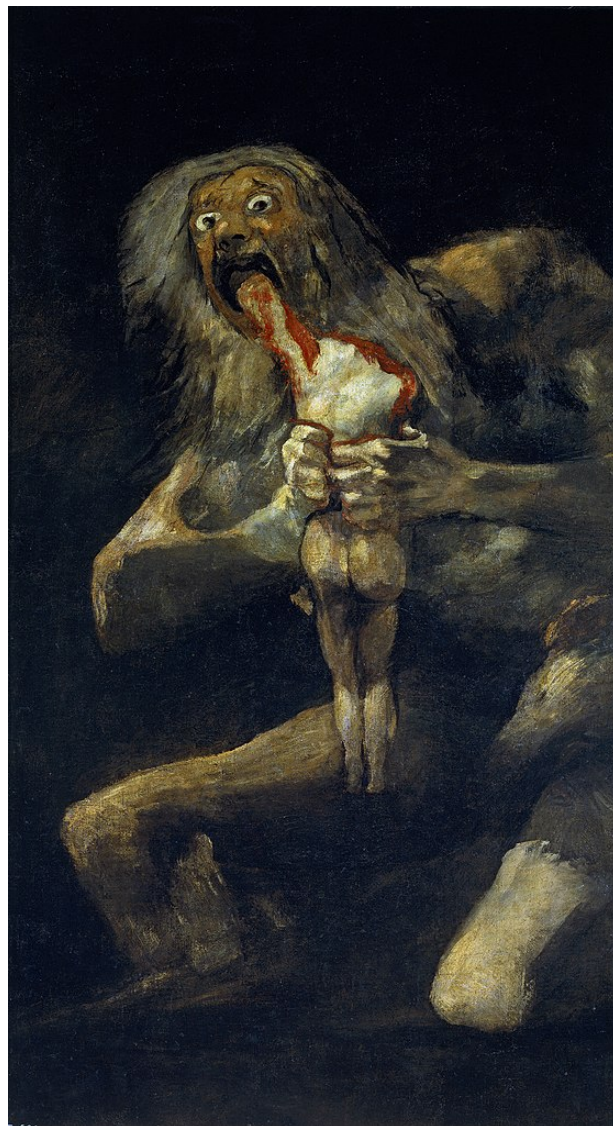


# Propagación de Ondas

Apuntes de clase

Javier Rodrigo López <sup>1</sup>

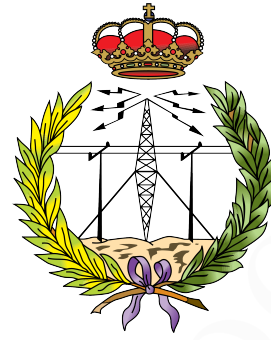
2 de febrero de 2021



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



UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE MADRID



## Introducción

---

Imagen de la portada: *Saturno devorando a su hijo*, de Francisco de Goya.

# Índice general

Introducción . . . . .	2
<b>1. Operadores vectoriales . . . . .</b>	<b>5</b>
1.1. Gradiente de un campo escalar . . . . .	5
1.2. Divergencia y rotacional de un campo vectorial . . . . .	5
1.3. Teorema de Helmholtz . . . . .	5
<b>2. Ondas acústicas planas . . . . .</b>	<b>7</b>
2.1. Notación compleja . . . . .	7
2.2. Ecuación de onda. Solución armónica . . . . .	7
2.3. Densidad de energía. Intensidad acústica . . . . .	7
<b>3. Ondas acústicas esféricas . . . . .</b>	<b>9</b>
3.1. Ecuación de onda esférica . . . . .	9
3.2. Solución armónica. Variables acústicas de una onda esférica . . . . .	9
3.3. Intensidad de una onda esférica . . . . .	9
<b>4. Reflexión y refracción de una onda plana . . . . .</b>	<b>11</b>
4.1. Reflexión y transmisión de una onda plana . . . . .	11
4.2. Ondas acústicas estacionarias . . . . .	11
4.3. Impedancia de una onda estacionaria . . . . .	11
<b>5. Ecuaciones de Maxwell. Ecuación de onda. Energía . . . . .</b>	<b>13</b>
5.1. Ecuaciones de Maxwell en forma diferencial . . . . .	13
5.2. Potenciales eléctrico y magnético . . . . .	13
5.3. Ecuación de onda para los campos y para los potenciales . . . . .	13
5.4. Energía del campo electromagnético. Teorema de Poynting . . . . .	13
5.5. Aplicación: Radiación de un dipolo oscilante . . . . .	13
<b>6. Propagación de ondas electromagnéticas en medios conductores . . . . .</b>	<b>15</b>
6.1. Solución para ondas planas . . . . .	15
6.2. Impedancia e índice de refracción del medio . . . . .	15
6.3. Propagación de la energía . . . . .	15
6.4. Polarización . . . . .	15
<b>7. Propagación de ondas electromagnéticas en medios conductores . . . . .</b>	<b>17</b>
7.1. Densidad de carga libre en el conductor. Carácter transversal . . . . .	17
7.2. Solución para ondas planas. Magnitudes complejas . . . . .	17
7.3. Balance energético . . . . .	17
<b>8. Reflexión y refracción de ondas electromagnéticas . . . . .</b>	<b>19</b>
8.1. Reflexión y refracción en la frontera dieléctrico-dieléctrico . . . . .	19
8.2. Ecuaciones de Fresnel . . . . .	19
8.3. Coeficientes de reflexión y refracción . . . . .	19
8.4. Reflexión y refracción en la frontera dieléctrico-conductor . . . . .	19
<b>9. Ondas guiadas . . . . .</b>	<b>21</b>
9.1. Ondas estacionarias producidas por reflexión en la frontera dieléctrico-conductor. Ondas TE y TM . . . . .	21
9.2. Guía de onda formada por dos planos conductores paralelos . . . . .	21
9.3. Balance de energía . . . . .	21
9.4. Guía de onda rectangular . . . . .	21

Javier Rodrigo López

# Capítulo 1

## Operadores vectoriales

1.1 Gradiente de un campo escalar

---

1.2 Divergencia y rotacional de un campo vectorial

---

1.3 Teorema de Helmholtz

---

Javier Rodrigo López

## Capítulo 2

# Ondas acústicas planas

2.1 Notación compleja

---

2.2 Ecuación de onda. Solución armónica

---

2.3 Densidad de energía. Intensidad acústica

---

Javier Rodrigo López



## Capítulo 3

# Ondas acústicas esféricas

### 3.1 Ecuación de onda esférica

---

### 3.2 Solución armónica. Variables acústicas de una onda esférica

---

### 3.3 Intensidad de una onda esférica

---

Javier Rodrigo López

## Capítulo 4

# Reflexión y refracción de una onda plana

### 4.1 Reflexión y transmisión de una onda plana

---

### 4.2 Ondas acústicas estacionarias

---

### 4.3 Impedancia de una onda estacionaria

---

Javier Rodrigo López

## Capítulo 5

# Ecuaciones de Maxwell. Ecuación de onda. Energía

5.1 Ecuaciones de Maxwell en forma diferencial

---

5.2 Potenciales eléctrico y magnético

---

5.3 Ecuación de onda para los campos y para los potenciales

---

5.4 Energía del campo electromagnético. Teorema de Poynting

---

5.5 Aplicación: Radiación de un dipolo oscilante

---

Javier Rodrigo López

## Capítulo 6

# Propagación de ondas electromagnéticas en medios conductores

6.1 Solución para ondas planas

---

6.2 Impedancia e índice de refracción del medio

---

6.3 Propagación de la energía

---

6.4 Polarización

---

Javier Rodrigo López



## Capítulo 7

# Propagación de ondas electromagnéticas en medios conductores

7.1 Densidad de carga libre en el conductor. Carácter transversal

---

7.2 Solución para ondas planas. Magnitudes complejas

---

7.3 Balance energético

---

Javier Rodrigo López

## Capítulo 8

# Reflexión y refracción de ondas electromagnéticas

8.1 Reflexión y refracción en la frontera  
dieléctrico-dieléctrico

---

8.2 Ecuaciones de Fresnel

---

8.3 Coeficientes de reflexión y refracción

---

8.4 Reflexión y refracción en la frontera  
dieléctrico-conductor

---

Javier Rodrigo López

## Capítulo 9

# Ondas guiadas

9.1 Ondas estacionarias producidas por reflexión en la frontera dieléctrico-conductor. Ondas TE y TM

---

9.2 Guía de onda formada por dos planos conductores paralelos

---

9.3 Balance de energía

---

9.4 Guía de onda rectangular

---