

# APUNTES

---

MARCOS ÁVILA NAVAS

*I.E.S. Los Colegiales*

---

# Contents

<b>I</b>	<b>Preambulo</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Sobre este libro</b>	<b>1</b>
1.1	Cómo leer este libro	1
<b>II</b>	<b>Matemáticas</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Preludio</b>	<b>2</b>
2.1	Lógica proposicional de primer orden	2
2.2	Conjuntos	2
2.3	Relaciones	4
2.4	Producto cartesiano	4
2.5	Funciones	5
2.6	Construcción de los números naturales	6
<b>3</b>	<b>Análisis real</b>	<b>7</b>
3.1	Funciones reales	7
3.1.1	En práctica	8
3.2	Límites	8
3.2.1	Álgebra de los reales extendidos	10
3.2.2	En la práctica	10
3.3	Derivadas	10
3.4	Análisis de una función	11
3.4.1	Monotonía	11
3.4.2	Curvatura	12
3.5	Integrales	12
3.5.1	Integración por cambio de variable	12
3.5.2	Integración por partes	13
3.5.3	Integración por fracciones simples	13
3.6	Ejercicios selectividad resueltos	13
<b>4</b>	<b>Estadística y probabilidad</b>	<b>15</b>
4.1	Probabilidad	15
4.2	Estadística	17
4.3	Distribuciones y parámetros	17
4.4	Distribuciones comunes	18

<b>5</b>	<b>Álgebra</b>	<b>19</b>
5.1	De monoide a espacio vectorial	19
5.2	Espacios vectoriales	20
5.2.1	Bases	20
5.2.2	Transformaciones lineales	21
5.2.3	Matrices	21
5.2.4	Operaciones con matrices	22
5.2.5	Tipos de matrices	22
5.2.6	Resultados sobre matrices	23
<b>6</b>	<b>Geometría</b>	<b>24</b>
6.1	Espacios con producto interno	24
6.1.1	Métrica	24
6.2	Ortogonalidad y proyecciones	25
6.3	Bases ortonormales	25
6.4	Geometría analítica	26
6.4.1	Rectas	26
6.4.2	Planos	26
6.5	Isometrías	26
<b>III</b>	<b>Física</b>	<b>26</b>
<b>7</b>	<b>Preludio</b>	<b>27</b>
7.1	Mecánica clásica	27
7.1.1	Momento lineal y angular	27
7.1.2	Energía y trabajo	28
<b>8</b>	<b>Campo gravitatorio</b>	<b>28</b>
8.1	Creado por masas puntuales	28
8.2	Energía asociada al campo gravitatorio	28
8.2.1	Potencial gravitatorio	29
8.3	Campo gravitatorio de los cuerpos celestes	29
8.3.1	Leyes de Kepler	29
<b>9</b>	<b>Campo eléctrico</b>	<b>30</b>
9.1	Creado por cargas puntuales	30
9.2	Energía asociada al campo eléctrico	30
9.2.1	Potencial eléctrico	31
9.3	Flujo eléctrico	31
<b>10</b>	<b>Campo magnético</b>	<b>32</b>
10.1	Sobre una carga en movimiento	32
10.2	Sobre una corriente eléctrica	32
10.3	Creado por una corriente eléctrica	33
10.4	Flujo magnético	33

<b>11 Inducción electromagnética</b>	<b>34</b>
<b>12 Ondas</b>	<b>34</b>
12.1 Movimiento armónico simple	34
12.2 Movimiento ondulatorio	35
12.3 Ondas sonoras	36
<b>13 Óptica</b>	<b>36</b>
13.1 Naturaleza y propagación de la luz	36
13.2 Óptica geométrica	37
13.3 Reflexión de la luz	37
13.4 Refracción de la luz	37
13.5 Sistemas ópticos	38
13.5.1 Espejos	38
13.5.2 Lentes	38
<b>14 Física moderna</b>	<b>38</b>
14.1 Crisis de la física clásica	39
14.2 Cuantización de la energía	39
14.3 Efecto fotoeléctrico	39
14.4 Naturaleza corpuscular de la luz	39
14.5 Dualidad onda-partícula	40
14.6 Principio de incertidumbre	40
<b>15 Física nuclear</b>	<b>40</b>
15.1 Estructura del núcleo atómico	40
15.2 Estabilidad del Núcleo	41
15.3 Radiactividad Natural	41
15.3.1 Núcleos inestables	41
15.3.2 Concepto y tipos de radiactividad natural	41
15.3.3 Leyes del desplazamiento radiactivo	42
15.3.4 Series o familias radiactivas	43
15.4 Cinética de la Desintegración Radiactiva	43
15.4.1 Actividad radiactiva	43
15.4.2 Núclidos en función del tiempo	43
15.4.3 Periodo de semidesintegración	43
15.4.4 Vida media	43
15.5 Radiactividad artificial	44
15.5.1 Mecanismo de la Fisión Nuclear	44
15.5.2 La Energía de la Fisión Nuclear	44
15.5.3 Mecanismo de la Fusión Nuclear	44
15.5.4 Energía de la Fusión Nuclear	44
<b>IV Tecnología</b>	<b>45</b>
<b>16 Preludio</b>	<b>45</b>

<b>17 Materiales y sus propiedades</b>	<b>45</b>
17.1 Propiedades mecánicas de los materiales	45
17.2 Ensayos de propiedades mecánicas	45
17.2.1 De tracción	45
17.2.2 De dureza	46
17.3 De resiliencia	47
<b>18 Máquinas térmicas</b>	<b>47</b>
18.1 Principios fundamentales de termodinámica	47
18.2 Transformaciones termodinámicas en los gases	48
18.2.1 Transformaciones isobáricas (presión constante)	48
18.2.2 Transformaciones isotérmicas (temperatura constante)	48
18.2.3 Transformaciones isocóricas (volumen constante)	49
18.2.4 Transformaciones adiabáticas	49
18.3 Procesos reversibles e irreversibles	49
18.3.1 Motores térmicos y máquinas frigoríficas	50
18.3.2 Ciclo ideal de Carnot	50
18.4 Motores de combustión interna	50
18.4.1 Motores de explosión	51
18.4.2 Motores de diesel	52
18.4.3 Parámetros y magnitudes características	53
18.5 Motores de combustión externa	53
18.5.1 Ciclo de Rankine (Turbina de vapor)	53
18.5.2 Ciclo de Brayton (Turbina de gas)	54
18.6 Bombas de calor	54
18.6.1 Ciclo de refrigeración de Carnot	54
18.6.2 Ciclo de Rankine inverso	55
<b>19 Hidráulica y neumática</b>	<b>56</b>
19.1 Elementos de los circuitos neumáticos	56
19.1.1 Compresores	57
19.1.2 Acondicionadores del aire	57
19.1.3 Actuadores neumáticos	57
19.1.4 Válvulas distribuidoras	58
19.1.5 Otras válvulas	58
19.2 Circuitos prácticos neumáticos	59
19.3 Circuitos hidráulicos	60
19.3.1 Cálculo de parámetros en un circuito	61
<b>V Historia de la Filosofía</b>	<b>62</b>
<b>20 Preludio</b>	<b>62</b>
20.1 Áreas de la filosofía	62
20.1.1 Metafísica	62
20.1.2 Epistemología	62
20.1.3 Ética	62

20.1.4	Política	62
<b>21</b>	<b>Platón</b>	<b>63</b>
21.1	Metafísica	63
21.1.1	Ontología	64
21.1.2	Cosmología	64
21.2	Epistemología	65
21.3	Antropología	66
21.3.1	Alma	66
21.3.2	Cuerpo	66
21.4	Política	67
<b>22</b>	<b>Descartes</b>	<b>69</b>
22.1	Método	69
22.1.1	Operaciones de la mente	70
22.1.2	Reglas del método	70
22.2	Metafísica	70
22.2.1	La Teoría de las Tres Sustancias	71
22.3	Epistemología	71
22.3.1	La Duda Metódica	71
22.3.2	Clasificación de las Ideas	72
22.3.3	Demostraciones de la Existencia de Dios	73
22.4	Antropología	73
22.4.1	El Problema de la Interacción	73
<b>23</b>	<b>Obras</b>	<b>74</b>
23.1		74

---

# Preambulo

## SECTION 1

### Sobre este libro

---

Este libro trata de recoger todos los temas que un estudiante de 2º de bachillerato puede encontrarse en las distintas asignaturas. Las asignaturas tratadas no son exhaustas: solo se recogen **Matemáticas II**, **Física**, **Tecnología**, **Filosofía**, y **Lengua**. Es por tanto dirigido al itinerario tecnológico impartido en muchos centros, pero especialmente al impartido en el I.E.S Los Colegiales.

#### SUBSECTION 1.1

### Cómo leer este libro

---

Este libro intenta da una explicación profunda tal que el estudiante sea capaz de comprender la intuición que lleva al planteamiento de los problemas, el razonamiento tras los distintos resultados, o las conclusiones del autor en cuestión.

Cabe remarcar que el orden de los temas no es casualidad: de tanto en tanto se utilizarán conceptos ya trabajados en partes anteriores, tal que, por ejemplo, para mejor comprender por qué el potencial gravitatorio tiende a 0 en el infinito, el lector será dirigido a la parte donde se trata tales cuestiones.

# Matemáticas

PART

II

SECTION 2

## Preludio

Las áreas de las matemáticas pertinentes a la selectividad son 4: **análisis real, geometría, álgebra, probabilidad y estadística.**

SUBSECTION 2.1

### Lógica proposicional de primer orden

Se dice que las matemáticas son un lenguaje. Como tal, y aunque preferimos el lenguaje natural, y nos limitamos a este para todo lo relevante a la selectividad, es bueno familiarizarse con el lenguaje matemático básico. Aunque existen varios “lenguajes” para las matemáticas, el más fácil, más usado, y el clásico es la “***lógica proposicional de primer orden***”.

En esencia, la lógica proposicional trata de construir “*proposiciones*” utilizando un cierto conjunto de símbolos, los “*conectores lógicos*” y los “*cuantificadores*”. Sin entrar en demasiado detalle, una proposición es una declaración con un valor de verdad (“*Hoy hace sol*”, “*Sócrates es inmortal*”, “*Beethoven el perro fue un gran pianista*”...). Estas declaraciones naturalmente forman otras utilizando “*conectores lógicos*”. Por ejemplo, “*Mañana lloverá y hoy hace sol*” se puede descomponer en dos otras proposiciones, que si ambas son verdad harán la proposición total verdad. Cada conector lógico tiene asociado un símbolo como “ $\wedge$ ” en el caso de “y”.

Los conectores mas comunes son: conjunción (“... y ...”, “ $\wedge$ ”), disyunción (“... o ...”, “ $\vee$ ”), negación (“no ...”, “ $\neg$ ”) e implicación (“... por lo tanto ...”, “ $\implies$ ”).

Por otra parte, también nos interesa hablar de para que cosas algo es verdad. Por ejemplo, “*Cualquier número natural se puede factorizar en números primos*” tiene un sentido de extensión completamente distinto a “*Existen 3 números enteros tal que la suma de los cuadrados de dos sean igual al cuadrado del tercero*”. Hay dos tipos de cuantificadores: universal (“*Cualquier* “ $x$ ”, “...”, “ $\forall x \dots$ ”) y existencial (“*Existe* “ $x$ ” tal que, “...”, “ $\exists x \dots$ ”).

Con esto, podemos adentrarnos un poco en la anatomía de la proposición. Una proposición tiene un “sujeto” (*variables que representan de lo que se está hablando*) y un “predicado” (*lo que se postula que las variables satisfacen*). Se dice que una variable es “libre” cuando aparece en el predicado sin haber sido cuantificada. Típicamente nos interesan proposiciones sin variables libres, ya que es imposible deducir el valor de verdad de “ *$x$  es mortal*” si no sabemos de donde procede  $x$  (es decir, deberíamos añadir “*cualquier humano, llamese  $x$ , para el que ...*” o “*existe un humano, llamese  $x$ , para el que ...*”).

SUBSECTION 2.2

### Conjuntos

En esencia, lo que las matemáticas clásicas<sup>1</sup> son es el estudio de “conjuntos”. Un conjunto se puede pensar intuitivamente como un saco: una agrupación, desordenada, de elementos únicos (es decir, no permitimos elementos repetidos). La notación básica

<sup>1</sup> Existen otras “matemáticas”, por ejemplo la *constructiva*

de un conjunto es separar los elementos por comas y encapsular la enumeración con llaves, por ejemplo:  $\{2, 3, abc, \{\star\}\}$ .

Formalmente, tenemos los axiomas Zermelo–Frankel:

**Definition 1** (ZFC) Llamamos ZFC a los siguientes axiomas:

- **Extensionalidad:** dos conjuntos son iguales si (y solo si) tienen los mismos elementos.

$$X = Y \iff \forall x. (x \in X \iff x \in Y)$$

- **Conjunto vacío:** existe un conjunto sin elementos, denotado  $\emptyset$ .

$$\exists \emptyset. \forall x. x \notin \emptyset$$

- **Par:** dados  $x, y$  existe  $\{x, y\}$ .

$$\forall X, Y. \exists \{X, Y\}. \forall x. (x \in \{X, Y\} \iff x = X \vee x = Y)$$

- **Unión:** dado  $X$  existe  $\bigcup X$ .

$$\forall X. \exists \bigcup X. \forall u. (u \in \bigcup X \iff \exists x. (u \in x \wedge x \in X))$$

- **Comprensión restringida:** se pueden formar subconjuntos definidos por predicados.
- **Reemplazo:** imágenes de funciones definibles son conjuntos.
- **Infinito:** existe un conjunto infinito.
- **Conjunto potencia:** la clase de todos los subconjuntos de un conjunto es un conjunto.
- **Elección:** toda familia de conjuntos no vacíos tiene una función de elección.

No obstante, raramente nos preocupan los específicos de los axiomas. La excepción a esto es el axioma de elección, ya que es equivalente a muchos teoremas cruciales para muchas áreas de las matemáticas (y sin embargo es el axioma más controversial).

Sobre los conjuntos nos interesa fundamentalmente una cuestión: si algo pertenece a él o no. Esto se representa con un predicado el cuál se representa con la notación  $x \in X$  (se puede leer como “ $x$  pertenece a  $X$ ”). Por ejemplo, si  $X = \{2, 3, abc, \{\star\}\}$  entonces  $2 \in X$ , pero no  $\star \in X$ , lo correcto sería  $\{\star\} \in X$ . Uno además puede preguntar si todos los elementos de un conjunto pertenecen a otro, con la notación  $X \subseteq Y$ , definida tal que:

$$X \subseteq Y \iff \forall x \in X, x \in Y$$

*Remark* Aunque por convenio utilizamos mayúsculas para denotar conjuntos y minúsculas para elementos, en realidad, las matemáticas clásicas solo consideran conjuntos. Conque elementos de conjuntos son, a su vez, conjuntos, patrón que se repite hasta terminar con el conjunto vacío cuya existencia es postulada axiomáticamente.

## SUBSECTION 2.3

### Relaciones

Ocurre que en muchos contextos nos gustaría tener un sentido de igualdad un tanto diferente al que hemos postulado en los axiomas ZFC (por ejemplo, identificar un triángulo  $\widehat{ABC}$  a “otro”  $\widehat{BAC}$ ). Toda noción de igualdad debe cumplir:

- **Reflexividad:**  $x = x$ .
- **Simetría:** si  $x = y$  entonces  $y = x$ .
- **Transitividad:** si  $x = y$  e  $y = z$  entonces  $x = z$ .

Estas propiedades definen lo que se conoce como una **relación de equivalencia**.

**Definition 2** Sea  $X$  un conjunto. Una **relación** en  $X$  es un subconjunto  $R \subseteq X \times X$ . Decimos que  $R$  es una **relación de equivalencia** si satisface reflexividad, simetría y transitividad.

Dada una relación de equivalencia  $\sim$  sobre  $X$  y un elemento  $x \in X$ , definimos la **clase de equivalencia** de  $x$  como:

$$[x] := \{y \in X \mid y \sim x\}$$

*Example* Al calcular una *integral* realmente calculamos una clase de equivalencia:

$$\int f(x) \cdot dx = \{F \in \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \mid \frac{d}{dx} F = f\}$$

Dada por la relación de equivalencia:

$$f \sim g \iff \exists C \in \mathbb{R}. f(x) + C = g(x)$$

**Theorem 1** Las clases de equivalencia de una relación de equivalencia  $\sim$  sobre  $X$  forman una partición de  $X$ .

**PROOF** La reflexividad implica que todo elemento pertenece a su propia clase, luego la unión de todas las clases es  $X$ . La simetría y transitividad implican que dos clases o bien son disjuntas o bien coinciden.  $\square$

El conjunto de todas las clases de equivalencia se denota por  $X/\sim$  y se llama el **conjunto cociente**. Este proceso es ubicuo en matemáticas: construcción de los números racionales, reales, espacios topológicos, grupos cociente, etc.

#### SUBSECTION 2.4

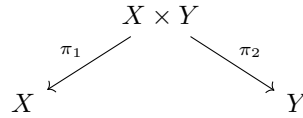
### Producto cartesiano

Dados dos conjuntos  $X$  e  $Y$ , definimos su **producto cartesiano** como:

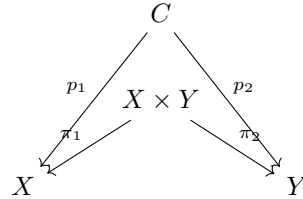
$$X \times Y := \{(x, y) \mid x \in X, y \in Y\}$$

*Remark* Formalmente, un par ordenado  $(x, y)$  se puede definir como el conjunto  $\{\{x\}, \{x, y\}\}$  (per Kuratowski). Esto garantiza que  $(x, y) = (x', y')$  si y solo si  $x = x'$  e  $y = y'$ .

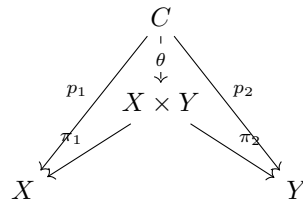
Los productos cartesianos vienen determinados por su **propiedad universal**. Utilizando conceptos de la siguiente sección, escribimos  $\pi_1 : X \times Y \rightarrow X$  para la función que descarta su segundo componente y  $\pi_2 : X \times Y \rightarrow Y$  para la función que descarta su primer componente. Conque tenemos el diagrama:



La propiedad universal del producto cartesiano es la siguiente: para cualquier diagrama de la forma:



Existe una función  $\theta : C \rightarrow X \times Y$  que hace el siguiente diagrama conmutar (es decir,  $p_1 = \pi_1 \circ \theta$  y  $p_2 = \pi_2 \circ \theta$ ):



#### SUBSECTION 2.5

### Funciones

Con todo esto, derivamos el concepto de función. Decimos que  $f : X \rightarrow Y$  es una función del conjunto  $X$  al conjunto  $Y$  a la asociación de cada elemento de  $X$  a un único elemento de  $Y$ . Formalmente:

**Definition 3** (Función) Una función  $f : X \rightarrow Y$  se define via el conjunto  $G_f \subseteq X \times Y$  tal que:

$$\forall x \in X. \exists! f(x) \in Y. (x, f(x)) \in G_f$$

Nótese que  $f(x)$  es solo un símbolo, aunque es trivial de aquí derivar el concepto intuitivo de función que teníamos.

*Example* Por ejemplo, podemos considerar una función  $\chi : X \rightarrow Y$  de  $X = \{2, 3, abc, \{\star\}\}$  a  $Y = \{0, 1\}$  que asocia a los números de  $X$  a 1 y al resto de elementos a 0. Si “tiramos hacia atrás” por la función  $\text{true} : \{\star\} \rightarrow Y$  que manda  $\star \mapsto 1$  obtendremos el subconjunto de  $X$  de los elementos que son números.

La idea tras el anterior ejemplo no será utilizada a este nivel. No obstante, Tanto el mecanismo general (*límites en el sentido de teoría de categorías*) como el ejemplo en sí (*clasificador de subobjetos en el sentido de teoría de topos*) son de extrema importancia para las matemáticas modernas.

De las funciones nos interesa sacar 3 conjuntos:

**Definition 4**

- El **dominio** ( $\text{dom } f$ ): Si  $f : X \rightarrow Y$  es una función,  $\text{dom } f = X$  (es decir, el conjunto sobre el que  $f$  se define).
- El **codominio** ( $\text{cod } f$ ): Si  $f : X \rightarrow Y$  es una función,  $\text{cod } f = Y$  (es decir, el

conjunto al que  $f$  llega).

- La **imagen** ( $\text{im } f$ ): Si  $f : X \rightarrow Y$  es una función,  $\text{im } f = f(X)$  (es decir, el conjunto en  $Y$  que  $f$  produce).

Además, podemos categorizar las funciones en 3 tipos:

**Definition 5** Decimos que:

- $f$  es **inyectiva** si  $\forall x, y \in X. f(x) = f(y) \implies x = y$ .
- $f$  es **sobreyectiva** si  $\forall y \in Y, \exists x \in X. f(x) = y$ .
- $f$  es **biyectiva** si es inyectiva y sobreyectiva.

**Theorem 2** Una función  $f : X \rightarrow Y$  es biyectiva si y solo si existe una función  $f^{-1} : Y \rightarrow X$  tal que:

$$f^{-1} \circ f = \text{id}_X \quad \text{y} \quad f \circ f^{-1} = \text{id}_Y$$

Llamamos a  $f^{-1}$  la **inversa** de  $f$ .

**PROOF** Si  $f$  es biyectiva, definimos  $g(y)$  como el único  $x$  tal que  $f(x) = y$ . La unicidad viene de la inyectividad y la existencia de la sobreyectividad.

El otro sentido es inmediato.  $\square$

En este caso decimos que  $X$  e  $Y$  son **isomorfos como conjuntos** y escribimos  $X \cong Y$ .

#### SUBSECTION 2.6

### Construcción de los números naturales

El axioma del infinito postula precisamente la existencia del conjunto de números naturales. Dicho axioma utiliza la construcción von Neumann para su representación como conjuntos:

$$0 := \emptyset, \quad n + 1 := n \cup \{n\}$$

Así:

$$0 = \emptyset, \quad 1 = \{0\}, \quad 2 = \{0, 1\}, \quad 3 = \{0, 1, 2\}, \dots$$

**Theorem 3** (Inducción) Sea  $P(n)$  una propiedad sobre  $\mathbb{N}$ . Si:

- $P(0)$  es cierta,
- $\forall n, P(n) \implies P(n + 1)$ ,

entonces  $P(n)$  es cierta para todo  $n \in \mathbb{N}$ .

## SECTION 3

## Análisis real

El **análisis real** investiga los números reales, secuencias de estos, y funciones reales (funciones con dominio en  $\mathbb{R}$ ).

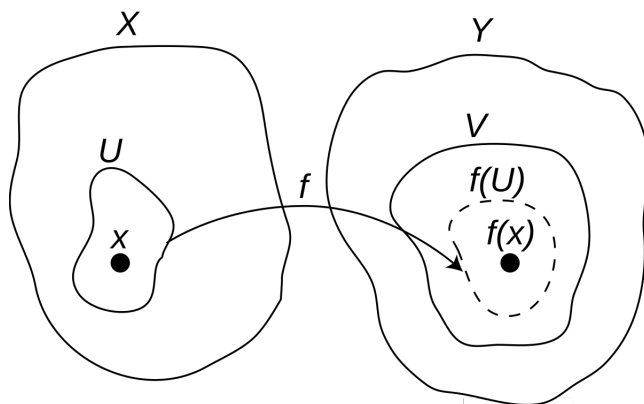
## SUBSECTION 3.1

## Funciones reales

Una función real  $f$  es aquella tal que  $\text{dom } f = X \subseteq \mathbb{R}$ , es decir, cuyo dominio es  $\mathbb{R}$  o un subconjunto de este. Gracias a la estructura (*topológica*)<sup>2</sup> de los números reales, podemos considerar la noción de **continuidad**:

<sup>2</sup> La topología es el estudio de espacios contruidos por conjuntos. En topología  $\mathbb{R}$  se suele considerar como “el espacio de la recta”, “la recta real”

**Definition 6** (Continuidad topológica) Decimos que una función real es continua en  $a$  si a cada intervalo abierto  $V$  que contiene a  $f(a)$  se le corresponde un intervalo abierto  $U$  que contiene a  $a$  tal que  $f(U) \subseteq V$ .



Esta definición no es la estándar (la utilizada en selectividad será definida en la sección sobre límites). Sin embargo, nos da una buena intuición sobre lo que significa continuidad: si pensamos en un intervalo abierto cómo una zona cercana a algún punto, una función continua, según esta definición, es aquella en la que zonas cercanas en el codominio se corresponden a zonas cercanas en el dominio. Dicho de otra manera, si  $x$  está cercano a  $y$  en el dominio,  $f(x)$  está cercano a  $f(y)$  en la imagen.

Por conveniencia, definimos la función  $\text{cont} : (X \rightarrow \mathbb{R}) \rightarrow \mathcal{P}\mathbb{R}$ , que a cada función real asocia el subconjunto  $\text{cont } f \subseteq X$  en el cuál  $f$  es continua.

Además de estas propiedad *topológica*, nos suelen interesar otras propiedades más *algebraicas*, a saber: *simetría* y *periodicidad*.

**Definition 7** (Simetría) Sea  $a \in \mathbb{R}$  y  $f$  una función real, la línea descrita por  $x = a$  en el plano cartesiano se llama *eje de simetría par* del gráfico de una función  $f$  si:

$$\forall x \in \mathbb{R}, f(a+x) = f(a-x)$$

Y se llama *eje de simetría impar* si:

$$\forall x \in \mathbb{R}, f(a+x) = -f(a-x)$$

El caso más común y el que asumimos si no se nos da un eje de simetría es para cuando  $a = 0$ .

**Definition 8** (Periodicidad) Sea  $T \in \mathbb{R}$  y  $f$  una función real, se dice que  $f$  tiene periodo  $T$  si:

$$\forall x \in \mathbb{R}, f(x + T) = f(x)$$

Conque, por inducción, para función con periodo  $T$ :

$$\forall n \in \mathbb{Z}, \forall x \in \mathbb{R}, f(x + nT) = f(x)$$

*Remark* Si  $f$  es periódica de periodo  $T$ , entonces basta estudiar su comportamiento en cualquier intervalo de longitud  $T$ , por ejemplo  $[0, T]$ .

### 3.1.1 En práctica

En la selectividad no es raro un ejercicio que requiera calcular el dominio de una función. Para este fin, debemos identificar el dominio e imagen de todas las funciones con dominios restringidos involucradas y restringir hasta que la imagen de la función que les sirve como argumento caiga en el dominio de estas funciones “problemáticas”. A continuación una tabla con reglas de inferencia para los dominios:

$f(x)$	$\text{dom } f$
$f_1(x) + f_2(x)$	$\text{dom } f_1 \cap \text{dom } f_2$
$f_1(x)f_2(x)$	$\text{dom } f_1 \cap \text{dom } f_2$
$f_1(x)/f_2(x)$	$(\text{dom } f_1 \cap \text{dom } f_2) \setminus \{f_2(x) = 0\}$
$ax^b$	$\mathbb{R}$
$\sqrt[n]{x}$	$[0, +\infty)$
$\sqrt[n+1]{x}$	$\mathbb{R}$
$a^x$	$\mathbb{R}$
$\ln(x)$	$(0, +\infty)$
$ x $	$\mathbb{R}$

SUBSECTION 3.2

## Límites

Los límites son la propiedad característica de los números reales <sup>3</sup>: el salto de los números racionales a los números reales es precisamente requerir que toda secuencia (*Cauchy*) converja. <sup>4</sup>

**Definition 9** (Secuencia) Una secuencia (de números reales) es una función de  $\mathbb{N}$  a  $\mathbb{R}$ . Equivalentemente es una lista ordenada e infinita de números reales.

**Definition 10** (Secuencia Cauchy) Se dice que una secuencia es *Cauchy* cuando los números se acercan arbitrariamente. Si  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$  es una secuencia Cauchy:

$$\forall \epsilon > 0. \exists N \in \mathbb{R}. \forall m, n \geq N. |f(m) - f(n)| < \epsilon$$

Con esta definición a mano, el límite de una función  $f$  cuando tiende a  $a$  es simplemente a lo que converja el aplicarle  $f$  a una secuencia Cauchy que converja a  $a$ :

**Definition 11** (Límite de una función) Se dice que  $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = L$  si:

$$\forall \epsilon > 0, \exists \delta > 0. |a - x| < \delta \rightarrow |L - f(x)| < \epsilon$$

**Theorem 4** (Unicidad del límite) Si  $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = L$  y  $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = M$ , entonces  $L = M$ .

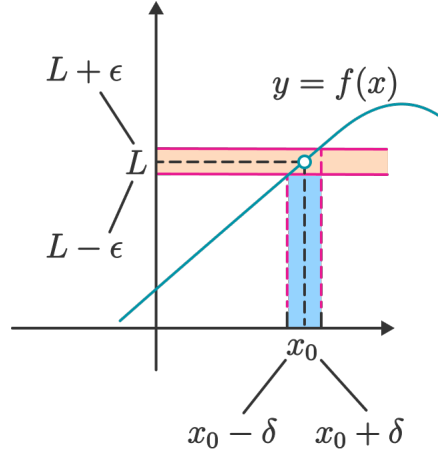
<sup>3</sup> Todo “campo completo ordenado” es isomórfico a  $\mathbb{R}$ .

<sup>4</sup> Estos son los llamados los reales Cauchy, también existen los reales Dedekind. En matemáticas constructivas los reales Dedekind contienen “más números”.

PROOF | Supóngase  $L \neq M$ . Tomando  $\epsilon = |L - M|/2$  se obtiene una contradicción.  $\square$

**Theorem 5** (Caracterización secuencial)  $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = L$  si y solo si para toda sucesión  $(x_n)$  con  $x_n \rightarrow a$  y  $x_n \neq a$ , se tiene  $f(x_n) \rightarrow L$ .

*Remark* Esta equivalencia es específica de espacios métricos de primer numerable como  $\mathbb{R}$ .



En la práctica, hay veces que nos interesa investigar secuencias Cauchy que siempre sean mayores o menores que el número al que convergen:

**Definition 12** (Límites laterales de una función) Se dice que  $\lim_{x \rightarrow a^+} f(x) = L$  (convergencia por la derecha) si:

$$\forall \epsilon > 0, \exists \delta > 0. a < x < a + \delta \rightarrow |L - f(x)| < \epsilon$$

Dualmente, se dice que  $\lim_{x \rightarrow a^-} f(x) = L$  (convergencia por la izquierda) si:

$$\forall \epsilon > 0, \exists \delta > 0. a - \delta < x < a \rightarrow |L - f(x)| < \epsilon$$

También no son pocas las ocasiones donde nos interesa considerar el comportamiento de una función para números “cada vez más grandes”:

**Definition 13** (Límites al infinito) Se dice que  $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = L$  si:

$$\forall \epsilon > 0. \exists N \in \mathbb{R}. x > N \rightarrow |f(x) - L| < \epsilon$$

Dualmente, se dice que  $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = L$  si:

$$\forall \epsilon > 0. \exists N \in \mathbb{R}. x < N \rightarrow |f(x) - L| < \epsilon$$

Todas estas definiciones serán unificadas para la resolución de problemas en lo que podemos llamar *el álgebra de los reales extendidos* ( $\bar{\mathbb{R}}$ ).

Finalmente, cabe replantear la definición de continuidad utilizando límites, ya que esta es la utilizada en la selectividad:

**Definition 14** (Continuidad) Decimos que una función real es continua en  $a$  si:

$$\lim_{x \rightarrow a^-} f(x) = f(a) = \lim_{x \rightarrow a^+} f(x)$$

**Theorem 6** Si  $f : X \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  es continua en  $a$  en el sentido  $\epsilon$ - $\delta$ , entonces es continua en  $a$  en el sentido topológico, y viceversa.

**PROOF** En  $\mathbb{R}$  los abiertos son uniones de intervalos abiertos. Traducir un entorno abierto en una condición  $\epsilon$ - $\delta$  es trivial.  $\square$

### 3.2.1 Álgebra de los reales extendidos

Empezamos definiendo el conjunto sobre el cual definiremos las operaciones aptas para el cálculo de límites:

**Definition 15** (Los reales extendidos) Llámese  $\bar{\mathbb{R}}$  o “reales extendidos” al conjunto:

$$\bar{\mathbb{R}} = \mathbb{R} \cup \{+\infty, -\infty, \text{“Indet.”}, \text{“No existe.”}\}$$

Estos dos últimos valores no vienen en la construcción clásica de los **reales extendidos**, son valores que añadimos ya que nuestra construcción de  $\bar{\mathbb{R}}$  va orientada al cálculo de límites.

Para describir el álgebra que nos interesa sobre el anterior conjunto, basta con definir cómo participen los nuevos símbolos, y es que no modificamos las operaciones sobre los números reales. Para este fin, basta con decir que los símbolos de infinito operan como uno esperaría ( $k + (\pm\infty) = \pm\infty$ ,  $k(\pm\infty) = \pm\infty \dots$ ). Los únicos casos donde la anterior intuición falla son en los casos “indeterminados”. Dichos casos son:  $\frac{\infty}{\infty}$ ,  $\frac{0}{0}$ ,  $0 \cdot \infty$ ,  $\infty - \infty$ ,  $1^\infty$ ,  $0^0$ ,  $0^\infty$ . Para lo que la selectividad concierne, solo nos interesan los 4 primeros casos.

Por último, el símbolo “No existe” viene a funcionar como un indicador de la divergencia de lo que se está intentando calcular. Por ejemplo  $\cos(+\infty) = \text{“No existe”}$ .

### 3.2.2 En la práctica

Falta por explicar cómo pasar del cálculo de un límite a operar en el álgebra anteriormente descrito. Para lo cuál es suficiente decir que si se tiene  $\lim x \rightarrow \alpha f(x)$ , donde  $\alpha$  es o un real o un infinito, basta con sustituir  $\alpha$  por  $x$  en  $f(x)$  y operar siguiendo las reglas ya dichas. Si el resultado de operar es otra cosa que no sea “Indet.”, hemos terminado. En caso de un “Indet.”, debemos trabajar  $f(x)$  hasta conseguir una expresión que al sustituir nos de el resultado deseado.

Una técnica que suele funcionar es transformar todos los casos en  $\frac{0}{0}$  o  $\frac{\infty}{\infty}$ . Para  $0 \cdot \infty$  la transformación es directa ( $0 \cdot \infty = \frac{1}{\infty} \cdot \infty = \frac{\infty}{\infty}$ ). Para  $\infty - \infty$  uno suele multiplicar y dividir por el conjugado de la expresión. Una vez en uno de estos dos casos, suele ser posible sacar factor común tanto en el denominador como en el numerador o se puede aplicar *L'Hopital*, a ser explicado en la siguiente sección.

#### SUBSECTION 3.3

### Derivadas

En muchas situaciones nos interesa conocer la tasa de variación de una función en un intervalo, para lo cuál, tenemos la siguiente definición:

**Definition 16** (Tasa de Variación Media, TVM) La *Tasa de Variación Media* de una función real  $f$  en el intervalo  $[a, b]$  se define como:

$$TVM_a^b f := \frac{f(b) - f(a)}{b - a}$$

Ocurre que, asimismo, es interesante investigar cuando  $[a, b]$  “es un punto”. Es decir, cuando  $a$  y  $b$  estén arbitrariamente cerca, que es lo mismo que  $b = \lim_{h \rightarrow 0} a + h$ . Siguiendo esta intuición, llegamos al concepto de *derivada*:

**Definition 17** (Derivada en un punto y función derivada) Sea  $f$  una función real. La *derivada de  $f$  en  $x$*  se define por:

$$f'(x) := \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h}$$

Nótese que  $f'(x)$  es sólo un símbolo. No obstante es posible definir la *función derivada*, que a cada  $x \in \text{cont } f$  asocia a su correspondiente  $f'(x)$ .

Definimos  $\text{der} : (X \rightarrow \mathbb{R}) \rightarrow \mathcal{P}\mathbb{R}$  de manera similar a  $\text{cont}$ .

**Remark** Es posible que  $f$  no sea derivable en un punto pero si sea continua (por ejemplo,  $f(x) = |x|$  para  $x = 0$ ). En general, por tanto,  $x \in \text{der } f \rightarrow x \in \text{cont } f$ , pero la converso es falsa.

En general:

**Theorem 7** Si  $f$  es derivable en  $a$ , entonces es continua en  $a$ .

**PROOF** Escribimos:

$$f(x) = f(a) + (x - a) \frac{f(x) - f(a)}{x - a}$$

y tomamos límite cuando  $x \rightarrow a$ .  $\square$

La función derivada  $f'$  de otra, al ser una función real, puede asimismo ser derivada indefinidamente. Resultando en lo que llamamos la  *$n$ -ésima derivada de  $f$* .<sup>5</sup>

Las nociones anteriores también son útiles para el cálculo de límites gracias a la *regla de L'Hopital*:

**Theorem 8** (Regla de L'Hopital) Sean  $f$  y  $g$  funciones reales para las que  $\lim_{x \rightarrow \alpha} \frac{f(x)}{g(x)}$  sea  $0$  o  $\infty$ . Se cumple que:

$$\lim_{x \rightarrow \alpha} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow \alpha} \frac{f'(x)}{g'(x)}$$

<sup>5</sup> Una función  $\infty$ -derivable se denomina suave.

#### SUBSECTION 3.4

### Análisis de una función

Podemos utilizar los conceptos anteriores como herramientas para investigar el comportamiento de una función *localmente*.

#### 3.4.1 Monotonía

La monotonía concierne a los intervalos de la función donde se tiene un mismo signo de cambio. Es decir, donde crece y decrece la función. Para este fin, por cada tramo continuo de nuestra función, investigamos el signo de  $f'(x)$  para  $x$  en dicho tramo. Que  $f'(x) > 0$  significa que la función tiene tendencia a crecer cerca de  $x$ , y lo opuesto es verdad si  $f'(x) < 0$ . Cuando  $f'(x) = 0$  estamos ante un *punto crítico*, punto donde la función cambia de signo de cambio.

En resumen:

**Theorem 9** Sea  $f$  continua en  $[a, b]$  y derivable en  $(a, b)$ .

- Si  $f'(x) \geq 0$  en  $(a, b)$ , entonces  $f$  es creciente.

- Si  $f'(x) \leq 0$  en  $(a, b)$ , entonces  $f$  es decreciente.

### 3.4.2 Curvatura

La curvatura concierne a los intervalos de la función donde la gráfica de la tangente se encuentra en una misma posición relativa a la gráfica de la función (a saber: por arriba o por debajo).

**Definition 18**

Decimos que  $f$  es cóncava hacia arriba en un intervalo si  $f''(x) > 0$ , y cóncava hacia abajo si  $f''(x) < 0$ . Un punto donde  $f''(x) = 0$  y cambia de signo se llama punto de inflexión.

Los mismos principios de monotonía aplican a curvatura, ya que estudiar la curvatura de  $f$  es equivalente a estudiar la monotonía de  $f'$ .

SUBSECTION 3.5

## Integrales

En ciertas circunstancias podemos agregar información local de un espacio en un proceso que llamamos *integración*. Para funciones reales, podemos definir la llamada *integración de Riemann*. Conceptualmente, la integral de Riemann  $(\int_a^b f(x)dx)$  calcula una “media” de los valores de  $f(x)$ ,  $x \in [a, b]$ .

Ocurre que la integración y la derivación son procesos inversos:

**Theorem 10**

(Teorema fundamental del cálculo) Sea  $f$  una función real y  $C$  un número real, llamado “*constante de derivación*”. Entonces:

$$\frac{d}{dx} \left( \int f(x)dx + C \right) = f(x)$$

De la misma manera que buscar una función inversa a otra no es trivial, buscar una *primitiva*<sup>6</sup>, es decir, integrar una función, suele requerir utilizar ciertas técnicas falibles (conque no es un proceso mecánico como la diferenciación).

El teorema anterior es una instancia del teorema más general de Stokes.

<sup>6</sup> una función real  $F$  es una antiderivada, o primitiva, de otra  $f$  si la derivada de  $F$  es  $f$

**Theorem 11**

(Teorema de Stokes) Sea  $X$  una *variedad diferencial*,  $\omega : X$  una *forma diferencial*, y  $\sigma$  un *símplice suave*. Entonces:

$$\int_{\partial\sigma} \omega = \int_{\sigma} d\omega$$

Tomando  $X = [a, b]$  y el canónico 1-símplice suave  $\sigma : \Delta^1 \rightarrow [a, b]$  recuperamos el teorema fundamental del cálculo.

### 3.5.1 Integración por cambio de variable

**Theorem 12**

(Cambio de variable) Sea  $t = \Phi(x)$  una substitución y  $f$  una función real integrable. Para una integral en términos de  $x$ , entonces:

$$\int f(x) \cdot dx = \int f(\Phi^{-1}(t)) \cdot \frac{dt}{\Phi'(\Phi^{-1}(t))}$$

### 3.5.2 Integración por partes

**Theorem 13** (Por partes) Sea  $f$  una función real integrable tal ue  $f(x) = u(x)v'(x)$ . Se cumple que:

$$\int f(x) \cdot dx = u(x)v(x) - \int v(x)u'(x)dx$$

*Remark* Podemos recordar el anterior resultado con la expresión  $\int u dv = uv - \int v du$  a la cuál le asociamos la regla memotécnica: “Un día vi una vaca sin rabo vestida de uniforme”.

### 3.5.3 Integración por fracciones simples

**Theorem 14** (Fracciones simples) Sea  $f$  una función racional para la cuál el grado del denominador  $n$  sea mayor a la del numerador y sean  $r_1 \dots r_n$  las raíces del denominador, podemos descomponer  $f$  tal que:

$$f(x) = \frac{P(x)}{Q(x)} = \sum_{i=1} \frac{A_i}{(x - r_i)^\alpha}$$

Donde  $A_1 \dots A_n$  son coeficientes reales y  $\alpha$  es la multiplicidad de la raíz  $r_i$ .

Conque podemos integrar funciones racionales como aquella descomposición.

SUBSECTION 3.6

## Ejercicios selectividad resueltos

1. **Madrid. Ordinaria 2025. Pregunta 2:** Un muro rectangular de la biblioteca pública del barrio se va a pintar con la ayuda de unos grafiteros. La dimensión del muro es de 3 metros de alto y 12 metros de largo. Colocando la esquina inferior izquierda del muro en el origen de coordenadas, se va a utilizar la curva

$$f(x) = \cos\left(\frac{\pi x}{9}\right) + 2$$

para diferenciar dos regiones del muro que serán pintadas con dos colores distintos. Se sabe que con un bote de spray se pueden pintar 3 metros cuadrados de superficie.

- (a) (0.75 puntos) Halle el valor máximo y el valor mínimo de la función  $f(x)$  en el intervalo  $[0, 12]$ . ¿Está la curva en este intervalo  $[0, 12]$  contenida completamente en el muro?
- (b) (1.25 puntos) Halle el área que tienen que pintar de cada color.
- (c) (0.5 puntos) Cuántos botes de spray se tienen que comprar como mínimo para pintar toda el área bajo la curva  $f(x)$ ?

**PROOF** Por el teorema de Weierstrass, basta con estudiar los extremos del dominio y los máximos relativos para determinar los máximos y mínimos. Para este fin, nótese que  $f$  se define cómo una composición de funciones derivables, por lo que es derivable (asimismo continua). Por lo cuál, derivamos:

$$\frac{d}{dx}f = \frac{d}{dx} \cos\left(\frac{\pi x}{9}\right) + 2 = -\frac{\pi}{9} \sin\left(\frac{\pi x}{9}\right)$$

A continuación, averiguamos los puntos críticos:

$$f'(x) = 0; \quad -\frac{\pi}{9} \sin\left(\frac{\pi x}{9}\right) = 0; \quad \frac{\pi x}{9} = n\pi; \quad x = 9n \quad \text{donde } n \in \mathbb{Z}$$

En concreto, en nuestro dominio encontramos dos puntos críticos, cuando  $n = 0$  y  $n = 1$ .

Desde este punto, basta con ordenar los valores de los puntos que nos interesan y tomar el mayor y el menor:

$$f(0) = 3 > f(12) = 1.5 > f(9) > 1$$

Por tanto, el valor máximo y mínimo de  $f$  es 3 y 1 cuando  $x = 0$  y  $x = 9$  respectivamente. Ya que  $3, 1 \in [0, 3]$  y que  $f$  es continua,  $f$  es contenida completamente en el muro.  $\square$

PROOF Para calcular el área de cada color, integramos y utilizamos la geometría rectangular del gráfico para derivar una área de otra:

$$A_1 = \int_0^{12} f(x)dx = \int_0^{12} \cos\left(\frac{\pi x}{9}\right) + 2dx = \left[\frac{9}{\pi} \sin\left(\frac{\pi x}{9}\right) + 2x\right]_0^{12} \approx 21.51m$$

$$A_T = A_1 + A_2; A_2 = A_T - A_1 = bh - A_1 \approx 14.48m$$

$\square$

PROOF Averiguamos la cantidad de botes utilizando que un bote puede pintar hasta 3 metros cuadrados de superficie:

$$n_{\text{botes}} = \lceil \frac{A_1}{\text{area}\backslash\text{bote}} \rceil = 8 \text{ botes}$$

$\square$

## SECTION 4

## Estadística y probabilidad

La **estadística y probabilidad** estudia modelos matemáticos que exhiben una falta de información o *aleatoriedad*.

## SUBSECTION 4.1

### Probabilidad

**Definition 19** ( $\sigma$ -álgebra) Dado un conjunto  $\Omega$ , una  $\sigma$ -álgebra es una colección de subconjuntos de  $\Omega$  cerrada ante complementación, y unión e intersección de familias contables.

Conque un elemento de una  $\sigma$ -álgebra  $\mathcal{F}$  podría ser visto como un *suceso*: Si pasan sucesos  $A, B \in \mathcal{F}$ , siempre podremos preguntar cuando pasa  $A$  y  $B$  ( $A \cap B$ ),  $A$  o  $B$  ( $A \cup B$ ), y cuando no pasa  $A$  ( $\bar{A}$ ).

**Definition 20** (Espacio de probabilidad) Un espacio de probabilidad es un triple  $(\Omega, \mathcal{F}, p)$  donde  $\mathcal{F}$  es una  $\sigma$ -álgebra sobre  $\Omega$  y  $p : \mathcal{F} \rightarrow [0, 1]$  es la función de probabilidad, que satisface los *axiomas de Kolmogorov*:

1.

$$p(\Omega) = 1$$

2.

$$\forall (A_1 \dots A_n \in \mathcal{F}, A_i \cup A_j = \emptyset \implies i = j). p\left(\bigcup_i^n A_i\right) = \sum_i^n p(A_i)$$

A partir de los axiomas de Kolmogorov y los axiomas de las matemáticas clásicas <sup>7</sup> se deducen inmediatamente propiedades fundamentales.

<sup>7</sup> La ley del tercero excluido es equivalente a que todo subconjunto tenga un complemento

**Theorem 15** Sea  $(\Omega, \mathcal{F}, p)$  un espacio de probabilidad. Entonces:

1.  $p(\emptyset) = 0$ ,
2. si  $A \subseteq B$ , entonces  $p(A) \leq p(B)$ ,
3.  $p(\bar{A}) = 1 - p(A)$ ,
4.  $p(A \cup B) = p(A) + p(B) - p(A \cap B)$ .

PROOF | Todas se deducen usando la aditividad finita y las leyes de De Morgan.  $\square$

Un espacio de probabilidades  $\Omega$  puede ser “restringido” a un subconjunto  $B$  (dentro de su  $\sigma$ -álgebra): para cualquier otro suceso  $A$ , la intersección entre ambos  $A \cap B$  da el espacio de posibilidades que suceda  $A$  impuesta la condición  $B$ . Así, la medida de esto dividida entre  $p(B)$  (para que  $B$  “ocupe todo el volumen”) da lo que llamamos **probabilidad condicional**.

**Definition 21** (Probabilidad condicional) Sea  $A, B \in \mathcal{F}$  con  $p(B) > 0$ . Definimos la probabilidad de  $A$  condicionada por  $B$  como:

$$p(A | B) := \frac{p(A \cap B)}{p(B)}$$

*Remark* Intuitivamente,  $p(B)p(A | B) = p(A \cap B)$  es una especie de *modus ponens*.

**Definition 22** (Independencia) Dos sucesos  $A, B \in \mathcal{F}$  son independientes si:

$$p(A \cap B) = p(A)p(B)$$

Equivalentemente:

$$p(A | B) = p(A)$$

*Example* En el lanzamiento de dos monedas justas, el suceso “cara en la primera” es independiente del suceso “cara en la segunda”.  
No obstante, dada una serie de resultados, no podemos deducir la independencia de dos sucesos por este tipo de razonamiento externo en general.

A continuación una definición intuitiva:

**Definition 23** (Compatibilidad) Dos sucesos  $A, B \in \mathcal{F}$  son compatibles si:

$$p(A \cup B) = 0$$

Equivalentemente:

$$p(A | B) = 0$$

En muchos contextos consideramos sistemas que nos permitan descomponer otros sucesos en casos más simples. En el caso de la probabilidad:

**Definition 24** (Sistema completo de sucesos) Un sistema completo de sucesos  $\{A_i \in \mathcal{F}\}$  es una familia de sucesos que además cumple que sus sucesos son incompatibles dos a dos y que la unión de la familia es el espacio muestral.

La descomposición viene dada por el siguiente teorema:

**Theorem 16** (Teorema de la probabilidad total) Dado un sistema completo de sucesos  $\{A_i \in \mathcal{F}\}$ , y cualquier otro suceso  $B \in \mathcal{F}$ , se cumple que:

$$p(B) = \sum_i p(A_i)p(B | A_i)$$

**PROOF** Nótese que, despejando,  $p(B | A)p(A) = p(A \cap B)$ . Entonces:

$$p(B) = p(B \cap \Omega) = p(B \cap \bigcup_i A_i) = p(\bigcup_i B \cap A_i) = \sum_i p(B \cap A_i) = \sum_i p(A_i)p(B | A_i)$$

Utilizando tanto la distribución de la intersección sobre la unión, como el hecho de que cada  $B \cap A_i$  es incompatible dos a dos.  $\square$

Todo esto nos da el fundamento detrás de la *epistemología Bayesiana*, la cuál tiene su culmen en el siguiente teorema:

**Theorem 17** (Teorema de Bayes) Si  $p(B) > 0$ , entonces:

$$p(A | B) = \frac{p(B | A)p(A)}{p(B)}$$

PROOF Nótese que, despejando,  $p(B | A)p(A) = p(A \cap B)$ . Entonces:

$$p(A | B) := \frac{p(A \cap B)}{p(B)} = \frac{p(B | A)p(A)}{p(B)}$$

□

La importancia de este teorema está en su aplicación: la probabilidad de que una hipótesis  $A$  sea cierta dados unos hechos  $B$  se puede actualizar utilizando la probabilidad anterior de la hipótesis.

SUBSECTION 4.2

## Estadística

Ha resultado conveniente estudiar funciones sobre el espacio de probabilidad a algún espacio medible como  $\mathbb{R}$ .

**Definition 25** (Variable aleatoria) Una variable aleatoria es una función medible:

$$X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$$

Cuando  $\text{im}(X)$  es hablamos de una variable aleatoria *discreta* y *continua* en caso contrario.

*Example* Ejemplos de variables aleatorias incluyen la suma de valores de lanzar  $n$  veces un dado  $\Sigma : \mathbf{6}^n \rightarrow \mathbb{R}$  (discreta) y el tiempo que tarda un autobus en llegar  $t : [0, +\infty) \rightarrow \mathbb{R}$ .

SUBSECTION 4.3

## Distribuciones y parámetros

(...)

**Definition 26** (Distribuciones) Sea  $X$  una variable aleatoria. Definimos la función de probabilidad como la probabilidad del *retroceso de  $i$* :  $\{x\} \hookrightarrow \mathbb{R}$  por la variable  $X$ :

$$f(x) = p(X = x) = p(\{x\} \times_{\mathbb{R}} \Omega)$$

. Asimismo, definimos la **distribución** (en el caso discreto) o de **densidad** (en el caso continuo) como la acumulación de valores menores a uno dado:

$$F(x) = \sum_i^x f(x_i) \quad \text{o} \quad F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) \cdot dx$$

(...)

**Definition 27** (Parámetros) Sea  $X$  una variable aleatoria discreta e  $Y$  una continua. Definimos:

- La **esperanza** de  $X$  como:

$$\mu := \sum_x x p(X = x)$$

y la de  $Y$  como:

$$\mu := \int_{-\infty}^{+\infty} x p(Y = y) \cdot dy$$

- La **varianza** de  $X$  como:

$$\sigma^2 := \sum_x (x - \mu)^2 p(X = x)$$

y la de  $Y$  como:

$$\sigma^2 := \int_{-\infty}^{+\infty} (y - \mu)^2 p(Y = y) \cdot dy$$

- La **desviación típica** como:

$$\sigma := \sqrt{\sigma^2}$$

## SUBSECTION 4.4

## Distribuciones comunes

(...)

**Definition 28** (Distribución binomial) Una variable aleatoria  $X$  sigue una distribución binomial  $B(n, p)$  si:

$$p(X = k) = \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n-k}$$

*Example* | Número de caras al lanzar  $n$  monedas justas.

(...)

**Definition 29** (Distribución normal) Una variable aleatoria continua  $X$  sigue una distribución normal  $N(\mu, \sigma)$  si tiene densidad:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

*Remark* Dicha distribución aparece como límite universal en muchos procesos aleatorios.

En ocasiones conviene aproximar una distribución binomial por una normal. Esto es posible gracias a los siguientes teoremas:

**Theorem 18** (Ley de los grandes números débil) Sea  $(X_n)$  una sucesión de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas con esperanza finita  $\mu$ . Entonces:

$$\forall \epsilon > 0, \lim_{n \rightarrow +\infty} p(|\overline{X_n} - \mu| < \epsilon) = 1$$

donde  $\overline{X_n}$  es el promedio de las variables.

**Theorem 19** (Teorema central del límite) Bajo las mismas hipótesis, la suma normalizada:

$$\frac{\sum_{i=1}^n X_i - n\mu}{\sqrt{n\sigma^2}}$$

converge en distribución a una normal estándar.

Con esto, una binomial  $B(n, p)$  se aproxima por una de  $N(\mu = np, \sigma = \sqrt{np(1-p)})$ . Y una probabilidad de la binomial se aproxima por la normal utilizando *aproximación por Yates*.

## SECTION 5

## Álgebra

## SUBSECTION 5.1

## De monoide a espacio vectorial

El álgebra, en definitiva, es la manipulación de símbolos de manera sintética y abstracta. En álgebra equipamos a conjuntos con ciertas operaciones que cumplen ciertas propiedades. La estructura más simple que se le puede dar a un conjunto es un **magma**, no obstante dicha estructura no aparece tanto como los monoides:

**Definition 30** (Monoide) Sea  $\mathcal{M}$  un conjunto. Un *monoide* es un triple  $(\mathcal{M}, \cdot, \epsilon)$  donde  $\cdot : \mathcal{M} \times \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}$  es una función y  $\epsilon \in \mathcal{M}$  es el *elemento neutro*, es decir:

$$\forall a \in \mathcal{M}, a \cdot \epsilon = \epsilon \cdot a = a$$

*Example* (Monoides) Monoides ya encontramos muchos naturalmente en matemáticas:

- $(\mathbb{N}, +, 0)$ : los números naturales con la suma.
- $(\mathbb{Z}_{\geq 0}, \times, 1)$ : números naturales incluyendo el 0 con la multiplicación.
- $(\text{End}(X), \circ, 1_X)$ : el conjunto de endomorfismos de un conjunto  $X$  con composición de funciones.
- $(\mathcal{P}(X), \cup, \emptyset)$ : el conjunto de subconjuntos de  $X$  con unión.

**Definition 31** (Grupos) Sea  $\mathcal{G}$  un conjunto. Un *grupo* es un monoide para el que:

$$\forall x \in \mathcal{G}, \exists x^{-1} \in \mathcal{G}. x \cdot x^{-1} = x^{-1} \cdot x = \epsilon$$

Llamamos a dicho  $x^{-1}$  la inversa de  $x$ .

Si es verdad que  $\forall x, y \in \mathcal{G}. x \cdot y = y \cdot x$  llamamos al grupo *abeliano*.

*Example* (Grupos) Los grupos son otro objeto matemático estudiado extensamente. Ejemplos de grupos:

- $(\mathbb{Z}, +, 0)$ : enteros con suma, grupo abeliano.
- $(\mathbb{R}^*, \times, 1)$ : reales distintos de cero con multiplicación.
- $S_n$  con composición: el grupo simétrico de permutaciones de  $n$  elementos.
- $(\mathbb{C}, +, 0)$ : números complejos con suma.

**Definition 32** (Anillos) Sea  $\mathfrak{R}$  un conjunto. Un anillo es un grupo abeliano  $(\mathcal{G}, +, 0)$  junto con un monoide  $(\mathcal{G}, \cdot, 1)$  tal que la *multiplicación sea distributiva sobre la suma*:

$$\forall a, b, c \in \mathfrak{R}, a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c$$

y

$$\forall a, b, c \in \mathfrak{R}, (b + c) \cdot a = b \cdot a + c \cdot a$$

Técnicamente, lo anterior es un *anillo unitario*. Cuando ocurre que el monoide de la multiplicación es, además, un grupo, entonces tenemos un *cuerpo*.

*Example* (Anillos) El ejemplo de anillo canónico es el conjunto de funciones sobre algún espacio a algún otro anillo. Ejemplos de anillos:

- $(\mathbb{Z}, +, \cdot)$ : enteros con suma y multiplicación.
- $(\mathbb{R}[x], +, \cdot)$ : polinomios reales.
- $(\mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R}), +, \cdot)$ : matrices cuadradas con suma y multiplicación usual.

*Example* (Cuerpos) Ejemplos de cuerpos:

- $(\mathbb{Q}, +, \cdot)$ : números racionales.
- $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ : números reales.
- $(\mathbb{C}, +, \cdot)$ : números complejos.
- $\mathbb{F}_p$  con  $p$  primo: cuerpo finito con operaciones módulo  $p$ .

**Definition 33** (Modulo sobre un anillo) Un modulo  $V$  sobre un anillo  $\mathfrak{R}$  es un monoide abeliano equipado con una acción  $\cdot : \mathfrak{R} \times V \rightarrow V$  compatible con la estructura de anillo de  $\mathfrak{R}$ :

$$\forall r, s \in \mathfrak{R}, \forall v \in V, (r + s) \cdot v = r \cdot v + s \cdot v$$

$$\forall r \in \mathfrak{R}, \forall v, w \in V, r \cdot (v + w) = r \cdot v + r \cdot w$$

$$\forall r, s \in \mathfrak{R}, \forall v \in V, (r \cdot s) \cdot v = r \cdot (v \cdot s)$$

$$\forall v \in V, 1 \cdot v = v$$

Cuando  $\mathfrak{R}$  es además un cuerpo,  $V$  es un *espacio vectorial*.

*Example* (Módulos) Ejemplos de módulos:

- $\mathbb{Z}^n$  como módulo sobre  $\mathbb{Z}$ .
- $\mathbb{R}^n$  como espacio vectorial sobre  $\mathbb{R}$ .
- $\mathbb{C}^n$  como espacio vectorial sobre  $\mathbb{C}$ .
- El conjunto de polinomios  $\mathbb{R}[x]$  como módulo sobre  $\mathbb{R}$ .

SUBSECTION 5.2

## Espacios vectoriales

### 5.2.1 Bases

Una base es un subconjunto del espacio vectorial que genera al resto de elementos. Asumiendo el axioma de la elección <sup>8</sup> todo espacio vectorial tiene una base. Antes de definir formalmente una base, debemos ser precisos con que significa que “generen” el espacio vectorial:

<sup>8</sup> <https://ncatlab.org/nlab/show/axiom+of+choice>

**Definition 34** (Combinación lineal) Sea  $V$  un espacio vectorial sobre un cuerpo  $k$  y  $U \subseteq V$  un subconjunto. Definimos el conjunto  $\text{span } U \subseteq V$  como:

$$\text{span } U := \left\{ \sum_{a_i \in k, \vec{v}_i \in U} a_i \vec{v}_i \right\}$$

Decimos que un elemento de  $\text{span } U$  es una combinación lineal de  $U$ .

Asimismo, una base  $B \subseteq V$  debería de ser un subconjunto mínimo con la propiedad de que  $\text{span } B = V$ :

**Definition 35** (Independencia lineal) Sea  $V$  un espacio vectorial sobre un cuerpo  $k$  y  $U \subseteq V$  un subconjunto finito. Decimos que  $U$  es linealmente independiente si:

$$\sum_{a_i \in k, \vec{v}_i \in U} a_i \vec{v}_i = 0 \Rightarrow a_i = 0$$

En total:

**Definition 36** (Base) Sea  $V$  un espacio vectorial sobre un cuerpo  $k$  y  $B \subseteq V$  un subconjunto (posiblemente infinito). Decimos que  $B$  es una base para  $V$  si  $\text{span } B = V$  y si cualquier subconjunto finito de  $B$  es linealmente independiente.

Es un teorema que cualquier base para un mismo espacio vectorial tiene una misma cardinalidad. Así, si aceptamos que todo espacio vectorial tiene una base, podemos definir una noción de dimensión del espacio de manera sencilla:

**Definition 37** (Dimensión) La cardinalidad  $\kappa$  de una base es la dimensión de un espacio vectorial.

### 5.2.2 Transformaciones lineales

Una transformación lineal es un  $k$ -homomorfismo entre espacios vectoriales, esto es:

**Definition 38** (Transformación lineal) Sea  $V, W$  espacios vectoriales sobre el mismo cuerpo  $k$ . Una función  $T : V \rightarrow W$  es una transformación lineal si:

$$1. \quad \forall a \in k, \forall \vec{v} \in V, T(a\vec{v}) = aT(\vec{v})$$

$$2. \quad \forall \vec{v}, \vec{w} \in V, T(\vec{v} + \vec{w}) = T(\vec{v}) + T(\vec{w})$$

equivalentemente,

$$\forall a \in k, \forall \vec{v}, \vec{w} \in V, T(a\vec{v} + \vec{w}) = aT(\vec{v}) + T(\vec{w})$$

### 5.2.3 Matrices

Toda transformación lineal es equivalentemente una *matríz*:

**Definition 39** (Matriz  $n \times m$ ) Una matríz (real, compleja...)  $n \times m$  donde  $n, m$  son cardinales (típicamente finitos) es una función  $n \times m \rightarrow \mathbb{R}(\mathbb{C}, \mathbb{Q} \dots)$ . No obstante, “matríz” implica que debemos representar dicha función como una tabla de  $n$  filas y  $m$  columnas cuyas entradas son valores en el objeto algebraico apropiado (los reales, por ejemplo):

$$A = (a_{ij}) = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nm} \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{n \times m}$$

La correspondencia entre matriz y transformación lineal viene dada por el hecho de que una transformación lineal sea esencialmente determinada por su acción en una alguna base de su dominio. Así, cada columna de la matriz es el resultado de aplicar la transformación a un elemento de la base. Dicho lo cuál, es fácil derivar los cálculos asociados a aplicar una transformación a un elemento utilizando matrices (*multiplicación matriz-vector*) y otras operaciones como composición de matrices (*multiplicación matriz-matriz*).

Estudiar transformaciones lineales por medio de matrices hace más claro y computacional lo que prosigue. Además, el concepto de matriz escapa el de transformación lineal, siendo una manera útil de representar distintos fenómenos.

*Remark* Cómo luz de esto, la notación  $\mathcal{M}_{n \times m}$  es más fácilmente entendida cuando se entiende alguna matriz  $T \in \mathcal{M}_{n \times m}$  como una transformación  $T : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ . Así, es evidente que si  $T$  ha de representar una transformación siendo sus columnas los vectores base cuyo span forma la imagen de  $T$   $m$  ha de ser el número de columnas y  $n$  de filas.

#### 5.2.4 Operaciones con matrices

**Definition 40** (Suma de matrices) Sean  $A, B \in \mathcal{M}_{n \times m}$  matrices sobre un cuerpo  $k$ . Definimos la suma de matrices como la suma punto a punto, esto es:

$$A + B = \begin{pmatrix} a_{11} + b_{11} & \dots & a_{1m} + b_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} + b_{n1} & \dots & a_{nm} + b_{nm} \end{pmatrix}$$

**Definition 41** (Multiplicación de matrices) Sean  $A \in \mathcal{M}_{n \times m}$  y  $B \in \mathcal{M}_{m \times r}$  matrices sobre un cuerpo  $k$ . Definimos la multiplicación de matrices como la composición de las transformaciones lineales que representan.

#### 5.2.5 Tipos de matrices

**Definition 42** (Matriz cuadrada) Una matriz  $A \in \mathcal{M}_{n \times n}$  tiene igual número de filas y columnas.

**Definition 43** (Matriz diagonal) Una matriz cuadrada  $A = (a_{ij})$  es diagonal si  $a_{ij} = 0$  para todo  $i \neq j$ .

**Definition 44** (Matriz identidad) La matriz identidad  $I_n$  es diagonal con todos los elementos de la diagonal iguales a 1.

**Definition 45** (Matriz nula) Una matriz  $A$  es nula si  $a_{ij} = 0$  para todo  $i, j$ .

**Definition 46** (Matriz triangular) •  $A$  es triangular superior si  $a_{ij} = 0$  para todo  $i > j$ .  
•  $A$  es triangular inferior si  $a_{ij} = 0$  para todo  $i < j$ .

**Definition 47** (Matriz simétrica y antisimétrica) •  $A$  es simétrica si  $A^T = A$ .  
•  $A$  es antisimétrica si  $A^T = -A$ .

**Definition 48** (Matriz invertible) Una matriz  $A$  es invertible si existe  $B$  tal que  $AB = BA = I_n$ .

## 5.2.6 Resultados sobre matrices

**Theorem 20** (Determinante de matriz triangular) Sea  $A$  triangular (superior o inferior). Entonces:

$$\det(A) = \prod_{i=1}^n a_{ii}$$

**Theorem 21** (Invertibilidad y determinante) Una matriz cuadrada  $A$  es invertible si y sólo si  $\det(A) \neq 0$ .

**Theorem 22** (Producto de matrices) Sean  $A, B \in \mathcal{M}_{n \times n}$ . Entonces:

$$\det(AB) = \det(A) \det(B) \quad \text{y} \quad (AB)^T = B^T A^T$$

**Theorem 23** (Regla de Cramer) Sea  $Ax = b$  un sistema lineal con  $A$  invertible. Entonces, para cada  $i$ :

$$x_i = \frac{\det(A_i)}{\det(A)}$$

donde  $A_i$  es  $A$  reemplazando la columna  $i$  por  $b$ .

**Theorem 24** (Teorema espectral para matrices simétricas) Sea  $A$  simétrica real. Entonces  $A$  es diagonalizable por una matriz ortogonal  $P$ :

$$P^T A P = D$$

donde  $D$  es diagonal con los valores propios de  $A$ .

## SECTION 6

## Geometría

## SUBSECTION 6.1

## Espacios con producto interno

Un espacio con producto interno es un espacio vectorial con una noción de “geometría”. El producto interno es una operación que nos permite medir la longitud de vectores y ángulos entre vectores.

**Definition 49** (Espacio con producto interno) Un espacio con producto interno  $V$  sobre  $k$  es un espacio vectorial equipado con un producto interno  $\langle -, - \rangle : V \times V \rightarrow k$ :

1.

$$\forall \vec{v}, \vec{w} \in V, \langle \vec{v}, \vec{w} \rangle = \langle \vec{w}, \vec{v} \rangle$$

2.

$$\forall a, b \in k, \forall \vec{x}, \vec{y}, \vec{w} \in V, \langle a\vec{x} + b\vec{y}, \vec{w} \rangle = a\langle \vec{x}, \vec{w} \rangle + b\langle \vec{y}, \vec{w} \rangle$$

3.

$$\forall \vec{v} \in V, \langle \vec{v}, \vec{v} \rangle \geq 0$$

4.

$$\forall \vec{v} \in V, \langle \vec{v}, \vec{v} \rangle = 0 \iff \vec{v} = \vec{0}$$

## 6.1.1 Métrica

El producto interno induce de manera natural una noción de longitud.

**Definition 50** (Norma inducida) Sea  $V$  un espacio con producto interno. Definimos la *norma*  $\| - \| : V \rightarrow k^+$  de un vector  $\vec{v} \in V$  como:

$$\|\vec{v}\| := \sqrt{\langle \vec{v}, \vec{v} \rangle}$$

**Theorem 25** La norma satisface:

1.

$$\forall \vec{v} \in V. \|\vec{v}\| = 0 \iff \vec{v} = \vec{0}$$

2.

$$\forall a \in k. \forall \vec{v} \in V. \|a\vec{v}\| = |a|\|\vec{v}\|$$

3.

$$\forall \vec{v}, \vec{w} \in V. \|\vec{v} + \vec{w}\| \leq \|\vec{v}\| + \|\vec{w}\|$$

.

**PROOF** Las dos primeras proposiciones son mero cómputo.

La tercera propiedad se deduce de la desigualdad de Cauchy–Schwarz.  $\square$

**Theorem 26** (Desigualdad de Cauchy–Schwarz) Para todo  $\vec{v}, \vec{w} \in V$ :

$$|\langle \vec{v}, \vec{w} \rangle| \leq \|\vec{v}\| \cdot \|\vec{w}\|$$

PROOF | Se considera  $\langle \vec{v} - t\vec{w}, \vec{v} - t\vec{w} \rangle \geq 0$  y se estudia como polinomio en  $t$ . □

A partir de la norma se define una noción de distancia.

**Definition 51** (Distancia) Definimos la distancia entre dos vectores como:

$$d(\vec{v}, \vec{w}) := \|\vec{v} - \vec{w}\|$$

Finalmente, podemos definir ángulos entre vectores tal que:

**Definition 52** (Ángulo entre vectores) Para  $\vec{v}, \vec{w} \neq \vec{0}$  definimos el ángulo  $\theta$  entre ellos por:

$$\theta = \arccos\left(\frac{\langle \vec{v}, \vec{w} \rangle}{\|\vec{v}\| \|\vec{w}\|}\right)$$

## SUBSECTION 6.2

### Ortogonalidad y proyecciones

**Definition 53** (Ortogonalidad) Dos vectores  $\vec{v}, \vec{w}$  son *ortogonales* si:

$$\langle \vec{v}, \vec{w} \rangle = 0$$

*Example* | En  $\mathbb{R}^2$  con el producto escalar usual,

$$\vec{v} = (1, 0), \quad \vec{w} = (0, 1)$$

son ortogonales.

**Definition 54** (Proyección ortogonal) Sea  $\vec{u} \neq \vec{0}$ . La proyección ortogonal de  $\vec{v}$  sobre  $\vec{u}$  es:

$$\text{proj}_{\vec{u}}(\vec{v}) := \frac{\langle \vec{v}, \vec{u} \rangle}{\langle \vec{u}, \vec{u} \rangle} \vec{u}$$

*Remark* | Esta operación es fundamental en mínimos cuadrados y aparece implícitamente en el análisis de errores experimentales.

## SUBSECTION 6.3

### Bases ortonormales

**Definition 55** (Base ortonormal) Una base  $B = \{\vec{e}_i\}$  es *ortonormal* si:

$$\langle \vec{e}_i, \vec{e}_j \rangle = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

**Theorem 27** (Proceso de Gram–Schmidt) Sea  $(\vec{v}_1, \dots, \vec{v}_n)$  una familia linealmente independiente. Entonces existe una base ortonormal  $(\vec{e}_1, \dots, \vec{e}_n)$  que genera el mismo subespacio.

PROOF | Se define inductivamente:

$$\vec{u}_k := \vec{v}_k - \sum_{i=1}^{k-1} \text{proj}_{\vec{e}_i}(\vec{v}_k), \quad \vec{e}_k := \frac{\vec{u}_k}{\|\vec{u}_k\|}$$

## Geometría analítica

En  $\mathbb{R}^n$ , la geometría se puede describir mediante ecuaciones que “esculpen” subespacios dentro de  $\mathbb{R}^n$ .

### 6.4.1 Rectas

**Definition 56** (Recta vectorial) Una recta que pasa por  $\vec{p}$  con dirección  $\vec{v} \neq 0$  es:

$$r(t) = \vec{p} + t\vec{v}$$

**Theorem 28** Dos rectas son paralelas si y solo si sus vectores directores son linealmente dependientes.

### 6.4.2 Planos

**Definition 57** (Plano) Un plano en  $\mathbb{R}^3$  puede describirse como:

$$\langle \vec{n}, \vec{x} - \vec{p} \rangle = 0$$

donde  $\vec{n}$  es un vector normal.

**Theorem 29** La distancia de un punto  $\vec{x}$  a un plano es:

$$d = \frac{|\langle \vec{n}, \vec{x} - \vec{p} \rangle|}{\|\vec{n}\|}$$

## Isometrías

**Definition 58** (Isometría) Una transformación lineal  $T : V \rightarrow V$  es una isometría si:

$$\langle T(\vec{v}), T(\vec{w}) \rangle = \langle \vec{v}, \vec{w} \rangle$$

*Example* | Rotaciones y reflexiones en  $\mathbb{R}^2$  y  $\mathbb{R}^3$ .

**Theorem 30** Una matriz representa una isometría si y solo si es ortogonal:

$$A^T A = I$$

*Remark* El conjunto de matrices ortogonales forma un grupo de especial importancia para la física,  $O(n)$ .

# Física

## Preludio

Las áreas de la física pertinentes a la selectividad son ...: **Campo gravitatorio, campo eléctrico y campo magnético, ...**

## SUBSECTION 7.1

**Mecánica clásica**

El campo gravitatorio es un campo vectorial en la mecánica clásica <sup>9</sup>, y utilizamos los tres *versores* estándar:  $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ .

<sup>9</sup> en la teoría de relatividad general es un **campo tensorial**

Dentro del campo gravitatorio todas las fuerzas son atractivas y son resultantes de la masa de los objetos, que aproximamos cómo partículas puntuales.

**7.1.1 Momento lineal y angular**

**Definition 59** (Momento Lineal) El momento lineal  $\vec{p}$  es una magnitud vectorial que representa la inercia de un cuerpo, su resistencia a cambiar su estado de movimiento.

$$\vec{p} := m\vec{v}$$

**Theorem 31** (Variación del momento lineal) La variación del momento lineal es precisamente la fuerza responsable del movimiento.

PROOF

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a} = \vec{F}$$

□

En un movimiento curvilíneo,  $\vec{p}$  cambia continuamente, lo cuál lo explicamos con una nueva magnitud:

**Definition 60** (Momento Angular) El momento angular  $\vec{L}$  caracteriza las propiedades de inercia de un cuerpo que gira respecto a un punto.

$$\vec{L} := \vec{r} \times \vec{p}$$

En un movimiento circular podemos simplificar la definición de la magnitud del momento angular, ya que:

$$L = rp \sin \alpha = rp \sin 90 = rp = rmv$$

**Definition 61** (Fuerza central) Fuerza central es aquella cuya dirección es siempre a un punto fijo y cuya magnitud solo depende de la distancia a ese punto.

**Theorem 32** (Conservación del momento angular) Para un cuerpo sometido a fuerzas centrales la variación del momento se anula.

PROOF

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{v} \times m\vec{v} + \vec{r} \times (m\vec{a}) = \vec{r} \times \vec{F}$$

Si ni  $\vec{r} = 0$  ni  $\vec{F} = 0$ , entonces  $\vec{r} \times \vec{F} = 0$  implica que  $\vec{r}$  y  $\vec{F}$  son paralelos (definición de fuerza central). □

### 7.1.2 Energía y trabajo

**Definition 62** (Trabajo) El trabajo se define de la siguiente forma:

$$W = \int_i^f \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

**Definition 63** (Energía y energía mecánica) Capacidad que tiene un cuerpo para realizar trabajo. La energía mecánica es aquella asociada al movimiento:

- **Energía cinética:** Energía que tiene un cuerpo en virtud a su velocidad:

$$W = \int_i^f \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int_i^f m\vec{a} \cdot d\vec{r} = \int_i^f m \frac{d\vec{v}}{dt} \cdot d\vec{r} = \int_i^f m\vec{v} \cdot d\vec{v} = \frac{1}{2}m [v^2]_i^f = \Delta E_C$$

$$\implies E_C = \frac{1}{2}mv^2$$

- **Energía potencial:** Energía que tiene un cuerpo en virtud a su posición en un campo conservativo:

$$W = -\Delta E_P$$

La suma de estas dos anteriores es la **energía mecánica**:

$$E_M = E_C + E_P$$

## SECTION 8

# Campo gravitatorio

## SUBSECTION 8.1

### Creado por masas puntuales

**Definition 64** (Fuerza gravitacional) Fuerza resultante de las perturbaciones del campo gravitatorio.

$$\vec{F}_g = -G \frac{Mm}{r^2} \hat{u}_r$$

**Definition 65** (Intensidad del campo gravitatorio) Fuerza resultante por el campo gravitatorio por unidad de masa.

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}_g}{m} = -G \frac{M}{r^2} \hat{u}_r$$

*Remark* El principio de superposición aplica:

$$\vec{g}_T = \sum_i \vec{g}_i = -G \sum_i \frac{M_i}{r_i^2} \hat{u}_{ri}$$

## SUBSECTION 8.2

### Energía asociada al campo gravitatorio

El campo gravitatorio es uno conservativo, por tanto:

$$W = \int_i^f \vec{F}_g \cdot d\vec{r} = \int_i^f -G \frac{Mm}{r^2} \hat{u}_r \cdot d\vec{r} = \int_i^f -G \frac{Mm}{r^2} dr = -GMm \left[ \frac{-1}{r} \right]_i^f = -\Delta E_P$$

$$\Rightarrow E_P = -G \frac{Mm}{r}$$

### 8.2.1 Potencial gravitatorio

Considerar lo que hace una unidad de masa en el campo, así creando un “espacio de gravedad”, nos lleva al concepto de potencial gravitatorio:

**Definition 66**

(Potencial gravitatorio) Trabajo necesario para llevar una unidad de masa hasta el infinito a velocidad constante:

$$V = E_{P\infty} - E_P = G \frac{M}{r}$$

Es fácil conectar la definición y la intuición considerando la expresión  $Vm$ .

SUBSECTION 8.3

## Campo gravitatorio de los cuerpos celestes

El campo gravitatorio tal y cómo lo hemos presentado puede utilizarse para operar con cuerpos celestes (aproximadamente).

Para este fin, solemos igualar la fuerza centrípeta y la fuerza gravitatoria y desarrollar hasta tener una expresión en términos de los datos dados.

*Remark* La velocidad que obtenemos de esta manera es la orbital:

$$\vec{F}_C = \vec{F}_G; F_C = F_G; m \frac{v_o^2}{r} = G \frac{Mm}{r^2}; v_o = \sqrt{G \frac{M}{r}}$$

El cálculo de la velocidad de escape, por ejemplo, se hace utilizando la ley de la conservación de la energía:

$$\Delta E_M \geq 0; \Delta E_C + \Delta E_P \geq 0; \frac{1}{2}mv_e^2 - G \frac{Mm}{r} \geq 0; v_e \geq \sqrt{2G \frac{M}{r}}$$

Asimismo podemos proceder de la manera presentada para el cálculo de algún parametro para la transición entre órbitas.

### 8.3.1 Leyes de Kepler

- **Primera ley:** Todos los planetas se mueven alrededor del Sol siguiendo órbitas elípticas, y el Sol está en uno de los focos de la elipse.
- **Segunda ley:** Los cuerpos celestes se mueven con una velocidad areolar constante. Es decir, un mismo tiempo barre una misma área en cualquier punto de la órbita ( $\frac{dA}{dt} = cte.$ )
- **Tercera ley:** Para todos los cuerpos celestes orbitando alrededor del mismo cuerpo, se cumple que:

$$\frac{T_1^2}{a_1^3} = cte. = \frac{T_2^2}{a_2^3}$$

El punto más alejado de una órbita elíptica es el afelio y el más cercano es el perihelio.

## SECTION 9

## Campo eléctrico

El campo eléctrico ( $\vec{E}$ ) es uno de los dos campos que resultan cuando se fija unas coordenadas espacio-tiempo para el electromagnetismo.<sup>10</sup> A este asociamos dos ecuaciones de Maxwell<sup>11</sup>:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \iff \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0} \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \iff \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{a}\end{aligned}$$

El campo eléctrico es un campo vectorial al igual que el campo gravitatorio, que pertene a las interacción resultadas por la propiedad conocida como *carga eléctrica*.

## SUBSECTION 9.1

### Creado por cargas puntuales

**Definition 67** (Fuerza Eléctrica, Ley de Coulomb) La fuerza eléctrica es la resultante de las perturbaciones del campo electroestático.

$$\vec{F}_e = K \frac{Qq}{r^2} \cdot \hat{u}_r$$

*Remark* Si se fija una dirección, es fácil ver que:

- **Si  $Q$  y  $q$  tienen mismo signo:** Entonces  $Qq > 0$  por lo que  $F_e > 0$  (repulsión).
- **Si  $Q$  y  $q$  tienen distinto signo:** Entonces  $Qq < 0$  por lo que  $F_e < 0$  (atracción).

Por lo que se justifica la regla “similares se repelen y opuestos se atraen”.

**Definition 68** (Intensidad eléctrica) Fuerza resultante por el campo electroestático por unidad de carga.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q} = K \frac{Q}{r^2}$$

*Remark* Nótese que si  $Q > 0$  entonces  $\vec{E}$  y  $\hat{u}_r$  tendrán el mismo sentido mientras que si  $Q < 0$  entonces  $\vec{E}$  y  $\hat{u}_r$  tendrán sentidos opuestos (demostración trivial).

*Remark* También es importante remarcar que el principio de superposición aplica:

$$\vec{E}_T = \sum_i \vec{E}_i = K \sum_i \frac{Q_i}{r_i^2} \cdot \hat{u}_{ri}$$

## SUBSECTION 9.2

### Energía asociada al campo eléctrico

En la situación descrita, podemos llegar a una forma cerrada para el trabajo dentro del campo electroestático:

$$W = \int_i^f \vec{F}_e \cdot d\vec{r} = \int_i^f K \frac{Qq}{r^2} \hat{u}_r \cdot d\vec{r} = \int_i^f K \frac{Qq}{r^2} dr = KQq \left[ \frac{-1}{r} \right]_i^f$$

<sup>10</sup> Más sobre en esto en ncatlab

<sup>11</sup> Las ecuaciones de Maxwell son la síntesis de nuestro conocimiento sobre electromagnetismo

**Definition 69** (Energía potencial eléctrica) La energía potencial eléctrica se define en virtud a que el campo electrostático es conservativo:

$$W_c = -\Delta E_P \quad \text{ó} \quad E_P = K \frac{Qq}{r}$$

Intuitivamente, la energía potencial eléctrica es comparable a la gravitacional solo que cargas positivas “suben el terreno” mientras que cargas negativas lo bajan. De la misma manera que con los campos gravitatorios, es fructífero considerar energía potencial por unidad de carga (A ser explicado a continuación).

### 9.2.1 Potencial eléctrico

**Definition 70** (Potencial eléctrico) Trabajo necesario para llevar una unidad de carga hasta el infinito a velocidad constante:

$$V = E_{P\infty} - E_P = K \frac{Q}{r}$$

*Remark* Si se fija una dirección, es fácil ver que si  $Q$  y  $q$  tienen mismo signo ( $Qq > 0$ )

- **Si**  $r_f > r_i$  (se aleja): Entonces  $W = -\Delta E_P = -q\Delta V > 0$  (movimiento espontáneo).
- **Si**  $r_f < r_i$  (se aleja): Entonces  $W = -\Delta E_P = -q\Delta V < 0$  (se necesita suplir una fuerza).

Mientras que lo contrario es cierto si  $Q$  y  $q$  tienen distinto signo.

#### SUBSECTION 9.3

### Flujo eléctrico

Cuando uno considera una cierta superficie y considera la cantidad de campo eléctrico que fluye através de dicha superficie, uno esta pensando en el flujo eléctrico  $\Phi_E$ . Este concepto nos permite formular una ley equivalente a la de Coulomb un tanto más útil en ciertas circunstancias, la *ley de Gauss*.

El flujo eléctrico en una parte infinitesimal de una superficie debe ser el producto del componente perpendicular del campo eléctrico (la parte que sale o entra) con el vector superficie. Es decir:

$$d\Phi_E = \vec{B} \cdot d\vec{S} = BS \cos \theta$$

Lo cuál implica la definición de flujo eléctrico:

**Definition 71** (Flujo eléctrico) Para una superficie  $\vec{S}$  y un campo eléctrico  $\vec{E}$ , el flujo eléctrico se define tal que:

$$\Phi_E := \int \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

#### SECTION 10

### Campo magnético

El campo magnético ( $\vec{B}$ ) es uno de los dos campos que resultan cuando se fija unas coordenadas espacio-tiempo para el electromagnetismo. A diferencia que el campo eléctrico, el campo magnético no tiene una *unidad activa*, con lo que debe existir un *polo norte* y un *polo sur* para que dicha interacción tenga lugar. Las cargas eléctricas, las estudiadas en el apartado anterior, también serán influida por el campo magnético, siempre y cuando se encuentren en movimiento. Conversamente, el movimiento de cuerpos cargados eléctricamente produce un campo magnético.

A este campo le corresponden las otras dos ecuaciones de Maxwell:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{B} = 0 &\iff \oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \\ \nabla \times \vec{B} = -\mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} &\iff \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = -\mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \int \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\end{aligned}$$

#### SUBSECTION 10.1

### Sobre una carga en movimiento

Experimentalmente se descubrió que cargas en movimiento producen un campo magnético. Puesto que es así, la **Ley de Lorentz** viene a determinar el valor de la fuerza magnética sobre una carga en movimiento:

#### Theorem 33

(Ley de Lorentz) La fuerza magnética ( $F_B$ ) es perpendicular al campo magnético y al movimiento. Además depende de la carga del cuerpo, su velocidad, y la intensidad del campo magnético:

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

En caso de coexistir con un campo eléctrico, la Ley de Lorentz además implica:

$$\vec{F}_{EM} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Recordamos que para realizar el producto vectorial es conveniente utilizar la regla de la mano derecha.

#### Remark

La Ley de Lorentz sugiere que esta fuerza siempre será perpendicular al movimiento (dicho de otra manera, siempre será **centrípeta**). Por mecánica, dicha fuerza nunca alterará el módulo de la velocidad, y únicamente afectará a la trayectoria.

La unidad del campo magnético son los *Teslas*:

$$\vec{B} : T = \frac{1N}{1C \cdot 1\frac{m}{s}}$$

Cabe destacar que un tesla raramente se da en la naturaleza (los imanes permanentes están comprendidos entre  $0.01T$  y  $0.5T$ ).

#### SUBSECTION 10.2

### Sobre una corriente eléctrica

Una corriente eléctrica no es más que el flujo de cargas. Consecuentemente, se verá afectado por el campo magnético. La expresión que determina dicha interacción es conocida como la *Primera Ley de Laplace*.

Primero observamos que una carga circula a través de su conductor tal que:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{l}}{dt}$$

A continuación, demostramos que intensidad por diferencial de longitud es lo mismo que velocidad por diferencial de carga:

$$I := \frac{dq}{dt}; \quad Id\vec{l} = \frac{dq}{dt}d\vec{l} = dq \cdot d\vec{l}$$

Con todo esto, concluimos la Primera Ley de Laplace:

$$d\vec{F} = dq(\vec{v} \times \vec{B}) = (\vec{v}dq) \times \vec{B} = Id\vec{l} \times \vec{B}$$

Para lo que segundo de bachillerato corresponde, tanto  $B$  como  $I$  serán constantes. Con lo que llegamos a la fórmula aplicable en la selectividad:

$$d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B}; \quad \vec{F} = \int Id\vec{l} \times \vec{B} = I \left( \int d\vec{l} \right) \times \vec{B} = I\vec{l} \times \vec{B}$$

### SUBSECTION 10.3

## Creado por una corriente eléctrica

Experimentalmente, Biot y Savart concluyeron que el campo magnético elemental ( $d\vec{B}$ ) creado por un elemento de corriente ( $Id\vec{l}$ ) en un punto, cuya posición respecto al elemento de corriente viene dado por  $\vec{r}$ , es:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \hat{u}_r}{r^2}$$

Donde  $\mu_0$  es una constante para el vacío.

El que el conductor sea finito y rectilíneo implica que podemos operar la anterior expresión y llegar a una expresión concisa y aplicable a la selectividad:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r}$$

Además podemos utilizar la otra regla de la mano derecha para determinar la orientación del campo magnético en estas circunstancias.

*Remark* Puede darse el caso donde debemos considerar de dos conductores rectilíneos paralelos el campo que generan uno sobre otro. Para lo cual con basta aplicar las reglas ya mencionadas en ambos conductores desde el conductor recíproco. Debe cumplirse que el que ambos conductores se atraigan implica que el flujo por ambos conductores tenga el mismo sentido y lo opuesto cuando los conductores se repelan.

### SUBSECTION 10.4

## Flujo magnético

El flujo magnético  $\Phi_B$  se define de la misma manera que el flujo eléctrico, es decir:

**Definition 72** (Flujo magnético) Para una superficie  $\vec{S}$  y un campo magnético  $\vec{B}$ , el flujo magnético se define tal que:  

$$\Phi_B := \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

## SECTION 11

## Inducción electromagnética

El cambio de un flujo magnético *induce* una fuerza electromotriz sobre la superficie dada. Esto se deduce desde la Ley de Inducción de Faraday:

**Theorem 34** (Fuerza electromagnetica) La fuerza electromotriz, definida tal que:

$$\mathcal{E} := \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

puede ser expresada equivalentemente con la expresión:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

## PROOF

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &:= \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} \\ &= \int_S (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{A} && \text{Teorema de Stokes} \\ &= - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A} && \text{Ley de inducción de Faraday} \\ &=: -\frac{d\Phi_B}{dt} && \text{Definición de flujo magnético} \end{aligned}$$

□

*Remark* El signo negativo de la expresión de la fuerza electromagnética es explicado por la *Ley de Lenz*. Dicha ley establece que el sentido del campo magnético inducido se opone a la causa que lo produce.

## SECTION 12

## Ondas

Una onda, intuitivamente, es la alteración armónica de alguna propiedad a lo largo del espacio o del tiempo.

## SUBSECTION 12.1

### Movimiento armónico simple

El ejemplo más sencillo de onda es el movimiento armónico simple (MAS).

**Definition 73** (Movimiento armónico simple) Un Movimiento Armónico Simple es un movimiento periódico en el que la fuerza (o aceleración) es directamente proporcional al desplazamiento respecto a la posición de equilibrio y de sentido contrario:

1.

$$F(x) = -kx$$

2.

$$a(x) = -\omega^2 x$$

*Remark* Es fácil demostrar que, para una amplitud  $A$ , una velocidad angular  $\omega$ , y un desfase  $\phi$ :

- La **posición** en un MAS en un tiempo  $t$  es:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \phi)$$

- La **velocidad**:

$$v(t) = A\omega \cos(\omega t + \phi)$$

- La **aceleración**:

$$x(t) = -A\omega^2 \sin(\omega t + \phi)$$

Un movimiento armónico simple se define por las siguientes magnitudes:

- **Amplitud**  $A$ : valor máximo del desplazamiento respecto a la posición de equilibrio.
- **Periodo**  $T$ : tiempo necesario para completar una oscilación.
- **Frecuencia**  $f$ : número de oscilaciones por unidad de tiempo, relacionada con el periodo mediante

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

- **Frecuencia angular**  $\omega$ , definida como

$$\omega = 2\pi f$$

*Example* (Sistemas que realizan MAS) Son ejemplos clásicos de movimiento armónico simple:

1. Un sistema masa-muelle, cuya frecuencia angular viene dada por:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

siendo  $k$  la constante elástica del muelle y  $m$  la masa.

2. Un péndulo simple para pequeñas oscilaciones, con:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{\ell}}$$

donde  $\ell$  es la longitud del péndulo y  $g$  la aceleración de la gravedad.

SUBSECTION 12.2

## Movimiento ondulatorio

**Definition 74** (Onda) Una onda es la propagación de una perturbación que transporta energía a través del espacio sin transporte neto de materia.

Dada una onda armónica, se definen:

- **Longitud de onda**  $\lambda$ : distancia mínima entre dos puntos que oscilan en fase.
- **Periodo**  $T$  y **frecuencia**  $f$ , con la relación  $f = 1/T$ .
- **Velocidad de propagación**  $v$ , que satisface:

$$v = \lambda f$$

**Definition 75** (Ecuación de una onda armónica) La expresión matemática de una onda armónica que se propaga en el sentido positivo del eje  $x$  es:

$$y(x, t) = A \sin(\omega t - kx + \phi)$$

donde el número de onda  $k$  viene dado por:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

#### SUBSECTION 12.3

### Ondas sonoras

**Definition 76** (Onda sonora) El sonido es una onda mecánica longitudinal producida por variaciones de presión que se propaga únicamente en medios materiales.

*Remark* La velocidad de propagación del sonido depende del medio. En el aire, a temperatura ambiente, su valor aproximado es:

$$v \approx 343 \text{ m s}^{-1}$$

**Definition 77** (Efecto Doppler) El efecto Doppler es la variación aparente de la frecuencia de una onda percibida por un observador cuando existe movimiento relativo entre la fuente emisora y el observador.

**Theorem 35** (Efecto Doppler para ondas sonoras) Si  $v$  es la velocidad de propagación del sonido,  $v_o$  la velocidad del observador y  $v_s$  la de la fuente, la frecuencia observada viene dada por:

$$f' = f \frac{v \pm v_o}{v \mp v_s}$$

donde los signos se eligen según si el movimiento es de acercamiento o alejamiento.

#### SECTION 13

### Óptica

La óptica es la rama de la física que estudia el comportamiento y las propiedades de la luz, así como su interacción con la materia.

#### SUBSECTION 13.1

### Naturaleza y propagación de la luz

**Definition 78** (Luz) La luz es una radiación electromagnética capaz de propagarse tanto en el vacío como en medios materiales, caracterizada por una velocidad finita y constante en el vacío.

*Remark* En el vacío, la velocidad de la luz tiene el valor

$$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

**Definition 79** (Índice de refracción) El índice de refracción  $n$  de un medio se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y su velocidad en dicho medio:

$$n = \frac{c}{v}$$

## SUBSECTION 13.2

## Óptica geométrica

---

Cuando las dimensiones características de los obstáculos son mucho mayores que la longitud de onda de la luz, esta puede describirse mediante rayos, dando lugar a la óptica geométrica.

**Definition 80** (Principios de la óptica geométrica) La óptica geométrica se fundamenta en los siguientes principios:

1. La luz se propaga en línea recta en medios homogéneos.
2. Los rayos luminosos son independientes entre sí.
3. El camino seguido por la luz es reversible.

## SUBSECTION 13.3

## Reflexión de la luz

---

**Definition 81** (Reflexión) La reflexión es el fenómeno por el cual la luz, al incidir sobre una superficie, regresa al medio del que procede.

**Theorem 36** (Leyes de la reflexión) En un fenómeno de reflexión se verifican las siguientes leyes:

1. El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal a la superficie pertenecen al mismo plano.
2. El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión:

$$\theta_i = \theta_r$$

## SUBSECTION 13.4

## Refracción de la luz

---

**Definition 82** (Refracción) La refracción es el cambio de dirección y velocidad que experimenta la luz al pasar de un medio a otro con distinto índice de refracción.

**Theorem 37** (Ley de Snell) Si un rayo de luz pasa de un medio de índice  $n_1$  a otro de índice  $n_2$ , los ángulos de incidencia y refracción verifican:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

**Definition 83** (Ángulo límite) Se denomina ángulo límite  $\theta_L$  al ángulo de incidencia para el cual el ángulo de refracción es  $90^\circ$ , cumpliéndose:

$$\sin \theta_L = \frac{n_2}{n_1}, \quad n_1 > n_2$$

*Remark* Para ángulos de incidencia mayores que el ángulo límite se produce el fenómeno de reflexión total.

#### SUBSECTION 13.5

### Sistemas ópticos

#### 13.5.1 Espejos

**Definition 84** (Espejos esféricos) Un espejo esférico es una superficie reflectante que forma parte de una esfera. Puede ser cóncavo o convexo según la orientación de su superficie reflectante.

**Theorem 38** (Ecuación fundamental de los espejos) Para un espejo esférico se cumple la relación:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

donde  $f$  es la distancia focal,  $s$  la distancia del objeto y  $s'$  la distancia de la imagen.

#### 13.5.2 Lentes

**Definition 85** (Lentes delgadas) Una lente delgada es un sistema óptico transparente limitado por dos superficies, capaz de desviar los rayos luminosos por refracción.

**Theorem 39** (Ecuación de las lentes delgadas) En una lente delgada se verifica la ecuación:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'}$$

**Definition 86** (Aumento lateral) El aumento lateral  $A$  de una lente o espejo se define como el cociente entre el tamaño de la imagen y el del objeto:

$$A = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$

#### SECTION 14

### Física moderna

La física moderna surge a comienzos del siglo XX para dar explicación a fenómenos que no podían ser descritos adecuadamente por la física clásica, introduciendo una nueva concepción de la energía, la radiación y la materia.

#### SUBSECTION 14.1

### Crisis de la física clásica

*Remark* A finales del siglo XIX se pusieron de manifiesto diversas discrepancias entre los resultados experimentales y las predicciones de la física clásica, especialmente en el estudio de la radiación electromagnética y de la estructura de la materia.

## SUBSECTION 14.2

**Cuantización de la energía**

**Definition 87** (Hipótesis de Planck) La energía intercambiada entre la radiación electromagnética y la materia no puede tomar cualquier valor continuo, sino que se emite o absorbe en cantidades discretas llamadas cuantos.

**Theorem 40** (Relación de Planck) La energía asociada a un cuanto de radiación de frecuencia  $f$  viene dada por:

$$E = hf$$

donde  $h$  es la constante de Planck.

## SUBSECTION 14.3

**Efecto fotoeléctrico**

**Definition 88** (Efecto fotoeléctrico) El efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por la superficie de un metal cuando sobre él incide radiación electromagnética de frecuencia suficientemente elevada.

**Theorem 41** (Ecuación del efecto fotoeléctrico) La energía del fotón incidente se reparte entre el trabajo de extracción del metal y la energía cinética máxima de los electrones emitidos, de acuerdo con la expresión:

$$hf = W_0 + E_c$$

donde  $W_0$  es el trabajo de extracción.

*Remark* Del estudio experimental del efecto fotoeléctrico se deducen las siguientes conclusiones:

- Existe una frecuencia umbral por debajo de la cual no se produce emisión de electrones.
- La energía cinética de los electrones depende de la frecuencia, no de la intensidad de la radiación.
- La emisión es prácticamente instantánea.

## SUBSECTION 14.4

**Naturaleza corpuscular de la luz**

**Definition 89** (Fotón) El fotón es el cuanto de energía asociado a la radiación electromagnética, caracterizado por carecer de masa en reposo y propagarse a la velocidad de la luz en el vacío.

*Remark* El fotón posee cantidad de movimiento, cuyo valor viene dado por:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c}$$

## SUBSECTION 14.5

**Dualidad onda-partícula**

**Definition 90** (Hipótesis de De Broglie) A toda partícula material de cantidad de movimiento  $p$  se le puede asociar una onda cuya longitud de onda viene dada por:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

*Remark* La hipótesis de De Broglie extiende la dualidad onda-partícula, inicialmente atribuida a la luz, a toda la materia.

## SUBSECTION 14.6

**Principio de incertidumbre**

**Theorem 42** (Principio de incertidumbre de Heisenberg) No es posible determinar simultáneamente con precisión arbitraria la posición y la cantidad de movimiento de una partícula. Es decir,

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

*Remark* Este principio no se debe a limitaciones experimentales, sino que es una consecuencia fundamental de la naturaleza ondulatoria de la materia.

## SECTION 15

**Física nuclear**

## SUBSECTION 15.1

**Estructura del núcleo atómico**

Los átomos están formados por tres partículas: *protones*, *neutrones* y *electrones*. Estas dos primeras partículas constituyen los “*nucleones*”. Distintos tipos de nucleones son llamados “*núclidos*”.

La masa del átomo se concentra en el núcleo. Esta se mide en unidades de masa atómica (u), que se define cómo la doceava parte del átomo de carbono-12.

Se define el número másico (A) como el número de nucleones en una partícula, y se define el número atómico (Z) como el número de protones que posee un átomo (este número caracteriza a un elemento).

Dos núclidos pueden ser:

1. **Isótopos:** Si se diferencian en el número de neutrones.
2. **Isóbaros:** Si se diferencian en el número de protones.
3. **Isótonos:** Si tienen el mismo número de neutrones.
4. **Isómeros:** Si solo se diferencian en el estado energético.

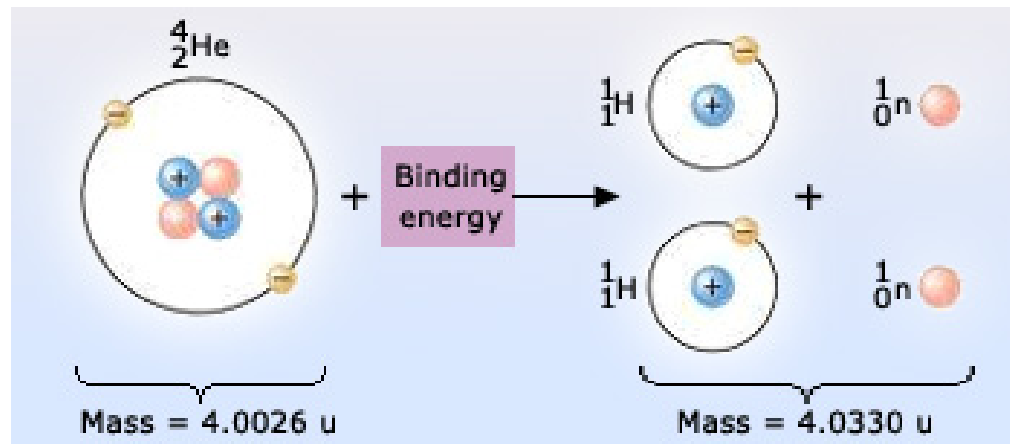


Figure 1. Defecto de masa al constituir un núcleo

## SUBSECTION 15.2

### Estabilidad del Núcleo

Utilizamos la **interacción nuclear fuerte** para explicar la estabilidad del núcleo pese a la aparente repulsión por las cargas de los protones que desintegrarían el núcleo.

La masa de los núclidos es menor que la suma de las masas de los nucleones que los componen. Este **defecto de masa** ( $\Delta m$ ) se calcula así:

$$\Delta m = \sum m_{\text{nucleon.}} - m_{\text{nuclid.}} = [Z \cdot m_{\text{prot.}} + (A - Z) \cdot m_{\text{neut.}}] - m_{\text{nuclid.}}$$

Cuando se forma el núcleo a partir de los nucleones, su mayor estabilidad implica que se libere energía. Es decir, la energía del núcleo es menor que la de los nucleones por separado. La energía liberada se llama **energía de enlace**:

$$E_{\text{enl.}} = \Delta E = \Delta m \cdot c^2 = (\sum m_{\text{nucleon.}} - m_{\text{nuclid.}}) \cdot c^2$$

Se llama **energía de enlace por nucleón** al cociente entre la energía de enlace y el número másico y nos informa de la estabilidad de ese núclido:

$$\frac{E_{\text{enlace}}}{\text{nucleon}} = \frac{E_{\text{enlace}}}{A}$$

## SUBSECTION 15.3

### Radiactividad Natural

#### 15.3.1 Núcleos inestables

Los núcleos requieren de neutrones para ser estables. Esto se debe a que la fuerza electrostática entre los protones desintegraría el núcleo. Por tanto, para mantenerse estables, se necesita de una partícula capaz de aportar las interacciones nucleares fuertes sin añadir más carga, precisamente neutrones.

Ya que los neutrones son inestables si no coexisten con protones, si el núcleo es muy grande no hay los suficientes protones para garantizar la estabilización de todos los neutrones.

#### 15.3.2 Concepto y tipos de radiactividad natural

Podemos identificar 3 tipos de radiación:

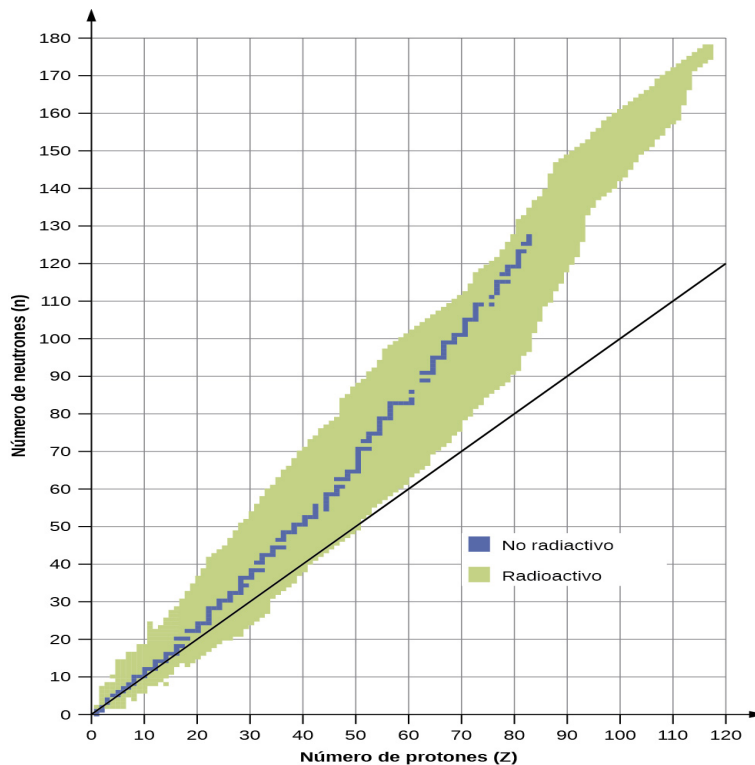


Figure 2. Gráfica energía de enlace por nucleón

1. **Rayos  $\alpha$ :** Son núcleos de helio  ${}^4_2\text{He}$ , tienen carga positiva, se mueven a  $16000\text{km/s}$ , y tienen muy poco poder de penetración.
2. **Rayos  $\beta$ :** Son electrones beta  ${}^0_{-1}\beta$ , tienen carga negativa, se mueven a  $260000\text{km/s}$ , y tienen un mayor poder de penetración.
3. **Rayos  $\gamma$ :** Son radiaciones electromagnéticas, no tienen carga, van a  $c = \text{vel.luz}$ , y tienen gran poder de penetración.

Cuando un núclido se transforma en otro de otro elemento diferente se dice que ha **transmutado**.

### 15.3.3 Leyes del desplazamiento radiactivo

Nos permiten computar los efectos de la radiación en átomos:

1. **Primera ley:** Dado X, Y un átomos, A y Z números másicos y atómicos respectivamente:  ${}^A_Z\text{X} \xrightarrow{\alpha} {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}$  (donde  $\xrightarrow{\alpha}$  significa que también se ha producido una partícula  $\alpha$ ).
2. **Segunda ley:** Dado X, Y átomos, A y Z números másicos y atómicos respectivamente:  ${}^A_Z\text{X} \xrightarrow{{}^0_{-1}\beta} {}^A_{Z+1}\text{Y}$ , por lo que X e Y son isóbaros. También es posible, de manera artificial, conseguir una desintegración beta positiva:  ${}^A_Z\text{X} \xrightarrow{{}^0_{+1}\beta} {}^A_{Z-1}\text{Y}$ .
3. **Tercera ley:** Dado X un átomo, A y Z su número másico y atómico respectivamente:  ${}^A_Z\text{X} \xrightarrow{\gamma} {}^A_Z\text{X}^*$ . Donde  $\text{X}^*$  indica un cambio de estado energético en X.

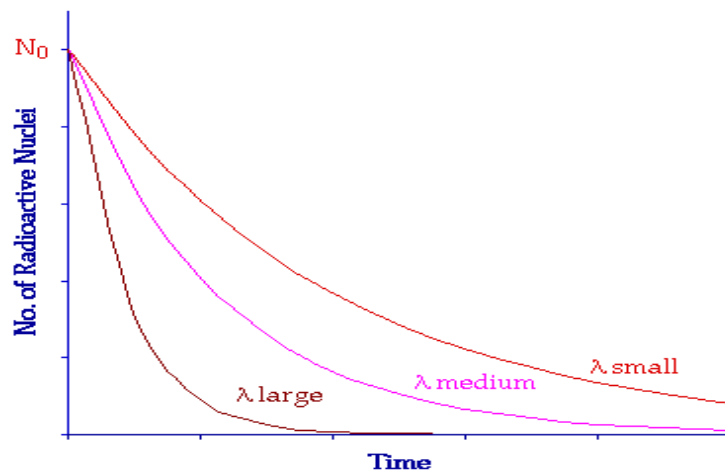


Figure 3. Gráfica energía de enlace por nucleón

### 15.3.4 Series o familias radiactivas

Los núcleos, antes de alcanzar la estabilidad, se desintegran en diferentes núcleos intermedios. Esto lo hacen formando una serie o cadena reactiva.

#### SUBSECTION 15.4

### Cinética de la Desintegración Radiactiva

#### 15.4.1 Actividad radiactiva

Llamamos actividad radiactiva ( $A$ ) al número de núclidos que se desintegran por unidad de tiempo:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N$$

Donde  $\lambda$  es la constante de desintegración: la probabilidad de desintegración de un núclido por unidad de tiempo (en  $s^{-1}$  en el SI).

La actividad radiactiva se mide en **Becquerelio (Bq)**. Donde  $1Bq = 1des./s$ .

#### 15.4.2 Núclidos en función del tiempo

Si inicialmente hay  $N_0$  núclidos, luego de un tiempo  $t$  habrá:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

#### 15.4.3 Periodo de semidesintegración

Llamamos **periodo de semidesintegración** ( $T_{1/2}$ ) al tiempo que tarda en desintegrarse la mitad de los núcleos que había en la muestra.

Es fácil ver que:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

#### 15.4.4 Vida media

Llamamos **vida media** ( $\tau$ ) al promedio de vida de un núcleo o partícula subatómica libre antes de desintegrarse:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}$$

## SUBSECTION 15.5

## Radiactividad artificial

---

Se denomina **radiactividad artificial** a la que resulta de núclidos radiactivos que se obtienen en el laboratorio al bombardear núclidos estables con partículas  $\alpha$ ,  $\beta$ , neutrones, etc.

Este proceso de irradiar núclidos estables puede llegar a producir elementos químicos que no existen en la naturaleza (*sintéticos*).

En las reacciones nucleares se conserva:

1. La carga eléctrica
2. El número de nucleones
3. El momento lineal
4. El conjunto mas energía:  $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$

### 15.5.1 Mecanismo de la Fisión Nuclear

La **fisión nuclear** es un proceso en el que un núclido se rompe en dos fracciones más pequeñas.

Un núcleo a punto de fisionarse, porque ha absorbido un neutrón, se encuentra excitado y deformado. Cuando las fuerzas de atracción son menores que las de repulsión, el núcleo se fisiona, emitiendo con cierta velocidad, más los núcleos resultantes, neutrones.

Estos neutrones luego son capaces de provocar la misma fisión en otros núcleos, ocurriendo una **reacción en cadena**.

### 15.5.2 La Energía de la Fisión Nuclear

La resultante de la fisión nuclear es ligeramente inferior a la masa de las sustancias que reaccionan. Este defecto de masa se libera en forma de energía. Las reacciones nucleares son las más exoenergéticas, sirviendo como gran fuente de energía. Esto también implica que se deba utilizar mecanismos para controlar la fisión.

### 15.5.3 Mecanismo de la Fusión Nuclear

La fusión nuclear es un proceso en el que dos núclidos de masa baja se unen dando un núclido de masa más alta.

La masa de los productos es ligeramente inferior a la masa de los reactivos, siendo esta pérdida convertida en energía.

### 15.5.4 Energía de la Fusión Nuclear

La fusión nuclear que tiene lugar en estas estrellas transcurre en estado de plasma: gas ionizado a millones de grado centígrados. Como resultado, se genera una gran cantidad de energía.

## SECTION 16

## Preludio

---

## SECTION 17

## Materiales y sus propiedades

---

## SUBSECTION 17.1

### Propiedades mecánicas de los materiales

---

- **Dureza:** Resistencia que ofrece un material a ser deformado o penetrado.
- **Elasticidad:** Propiedad general de los cuerpos sólidos, en virtud de la cual recuperan más o menos de su extensión y forma, tan pronto como cesa la acción de la fuerza que las deformaba.
- **Plasticidad:** Propiedad general de lo que puede cambiar de forma y conservar esta de modo permanente si rompe.
  - **Maleabilidad:** Propiedad de adquirir una deformación mediante una compresión sin romperse.
  - **Ductilidad:** Propiedad de adquirir una deformación mediante tracción sin romperse.
- **Resilencia:** Capacidad de absorber energía mecánica y recuperar su forma original después de una deformación elástica.
  - **A tracción**
  - **A compresión**
  - **A flexión**
  - **A pandeo**
  - **A torsión**
  - **A la fatiga**

## SUBSECTION 17.2

### Ensayos de propiedades mecánicas

---

#### 17.2.1 De tracción

Conceptos previos:

- **Tensión:**  $\sigma := \frac{F}{S}$
- **Alargamiento unitario:**  $\epsilon := \frac{\Delta l}{l_0}$
- **Estricción:**  $\epsilon_t := \frac{-\Delta S}{S_0}$

- **Modulo de Poisson:**  $\eta := \frac{\epsilon_t}{\epsilon}$
- **Módulo de elasticidad:**  $E := \frac{\sigma}{\epsilon}$

En el ensayo de tracción se somete a una probeta de forma y dimensiones normalizadas y del material a ensayar a un esfuerzo de tracción en la dirección de su eje, de manera creciente y hasta romperla.

En un diagrama de tracción, se distinguen dos zonas características:

- **Zona elástica (OE) [0, E]**
  - **Zona de proporcionalidad (OP) [0, P]:** Es válido usar  $E$  como factor de conversión.
  - **Zona no proporcional (PE) [P, E]**
- **Zona plástica (ES) [E, S]**
  - **Zona límite de rotura (ER) [E, R]**
  - **Zona rotura efectiva (RS) [R, S]**

Existen puntos entre E y S, cabe destacar:

- **Rotura efectiva (R):** Tras este punto, es inevitable la rotura.
- **Fluencia (F):** (Solo para metales) Tras este punto, se produce un alargamiento sin que aumente la tensión aplicada.

El adjetivo “límite” a cualquiera de estos puntos refiere al valor de la tensión correspondiente al punto en la gráfica, se simboliza con  $\sigma_{(-)}$ .

Otro nombre para  $\sigma_E$  es **tensión de admisión** ( $\sigma_{ad}$ ), y se puede aproximar al límite de proporcionalidad.

La **tensión de trabajo** es la tensión máxima a la que podemos someter una pieza respetando las recomendaciones y normas de seguridad, para calcularla, se aplica un coef. de seguridad  $N \in [1.2, 4]$ .

### 17.2.2 De dureza

Brinell:

- $D :=$  Diametro de bola.
- $d :=$  Diametro de la huella.
- **Flecha:**  $f := \frac{1}{2}(D - \sqrt{D^2 - d^2})$
- $F := KD^2$  donde  $K :=$  cte. de ensayo.
- $S := \pi D f$
- **Grado de dureza:**  $HB := \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi D f} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$

La nomenclatura estandarizada tiene forma:  $(HB) HB(S|W) (D) (F) (t)$ ,  $(t)$  solo es necesario si el tiempo no es entre 10 y 15 segundos, y donde  $S = \text{Steel}$  y  $W = \text{Wolfram}$ .

Vickers:

- $d :=$  Diagonal de la huella.
- $S := \frac{d^2}{2 \sin 68}$

- **Grado de dureza:**  $HV := \frac{F}{S} = \frac{2 \sin 68^\circ F}{d^2}$

La nomenclatura estandarizada tiene forma:  $(HV) \text{ HV } (F) (t), (t)$ .  
Rockwell:

- $HRC := 100 - 500h$
- $HRB := 130 - 500h$

## SUBSECTION 17.3

**De resiliencia**

Consiste en medir la energía que absorbe un material al ser impactado. Se utiliza el péndulo Charpy.

Conceptos:

- **Energía absorbida:**  $-\Delta E_p := -mg\Delta h$
- **Resiliencia:**  $\rho := \frac{-\Delta E_p}{S}$ , donde  $S := S_T - ent$ .

## SECTION 18

**Máquinas térmicas**

## SUBSECTION 18.1

**Principios fundamentales de termodinámica**

La termodinámica es la rama de la física que estudia las relaciones entre el calor, el trabajo, y la transferencia de energía.

**Definition 91** Energía térmica ( $Q$ )def1 En general,

$$Q := mC_E \Delta T \quad \text{donde } C_E := \text{calor específico}$$

Para gases a volumen constante,

$$Q = mC_V \Delta T \quad \text{donde } C_V := \text{calor específico a volumen constante}$$

Para gases a presión constante,

$$Q = mC_p \Delta T \quad \text{donde } C_p := \text{calor específico a presión constante}$$

**Definition 92** Energía interna ( $U$ )def2 La energía interna ( $U$ ) es la que tiene una sustancia en virtud a su temperatura:

$$U := \sum E_c^{\text{partíc.}} \quad (\text{Def. no utilizada en el temario})$$

A continuación, enumeramos los 3 principios básicos de la termodinámica:

1. **Ley de la conservación de la energía:** La energía interna ( $U$ ) incrementa al añadir energía térmica al sistema, y hacer que el sistema realice trabajo la disminuye, ergo postulamos:

$$\Delta U = Q - W$$

2. **Ley de la entropía:** La cantidad de entropía del universo tiende a incrementarse en el tiempo.
3. **Principio del cero absoluto:** La entropía de un cristal perfecto de cualquier sustancia pura se aproxima a cero cuando la temperatura se aproxima al cero absoluto.

Solo usaremos el primer principio para lo que prosigue.

## SUBSECTION 18.2

**Transformaciones termodinámicas en los gases**

Asumimos la Ley de los gases ideales:

**Definition 93** Ley de los gases ideales Para un gas (ideal), se cumple:

$$pV = nRT \quad \text{donde } R = 0.082 \frac{L \cdot atm}{mol \cdot K}$$

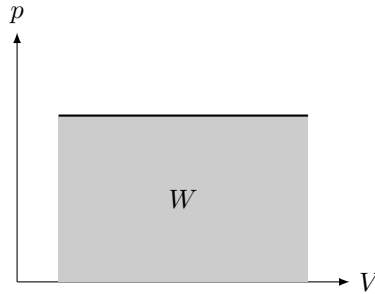
**18.2.1 Transformaciones isobáricas (presión constante)**

$$pV = nRT; \quad \frac{p}{nR} = \frac{V}{T} = cte. \rightarrow \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Por la definición de presión ( $p := \frac{F}{S}$ ), tenemos:

$$W := \int_{V_1}^{V_2} F \cdot dx = \int_{V_1}^{V_2} pS \cdot dx = \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV = p\Delta V$$

En cuanto a la gráfica  $p$ - $V$ :

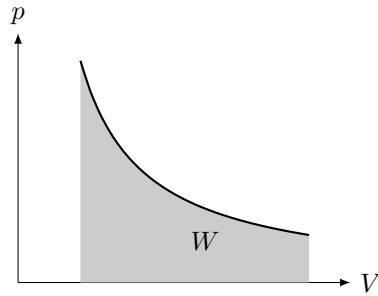
**18.2.2 Transformaciones isotérmicas (temperatura constante)**

$$pV = nRT = cte. \rightarrow p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad \text{ó} \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

Dado que, en estas condiciones,  $p = \frac{nRT}{V}$

$$W := \int_{V_1}^{V_2} F \cdot dx = \int_{V_1}^{V_2} pS \cdot dx = \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} \cdot dV = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

En cuanto a la gráfica  $p$ - $V$ :



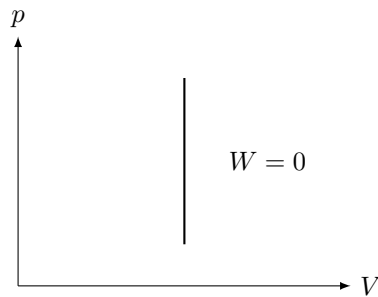
### 18.2.3 Transformaciones isocóricas (volumen constante)

$$pV = nRT; \quad \frac{V}{nR} = \frac{T}{p} = \text{cte.} \rightarrow \frac{T_1}{p_1} = \frac{T_2}{p_2}$$

Es fácil ver que  $W = 0$  ya que  $\Delta V = 0$ .

$$Q = nC_V \Delta T \rightarrow (p_1 > p_2 \Leftrightarrow Q_1 > Q_2)$$

En cuanto a la gráfica  $p$ - $V$ :



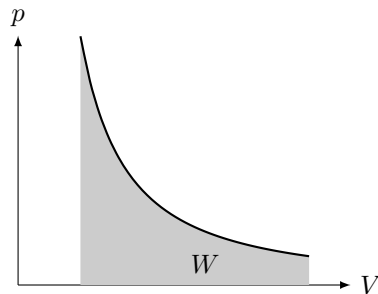
### 18.2.4 Transformaciones adiabáticas

Sistemas perfectamente aislados o transformaciones instantáneas. Nada es constante.

$$W = \frac{1}{1-\gamma}(p_2V_2 - p_1V_1) \quad \text{donde } \gamma := \frac{C_p}{C_V} = \text{coef. adiabático}$$

Para el aire,  $\gamma \approx 1.4$

En cuanto a la gráfica  $p$ - $V$ :



#### SUBSECTION 18.3

### Procesos reversibles e irreversibles

Llamamos proceso reversible a aquel en el cuál en el proceso de transformación  $(p_0, V_0, T_0) \rightarrow (p, V, T)$  todos los estados intermedios son estables. Es decir, la transformación es lenta.

### 18.3.1 Motores térmicos y máquinas frigoríficas

Una máquina térmica basa su funcionamiento en el flujo de energía calorífica entre dos focos. Si saca calor de un foco caliente, lo vierte en otro frío, y aprovecha el trabajo resultante de la transformación, se llama **motor térmico**. Si por el otro lado saca calor de un foco frío utilizando trabajo y lo vierte en otro caliente, se llama **máquina frigorífica**.

En esta situación,

$$W = Q_c - Q_f$$

$$\eta := \frac{E_u}{E_a} = \frac{W}{Q_c} = 1 - \frac{Q_f}{Q_c}$$

### 18.3.2 Ciclo ideal de Carnot

Máximo rendimiento que se puede extraer de dos focos. El rendimiento es comúnmente aproximado tal que:

$$\eta \approx 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

Asumimos la transmisión calorífica perfecta en las expansiones y el aislamiento perfecto en las compresiones:

1. **Expansión isotérmica:** Se aplica el calor del foco caliente, resultando en una expansión del gas a la misma temperatura que el foco caliente.
2. **Expansión adiabática:** Se retira el foco caliente; el gas sigue expandiéndose debido a la energía cinética residual.
3. **Compresión isotérmica:** Se aplica el calor del foco frío, retirando el calor del gas y dejándolo a la misma temperatura que la del foco frío.
4. **Compresión adiabática:** Se retira el foco frío; el gas sigue comprimiéndose debido a la energía cinética residual.



#### SUBSECTION 18.4

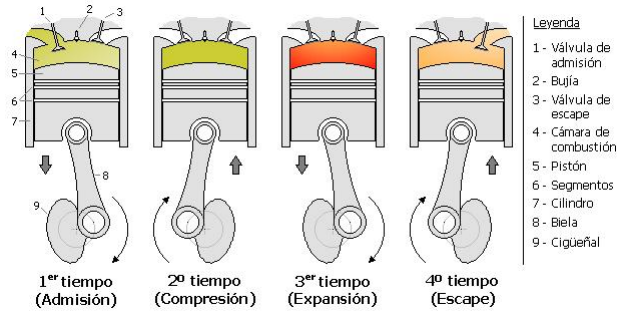
### Motores de combustión interna

Siempre nos vamos a encontrar con un pistón y una recámara. Por lo que distinguimos entre tipo de transformación que se produce en la aplicación del foco caliente, y número de movimientos del pistón (tiempos) en el que el ciclo se completa.

### 18.4.1 Motores de explosión

Nos centramos en el ciclo de Otto.

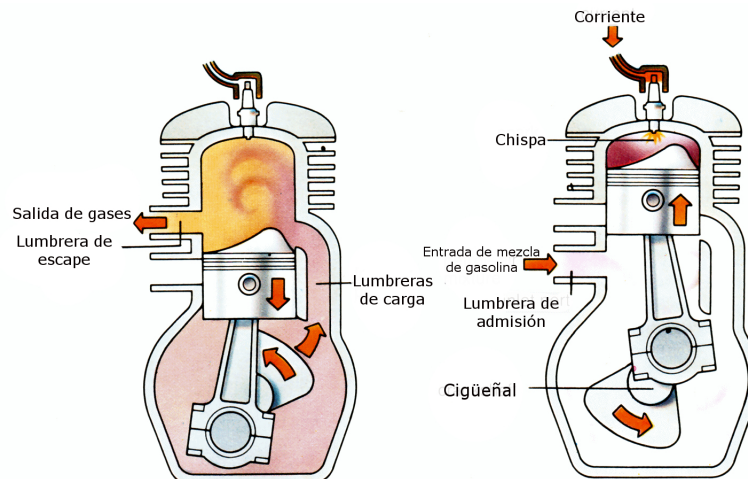
- De 4 tiempos:



1. **Fase de admisión:** transformación isobárica.
2. **Fase de compresión:** transformación adiabática; transformación isocórica (explosión, combustión instantánea).
3. **Fase de expansión:** transformación adiabática; transformación isopórica (apertura de la válvula).
4. **Fase de escape:** transformación isobárica.



- De 2 tiempos:



1. **Fase de compresión y aspiración:** transformación adiabática; transformación isobárica.
2. **Fase de explosión y escape:** transformación adiabática; transformación isobárica.



#### 18.4.2 Motores de diesel

Los motores diesel cambian la bujía que produce la explosión del combustible por un inyector (combustión progresiva).

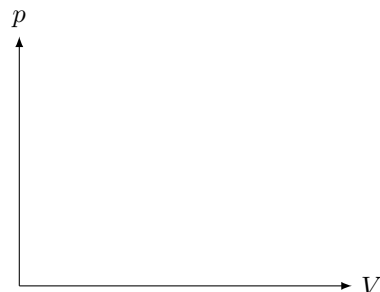
- **De 4 tiempos:**

1. **Fase de admisión:** transformación isobárica.
2. **Fase de compresión:** transformación adiabática.
3. **Fase de expansión:** transformación isobárica (combustión); transformación (adiabática).
4. **Fase de escape:** transformación isocórica; transformación isobárica.



- **De 2 tiempos:**

1. **Fase de compresión y aspiración:** transformación adiabática; transformación isocórica.
2. **Fase de explosión y escape:** transformación adiabática; transformación isocórica.



### 18.4.3 Parámetros y magnitudes características

- **Calibre:**  $d := \text{diam.}$
- **PMS:** Punto muerto superior.
- **PMI:** Punto muerto inferior.
- **Carrera:**  $h := PMS - PMI$
- **Cilindrada:**  $V := \pi \frac{d^2}{4} h n$  donde  $n := \text{núm. de cilindros}$
- $V_c$ : Volumen cámara de compresión.
- **Relación de compresión:**  $RC := \frac{V_1 + V_c}{V_c}$
- **Gasto:**  $G := \frac{m_c}{t}$
- **Potencia absorbida:**  $P_a = G P_c$  donde  $P_c = \text{poder calorífico}$
- **Momento de torsión:**  $M = F r$
- **Potencia útil:**  $P_u = M \omega$

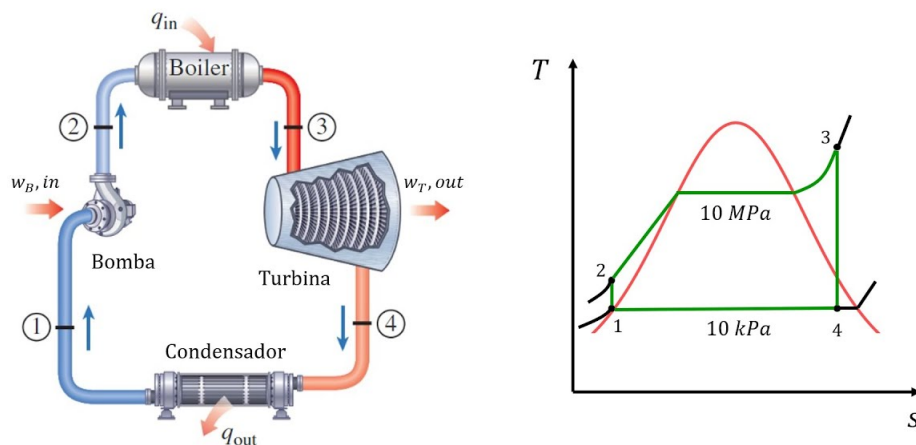
#### SUBSECTION 18.5

### Motores de combustión externa

Su utilidad es la generación eléctrica y de propulsor de aviones.

#### 18.5.1 Ciclo de Rankine (Turbina de vapor)

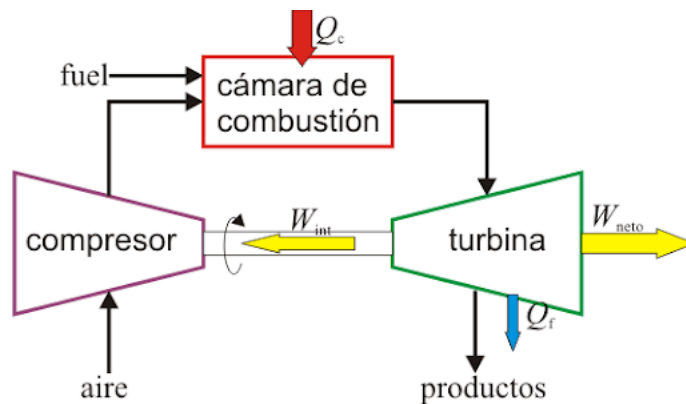
### Ciclo Rankine ideal simple



1. **Caldera:** transformación isobárica: Absorción de calor en la caldera, comienza el cambio de fase, se produce vapor sobrecalentado.
2. **Turbina:** transformación adiabática.
3. **Condensación:** transformación isobárica; transformación isotérmica.
4. **Bomba:** transformación isocórica.



### 18.5.2 Ciclo de Brayton (Turbina de gas)



1. **Compresor:** transformación adiabática.
2. **Quemador:** transformación isobárica.
3. **Turbina:** transformación adiabática.



#### SUBSECTION 18.6

### Bombas de calor

La transmisión de calor de un foco frío a uno caliente no es espontánea. Por lo cual necesitamos realizar trabajo para que esto ocurra. Este trabajo será igual a la diferencia de calor de los focos  $W = Q_C - Q_F$ .

#### 18.6.1 Ciclo de refrigeración de Carnot

Máxima eficiencia que se puede extraer de dos focos. El rendimiento es comúnmente aproximado tal que:

$$\epsilon = \frac{E_u}{E_a} = \frac{Q_F}{W} = \frac{Q_C}{Q_C - Q_F} \approx \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

Asumimos la transmisión calorífica perfecta en las expansiones y el aislamiento perfecto en las compresiones:

1. **Compresión adiabática** Se realiza el trabajo comprimiendo el émbolo. Aumenta la temperatura y presión del gas.
2. **Compresión isotérmica** Se aplica el foco caliente, que toma calor del gas.
3. **Expansión isotérmica** Se retira el foco caliente, causando que el gas se expanda y disminuya su temperatura.
4. **Compresión isotérmica** Se aplica el foco frío, que retira calor del gas.



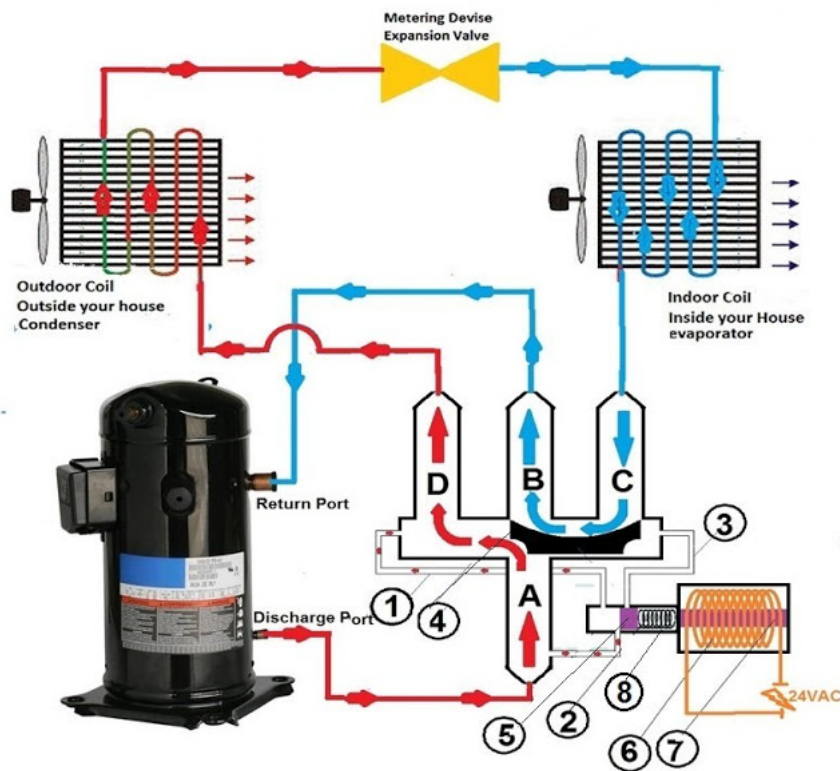
### 18.6.2 Ciclo de Rankine inverso

1. **Compresión adiabática:** El vapor saturado procedente del evaporador llega al compresor; aumenta su temperatura hasta alcanzar el punto correspondiente al vapor recalentado. Esta transformación se realiza con la aportación de trabajo externo ( $W$ ).
2. **Transformación isobárica:** En el condensador, el vapor está a una temperatura mayor que la del ambiente, por tanto cede calor ( $Q_C$ ), manteniendo constante la presión, mientras se produce, primero, un enfriamiento seguido de una condensación hasta convertirse en líquido saturado. Al pasar de vapor a líquido hay una gran reducción de volumen, con lo cual el fluido pasa a un estado líquido a alta presión.
3. **Expansión adiabática:** Se hace pasar el fluido por la válvula de expansión, donde se produce una transformación adiabática con un ligero aumento del volumen y gran disminución de presión y temperatura. Una parte del líquido se vaporiza, y en el punto 4 hay vapor húmedo.
4. **Transformación isobárica** El vapor húmedo, a su paso por el evaporador, que se encuentra en el recinto que queremos refrigerar, absorbe calor del foco frío ( $Q_F$ ) por encontrarse a menor temperatura que éste. Se completa la vaporización del fluido a medida que aumenta su volumen hasta llegar a la entrada del compresor, donde comienza de nuevo el ciclo.

Este ciclo puede servir tanto para refrescar en verano ( $Q_C = \text{exterior}$ ,  $Q_F = \text{interior}$ ) como calentar en invierno ( $Q_C = \text{interior}$ ,  $Q_F = \text{exterior}$ ). Asimismo tanto el evaporador como el condensador pueden intercambiar funciones. Concluimos que solo es necesario alternar el flujo del refrigerante para alternar funciones.



Cabe enumerar los distintos elementos presentes en la refrigeración por vapor. Estos son: compresor (puede ser centrífugo o volumétrico), condensador o evaporador (intercambiadores de calor), válvula de expansión (mantiene la presión constante del refrigerante que se dirige hacia el evaporador).



## SECTION 19

# Hidráulica y neumática

## SUBSECTION 19.1

### Elementos de los circuitos neumáticos

Los circuitos neumáticos utilizan aire para su funcionamiento. Naturalmente, necesitaremos elementos que capten el aire, lo compriman, lo almacenen, regulen su presión, etc. Por otra parte, elementos para dispensar del aire son innecesarios o muy simples.

### 19.1.1 Compresores

Encontramos dos tipos de compresores:

- **Volumétricos:** Reducen el volumen que ocupa el aire, aumentando la presión, según la ley de Boyle. Podemos distinguir a su vez entre alternativos o de pistón y rotativos.
- **Dinámicos:** Aumentan la energía cinética del aire que, al frenar contra el fluido ya existente en su salida hace que su velocidad se transforme en presión de empuje según la ecuación de Bernoulli. Los tipos que existen son: radiales o centrífugos y axiales.

Los compresores suelen guardar el aire comprimido en un depósito.

### 19.1.2 Acondicionadores del aire

Con tal de no desgastar los elementos involucrados en el circuito, el aire pasa por un proceso de acondicionado:

1. **Secador:** reduce el contenido de vapor de agua en el aire.
2. **Filtro:** retiene las impurezas arrastradas por el aire.
3. **Regulador de presión:** mantiene el valor de la presión constante.
4. **Lubricador:** pulveriza una pequeña cantidad de aceite en el aire. Evita la corrosión y el desgaste interno de las piezas.

La combinación de las tres últimas unidades dan lugar a la **unidad de mantenimiento**. Y la combinación de todos los elementos, junto con el compresor, dan la **toma de aire a presión**.

### 19.1.3 Actuadores neumáticos

Diferenciamos entre actuadores rotativos (motores, usos escasos), y actuadores lineales (cilindros). Nos centraremos en los lineales, los cuáles se subdividen en 2 tipos:

- **De simple efecto:** El aire solo puede realizar una acción (típicamente la de extensión del pistón). El retorno se realiza por un muelle.
- **De doble efecto:** Tanto el avance como el retroceso viene dado por aire.

Nos suele interesar el cálculo de la fuerza y el consumo de aire.

La fuerza teórica viene dada por:

$$F_t = pS$$

Donde  $S = S_e - S_v$  en el retroceso de un pistón de doble efecto y  $S = S_e$  de lo contrario.

No obstante, uno debe tener en cuenta tanto la fuerza de rozamiento como el muelle, conque:

$$F = F_t - F_r - F_m$$

Donde  $F_m = K\Delta x$ . En otras ocasiones,  $F$  se toma de un porcentaje de  $F_t$ .

El consumo de aire es precisamente el volumen de aire implicado en la acción del cilindro, es decir, la carrera  $l$  por la superficie  $S$  (Con las consideraciones anteriores de que es la superficie).

### 19.1.4 Válvulas distribuidoras

Sirven para dirigir y regular la dirección del aire comprimido a través de los circuitos. Se nombran según el número de vías u orificios que tengan, el número de estados, y su accionamiento.

Tabla con la representación de válvulas de distribución.			
	Válvula 2/2 normalmente cerrada		Válvula 3/3 con posición neutra normalmente cerrada
	Válvula 2/2 normalmente abierta		Válvula 4/3 con posición neutra normalmente cerrada
	Válvula 3/2 normalmente cerrada		Válvula 4/3 con posición neutra a escape
	Válvula 3/2 normalmente abierta		Válvula 5/2
	Válvula 4/2		Válvula 5/3 en posición normalmente cerrada
	Válvula 4/2 normalmente cerrada		Válvula 5/3 en posición normalmente abierta

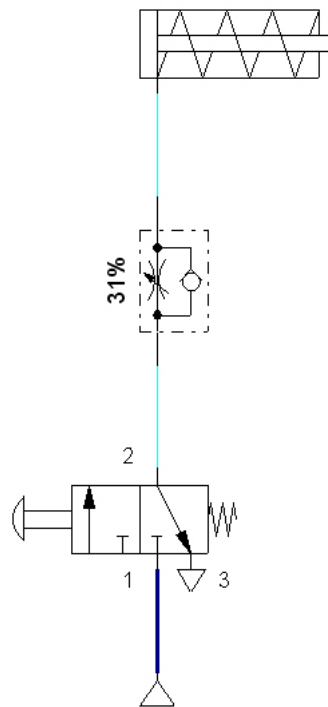
### 19.1.5 Otras válvulas

Nombre	Uso	Imagen
Válvula antirretorno	Deja pasar el aire en un solo sentido	
Válvula reguladora bidireccional	Regula el caudal del aire	
Válvula reguladora unidireccional	Regula el caudal del aire en un solo sentido	
Válvula selectora de circuitos	Tiene una función lógica de OR	
Válvula de simultaneidad	Tiene una función lógica de AND	
Válvula temporizadora	Aplica un retardo en el pase del aire	

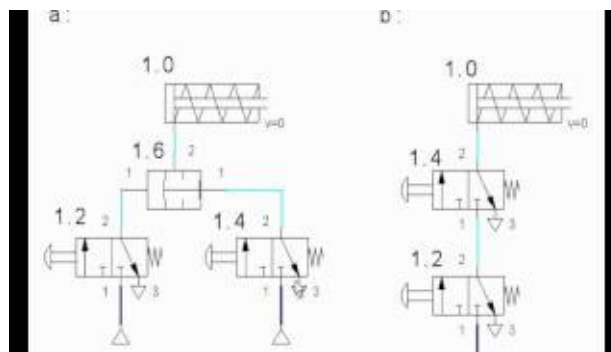
## SUBSECTION 19.2

## Circuitos prácticos neumáticos

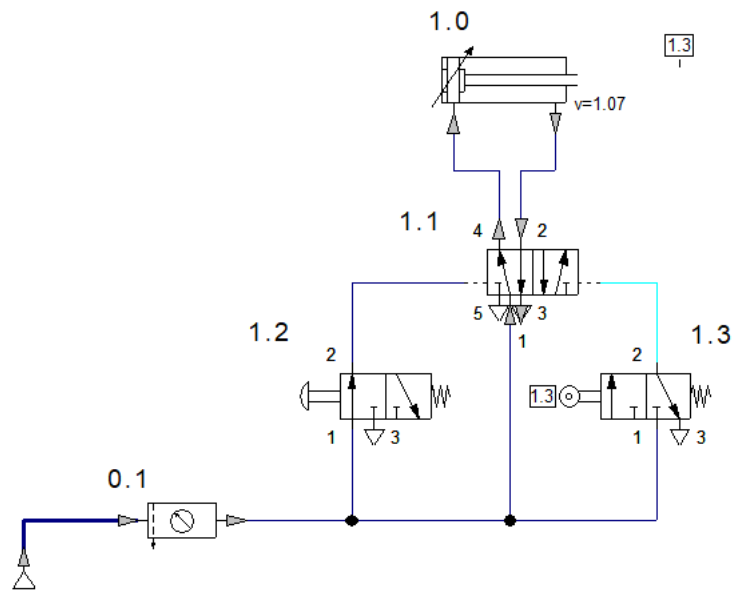
- Mando de un cilindro de simple efecto con regulación de velocidad en el vástago



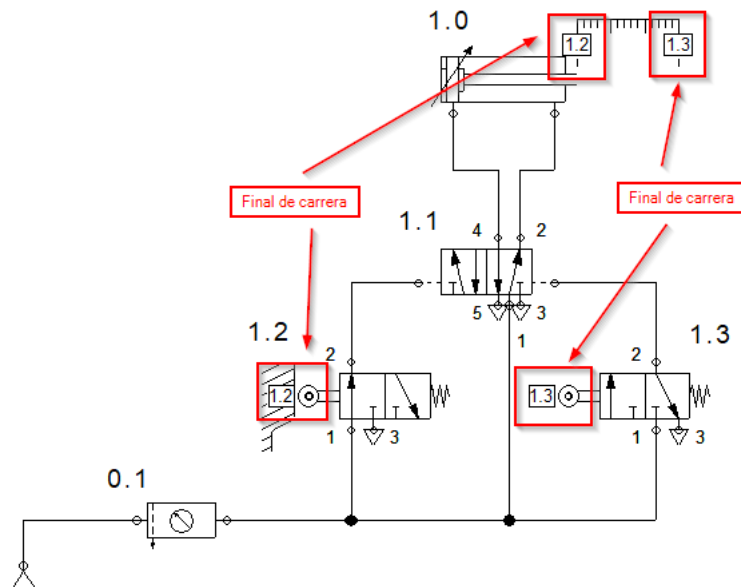
- Mando condicional de simple efecto



- Mando semiautomático de un cilindro de doble efecto



- Mando automático de un cilindro de doble efecto



## SUBSECTION 19.3

## Circuitos hidráulicos

Son circuitos que emplean el aceite como fluido. Consecuentemente, podremos lograr mayor fuerza y sostener estados intermedios (fluido incompresible), tener mejor control caudal y velocidad, pero necesitaremos tuberías de recogida y habrá peligro de contaminación por fugas.

### 19.3.1 Cálculo de parámetros en un circuito

El principio de Pascal asevera que la presión ejercida sobre un fluido incompresible se transmite instantáneamente y por igual a todos los puntos de dicho fluido ( $p_1 = p_2$  y  $V_1 = V_2$ ). Por lo tanto, el caudal  $Q$  se mantiene a lo largo del circuito, conque la potencia hidráulica puede ser calculada tal que  $P = Fv = pSv = pQ$ .

Según la ley de la conservación de la energía, tenemos:

$$E_P + E_C + E_{Pr} = E'_P + E'_C + E'_{Pr} \rightarrow mgh + \frac{1}{2}mv^2 + pS = mgh' + \frac{1}{2}mv'^2 + pS'$$

Conque, dividiendo entre  $V$ , llegamos a la ecuación de Bernoulli:

$$\rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + p = \rho gh' + \frac{1}{2}\rho v'^2 + p'$$

# *Historia de la Filosofía*

PART

V

SECTION 20

## Preludio

---

Los autores filosóficos pertinentes a la selectividad son: **Platón, Descartes, Nietzsche y Ortega** (si se elige el bloque de problemas ontológicos y epistemológicos).

SUBSECTION 20.1

## Áreas de la filosofía

---

Para todos los autores a presentar es ponderable leer sus obras cuando sea factible.

Antes de tratar la Historia de la Filosofía, es encomiable repasar los contenidos de esta. La filosofía (*φιλο*- “amor”, *σοφία*- “sabiduría”) es el estudio racional de los constituyentes fundamentales de la realidad y del ser humano. Es, en cierto sentido, el conjunto de axiomas que suponemos para el desarrollo de los demás conocimientos.

**20.1.1**    Metafísica

**20.1.2**    Epistemología

**20.1.3**    Ética

**20.1.4**    Política

## SECTION 21

## Platón

---



*Toda la filosofía occidental es una serie de notas a pie de página de Platón*

Alfred North Whitehead

La influencia que ha tenido la filosofía de Platón sobre la filosofía y todas sus vertientes y todos los que beben de ellas, que en última instancia es la humanidad completa, escapa de todo remaque. La posición maximalista de dicha proposición afirma que tras Platón, *nihil novum sub sole*.

Algunos Padres de la Iglesia miraron a Platón con gran veneración, y las sublimes verdades que se encierran en sus escritos y formaron tan grandes filósofos, tuvieron bastante fuerza para arrancar de la docta pluma de San Agustín, hablando de éstos, aquella fuerte hipérbole: que en mudando algunas proposiciones y unos pocos términos se convertirían en hombres cristianos.

Cabe destacar que la distribución de contenidos de la presente exposición no sigue la del mismo Platón. No es hasta Aristóteles que se conoce una manera sistemática de la presentación de la filosofía. Platón en particular presentaba sus obras en forma de diálogos (cuyo personaje principal suele ser Sócrates), que con libertad fluían entre distintos temas. Su pensamiento se forja en un **contexto sociopolítico** marcado por la guerra del Peloponeso, la corrupción de los Treinta Tiranos (entre los que figuraron parientes suyos) y, de manera decisiva, la condena a muerte de Sócrates, hecho que lo alejó de la política activa y lo entregó al cultivo de la filosofía.

## SUBSECTION 21.1

### Metafísica

---

La filosofía platónica propone un esquema a aplicar en distintas áreas del saber, el llamado *dualismo Platónico*, el cuál está expuesto con el símil de la caverna. La etimología de dualismo ya sugiere el fundamento que profesa, a saber: la existencia de dos principios fundamentales que componen un sistema. El dualismo platónico además precisa la esencia de estos dos principios, o *mundos* y la relación entre ellos.

En metafísica, se postula un mundo sensible, inferior, el cuál es contingente, perecedero, imperfecto . . . (en definitiva, *Heracleíteo*), que se corresponde al mundo inteligible (o formal), superior, el cuál es inmutable, eterno, perfecto . . . (en definitiva, *Parménico*).

La relación entre ambos se da mediante participación (*methexis*) e imitación (*mimesis*). Lo cuál quiere decir que el mundo sensible, compuesto de particulares, participa en sus correspondientes universales (exhibiéndose como ejemplos del universal) e imita la idiosincrasia de sus universales. Se deduce, además, que ambos mundos son independientes y, en cierto sentido, el mundo formal es anterior.

La aplicación del dualismo platónico a la metafísica resulta en la llamada *Teoría de las ideas*. Las Ideas o Formas son esencias inmateriales, únicas, eternas e inmutables, que existen separadas de las cosas particulares y constituyen el auténtico objeto del pensamiento. Es por su primacía de las ideas que esta teoría constituye la primera filosofía idealista en la Historia de la Filosofía. El mundo inteligible está jerarquizado: en la cúspide se halla la Idea del Bien; le siguen ideas generales (Ser, Quietud, Movimiento); luego las de las virtudes; después las de seres vivos y objetos naturales; y finalmente, los entes matemáticos.

A este nivel cabe destacar además la existencia de una Idea suprema: el Bien. Para Platón esta es la Idea que da sentido al resto. En el símil de la caverna el Bien se identifica con el sol puesto que proporciona la luz por la que podemos vislumbrar el resto de Formas. Resulta esto importante ya que en la genealogía de Dios dicha concepción es primordial. En este símil también cabe la explicación de una característica crucial de esta concepción de Bien. A saber, Platón concibe un Bien que es inefable, el cuál es exclusivo a la revelación mística. En sus diálogos, la idea suprema no es unívoca: en la *República* es el Bien; en el *Banquete*, la Belleza; en el *Parménides*, el Uno; en el *Sofista*, el Ser, lo que indica una evolución y cierta indecisión en su pensamiento.

### 21.1.1 Ontología

En misma correspondencia con los anteriores mundos, encontramos dos tipos de cosas que “son”: Lo *particular* y lo *universal*. Platón distingue al menos en 4 maneras entre estas dos categorías, a saber: multiplicidad, siendo lo universal único y lo particular múltiple, tal que un único fenómeno pueda presentar distintos ejemplos; mutabilidad, puesto que lo universal es rígido e inmóvil mientras que lo particular es contingente; materialidad, de manera que las Formas trascienden cualquier marco material, opuestamente a la manera en la que lo particular se encuentra ligado a la materia; sensibilidad, tal que el órgano que percibe las Ideas es la mente, el *alma*, y el que percibe los particulares son los sentidos.

De esta manera, la perfección es una cualidad exclusiva a los universales, puesto que el ejemplo siempre carece de algo respecto a su Idea (cf. ejemplo del triángulo). El propio Platón sometió su teoría a una revisión crítica, planteándose problemas como la existencia de ideas de objetos sin valor (pelo, barro) y las dificultades lógicas de los conceptos de participación e imitación, que podrían llevar a una regresión infinita. No obstante, mantuvo la necesidad de las ideas como fundamento del conocimiento racional.

### 21.1.2 Cosmología

Platón expone su cosmología principalmente en el diálogo *Timeo*. El cosmos tiene un origen teleológico, fruto de la acción de un Demiurgo (artífice divino) que, movido por la bondad, ordena una materia originaria caótica y preexistente dentro de un espacio vacío (receptáculo), tomando como modelo las Ideas eternas. El Demiurgo no es un creador *ex nihilo*, sino un ordenador. El cosmos resultante es un ser vivo dotado de alma, de forma esférica, con la Tierra en el centro y esferas concéntricas para los astros. Su cuerpo está compuesto de los cuatro elementos (fuego, tierra, agua, aire; influencia de Empédocles), a los que Platón asocia los sólidos platónicos o poliedros regulares (tetraedro, hexaedro, octaedro, icosaedro), estableciendo así una identificación entre cuerpo físico y estructura matemática (influencia pitagórica). El alma del cosmos, creada también por el Demiurgo, gobierna sus movimientos mediante armonías musicales y proporciones numéricas.

SUBSECTION 21.2

## Epistemología

Platón distingue rigurosamente entre lo que puede ser objeto de conocimiento auténtico (*epistémē*) y lo que pertenece al campo de la opinión (*doxa*). El conocimiento verdadero no trata de particulares sensibles, cambiantes y engañosos, sino de las Formas o Ideas, entidades inmutables y universales que constituyen la realidad ontológicamente prioritaria. Así, epistemológicamente, conocer equivale a participar intelectualmente en la Forma correspondiente: no basta la percepción sensorial para aprehender la esencia de las cosas.

Dos figuras explicitan este pensamiento: el mito de la caverna y la *línea dividida*. En la línea dividida Platón traza, de menor a mayor grado de verdad, los segmentos de la imaginación (*eikasia*) y la creencia (*pistis*) (los cuales remiten al mundo sensible), y los de la comprensión matemática o conocimiento discursivo (*dianoia*) y la dialéctica (*noesis*) (propios del mundo inteligible). La dialéctica, entendida inicialmente como el método socrático de preguntas y respuestas, evoluciona en Platón hasta convertirse en el arte supremo que, sin recurrir a imágenes ni hipótesis, asciende hasta los principios no hipotéticos (las Ideas) y, tras contemplar la Idea del Bien, desciende deductivamente encadenando todo el saber. La dialéctica culmina en la intuición racional de las Formas y, sobre todo, en la contemplación del Bien, que ilumina y legitima todo saber: conocer el Bien es, en última instancia, conocer la condición de posibilidad de la verdad.

MUNDO SENSIBLE		MUNDO INTELIGIBLE	
Imágenes	Entes naturales y artificiales	Entes matemáticos	Ideas
<i>eikasia</i> (conjetura) imaginación	<i>pistis</i> (creencia) sentidos	<i>dianoia</i> (verdad deducida) razón discursiva	<i>noesis</i> (verdad intuita) intuición intelectual
...	Física	Matemáticas	Dialéctica
<b>DOXA</b> (opinión)		<b>EPISTEME</b> (verdad o ciencia)	

Otra tesis epistemológica central es la Teoría de la reminiscencia o *anamnēsis*: el alma, al ser inmortal y haber contemplado las Formas antes de su encarnación (preexistencia del alma), recuerda mediante la correcta interrogación y el ejercicio intelectual lo que ya en ella existe latente. La educación, por tanto, no es mera transmisión de información sino recolocación (o evocación) de la verdad que el alma ya posee; la mayéutica socrática es la técnica educativa que facilita esa recolección de la verdad mediante preguntas dirigidas.

Platón jerarquiza también las disciplinas: las matemáticas ocupan un lugar preparatorio, pues habitúan la mente a la abstracción, mientras que la dialéctica constituye la forma suprema de conocimiento, puesto que por ella se trasciende el plano hipotético y se alcanza el conocimiento de los principios primeros.

Finalmente, en el *Banquete*, Platón presenta a Eros (el Amor) como un demon intermedio entre lo humano y lo divino, hijo de la Pobreza (*Penia*) y la Abundancia (*Poros*). Eros simboliza la filosofía misma: el anhelo y la fuerza motriz que impulsa al alma desde el amor a la belleza sensible, ascendiendo gradualmente (amor a los cuerpos, a las almas, a las instituciones, a las ciencias) hasta el amor y conocimiento de la Belleza en sí, la Idea eterna y perfecta. El amor platónico es, así, amor a la perfección de lo ideal.

SUBSECTION 21.3

## Antropología

La tan reconocida distinción entre cuerpo y mente (*alma*) proviene al instanciar el dualismo platónico al humano. Siendo el alma el mundo superior, se deriva: la imperativa al ascetismo, que el cuerpo sirve como prisión para el alma, el ciclo de reencarnación (metempsicosis o transmigración) . . . . Es aquí donde es posible trazar una influencia hacia los Pitagóricos y a su vez hacia el orfismo.

### 21.3.1 Alma

El alma, según Platón, tiene carácter divino y es ontológicamente prioritaria respecto del cuerpo. Es inmortal, preexistente y capaz de contemplar las Formas; su caída al cuerpo es lo que origina el olvido y la necesidad de aprendizaje que, en realidad, es recolocación. Moralmente, el alma es tripartita, conforme a la célebre división de *La República* y al mito del carro alado del *Fedro*:

- **La parte racional** (*logistikon*): orientada al conocimiento, ama la verdad y debe gobernar por su capacidad para discernir el Bien. Es inmortal, de naturaleza divina y se sitúa en el cerebro.
- **La parte irascible o espirituosa** (*thymoeides*): vinculada al ánimo, al honor y al valor; su función es auxiliar a la razón y sostener la firmeza moral. Es mortal, fuente de pasiones nobles, inseparable del cuerpo y se sitúa en el tórax.
- **La parte concupiscible** (*epithymetikon*): relacionada con apetitos y placeres corporales; exige moderación. Es mortal, fuente de pasiones innobles, inseparable del cuerpo y se sitúa en el abdomen.

Platón relaciona la anterior división con las 4 virtudes griegas *cardinales* (a saber: prudencia, justicia, coraje y templanza) de la siguiente manera:

- Que haya **prudencia** (*phronesis*) significa que la parte racional sea la autoridad suprema y guíe al resto.
- Que haya **coraje** o **fortaleza** (*andreia*) significa que la parte irascible se someta a la parte racional. Puesto que son valientes aquellos que, sabiendo lo que es bueno, actúan de manera acorde.
- Que haya **templanza** o **moderación** (*sophrosyne*) significa que la parte concupiscible sepa moderar su apetito, así subordinándose a la razón.

Por último, la justicia (*dikaiosyne*), en el alma, se define como la armonía y el correcto ordenamiento entre estas partes: cada una desempeña su función sin usurpar la propia de las otras, bajo la dirección de la razón. La tarea del alma unida al cuerpo es la purificación (*katharsis*), un alejamiento de lo sensible y un acercamiento a lo inteligible. En el plano antropológico-religioso, Platón postula el ciclo de transmigraciones (influencia pitagórica) y la posibilidad de purificación moral del alma (cf. el mito de Er en la *República*), donde la conducta en la vida determina su suerte posterior y la posibilidad de liberarse definitivamente del ciclo para contemplar las Ideas.

### 21.3.2 Cuerpo

Siendo el cuerpo la antítesis del alma, Platón lo presenta como principio mortal, ligado a la generación y la corrupción, y como fuente de pasiones, deseos y errores perceptivos. Los sentidos remiten al mundo cambiante y, por tanto, son instrumentos limitados y frecuentemente engañosos para acceder a la verdad. La presencia del cuerpo impone sobre el alma tentaciones que desordenan su jerarquía; la concupiscencia puede subyugar

a la razón si no media la educación y la disciplina moral; por eso Platón adopta, en sus consecuencias prácticas, una inclinación hacia el ascetismo moderado y la purificación.

No obstante, Platón no reduce el cuerpo a mero estorbo: reconoce su papel en la acción política y social y en la formación del carácter. El proyecto educativo que propone orienta y regula los impulsos corporales mediante gimnasia, música y disciplina, integrándolos de modo que sirvan a la excelencia del alma. La medicina del alma, como metáfora, exige ordenar y domesticar las apetencias para que la polis y la vida individual alcancen la armonía justa.

#### SUBSECTION 21.4

### Política

La misión última de la filosofía política de Platón es la justicia. Su más magna obra expuesta para este fin es *La República*.

Justicia se ha de entender por este nombre lo que en común llamamos virtud, y de otro modo hombría de bien, o concierto y armonía universal de las acciones; es decir, aquel hábito de vivir en un todo conforme al dictamen de la recta razón que constituye al que le posee en la clase de hombre justo. Tomada la justicia en este sentido generalísimo, se identifica con la república concertada y estrechamente unida, de forma que parezca no más de una sola alma; y la verdadera república equivale a la justicia de todos los ciudadanos, por la cual cada uno desempeña su cargo u oficio como es debido. En algo, no obstante, pueden distinguirse, en cuanto a la república es como el argumento y materia de que se vale, y la justicia es como el fin y término; de modo que Platón toma por objeto una república, con el fin de manifestar en grande, en términos que a nadie se le oculte, la naturaleza de la justicia.

Cinco puntos insinúa Platón en la introducción de su diálogo, que son como otras tantas piedras fundamentales sobre que se sustenta una república; a saber: las solemnidades sagradas, la amistad, la prudencia y consejo de los ancianos, el afecto moderado de las riquezas, y la utilidad de ellas para sostener los derechos de la verdad, compañera inseparable de la justicia.<sup>12</sup>

La estructura política ideal platónica deriva directamente de la antropología tripartita: la ciudad perfecta replica en lo social el orden del alma justa, estableciendo una correlación entre el alma y el Estado. Así se distinguen tres clases sociales análogas a las partes del alma, regidas por el principio de especialización funcional (cada uno debe realizar la función para la que está naturalmente mejor dotado):

- **Gobernantes (filósofos–reyes):** corresponden a la parte racional. Solo aquellos que han alcanzado la comprensión de las Formas, y en última instancia del Bien, son aptos para gobernar. La filosofía, convertida en virtud política, legitima el poder. Deben ser célibes y carecer de propiedad privada para evitar intereses particulares.
- **Auxiliares o Guardianes (guerreros y policías):** corresponden a la parte irascible. Su función es defender la ciudad y aplicar las decisiones de los gobernantes; deben poseer coraje y lealtad. También viven en régimen comunitario, sin propiedad privada ni familia.
- **Proveedores o Productores (agricultores, artesanos, comerciantes):** corresponden a la parte concupiscible. Su tarea es sostener materialmente la polis mediante el trabajo y la producción. A ellos se les permite la propiedad privada y la familia.

La justicia política, por tanto, consiste en que cada clase realice la función para la cual está naturalmente más capacitada, bajo la guía de la razón gobernante. Un Estado justo es aquel con gobernantes prudentes, guardianes fuertes y productores moderados.

<sup>12</sup> En este primer punto, con la oración y la adoración, sacrificios y votos de los asistentes a las solemnidades sagradas, se indican la piedad y religión, dos firmes fundamentos del Estado y de la justicia y demás virtudes necesarias a la sociedad; añadiéndose a estos como tercero la esperanza de los premios y temor de las penas que acaso es el más poderoso de los tres para contener la multitud.

Para asegurar este orden, Platón diseña un riguroso sistema educativo público en dos etapas: una primera (hasta los 20 años) de gimnasia y música para todos los futuros guardianes; y una segunda (de los 20 a los 35) de formación matemática y filosófica para los seleccionados como futuros gobernantes. La educación tiene como objetivo desarrollar las capacidades naturales y asegurar la estabilidad del orden social. Platón, además, defiende la igualdad de capacidades entre hombres y mujeres: las mujeres aptas deben recibir la misma educación y acceder a las funciones de guardián o gobernante.

Para mantener la cohesión social, Platón recurre al «mito de las razas» o «mito de los metales» (oro, plata, bronce/hierro), un «noble engaño» que justifica la estructura jerárquica como de origen divino. Asimismo, propone la comunidad de mujeres e hijos entre guardianes y gobernantes, abolendo la familia tradicional para que su lealtad sea exclusiva al Estado.

El sistema de gobierno propuesto es una monarquía o aristocracia absoluta de los más sabios. Platón desconfía de las leyes fijas, pues podrían obstaculizar el juicio sapiente del filósofo-rey, aunque en su último diálogo, *Las Leyes*, matiza esta posición.

Platón analiza asimismo la dinámica de degeneración política: la ciudad ideal (aristocracia) puede decaer en timocracia (gobierno de los ambiciosos), luego en oligarquía (gobierno de los ricos), después en democracia (gobierno de la multitud) y finalmente en tiranía (gobierno del déspota). Cada régimen tiene su psicología moral y sus vicios correspondientes. La causa última de este declive es el desorden interior del alma colectiva: cuando la razón deja de mandar, los apetitos y los intereses particulares toman el poder, provocando corrupción y violencia.

Finalmente, la figura del filósofo-rey sintetiza la aspiración platónica: un gobernante que no busca el poder por interés personal sino por saber y por amor a la verdad, capaz de orientar la polis hacia el bien común. La política platónica, aunque aristocrática en su designio (gobierno de los mejores en conocimiento), está animada por la idea de que el saber auténtico es condición de la legitimidad y la virtud públicas. Su propuesta inaugura el género de la utopía política, un modelo ideal que sirve de crítica a la realidad existente.

## SECTION 22

## Descartes

---



*Descartes, el padre la filosofía moderna [...] nunca hubiera sido – así nos asegura– guiado a construir su filosofía si hubiera tenido solo un profesor, pues entonces hubiera creído lo que se le fue dicho; pero, encontrando que sus profesores se contradecían, fue forzado a concluir que ninguna doctrina existente era cierta*

Bertrand Russell

La filosofía de Descartes inaugura el racionalismo continental como vertiente filosófica en directa oposición al empirismo británico. Asimismo, plantea los temas ideosincráticos que todo filósofo hasta Kant tratará de contestar. Verbigracia, el problema de la duda radical, de cuerpo–mente, del mundo exterior, de la fundación del conocimiento, de la representación. . .

En concreto, la filosofía de Descartes tiene como objetivo dar raíz al *árbol del conocimiento* (cf. Principios de la Filosofía) para que este pueda crecer y así superar el escepticismo de su época. Para este fin, Descartes concibe un método, modelado en la matemática que considera cómo Galileo el lenguaje del universo, apodado *Mathesis Universalis*, esencial en toda ciencia si ha de lograr conocimiento clarividente. Lo natural de la razón es perderse, indagar en falsos razonamientos; método es la rutina que logra dirigir la mente hacia el conocimiento.

Así, dotar a la filosofía de un método para su desarrollo constituiría, siguiendo a Descartes, elevar a dicha disciplina al campo de las ciencias estrictas.

## SUBSECTION 22.1

### Método

---

Por todo lo dicho, Descartes comienza con su sistema de deducción, su método, *à la matemática*. En el Discurso del Método, Descartes tantea las matemáticas como fundación para la filosofía, y concluye qué, por venerable que sea esta disciplina, sus métodos

no se adecuan a su necesidad de una *philosophia perennis*. Por lo que prosigue en busca de un método adecuado para el raciocinio.

### 22.1.1 Operaciones de la mente

El método que propone Descartes parte de los dos procesos mentales que están implicados en las matemáticas:

1. **La intuición:** Descartes entiende por intuición “la concepción de un espíritu sano y atento, tan distinta y tan fácil que ninguna duda quede sobre lo conocido”. Es decir, sería aquel proceso por el cual se presenta a la mente una idea tan evidente que no cabe ninguna duda sobre ella. Son intuiciones, por ejemplo, la captación inmediata de los axiomas de Euclides, por ejemplo: cosas iguales a una misma cosa son iguales entre sí.
2. **La deducción:** Es la “operación por la cual comprendemos todas las cosas que son consecuencia necesaria de otras conocidas por nosotros”. En filosofía se entiende por deducción, normalmente una inferencia de carácter necesario por la cual pasamos de unas afirmaciones a otras. o Intuición y deducción componen en matemáticas el camino que va de las proposiciones más simples a las más complejas, obteniendo así teoremas.

### 22.1.2 Reglas del método

En su obra Reglas para la dirección del espíritu, Descartes propuso veintiuna reglas para dirigir correctamente la razón. Posteriormente, en el Discurso del método redujo estas reglas a cuatro. A saber:

1. **Regla de la evidencia:** “El primero consistía en no admitir cosa alguna como verdadera si no se la había conocido evidentemente como tal”. Se trata con este precepto de “dudar de todo”, admitiendo únicamente aquello que se presenta “clara y distintamente” a la razón.
2. **Regla de la análisis:** “El segundo exigía que dividiese cada una de las facultades a examinar en tantas partes como fuese posible y necesario para resolverlas más fácilmente”.
3. **Regla de la síntesis:** “El tercero requería conducir con orden mis reflexiones comenzando por los objetos más simples y más fácilmente cognoscibles, para ascender poco a poco, gradualmente, hasta el conocimiento de los más complejos”.
4. **Regla de la enumeración:** Por último, “realizar recuentos tan complejos y revisiones tan amplias que pudiese estar seguro de no omitir nada”.

Las dos primeras reglas constituyen la parte analítica del método que permite un *ars inveniendi*, es decir, un procedimiento que nos permite separar lo accidental de lo sustancial, centrándonos en lo simple para poder conocerlo. La síntesis es un *ars demonstrandi* que pone lo que hemos conocido en conexión con lo anterior, bajo la forma de un sistema.

#### SUBSECTION 22.2

### Metafísica

---

De acuerdo con la concepción unitaria del saber de Descartes, la metafísica constituye las raíces del árbol del conocimiento. Por ello, Descartes decide aplicar sus cuatro reglas del método justamente en el campo de la metafísica (la filosofía). Ese es el proyecto que desarrolla en sus Meditaciones metafísicas de 1641. La primera regla del método le

indica que no debe “admitir como verdadero nada que no sea claro y distinto, evidente y necesario”. Por lo tanto, Descartes busca en la filosofía una verdad primera que tenga los caracteres de claridad y distinción que exige la primera regla del método.

Descartes hace premisa de lo que para Montaigne era conclusión: la duda en Descartes es “metódica”, no existencial; el escepticismo reinante de la época era su punto de partida, no de llegada. La duda, por tanto, y a diferencia de Montaigne, tiene un objeto bien definido en Descartes: partiendo de ella se trata de hallar una primera certeza para “levantar el edificio de una nueva Filosofía”. He aquí, en síntesis, el auténtico sentido de la duda metódica cartesiana: que ninguna verdad susceptible de duda puede ser principio de la filosofía.

### 22.2.1 La Teoría de las Tres Sustancias

Una sustancia es “una cosa que existe de tal manera que no necesita de ninguna otra cosa para existir”. En rigor, solo **Dios es sustancia en sentido absoluto**. No obstante, Descartes admite dos sustancias creadas, definidas por sus atributos esenciales:

1. **Sustancia Infinita (Dios)**. Atributo principal: **La Perfección**.
2. **Sustancia Pensante (*Res Cogitans*)**. Atributo principal: **El Pensamiento** (dudar, entender, afirmar, querer, imaginar, sentir). Es el *yo* descubierto en el *cogito*.
3. **Sustancia Extensa (*Res Extensa*)**. Atributo principal: **La Extensión** (longitud, anchura, profundidad). Es la esencia de toda realidad material o corpórea.

El mundo físico, incluido el cuerpo humano y los animales (considerados por Descartes autómatas complejo), se reduce a *res extensa*: pura geometría y movimiento, gobernado por leyes mecanicistas.

#### SUBSECTION 22.3

### Epistemología

Presentada la metafísica que Descartes trata de demostrar, podemos seguir a Descartes en su punto de partida: la epistemología.

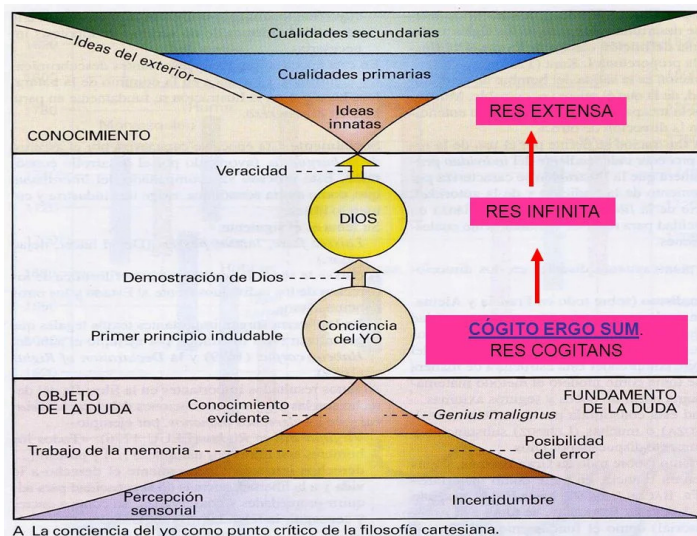
#### 22.3.1 La Duda Metódica

Para aplicar la primera regla y encontrar la primera evidencia, es necesario eliminar todos los prejuicios. Descartes emprende una duda metódica, universal e hiperbólica como instrumento. Se duda sucesivamente de:

- Los **sentidos**: Descartes se plantea si es posible fiarse de los sentidos para alcanzar un conocimiento seguro. Pero se encuentra con el ejemplo de las ilusiones ópticas (la refracción de la luz hace que una vara parezca torcida en el agua). Por ello Descartes encuentra que “es prudente no fiarse nunca por entero de quienes nos han engañado una vez”.
- La **distinción entre vigilia y sueño**: Ya que la realidad que experimentamos podría no ser más que un sueño, Descartes se da cuenta de que no es en absoluto posible distinguir el sueño de la vigilia. No obstante, hay algo que es verdad tanto en los sueños como en la vigilia: las matemáticas. Da igual si estoy en un sueño o no, una suma siempre será una suma. Pues, “duerma yo o esté despierto, dos más tres serán siempre cinco, y el cuadrado no tendrá más de cuatro lados”.

- Hasta de las **verdades matemáticas**, mediante la hipótesis del **genio maligno** (*genium malignum*): Descartes finge la hipótesis de que el ser humano habría podido ser creado por un Dios todopoderoso malvado. Ese Dios usaría todo su poder para engañarnos. Un ser así podría haber creado la mente de tal modo que nos equivocaríamos incluso en aquello que nos parece más evidente. Debido al genio maligno, *cuanto más cierto esté de algo, tanto más equivocado estoy*.

Evidentemente, la duda metódica no tiene otro sentido que ir “desbrozando” el camino hacia una primera certeza indiscutible. En efecto, aunque todo resulte dudoso, e incluso un genio maligno ponga toda su industria en engañarme, sin embargo, puedo estar seguro al menos de una cosa: de que pienso y, por tanto, soy. “Cogito ergo sum”. He aquí el conocimiento absolutamente cierto e indubitable que Descartes andaba buscando y el punto de partida de toda su filosofía: el “cogito” como principio del filosofar. Afirmaba Descartes que si Arquímedes había pedido un punto de apoyo para levantar el mundo, también él tendría derecho a pedir lo propio para levantar el edificio de una nueva filosofía.



A La conciencia del yo como punto crítico de la filosofía cartesiana.

Lo que hizo más bien fue “refundar” la filosofía misma, enfrentándose al escepticismo de la época desde la radicalidad del “cogito”. Por lo demás, cabe destacar que esta primera verdad indiscutible, el célebre “ego sum res cogitans”, no sería sino el resultado de una “intuición”, o si se quiere, una captación simple e inmediata del espíritu, tan clara y distinta, que no deja lugar a dudas. Como declara Descartes: “Un concepto de la mente pura y atenta que nace de la sola luz de la razón”. Con esto tenemos, por tanto, que la esencia última del método cartesiano es este aspecto intuitivo, la “simplex mentis inspectio”.

Esta primera verdad establece también el criterio de verdad: es verdadero todo aquello que se percibe con la misma claridad y distinción con la que percibo mi existencia como cosa pensante.

### 22.3.2 Clasificación de las Ideas

Al analizar el contenido de su mente, Descartes distingue tres tipos de ideas:

- **Ideas Adventicias:** Parecen provenir de la experiencia externa (ej.: el sonido de un trueno). Son sospechosas para la fundamentación.
- **Ideas Facticias:** Construidas por la imaginación a partir de otras ideas (ej.: un centauro).

- **Ideas Innatas:** Nacen con el pensamiento mismo, son claras y distintas, y constituyen el fundamento del conocimiento verdadero (ej.: la idea de Yo, de Pensamiento, de Perfección, de Infinito, de Dios).

Desde la certeza del *cogito*, Descartes busca recuperar el mundo exterior. Para ello, debe demostrar la existencia de un **Dios veraz** que garantice la fiabilidad de nuestras facultades cognoscitivas.

### 22.3.3 Demostraciones de la Existencia de Dios

Descartes ofrece dos pruebas principales, basadas en el análisis de la idea innata de Dios (Ser Perfecto e Infinito):

#### 1. Prueba por la Causalidad de la Idea de Perfección (Vía Causal):

- Tengo en mí la idea de un ser infinito y perfecto.
- Yo soy un ser finito e imperfecto.
- El principio de causalidad (la causa debe tener al menos tanta realidad formal como el efecto) exige que esta idea no pueda haber sido producida por mí, ni por nada finito.
- Luego, debe existir una causa adecuada a esta idea: un **Ser realmente infinito y perfecto** (Dios).

#### 2. Prueba Ontológica (por la Esencia Necesaria):

- La esencia de Dios implica la **existencia necesaria**, del mismo modo que la esencia del triángulo implica que sus ángulos sumen 180°.
- La existencia es una **perfección**. Un ser sumamente perfecto no puede carecer de perfección alguna.
- Por tanto, Dios existe necesariamente.

La existencia de un **Dios perfecto y veraz** es la segunda certeza fundamental. Su perfección excluye que sea un engañador; por tanto, **garantiza la fiabilidad de nuestra razón** cuando juzgamos con claridad y distinción, y permite recuperar la confianza en :wq:la realidad del mundo material.

#### SUBSECTION 22.4

### Antropología

---

El ser humano es un **compuesto problemático** de dos sustancias radicalmente heterogéneas: un **alma** (*res cogitans*) y un **cuerpo** (*res extensa*). Este **dualismo sustancial** es el núcleo de la antropología cartesiana.

#### 22.4.1 El Problema de la Interacción

La cuestión central es: ¿cómo pueden dos realidades de naturaleza opuesta (inmaterial/material, inextensa/extensa) **interactuar** e influirse mutuamente? En la experiencia común, parece claro que el alma mueve el cuerpo (ej.: decidir caminar) y el cuerpo afecta al alma (ej.: sentir dolor).

Para explicar esta interacción, Descartes postula un **punto de unión** en el cerebro: la **glándula pineal**. Allí, los "espíritus animales" (partículas materiales muy sutiles del cuerpo) transmitirían los impulsos sensoriales al alma, y las voliciones del alma moverían el cuerpo. Esta solución es **insatisfactoria** desde su propio marco metafísico, pues supone que una sustancia inextensa puede actuar localmente sobre lo extenso, violando las leyes de la física mecanicista que él mismo propuso.

SECTION 23

## Obras

---

SUBSECTION 23.1

---