por exemplo.



A relação desse movimento com um ponto de referência é chamada de fase. Por exemplo, na figura abaixo as duas senoides estão defasadas em 90º.



Quando duas ondas são superpostas suas amplitudes são somadas algebricamente e a onda resultante dessa soma depende da fase. Assim, duas ondas de mesma frequência e amplitude *A* começando seus ciclos em zero grau, (em fase), vão resultar numa onda com mesma frequência e amplitude igual a duas vezes *A*. Mas se essas ondas estiverem defasadas, essa relação de amplitude é modificada. Para duas ondas de mesma frequência e amplitude, mas defasadas em 180º, as amplitudes estão exatamente opostas, cancelando-se totalmente:



Dizemos que diferenças de fase entre duas ondas geram interferências construtivas - quando a onda resultante tem amplitude maior que a das ondas individuais - ou interferências destrutivas - quando a amplitude da onda resultante é menor que a das ondas individuais.

Isso quer dizer que quando ondas sonoras interagem no ambiente elas estão se reforçando (interferência construtiva) ou cancelando (interferência destrutiva). Os sons que ouvimos no ambiente à nossa volta têm um comportamento complexo e raramente teremos um cancelamento total de uma determinada frequência devido às diferenças de fase.

As mesmas relações dadas para ondas senoidais de mesma frequência e amplitude são aplicadas também para a interação de outros tipos de onda com freqüências e amplitudes diferentes.

Deve-se notar que os harmônicos que compõem um som complexo também podem ter fases diferentes. Embora essas diferenças determinem a forma da onda, nosso aparelho auditivo é pouco sensível a essas variações. De modo geral, somos bastante sensíveis a variações de frequência e amplitude, mas as relações de fase são pouco perceptíveis, a não ser indiretamente.

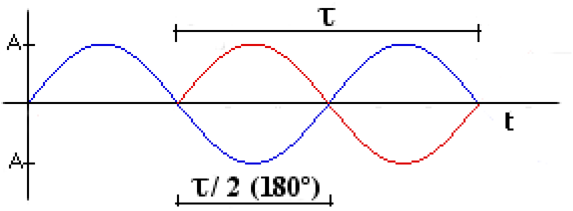
Por exemplo, duas senóides de frequência muito próxima, digamos 500Hz e 503Hz, entrarão e sairão de fase numa taxa de três vezes por segundo. Isso causa uma interferência periódica de reforço e cancelamento de amplitude. Esse fenômeno é chamado "batimento" e, nesse caso, a frequência do batimento é de 3 Hz. A sensação auditiva causada pelo batimento pode auxiliar na afinação de instrumentos de cordas, por exemplo. Quanto mais próxima a afinação de duas cordas soando juntas na mesma nota, menor a frequência do batimento gerado, que deverá desaparecer por completo quando elas estiverem perfeitamente afinadas.

Se considerarmos a situação de uma sala em que um som é difundido por dois alto-falantes, a interação entre os sons emitidos por cada um deles ocorrerá de modo diferente em cada ponto da sala. Dessa maneira, ouvintes localizados em pontos distintos ouvirão resultados sonoros diferentes. Um ouvinte posicionado de modo eqüidistante dos dois alto-falantes ouvirá o som em fase. Em qualquer outra posição haverá defasagem entre as duas fontes sonoras já que o som

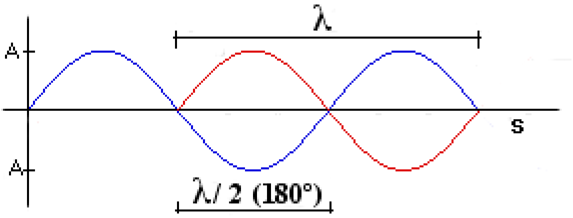
deverá percorrer distâncias diferentes até atingir ao ouvinte. Assim, as interações de fase influenciam na qualidade acústica dos ambientes.

Uma situação em que o controle de fase deve ser levado em conta é na captação sonora. Imagine uma gravação feita por dois microfones, um localizado a 0,5m e outro a 1m da fonte sonora. Como o som se propaga a uma certa velocidade (aproximadamente 344 m/s), as ondas sonoras chegarão atrasadas no microfone mais distante em relação ao microfone mais próximo da fonte. Quando os sinais dos microfones forem somados, algumas freqüências sofrerão cancelamento de fase enquanto outras serão reforçadas, modificando as características do timbre da fonte sonora.

Para que haja cancelamento total da energia sonora para uma determinada frequência, é necessário que duas ondas estejam defasadas em 180º. Em situações práticas, no entanto, as diferenças de fase não são diretamente medidas em termos de ângulos, mas sim em relação ao tempo (por exemplo, atraso entre duas fonte sonoras) ou espaço (distância entre duas fontes). Quando dizemos que duas ondas têm uma diferença de fase de 180º, isso significa que uma onda está 1/2 período atrasada (se pensarmos em termos de tempo) ou que há um deslocamento de 1/2 comprimento de onda entre as duas (se pensarmos em temos de espaço). Assim é fácil deduzir que para uma diferença, temporal Δt ou espacial Δs, quaisquer, haverá um cancelamento máximo (180º) para uma frequência que tiver um período ou um comprimento de onda equivalente a a duas vezes essa diferença.



Cancelamento máximo
quando $\Delta t = \tau / 2$



Cancelamento máximo
quando $\Delta s = \lambda / 2$

Assim, para dois sinais sonoros idênticos que chegam a um ouvinte com 0,005 segundo de atraso, o cancelamento de fase será total para uma frequência cujo período seja 2 vezes esse atraso:

$$2 * \tau = \frac{1}{f} \Rightarrow f = \frac{1}{2 * 0{,}005} = 100 Hz$$

Da mesma forma, duas fontes sonoras distantes, respectivamente a 0,50 metro e 2.22 metros de um microfone tenderão a ter um cancelamento máximo na frequência cujo comprimento de onda é 2 vezes a diferença entre as distâncias:

$$2 * \lambda = \frac{V}{f} \Rightarrow f = \frac{344}{2 * \Delta d} = \frac{344}{2 * 1{,}72} = 100 Hz$$

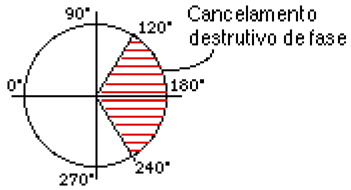
Como já foi dito, duas ou mais ondas sonoras estão sempre interagindo e a onda resultante depende da diferença de fases entre elas. Ainda que a defasagem seja diferente de 180º graus para uma determinada frequência, pode estar ocorrendo uma interferência destrutiva. Para fins práticos devemos evitar a faixa de defasagem que vai de 120º a 240º. Isso porque nessa faixa a soma de duas ondas de mesma frequência e amplitude *A*, resulta numa onda de amplitude sempre menor do que *A*. O cálculo da amplitude referente à soma de duas senóides de mesma frequência é dado pela fórmula:

$$A_{total} = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + (2 * A_1 * A_2 * \cos\phi)}$$

onde A_1 e A_2 são as aplitudes respectivas das duas ondas, A_{total} a soma resultante e Φ é o ângulo de defasagem. Se considerarmos que as duas ondas têm a mesma amplitude *A*, temos que:

para Φ = 0º	Atotal =	2 x A
para Φ = 90º	Atotal =	1.414 x A
para Φ = 120º	Atotal =	1 x A
para Φ = 180º	Atotal =	0
para Φ = 240º	Atotal =	1 x A
para Φ = 270º	Atotal =	-1.414 x A
para Φ = 360º	Atotal =	2 x A

Portanto, deve-se evitar a região entre 120º e 240º de defasagem, pois aí ocorrerão os maiores cancelamentos de amplitude em função da diferença de fase:



Para saber se o atraso em relação a uma determinada frequência encontra-se nessa zona de concelamento destrutivo de fase, pode-se utilizar a seguinte fórmula:

$$\phi = \Delta_t \bullet f \bullet 360^o$$

onde Δt é o atraso em segundos, o qual pode ser calculado como a distância entre as fonte sonoras divida pela velocidade do som:

$$\Delta_t = \frac{d_1 - d_2}{V_{som}}$$

Se o ângulo Φ estiver no intervalo entre 120º e 240º, haverá um cancelamento razoável para aquela frequência.

Limites de Audibilidade

Os nossos limites de audibilidade são determinados em termos de intensidade sonora, para um tom puro de freqüência de 1000Hz. A gama entre esses limites é bastante grande: vai do *Limiar de Audibilidade* (mínima intensidade audível) correspondente a 10^{-12} W/m^2 até o *Limite de Dor* (nível máximo de intensidade audível sem danos fisiológicos ou dor) correspondente a 1 W/m^2. Ou seja, uma razão de 1 para 1 trilhão.

Nosso ouvido responde de modo complexo a pequenas variações de pressão do meio, podendo detectar variações por volta de 2×10^{-5} N/m^2. Isso corresponde aproximadamente a 1 bilionésimo da pressão atmosférica (101.325 *Pa*, ou aproximadamente 10^5 N/m^2).

O *Limite de Dor* é aproximadamente 1 trilhão de vezes maior (10^{12}), mas ainda assim corresponde a menos de 1 milésimo da pressão atmosférica.

Para uma freqüência de 1000 Hz os níveis mínimo e máximo de intensidades sonoras que percebemos são definidos por:

Limiar de Audibilidade	**$I = 10^{-12}$ W/m**	$10 \log \frac{10^{-12}}{10^{-12}} = 0dB$
Limite de Dor	**$I = 1$ W/m^2**	$10 \log \frac{1}{10^{-12}} = 120dB$

Desse modo, a gama de intensidades que ouvimos é de 120 dB para um tom de referência de 1000 Hz.

Decibel e Escala Logarítmica

Em função da extensão das variações entre as intensidades mínima e máxima que podemos ouvir é conveniente que se utilize uma escala logarítimica, a escala de Decibéis (dB).

Decibel é a razão logarítmica entre duas potências ou intensidades e é dado pela expressão:

$dB = 10 \times \log_{10} (I_x/I_y)$

A relação entre operações exponenciais e logarítimicas é dada da seguinte maneira:

$N=B^e$	**$\log_B N=e$**

Principais operações:

$x^y * x^z = x^{y+z}$	**$\log a*b = \log a + \log b$**
$x^y / x^z = x^{y-z}$	**$\log a/b = \log a - \log b$**
$(x^y)^z = x^{y*z}$	**$\log a^b = b \log a$**

Tabela de Logarítimos na base 10 ($\log_{10}$)

log 1 = 0	log 10 = 1
log 2 = 0.301	log 100 = 2
log 3 = 0.477	log 1000 = 3
log 4 = 0.602	log 10000 = 4
log 5 = 0.698	log 100000 = 5

log 6 = 0.778	log 0.1 = -1
log 7 = 0.845	log 0.01 = -2
log 8 = 0.903	log 0.001 = -3
log 9 = 0.954	log 0.0001 = -4

Decibéis

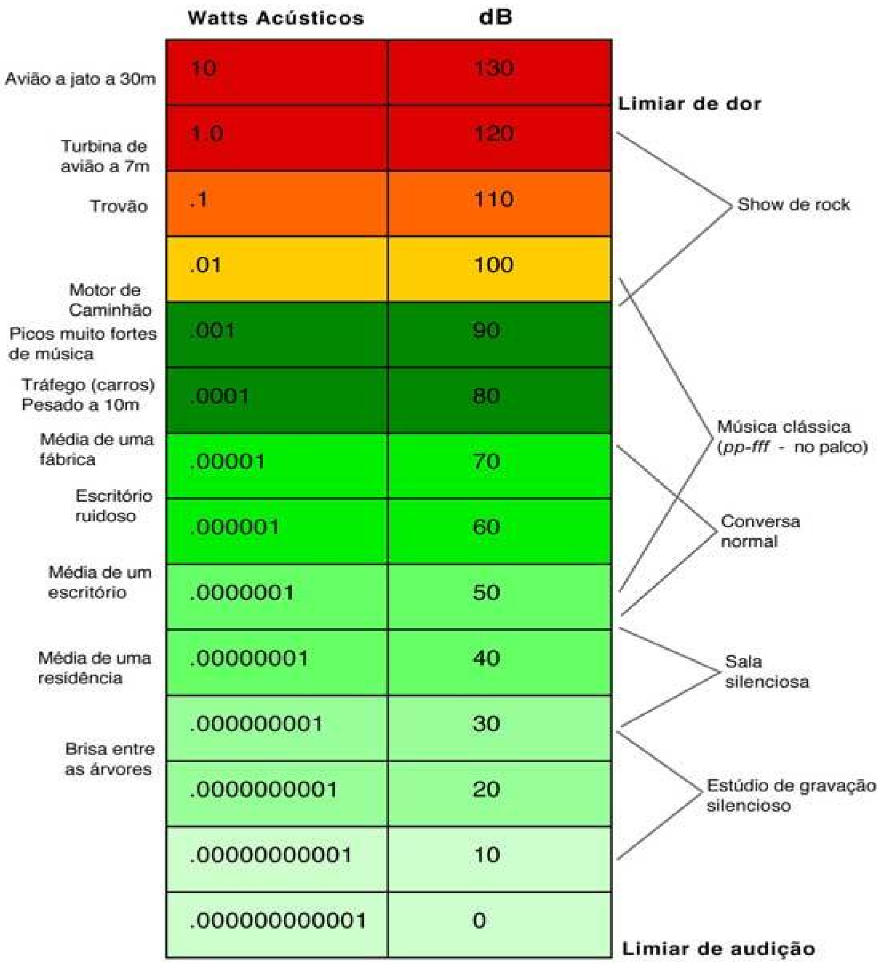
A percepção do volume está relacionada à variação de pressão gerada por uma onda sonora e, portanto, à sua intensidade.

Nosso sistema auditivo tem dois limites de audibilidade:

- limiar de audibilidade (mínima intensidade audível)

- limite de dor (máximo nível de intensidade audível sem danos fisiológicos ou dor)

A gama entre os 2 limites é muito grande. Para uma frequência pura de 1000 Hz, esses limites vão de 10^{-12} watt/m^2 a 1 watt/m^2, ou seja, uma razão de 1 trilhão para 1.



Numericamente, a referência em watt/m^2 não é confortável. Para isso foi introduzida uma razão de compressão logarítmica, o decibel (dB).

DECIBEL é uma relação logaritmica entre duas potências ou intensidades.

$dB = 10 \log_{10} (I_1/I_2)$

Relação exponencial e logarítmica:	$N=B^e$ --> $\log_B N=e$
$x^y * x^z = x^{y+z}$ =>	log a*b = log a + log b
$x^y/x^z = x^{y-z}$ =>	log a/b = log a - log b
$(x^y)^z = x^{y*z}$ =>	$\log a^b = b \log a$

NÍVEL DE INTENSIDADE SONORA: toma-se o limiar de audibilidade como referência (10^{-12} watt/m^2):

limiar de audibilidade	$10 \log (10^{-12}/10^{-12}) = 10 \log 1 = 0$ dB
limite de dor	$10 \log (1/10^{-12}) = 10 \log 10^{12} = 120$dB

A cada 3dB a intensidade dobra: I + I => 10 log (2/1) = 10* 0,301= 3dB

Logarítmos	
log 1 = 0	log 7 = 0.845
log 2 = 0.301	log 8 = 0.903
log 3 = 0.477	log 9 = 0.954
log 4 = 0.602	log 10 = 1
log 5 = 0.698	log 100 = 2

log 6 = 0.778	log 1000 = 3

Relação de Intensidade/ Potência (dBm ou dB SPL)	**Relação de Pressão/ Voltagem (dBV ou dBu)**
0dB = 1* I	0dB = 1* V
1dB = 1.25* I	2dB = 1.25 * V
2dB = 1.6* I	4dB = 1.6 * V
3dB = 2* I	6dB = 2* V
4.8dB = 3 * I	9.5dB = 3 * V
6dB = 4* I	12dB = 4* V
7dB = 5 * I	14dB = 5 * V
7.8dB = 6 * I	15.6dB = 6* V
8.5dB = 7 * I	16.9dB = 7 * V
9dB = 8* I	18dB = 8* V
9.5dB = 9 * I	19.1dB = 9 * V
10dB = 10* I	20dB = 10* V
12dB = 16* I	24dB = 16* V
15dB = 32* I	30dB = 32* V
18dB = 64* I	36dB = 64* V
20dB = 100* I	40dB = 100* V

30dB = 1.000* I	60dB = 1.000* V
40dB = 10.000* I	80dB = 10.000* V

Potência máxima de alguns instrumentos

Instrumento	Potência Máxima (watt)	Decibéis
clarinete	0,05	86
violoncelo	0,16	92
piano	0,27	94
trompete	0,31	94
trombone	6,0	107
bumbo	25,0	113

dBm(Z)	referencia é 1mW=0,001W = 10^{-3}W	10 * log P/0.001 W

mW = miliwatt / Z = impedância (geralmente 600 Ohms)

dBW	referencia é 1 W	1W = 0dBW = 30dBm

dBV	referencia é 1 Volt	Decibel em relação à tensão (U)	P = U^2/Z

dB = $10 \log P_1 / P_2 = 10 \log (U^2/Z)_1 * (U^2/Z)_2 = 10 \log (U^2)_1/(U^2)_2$
$= 10 \log (U_1/U2)_2 = 20 \log (U_1/U_2) =$ **dBV**

dBu	referencia é 0,775 V ou 775 mV

dBm = dBW + 30	**dBW** = dBm - 30
dBV = dBu - 2.21	**dBu** = dBV + 2.21

Intensidade Sonora

É o fluxo de energia por unidade de área. Refere-se ao produto da pressão pela velocidade das partículas em um meio fluido, o que é equivalente à potência recebida por unidade de área.

$$I = \frac{Força}{Área} \times \frac{Distância}{Tempo} = \frac{Energia}{Área \times Tempo} = \frac{Potência}{Área}$$

Em termos acústicos a intensidade é o valor médio do fluxo de energia por unidade de área perpendicular à direção de propagação, medida em Watt por metro quadrado (W/m2).

O *Nível de Intensidade Sonora* é expresso em decibéis tomando-se como referência $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2.

$$NIS = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

Para uma freqüência de 1000 Hz, os níveis mínimo e máximo de intensidades sonoras que percebemos são definidos por:

Limiar de Audibilidade	I=10^{-12} W/m	$10 \log \frac{10^{-12}}{10^{-12}} = 0dB$
Limite de Dor	I = 1 W/m^2	$10 \log \frac{1}{10^{-12}} = 120dB$

Desse modo, a gama de intensidades que ouvimos é de 120 dB para um tom de referência de 1000 Hz.

Potência Sonora

É a *energia acústica* total emitida por uma fonte por unidade de tempo, medida em Watt (1 W = 1 J/s).

O *Nível de Potencia Sonora* (*NWS, Sound Power Level*) é expresso em decibéis

tomando-se como referência $W_0 = 10^{-12}$ W (1 picowatt).

$$NWS = 10\log\frac{W}{W_0}$$

Ao contrário do que acontece com a intensidade e a pressão sonora, a potência não depende do ambiente nem da distância da fonte. Seu valor não varia já que a potência sonora refere-se à energia emitida pela fonte.

Pressão Sonora

Variação média (*RMS – root mean square*) de pressão em relação à pressão atmosférica; medida em Pascais (Pa) ou Newtons por metro quadrado (N/m^2).

1 Pa = 1 N/m^2

O *Nível de Pressão Sonora* - NPS (*Sound Pressure Level – SPL*) em um determinado ponto é expresso em decibéis e tem como valor de referência P_0 = 20 mPa (2×10^{-5} N/m^2).

A intensidade é proporcional ao quadrado da média de variação de pressão. Daí,

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{p_1^2}{p_2^2}$$

Portanto,

$$NIS = 10\log\frac{I}{I_0} = 10\log\frac{p^2}{p_0^2} = 10\log\left(\frac{p}{p_0}\right)^2 = 20\log\frac{p}{p_0}$$

Assim, o Nível de pressão sonora é dado por:

$$NPS = 20\log\frac{p}{p_0}$$

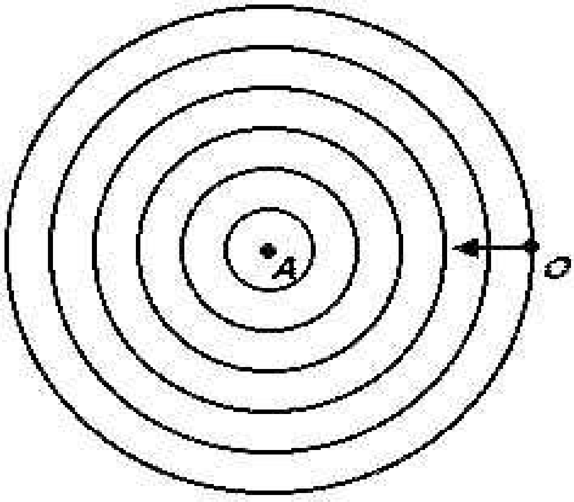
Efeito Doppler

Quando uma fonte sonora ou seu receptor (o ouvinte) estão se movendo ocorre uma alteração aparente na frequência percebida do som, que é denominada *Efeito Doppler.*

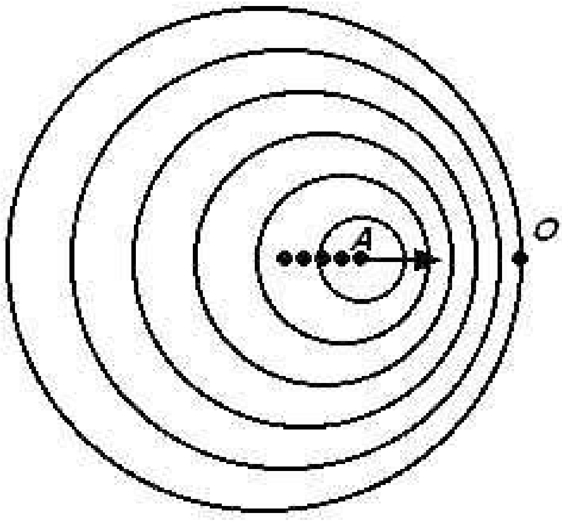
Suponhamos que uma fonte *A* emite 100 ondas por segundo. Um observador *O* perceberá a passagem de 100 ondas a cada segundo. Entretanto, se o observador se move na direção da fonte *A*, o número de ondas que ele encontra a cada segundo aumenta proporcionalmente à sua velocidade e a frequência aparente será dada por:

$$f = f_A \frac{v + v_0}{v}$$

onde f_A é a frequência da fonte, v_o a velocidade do observador, e v a velocidade do som. Assim a frequência aparentemente aumenta enquanto o observador se move em direção à fonte. Quando o observador passa pela fonte A, a frequência cai abruptamente, já que a ele passa a se afastar da fonte (nesse caso, v_o deve ser subtraída de v).



O mesmo efeito ocorre se a fonte estiver em movimento, como no caso de uma ambulância que passa com a sirene ligada por um observador. A figura abaixo mostra que as ondas produzidas se assemelham a esferas cujos centros se deslocam na direção do movimento da fonte.



Neste caso a frequência aparente será:

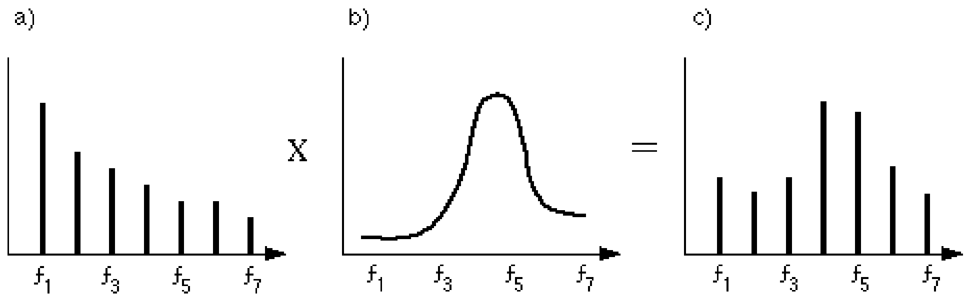
$$f = f_A \frac{v}{v - v_A}$$

Formantes

Os formantes podem ser definidos como picos de energia em uma região do espectro sonoro. Desse modo, os harmônicos que se encontram nessa região de ressonância serão realçados.

Os formantes são um fator importante na caracterização do timbre de certos instrumentos. Enquanto o espectro de cada nota de um instrumento pode variar consideravelmente com a altura, as regiões dos formantes permanecem estáveis, seja qual for a frequência da nota. Portanto, os formantes funcionam como uma espécie de assinatura de uma determinada fonte sonora.

A caixa de ressonância de instrumentos como o piano e a maioria dos instrumentos de corda possuem regiões de formantes específicas que modulam as vibrações geradas pelas cordas alterando assim o espectro do instrumento. A figura abaixo representa um instrumento de corda hipotético, onde o gráfico a) representa o espectro da corda que será modulado (multiplicado) pelo formante da caixa de ressonância do instrumento, representado no gráfico b). O espectro do som resultante desse instrumento está representado no gráfico c).



Os formantes são particularmente importantes na determinação da fala. De certo modo, a formação das vogais se dá praticamente pela alteração das regiões formânticas do aparelho fonador.

Frequências dos 2 primeiros Formantes (em Hz) para instrumentos de sopro

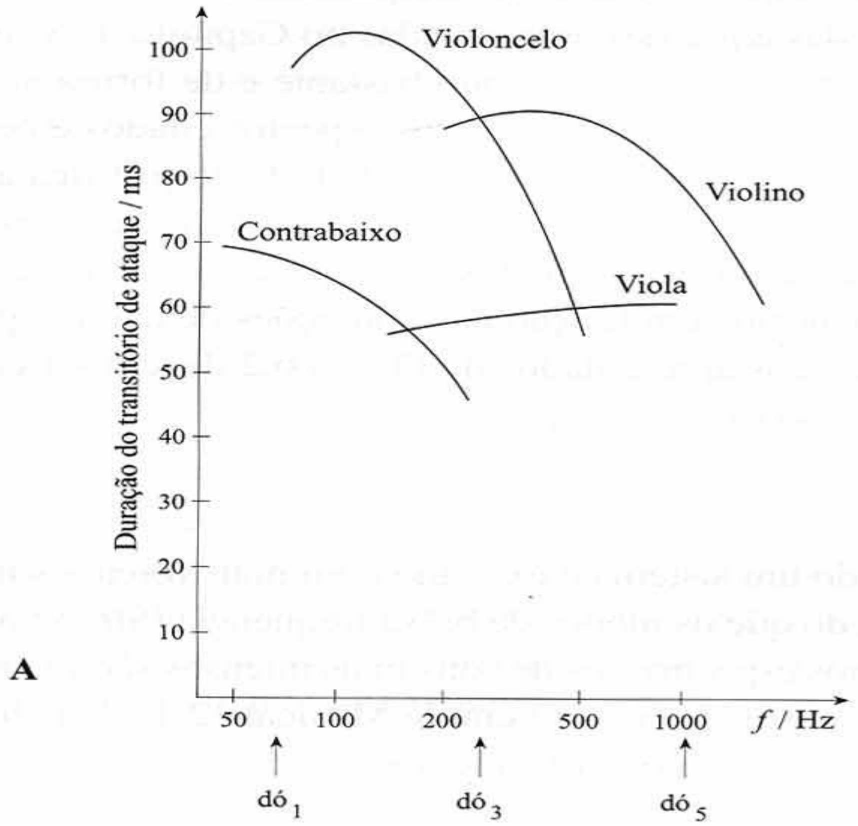
Instrumento	1.o Formante	2.o Formante
Flauta	800	-
Oboé	1400	3000
Clarinete	1500-1700	3700-4300
Fagote	440-500	1220-1280
Trompete	1200-1400	2500
Trombone	600-800	-
Tuba	200-400	-
Trompa	400-500	-

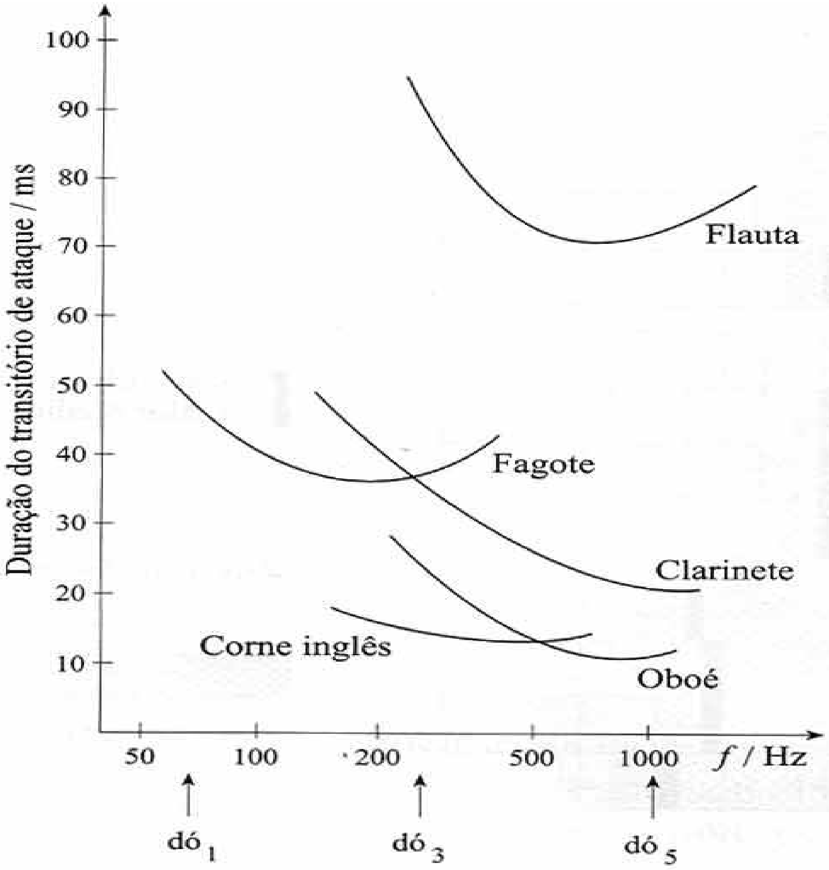
Transientes

São picos de energia de curta duração gerados por componentes não periódicos e de comportamento caótico. Ocorrem geralmente no ataque dos sons e contêm grande quantidade de energia em altas freqüências.

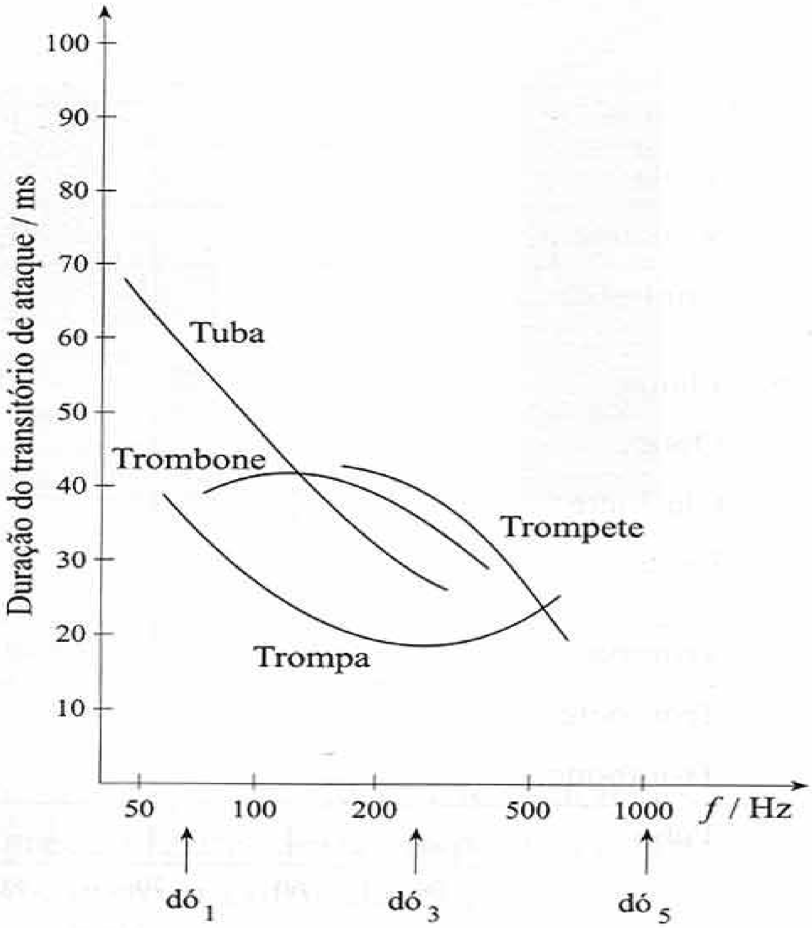
A porção do ataque de um som é chamada de *estado transiente* uma vez que as componentes freqüenciais não são estáveis. Sua duração varia em torno de 5 a 300 milesegundos.

Os transientes são fundamentais na percepção do timbre e na formação da impressão espacial dos sons. Para a voz, os transientes são de extrema importância, já que constituem a base de sons consoantes.




Duração do transitório de ataque / ms
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
Flauta
Fagote
Clarinete
Corne inglês
Oboé
50
100
200
500
1000
f / Hz
dó 1
dó 3
dó 5

B


Duração do transitório de ataque / ms
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
Tuba
Trombone
Trompete
Trompa
50
100
200
500
1000
f / Hz
dó 1
dó 3
dó 5

C