

Escrito e ilustrado por:

**PAUL G. HEWITT**

*City College de San Francisco*

# Física Conceitual

SBI-IFUSP

**9ª Edição**



305M81042121

INSTITUTO DE FÍSICA  
Serviço de Biblioteca e  
Informação

Tombos: 42.121

**Tradução:**

Trieste Freire Ricci

Doutor em Ciências pela UFRGS

Professor Adjunto do Instituto de Física da UFRGS

Maria Helena Gravina

Especialista em Ciências pela UFRGS

Professora do Colégio Militar de Porto Alegre

**Revisão técnica:**

Cláudio José de Holanda Cavalcanti

Doutor em Ciências pela UFRGS

Professor Assistente do Centro Universitário La Salle

Reimpressão 2007



2002

# 21

## SONS MUSICAIS



Skip Wagner, um entusiasta da física e trompetista da Orquestra de Balé de São Francisco, EUA, ilustra maravilhosamente o som da música.

A maior parte dos sons que escutamos são ruídos. O impacto de um objeto que cai, a batida de uma porta, o ronco de uma motocicleta e a grande maioria dos sons que escutamos no tráfego das cidades são ruídos. O ruído corresponde a uma vibração irregular do tímpano produzida por alguma outra vibração irregular. O som musical tem diferentes características, possuindo tons periódicos – ou “notas” musicais. Embora o ruído não tenha tais características, a linha que separa a música do ruído é tênue e subjetiva. Para alguns compositores contemporâneos ela não existe.

Algumas pessoas consideram ruído a música contemporânea e a música não-familiar de outras culturas. Diferenciar de ruído esses tipos de música torna-se um problema de estética. Entretanto, diferenciar de ruído a música tradicional – isto é, a música clássica ocidental e a maior parte da música popular – não representa um problema. Usando um osciloscópio, mesmo uma pessoa com total perda de audição poderia distinguir entre estes tipos de música. Lembre-se da Figura 20.4: quando um osciloscópio é alimentado por um sinal elétrico vindo de um microfone, os padrões das variações de pressão do ar com o tempo são mostrados de maneira precisa – o que facilmente torna o ruído distinguível da música tradicional (Figura 21.1).

Os músicos normalmente se referem aos tons musicais em termos de três características principais: altura, volume e timbre.

### Altura

A **altura** de um som relaciona-se à frequência. A maioria dos sons são compostos de diversas frequências, a mais baixa das quais corresponde à altura do som. Vibrações rápidas da fonte sonora (alta frequência) produzem uma nota alta, enquanto vibrações lentas (baixa frequência) produzem uma nota baixa. Falamos da altura de um som em termos de sua posição em uma escala musical. Quando um concerto em A<sup>4</sup> é tocado num piano, um martelo faz vibrar duas ou três cordas, cada uma das quais vibra 440 vezes em um segundo. A altura do concerto A corresponde a 440 hertz<sup>\*\*</sup>.

Notas musicais diferentes são obtidas mudando-se a frequência de vibração da fonte sonora. Isso geralmente é feito alterando-se o tamanho, a rigidez ou a massa do objeto em vibração. Um guitarrista ou violinista, por exemplo, ajusta a rigidez, ou tensão, das cordas do instrumento quando as está afinando. Depois, alterando o comprimento de ca-

<sup>\*</sup> N. de T. No sistema cifrado para representar notas, acordes ou tons musicais, as primeiras letras do alfabeto, em maiúsculas, representam os nomes tradicionais dos sons da escala musical: A para Lá, B para Si, C para Dó, D para Ré, E para Mi, F para Fá e G para Sol.

<sup>\*\*</sup> Curiosamente, o tom do concerto em A varia desde tão baixo quanto 436 Hz até tão alto quanto 448 Hz, para diferentes orquestras sinfônicas.

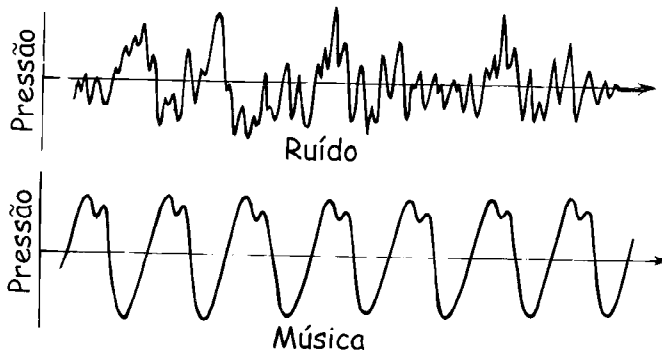


FIGURA 21.1 Representações gráficas de ruído e de música.

TABELA 21.1 Fontes e intensidades de som comuns

Fonte Sonora	Intensidade ( $W/m^2$ )	Nível Sonoro (dB)
Avião a jato a 30m de distância	$10^2$	140
Sirene de alarme, próxima	1	120
Música popular amplificada	$10^{-1}$	115
Rebitador	$10^{-3}$	100
Tráfego na rua movimentada	$10^{-5}$	70
Conversa em casa	$10^{-6}$	60
Ruído baixo em casa	$10^{-8}$	40
Murmúrio	$10^{-10}$	20
Farfalhar de folhas de árvores	$10^{-11}$	10
Limiar de audição	$10^{-12}$	0

da corda ao pressioná-las com os dedos, pode tocar diferentes notas com elas.

Nos instrumentos de sopro, pode-se alterar o comprimento da coluna de ar em vibração (trompete), ou pode-se abrir ou fechar os pequenos buracos na lateral do tubo em combinações variadas (saxofone, clarineta, flauta), para alterar a altura da nota emitida.

Os sons muito altos usados em música quase sempre são mais baixos do que 4.000 hertz, mas o ouvido humano pode escutar sons com frequências acima de 18.000 hertz. Algumas pessoas podem escutar sons com alturas ainda maiores, assim como a maioria dos cachorros. Em geral, o limite superior de audição nas pessoas fica mais baixo à medida que envelhecem. Um som muito alto frequentemente é inaudível para uma pessoa idosa, mas pode ser escutado claramente por alguém mais jovem. Deste modo, na época em que você puder realmente comprar aquele sistema musical de alta-fidelidade, pode ser que você nem seja capaz de apreciar a diferença.



rência – e chamada de 0 *bel*, uma unidade que homenageia Alexandre Graham Bell. Um som dez vezes mais intenso que este tem uma intensidade de 1 *bel* ( $10^{-11} W/m^2$ ) ou 10 *decibels*. A Tabela 21.1 lista alguns sons musicais típicos e suas intensidades.

Um som de 10 decibels é 10 vezes mais intenso do que 0 decibel, o limiar de audição. Logo, 20 decibels é 100 ou  $10^2$  vezes mais intenso do que o limiar de audição. Logicamente, 30 decibels é  $10^3$  vezes mais intenso do que o limiar de audição e 40 decibels é  $10^4$  vezes esse valor. Logo, 60 decibels representa uma intensidade sonora um milhão de vezes ( $10^6$ ) maior do que 0 decibel; 80 decibels representa um som  $10^2$  vezes mais intenso do que 60 decibels.

Os danos fisiológicos ao ouvido começam a acontecer quando ele é exposto a 85 decibels, com o grau dos danos dependendo da duração da exposição e de suas características quanto à frequência. Danos causados por um som muito intenso podem ser temporários ou permanentes, dependendo se os órgãos de Corti, os órgãos receptores dentro do ouvido interno, foram danificados ou destruídos. O simples som de uma explosão pode produzir nesses órgãos vibrações tão intensas que são capazes de rasgá-los. Menos intenso, mas severo, o ruído pode interferir nos processos celulares nos órgãos e produzir avarias. Infelizmente as células desses órgãos não se regeneram.

A intensidade do som é um atributo físico e puramente objetivo de uma onda sonora e pode ser medida por diversos instrumentos acústicos (e o osciloscópio da Figura 21.2). O **volume do som**, por outro lado, é uma sensação fisiológica. O ouvido sente algumas frequências melhores do que outras. Um som de 3.500 Hz soa a 80 decibels, por exemplo, cerca de duas vezes mais forte para a maioria das pessoas do

## Intensidade Sonora e Volume de Som

A **intensidade** de um som depende da amplitude das vibrações de pressão no interior da onda sonora. (E, como em todas as ondas, a intensidade é diretamente proporcional ao quadrado da amplitude da onda.) A intensidade é medida em unidades de watts/metro<sup>2</sup>. O ouvido humano reage a intensidades que abrangem uma faixa enorme desde  $10^{-12} W/m^2$  (o limiar da audição) até mais de  $1 W/m^2$  (o limiar da dor). Como esta faixa de valores é muito grande, utilizam-se escalas de potências de dez para as intensidades, em que a intensidade dificilmente audível de  $10^{-12} W/m^2$  é tomada como a intensidade de refe-





FIGURA 21.2 James mostra um sinal de som num osciloscópio.

que um som de 125 Hz a 80 decibels; os humanos são mais sensíveis na faixa dos 3.500 Hz. Os sons mais fortes que podemos tolerar têm intensidades um milhão de milhão de vezes mais forte que o mais fraco dos sons. A diferença percebida no volume do som, no entanto, é muito menor do que isso.

**Teste a si mesmo** O ouvido é danificado permanentemente quando se vai a concertos ou clubes, ou quando se exerce funções em ambientes com música muito alta?

## Timbre

Não temos problema em distinguir entre o som de um piano e um som de uma clarineta, para a mesma nota. Cada um desses sons tem uma característica sonora que difere em **timbre**, ou qualidade. A maioria dos sons musicais é formada pela superposição de muitos sons com frequências diferentes. Esses vários sons são chamados de **componentes de frequência**, ou simplesmente *componentes*. A frequência mais baixa deles, chamada de **frequência fundamental**, determina a altura da nota. Aquelas componentes de frequência que são múltiplas inteiras da frequência fundamental são chamadas de **harmônicos**. Um tom com frequência duas vezes maior do que a frequência fundamental é o segundo harmônico, um tom com três vezes a frequência fundamental é o terceiro harmônico e assim por diante (Figura 21.3). É a variedade das componentes de frequência que dão a uma nota musical seu timbre característico.

<sup>1</sup> N. de T. Em português, quando empregada em contexto musical, a palavra "alto" (ou "alta") pode ter dois sentidos bem diferentes, dependendo se é empregada para se referir ao volume do som (como em "Abaixe o som, por favor") ou à frequência do mesmo (como em "A cantora alcança notas muito altas naquela música"). No presente caso, "música muito alta" claramente significa que o volume da música é muito grande, ou alto.

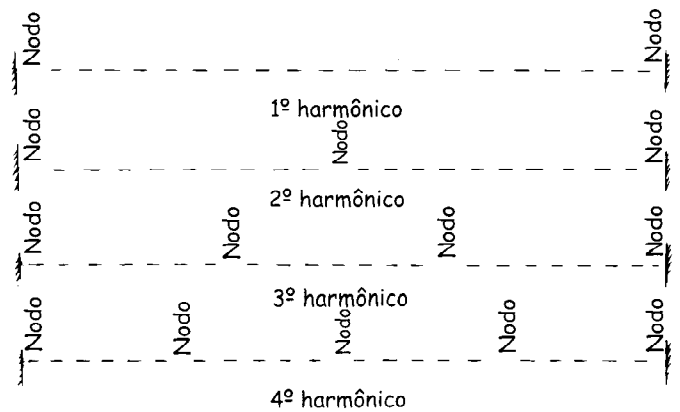


FIGURA 21.3 Modos de vibração de uma corda de violão.

**Verifique sua resposta** Sim, dependendo do volume da música, de sua duração, de quão próxima e de quão frequentemente isso acontece. Alguns grupos musicais têm dado ênfase no volume do som em vez da qualidade da música. Tragicamente, à medida que o ouvido vai sendo danificado, os membros do grupo (e seus fãs) precisam de volumes de som cada vez maiores para que sua audição seja estimulada. A perda de audição causada por sons é particularmente comum na faixa de frequência que vai de 2.000 a 5.000 Hz. O ouvido humano é normalmente mais sensível em torno dos 3.000 Hz.

Assim, se tocamos o C (Dó) central do piano, produzimos um tom fundamental com uma altura de 262 hertz e também uma mistura de componentes de frequência com



duas, três, quatro, cinco vezes, e assim por diante, a frequência do C central. O número de componentes de frequência, e o volume de som de cada uma delas, determinam o timbre do som associado ao piano. Os sons de praticamente todos os instrumentos musicais consistem do som fundamental e suas componentes de frequência. Tons puros, aqueles que possuem apenas uma única frequência, podem ser

<sup>2</sup> Na terminologia normalmente utilizada em música, o segundo harmônico é chamada de primeiro *sobretom*, o terceiro harmônico de segundo *sobretom* e assim por diante. Nem todas as componentes de frequência presentes num som musical complexo são múltiplas inteiras da frequência fundamental. Diferente dos harmônicos produzidos pelos instrumentos de sopro de madeira ou de bronze, instrumentos de corda tais como um piano produzem componentes de frequência "esticadas", que são aproximadamente, mas não exatamente, harmônicos. Isso é um fator importante ao se afinar pianos, e ocorre porque a rigidez das cordas a serem dobradas altera um pouco a força restauradora para vibrações de frequências diferentes.



**FIGURA 21.4** Uma vibração composta do modo fundamental e de seu terceiro harmônico.

Dó do piano

Dó da clarineta

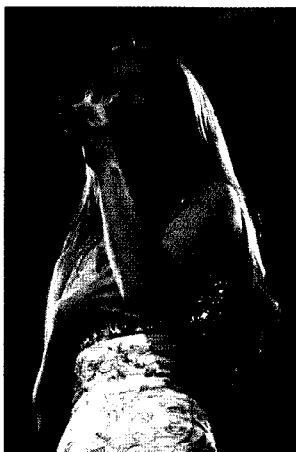
**FIGURA 21.5** Os sons de um piano e de uma clarineta diferem em timbre.

produzidos eletronicamente. Os sintetizadores eletrônicos produzem tons puros e também misturas destes, numa vasta variedade de sons musicais.

O timbre de um som é determinado pela presença e a pela intensidade relativa das várias componentes. O som produzido por uma certa nota do piano e aquele produzido por uma clarineta, ambos de mesma altura, têm timbres diferentes, que o ouvido reconhece por serem diferentes as componentes que os formam. Um par de notas de mesma altura, mas com timbres diferentes, ou possuem componentes diferentes ou então apresentam diferenças nas intensidades relativas de suas componentes.

## Instrumentos Musicais

Os instrumentos musicais convencionais podem ser agrupados em uma de três classes: aqueles em que o som é produzido por cordas vibrantes, aqueles em que o som é produzido por colunas de ar em vibração ou aqueles em que o som é produzido por *percussão* – a vibração de uma superfície bidimensional.



Num instrumento de cordas, a vibração das cordas é transferida para um tampo vibrante e daí para o ar, mas com eficiência baixa. Para compensar isso, nas orquestras existem agrupamentos ou seções de instrumentos de corda relativamente numerosos. Um número menor de

instrumentos de sopro altamente eficientes equilibra o maior número de violinos.

Em um instrumento de sopro, o som é uma vibração de uma coluna de ar no interior do instrumento. Há diversas maneiras com as quais se pode por a vibrar colunas de ar. Em instrumentos de bronze tais como os trompetes, trompas e trombones, as vibrações dos lábios do instrumentista interagem com as ondas estacionárias que se estabelecem por causa da reflexão na extremidade do instrumento, que se alarga para fora na forma de um sino. Os comprimentos das colunas de ar vibrantes são manipulados apertando-se válvulas, que adicionam ou subtraem segmentos extras às colunas, ou estendendo-se os comprimentos dos tubos\*. Em instrumentos de sopro feitos de madeira, tais como clarinetas e oboés, uma corrente de ar que é soprada pelo músico faz vibrar uma palheta, ao passo que em pífaros, flautas e flautins, o músico sopra o ar contra a borda de um buraco para gerar um fluxo flutuante que põe a coluna de ar em vibração.

Em instrumentos de percussão tais como tambores e címbalos, a membrana bidimensional ou superfície elástica é batida para produzir som. O tom fundamental que é gerado depende da geometria, da elasticidade e, em alguns casos, da tensão da superfície. Alterar a tensão na superfície vibrante resulta em mudança na altura do som produzido; abaixar a borda da superfície de um tambor com a mão é uma maneira de realizar isso. Podem-se estabelecer diferentes modos de vibração batendo-se na superfície em lugares diferentes. Em um timbale, o formato da caixa altera a frequência do tambor. Como em todos os sons musicais, o timbre depende do número de componentes de frequência e de suas intensidades relativas.

Instrumentos musicais eletrônicos diferem notavelmente dos instrumentos convencionais. Em lugar de cordas que devem ser dobradas, tangidas ou percutidas, de palhetas sobre as quais o ar deve ser soprado, ou de diafragmas para serem golpeados a fim de produzirem sons, certos instrumentos musicais usam elétrons para gerar os sinais que formam os sons musicais. Outros partem de um som produzido por um instrumento acústico e, então, modificam-no. A música eletrônica exige do compositor e do instrumentista uma especialidade além do seu conhecimento em musicologia. Ela traz às mãos do músico uma ferramenta nova e poderosa.

## Análise de Fourier

Você já olhou de perto os sulcos de um antigo disco fonográfico de vinil? As variações nas larguras dos sulcos, vistas na Figura 21.6, fazem a agulha do disco vibrar enquanto são percorridos por ela. Essas vibrações mecânicas, por sua vez, são transformadas em vibrações elétricas para produzir os sons que você escuta de uma gravação. Não é impressionan-

\* Uma corneta não possui válvulas nem comprimento variável. O corneteiro deve ser um perito em criar sobretons diferentes para obter notas diferentes.



te que todas as diferentes vibrações geradas pelas diferentes partes de uma orquestra sejam capturadas num único sulco ondulante do disco? O som de um oboé capturado no sulco de um disco fonográfico de vinil e mostrado na tela de um osciloscópio se parece com o que mostra a Figura 21.7a. Essa onda corresponde ao sinal elétrico gerado pela agulha vibrante. Ela também corresponde

ao sinal amplificado que ativa o alto-falante de um sistema de som e à amplitude da vibração do ar contra o tímpano do ouvido. A Figura 21.7b mostra a aparência da onda produzida por uma clarineta. Quando o oboé e a clarineta soam juntos, o princípio da superposição fica evidente quando suas ondas individuais se combinam para produzir a forma de onda mostrada na Figura 21.7c.

A forma da onda na Figura 21.7c é o resultado da superposição (interferência) das formas *a* e *b*. Se conhecemos *a* e *b*, é fácil gerar *c*. Mas é um outro tipo de problema diferenciar em *c* as formas de onda *a* e *b* que a compõem. Olhando apenas para *c*, não podemos separar o oboé da clarineta.

Mas coloque o disco de vinil no toca-discos e seus ouvidos saberão imediatamente que instrumentos estão sendo tocados, e qual o volume relativo de cada um. Nossos ouvidos automaticamente decompõem o sinal global em suas partes componentes.

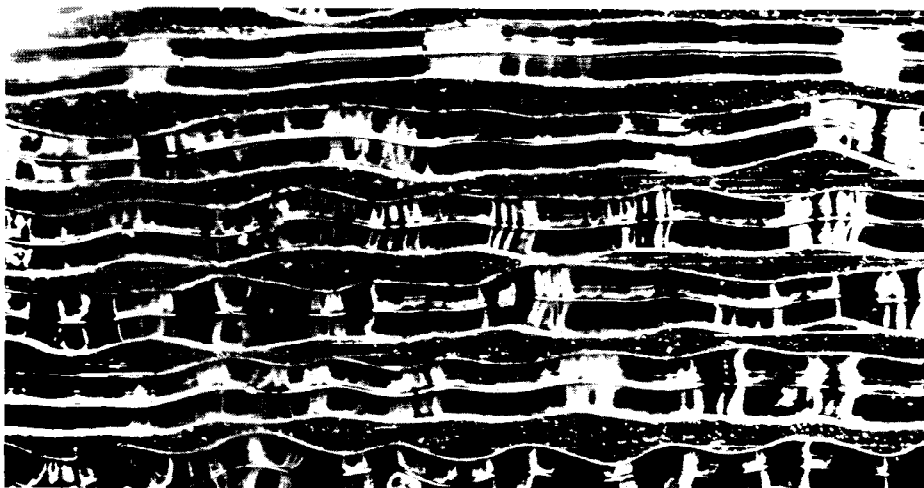
Em 1822 o matemático francês Joseph Fourier descobriu uma regularidade matemática para as partes que compõem um movimento ondulatório periódico. Ele descobriu que mesmo os movimentos ondulatórios periódicos mais complicados podem ser decompostos em simples ondas senoidais que se adicionam. Uma onda senoidal é a mais sim-

ples de todas as ondas, possuindo uma única frequência (Figura 21.8). Fourier descobriu que todas as ondas periódicas podem ser decompostas em ondas senoidais constituintes com amplitudes e frequências próprias. A operação matemática para realizar tal decomposição chama-se **análise de Fourier**. Não explicaremos aqui a matemática envolvida, simplesmente mencionaremos que com esta análise podemos encontrar as ondas senoidais puras, ou tons puros, que se adicionam para compor uma nota, digamos, de um violino. Quando esses tons puros soam juntos, como ao colocar em vibração, simultaneamente, um certo número de diapasons ou selecionando as chaves apropriadas de um órgão elétrico, eles combinam-se para dar a nota do violino. A onda senoidal de frequência mais baixa é a fundamental, e ela determina a altura da nota. As ondas senoidais de frequência mais alta são as componentes de frequência que dão o timbre característico. Assim, a forma de onda de qualquer som musical que nada mais é do que uma soma de ondas senoidais simples.

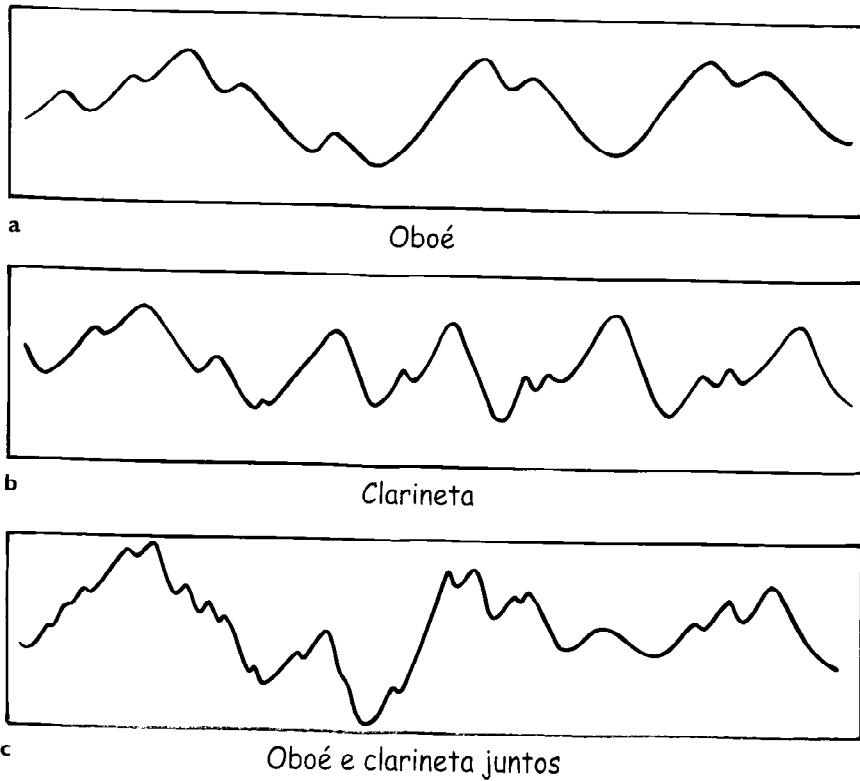
Uma vez que a forma de onda musical é obtida de um grande número de diferentes ondas senoidais, para reproduzir o som corretamente no rádio, no toca-discos digital ou no toca-fitas, deveríamos ser capazes de processar uma faixa de frequências tão ampla quanto possível. As notas de um teclado de piano abrangem desde 27 hertz até 4.200 hertz, mas para reproduzir fielmente uma composição feita para o piano, o sistema de som deve ter uma faixa de frequências que alcança até 20.000 hertz. Quanto mais ampla for a faixa de frequências de um sistema elétrico sonoro, mais fiel ao som original é o som ouvido na saída do sistema, sendo larga, por isso, a faixa de frequências de um sistema de som de alta-fidelidade.

Nossos ouvidos realizam automaticamente um tipo de análise de Fourier. Eles separam a mixórdia das complexas pulsações de ar que o alcançam e as transformam em tons

N. de T. Ondas senoidais são aquelas com a forma de uma função seno, ou co-seno, uma vez que esta forma pode ser vista como uma função seno defasada em 90 graus.



**FIGURA 21.6** Uma vista microscópica dos sulcos de um disco fonográfico de vinil.



**FIGURA 21.7** As formas de onda de (a) um oboé, (b) uma clarineta e (c) do oboé e da clarineta soando juntos.

**FIGURA 21.8** Uma onda senoidal. As somas de ondas senoidais individuais compõem formas de ondas mais complexas.

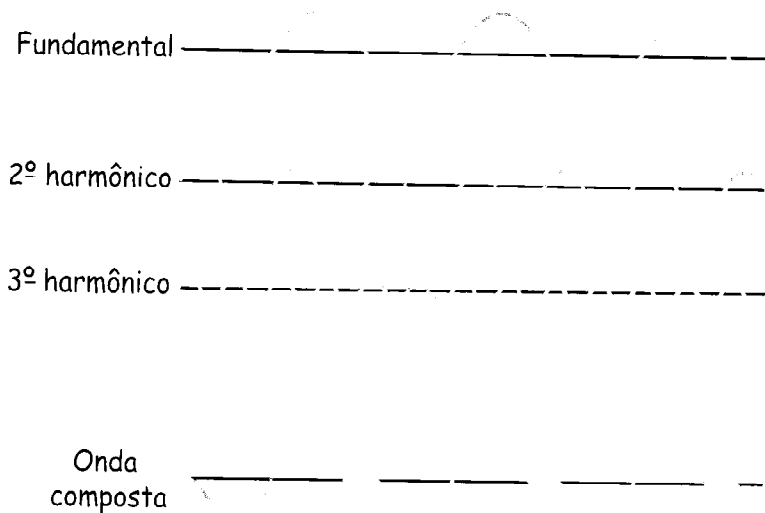
puros constituídos por ondas senoidais. Ao escutarmos, nós os recombinaamos em vários agrupamentos. As combinações de tons que aprendemos a fazer para despertar nossa atenção determinam o que ouvimos quando escutamos um concerto. Podemos dirigir nossa atenção para os sons de diversos instrumentos e separar os tons com volumes mais fracos dos que têm volume maior; podemos nos deliciar com a in-

tricada interação dos instrumentos e ainda detectar os ruídos externos dos outros que nos cercam. Isso é uma incrível façanha.

### CDS

Atualmente experimentamos os sons plenos e ricos de um quarteto de cordas ou de uma orquestra sinfônica nas salas de nossas casas ouvindo um CD (disco laser) por meio de uma notável técnica de gravação e reprodução de sons, cha-

N. de T. Abreviação de "Compact Discs".



**FIGURA 21.9** A fundamental e seus harmônicos combinam-se de modo a produzir uma onda composta.



FIGURA 21.10 Cada ouvinte escuta a mesma música?

mada de *áudio digital*. Mamã e Papai podem ter tido suas músicas gravadas em discos de vinil, que utilizavam uma agulha fonográfica convencional que vibrava dentro do sulco gravado. Hoje os toca-discos digitais usam um feixe de *laser* que é direcionado a um disco refletor de plástico. O sinal de entrada no amplificador vem de um sensor luminoso, em vez de uma agulha fonográfica.

Nos discos de vinil de antigamente, a agulha vibrava enquanto percorria os sulcos tortuosos da gravação. A saída era um sinal como aqueles mostrados na Figura 21.7. Este tipo de forma de onda contínua é chamado de sinal *analógico*. Ele pode ser transformado num sinal digital medindo-se

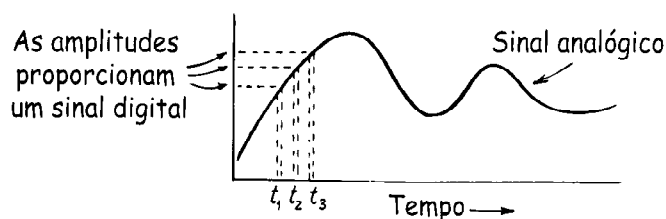


FIGURA 21.11 A amplitude da forma de onda analógica é medida sucessivamente em instantes separados, para fornecer informação digital que é gravada em forma binária sobre a superfície refletora de disco laser (CD).

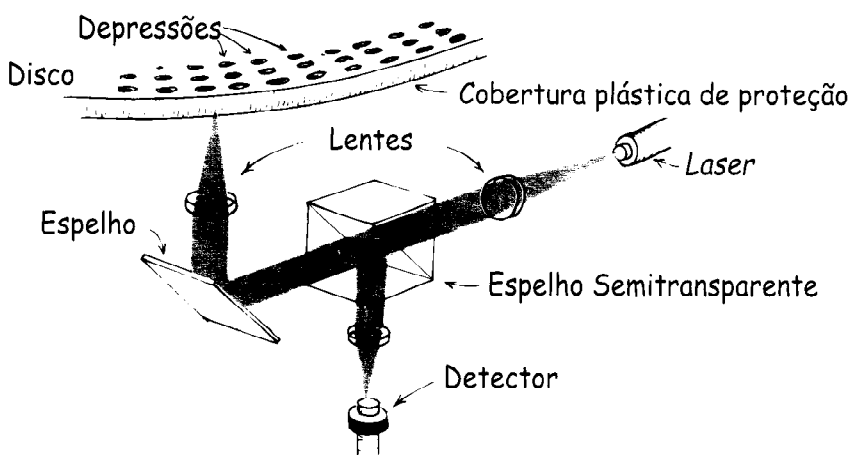


FIGURA 21.13 Um feixe de *laser* bem focado "lê" a informação digital representada por uma série de pequenas depressões sobre o disco laser.

os valores numéricos de sua amplitude em cada um dos curtos intervalos de tempo separados (Figura 21.11). Esse valor numérico pode ser expresso em um sistema numérico conveniente aos computadores digitais, chamado de sistema *binário*. No código binário, cada número pode ser expresso como uma sucessão de zeros e uns; por exemplo, o número 1 é 1, o 2 é 10, o 3 é 11, o 4 é 100, o cinco é 101, 17 é 10001, etc. Deste modo, a forma de onda analógica pode ser expressa com uma série de pulsos dos tipos "desligado" e "desligado", que correspondem à série de zeros e uns do código binário. É aqui que entram os discos *laser*.

Em lugar de um sulco fonográfico tortuoso, um CD possui uma série de microscópicas depressões cerca de trinta vezes menores do que a espessura de um fio de cabelo humano (Figura 21.12). Quando o feixe de luz incide sobre a parte plana da superfície refletora, ele é refletido diretamente para o sistema óptico do toca-discos; isto constitui um pulso do tipo "ligado". Quando o feixe incide diretamente sobre uma depressão que está passando, muito pouco do feixe de laser retorna ao sensor óptico; isto constitui um pulso do tipo "desligado". A rápida flutuação de pulsos dos tipos "ligado" e "desligado" gera os dígitos "um" e "zero" do código binário.

A taxa com a qual são amostradas essas depressões microscópicas sobre o disco é de 44.100 vezes por segundo. Um disco *laser* tem apenas 1/6 do tamanho de um LP convencional e contém bilhões de bits de informação. Toda essa informação está gravada em código na superfície refletora.

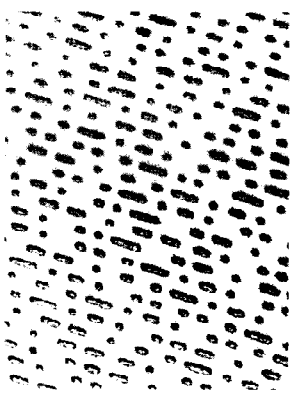


FIGURA 21.12 Uma visão microscópica das depressões sobre um disco *laser*.



ra, que é coberta com uma camada protetora de plástico transparente. Uma vez que o feixe de *laser* é focado sobre a superfície do disco abaixo da camada, o CD é relativamente imune a poeira, arranhões e marcas de dedo. Nada de chiados, estalidos e estampidos tão característicos dos antigos LPs. E como o feixe de *laser* não encosta no disco, este não se desgasta – não importa quantas vezes você o ouça.

A mais extraordinária característica do disco laser, entretanto, é a qualidade do som. Você pode ouvir a diferença.

## Sumário de Termos

**Altura do som** A “altura” de um som, como numa escala musical, que está relacionada principalmente à frequência. Uma fonte vibrando em alta frequência gera um som de altura muito grande, ou agudo; uma fonte vibrando em baixa frequência gera um som de altura baixa, ou grave.

**Intensidade sonora** A potência por metro quadrado transportada numa onda sonora, geralmente medida em decibels.

**Volume do som** A sensação fisiológica diretamente relacionada à intensidade do som.

**Timbre** A qualidade característica de um som musical, determinada pelo número e pela intensidade relativa das componentes de frequência.

**Componente de frequência** Uma onda sonora de única frequência que constitui um som complexo. Quando a frequência da componente é um múltiplo inteiro da frequência mais baixa, ela se chama um harmônico.

**Frequência fundamental** A frequência mais baixa de uma vibração, ou primeiro harmônico, em um som musical.

**Harmônico** Uma componente de frequência cuja frequência é múltipla inteira da fundamental. O segundo harmônico tem frequência duas vezes maior do que a fundamental, o terceiro harmônico tem frequência três vezes maior, e assim por diante.

**Análise de Fourier** Um método matemático que decompõe qualquer forma de onda periódica em uma combinação de ondas senoidais simples.

## Questões de Revisão

1. Faça distinção entre música e ruído.
2. Quais são as três principais características dos sons musicais?

### Altura

3. Como se comparam, em termos de frequência, uma nota musical alta com uma mais baixa?
4. Como a nota de maior altura que alguém pode ouvir varia com a idade?

### Intensidade Sonora e Volume do Som

5. O que é um decibel e quantos decibels correspondem à intensidade sonora mais baixa que podemos ouvir?

6. O som de 30 dB é 30 ou 103 (cem) vezes maior do que o limiar da dor?
7. Faça distinção entre intensidade sonora e volume do som.
8. Como os sons de maior volume que podemos tolerar se comparam com os mais fracos sons audíveis?

### Timbre

9. O que determina a altura de uma nota musical?
10. Se a frequência musical de uma nota é 200 Hz, qual é a frequência do segundo harmônico? E da do terceiro harmônico?
11. O que determina exatamente o timbre de uma nota musical?
12. Por que a mesma nota musical quando emitida por um banjo e por um violão apresentam sonoridades tão diferentes?

### Instrumentos Musicais

13. Quais as três principais classes de instrumentos musicais?
14. Por que as orquestras geralmente possuem um número maior de instrumentos de corda do que de sopro?

### Análise de Fourier

15. O que Fourier descobriu acerca dos padrões ondulatórios periódicos?
16. Um sistema de som de alta-fidelidade pode possuir uma faixa de frequências que se estende além de 20.000 hertz. Qual é a utilidade desta faixa de frequências tão ampla?

### CD's

17. Como o sinal de som é registrado em um disco fonográfico de vinil convencional? Como ele é registrado num disco laser?
18. Por que um disco laser não se desgasta como um disco de vinil comum?

## Projetos

1. Verifique que orelha tem melhor audição cobrindo uma delas e determinando até que distância você pode escutar o tique-taque de um relógio com a orelha tapada; repita o mesmo para a outra orelha. Observe também como a sensibilidade de sua audição melhora quando você coloca suas mãos como conchas atrás das orelhas.
2. Produza o som de menor altura que você consegue emitir; então procure ir dobrando a altura dele e verifique quantas oitavas sua voz pode alcançar. Se você é um cantor, qual é o seu alcance?
3. Sobre uma folha de papel quadriculado para gráficos, desenhe um ciclo completo (um período da fundamental) da onda composta da Figura 21.9, superpondo diversos deslocamentos verticais produzidos pela fundamental e por suas duas primeiras componentes de frequência. Seu professor pode lhe mostrar como fazer isso. Então encontre as ondas compostas desses sons por sua própria escolha.