

# Fundamentos de Sonido e Imagen

Apuntes de clase

Javier Rodrigo López <sup>1</sup>

23 de mayo de 2021



<sup>1</sup>Correo electrónico: [javiolonchelo@gmail.com](mailto:javiolonchelo@gmail.com)



UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE MADRID



## Introducción

---

Imagen de la portada: *Corriendo por la playa. Valencia*, de Joaquín Sorolla.

Información para los sentidos de la vista y el oído:

- Luz → Imagen → Vídeo
- Vibraciones → Sonido → Audio
- **Consumo audiovisual:** Consumo humano
- **Análisis:** Procesado, Edición, Interpretación.
- **Síntesis:** Generación, automatización

Luz, óptica, fotometría Magnitudes físicas: Propagación, fuentes, medio, obstáculos Ondas, vibraciones, sonido, acústica S.V. Humano. Color PERCEPCIÓN HUMANA y COMPRENSIÓN Psicoacústica Cámaras, scanners, pantallas, impresión, scanners médicos

**Usuario:** Utiliza equipo o servicio. Creador de contenido. Artista. **Técnico:** Operar, mantener instalaciones **Ingeniero:**

- Conocimientos básicos fuertes
- Capacidad de trabajo
- Adaptabilidad e Independencia
- Comunicación: Oral, Escrita y en inglés
- Cooperación: Trabajo con otros
- Aprendizaje continuo, curiosidad
- Investigación: Crear algo nuevo
- Experiencia: Intuición, "sabiduría"

Imagen:

Teoría: 16h + 2h parcial Laboratorio: 8h = 4 prácticas online

Sonido:

Teoría 18h online Laboratorio (Aula L8103) 4h = 2 prácticas presenciales

## Evaluación

---

Teoría Imagen: 35 % + Teoría Sonido 35 % + cada laboratorio cuenta 15 %

Hay que sacar más de un 5 en cada parte.

# Índice general

Introducción . . . . .	2
<b>1. Señales, sistemas y medidas acústicas. Revisión de conceptos</b>	<b>5</b>
1.1. Oscilaciones mecánicas . . . . .	5
1.2. MAS amortiguado en régimen libre . . . . .	5
1.3. Fasores . . . . .	7
1.4. Fenómeno de Resonancia . . . . .	7
1.5. Factor de calidad . . . . .	7
1.6. Energía . . . . .	7
1.7. Composición de dos MAS de igual frecuencia . . . . .	7
1.7.1. Teorema del coseno . . . . .	7
1.7.2. Cálculo fasorial . . . . .	7
<b>2. Señales acústicas</b>	<b>9</b>
2.1. Valor RMS y nivel de una señal . . . . .	9
2.2. Serie de Fourier y Transformada de Fourier . . . . .	9
2.3. Densidad espectral de potencia . . . . .	9
2.4. Nivel espectral y nivel en banda . . . . .	9
2.5. Ruido blanco y ruido rosa . . . . .	9
2.6. Sistemas y medidas acústicas . . . . .	9
2.7. Sistema lineal. Función de transferencia. Respuesta al impulso . . . . .	9
2.8. Métodos de análisis de sistemas . . . . .	9
2.9. Analogías electro-mecánico-acústicas . . . . .	9
<b>3. Audición y voz</b>	<b>11</b>
3.1. Fisiología y funcionamiento del sistema auditivo humano . . . . .	11
3.2. Características de la respuesta auditiva . . . . .	11
3.3. No linealidad del sistema auditivo . . . . .	11
3.4. Efecto de enmascaramiento temporal y frecuencial . . . . .	11
3.5. Audición binaural . . . . .	11
3.6. Mecanismo de generación de la voz . . . . .	11
3.7. Características acústicas de voz . . . . .	11
3.8. Análisis de la señal de voz . . . . .	11
<b>4. Ondas planas y esféricas</b>	<b>13</b>
4.1. Ecuación de onda plana. Velocidad de propagación . . . . .	13
4.2. Velocidad vibratoria e impedancia de una onda plana . . . . .	13
4.3. Presión e intensidad acústicas . . . . .	13
4.4. Ecuación de una onda esférica . . . . .	13
4.5. Velocidad vibratoria e impedancia de una onda esférica . . . . .	13
4.6. Campo acústico originado por una fuente. Divergencia esférica . . . . .	13
4.7. Potencia radiada por una fuente . . . . .	13
<b>5. Ondas estacionarias</b>	<b>15</b>
5.1. Reflexión de una onda plana . . . . .	15
5.2. Impedancia de una línea de transmisión acústica . . . . .	15
5.3. Intensidad acústica de una onda estacionaria . . . . .	15
5.4. Transmisión acústica a través de varios medios . . . . .	15
<b>6. Formación y captación de imágenes</b>	<b>17</b>
6.1. Introducción . . . . .	17
6.1.1. Diferencias y similitudes entre las vista y el oído . . . . .	17
6.2. Óptica geométrica . . . . .	17

6.3. Fotografía . . . . .	19
6.4. Fotometría . . . . .	19
<b>7. El sistema visual humano. Colorimetría</b>	<b>21</b>
7.1. Introducción a la visión . . . . .	21
7.2. Estructura y óptica del ojo humano . . . . .	21
7.3. La retina, nuestro sensor . . . . .	21
7.4. Percepción: Implicaciones en los sistemas de imagen . . . . .	21
<b>8. Señales utilizadas para la representación de imágenes</b>	<b>23</b>
8.1. Modelos cromáticos para el almacenamiento cuantificado de los colores . . . . .	23
8.2. Señales de luminancia y de cromaticidad . . . . .	23
8.3. Importancia concedida por el ojo a las señales de luminancia y cromaticidad . . . . .	23
8.4. Cartas de barras para los estudios cromáticos de imágenes fijas y de vídeo . . . . .	23
8.5. Relación de aspecto y exploraciones progresivas y entrelazada . . . . .	23
8.6. Resolución horizontal y vertical de las imágenes (SD, HD, UHD) . . . . .	23
8.7. Señales normalmente utilizadas para la transmisión de señales de vídeo . . . . .	23
8.8. Intervalos de vídeo e intervalos de sincronismo . . . . .	23
<b>A. Prácticas</b>	<b>25</b>
A.1. Introducción. Técnicas de medidas acústicas. Técnicas de análisis de sistemas mecánicos y acústicos . . . . .	25
A.2. Osciladores mecánicos y acústicos . . . . .	25
A.3. Ondas acústicas esféricas. Potencia radiada por una fuente . . . . .	25
A.4. Ondas acústicas estacionarias. Impedancia acústica. Impedancia de radiación de un tubo . . . . .	25
A.5. Imagen digital . . . . .	25
A.6. Relación de aspecto y adaptaciones . . . . .	25
A.7. Brillo y contraste . . . . .	25
A.8. Color. Saturación y tinte . . . . .	25
<b>B. Imagen</b>	<b>27</b>
<b>C. Sonido</b>	<b>29</b>

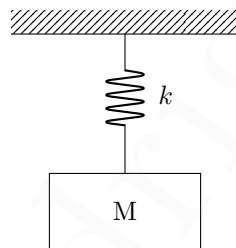
# Capítulo 1

## Señales, sistemas y medidas acústicas. Revisión de conceptos

### 1.1 Oscilaciones mecánicas

---

Figura 1.1. Oscilador simple.



Este oscilador está formado por una masa  $M$  que cuelga de un muelle de constante  $k$ .

De la segunda Ley de Newton, podemos obtener la ecuación de ondas:

$$\sum F = M \cdot a \quad \Rightarrow \quad M \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = 0$$

Recordemos el oscilador armónico simple, que es descrito mediante la **Ley de Hooke**:

$$F = -kx$$

Esta ecuación describe un movimiento sin amortiguamiento, perpetuo.

Si resolvemos la ecuación de ondas, el resultado tiene la siguiente forma:

$$x(t) = x_o \cos(\omega_o t + \varphi)$$

Algunos parámetros importantes:

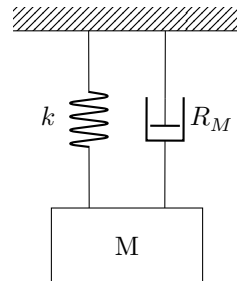
$$\omega_o = 2\pi \cdot f_o = \sqrt{\frac{k}{M}}$$
$$T_o = \frac{1}{f_o} = \frac{2\pi}{\omega_o}$$

### 1.2 MAS amortiguado en régimen libre

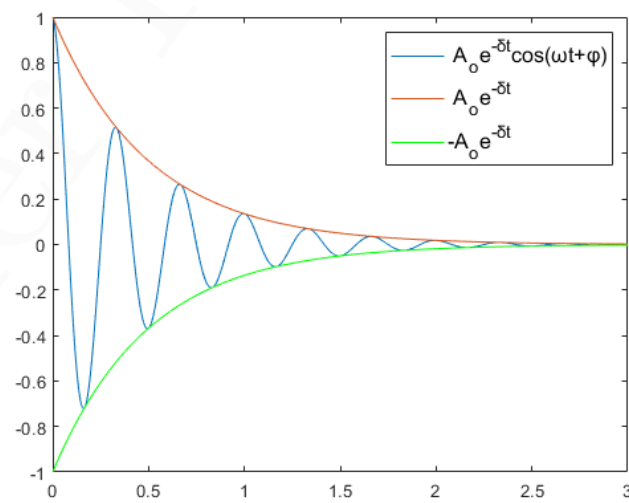
---

Si añadimos amortiguación a este movimiento, el resultado tendría la misma forma que antes, pero con una exponencial negativa que hace que decrezca en amplitud con el paso del tiempo.

$$\sum F = M \cdot a \quad \Rightarrow \quad M \frac{d^2 x}{dt^2} + R_M \frac{dx}{dt} + kx = 0 \quad \xrightarrow{\text{Solución}} \quad x(t) = x_o e^{-\delta t} \cos(\omega' t + \varphi)$$

**Figura 1.2.** Sistema masa-resorte

Este sistema es un oscilador con 1 grado de libertad.

**Figura 1.3.** Respuesta al impulso del oscilador amortiguado

Este resultado se puede entender como la **respuesta al impulso** del sistema mecánico. En la práctica, usaremos señales rectangulares muy grandes y de duración muy corta para modelar el sistema, como si fueran señales impulso  $\delta(t)$ . Más adelante aprenderemos a hacer esto.

$$\delta = \frac{R_M}{2M} \omega' = \sqrt{\omega_o^2 - \delta^2} \quad \xrightarrow{\omega_o \gg \delta} \quad \omega' \approx \omega_o$$

$$\tau = \frac{x_o}{e} = \frac{1}{\delta} \quad \tau \equiv \text{Tiempo de relajación del sistema}$$

### 1.3 Fasores

---

El acento circunflejo ( $\hat{\phantom{x}}$ ) es el símbolo que usaremos para representar los fasores en este documento.

$$\hat{x} = x_o e^{j\varphi}$$

$$\text{Compliance mecánica} \equiv k = \frac{1}{C}$$

### 1.4 Fenómeno de Resonancia

---

En los sistemas eléctricos, acústicos y mecánicos (como el de la [Figura 1.2](#)) tiene lugar un fenómeno denominado **resonancia**. Para ciertas frecuencias de oscilación, la resistencia que presenta el sistema puede disminuir considerablemente. A esa frecuencia se la conoce como frecuencia fundamental o **modo propio**.

### 1.5 Factor de calidad

---

El factor de calidad no representa la calidad del sistema mecánico que tengamos. Esto se debe a que es un parámetro heredado de la teoría de circuitos.

$$Q = \left. \frac{f_c}{\Delta f} \right|_{-3 \text{ dB}} = \frac{\omega_o \tau}{2}$$

En un altavoz, nos interesa un tiempo de respuesta bajo. Sin embargo, se debe escoger un ancho de banda adecuado para ofrecer una respuesta en frecuencia adaptada a nuestras necesidades.

### 1.6 Energía

---

Esto no entra demasiado.

### 1.7 Composición de dos MAS de igual frecuencia

---

Esta composición es denominada **suma coherente**.

#### 1.7.1. Teorema del coseno

$$x_o^2 = x_{o1}^2 + x_{o2}^2 + 2x_{o1}x_{o2} \cos(\delta) \quad , \quad \text{con } \delta = \varphi_2 - \varphi_1$$

#### 1.7.2. Cálculo fasorial

Javier Rodrigo López



## Capítulo 2

# Señales acústicas

2.1 Valor RMS y nivel de una señal

---

2.2 Serie de Fourier y Transformada de Fourier

---

2.3 Densidad espectral de potencia

---

2.4 Nivel espectral y nivel en banda

---

2.5 Ruido blanco y ruido rosa

---

2.6 Sistemas y medidas acústicas

---

2.7 Sistema lineal. Función de transferencia. Respuesta al impulso

---

2.8 Métodos de análisis de sistemas

---

2.9 Analogías electro-mecánico-acústicas

---

Javier Rodrigo López

## Capítulo 3

# Audición y voz

3.1 Fisiología y funcionamiento del sistema auditivo humano

---

3.2 Características de la respuesta auditiva

---

3.3 No linealidad del sistema auditivo

---

3.4 Efecto de enmascaramiento temporal y frecuencial

---

3.5 Audición binaural

---

3.6 Mecanismo de generación de la voz

---

3.7 Características acústicas de voz

---

3.8 Análisis de la señal de voz

---

Javier Rodrigo López

## Capítulo 4

# Ondas planas y esféricas

4.1 Ecuación de onda plana. Velocidad de propagación

---

4.2 Velocidad vibratoria e impedancia de una onda plana

---

4.3 Presión e intensidad acústicas

---

4.4 Ecuación de una onda esférica

---

4.5 Velocidad vibratoria e impedancia de una onda esférica

---

4.6 Campo acústico originado por una fuente. Divergencia esférica

---

4.7 Potencia radiada por una fuente

---

Javier Rodrigo López

## Capítulo 5

# Ondas estacionarias

5.1 Reflexión de una onda plana

---

5.2 Impedancia de una línea de transmisión acústica

---

5.3 Intensidad acústica de una onda estacionaria

---

5.4 Transmisión acústica a través de varios medios

---

Javier Rodrigo López



## Capítulo 6

# Formación y captación de imágenes

### 6.1 Introducción

---

#### 6.1.1. Diferencias y similitudes entre la vista y el oído

- Ambas tienen alcance cercano y lejano.
- El detalle espacial es alto en la vista y bajo en el oído.
- Ambos tienen alto detalle temporal.
- La vista tiene un bajo detalle frecuencial (colores) mientras que el oído tiene un alto detalle frecuencial (tono y timbre).
- Ambas sensaciones comienzan y acaban rápidamente.

Llamamos **luz** a la parte del espectro electromagnético visible por el Sistema Visual Humano. Comprende aproximadamente las longitudes de onda entre 380nm y 780nm.

Llamamos **sonido** al rango de frecuencias de las vibraciones audibles por el Sistema Auditivo Humano. Comprende frecuencias entre 20Hz y 20kHz.

La propagación de ambos es en forma de ondas, por lo que se puede relacionar la frecuencia, la velocidad de propagación y la longitud de onda:

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

La velocidad de propagación de la luz es aproximadamente un millón de veces mayor que la del sonido. Sin embargo, el rango de frecuencias de sonido es mucho mayor que el de la luz.

La interacción con medio y obstáculos depende de los rangos de longitud de onda.

Estudiaremos:

- Física en general.
- Óptica geométrica.
- Fotografía: Captura de imágenes.
- Fotometría: Medida de energía transportada, fuentes y objetos iluminados.
- Visión humana y colorimetría.

### 6.2 Óptica geométrica

---

Trata sobre reflexión y refracción de luz en fronteras entre medios y su propagación en medios homogéneos.

### Simplificación

Medio homogéneo: mismas propiedades en todos los puntos. Viaja en línea recta.

Sucesión de medios homogéneos: Lentes.

Campo luminoso. En un momento dado en un punto del espacio hay:

- Rayos en todas direcciones, provenientes de:
  - Fuentes de luz
  - Superficies
  - Atmósfera

Cámara oscura y modelo de cámara ideal. Es una caja o habitación con apertura muy pequeña. Desde cada punto a la vista solo pasa luz en una dirección y genera una imagen nítida e invertida en el interior. Rayo único”.

Es el modelo de cámara ideal usado en Gráficos 3D.

### Cámara estenopeica. *Pinhole*.

---

El eje  $Z$  es perpendicular al eje óptico o eje de la cámara. FALTA AÑADIR IMAGEN

Sensor: tamaño y relación de aspecto.

El tamaño se mide en milímetros.

La relación de aspecto es el ancho entre el alto. Si el objeto es muy grande o está muy cerca, su imagen puede no caber en el sensor.

Círculo de confusión:

En realidad, de cada punto de la vista se proyecta un cono de rayos con la forma de la apertura: círculo de confusión.

Para que la imagen sea nítida basta con que el círculo de confusión sea menor que el tamaño de un fotodetector del sensor.

Por ello, para este modelo de cámara se supone que pasa un único rayo por la apertura.

### Ejercicios

---

Para resolver los ejercicios con cámaras estenopeicas, utilizaremos el **teorema de Tales**. Siendo estas las distancias

EJERCICIO 1 Se cuenta con una cámara que se ajusta el modelo de cámara estenopeica ideal. El tamaño de su sensor de imagen es 36x24 mm

### Sensor de Imagen

---

Capta energía luminosa mediante:

- Proceso fotoquímico. Se debe a una reacción química.
- Proceso fotoeléctrico. Cada celda (pixel) del sensor se carga eléctricamente de forma proporcional a la energía luminosa recibida.

A más energía luminosa, más brillo en la imagen capturada.

### Deventajas de la cámara estenopeica

---

Al entrar muy poca luz, la energía luminosa que recibe el sensor de la cámara estenopeica

Aspectos clave al capturar una imagen

- Imagen enfocada (nítida) para aperturas mayores. Necesitamos óptica de enfoque.
- Cantidad de luz suficiente, depende de:
  - Luz presente en la escena
  - Tamaño de la apertura

- Tiempo de exposición (relacionado con la velocidad de obturación o *shutter*)

Velocidad de la luz e índice de refracción.

La propagación de la luz en un

Refracción en superficie esférica.

La potencia focal.

Ecuación de lente delgada

$$P = \frac{1}{d_f} = (n_l - n_o) \cdot \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Convención de signos y geometría.

### 6.3 Fotografía

---

### 6.4 Fotometría

---

Javier Rodrigo López

## Capítulo 7

# El sistema visual humano. Colorimetría

7.1 Introducción a la visión

---

7.2 Estructura y óptica del ojo humano

---

7.3 La retina, nuestro sensor

---

7.4 Percepción: Implicaciones en los sistemas de imagen

---

Javier Rodrigo López

## Capítulo 8

# Señales utilizadas para la representación de imágenes

- 8.1 Modelos cromáticos para el almacenamiento cuantificado de los colores

---
- 8.2 Señales de luminancia y de crominancia

---
- 8.3 Importancia concedida por el ojo a las señales de luminancia y crominancia

---
- 8.4 Cartas de barras para los estudios cromáticos de imágenes fijas y de vídeo

---
- 8.5 Relación de aspecto y exploraciones progresivas y entrelazada

---
- 8.6 Resolución horizontal y vertical de las imágenes (SD, HD, UHD)

---
- 8.7 Señales normalmente utilizadas para la transmisión de señales de vídeo

---
- 8.8 Intervalos de vídeo e intervalos de sincronismo

---

Javier Rodrigo López



# Apéndice A

## Prácticas

A.1 Introducción. Técnicas de medidas acústicas. Técnicas de análisis de sistemas mecánicos y acústicos

---

A.2 Osciladores mecánicos y acústicos

---

A.3 Ondas acústicas esféricas. Potencia radiada por una fuente

---

A.4 Ondas acústicas estacionarias. Impedancia acústica. Impedancia de radiación de un tubo

---

A.5 Imagen digital

---

A.6 Relación de aspecto y adaptaciones

---

A.7 Brillo y contraste

---

A.8 Color. Saturación y tinte

---

Javier Rodrigo López

## Apéndice B

### Imagen

- Ángulo de visión:  $\alpha$
- Factor de campo de aumento visual: **zoom**
- Tiempo de exposición / Velocidad de disparo:  $t$  [s]
- Círculo de confusión:  $cc$  [ $\mu\text{m}$ ]
- Diámetro del diafragma:  $D$  [mm]
- Distancia focal:  $d_f$  [mm]
- Número  $f$  / apertura:
- Profundidad de campo
- Valor de exposición
- Valor de exposición con sensibilidad considerada
- Sensibilidad
- Margen dinámico
- Nivel de ruido medio
- Relación señal a ruido (imagen)
- Resolución señal a ruido de pico (sistema)

Javier Rodrigo López

## Apéndice C

### Sonido