

# 2

## SISTEMA DE COMUNICAÇÃO

Um sistema de comunicação tem a finalidade de transportar uma certa informação de um ponto chamado “fonte” para outro chamado “usuário”, através de um meio de comunicação.

No modelo ilustrado na figura abaixo, procuro sintetizar esta idéia simplificada de um sistema de comunicação.



Fig. 2.1: Sistema de comunicação

A informação pode ser de qualquer natureza e ter qualquer forma e conteúdo. Desde que o sistema seja capaz de transportá-la de um ponto a outro, mantendo sua inteligibilidade, fica caracterizada a comunicação.

Você pode ver, pela figura 2.1, que os elementos básicos de um sistema são:

- |                       |   |
|-----------------------|---|
| Fonte da informação - | quem gera a informação a ser transportada para o outro ponto.                                       |
| Transmissor -         | quem tem a tarefa de transmitir, de forma adequada, através do meio de comunicação disponível.      |
| Meio de comunicação - | meio físico por onde deve passar a informação.  |
| Receptor -            | quem recebe a informação transmitida pelo transmissor e a traduz para a forma desejável ao usuário. |
| Usuário -             | quem utiliza a informação.  |

Um exemplo bem simples seria o de uma pessoa falando para outra, conforme mostra a figura abaixo.

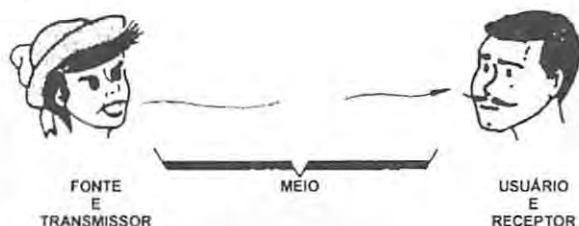


Fig.2.2: 1º exemplo de sistema

Neste caso, a pessoa da esquerda é a fonte e o transmissor, pois ela gera e transmite a informação por meio de ondas sonoras.

O meio de comunicação é o espaço que permite a transmissão das vibrações sonoras, e a pessoa da direita é o receptor e usuário.

Para que seja caracterizado um sistema de comunicação, o usuário deve “entender” o que está recebendo!

Por mais óbvio que possa parecer agora, gostaria de salientar alguns problemas que poderiam dificultar ou até mesmo impedir tal comunicação:

1. A pessoa da esquerda fala em uma língua completamente desconhecida para a outra.
2. Elas estão longe o suficiente para que não seja possível ouvir direito o que a pessoa da esquerda está falando.
3. Elas estão longe mas a pessoa da esquerda está utilizando uma corneta para amplificar o som. No entanto, sua voz fica tão fanhosa que o usuário, apesar de escutar não consegue identificar bem as palavras.
4. Elas estão perto de uma pista de aviação e o ruído provocado pelos aviões impede o usuário de entender bem o que está sendo falado.

Você acabou de ver, neste exemplo simples, os quatro problemas mais comuns em um sistema de comunicação:

1. Código - Deve ser tal que fonte/transmissor e usuário/receptor se entendam, ou seja, o código deve ser de conhecimento mútuo.
2. Atenuação - O meio de comunicação introduz perda no sinal transmitido, ou seja, ele atenua o sinal. Se esta atenuação for muito grande, o receptor pode não conseguir recuperar o sinal transmitido.
3. Distorção - Apesar do sinal chegar com um nível satisfatório, está tão distorcido que sua recuperação fica muito difícil.
4. Ruído - O meio de comunicação pode introduzir ruído, que chega junto com o sinal transmitido. Chama-se de ruído todo sinal indesejável que seja somado ao sinal original transmitido. Se o nível de ruído for grande, comparado com o do sinal, torna-se muito difícil recuperar o sinal original.

Passarei agora a outro exemplo, um pouco mais completo, porém igualmente simples: uma pessoa falando para outra, por telefone.

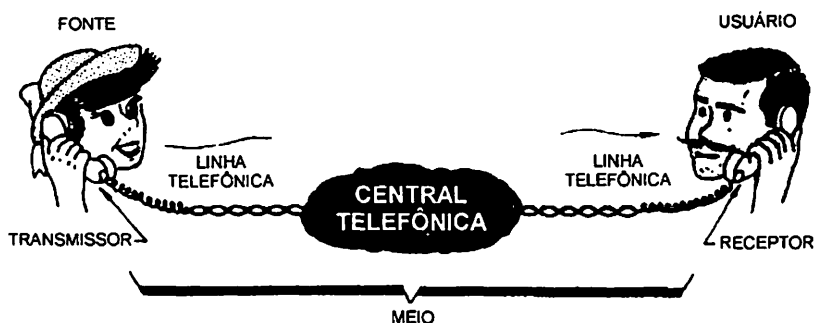


Fig.2.3: 2º exemplo de sistema

Neste caso, você já pode distinguir fonte, transmissor, meio, receptor e usuário. O sinal gerado pela pessoa da esquerda (fonte) são vibrações sonoras. Essas vibrações são transformadas, pelo telefone transmissor, em vibrações elétricas (sinal elétrico).

O sinal elétrico é transmitido pelo meio de comunicação, que inclui as linhas telefônicas e a central de comutação telefônica.

Do outro lado, o sinal elétrico é transformado em vibração sonora pelo telefone receptor e finalmente, a informação chega ao usuário.

Mencionei no início do capítulo, que a informação pode ser de diversas naturezas, apesar de ter dado um único exemplo nos casos analisados: a voz humana.

Existe, no entanto, uma diferença substancial nos dois exemplos: no primeiro, a voz passou pelo meio de comunicação sob forma de vibrações mecânicas e no segundo sob forma de sinal elétrico.

Podemos dizer, então, que o sistema telefônico permite a transmissão de informação, cuja natureza é a voz humana, sob forma de sinal elétrico.

Será que esse sistema é capaz de transmitir informação de outra natureza, como por exemplo música ou dados de computador? Em caso afirmativo, como isto pode ser realizado e quais são as limitações impostas pelo sistema?

Pretendo, justamente, ao longo deste trabalho, responder a essas perguntas.

## 2.1 SINAL ELÉTRICO

Para que uma certa informação seja transmitida pelo sistema telefônico, ela deve estar sob a forma de sinal elétrico. Convém rever alguns pontos importantes sobre esse assunto, antes de prosseguirmos.

### 2.1.1 REPRESENTAÇÃO NO TEMPO

Um sinal elétrico fica bem caracterizado quando se conhece sua variação de amplitude com o tempo.

Quando o sinal é representado desta forma, diz-se que ele está representado no domínio do tempo.



Fig.2.4: Sinal elétrico - domínio do tempo

## SINAL SENOIDAL

Este sinal, em particular, é de grande importância na teoria de comunicação e por isto vou examinar suas principais características. Sua amplitude varia senoidalmente com o tempo, conforme você pode ver na figura abaixo:

$$x = A \operatorname{sen}(2\pi f t)$$

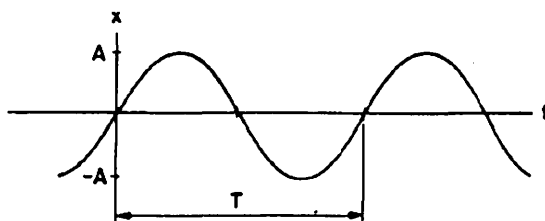


Fig.2.5: Sinal senoidal

onde:

- A = amplitude máxima [Volt]
- t = tempo [segundo]
- f = frequência = ciclos por segundo [Hz]
- T =  $1/f$  = período = tempo de duração de um ciclo completo [segundo]

Igualmente importante é o sinal cossenoidal, muito semelhante ao sinal senoidal.

$$x = A \cos(2\pi f t)$$

Observe que os dois sinais são periódicos, de período T, ou seja, a cada T segundos a mesma forma de onda é repetida.

## 2.1.2 POTÊNCIA DO SINAL

A potência de um sinal é a energia que ele pode fornecer em um determinado intervalo de tempo, ou seja, é a sua velocidade de fornecimento de energia:

$$P = \frac{E}{T}$$

P = potência [W=watt]

E = energia [J=joule]

T = tempo [s=segundo]

Observe que a potência é medida em “joule por segundo” que é a mesma coisa que “watt”.

Por exemplo, uma lâmpada de 100 W acesa durante uma hora fornece:

$$E = P \cdot T = 100 \cdot 60 \cdot 60 = 360 \text{ kJ} = 0,1 \text{ kW}\cdot\text{h}$$

No caso da lâmpada, às vezes, estamos mais interessados na velocidade com que ela fornece energia do que na energia efetivamente fornecida.

Uma lâmpada de 20 W é “mais lenta” do que uma de 100 W, por isto dizemos que ela é “mais fraca” que a de 100 W.

No caso dos sinais elétricos utilizados em comunicação, também estou mais interessado em saber sua potência do que na energia que ele transporta.

A potência de um sinal elétrico pode ser medida pelo produto de sua voltagem por sua corrente:

$$P = V \cdot I$$

P = potência [W=watt]

V = voltagem [V=volt]

I = corrente [A=ampere]

Neste ponto, gostaria de apresentar dois elementos físicos que atuam sobre a potência de um sinal:

Atenuador -

Amplificador -

atenua o sinal, diminuindo sua potência

amplifica o sinal, aumentando sua potência

O atenuador divide (poderia dizer que multiplica por um número menor que 1) e o amplificador multiplica a potência do sinal de entrada por um fator fixo.

Na figura abaixo, você pode ver um pequeno sistema onde um atenuador divide por 2 e um amplificador multiplica por 100.

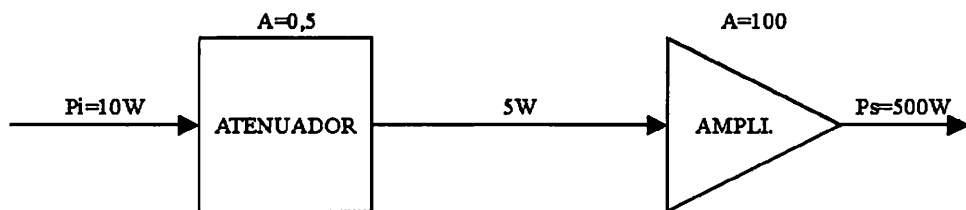


Fig.2.6: Atenuação e amplificação

A relação entre as entradas e as saídas são:

$$\text{Atenuador: } \frac{P_s}{P_i} = \frac{5}{10} = 0,5 \qquad \text{Amplificador: } \frac{P_s}{P_i} = \frac{500}{5} = 100$$

Se tivermos o fator de amplificação de um elemento desses, “A”, podemos calcular a saída, desde que saibamos a entrada, bastando executar uma multiplicação:

$$P_s = P_i \cdot A$$

No exemplo acima, o cálculo foi imediato. Imagine agora, se os números envolvidos fossem do tipo  $P_i = 7,46$  e  $A = 4369,5$ !

A fim de se evitar essas multiplicações, normalmente se utiliza uma relação entre potências do tipo logarítmica, chamada “decibel”:

$$A [dB] = 10 \cdot \log \frac{P_s}{P_i}$$

A potência do sinal, nesse caso, é sempre expressa com relação a 1 mW e chamada de “decibel relativo a 1 mW” ou “dBm”:

$$P [dBm] = 10 \cdot \log \frac{P_s}{1mW} = 10 \cdot \log P_s - 10 \cdot \log 0,001$$

$$P [dBm] = 10 \cdot \log P_s + 30$$

Observe que 1 mW corresponde a 0 dBm.

Vejamos agora, as relações entre entrada e saída de um elemento atenuador ou amplificador, utilizando o decibel:

$$A [dB] = 10 \cdot \log \frac{P_s}{P_i} = 10 \cdot \log \frac{P_{s1mW}}{P_{i1mW}}$$

$$A [dB] = 10 \cdot \log \frac{P_s}{1mW} - 10 \cdot \log \frac{P_i}{1mW}$$

$$A [dB] = P_s [dBm] - P_i [dBm]$$

Então:

$$P_s [dBm] = P_i [dBm] + A [dB]$$

Observe que as multiplicações foram transformadas em adições, quando utilizei o decibel.

Voltemos ao exemplo da figura 2.6 e vamos utilizar o decibel:

$$\text{Atenuador: } A = 10 \cdot \log 0,5 = -3 \text{ dB}$$

$$\text{Amplificador: } A = 10 \cdot \log 100 = 20 \text{ dB}$$

$$\text{Entrada: } P_i = 10 \cdot \log 10 + 30 = 40 \text{ dBm}$$

Então a saída será:

$$P_s = 40 \text{ dBm} - 3 \text{ dB} + 20 \text{ dB} = 57 \text{ dBm}$$

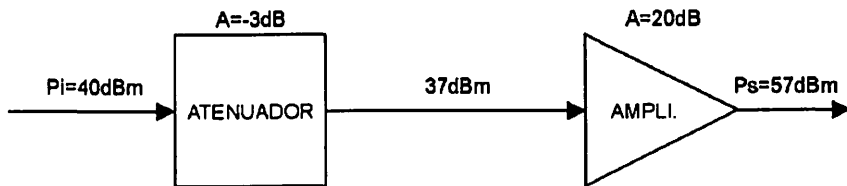


Fig.2.7: Atenuação e amplificação (dB)

Observe como ficou mais fácil comparado ao exemplo da figura 2.6. Note também que, como o logaritmo de qualquer número menor que “1” é negativo, potências menores que 1 mW terão um valor negativo quando expressas em dBm. Da mesma forma, a atenuação corresponde a um fator de amplificação negativo, quando expressa em dB.

## 2.1.3 REPRESENTAÇÃO EM FREQUÊNCIA

Pode ser mostrado matematicamente, que qualquer sinal periódico é equivalente a uma soma de infinitos sinais senoidais, cada um com uma determinada amplitude, e frequência múltipla daquela do sinal periódico original.

Quanto maior a quantidade de sinais senoidais somados, melhor será a aproximação.

Este fato é muito importante, pois significa que se pode imaginar qualquer sinal periódico como um espectro de sinais senoidais!

Dessa forma, representar um sinal periódico no domínio da frequência, é saber qual a frequência e intensidade de cada componente senoidal de seu espectro.

Na verdade, pode-se ir mais além e representar qualquer sinal, periódico ou não, no domínio da frequência, utilizando uma transformação matemática conhecida pelo nome de seu formulador: transformada de Fourier. Quando aplicamos a transformada de Fourier na equação do sinal (domínio do tempo), encontramos outra equação que representa a densidade espectral do sinal (domínio da frequência).

Sabemos, então, que qualquer sinal elétrico nada mais é do que a soma de infinitos sinais senoidais.

Em outras palavras, todo sinal possui uma densidade espectral que ocupa uma determinada faixa de frequência.

A figura 2.8 mostra um mesmo sinal representado das duas formas descritas: no domínio do tempo, onde você pode observar a variação da amplitude e no domínio da frequência, onde você pode ver quais são as suas componentes de frequência.

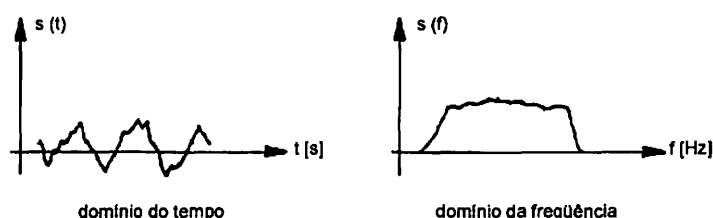


Fig.2.8: Sinal elétrico qualquer

## 2.1.4 FILTROS

Você viu no item anterior, que qualquer sinal elétrico ocupa uma faixa de frequência. Esta faixa é, às vezes, chamada de “banda”, e sinais que ocupam uma faixa de frequência delimitada, às vezes, são chamados de “sinais de banda limitada”.

Gostaria de apresentar um outro elemento físico, que, neste caso, age sobre a banda do sinal de entrada. Este elemento é chamado de “filtro de frequências” ou simplesmente “filtro”.

Os filtros são classificados em quatro tipos:

- |                     |   |
|---------------------|---|
| <b>Passa-baixo:</b> | deixa passar somente as frequências abaixo de um valor específico $F_c$ .     |
| <b>Passa-alto:</b>  | deixa passar somente as frequências acima de $F_c$ .                          |
| <b>Passa-banda:</b> | deixa passar as frequências que estiverem contidas numa faixa $F_2$ - $F_1$ . |
| <b>Corta-banda:</b> | deixa passar as frequências que estiverem fora de uma faixa $F_2$ - $F_1$ .   |

Na figura 2.9, você pode ver o efeito dos filtros sobre um sinal de entrada “E”, que ocupa uma faixa de frequência que vai de “0” a “F”.



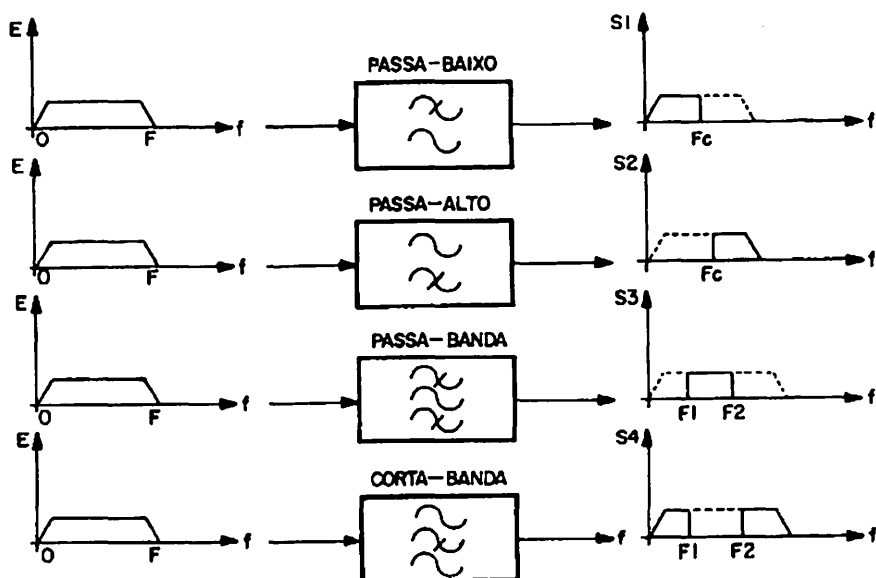


Fig.2.9: Filtros

O sinal de saída de cada filtro, S1 a S4, ocupa a faixa de frequência hachurada na figura, que corresponde a “fatias” da faixa do sinal de entrada “E”

## 2.2 SINAL DE VOZ

O sinal de voz é extremamente complexo mas convém fazermos uma rápida abordagem sobre o assunto, a fim de estudarmos a sua transmissão pelas linhas telefônicas.

Como você viu anteriormente, o sinal de voz transmitido pela linha telefônica é um sinal elétrico e como tal possui uma densidade espectral.

A densidade espectral do sinal de voz modifica-se continuamente durante todo o tempo em que a pessoa fala. Isto é perfeitamente compreensível, pois a fala possui, por exemplo, pausas para respiração, além de uma infinidade de sons diferentes: o som da palavra “esse” possui componentes de frequências mais altas do que o da palavra “um”, por exemplo.

Apesar da constante variação da densidade espectral do sinal de voz dificultar sua caracterização, foram feitos levantamentos da densidade espectral média, ao longo de um certo intervalo de tempo.

O gráfico abaixo, mostra esse resultado e nele podemos observar dois pontos interessantes:

- O espectro da voz humana cobre uma faixa de frequência que vai de 100Hz a 8.000Hz.
- A maior parte da energia se concentra na região de baixa frequência, em torno de 400Hz.

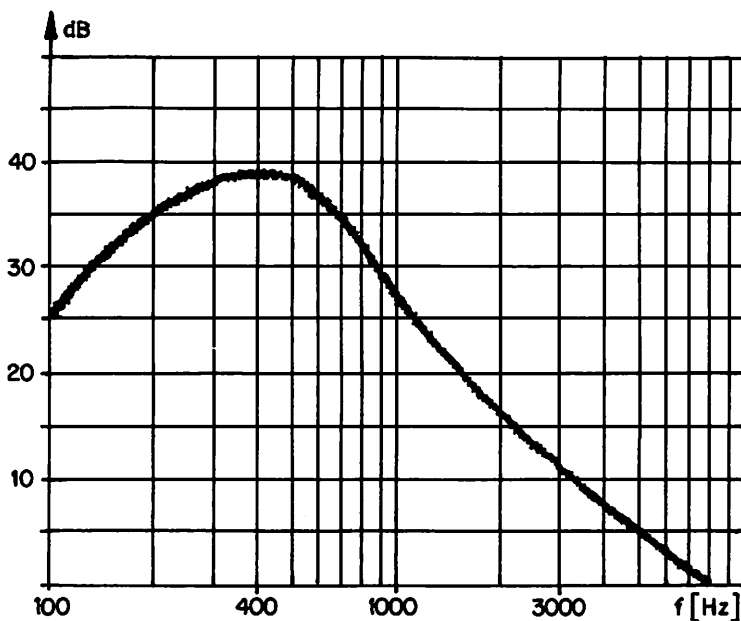


Fig.2.10: Densidade espectral do sinal de voz

Suponha que esse sinal de voz seja submetido a um filtro de freqüências, que só deixe passar suas componentes que estão entre 300Hz e 3.400Hz. Naturalmente, o sinal obtido na saída do filtro continua sendo um sinal de voz, porém sem suas componentes abaixo de 300Hz e acima de 3.400Hz (fora da faixa permitida pelo filtro). Será que o sinal resultante continua inteligível ?

Estudos e testes realizados mostraram que sim. Apesar da energia do sinal de voz se concentrar nas baixas freqüências, a importância para manter a inteligibilidade está entre 700Hz e 3.000Hz.

Após esses estudos, a faixa de 300 a 3.400 Hz foi adotada como “faixa de voz”, simplesmente porque esta faixa do espectro do sinal de voz é suficiente para garantir sua inteligibilidade.

A faixa de voz é, portanto, um canal de 3.100 Hz, comumente referido como canal de voz.

Você viu que a voz humana cobre uma faixa de freqüência que vai de 100 Hz a 8.000 Hz e talvez esteja se perguntando: e o ouvido humano ? A qual faixa de freqüência ele é sensível, ou seja, quais freqüências ele pode “ouvir” ?

Se nosso ouvido tivesse sua sensibilidade restrita à faixa de voz (300 Hz a 3.400 Hz) já seria suficiente para entendermos o que outras pessoas falam, mas a natureza foi bem mais generosa conosco: o ouvido humano normal pode sentir freqüências desde 20 Hz a 20.000 Hz e a esta faixa de freqüência audível deram o nome de “faixa de áudio”: qualquer sinal que nela se acomode, chama-se “sinal de áudio”.

Você, agora, pode concluir que o sinal de voz é um sinal de áudio que ocupa uma faixa de frequência que vai de 100 Hz a 8.000 Hz e que um sinal qualquer confinado à faixa de voz (300 Hz a 3.400 Hz) também é um sinal de áudio. Quando você ouve uma peça musical solada ao piano com acompanhamento de uma bateria e de um contrabaixo, certamente seu ouvido está ocupado em sentir todas as frequências da faixa de áudio, que eu gostaria de dividir em notas musicais, a fim de que você tenha uma boa idéia de sua extensão.

A escala musical tal qual existe em um piano atual, conhecida por “escala de temperamento igual”, surgiu no início do século XVIII e teve J. S. Bach como um de seus primeiros adeptos, o qual, inclusive, compôs uma coleção de prelúdios e fugas para teclado intitulada “O cravo bem temperado”, com a finalidade de demonstrar a versatilidade da, então, nova escala. É formada por oitavas e cada oitava possui 12 notas. Um teclado de piano com 88 teclas, por exemplo, possui 88 notas divididas em algo mais que 7 oitavas, onde as teclas brancas correspondem ao “dó, ré, mi, fá, sol, lá, si” e as pretas correspondem aos sustenidos.

A cada nota da escala musical corresponde uma frequência fundamental, de tal forma que qualquer nota de uma determinada oitava tem, exatamente, o dobro da frequência desta mesma nota na oitava inferior. Por exemplo, o lá do diapasão tem 440 Hz, o lá da oitava imediatamente superior tem 880 Hz, e assim por diante.

Na verdade, a relação de uma nota para outra, é realmente bem temperada, seguindo uma relação logarítmica de base 2, ou seja:

$$\log_2 F(n+1) = \frac{1}{12} + \log_2 F(n)$$

$$F(n+1) = 2^{1/12} \cdot F(n) = 1,05946309 \cdot F(n)$$

onde:

$\log_2$  = logaritmo na base 2  
 $F(n)$  = frequência de uma nota  
 $F(n+1)$  = frequência de uma nota imediatamente superior

Utilizando a equação acima, posso calcular a frequência de qualquer nota, sabendo sua posição em relação ao lá do diapasão:

lá (diapasão)	=A=	440,0 Hz	fá	=F=	698,5 Hz
lá sustenido	=A#=	466,2 Hz	fá sustenido	=F#=	740,0 Hz
si	=B=	493,9 Hz	sol	=G=	784,0 Hz
dó	=C=	523,3 Hz	sol sustenido	=G#=	830,6 Hz
dó sustenido	=C#=	554,4 Hz	lá	=A=	880,0 Hz
ré	=D=	587,3 Hz	lá sustenido	=A#=	932,3 Hz
ré sustenido	=D#=	622,3 Hz	si	=B=	987,8 Hz
mi	=E=	659,3 Hz	.	.	.

Na tabela abaixo, apresento todas as notas musicais cujas frequências fundamentais se situam dentro da faixa de áudio:

	27,50	55,00	110,0	220,0	440,0	880,0	1.760	3.520	7.040	14.080
	29,14	58,27	116,5	233,1	466,2	932,3	1.865	3.729	7.459	14.917
	30,87	61,74	123,5	246,9	493,9	987,8	1.976	3.951	7.902	15.804
	32,70	65,41	130,8	261,6	523,3	1.047	2.093	4.186	8.372	16.744
	34,65	69,30	138,6	277,2	554,4	1.109	2.217	4.435	8.870	17.740
	36,71	73,42	146,8	293,7	587,3	1.175	2.349	4.699	9.397	18.785
19,45	38,89	77,78	155,6	311,1	622,3	1.245	2.489	4.978	9.956	19.912
20,60	41,20	82,41	164,8	329,6	659,3	1.319	2.637	5.274	10.548	21.096
21,83	43,65	87,31	174,6	349,2	698,5	1.397	2.794	5.588	11.175	
23,12	46,25	92,50	185,0	370,0	740,0	1.480	2.960	5.920	11.840	
24,50	49,00	98,00	196,0	392,0	784,0	1.568	3.136	6.272	12.544	
25,96	51,91	103,8	207,7	415,3	830,6	1.661	3.322	6.645	13.290	

Observe que somos capazes de ouvir 10 oitavas desta escala, aproximadamente de um “mi”(20,60 Hz) a um “ré sustenido”(19.912 Hz).

Na figura 1.11, você pode ter uma idéia da faixa de áudio e comparar com as demais faixas de que falei.

Na coluna “1”, a faixa de áudio (20 a 20.000 Hz) está marcada em uma escala logarítmica de base 10 e na coluna “2”, ela está dividida nas 120 notas musicais que podemos ouvir. Observe que essa escala é logarítmica de base 2 e as notas estão igualmente espaçadas.

A coluna “3” ilustra um teclado com as posições das notas e a coluna “4” mostra a abrangência de um teclado de piano.

Nas colunas “5” e “6”, você pode ver as faixas ocupadas pelas frequências fundamentais de outros dois instrumentos: o violão e o violino.

Na coluna “7”, você pode ver onde se situa o espectro da voz humana e, finalmente, na coluna “8”, a faixa de voz tal qual foi definida.

Observe que a faixa de voz corresponde a 3,5 oitavas da escala musical, sendo mais estreita que a faixa ocupada pelas notas de um piano.

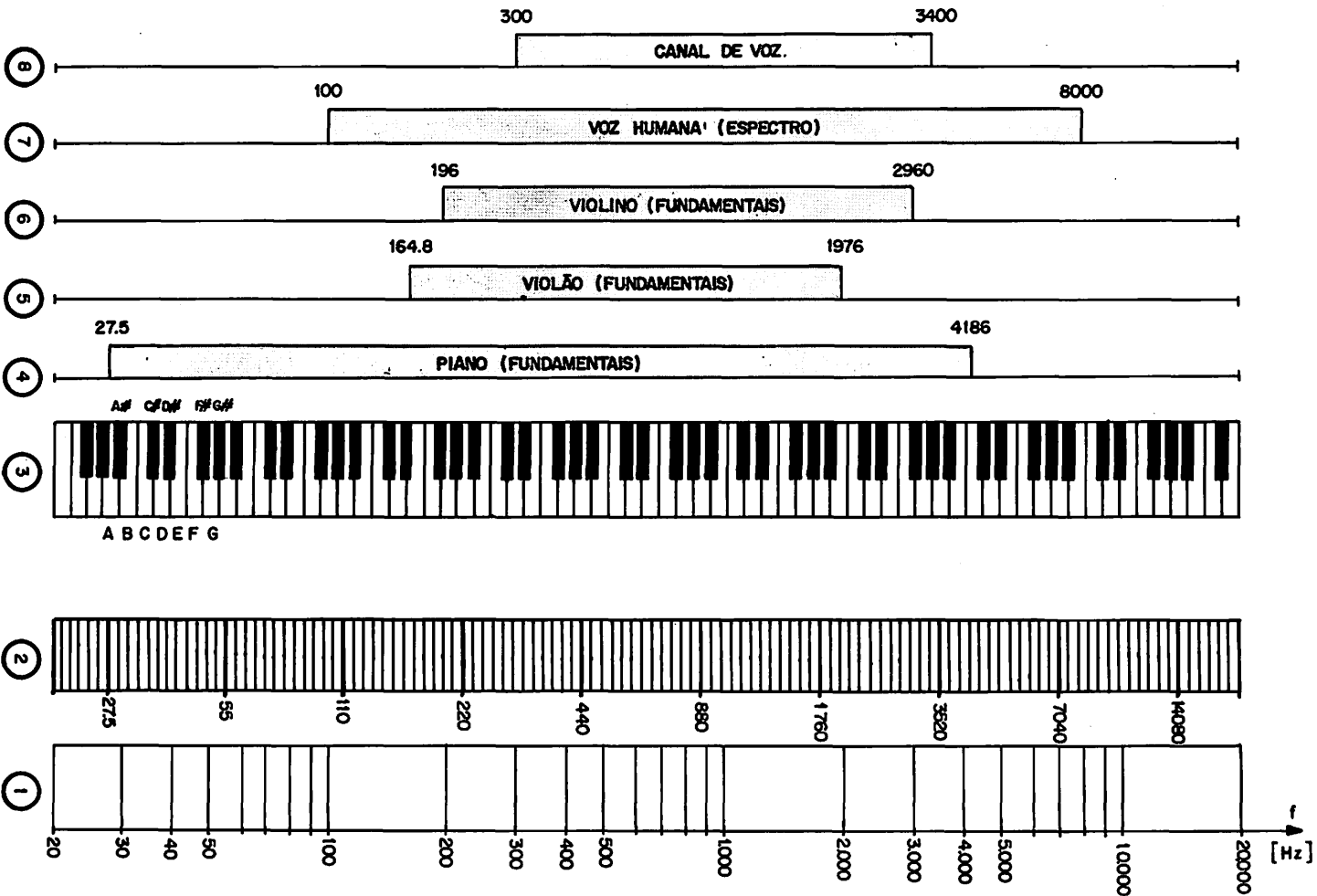


Fig.2.11: Faixa de áudio