



# *Acústica musical*

Escuela Universitaria de Música  
eMe, 2006

**Curso dirigido a docentes de IPA**

Leonardo Fiorelli  
Martín Rocamora



# *Temario*

## Física del sonido:

- Naturaleza y propagación del sonido
- Parámetros y representación del sonido
- Movimiento armónico simple, oscilaciones complejas
- Fourier, espectros armónicos inarmónicos y ruido

## Percepción del sonido:

- Fisiología del oído, sistema auditivo central
- Conceptos de psicoacústica



# *Temario*

## Acústica de instrumentos musicales:

- El instrumento como sistema acústico
- Cuerdas
- Tubos y columnas de aire

## Afinación y escalas:

- Intervalos
- Consonancia y disonancia
- Escalas naturales (natural y pitagórica)



# *Sonido*

## Percepción:

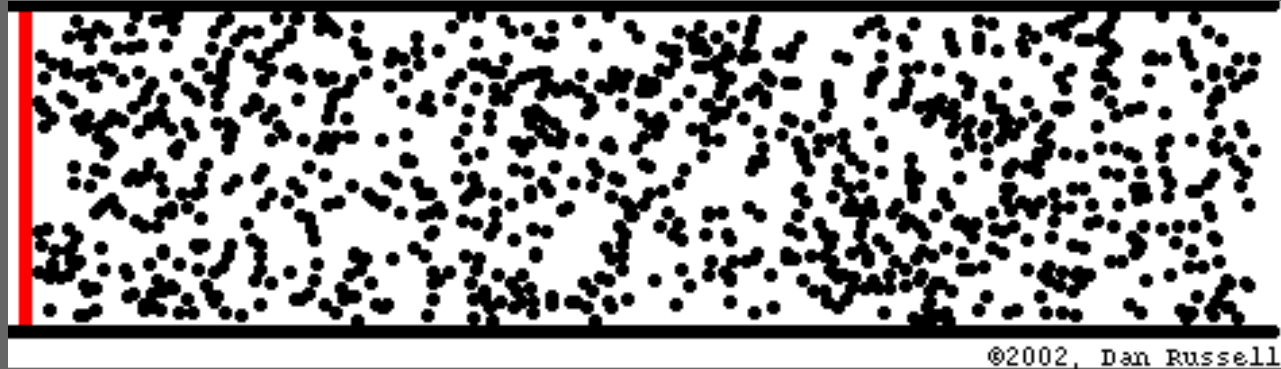
- Sensación percibida por el oído debida a las variaciones rápidas de presión en el aire

## Física:

- Vibración mecánica de un medio elástico (gaseoso, líquido o sólido) y la propagación de esta vibración a través de ondas

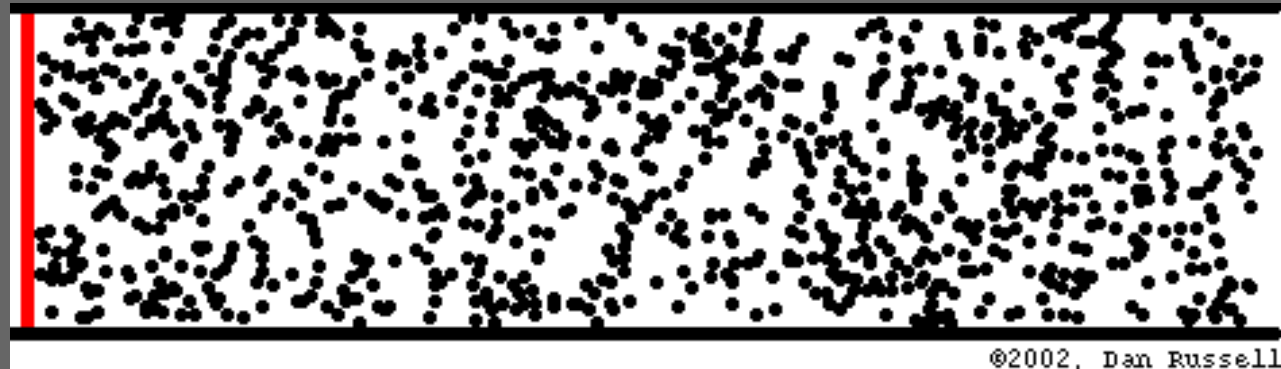


# *Naturaleza del sonido*





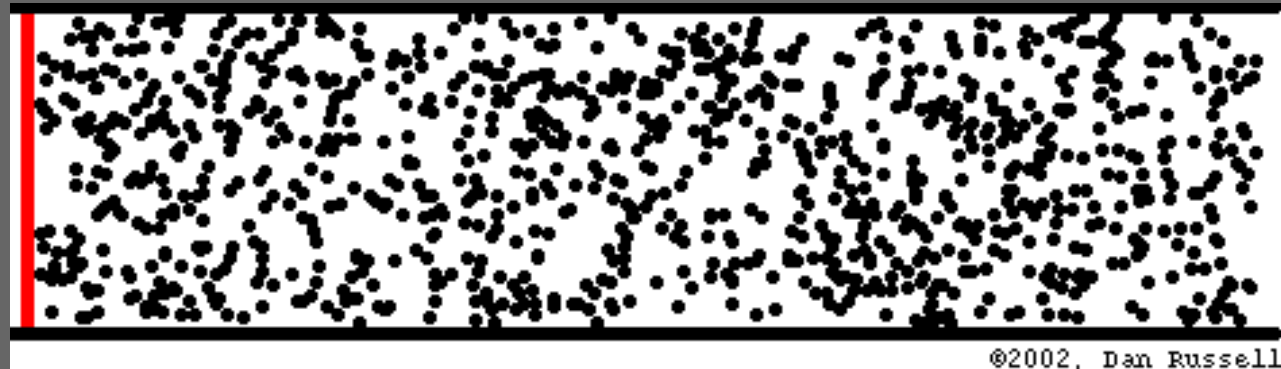
# *Naturaleza del sonido*



- El movimiento del pistón comprime el aire próximo.
- 
- 
-



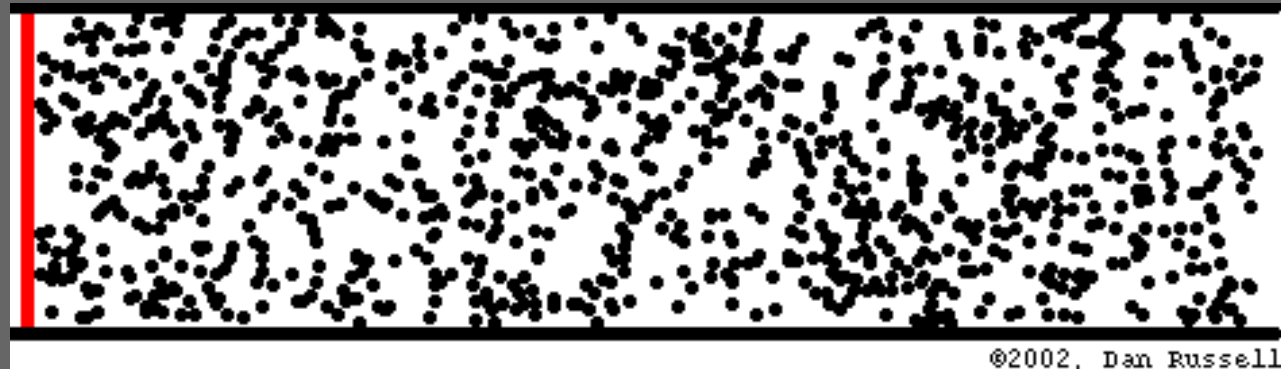
# *Naturaleza del sonido*



- El movimiento del pistón comprime el aire próximo.
- El aire comprimido tiende a descomprimirse.
- 
-



# *Naturaleza del sonido*

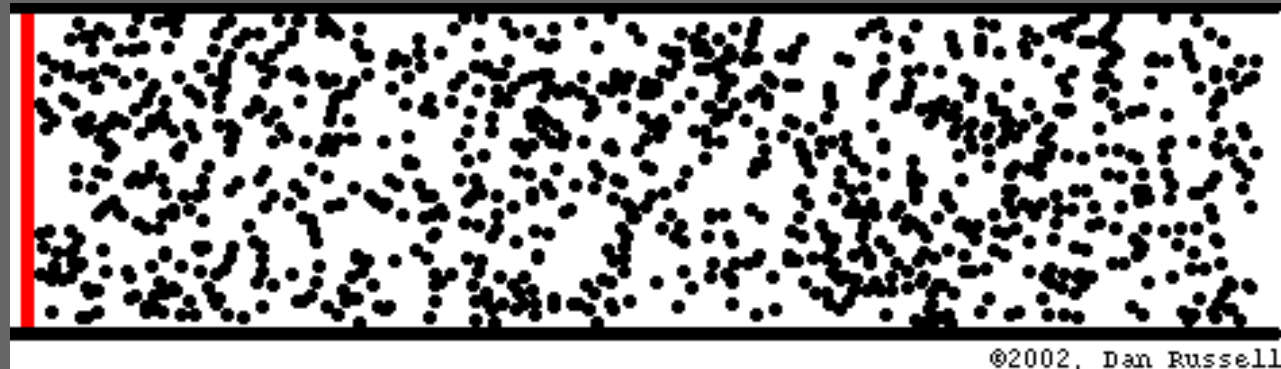


- El movimiento del pistón comprime el aire próximo.
- El aire comprimido tiende a descomprimirse.
- La descompresión comprime el aire contiguo.
-





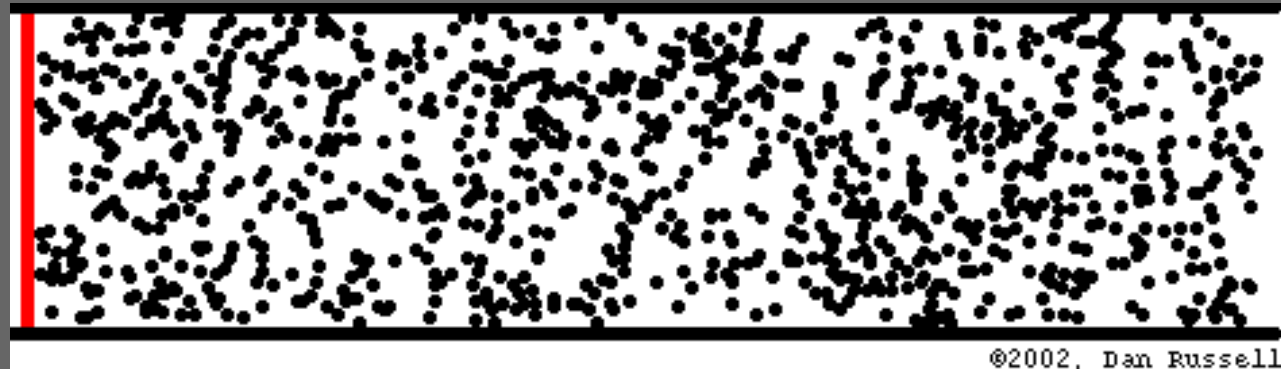
# *Naturaleza del sonido*



- El movimiento del pistón comprime el aire próximo.
- El aire comprimido tiende a descomprimirse.
- La descompresión comprime el aire contiguo.
- La perturbación se propaga a lo largo del tubo.



# *Naturaleza del sonido*



- El movimiento del pistón comprime el aire próximo.
- El aire comprimido tiende a descomprimirse.
- La descompresión comprime el aire contiguo.
- La perturbación se propaga a lo largo del tubo.

**El aire no se traslada con el sonido, la energía sonora se transmite por la vibración de las partículas de aire.**



# *Ondas sonoras*

## **Ondas elásticas**

Se producen en un medio que posea:

- elasticidad
- masa



# Ondas sonoras

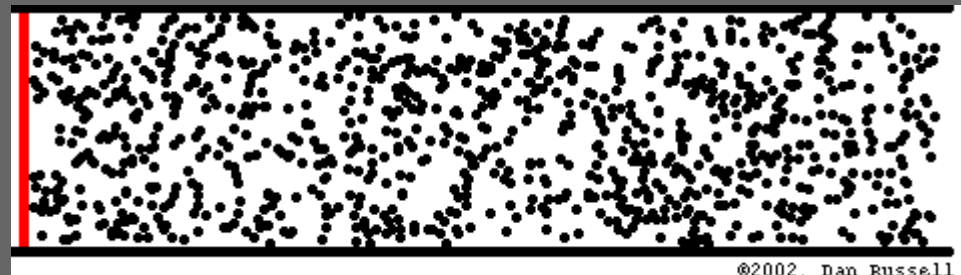
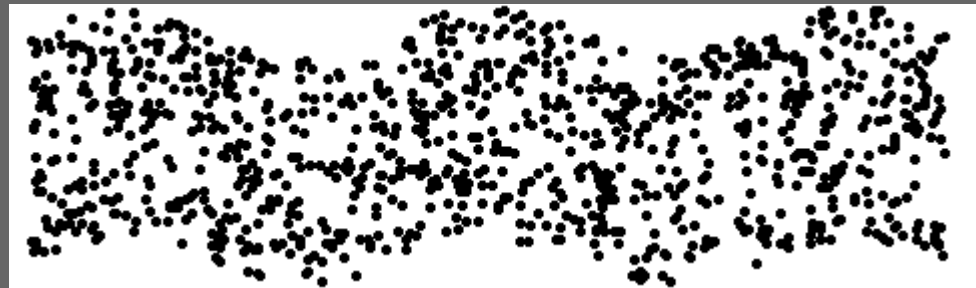
## Ondas elásticas

Se producen en un medio que posea:

- elasticidad
- masa

Ondas:

- transversales
- longitudinales



©2002, Dan Russell



# Ondas sonoras

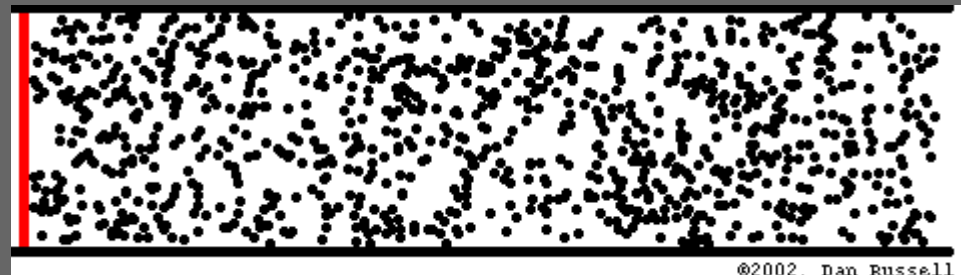
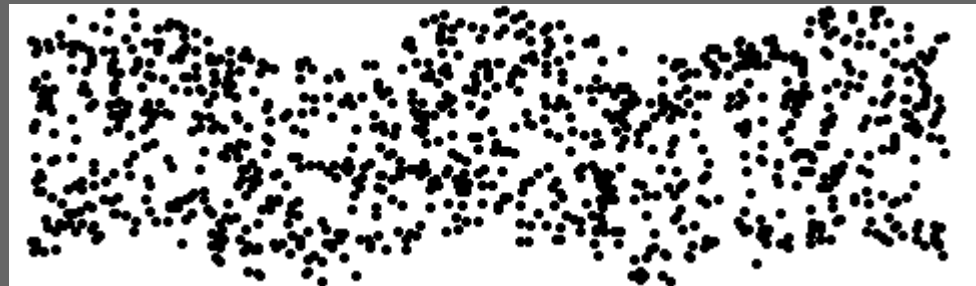
## Ondas elásticas

Se producen en un medio que posea:

- elasticidad
- masa

Ondas:

- transversales



©2002, Dan Russell

▪ longitudinales  
El sonido se propaga a través de ondas elásticas longitudinales.



# ***Velocidad del sonido***

- Velocidad de propagación: depende de las propiedades **elásticas** e **inerciales** del medio.
- Ondas sonoras: se propagan a la **misma velocidad** independientemente de su frecuencia o amplitud.



# Velocidad del sonido

- Velocidad de propagación: depende de las propiedades **elásticas** e **inerciales** del medio.
- Ondas sonoras: se propagan a la **misma velocidad** independientemente de su frecuencia o amplitud.

Depende sólo de

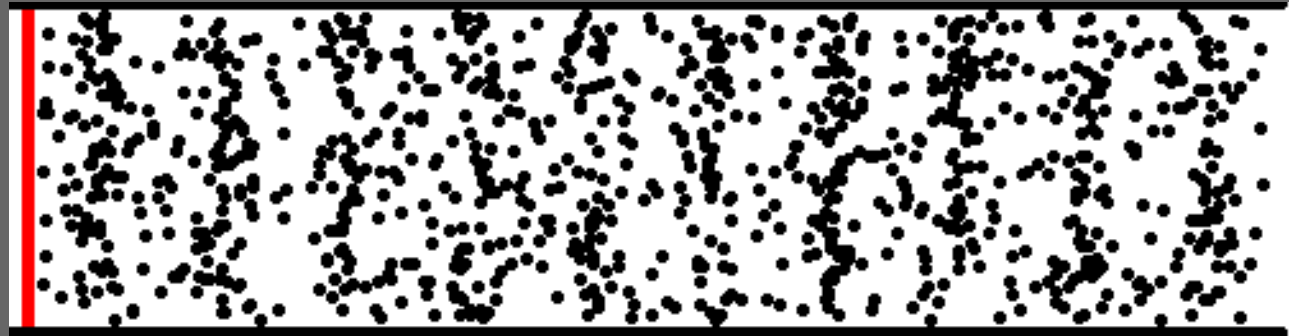
$$c = 332 \sqrt{1 + \frac{t}{273}}$$

(considerando gas ideal)

**334 m/s a 20 ° C** (3 segundos para recorrer 1 km)



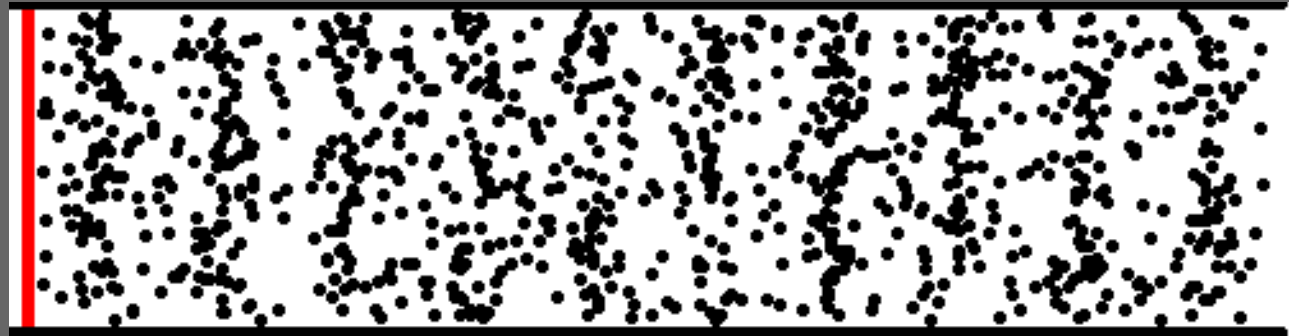
# *Ondas periódicas*







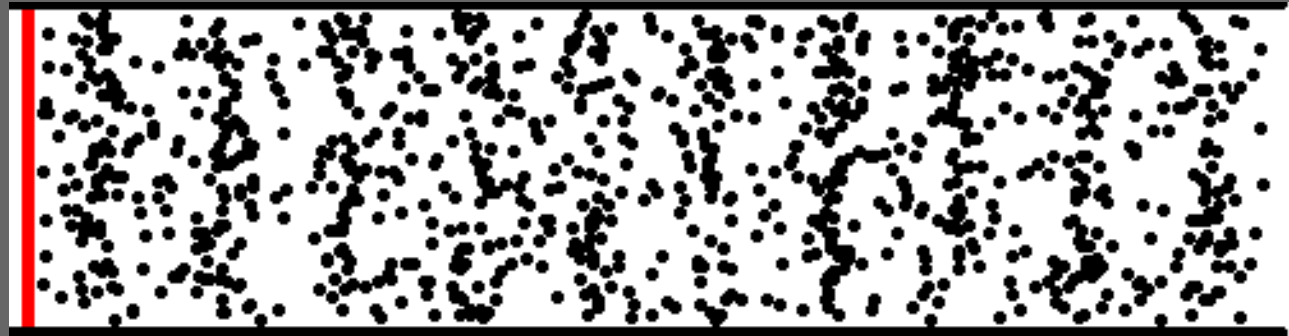
# Ondas periódicas



- **frecuencia** ( $f$ ) cantidad de ciclos por segundo
- 
-



# Ondas periódicas

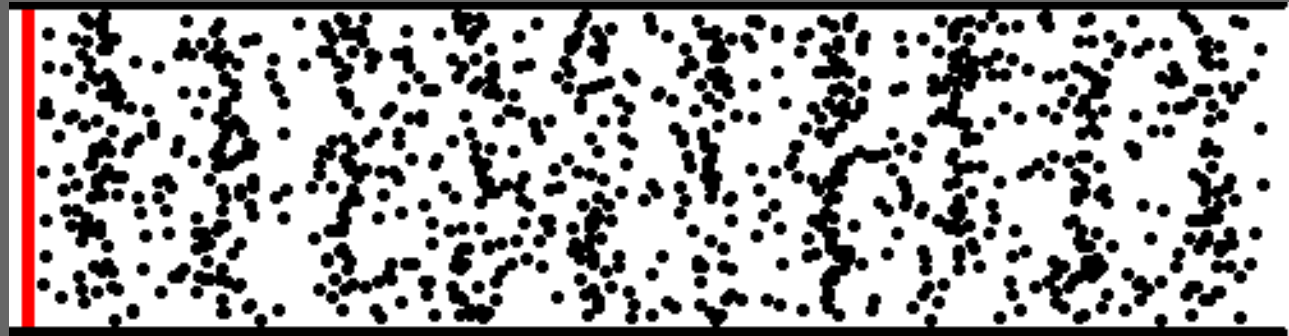


- **frecuencia** ( $f$ ) cantidad de ciclos por segundo
- **período** ( $T$ ) tiempo para completar un ciclo
- 

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

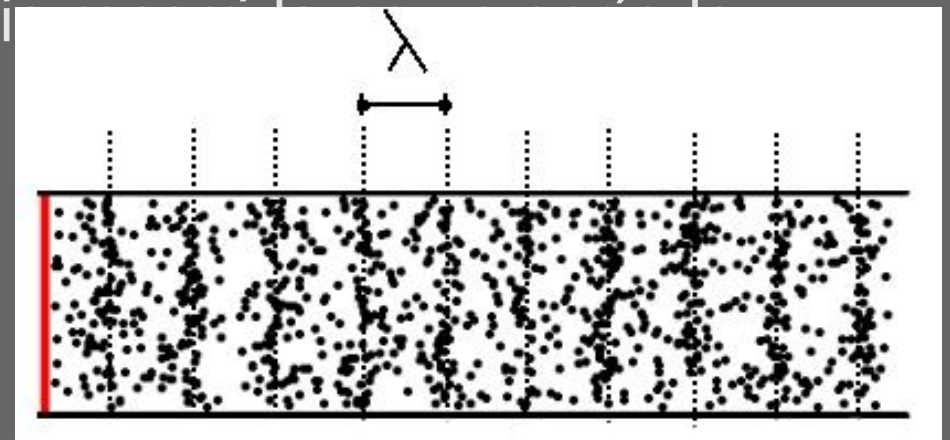


# Ondas periódicas



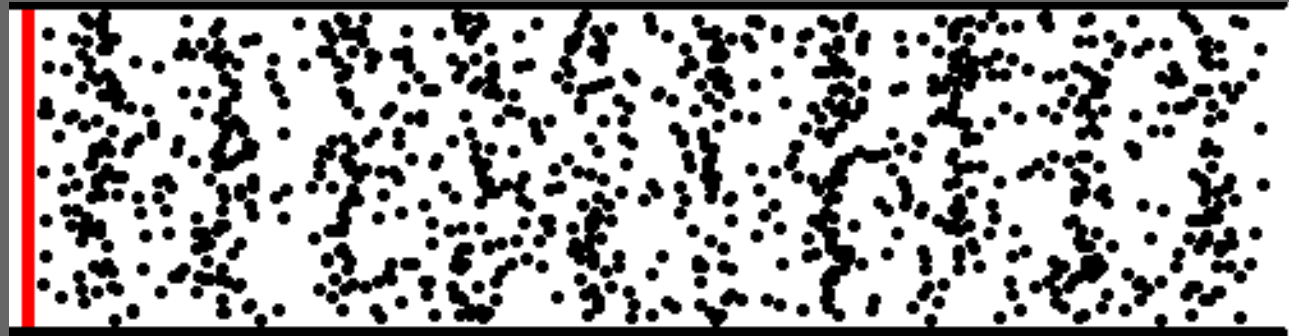
- **frecuencia** ( $f$ ) cantidad de ciclos por segundo
- **período** ( $T$ ) tiempo para completar un ciclo
- **longitud de onda** ( $\lambda$ ) distancia

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





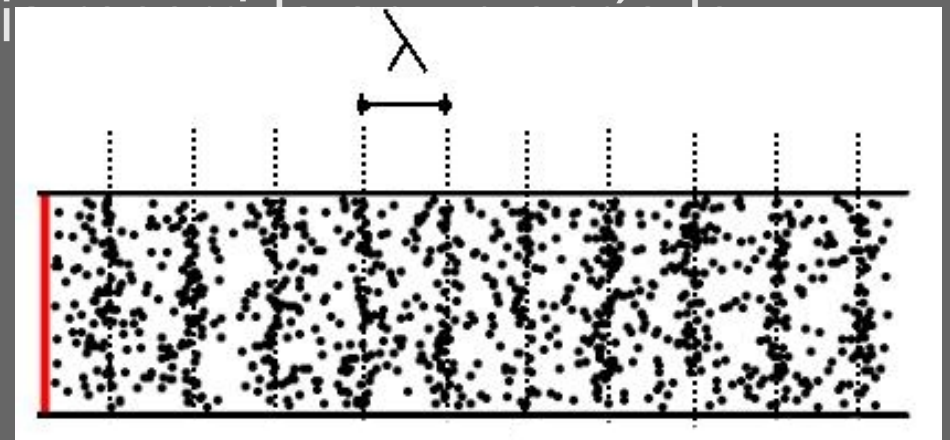
# Ondas periódicas



- **frecuencia** ( $f$ ) cantidad de ciclos por segundo
- **período** ( $T$ ) tiempo para completar un ciclo
- **longitud de onda** ( $\lambda$ ) distancia

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

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$





# Presión sonora

Sonido:

- Variación de presión atmosférica en un punto.

Presión atmosférica: 100.000 Pa

Variación de presión sonora

$$p_{sonora} = p_{atmosférica con sonido} - p_{atmosférica sin sonido}$$



# Presión sonora

Sonido:

- Variación de presión atmosférica en un punto.

Presión atmosférica: 100.000 Pa

Variación de presión sonora

$$p_{sonora} = p_{atmosférica\ con\ sonido} - p_{atmosférica\ sin\ sonido}$$

- Se define Nivel de Presión Sonora (NPS) en decibeles

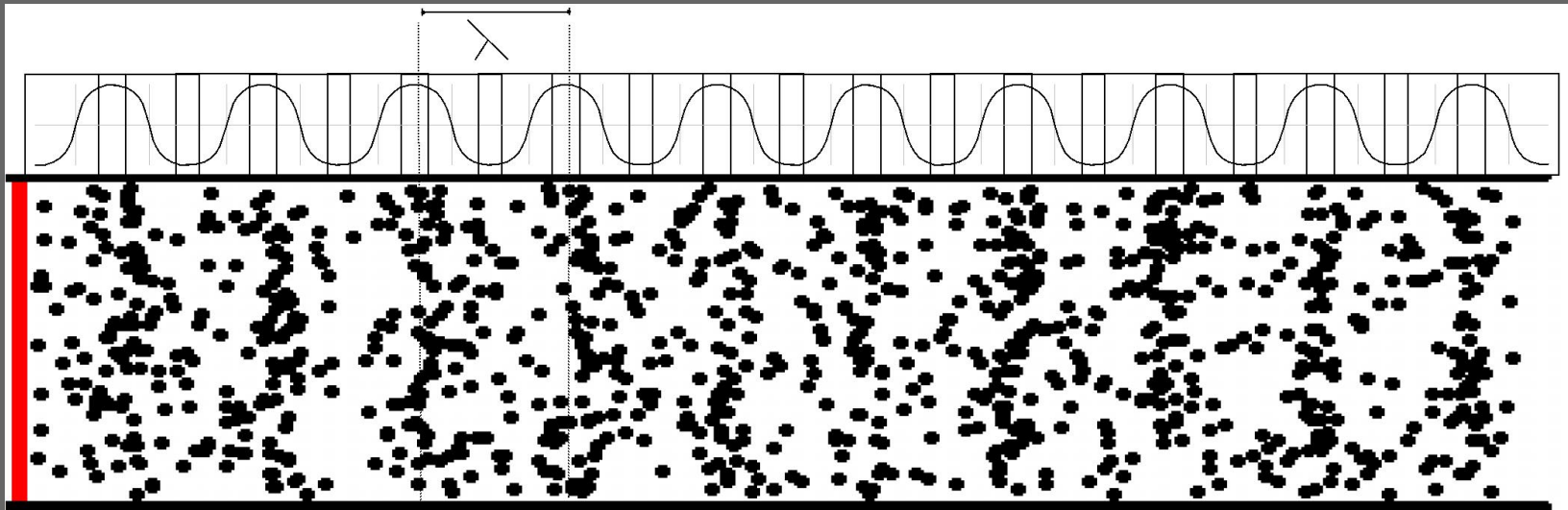
$$NPS(dB) = 20 \log \left( \frac{p}{p_{ref}} \right)$$



# Representación del sonido

Oscilograma:

- Para un punto fijo en el espacio, valor de presión sonora en cada instante de tiempo.





# *Movimiento armónico simple*

Sinusoide:

- Describe el movimiento de sistemas simples. (ej. péndulo, diapason)

$$y(t) = A \sin(2\pi f t + \phi)$$





# Movimiento armónico simple

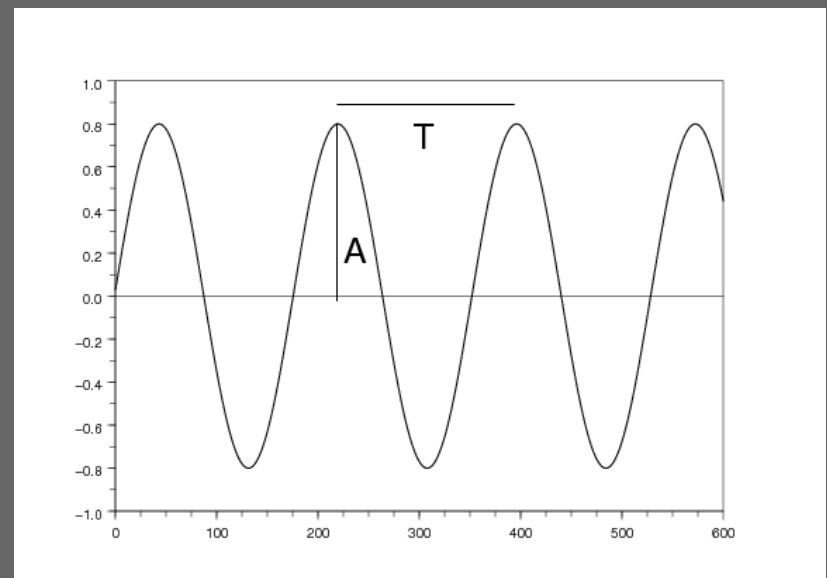
## Sinusoide:

- Describe el movimiento de sistemas simples. (ej. péndulo, diapason)

$$y(t) = A \sin(2\pi f t + \phi)$$

## Parámetros:

- A – amplitud
- f – frecuencia ( $1 / T$ )
- phi - fase

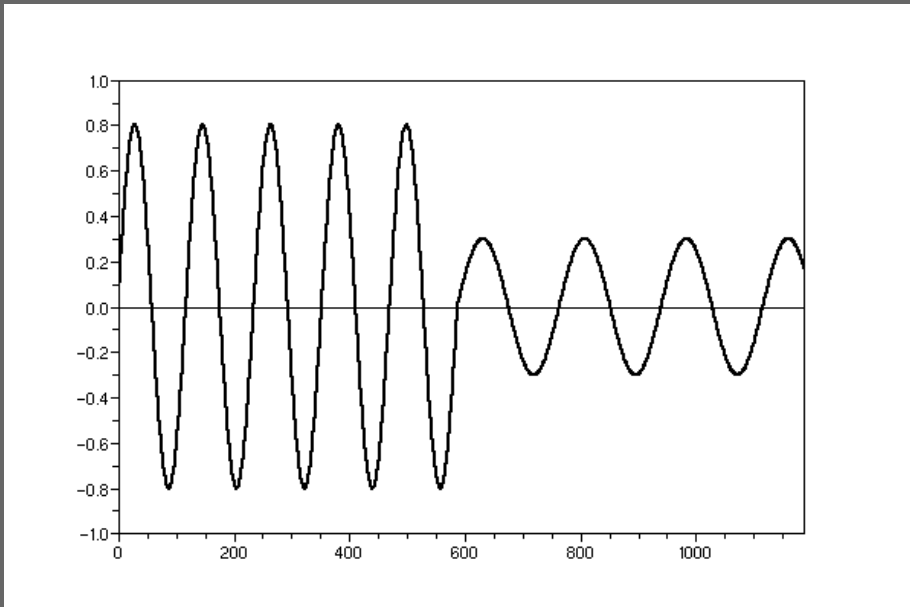




# *Amplitud y envolvente*

En un **oscilograma** se observa claramente la amplitud del sonido.

Sinusoides de diferente amplitud

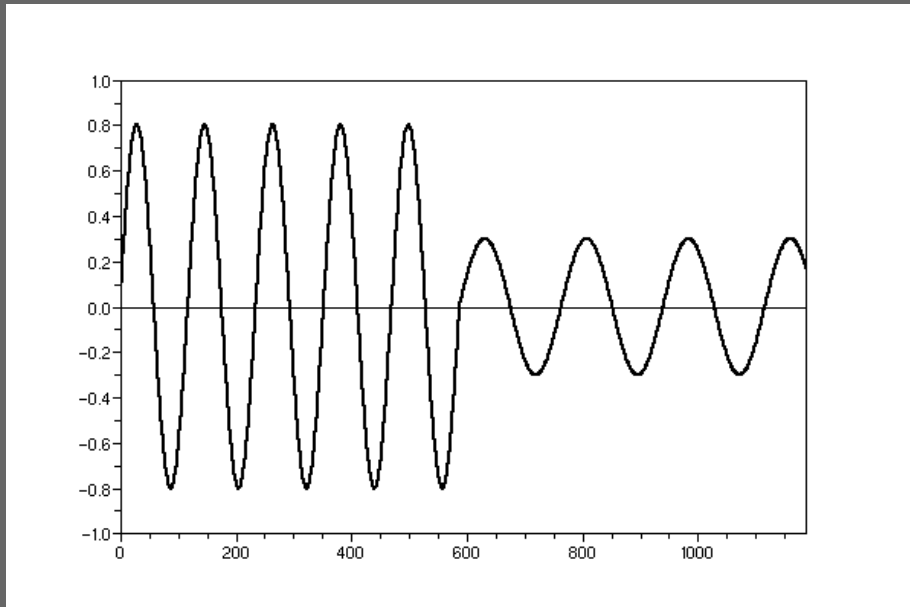




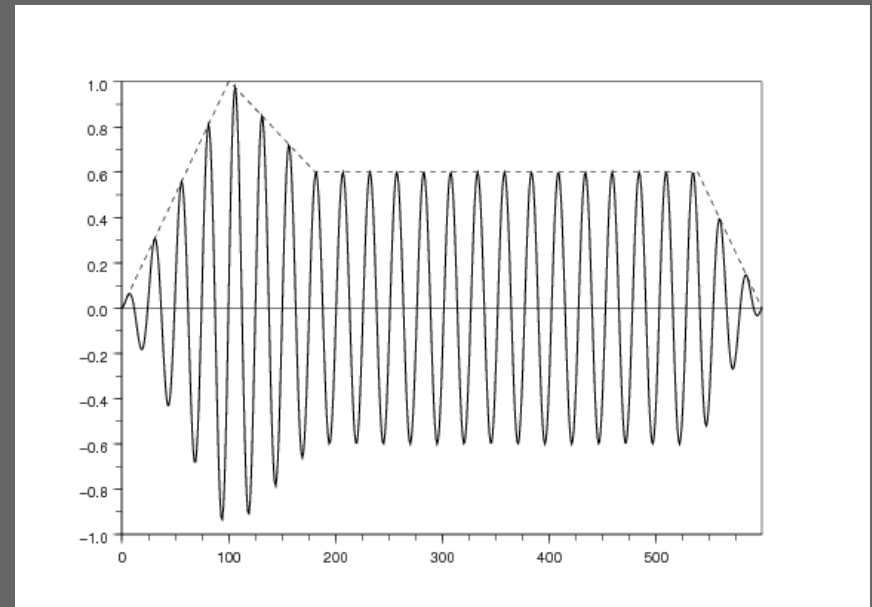
# *Amplitud y envolvente*

En un **oscilograma** se observa claramente la amplitud del sonido.

Sinusoides de diferente amplitud



Envolvente de amplitud variable

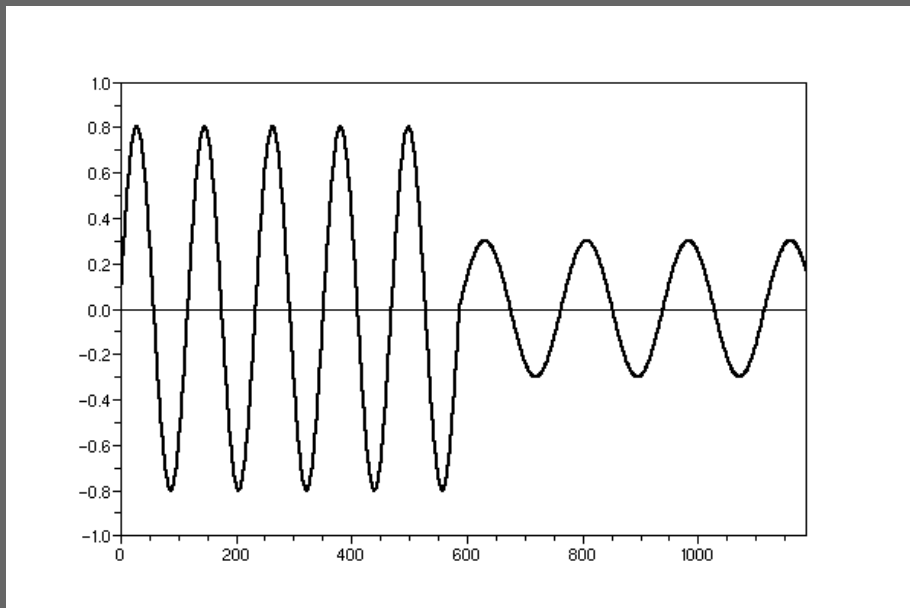




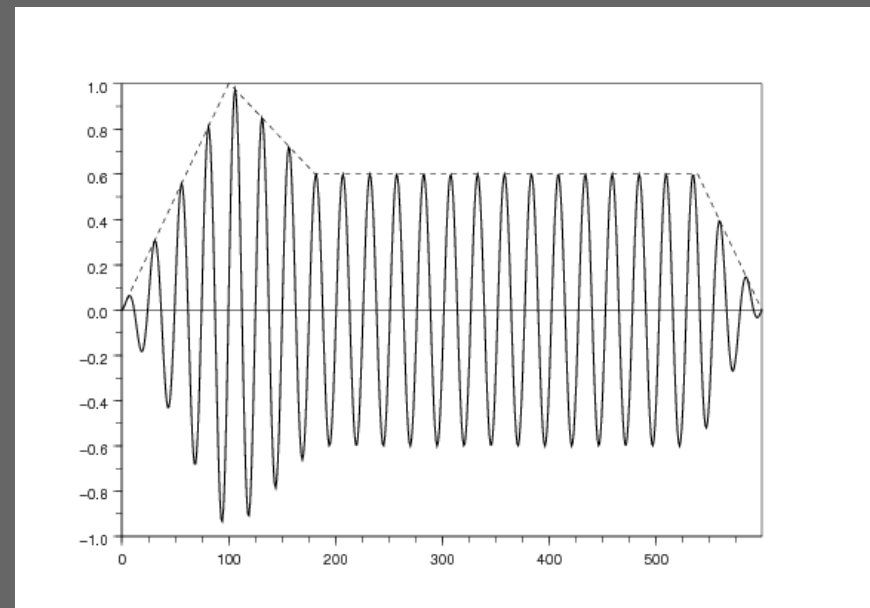
# *Amplitud y envolvente*

En un **oscilograma** se observa claramente la amplitud del sonido.

Sinusoides de diferente amplitud



Envolvente de amplitud variable

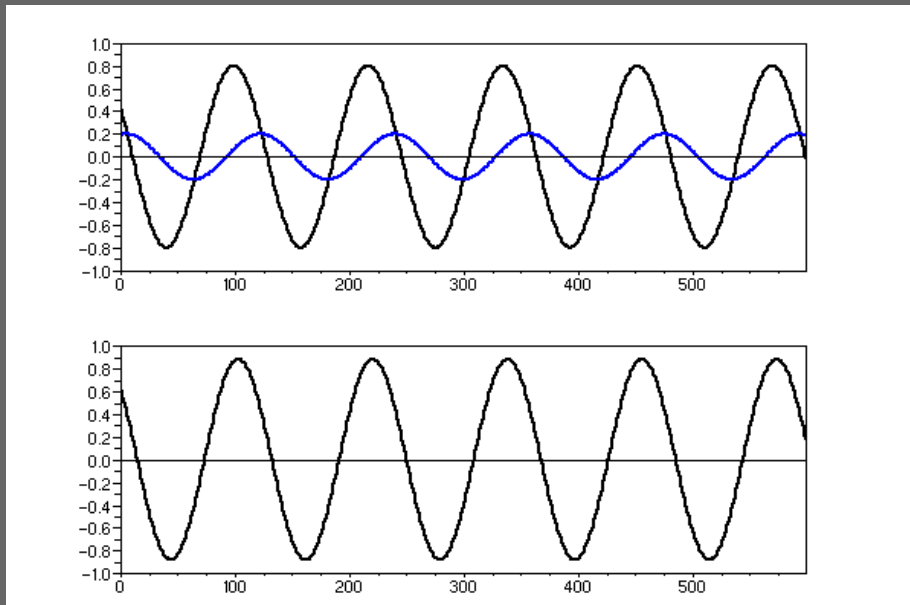


Observando el patrón de repetición de la onda se determina su período.



# *Superposición de ondas*

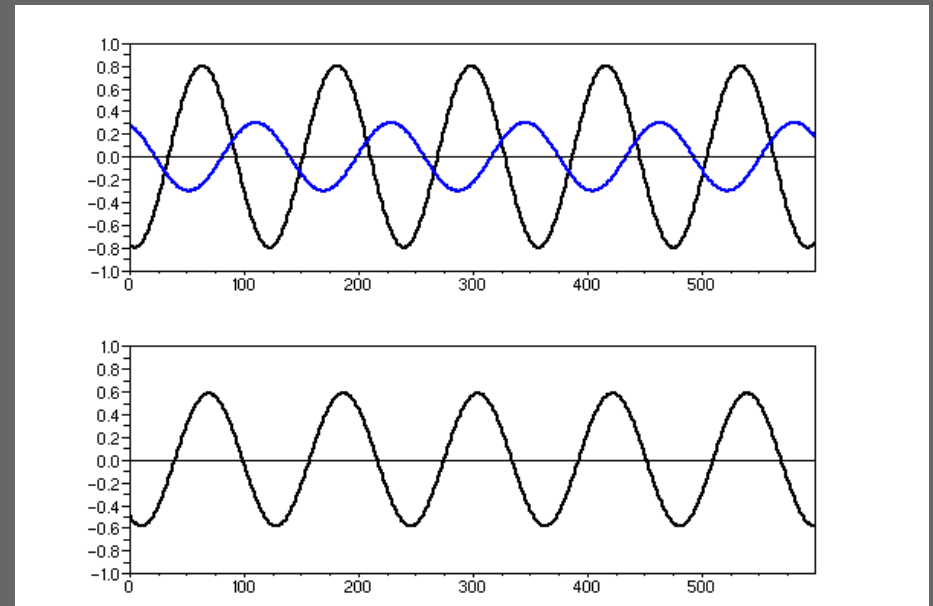
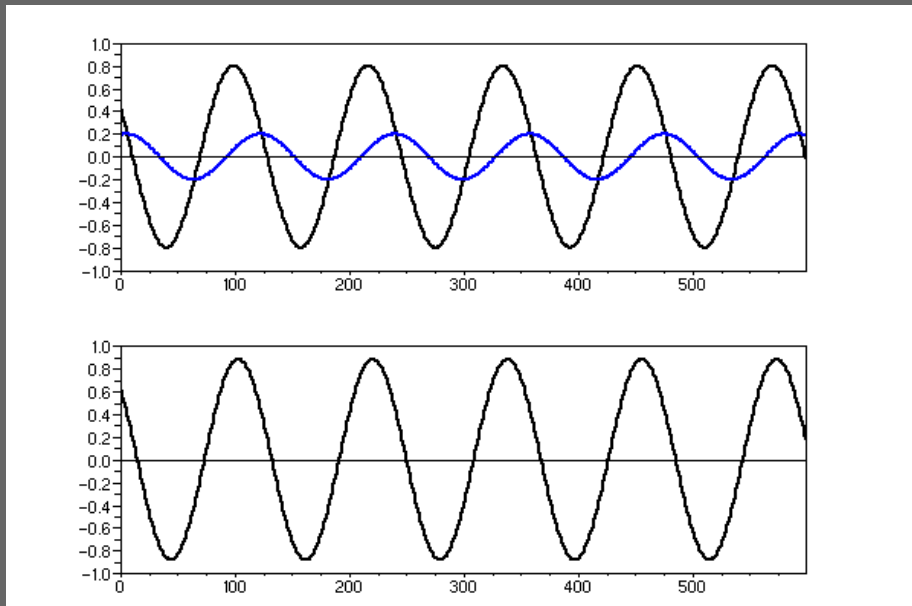
Sinusoides de igual frecuencia pero distinta amplitud y fase.





# Superposición de ondas

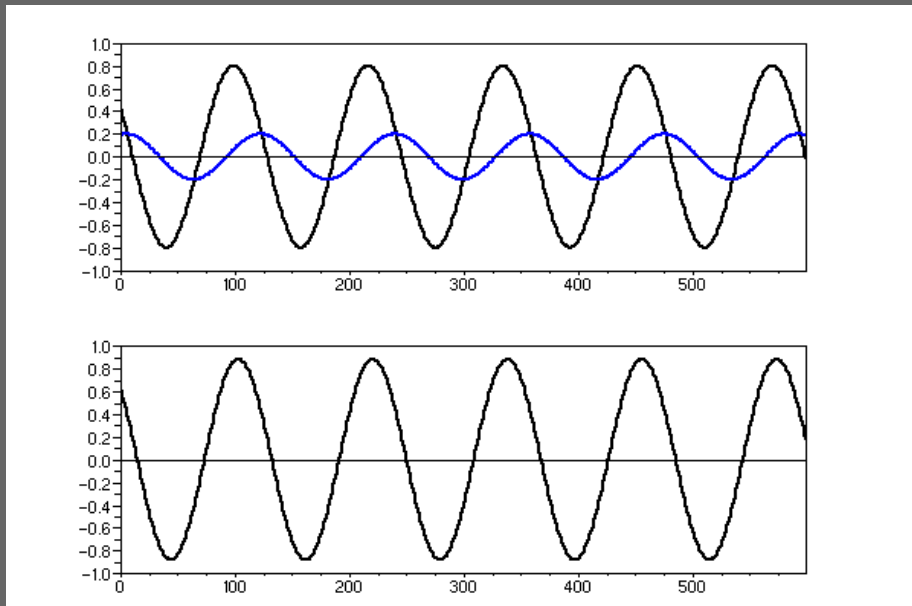
Sinusoides de igual frecuencia pero distinta amplitud y fase.



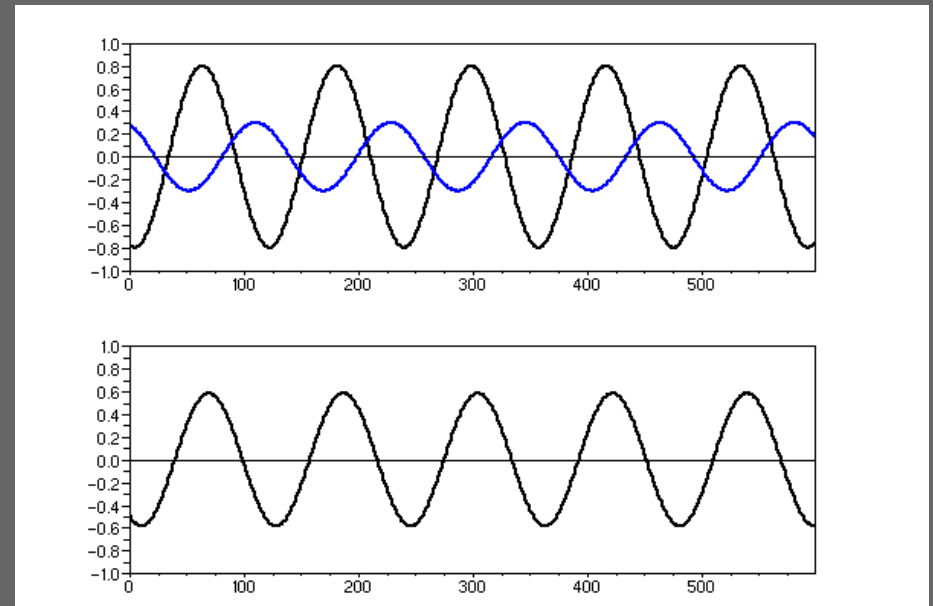


# Superposición de ondas

Sinusoides de igual frecuencia pero distinta amplitud y fase.



Interferencia constructiva

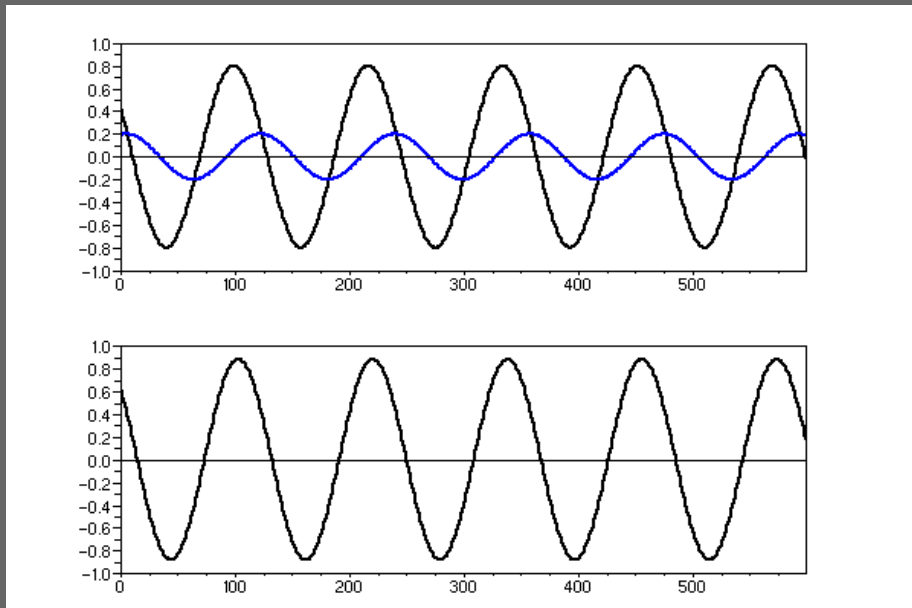


Interferencia destructiva

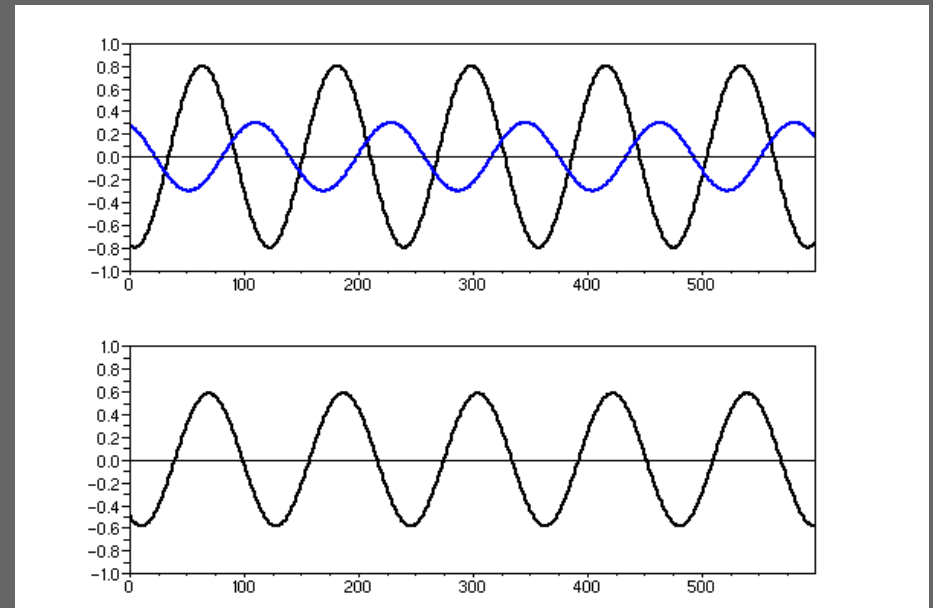


# Superposición de ondas

Sinusoides de igual frecuencia pero distinta amplitud y fase.



Interferencia constructiva



Interferencia destructiva

La onda resultante tiene la misma frecuencia.





# *Superposición de armónicos*

Superposición de sinusoides de **frecuencia** en relación **armónica**

**Armónicos:**

Múltiplos enteros de una frecuencia fundamental ( $f$ ,  $2f$ ,  $3f$ , ..., etc).



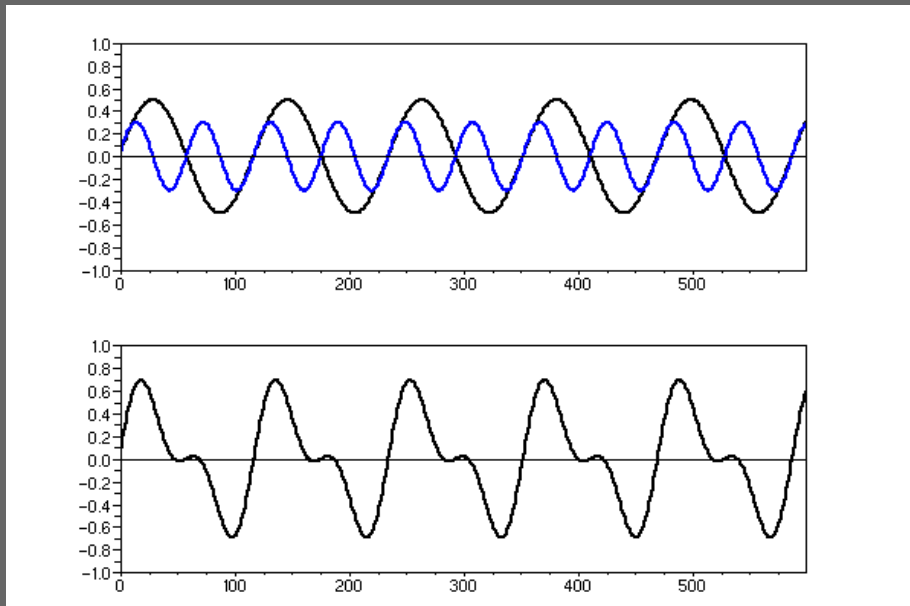
# Superposición de armónicos

Superposición de sinusoides de **frecuencia** en relación **armónica**

**Armónicos:**

Múltiplos enteros de una frecuencia fundamental ( $f$ ,  $2f$ ,  $3f$ , ..., etc).

Primer y segundo armónico ( $f$  y  $2f$ )





# Superposición de armónicos

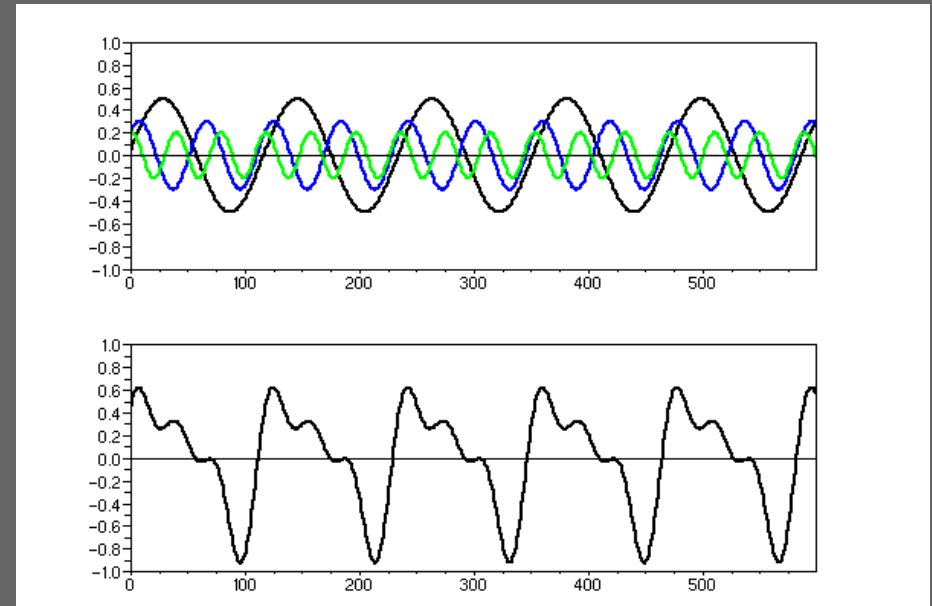
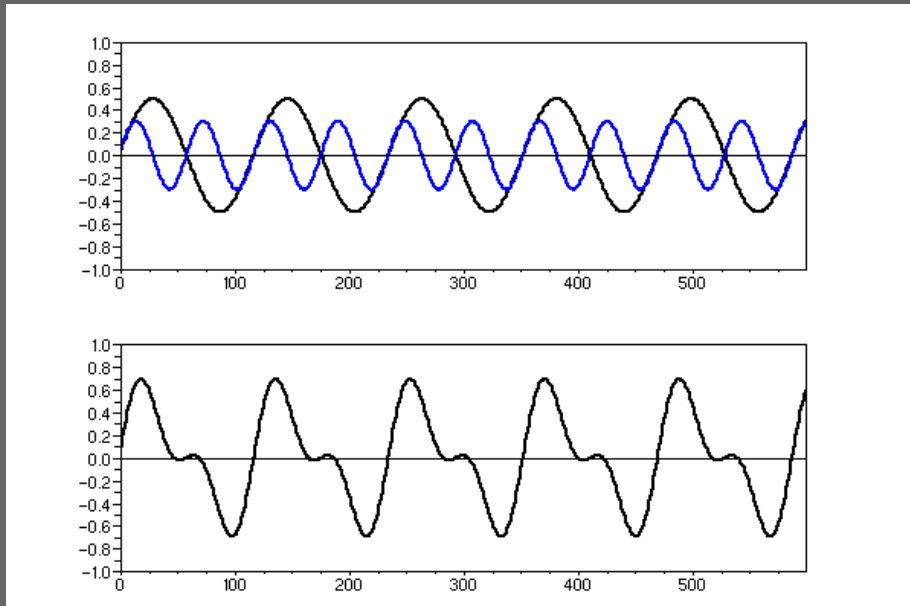
Superposición de sinusoides de **frecuencia** en relación armónica

**Armónicos:**

Múltiplos enteros de una **frecuencia fundamental** ( $f$ ,  $2f$ ,  $3f$ , ..., etc).

Primer y segundo armónico ( $f$  y  $2f$ )

Primer, segundo y tercer armónico ( $f$ ,  $2f$ ,  $3f$ )





# Superposición de armónicos

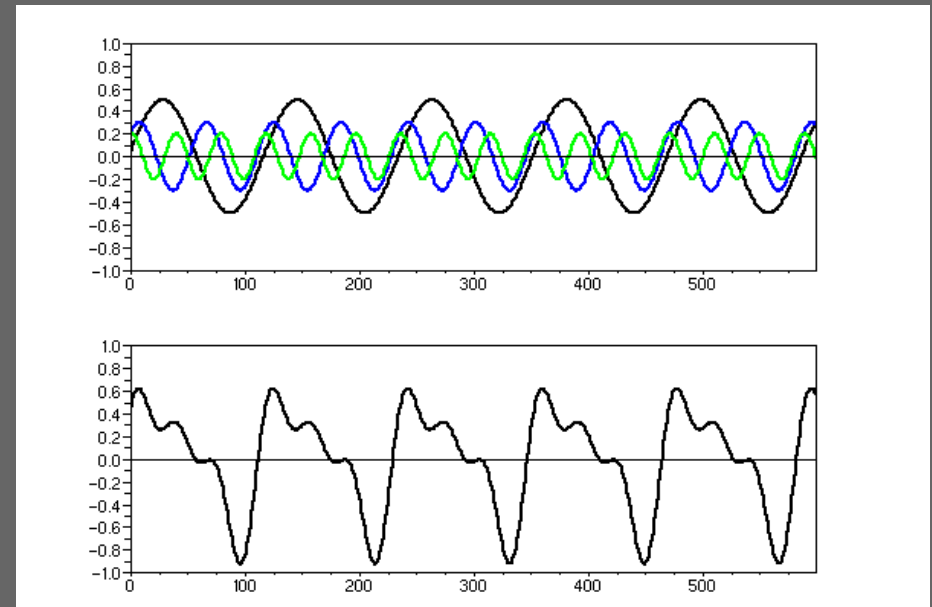
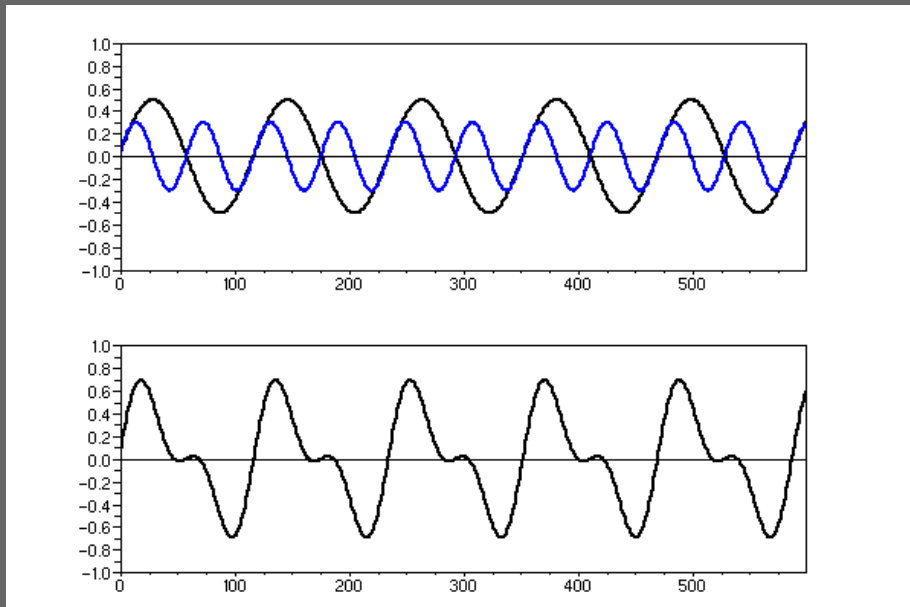
Superposición de sinusoides de **frecuencia** en relación armónica

**Armónicos:**

Múltiplos enteros de una **frecuencia fundamental** ( $f$ ,  $2f$ ,  $3f$ , ..., etc).

Primer y segundo armónico ( $f$  y  $2f$ )

Primer, segundo y tercer armónico ( $f$ ,  $2f$ ,  $3f$ )



**Serie armónica:** sonido formado por componentes armónicos



# *Análisis de Fourier*

Cualquier **onda periódica** puede representarse como superposición de **sinusoides** de distinta frecuencia.



# Análisis de Fourier

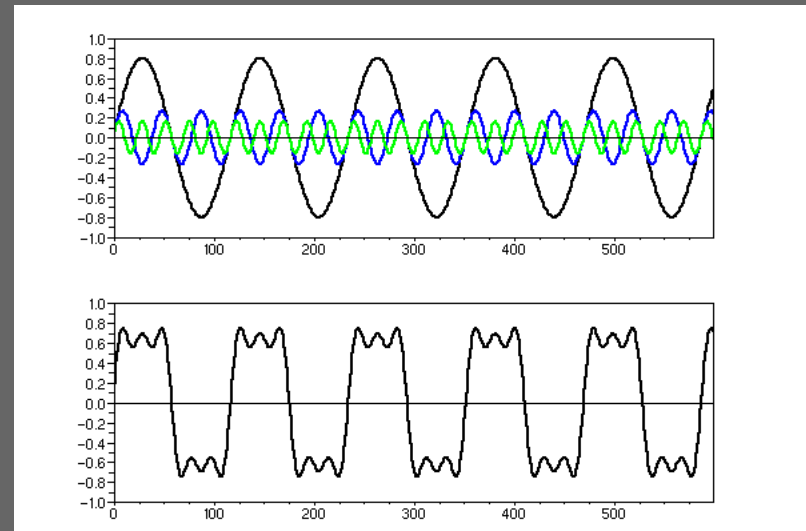
Cualquier **onda periódica** puede representarse como superposición de **sinusoides** de distinta frecuencia.

Ej. Onda cuadrada:

1er armónico – amplitud 1

3er armónico – amplitud  $1/3$

5to armónico – amplitud  $1/5$





# Análisis de Fourier

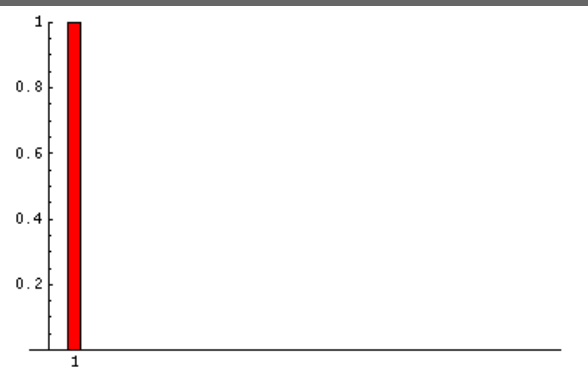
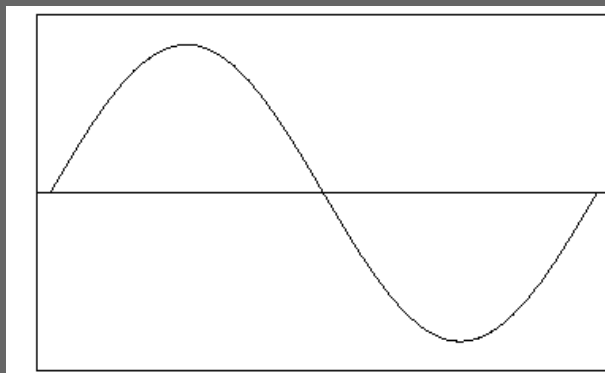
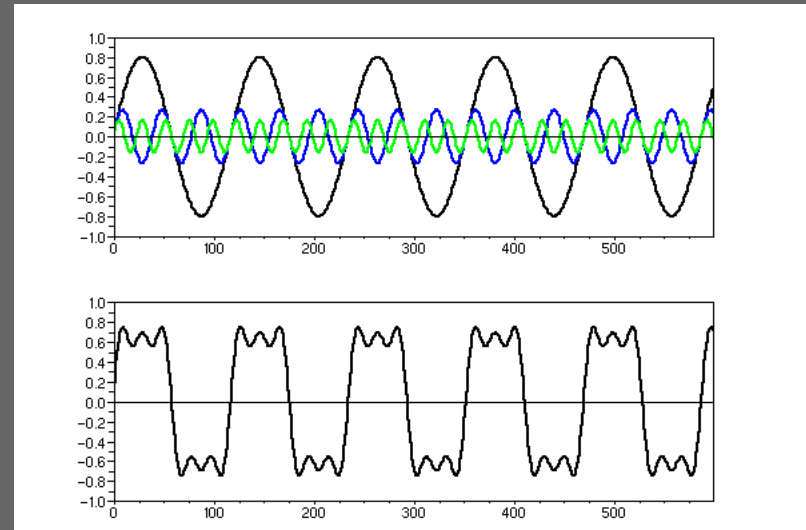
Cualquier onda periódica puede representarse como superposición de **sinusoides** de distinta frecuencia.

Ej. Onda cuadrada:

1er armónico – amplitud 1

3er armónico – amplitud  $1/3$

5to armónico – amplitud  $1/5$





# Análisis de Fourier

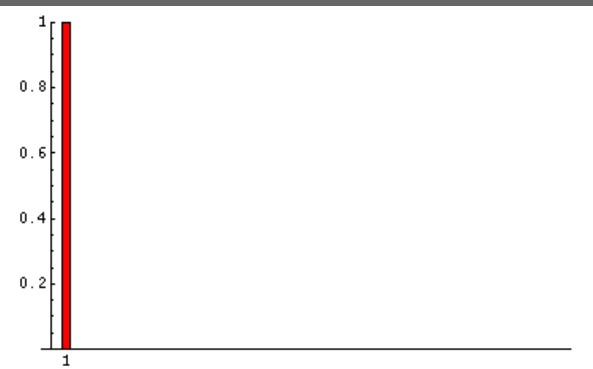
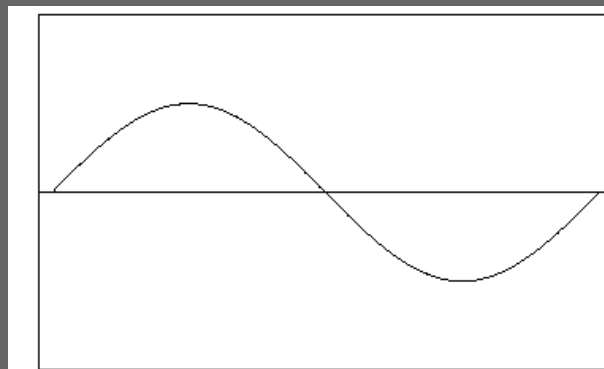
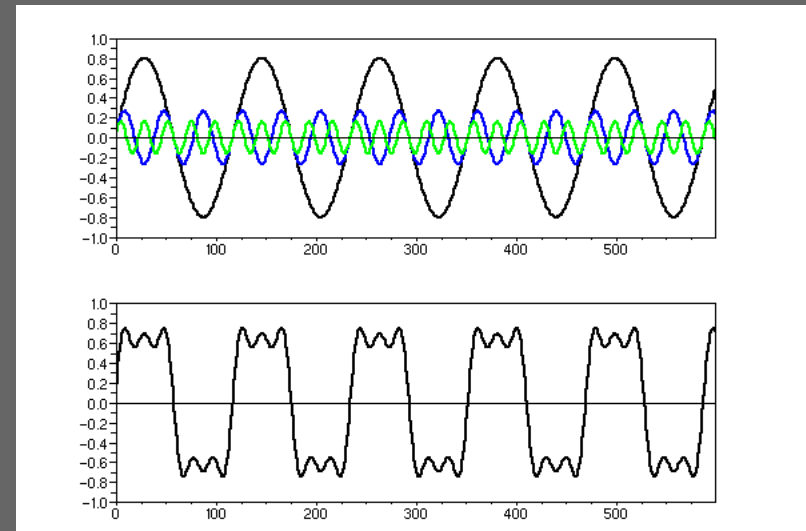
Cualquier **onda periódica** puede representarse como superposición de **sinusoides** de distinta frecuencia.

Ej. Onda cuadrada:

1er armónico – amplitud 1

3er armónico – amplitud  $1/3$

5to armónico – amplitud  $1/5$







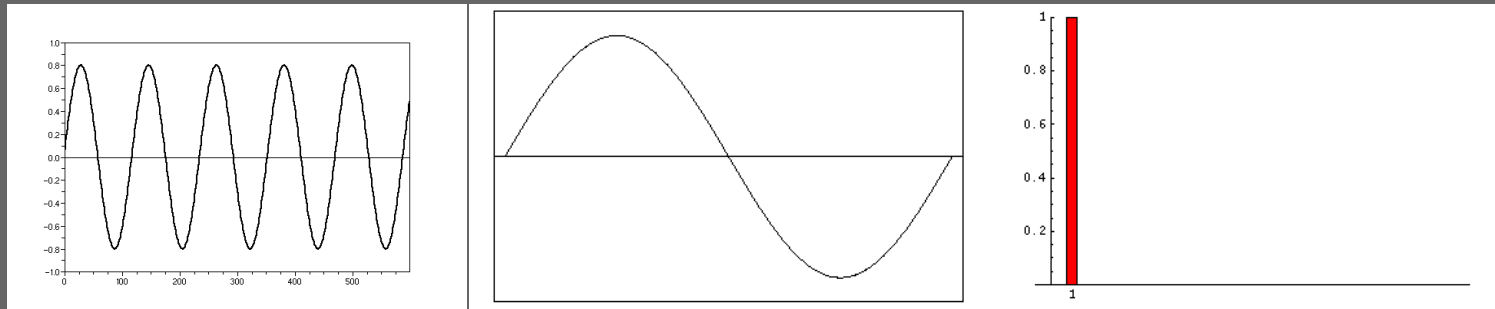
# ***Espectro del sonido***

Representación del sonido por sus componentes en frecuencia.



# *Espectro del sonido*

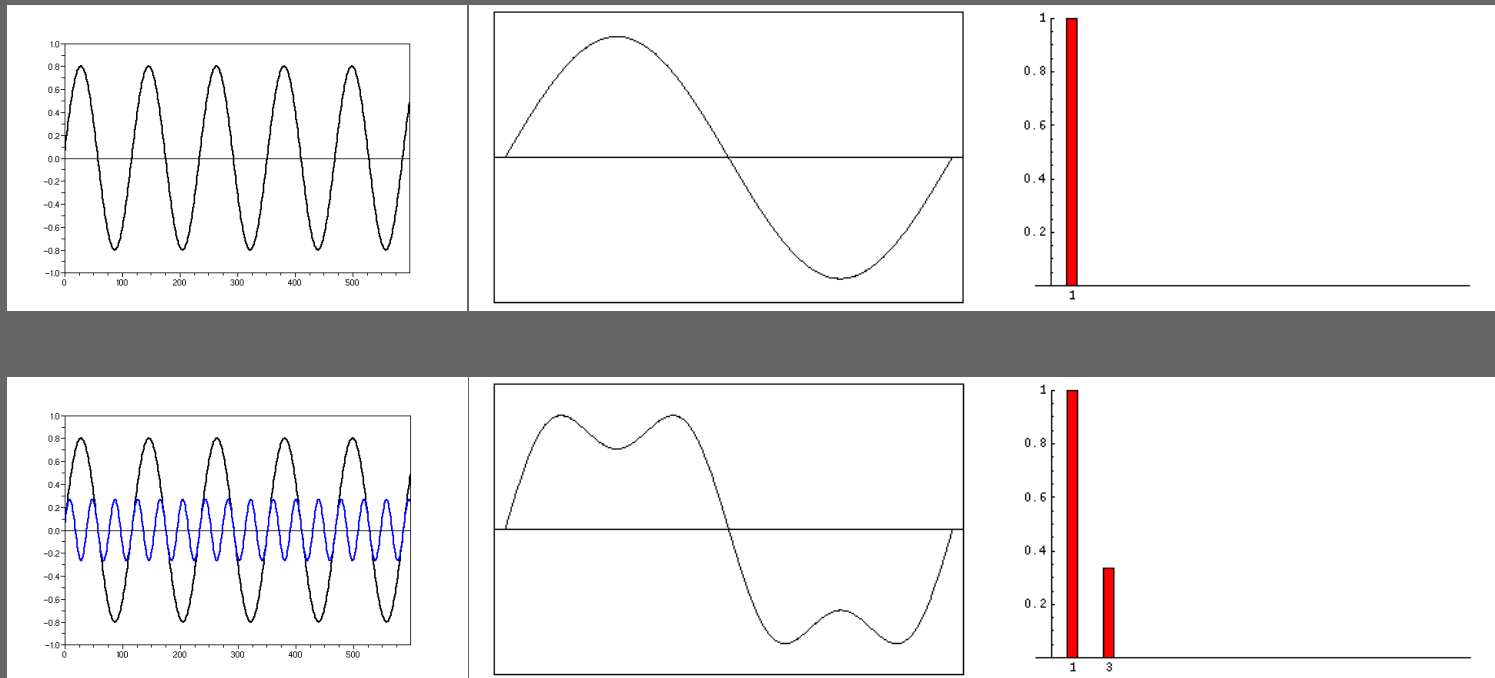
Representación del sonido por sus componentes en frecuencia.





# Espectro del sonido

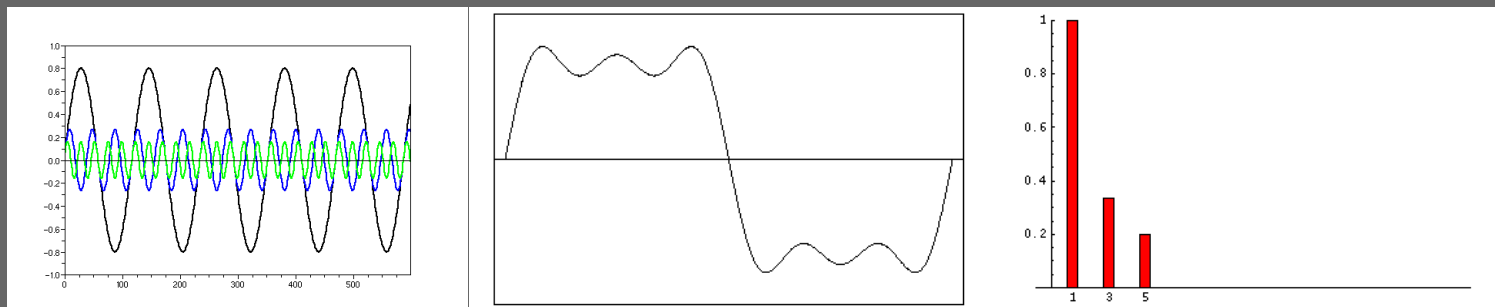
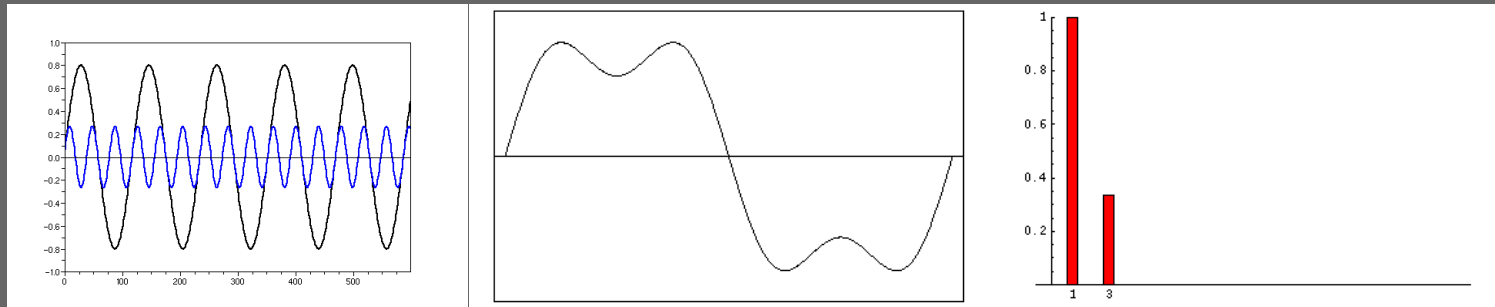
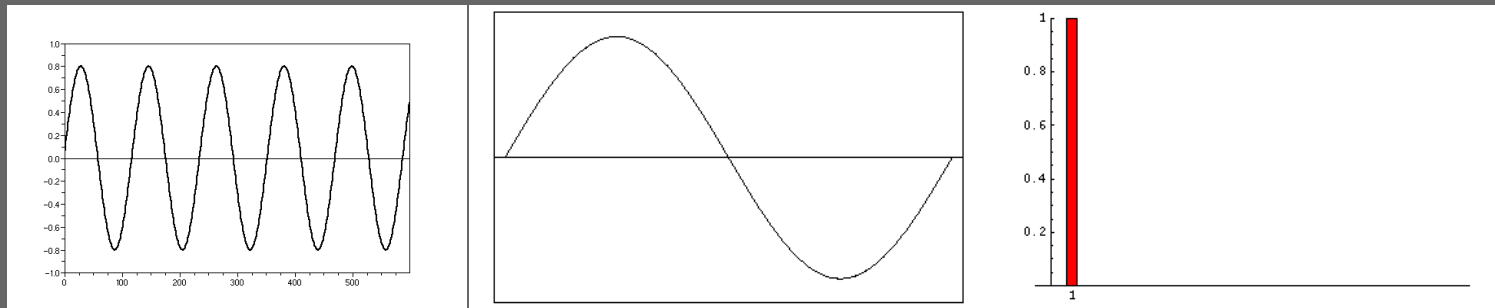
Representación del sonido por sus componentes en frecuencia.





# Espectro del sonido

Representación del sonido por sus componentes en frecuencia.





# ***Tipos de espectro del sonido***

- **Espectro armónico**

Componentes de frecuencia en relación armónica.

*Ej. la mayoría de los sonidos musicales (altura definida).*

- **Espectro inarmónico**

Componentes de frecuencia en relación no armónica.

*Ej. sonido de campanas, placas de metal.*

- **Espectro continuo - ruido**

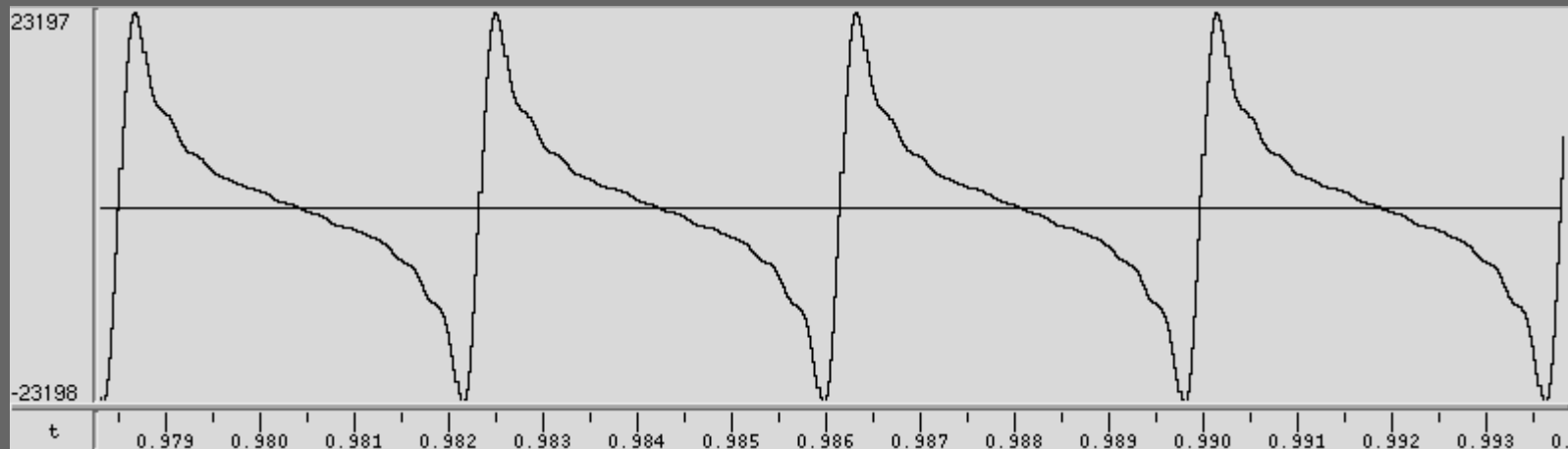
cantidad de parciales muy próximos.

Gran



# Espectro armónico

Forma de onda periódica.



Armónicos de Do central

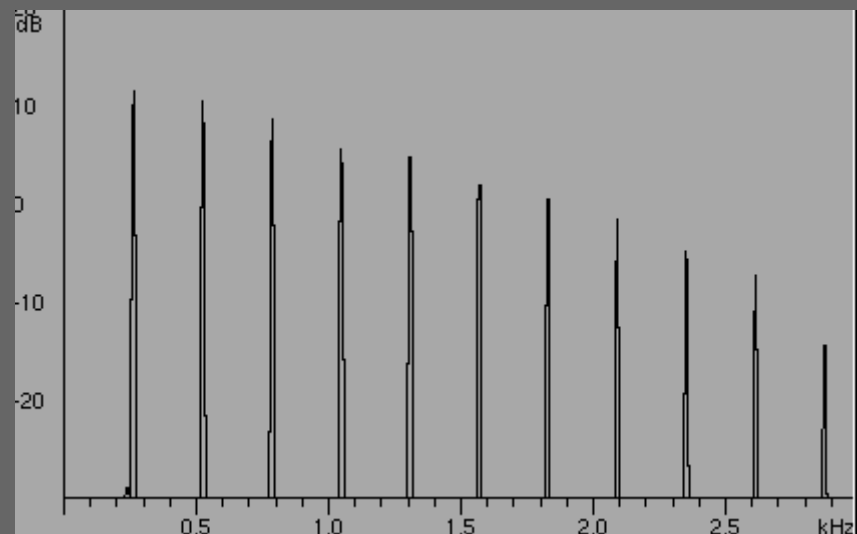
1er armónico – 261,626 Hz

2do armónico – 523,252 Hz

3er armónico – 784,878 Hz

...

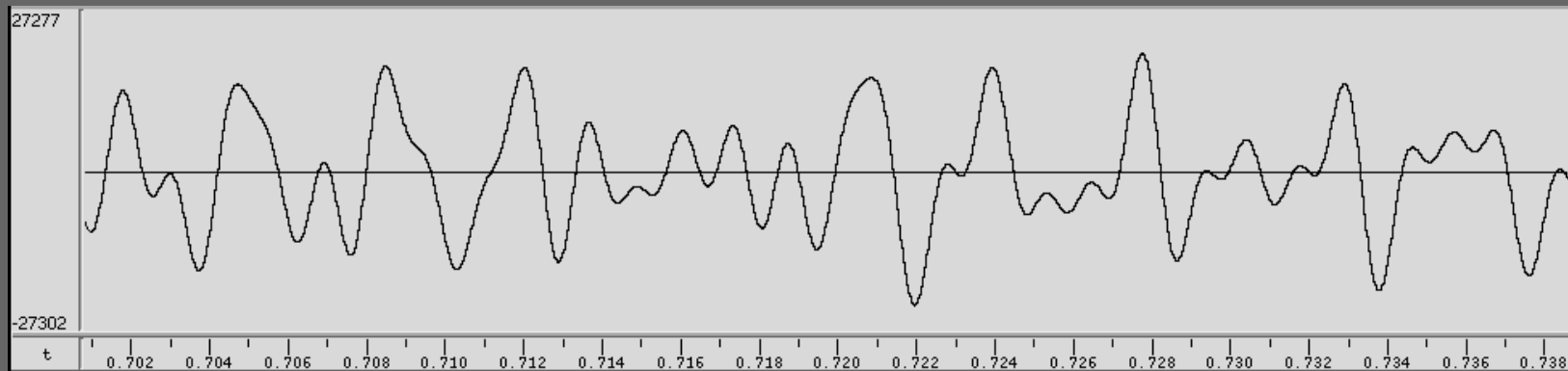
etc (continúa la serie armónica)





# Espectro inarmónico

Forma de onda no periódica.



Componentes de frecuencia

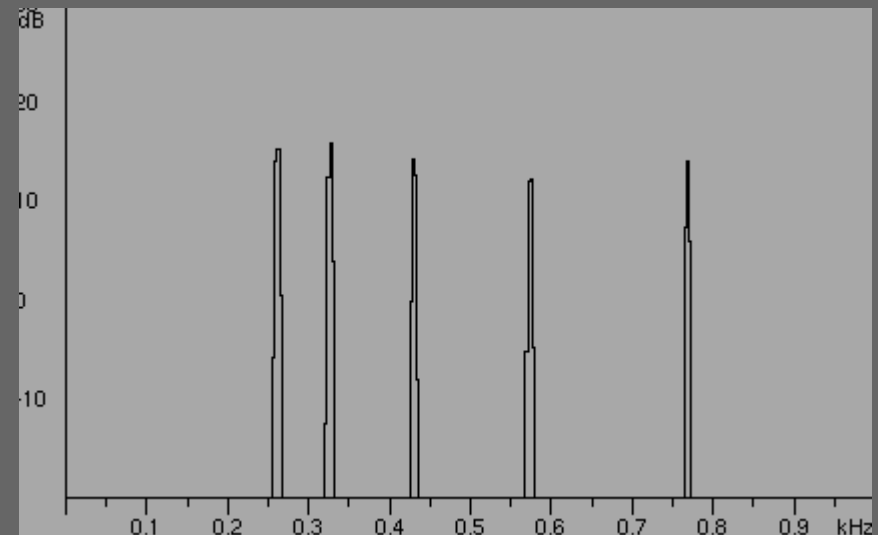
1er componente – 267 Hz

2do componente – 532 Hz

3er componente – 641 Hz

4to componente – 764 Hz

5to componente – 1701 Hz

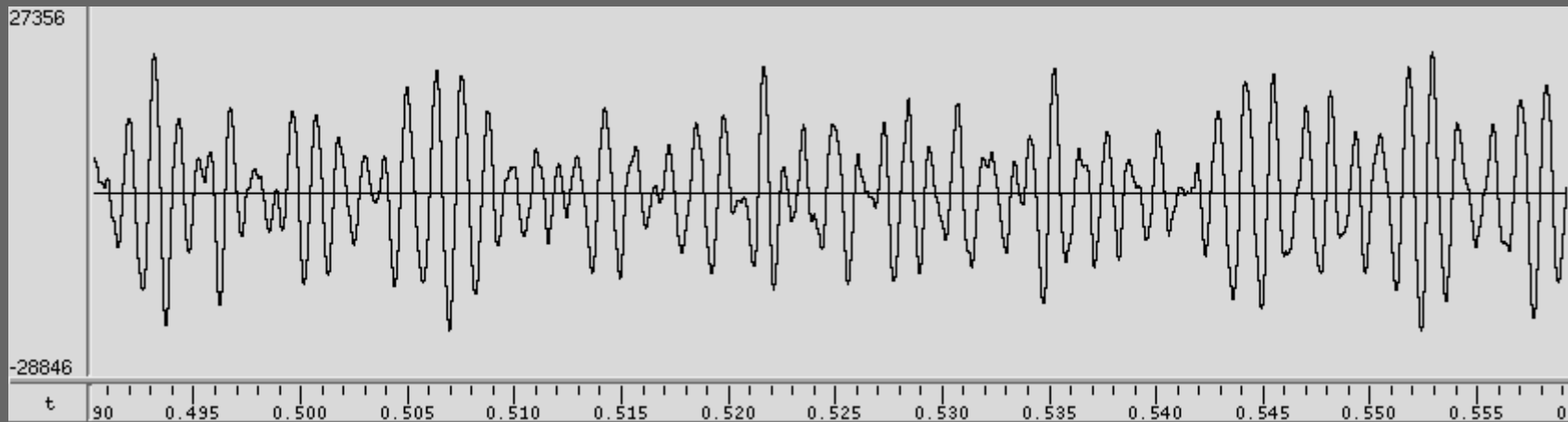


No tienen relación armónica.



# Espectro continuo

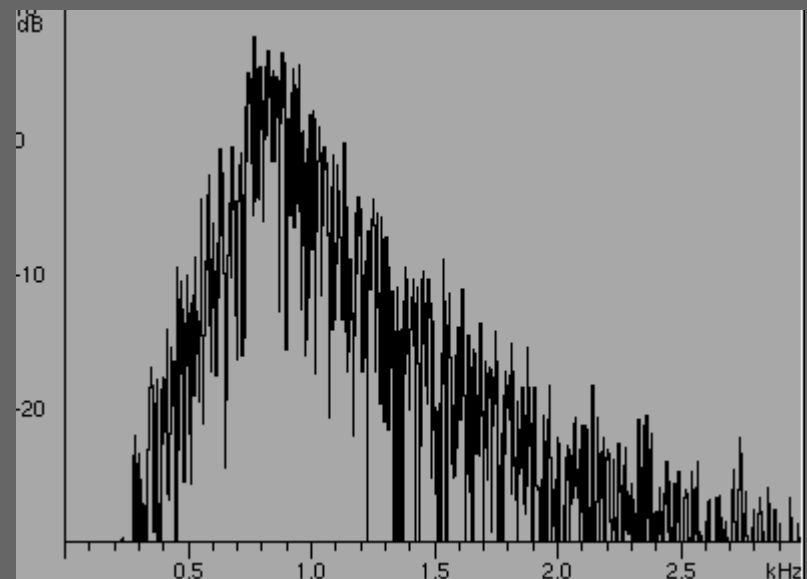
Forma de onda **aleatoria**, no periódica.



Componentes de frecuencia

- El espectro no está compuesto por componentes discretos sino por bandas de ruido.

Banda entorno a los 830 Hz.







## *Referencias*

J. G. Roederer, Acústica y psicoacústica de la música, Ricordi, 1997

F. Miyara, Acústica y sistemas de sonido, 3ra edición, UNR, 2003

K. Steiglitz, A digital signal processing primer, Addison Wesley, 1996

C. Gil, M. Vaquero, Sonido profesional, Cap. 1 Física del sonido, 4ta edición, Paraninfo, 1999

Animaciones - Dan Russell, Kettering University

<http://www.kettering.edu/~drussell/>