

PROYECTO DOCENTE

Grigory E. Astrakharchik



JUNIO 2015

DEPARTAMENTO DE FÍSICA E INGENIERÍA NUCLEAR

Facultad de Informática de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya

ÍNDICE

Proyecto docente	5
La asignatura de Física	5
Programa de la asignatura.....	5
Organización de la asignatura y distribución horaria.....	8
Tema 1: Corriente continua.....	8
Tema 2: Corriente alterna	9
Tema 3: Electrónica y puertas lógicas	11
Tema 4: Ondas	13
Descripción detallada del temario.....	15
1. Corriente continua	15
1.1. Carga eléctrica.	15
1.2. Corriente eléctrica.	16
1.3. Diferencia de potencial.	16
1.4. Potencia.....	17
1.5. Resistencia. Ley de Ohm. Efecto Joule.....	17
1.6. Fuentes de alimentación.	19
1.7. Leyes de Kirchhoff.....	21
1.8. Asociación de resistencias.	22
1.9. Instrumentos de medida.....	23
1.10. Teorema de Thévenin.....	23
1.11. Condensadores.....	24
2. Corriente alterna	25
2.1. Transitorios: circuitos RC y RL.	25
2.2. Régimen estacionario del circuito RCL.....	26
2.3. Números complejos.....	28
2.4. Impedancia. Ley de Ohm.	28
2.5. Circuitos de corriente alterna.....	31

2.6. Potencia.	32
2.7. Superposición de señales. Ancho de banda.	34
2.8. Resonancia.	38
2.9. Filtros.....	38
3. Electrónica y Puertas Lógicas	39
3.1. Estructura electrónica de los átomos.	39
3.2. Teoría de la conducción: metales, aislantes, semiconductores.	41
3.3. Diodo de unión <i>p-n</i> : rectificador de corriente.	44
3.4. Diodo emisor de luz (LED).....	47
3.5. Diodo Zener: limitador de tensión.	48
3.6. Transistores MOSFET de enriquecimiento. Puertas lógicas.	49
3.7. Inversor CMOS.	52
3.8. Retraso y potencia en circuitos digitales.....	53
3.9. Lógica CMOS	53
4. Ondas.....	55
4.1 Tipos de ondas. Función de onda.	55
4.2 Ondas armónicas.	58
4.3. Ondas electromagnéticas. Densidad de energía. Intensidad.....	59
4.4 Espectro electromagnético.	62
4.5 Polarización. Pantallas de cristal líquido.	64
4.6 Reflexión y refracción. Fibras ópticas.....	66
4.7 Interferencias.....	68
4.8 Láser.	70
Prácticas de Laboratorio.....	72
Introducción.....	72
Programa	72
Práctica 0: Tratamiento de datos experimentales.....	73
Práctica 1: Funcionamiento del osciloscopio.....	73

Práctica 2: Análisis de Fourier y medidas en corriente continua.....	74
Práctica 3: Reglas de Kirchhoff.....	74
Práctica 4: Equivalente Thévenin de un circuito de corriente continua.....	75
Práctica 5: Corriente alterna: Circuitos RC, RL y RLC en serie.	75
Práctica 6: Diodos. Características y aplicaciones.....	76
Práctica 7: Transistores NMOS y PMOS: Caracterización y la puerta NOT	76
Práctica 8: Propagación e interferencia de ondas	77
Práctica 9: Redes de difracción.....	77
Experimentos en la clase de teoría.....	83
Experimentos	83
Filtros polarizadores y pantalla LCD.	83
Luz infrarroja.....	84
Transformada de Fourier de sonidos periódicos y no periódicos.	86
Experimentos virtuales	87
Tren de ondas	87
Evaluación	88
Bibliografía	89
Proyecto de investigación.....	Error! Bookmark not defined.
Introducción.....	Error! Bookmark not defined.
Estado actual.....	Error! Bookmark not defined.
Gas unitario	Error! Bookmark not defined.
Solitones en un gas unitario	Error! Bookmark not defined.
Sistemas componentes múltiples.....	Error! Bookmark not defined.
Objetivos de investigación	Error! Bookmark not defined.
Gas unitario	Error! Bookmark not defined.
Solitones en un gas unitario	Error! Bookmark not defined.
Sistemas componentes múltiples.....	Error! Bookmark not defined.
Bibliografía.....	Error! Bookmark not defined.

PROYECTO DOCENTE

La asignatura de Física

PROGRAMA DE LA ASIGNATURA

El objetivo principal de la asignatura es conseguir que los estudiantes profundicen en su comprensión de los temas de Física General que tienen una incidencia mayor en la Informática. Por este motivo, pretendemos completar los conocimientos de Física adquiridos en cursos anteriores. Concretamente, el programa es una introducción al electromagnetismo, a la teoría de circuitos, a las ondas electromagnéticas y a los fundamentos de los circuitos lógicos. Consideramos indispensable la realización de prácticas de laboratorio donde el estudiante pueda familiarizarse con la metodología de hacer medidas, y con los instrumentos básicos de laboratorio, como son el polímetro, el osciloscopio y los generadores de funciones.

El curso se estructura en cuatro temas y está completado con las prácticas de laboratorio. El Programa detallado de la asignatura es el siguiente:

1. Corriente continua

- 1.1. Carga eléctrica.
- 1.2. Corriente eléctrica.
- 1.3. Diferencia de potencial.
- 1.4. Potencia.
- 1.5. Resistencia. Ley de Ohm. Efecto Joule.
- 1.6. Fuentes de alimentación.
- 1.7. Leyes de Kirchhoff.
- 1.8. Asociación de resistencias.
- 1.9. Instrumentos de medida.
- 1.10. Teorema de Thévenin.

1.11. Condensadores.

2. Corriente alterna

2.1. Transitorios: circuitos RC y RL.

2.2. Régimen estacionario del circuito RCL.

2.3. Números complejos.

2.4. Impedancia. Ley de Ohm.

2.5. Circuitos de corriente alterna.

2.6. Potencia.

2.7. Superposición de señales. Ancho de banda.

2.8. Resonancia.

2.9. Filtros.

3. Electrónica y Puertas Lógicas

3.1. Estructura electrónica de los átomos.

3.2. Teoría de la conducción: metales, aislantes, semiconductores.

3.3. Diodo de unión $p-n$: rectificador de corriente.

3.4. Diodo emisor de luz (LED).

3.5. Diodo Zener: limitador de tensión.

3.6. Transistores MOSFET de enriquecimiento. Puertas lógicas.

3.7. Inversor CMOS.

3.8. Retraso y potencia en circuitos digitales.

3.9. Lógica CMOS.

4. Ondas

- 4.1 Tipos de ondas. Función de onda.
- 4.2 Ondas armónicas.
- 4.3 Ondas electromagnéticas. Densidad de energía. Intensidad.
- 4.4 Espectro electromagnético.
- 4.5 Polarización. Pantallas de cristal líquido.
- 4.6 Reflexión y refracción. Fibras ópticas.
- 4.7 Interferencias.
- 4.8 Láser.

Prácticas de Laboratorio

Los estudiantes deberán realizar algunas de las siguientes prácticas de laboratorio:

- 0. Tratamiento de datos experimentales.
- 1. Funcionamiento del osciloscopio y del polímetro.
- 2. Reglas de Kirchhoff.
- 3. Equivalente Thévenin de un circuito de corriente continua.
- 4. Diodos. Características y aplicaciones.
- 5. Transistores NMOS y PMOS. Caracterización y puerta NOT.
- 6. Corriente Alterna: Circuitos RC, RL, RLC serie.
- 7. Propagación e interferencia de ondas.

A continuación detallamos para cada Tema del curso cuales son los objetivos a seguir y la distribución de la carga lectiva en horas de cada una de las actividades docentes asociadas.

ORGANIZACIÓN DE LA ASIGNATURA Y DISTRIBUCIÓN HORARIA

Tema 1: Corriente continua

Actividades docentes:

<i>Actividad</i>	Teoría	Problemas	Laboratorio	Aprendizaje Autónomo	Aprendizaje Dirigido	Total
<i>Horas</i>	7	7	4	24.5	2	44.5

Examen parcial:

Examen de teoría y problemas donde se evaluarán los contenidos del primer tema (Corriente Continua), Semana 5 (Fuera del horario de clase)

<i>Actividad</i>	Teoría	Problemas	Laboratorio	Aprendizaje Autónomo	Aprendizaje Dirigido	Total
<i>Horas</i>	0	0	0	0	1.2	1.2

Objetivos:

1. Capacidad de usar las leyes de Kirchhoff para determinar las intensidades y tensiones en un circuito de corriente continua de una o de múltiples mallas.
2. Capacidad de calcular la potencia disipada o generada por cualquier elemento de un circuito de corriente continua.
3. Capacidad de determinar el circuito equivalente de Thévenin entre dos puntos

cualquiera de un circuito de corriente continua.

Descripción:

En este capítulo se estudiarán los conceptos relativos a la corriente eléctrica continua. Se iniciará el tema con un repaso de conceptos básicos de la teoría electromagnética, como la carga eléctrica, la ley de Coulomb, el campo eléctrico y la diferencia de potencial en un campo creado por una distribución discreta de cargas eléctricas. A continuación se definirá la intensidad de una corriente eléctrica en un hilo conductor, la diferencia de potencial entre dos de sus puntos, la resistencia eléctrica y la ley de Ohm. Se introducirá el concepto de potencia consumida por una resistencia y su transformación en calor (efecto Joule). Se introducirá la necesidad de tener una fuente de alimentación para mantener una corriente eléctrica continua en un circuito, se definirá la fuerza electromotriz y se evaluará la potencia generada por una fuente de fem. A continuación se presentarán las leyes de Kirchhoff y algún método avanzado para la resolución de circuitos más complejos, como el método de corrientes de malla. Se enunciará el teorema de Thévenin, sin su demostración, y se justificará su utilidad en el estudio de circuitos eléctricos. Se explicarán los aparatos de medida eléctrica fundamentales y sus reglas de conexión y funcionamiento. Para acabar el tema, se explicará el funcionamiento de un condensador eléctrico y se definirán su capacidad y energía almacenada.

Tema 2: Corriente alterna

Actividades docentes:

<i>Actividad</i>	Teoría	Problemas	Laboratorio	Aprendizaje Autónomo	Aprendizaje Dirigido	Total
<i>Horas</i>	7	7	3	24.5	2	43.5

Examen parcial:

Examen de teoría y problemas donde se evaluarán los contenidos del segundo tema (Corriente Alterna). Semana 8 (Fuera del horario de clase)

<i>Actividad</i>	Teoría	Problemas	Laboratorio	Aprendizaje Autónomo	Aprendizaje Dirigido	Total
<i>Horas</i>	0	0	0	0	1.2	1.2

Objetivos:

1. Capacidad de identificar la amplitud, frecuencia, fase y valor eficaz de una señal sinusoidal.
2. Capacidad de determinar la respuesta de diferentes elementos pasivos cuando están sometidos a señales periódicas.
3. Conocimiento del concepto de fasor para poder determinar la respuesta estacionaria de un circuito de corriente alterna.
4. Capacidad de cálculo de la potencia eléctrica de cualquier elemento de un circuito de corriente alterna y de corregir el factor de potencia de un circuito dado.
5. Capacidad de cálculo del efecto de diferentes tipos de filtros sobre señales compuestas por una superposición de frecuencias distintas.

Descripción:

En este capítulo se aborda el tema de la corriente alterna en su conjunto. Antes de entrar en corrientes sinusoidales se analizarán las corrientes transitorias en circuitos RC y RL. Para estos dos casos se establecerán las ecuaciones de evolución temporal de la intensidad de corriente en función del tiempo, introduciendo el concepto fundamental de la constante de tiempo del circuito. A continuación se abordará el comportamiento temporal de la intensidad de corriente en circuitos RCL alimentados por una corriente

alterna de tipo sinusoidal. Se introducirán los conceptos de reactancia, impedancia y desfase. Se hará un repaso del álgebra de los números complejos para pasar a continuación a escribir la ley de Ohm en notación compleja. Mediante esta transformación se hace posible la resolución de circuitos de corriente alterna de topología parecida a los resueltos en el capítulo de corriente continua. Se continuará con el cálculo de la potencia consumida, instantánea y media, y se definirá el factor de potencia de un circuito y su corrección técnica. Debido a su importancia en el mundo de las comunicaciones se explicará el fenómeno de la superposición de señales y el concepto de ancho de banda. Para finalizar, se discutirá el fenómeno de la resonancia y el diseño de filtros de señales de tipo pasa altos y pasa bajos.

Tema 3: Electrónica y puertas lógicas

Actividades docentes:

<i>Actividad</i>	Teoría	Problemas	Laboratorio	Aprendizaje Autónomo	Aprendizaje Dirigido	Total
<i>Horas</i>	7	7	3	24.5	2	43.5

Examen parcial:

Examen de teoría y problemas donde se evaluarán los contenidos del tercer tema (Electrónica y puertas lógicas), Semana 11 (Fuera del horario de clase)

<i>Actividad</i>	Teoría	Problemas	Laboratorio	Aprendizaje Autónomo	Aprendizaje Dirigido	Total
<i>Horas</i>	0	0	0	0	1.2	1.2

Objetivos:

1. Conocimiento de los fundamentos de la teoría de la conducción, particularmente en el caso de los semiconductores.
2. Capacidad de determinar las intensidades y potenciales eléctricos en circuitos sencillos que contengan diodos.
3. Capacidad de describir correctamente los rectificadores de corriente básicos.
4. Capacidad de determinar las intensidades y potenciales eléctricos en circuitos sencillos que contengan transistores.
5. Conocimiento de como se representa y manipula la información digital mediante circuitos electrónicos.
6. Capacidad de determinar que puerta lógica representa un circuito electrónico determinado.

Descripción:

Este tema está dedicado a proporcionar a estudiantes unas nociones básicas sobre electrónica y la constitución física de puertas lógicas básicas. Se iniciará el capítulo con una descripción de la estructura electrónica de los átomos y de los diferentes comportamientos de la materia respecto a la conducción eléctrica. Tras definir la estructura de bandas de los materiales semiconductores intrínsecos se comentarán las características eléctricas de semiconductores dopados o extrínsecos de tipo n y de tipo p . Se explicará el funcionamiento del diodo de unión, del diodo Zener y del diodo LED. A continuación, se razonará de modo cualitativo cual es el comportamiento eléctrico de una doble unión $p-n$ para justificar su comportamiento como un transistor. Debido a su creciente importancia en la fabricación de chips se introducirán los transistores de efecto campo (FET). Se describirán las ecuaciones y regímenes de funcionamiento del transistor MOSFET y se resolverán ejemplos característicos. Para finalizar el tema, se explicará como se pueden construir las puertas lógicas elementales mediante el uso de diodos y transistores.

Tema 4: Ondas

Actividades docentes:

<i>Actividad</i>	Teoría	Problemas	Laboratorio	Aprendizaje Autónomo	Aprendizaje Dirigido	Total
<i>Horas</i>	7	7	3	24.5	2	43.5

Examen parcial:

Examen de teoría y problemas donde se evaluarán los contenidos del cuarto tema (Ondas), Semana 14 (Fuera del horario de clase)

<i>Actividad</i>	Teoría	Problemas	Laboratorio	Aprendizaje Autónomo	Aprendizaje Dirigido	Total
<i>Horas</i>	0	0	0	0	1.2	1.2

Objetivos:

1. Capacidad de definir el concepto de onda y clasificar las ondas en función de diferentes criterios.
2. Capacidad de determinar la función de onda correspondiente a una onda armónica unidimensional y a una onda electromagnética armónica plana.
3. Conocimiento de las características básicas del espectro electromagnético.
4. Capacidad de cálculo de la intensidad de energía transportada por un haz de luz y la energía de los fotones que lo forman.
5. Capacidad de determinar los patrones de interferencia de dos ondas coherentes.

6. Capacidad de determinar las direcciones de los haces de luz reflejada y refractada cuando la luz cambia de medio de propagación.

Descripción:

El último tema del Programa se dedica al estudio de las ondas y, más particularmente, de las ondas electromagnéticas. Se iniciará el capítulo con nociones generales del movimiento ondulatorio en mecánica y se justificará la expresión matemática general de una onda mediante la introducción de la función de onda. A través de la relación entre las derivadas espaciales y temporales de la función de onda se llegará a la ecuación de las ondas. Se analizará la forma matemática de la función de onda de tipo armónico con su doble periodicidad en tiempo y espacio. A continuación se justificará la existencia de las ondas electromagnéticas y se calculará su densidad de energía e intensidad. Se comentará el espectro electromagnético con las diferentes regiones con nombre específico: visible, ultravioleta, infrarrojo, etc. Se explicará el fenómeno de la polarización de la luz y su aplicación en la fabricación de pantallas de cristal líquido. Se deducirán las leyes de la reflexión y refracción de la luz. Se prestará especial atención al fenómeno de la reflexión total y a su aplicación en las fibras ópticas. Se concluirá el tema con la descripción del fenómeno de las interferencias para el caso más sencillo de una rendija doble y el funcionamiento cualitativo de un dispositivo láser.

Examen final:

Examen final de teoría y problemas al que pueden acceder los alumnos si no han superado la evaluación continua o quieren tener la oportunidad de mejorar nota (los alumnos interesados deben solicitar con diez días de antelación). Se evalúan todos los cuatro temas de que está compuesta la asignatura, y por tanto todos los contenidos específicos. Semana 15-18 (Fuera del horario de clase)

<i>Actividad</i>	Teoría	Problemas	Laboratorio	Aprendizaje Autónomo	Aprendizaje Dirigido	Total
<i>Horas</i>	0	0	0	0	2.5	2.5

DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL TEMARIO

1. Corriente continua

1.1. Carga eléctrica.

En este primer tema se introducen las bases de la física electrostática y de física de corriente continua.

En primera instancia se introduce el concepto de carga eléctrica como una propiedad básica de la materia (como lo son la masa, el espín, etcétera), la cual es sensible a la **ley de Coulomb**, que se establece experimentalmente. La ley de Coulomb es una relación fundamental de la electrostática, y establece la expresión de la fuerza que ejerce una carga eléctrica sobre otra. A continuación se destacan las propiedades fundamentales de la carga eléctrica. Se comenta que existen dos tipos de carga eléctrica (positiva y negativa), que existe una unidad mínima de carga (la del electrón, e), y la **cuantización** de la carga, lo que supone que la carga eléctrica de cualquier sistema es un número entero de carga fundamental.

Se estudia el **modelo clásico del átomo** (de Rutherford). En este modelo el átomo está formado por dos partes: (a) núcleo, muy pequeño, con toda la carga eléctrica positiva y casi toda la masa del átomo (b) “corteza” de electrones, girando a gran velocidad alrededor del núcleo. La carga q de un átomo de N_p protones, N_n neutrones y N_e electrones es $q = e(N_p - N_e)$. Los electrones externos pueden ser utilizados en la formación de enlaces químicos y eléctricos, y a los cuales se les denomina como **electrones de valencia**.

Se determina la fuerza eléctrica que ejerce un conjunto arbitrario de cargas sobre otra carga, estando todas ellas fijas en sus posiciones. Para ello se introduce el **teorema de superposición**, que establece que la fuerza total que actúa sobre un cuerpo es la suma vectorial de todas las fuerzas que se ejercen sobre él.

Se introduce el **campo eléctrico E** en la relación con la fuerza F que actúa sobre una carga de prueba q , $F = qE$. Se demuestra que el campo eléctrico satisface el teorema de superposición.

Se describe el concepto de visualización geométrica de campo eléctrico utilizando las **líneas de campo** eléctrico. Se explican ejemplos de las líneas de campo producido por una carga (de carga positiva o negativa), dos cargas puntuales (del mismo signo o de signos opuestos de carga) y de dos planos cargados (condensador).

1.2. Corriente eléctrica.

Se define un **conductor** como aquel material en el que la presencia de un campo eléctrico origina un desplazamiento de cargas eléctricas. Un ejemplo notable son los **metales**, donde las cargas contenidas en las capas electrónicas más lejanas del núcleo atómico poseen una energía de ionización muy baja.

Se introduce la conducción eléctrica como el movimiento de partículas eléctricamente cargadas a través de un medio de transmisión (conductor eléctrico). Entonces, el movimiento de las cargas constituye una **corriente eléctrica**. Se precisa que la corriente eléctrica puede ser debida a: (a) electrones (ej., en metales) (b) electrones y huecos (ej., semiconductores) (c) iones (ej., electrólitos).

Históricamente, el sentido de la corriente viene definido como la dirección de movimiento de una carga positiva. En los metales los portadores de carga son electrones de carga negativa (-), los cuales fluyen físicamente en sentido contrario de la corriente.

1.3. Diferencia de potencial.

Se revisa un cálculo de energía potencial en un problema de mecánica, donde el trabajo W está relacionado con las fuerzas que actúan sobre un cuerpo. En el caso especial de la fuerza neta constante \mathbf{F} , y el desplazamiento \mathbf{d} , el trabajo es el producto escalar $W = \mathbf{F} \cdot \mathbf{d} = Fd \cos(\vartheta)$, donde ϑ es el ángulo entre vectores \mathbf{F} y \mathbf{d} . Para un caso más genérico, se explica la expresión del trabajo como una integral de camino.

Se estudia el caso de las fuerzas conservativas y se determina que el trabajo realizado por una fuerza conservativa no depende de la trayectoria, sino que depende exclusivamente de la propia fuerza y de los puntos inicial y final de la trayectoria. Ello sugiere que las fuerzas conservativas llevan asociadas una propiedad que varía de un punto del espacio a otro, que se interpreta como una energía potencial.

Una vez revisado el concepto de la energía potencial en mecánica, se procede a la aplicación en el caso de las fuerzas eléctricas, partiendo de la relación entre la fuerza que actúa sobre una carga y el campo eléctrico. Por integración a lo largo de una trayectoria arbitraria que une dos puntos, se determina la expresión de la diferencia de energía potencial eléctrica asociada al desplazamiento de una carga desde un punto inicial hasta un punto final sometida a la acción de las fuerzas creadas por un conjunto de cargas estacionarias que interaccionan eléctricamente con ella. Partiendo de este resultado se deduce la expresión de la **diferencia de potencial** en un campo eléctrico.

Se introduce el concepto de potencial eléctrico. Éste se obtiene de analizar la expresión de la diferencia de energía potencial eléctrica al mover una carga puntual sometida a la acción del campo eléctrico. Se establece que el potencial eléctrico es igual a la energía potencial por unidad de carga, y que por tanto puede expresarse la diferencia de potencial entre dos puntos como la circulación del campo eléctrico a través de cualquier trayectoria que los una, cambiada de signo. El resultado no depende de la trayectoria al ser el campo eléctrico conservativo.

1.4. Potencia.

La definición de la potencia en circuitos eléctricos es siempre la misma que en la mecánica. Potencia P es la cantidad de trabajo W por unidad de tiempo t , $P = W / t$. El trabajo, producido por el campo eléctrico al desplazar una carga q entre dos puntos con diferencia de potencial V , es $W = q \cdot V$. La carga eléctrica desplazada en una unidad de tiempo está relacionada con la intensidad eléctrica $q = I \cdot t$. Entonces, la potencia es proporcional a la corriente I y a la diferencia de potencial V , $P = V \cdot I$.

Se precisa que la fórmula obtenida sigue válida no solo para componentes óhmicos, pero también para elementos no lineales, por ejemplo, diodos o fuentes de tensión.

1.5. Resistencia. Ley de Ohm. Efecto Joule.

Introducimos el concepto de resistencia eléctrica R como la medida de la oposición que ejerce un material al flujo de carga a través de él. Se discute que en muchos materiales la caída de potencial V es linealmente proporcional a la intensidad de corriente I , siendo el coeficiente de proporción la **resistencia** R . Materiales **óhmicos** tienen una resistencia constante la cual no depende de la caída de potencial ni de la intensidad.

La **resistividad** ρ expresa la relación entre la resistencia de un conductor y su tamaño $R = \rho L/S$, siendo: L – la longitud [m], S – la sección [mm^2]. Un valor alto de resistividad ρ indica que el material es mal conductor mientras que uno bajo indicará que es un buen conductor. La **conductividad** σ es la inversa de la resistividad ρ : $\sigma = 1 / \rho = L / (R S)$.

En general, la resistividad eléctrica ρ de los metales aumenta con la temperatura T . A altas temperaturas, la resistencia de un metal aumenta linealmente con la temperatura. A temperaturas muy bajas la resistividad normalmente alcanza un valor constante, conocido como la resistividad residual. El valor de la resistividad residual de un metal se decide en gran parte por su concentración de impurezas.

La resistividad eléctrica ρ cambia con la temperatura. Si la temperatura T no varía de forma considerable, una aproximación lineal es suficiente: $\rho(T) = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)]$, donde T_0 es una temperatura de referencia (por lo general la temperatura ambiente), ρ_0 es la resistividad a temperatura T_0 , α es un coeficiente empírico provisto de datos de medición.

Los átomos o iones en los metales vibran con una amplitud creciente a medida que aumenta la temperatura. Por lo tanto, las colisiones de electrones con ellos se hacen más frecuentes. Esto significa un aumento de la ρ con un aumento de la temperatura. En **semiconductores** y **aislantes** el número de portadores de carga libres aumenta exponencialmente con la temperatura, $\rho(T) = \rho_0 \exp\{E_g / k_B T\}$. En los semiconductores, $E_g \sim 1$ eV; ρ no es muy alta. En los aislantes, $E_g \gg 1$ eV; resistividad ρ es muy alta.

La resistencia de un **superconductor** desciende bruscamente a cero cuando el material se enfría por debajo de su temperatura crítica. Una corriente eléctrica puede persistir indefinidamente sin fuente de alimentación. La superconductividad es un fenómeno de la mecánica cuántica.

Otro ejemplo importante de un material no óhmico es un diodo. Por debajo de cierta diferencia de potencial, un diodo se comporta como un circuito abierto (no conduce). Por encima se comporta como un circuito cerrado con una resistencia eléctrica muy pequeña. Se discute la curva característica (I, V) de un diodo.

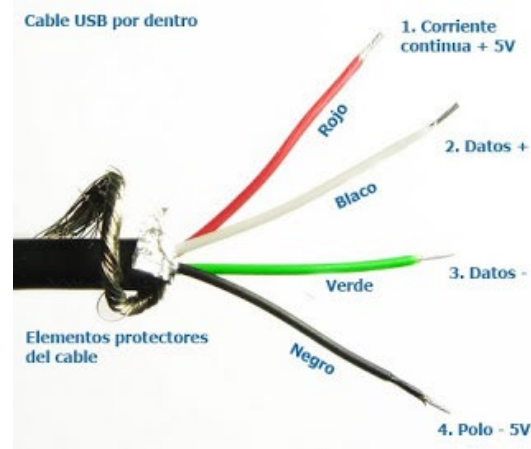
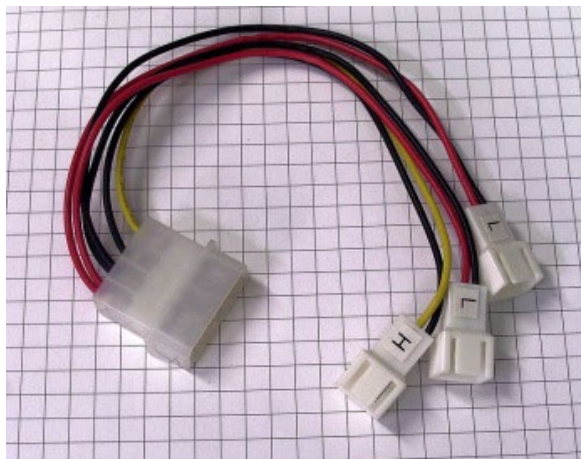
Cuando corriente eléctrica I atraviesa una resistencia R , los átomos sufren choques de electrones. Una parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor Q . Este fenómeno es conocido como **efecto Joule**. El calor disipado es $Q = P t = I V t = R I^2 t$.

1.6. Fuentes de alimentación.

Introducimos los símbolos electrónicos de varios elementos (conexión, resistencia, condensador, bobina, etcétera). Un **circuito** es una red eléctrica que contiene una trayectoria cerrada. Una red eléctrica es una interconexión de dos o más componentes, tales como resistencias, inductores, y condensadores, fuentes, diodos, etcétera. Los circuitos que contienen solo fuentes, componentes lineales (resistores, condensadores, inductores), pueden analizarse por métodos algebraicos para determinar su comportamiento en corriente directa o en corriente alterna.

La **fuerza de tensión** es un elemento activo que es capaz de generar una diferencia de potencial $V = V_A - V_B$ entre sus bornes (A y B) y proporcionar una corriente eléctrica. Se presenta el símbolo electrónico de una fuente. El trazo más largo y más fino indica el polo positivo (+), mientras que el trazo más corto y más grueso indica el polo negativo (-).

Se discute la convención de colores para marcar contactos positivos con rojo y negativos con azul. Como un ejemplo se consideran colores de un cable USB: rojo +5V, negro – tierra, otros dos datos (D+, D-).



Introducimos dos modelos de descripción de las fuentes, ideal y no ideal. Una **fuerza de tensión ideal** es aquella que genera una diferencia de potencial entre sus terminales constante e independiente de la carga que alimente. En otras palabras, es una fuente de tensión con resistencia interna cero, donde toda la tensión va a la carga R . La **fuerza de tensión ideal** es un elemento utilizado en la teoría de circuitos para el

análisis y la creación de modelos que permitan analizar el comportamiento de componentes electrónicos o circuitos reales.

A diferencia de las fuentes ideales, en una fuente real la diferencia de potencial entre bornes o la corriente que proporcionan, depende de la carga a la que estén conectadas. Una **fuerza de tensión real** se puede considerar como una fuente de tensión ideal, ε , en serie con una resistencia r , a la que se denomina resistencia interna de la fuente. En circuito abierto, la tensión entre los bornes A y B ($V_A - V_B$) es igual a ε , pero si entre los mencionados bornes se conecta una carga, R , la tensión pasa a ser: $V_A - V_B = \varepsilon - r I$, donde ε es la **fuerza electromotriz** (fem) y es una característica de fuente de tensión.

Una fuente real no puede entregar toda la potencia a la carga R que alimente debido a su resistencia interna r . En la fuente real de tensión: la intensidad de corriente es $I = \varepsilon / (R+r)$, la potencia consumida $P_{consumida} = \varepsilon I = (R+r) I^2$, la potencia entregada (útil) $P_{entregada} = R I^2$. Se denomina **rendimiento** η de la fuente a la relación entre potencia entregada y la total: $\eta = P_{entregada} / P_{consumida} = R / (R+r)$.

Un **cortocircuito** se produce cuando la fuente de tensión viene conectada a una resistencia cero. Eso puede provocar un paso de corriente tan alto que supera sus posibilidades de conducir la corriente sin deteriorarse. La intensidad de cortocircuito es $I_{cc} = \varepsilon / r$. El calor disipado por efecto de Joule es $Q = r I_{cc}^2 t = \varepsilon^2 t / r$ y la potencia disipada: $P = \varepsilon^2 / r$. Se consideran ejemplos de varias fuentes de tensión con típicos valores de la fem y de la resistencia interna: pila AA ($\varepsilon = 1.5\text{V}$, $r = 1\Omega$), batería de automóvil ($\varepsilon = 12\text{V}$, $r = 0.1\Omega$) y una fuente de alimentación de laboratorio ($\varepsilon = 20\text{V}$, $r = 0.01\Omega$).

Se discute que la resistencia interna hace que la diferencia de potencial en los bornes de la fuente no ideal $V_A - V_B$ no coincida con el valor de la fem ε y es más pequeña. La diferencia es la caída de tensión en la resistencia interna, $V_A - V_B = \varepsilon - r I$.

Si la **batería** es **reversible** también se puede cargarla. En este caso actúa como receptor. La corriente entra por el polo (+) y sale por el (-). La diferencia de potencial entre los dos terminales es: $V_A - V_B = \varepsilon + r I$ y es más grande que la fem.

Para el caso de las baterías se define la **capacidad de batería** q como la cantidad de carga que se le puede suministrar. Generalmente se expresa en A·h ($1 \text{ A}\cdot\text{h} = 3600 \text{ C}$). Por tanto, la energía total acumulada W en una batería de fem ε es $W = \varepsilon q$. El tiempo que tarda la batería en descargarse, o en el caso de un proceso de carga, a cargarse, vale $t = W/P = (\varepsilon q) / (\varepsilon I) = q/I$.

1.7. Leyes de Kirchhoff.

Las leyes de Kirchhoff fueron formuladas por Gustav Kirchhoff en 1845, cuando aún era estudiante. Son ampliamente utilizadas en ingeniería eléctrica para obtener los valores de la corriente y el potencial en cada punto de un circuito eléctrico. Estas leyes permiten resolver los circuitos utilizando el conjunto de ecuaciones al que ellos responden.

Definiciones:

- **Nodo:** cualquier punto donde dos o más elementos tienen una conexión común.
- **Rama:** conjunto de todos los elementos comprendidos entre dos nodos consecutivos con la misma intensidad de corriente
- **Malla:** cualquier camino cerrado en un circuito eléctrico

Primera ley de Kirchhoff (ley de nodos): En cualquier nodo, la suma de todas las corrientes I_i que pasan por el nodo es igual a cero: $I_1 + I_2 + I_3 + \dots = 0$. De forma equivalente, la suma de las corrientes que entran en ese nodo es igual a la suma de las corrientes que salen. La ley se basa en el principio de la conservación de la carga.

Segunda ley de Kirchhoff (ley de mallas): en un lazo cerrado, la suma de todas las caídas de tensión es igual a la tensión total suministrada: $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots = R_1 I_1 + R_2 I_2 + \dots$. La ley se basa en el principio de la conservación de la energía.

El procedimiento para resolver circuitos lineales es:

1. Localizar los nodos y mallas del circuito
2. Asignar un sentido arbitrario a la corriente de cada malla
3. Aplicar la ley de nodos, teniendo en cuenta si las corrientes salen o entran a los nodos.
4. Aplicar la ley de mallas, teniendo en cuenta que:
 - las f.e.m. se consideran positivas si al recorrer la malla primero encontramos el polo (-) y luego el (+)
 - la caída de tensión en una resistencia es positiva si el sentido de recorrido y el de la corriente coinciden, en caso contrario es negativa.
5. Resolver las ecuaciones

Se discute el cálculo de diferencias de potencial separando un rama del circuito en elementos diferentes. Así hay que sumar las diferencias de potencial producidos por fem

con la caída de tensión en las resistencias. Por ejemplo, cuando hay tres puntos A, B y C en una malla, $V_A - V_C = (V_A - V_B) + (V_B - V_C)$.

Es importante sumar la contribución de cada elemento con un signo correcto. Potencial eléctrico en un punto de un circuito representa la energía que posee cada unidad de carga al paso por dicho punto.

- a) Entonces, cuando la corriente pasa por una **resistencia** el potencial eléctrico disminuye, porque hay consumo de energía, lo que se manifestará como trabajo realizado en dicho circuito (calentamiento en una resistencia, luz). Para eso podemos hablar de **caída de tensión**.
- b) Considerando la diferencia de potencial en una **fem** hay que acordarse de que el polo positivo tiene potencial más alto.

1.8. Asociación de resistencias.

Para entender cómo funciona el cálculo de asociación de resistencias, primero introducimos el concepto de una resistencia equivalente. Se denomina **resistencia equivalente** de una asociación respecto de dos puntos A y B, a aquella que conectada a la misma diferencia de potencial, V_{AB} , demanda la misma intensidad, I .

Dos o más resistencias se encuentran conectadas **en serie** cuando al aplicar al conjunto una diferencia de potencial, todas ellas son recorridas por la misma corriente. La resistencia equivalente tiene la diferencia de potencias entre los extremos (A y B), $V_{AB} = R \cdot I$, donde I es la intensidad que circula por el circuito. Por la segunda ley de Kirchoff por cada resistencia circula la misma corriente: $V_{AB} = (R_1 + R_2 + \dots) \cdot I$. Entonces la resistencia equivalente a todas ellas es igual a la suma de cada una de las resistencias, $R = R_1 + R_2 + \dots$.

Dos o más resistencias se encuentran **en paralelo** cuando tienen dos terminales comunes de modo que al aplicar al conjunto una diferencia de potencial, V_{AB} , todas las resistencias tienen la misma caída de tensión, V_{AB} . La resistencia equivalente es igual a la inversa de la suma de las inversas de cada una de las resistencias.

En un caso importante de asociación en paralelo de dos resistencias R_1 y R_2 la resistencia equivalente es $R = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$. Otro ejemplo práctico es asociación de N resistencias iguales en paralelo, la resistencia equivalente es N veces más pequeña.

1.9. Instrumentos de medida.

En prácticas de laboratorio utilizamos el **polímetro** como el instrumento principal para medir propiedades de los circuitos. Es un instrumento eléctrico para medir magnitudes eléctricas activas como:

- a) corrientes, i.e. función de amperímetro
- b) potenciales (tensiones), función de voltímetro, o pasivas como
- c) resistencias (ohmímetro), capacidades y otras.

Las medidas pueden realizarse para corriente continua o alterna.

Un **amperímetro** es un instrumento que sirve para medir la intensidad de corriente que está circulando por un circuito eléctrico. Hemos de conectar el amperímetro **en serie**. Así, toda la corriente que circula por la rama va a pasar antes por el amperímetro. Los amperímetros tienen una resistencia interna muy pequeña (típicamente, menor de 1 ohmio), con la finalidad de que su presencia no disminuya la corriente a medir cuando se conecta a un circuito eléctrico.

Un **voltímetro** es un instrumento que sirve para medir la diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito eléctrico. Hemos de conectar el voltímetro **en paralelo**, entre los puntos donde tratamos de efectuar la medida. El voltímetro debe poseer una resistencia interna lo más alta posible, a fin de que no produzca un consumo apreciable, lo que daría lugar a una medida errónea de la tensión.

Un **ohmímetro** (óhmetro) es un instrumento para medir la resistencia eléctrica. El diseño de un ohmímetro se compone de una pequeña batería para aplicar un voltaje V a la resistencia bajo medida, para luego mediante un amperímetro medir la corriente I que circula a través de la resistencia R . El valor de la resistencia es $R = V/I$.

1.10. Teorema de Thévenin.

Para poder simplificar una parte del circuito es muy útil el **teorema de Thévenin**.

Una parte de un circuito eléctrico lineal entre dos terminales A y B puede sustituirse por un circuito equivalente que esté constituido únicamente por una fem \mathcal{E}_{Th} en serie con una resistencia R_{Th} .

Se explica la validez del teorema de Thévenin:

- a) Es válido en circuitos lineales formados por generadores y resistencias.
- b) Es válido en corriente alterna.
- c) Es válido en circuitos con condensadores y bobinas.
- d) No es válido en circuitos con diodos o transistores, ya que en este caso la resistencia varía con la intensidad o la tensión de forma no lineal (propiedades de semiconductores).

El cálculo analítico o la medida experimental consisten en encontrar equivalente de Thévenin para la fem ε_{Th} y la resistencia R_{Th} . La **tensión de Thévenin** ε_{Th} se define como la tensión que aparece entre los terminales cuando se desconecta la resistencia de la carga (circuito abierto). Para obtener la resistencia de Thévenin, R_{Th} , desconectamos la carga del circuito y anulamos las fuentes de tensión sustituyéndolas por un cortocircuito. Así, una fuente de tensión ε de resistencia interna r viene cambiada por una resistencia r , mientras una fuente ideal de tensión ε (resistencia interna 0) viene cambiada por una conexión de resistencia 0.

Derivamos el teorema de la **máxima transferencia de potencia**, para establecer que, dada una fuente con una resistencia de fuente fija, la resistencia de carga que maximiza la transferencia de potencia es aquella con un valor óhmico igual a la resistencia de fuente. Por ejemplo, en circuitos con antenas hay que adaptar o emparejar las impedancias, lo que consiste en hacer que la impedancia de salida de un origen de señal sea igual a la impedancia de entrada de la carga a la cual se conecta. El fin práctico es conseguir la máxima transferencia de potencia y aminorar las pérdidas de potencia por reflexiones desde la carga.

1.11. Condensadores.

La capacidad de un **condensador plano** de dos placas conductoras planas de tamaño (área) A con cargas totales $+q$ y $-q$, separadas por una distancia d es $C = \varepsilon \varepsilon_0 A / d$, donde la permitividad del vacío es $\varepsilon_0 \approx 8,85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ y ε es la constante dieléctrica (permitividad relativa del material dieléctrico entre las placas).

Para obtener la energía eléctrica almacenada en un condensador hay que analizar el proceso de la carga del condensador. Cuando la diferencia de potencial entre las placas es V , la carga es de $q=C \cdot V$. El trabajo necesario para incrementar en dq la carga del

condensador será $dW=V \cdot dq=q \cdot dq/C$. El trabajo total W , realizado en el proceso de carga, mientras esta aumenta desde cero hasta su valor final Q es un integral de 0 a Q de $q \cdot dq/C$. Como el resultado obtenemos que la **energía** eléctrica almacenada en un **condensador** $W= Q^2/(2C)=CV^2/2$.

La **rigidez dieléctrica** es el valor límite del campo eléctrico E_c , en el cual un material pierde su propiedad aisladora. Esto limita la carga que se puede almacenar en las placas de un condensador. La ruptura dieléctrica se produce cuando salta una chispa en el vacío, o quemando el dieléctrico. Se enseñan algunos valores reales de la rigidez dieléctrica en varias sustancias. Ej., Aire (0.4–3.0) MV/m, vidrio de ventana (9.8–13.8) MV/m, agua ultra pura 30 MV/m, SiO₂, más de 1000 MV/m.

2. Corriente alterna

La electrónica es la rama de la física y la especialización de la ingeniería que estudia y emplea sistemas cuyo funcionamiento se basa en la conducción y el control del flujo microscópico de los electrones u otras partículas cargadas eléctricamente.

La electrodinámica es la rama del electromagnetismo que trata de la evolución temporal en sistemas donde interactúan campos eléctricos y magnéticos con cargas en movimiento.

2.1. Transitorios: circuitos RC y RL.

Los circuitos de primer orden son circuitos que contienen solamente un componente que almacena energía (puede ser un condensador o inductor), y que además pueden describirse usando solamente una ecuación diferencial de primer orden.

Los dos circuitos relevantes de primer orden son:

- a) circuito RC (Resistor y Condensador)
- b) circuito RL (Resistor e Inductor)

En **circuitos resistivos**, un cambio del voltaje en el circuito produce un cambio inmediato en la intensidad de corriente, es decir $V(t) = R \cdot I(t)$.

En **circuitos RC** la presencia del condensador hace que se requiera un tiempo, es decir hay un **régimen transitorio**, para llegar de nuevo al equilibrio (régimen permanente).

Consideramos un circuito compuesto de una resistencia R conectada en serie con un condensador C y fem ε . La carga del condensador depende del voltaje V sobre las placas, $q(t) = C \cdot V(t)$. La intensidad de corriente es su primera derivada, $I(t) = dq/dt = C \cdot dV/dt$. Entonces, la dependencia temporal de la carga viene descrita por la ecuación diferencial lineal de primer orden, $dq/dt + q / (R C) = \varepsilon / R$. La solución general para la carga del condensador es $q(t) = A \cdot \exp \{ - t / (R C) \} + B$. Las constantes A y B vienen determinadas por los estados inicial, $t = 0$, y final del circuito, $t \rightarrow \infty$. La solución general para la intensidad de la corriente es $I = dq / dt = - A / (R C) \cdot \exp \{ - t / (R C) \}$. Los valores de las constantes son diferentes para el proceso de carga o de descarga del condensador.

En el **proceso de descarga** la condición inicial es $q(0) = 0$ y $A = -B = -VC$ y la final $q(\infty) = VC$ y $B = VC$. Entonces, la solución para la carga q en el condensador es $q(t) = VC \cdot [1 - \exp \{ - t / (R C) \}]$ y para la intensidad de corriente es $I(t) = V / R \cdot \exp \{ - t / (R C) \}$.

En el **proceso de carga** los límites del proceso son: la condición inicial $q(0) = VC$ y $A = VC$ y la condición final $q(\infty) = 0$ y $B = 0$. La solución es $q(t) = VC \cdot \exp \{ - t / (R C) \}$ para la carga q en el condensador y $I(t) = - V / R \cdot \exp \{ - t / (R C) \}$ para la intensidad de corriente.

En ambos casos la intensidad decae exponencialmente. Es decir, el cambio de la carga es máximo en el momento inicial y es cero para tiempos asintóticamente grandes.

Matemáticamente, la intensidad nunca es exactamente cero, entonces no podemos introducir un tiempo cuando la intensidad sea exactamente nula. Pero hay un tiempo característico del decaimiento τ , $I(t) = I(0) \exp \{ - t / \tau \}$. La **constante de tiempo** de un circuito RC es $\tau_c = RC$. En el proceso de descarga, pasado una unidad de constante de tiempo la carga (y la intensidad) son $q(\tau_c)/q(0) = I(\tau_c)/I(0) = \exp \{ -1 \} = 0.37$, es decir 37% respecto el valor inicial. Cuanto más grande es la constante de tiempo, más lenta es la descarga (por ejemplo, resistencia más grande o la capacidad del condensador más grande).

2.2. Régimen estacionario del circuito RCL.

Un **solenoid** es un dispositivo físico capaz de crear una zona de campo magnético uniforme. Un ejemplo es el de una bobina de hilo conductor aislado y enrollado helicoidalmente.

Autoinducción es un fenómeno por el cual en un circuito eléctrico una corriente eléctrica variable genera una fuerza electromotriz o voltaje inducido, que se opone al cambio del flujo de la corriente.

El campo magnético B producido por la corriente I que recorre el solenoide de N espiras, de longitud l y de sección S es $B = \mu_0 N I / l$. Este campo atraviesa las espiras del solenoide. El flujo de dicho campo a través de todas las espiras del solenoide se denomina **flujo del campo magnético** Φ . En un solenoide $\Phi = N B S = \mu_0 N^2 S I / l$.

Se denomina **coeficiente de autoinducción** L al cociente entre el flujo propio Φ y la intensidad I , $L = \Phi / I = \mu_0 N^2 S / l$. Del mismo modo que la capacidad, el coeficiente de autoinducción solamente depende de la geometría del circuito y de las propiedades magnéticas de la sustancia que se coloque en el interior del solenoide. La autoinducción de un solenoide de dimensiones fijas es mucho mayor si tiene un núcleo de hierro que si se encuentra en el vacío.

Cuando la intensidad de la corriente I cambia con el tiempo, se **induce una f.e.m.** en el propio circuito **que se opone** a los cambios de flujo, es decir de intensidad.

Derivando respecto al tiempo la expresión del flujo Φ (**Ley de Faraday**) $\varepsilon_L = - d\Phi / dt = -L dI / dt$. La fem autoinducida ε_L siempre actúa en el sentido que se opone a la variación de corriente.

El **circuito RL** está compuesto por una resistencia, una bobina y una fem en serie. Ecuaciones de Kirchhoff siguen validos en procesos circuitos RL . Consideremos la diferencia de potencial en tres elementos del circuito:

- a) la caída de tensión en la resistencia es $V_R = R \cdot I$,
- b) la fem autoinducida en la bobina $\varepsilon_L = - L dI / dt$,
- c) la fem ε

La segunda ley de Kirchhoff relaciona las fem y la caída de tensión en la resistencia, $\varepsilon + \varepsilon_L = \varepsilon - L dI / dt = R \cdot I$. Como resultado obtenemos la ecuación diferencial del circuito $dI / dt + (R / L) I = \varepsilon / L$. Podemos notar que esta ecuación es formalmente análoga a la del circuito RC. La solución general del circuito RL es $I(t) = A \cdot \exp \{ - t / \tau_L \} + B$, donde la constante de tiempo es $\tau_L = L / R$. Las constantes A y B se definen por las condiciones iniciales y finales del proceso. El proceso de caída de la corriente en el circuito viene descrito por un decaimiento exponencial $I(t) = V / R \cdot \exp \{ - t / \tau_L \}$. El proceso de establecimiento de la corriente es $I(t) = V / R \cdot [1 - \exp \{ - t / \tau_L \}]$.

2.3. Números complejos.

El término **número complejo** describe la suma de un número real y un número imaginario $z = x + i y$. La **unidad imaginaria** denota la raíz cuadrada de -1 : $i = (-1)^{1/2}$. Su cuadrado da -1 : $i^2 = -1$. La unidad imaginaria se indica con la letra i , o con la letra j para no confundirla con la intensidad de corriente I . El cuadrado del valor absoluto, **módulo** o magnitud de un número complejo z viene dado por la suma de cuadrados de la parte real e imaginaria: $|z| = \sqrt{(Re\ z)^2 + (Im\ z)^2}$. Un número **conjugado** z^* de un número complejo z tiene la parte imaginaria invertida $z^* = x - i y$. Producto de un número complejo por su número conjugado da cuadrado del valor absoluto, $z z^* = |z|^2$.

En **coordenadas cartesianas** un número complejo se representa como $z = x + i y$ (forma binomial). La parte real del número complejo y la parte imaginaria son $x = Re\ z$, $y = Im\ z$. El número complejo z corresponde a un punto en el plano. Por el teorema de Pitágoras, el valor absoluto de un número complejo coincide con la distancia euclídea desde el origen del plano a dicho punto.

En **coordenadas polares** $z = \rho e^{i\varphi}$, donde ρ es el módulo del número complejo y φ es el ángulo (representación polar) es el argumento del número complejo.

El cambio de variables se calcula desde el triángulo $\tan\ \varphi = Im\ z / Re\ z$, siendo entonces el argumento $\varphi = \arctg [Im\ z / Re\ z]$.

El **radián** es la unidad de ángulo plano. El ángulo formado por dos radios de una circunferencia, medido en radianes, es igual a la longitud del arco que delimitan los radios; es decir, $\varphi = s / r$, donde φ es ángulo, s es la longitud del arco, r es el radio. La longitud del arco s es el producto de φ (en radianes) por el radio r . La equivalencia entre grados y radianes es: $\pi\ rad = 180^\circ$.

Por la **fórmula de Euler**, la parte real de una exponente imaginaria es el coseno y la parte imaginaria es el seno $e^{i\varphi} = \cos\ \varphi + i \sin\ \varphi$. Casos especiales son $e^{i0} = 1$, $e^{i\pi/2} = i$, $e^{i\pi} = -1$. La fórmula de Euler da una relación muy intrincada entre las constantes básicas de la matemática ($\pi, e, i, 1$), $e^{i\pi} + 1 = 0$.

2.4. Impedancia. Ley de Ohm.

En una expresión del tipo $z = r e^{i\varphi}$ podemos pensar en r como la amplitud y en φ como la fase de una onda sinusoidal de una frecuencia dada. Cuando representamos una

corriente o un voltaje de **corriente alterna** (y por tanto con comportamiento sinusoidal) como la parte real de una función de variable compleja de la forma $f(t) = A \exp(i \omega t)$, donde ω representa la frecuencia angular y el número complejo z nos da la fase y la amplitud, el tratamiento de todas las fórmulas que rigen las resistencias, capacidades e inductores pueden ser unificadas introduciendo resistencias imaginarias para las dos últimas.

Para entender la **producción de fem alternas** consideramos N espiras que giran con velocidad angular ω constante en un campo magnético uniforme B . El flujo del campo magnético es $\Phi = B \cdot S \cdot N \cdot \cos \vartheta$ con la fase $\vartheta = \omega \cdot t + \vartheta_0$. El cambio del flujo $\Phi = B \cdot S \cdot N \cdot \cos(\omega \cdot t + \vartheta_0)$ por la Ley de Faraday induce una fem $\varepsilon = -d\Phi / dt = BSN \omega \sin(\omega t + \vartheta_0)$. Como resultado obtenemos una fem alterna $\varepsilon(t) = V_0 \sin(\omega t + \vartheta_0)$.

No se puede caracterizar una corriente alterna utilizando el valor medio. Para demostrarlo, consideramos voltaje $V(t) = V_0 \cos(\omega t)$ e intensidad $I(t) = I_0 \cos(\omega t)$. El **valor medio** de voltaje sobre un periodo es $\langle V \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt =$

$$\frac{1}{T} \int_0^T V_0 \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) dt = \frac{V_0}{2\pi} \left[\sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \right]_0^T = 0$$

i.e. voltaje medio es cero. Lo mismo vale para la intensidad media. Entonces, los valores medios no dan información sobre la amplitud de una corrientes alternas.

Para eso se puede utilizar los **valores eficaces**. Calculamos el valor medio del cuadrado del voltaje:

$$\langle V^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T V_0^2 \cos^2\left(\frac{2\pi}{T} t\right) dt = \frac{1}{T} \int_0^T V_0^2 \frac{1}{2} (1 + 2\cos\left(\frac{4\pi}{T} t\right)) dt = \frac{V_0^2}{2}$$

Así obtenemos una cantidad finita y relacionada con la amplitud del voltaje.

Introducimos el voltaje eficaz como $V_{ef} = V_0 / \sqrt{2}$ y la intensidad eficaz como $I_{ef} = I_0 / \sqrt{2}$. Los voltímetros y amperímetros en corriente alterna miden valores eficaces de la corriente o la tensión. Un ejemplo práctico es la red industrial de 220V, donde este valor es el voltaje eficaz, $V_{ef} = 220V$. La amplitud es más alta y es de $V_0 = \sqrt{2} V_{ef} = 220\sqrt{2} V$.

Consideramos tres circuitos simples de una fem alterna $V(t) = V_0 \cos(\omega t)$ en serie con

- 1) una resistencia
- 2) un condensador
- 3) una bobina

En el primer caso, de un circuito con una resistencia R la segunda ley de Kirchhoff permite encontrar la intensidad $I(t) = V(t) / R = V_0 / R \cdot \cos(\omega t) = I_0 \cdot \cos(\omega t)$. La tensión aplicada y la corriente están **en fase**.

En el segundo caso, de un circuito con un condensador C la carga en el condensador es proporcional al voltaje, $q(t) = V(t)C = V_0 C \cos(\omega t)$. La intensidad de la corriente es la primera derivada de la carga respecto el tiempo, $I(t) = dq(t)/dt = -V_0 \omega C \cdot \sin(\omega t) = -I_0 \sin(\omega t) = I_0 \cos(\omega t + \pi/2)$. Entonces, hay un desfase de 90° en adelante de la corriente que circula por el circuito respecto de la tensión en extremos del condensador (la corriente está adelantada $\pi/2$ respecto del voltaje). En términos de una exponente compleja en la entrada $V(t) = V_0 e^{i\omega t}$, la intensidad es $I(t) = C dV/dt = i \omega C V_0 e^{i\omega t} = i \omega C V(t)$. Así vemos que podemos reproducir la ley de Ohm $V = I R_C$ con una resistencia del condensador imaginaria $R_C = 1 / (i \omega C)$. Su modulo se denomina reactancia capacitiva o **capacitancia**. Describe la oposición ofrecida al paso de la corriente alterna por condensadores y se mide en Ohmios. La resistencia equivalente es $R_C = X_C / i = -i X_C$

En el tercer caso, de un circuito con una bobina con coeficiente de inducción L , hay una fem autoinducida en la bobina, $\varepsilon_L = -L dI/dt$. La segunda ley de Kirchhoff $V(t) + \varepsilon_L = 0$ resulta en una ecuación diferencial $dI/dt = V_0 / L \cdot \cos(\omega t)$. La solución es $I(t) = V_0 / (L \omega) \cdot \sin(\omega t) = I_0 \cos(\omega t - \pi/2)$. Por tanto, la bobina en corriente alterna atrasa la corriente 90° respecto a la tensión presente en sus extremos. En términos de una exponente compleja en la entrada, la ecuación diferencial es $dI/dt = V_0 / L \cdot e^{i\omega t}$

con la solución de $I = V_0 / (i\omega L) \cdot e^{i\omega t}$. Podemos reproducir la ley de Ohm $V = I \cdot R_L$ con una resistencia de inducción imaginaria $R_L = i \omega L$. Su módulo se denomina reactancia inductiva o **inductancia**. Describe la oposición ofrecida al paso de la corriente alterna por bobinas y se mide en Ohmios. La resistencia equivalente es $R_L = i X_L$.

Puede ser útil una regla nemotécnica. Si se representa por las letras

- L a la inducción eléctrica,
- U a la tensión eléctrica,
- C a la capacidad eléctrica

se puede utilizar la siguiente regla para recordar fácilmente cuando la corriente (I) atrasa o adelanta a la tensión (U) según el tipo de circuito eléctrico que se tenga, inductivo (L) o capacitivo (C).

•*LUIS*, se observa que la corriente (I) atrasa a la tensión (U) en un circuito inductivo (L).

•*CIUDAD*, se puede observar que la corriente (I) adelanta a la tensión (U) en un circuito capacitivo (C).

Hemos visto que la ley de Ohm $\bar{V} = \bar{I} \cdot \bar{Z}$ sigue válida en circuitos de corriente alterna considerando un valor complejo de la resistencia $\bar{Z} = R + i X$ donde una resistencia R contribuye a la parte real de \bar{Z} , un condensador C da una contribución de $-i X_C$ con la reactancia capacitiva $X_C = 1 / (\omega C)$, una inducción L da una contribución de $+i X_L$ donde la reactancia inductiva es $X_L = |R_L| = \omega L$. La **impedancia** es un concepto totalizador de los de resistencia y reactancia y es la suma de ambos.

El concepto de impedancia generaliza la ley de Ohm en el estudio de circuitos en corriente alterna $\bar{V} = \bar{I} \cdot \bar{Z}$. El formalismo de las impedancias permite calcular circuitos que contienen elementos resistivos, inductivos o capacitivos de manera similar al cálculo de circuitos resistivos en corriente continua. Esas reglas sólo son válidas en los casos siguientes: (a) Si estamos en régimen permanente con corriente alterna sinusoidal. (b) Si todos los componentes son lineales (por ejemplo, excluyen los componentes no lineales como los diodos).

2.5. Circuitos de corriente alterna.

Consideramos un circuito LCR, compuesto por una fem alterna en serie con una bobina, un condensador y una resistencia. La parte real de la impedancia es la resistencia R y su parte imaginaria es la reactancia ($X_L - X_C$). La impedancia del circuito es $\bar{Z} = R + i X_L - i X_C = R + i (X_L - X_C)$. Considerando que el voltaje en la entrada es $V(t) = V_0 \cos(\omega t + \alpha)$, obtenemos que la intensidad de la corriente $I(t) = I_0 \cos(\omega t + \alpha - \varphi)$ tiene un desfase de $\varphi = \arctg [X / R] = \arctg [(X_L - X_C) / R]$. La corriente máxima es $I_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{\varepsilon_0}{Z}$.

La relación entre corriente y voltaje en una bobina o en un condensador puede representarse mediante vectores bidimensionales llamados **fasores**. Podemos representar la caída de potencial en una resistencia como un vector de módulo $I_0 R$, que forma un ángulo φ con el eje real. El valor instantáneo de la caída de tensión es la componente real del vector $\text{Re}[\bar{V}]$, que gira en sentido antihorario con una velocidad ω . Esta representación fasorial la podemos llevar a cabo en el plano complejo.

Como ejemplo, consideramos de nuevo circuitos RL, RC y RCL esta vez en notación fasorial. Supongamos que por el circuito serie RL circula una corriente $\bar{I} = I \angle \alpha$. Como V_R está en fase y $\bar{V}_R = I R \angle \alpha$, V_L adelantada 90° respecto a dicha corriente, $\bar{V}_L = I X_L \angle \alpha + 90^\circ$, se tendrá: $\bar{V} = \bar{V}_R + \bar{V}_L = V \angle \alpha + \varphi$.

Consideramos un circuito RC con corriente $\bar{I} = I \angle \alpha$, V_R está en fase y $\bar{V}_R = I R \angle \alpha$, mientras V_C retrasa 90° respecto a dicha corriente, $\bar{V}_C = V \angle \alpha - 90^\circ$, se tendrá: $\bar{V} = \bar{V}_R + \bar{V}_C = V \angle \alpha - \varphi$.

En un circuito RCL hay siguientes casos:

- circuito inductivo, la intensidad queda retrasada respecto de la tensión
- circuito capacitivo, la intensidad queda adelantada respecto de la tensión.
- circuito resistivo, la intensidad queda en fase con la tensión (en este caso se dice que hay resonancia).

2.6. Potencia.

La potencia eléctrica es la relación de paso de energía de un flujo por unidad de tiempo, es decir, la cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento en un tiempo determinado. La potencia es proporcional a la corriente y a la tensión: $P = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \frac{dq}{dt} = VI$, donde I es el valor instantáneo de la corriente y V es el valor instantáneo del voltaje.

En un circuito general hay el desfase φ entre el voltaje $V(t) = V_0 \cos(\omega t)$ y la intensidad $I(t) = I_0 \cos(\omega t - \varphi)$. El valor del desfase viene definido por la impedancia $\tan \varphi = X / R$. La potencia instantánea $P(t) = V_0 I_0 \cos(\omega t) \cos(\omega t - \varphi)$ cambia con el tiempo. La potencia media $P = \langle P(t) \rangle = V_0 I_0 \langle \cos(\omega t) \cos(\omega t - \varphi) \rangle = V_0 I_0 / 2 \cdot \cos(\varphi)$ puede ser expresada con valores eficaces como $P = V_{ef} I_{ef} \cos(\varphi)$.

Es útil analizar las potencias consumidas en una resistencia, un condensador y una bobina.

Como la resistencia no introduce diferencia de fase entre corriente y voltaje ($\varphi=0$), por ejemplo, $V(t) = V_0 \cos(\omega t)$, $I(t) = I_0 \cos(\omega t)$, el cálculo de la potencia instantánea $P(t) = V(t) \cdot I(t)$ es inmediato $P(t) = V_0 \cos(\omega t) I_0 \cos(\omega t) = V_0^2 / R \cdot \cos^2(\omega t)$. La potencia media es $P = \langle P(t) \rangle = V_0^2 / R \cdot \langle \cos^2(\omega t) \rangle = 1/2 \cdot V_0^2 / R$. O, expresados con valores eficaces, el voltaje eficaz es $V_{ef} = V_0 / \sqrt{2}$ y la intensidad eficaz es $I_{ef} = I_0 / \sqrt{2}$. La

resistencia disipa energía en forma de calor por efecto Joule, siendo la potencia disipada $P=V_{ef}^2/R=R \cdot I_{ef}^2$.

En un circuito con un condensador, en un instante dado, la energía puede estar entrando o saliendo del condensador, dependiendo si en ese momento se carga o se descarga. Hay un desfase de 90° en adelante de la respecto de la tensión (la corriente está adelantada $\pi/2$ respecto del voltaje): $\varphi = -\pi/2 = -90^\circ$, por ejemplo, $V(t) = V_0 \cos(\omega t)$ y $I(t) = I_0 \cos(\omega t + \pi/2) = -I_0 \sin(\omega t)$. La potencia instantánea es $P(t) = -V_0^2/X_C \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\omega t) = -V_0^2/X_C \cdot 1/2 \cdot \sin(2\omega t)$ y la potencia media es igual a cero $P = \langle P(t) \rangle = -V_0^2/X_C \cdot 1/2 \cdot \langle \sin(2\omega t) \rangle = 0$. En algunos instantes el condensador quita la energía del circuito, en otros da la energía al circuito, llevando al consumo neto igual a cero.

En un circuito con una bobina, en un instante dado, la energía puede estar entrando o saliendo a la bobina. La bobina en corriente alterna atrasa la corriente 90° respecto a la tensión: $\varphi = \pi/2 = 90^\circ$, por ejemplo, $V(t) = V_0 \cos(\omega t)$ y $I(t) = I_0 \cos(\omega t - \pi/2) = I_0 \sin(\omega t)$. La potencia instantánea es $P(t) = V_0^2/X_L \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\omega t) = V_0^2/X_L \cdot 1/2 \cdot \sin(2\omega t)$ y la potencia media también es nula $P = \langle P(t) \rangle = V_0^2/X_L \cdot 1/2 \cdot \langle \sin(2\omega t) \rangle = 0$.

Usando el formalismo de las exponenciales complejas, podemos introducir un análogo complejo a la potencia. Si el fasor del voltaje es $\bar{V} = V_0 e^{i\omega t}$, el de la intensidad $\bar{I} = I_0 e^{i(\omega t - \varphi)}$ y de la impedancia $\bar{Z} = Z e^{i\varphi}$, entonces la potencia compleja es $\bar{S} = 1/2 \bar{V} \bar{I}^* = 1/2 V_0 I_0 e^{i\omega t} I_0 e^{-i(\omega t - \varphi)} = V_0 I_0 / 2 \cdot e^{i\varphi} = V_{ef} I_{ef} (\cos(\varphi) + i \sin(\varphi))$. Cada uno de los términos de \bar{S} tiene un significado:

- Potencia activa $P = \text{Re}[\bar{S}] = V_{ef} I_{ef} \cos(\varphi)$, se mide en vatios
- Potencia reactiva $Q = \text{Im}[\bar{S}] = V_{ef} I_{ef} \sin(\varphi)$, se mide en Voltio-Amperios reactivos
- Potencia aparente $S = |\bar{S}| = V_{ef} I_{ef}$, se mide en Voltio-Amperios

Se define **factor de potencia**, f.d.p., de un circuito de corriente alterna, como la relación entre la potencia activa, P , y la potencia aparente, S : $\cos(\varphi) = \frac{P}{S}$. El factor de potencia da una medida de la capacidad de una carga de absorber potencia activa, f.d.p = 1 en cargas puramente resistivas y f.d.p = 0 en elementos inductivos y capacitivos ideales sin resistencia.

A menudo es posible ajustar el factor de potencia de un sistema a un valor muy próximo a la unidad. Esta práctica es conocida como mejora o **corrección del factor de potencia** y se realiza mediante la conexión de bancos de condensadores o de inductancias. La corrección puede estar hecha en serie o en paralelo.

Consideramos primero el caso de **mejora del f.d.p** por conexión **en serie**. Si el circuito tiene una impedancia $Z = R + i X$, este produce un desfase $\varphi = \arctg X/R$. Para corregir f.d.p. conectando un elemento puro X' en serie, este tiene que ser de $X' = - X$. Es decir, en un circuito inductivo ($X > 0$, $\varphi > 0$) hay que conectar un condensador con $C = 1 / (\omega X)$. En un circuito capacitivo ($X < 0$, $\varphi < 0$) hay que conectar una inducción con $L = |X| / \omega$.

Para **mejora del f.d.p** por conexión **en paralelo** conectando un elemento puro X' en paralelo, este tiene que ser de $X' = - (R^2 + X^2) / X$ o en forma polar $X' = - Z / \sin \varphi$.

2.7. Superposición de señales. Ancho de banda.

A principio de este tema introducimos glosario útil.

Información - Es un conjunto de datos procesados que se interrelacionan lógicamente, con significado para el receptor y que reduce la incertidumbre, permitiendo la toma de decisiones.

Telecomunicación.- Transporte de Información en el cual la propagación de la señal se hace en combinación de medios electromagnéticos u ópticos

Dato.- Señal que se va a procesar.

Procesamiento.- La señal de entrada es sometida a un proceso de transformación mediante la aplicación de un conjunto de operaciones lógicas y/o matemáticas para obtener un resultado o solución.

Vamos a decir que una **señal** $F(t)$ es **continua** si la señal varía durante el tiempo pero tiene una representación para todo t con una función continua. Una señal es **discreta** si está compuesta de un número finito de valores.

Una señal $F(t)$ es **periódica** si existe un periodo T que da $F(t+T) = F(t)$, $-\infty < t < +\infty$.

Las tres características más importantes de una señal periódica son: la amplitud, la frecuencia y la fase. La **amplitud** es una medida de la variación máxima del desplazamiento u otra magnitud física que varía periódica o cuasiperiódicamente en el tiempo. Es la distancia máxima entre el punto más alejado de una onda y el punto de equilibrio o medio (típicamente cero en corriente alterna). La **frecuencia** f es el inverso del periodo, $f = 1/T$. La frecuencia representa el número de repeticiones de un periodo

por segundo y está expresada en ciclos por segundo, o hertz (Hz). La **fase** indica la situación instantánea en el ciclo, de una magnitud que varía cíclicamente. Es una medida de la posición relativa en el tiempo del periodo de una señal.

Una **señal sinusoidal** puede ser expresada como $F(t) = A \sin(2\pi f_1 t + \theta)$, donde A es la amplitud, f_1 es la frecuencia y θ es la fase. Recordemos que 2π radianes = $360^\circ = 1$ periodo.

En caso de ondas electromagnéticas o acústicas vale el principio de superposición de ondas. Es decir que el campo electromagnético o la presión (o la densidad) en una onda acústica es señal puede ser formado por una suma de señales. Por ejemplo, para la señal $F(t) = \sin(2\pi f_1 t) + 1/3 \sin(2\pi(3f_1)t)$ los componentes son ondas sinusoidales de frecuencias f_1 y $3f_1$ respectivamente. Cuando todas las frecuencias en los componentes de una señal son múltiplos de una frecuencia, a esta última se le conoce como **frecuencia fundamental**. El periodo de la señal total es igual al periodo de la frecuencia fundamental. Como el periodo del componente $\sin(2\pi f_1 t)$ es $T = 1/f_1$ entonces el periodo de $F(t)$ es también T .

El **espectro** es el rango de frecuencias contenido en la señal. Para el ejemplo anterior, $F(t) = \sin(2\pi f_1 t) + 1/3 \sin(2\pi(3f_1)t)$, el espectro va de f_1 a $3f_1$. El **ancho de banda** absoluto de una señal está dado por el tamaño del espectro. En el ejemplo anterior, el ancho de banda es de $2f_1$. También podemos decir que el ancho de banda es el conjunto de frecuencias (armónicos) que contiene la energía de la señal. Por ejemplo, los típicos valores para el ancho de banda son de 4kHz para una voz humana, 1 kHz para una llamada telefónica, 5 MHz para una señal de televisión.

El análisis de **transformada de Fourier discreta** permite demostrar que cualquier señal periódica $F(t)$ puede ser presentada con una suma de los componentes de diferentes frecuencias, en donde cada uno es una senoidal,

$$F(t) = \frac{1}{2} A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(n\omega_0 t) + B_n \sin(n\omega_0 t)],$$

donde los coeficientes de componentes de Fourier se puede calcular integrando en un periodo la función $F(t)$, multiplicada por un coseno, $A_n = \int_0^T F(t) \cos(n\omega_0 t) dt$, y un seno $B_n = \int_0^T F(t) \sin(n\omega_0 t) dt$ de la frecuencia de la componente correspondiente. La frecuencia de la n -ésima armónica es $f_n = n\omega_0/(2\pi) = n/T$.

Por ejemplo, vamos a calcular la transformada de Fourier de una señal cuadrada de amplitud V_0 , periodo T y duración τ definida sobre un periodo $-T/2 < t < T/2$. La señal

viene descrita por la función $F(t) = V_0$, $-1/2 \tau < t < 1/2 \tau$, y $F(t) = -V_0$ en el caso contrario. La transformada de Fourier da coeficientes $B_n = 0$ (porque la señal original $F(t)$ es una función impar) y $A_n = 2 V_0 [2 \sin(\pi n/2) - \sin(\pi n)] / (\pi n)$, diferente de cero solo para $n = 1, 3, 5, \dots$. Como resultado, la señal cuadrada se puede descomponer en una serie infinita, $F(t) = V_0 + \sum_{n=1,3,5,\dots} V_0 / (\pi n) \sin(\pi n/2) \cos(2\pi n f_i t)$, con índice n impar. El número de componentes de frecuencia es infinito, por lo tanto, el ancho de banda también es infinito. Sin embargo, la amplitud del n -ésimo componente de frecuencia $n f_i$, es $1/n$. Así, la mayor parte de la energía en onda cuadrada está en los primeros componentes de frecuencia.

FFT es la abreviatura usual (del inglés **Fast Fourier Transform**) de un eficiente algoritmo que permite calcular la transformada de Fourier discreta y su inversa. La señal de la que se tomaron muestras y que se va a transformar debe consistir de un número de muestras igual a una potencia de dos (típicamente 512, 1024, 2048 o 4096 muestras). La evaluación directa de esa fórmula requiere $O(n^2)$ operaciones aritméticas. Mediante un algoritmo FFT se puede obtener el mismo resultado con sólo $O(n \log n)$ operaciones.

Consideramos otro ejemplo importante en informática de una señal en una forma de un **tren de pulsos cuadrados** de amplitud V_0 . Hay dos parámetros temporales, la duración τ de un pulso y el período T entre pulsos. Por el teorema de Fourier obtenemos los coeficientes de la descomposición de Fourier, $F(\omega_n) = A_n = 2V_0 \omega_0 \tau \frac{\sin(\omega_n \tau/2)}{\omega_n \tau/2}$, donde la frecuencia fundamental está relacionada con el periodo $T = 2\pi/\omega_0$. Cuanto más grande es el periodo T , más pequeña es la frecuencia fundamental y también la discretización $\Delta\omega = 2\pi/T$, es decir hay más armónicos y están más cercanos. El espectro se “densifica”.

La transformada de Fourier de **un pulso cuadrado individual** se obtiene en el límite de T infinito. El espectro discreto se convierte en un espectro continuo, $F(\omega) = 2V_0 \omega \tau \frac{\sin(\omega \tau/2)}{\omega \tau/2}$. El ancho de banda f_b de un pulso individual se define por la frecuencia $f_b = \omega_b / 2\pi$, en la cual $F(\omega)$ es cero por la primera vez, i.e. $F(\omega_b) = 0$. Así obtenemos que $f_b = \omega_b / 2\pi = 1/\tau$. En otras palabras, cuanto más corto es el pulso más ancha es la banda y más armónicas son necesarias para codificar la señal.

El razonamiento anterior nos lleva a reconsiderar la expresión de una función $F(t)$ no periódica en el dominio de la frecuencia, no como una suma de armónicos de frecuencia ($n \omega_0$), sino como una función continua de la frecuencia ω . Así, la serie de transformada

de Fourier discreto $f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{in\omega_0 t}$ al cambiar la “variable discreta” $n\omega_0$ (cuando $T \rightarrow \infty$)

por la variable continua, ω , se transforma en una integral de **transformada de**

Fourier continua $f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega$.

Retorno a Cero (**código RZ**) es un sistema de codificación usado en telecomunicaciones en el cual la señal que representa a cada bit retorna a cero en algún instante dentro del tiempo del intervalo de bit. No es necesario enviar una señal de reloj adicional a los datos. Por tanto, las secuencias largas de “unos” o de “ceros” ya no plantean problemas para la recuperación del reloj en el receptor. Duración de un bit es doble de la duración de un pulso $T_{bit} = 2\tau$.

Cualquier sistema de transmisión tiene limitado su ancho de banda. En el código RZ, f_b - ancho de banda (medida en ciclos por segundo o hertzios, Hz) y la velocidad de transmisión de información V (medida en bits por segundo, bps) están relacionadas como $V = 1/T_{bit} = 1/(2\tau) = f_b / 2$. Por ejemplo, para un modem a 56k $V=56\text{kbit/s}$, $f_b=112\text{kHz}$, $\tau=8.9\text{ms}$; ADSL 2+ $V=24\text{Mbit/s}$, $f_b=48\text{MHz}$, $\tau=20.8\text{ns}$; memoria DDR3-SDRAM $V=442\text{Gbit/s}$, $f_b=844\text{GHz}$, $\tau=1.2\text{ps}$.

El teorema de muestreo o **criterio de Nyquist**, también conocido como teorema de Nyquist-Shannon-Kotelnikov, dice que la reconstrucción exacta (matemáticamente reversible en su totalidad) de una señal periódica continua a partir de sus muestras, es posible matemáticamente si la señal está limitada en banda y la tasa de muestreo es superior al doble de su ancho de banda. Como ejemplo consideramos una grabación en CD. La máxima audiofrecuencia perceptible para el oído humano joven y sano está en torno a los 20 kHz. Para CD-Audio la tasa es de 44100 muestras por segundo. Es decir, que la frecuencia máxima reproducida es de 22,05 kHz. La frecuencia de muestreo ligeramente superior permite compensar los filtros utilizados durante la conversión analógica-digital.

El **baudio** (en inglés *baud*) es una unidad de medida, usada en telecomunicaciones, que representa la cantidad de veces que cambia el estado de una señal en un periodo de tiempo.

La **tasa de baudios** (en inglés *Baud Rate*), también conocida como baudaje, es el número de unidades de señal por segundo. Un baudio puede contener varios bits.

Bit es el acrónimo *Binary digit* o dígito binario.

La **tasa de bits** (en inglés *bit rate*) define el número de bits que se transmiten por unidad de tiempo.

En el caso de las máquinas teletipo (*Télétype*TM) los eventos son simples cambios de voltaje $1 \rightarrow (+)$, $0 \rightarrow (-)$, cada evento representa un solo bit o impulso elemental, y su velocidad de transmisión en bits por segundo coincide con la velocidad en baudios. En los módems que utilizan diversos niveles de codificación, por ejemplo mediante modulación de fase, cada evento puede representar más de un bit, con lo cual ya no coinciden bits por segundo y baudios.

- módem de 2400 baud – velocidad máxima 14400 bit/s
- módem de 3200 baud – velocidad máxima 28800 bit/s
- módem de 8000 baud – velocidad máxima 56000 bit/s

2.8. Resonancia.

En general, con el término **resonancia** se refiere a un fenómeno relacionado con los movimientos periódicos en que se produce reforzamiento de una oscilación al someter el sistema a oscilaciones de una frecuencia determinada. En los circuitos AC, la resonancia se produce a una frecuencia especial determinada por los valores de la resistencia, la capacidad, y la inductancia. La condición de resonancia en los circuitos en serie es muy sencilla y se caracteriza porque la impedancia es mínima y el ángulo de fase es cero. En la resonancia la frecuencia es $f_0 = 1 / [2 \pi (L C)^{1/2}]$ y la frecuencia angular es $\omega_0 = 1 / (L C)^{1/2}$.

2.9. Filtros.

Un **filtro eléctrico** es un aparato que discrimina una determinada frecuencia o gama de frecuencias de una señal eléctrica que pasa a través de él. Con independencia de la realización concreta del filtro su forma de comportarse se describe por su **función de transferencia** V_{out}/V_{in} . Ésta determina la forma en que la señal aplicada cambia en amplitud y en fase, para cada frecuencia, al atravesar el filtro. La función de transferencia elegida tipifica el filtro. Algunos filtros básicos pueden estar compuestos por un circuito RC o RL.

Un circuito RC es un circuito compuesto por una resistencia y un condensador. La alimentación viene dada por el voltaje en la entrada (V_{in}).

Los circuitos RC pueden usarse para filtrar una señal, al bloquear ciertas frecuencias y dejar pasar otras. Los filtros RC más comunes son el filtro paso alto, filtro paso bajo, filtro paso banda, y el filtro elimina banda.

En la configuración de **paso bajo** el voltaje de la salida (V_{out}) se coge en bornes del condensador, $V_{out} = V_C(\omega) = \frac{1}{1+RC\omega} V_{in}$. Para frecuencias bajas $V_{out} = V_{in}$ y el filtro deja pasar la señal de entrada sin modificarla. Para frecuencias altas, $V_{out} \rightarrow 0$ y el filtro bloca la señal.

En cambio en la configuración de **paso alto** la tensión de salida es la caída de tensión en la resistencia, $V_{out} = V_R(\omega) = \frac{RC\omega}{1+RC\omega} V_{in}$. Para frecuencias altas $V_{out} = V_{in}$ y el filtro deja pasar toda la señal de entrada. Al contrario, para frecuencias bajas, $V_{out} \rightarrow 0$ y el filtro bloquea la señal.

3. Electrónica y Puertas Lógicas

La **electrónica** es la rama de la física, y la especialización de la ingeniería, que estudia y emplea sistemas cuyo funcionamiento se basa en la conducción y el control del flujo microscópico de los electrones u otras partículas cargadas eléctricamente.

Una **puerta lógica** es un dispositivo electrónico el cual es la expresión física de un operador booleano en la lógica de conmutación. Cada puerta lógica consiste en una red de dispositivos interruptores que cumple las condiciones booleanas para el operador particular. Son circuitos de conmutación integrados en un chip.

3.1. Estructura electrónica de los átomos.

El modelo clásico del átomo de Rutherford ya ha sido introducido en el apartado de Corriente Continua y es suficiente para explicar la creación de cargas negativas o positivas en metales cristalinos. Al mismo tiempo este modelo es demasiado simple para explicar la estructura de bandas en metales y, sobre todo, las propiedades de los semiconductores. Se necesita un modelo basado en efectos de física cuántica, y para eso introducimos el modelo **atómico de Bohr**.

Un átomo (del griego ἄτομος, no divisible) es la unidad más pequeña de un elemento químico que mantiene su identidad o sus propiedades, y que no es posible dividir mediante procesos químicos. El átomo está formado por partículas más pequeñas, llamadas partículas subatómicas. El núcleo del átomo es su parte central, tiene carga positiva, y en él se concentra casi toda la masa del mismo. El núcleo está formado por protones y neutrones. Alrededor del núcleo se encuentran los electrones, partículas de carga negativa y masa muy pequeña.

El núcleo del átomo se encuentra formado por nucleones, los cuales pueden ser de dos clases: protones, una partícula con carga eléctrica positiva igual a una carga elemental $q = |e| = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ y una masa $m_p = 1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; y neutrones: partículas carentes de carga eléctrica, y con una masa un poco mayor que la del protón $m_n = 1,67493 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.

El modelo de átomo de Bohr fue propuesto en 1913 por el físico danés Niels Bohr, para explicar por qué los átomos presentaban espectros de emisión característicos. En este modelo los electrones giran en órbitas circulares alrededor del núcleo $k Z e^2 / r^2 = m_e v^2 / r$. El momento angular $L = m_e v r$, en las órbitas permitidas es un múltiplo entero de \hbar , $L = \hbar n$, donde n es un número cuántico principal. El radio de la órbita es $r_n = n^2 a_0 / Z$ siendo el radio de Bohr $a_0 = \hbar^2 / k m_e e^2 = 0.52 \times 10^{-10} \text{ m}$. La energía correspondiente a los niveles permitidos es negativa e igual a $E_n = -Z^2 E_0 / n^2$. El estado de energía más baja (estado fundamental del átomo de Hidrógeno) se obtiene con $n=1$ y es $E_0 = -k^2 m_e e^2 / 2\hbar^2 = -13.6 \text{ eV}$.

El electrón sólo emite o absorbe energía en los saltos de una órbita permitida a otra. En dicho cambio emite o absorbe un fotón cuya energía es la diferencia de energía entre ambos niveles. Este fotón tiene una energía $E = h \nu = E_{n_i} - E_{n_f}$ donde el número cuántico principal n_i identifica la órbita inicial, n_f la final, ν es la frecuencia del fotón y $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ es la constante de Planck. La longitud λ de onda emitida satisface la relación $1/\lambda = Z^2 R (1/n_f^2 - 1/n_i^2)$ donde $R = m_e e^4 / 32\pi^2 \hbar^3 c$.

En 1885, Balmer había visto que los átomos de hidrógeno cuando emiten radiación lo hacen de forma discontinua lo que resulta en un espectro discreto. La longitud de onda emitida viene descrita por la formula fenomenológica de Balmer: $1/\lambda = R_H (1/2^2 - 1/n^2)$. El valor medido experimentalmente de la constante de Rydberg, $R_H = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$, coincide con el valor de la formula teórica obtenida desde el modelo de átomo de Bohr.

En física atómica, los **números cuánticos** son valores numéricos discretos que nos indican las características de los electrones en los átomos. Resulta, en el caso general, que son necesarios cuatro números cuánticos:

1. El número cuántico principal $n = 1, 2, 3, \dots$ determina la energía total asociada a un estado particular.
2. El momento angular orbital $l = 0, 1, 2, \dots, n$ indica la forma de la órbita clásica.
3. El número cuántico magnético orbital m_l puede tener los valores $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l$. Este número da la orientación de la órbita clásica con respecto a un campo magnético aplicado.
4. Espín del electrón. Está cuantificado y puede tener solamente los valores $+1/2$ o $-1/2$.

Todos los electrones de un átomo que tienen la misma energía (el mismo valor de n) se dice que pertenecen a la misma capa electrónica. Las capas se identifican por las letras K, L, M, N, \dots , correspondientes a $n = 1, 2, 3, 4, \dots$, respectivamente. Una capa se divide en subcapas, que corresponden a diferentes valores de l y se identifican como s, p, d, t, \dots para $l = 0, 1, 2, 3, \dots$, respectivamente. La distribución de los electrones de un átomo en capas y subcapas satisface el **principio de exclusión de Pauli** (1925): “Nunca dos electrones en un sistema electrónico pueden tener iguales los cuatro números cuánticos, n, l, m_l y s ”.

Las capas más internas, con n pequeño, corresponden a los electrones más cercanos al núcleo. Las capas más externas, con n grande, corresponden a energías más altas, y por lo tanto, los electrones más alejados del núcleo. La capa de electrones con energía más alta y más cercana a cero se llama **capa de valencia**. El estado de ocupación de esta capa determina cuan activo puede ser el átomo en procesos químicos y eléctricos.

3.2. Teoría de la conducción: metales, aislantes, semiconductores.

Los materiales pueden estar clasificados en función de la facilidad que tienen los electrones libres de moverse en la red cristalina (i.e. por su conductividad). Los materiales cristalinos se pueden clasificar en conductores, semiconductores y aislantes.

Para entender las propiedades de cristales compuestos por un número elevado de átomos hay que estudiar la estructura de los niveles energéticos. Primero consideramos un sistema más simple, de un solo átomo (por ejemplo, hidrógeno H). Los niveles de energía son discretos, como hemos visto en el modelo de átomo de Bohr. Cuando se acercan dos átomos idénticos (por ejemplo, dos átomos de hidrógeno H) para formar una molécula diatómica (H_2), cada nivel de energía se desdobra en dos subniveles de energías similares quitando **degeneración** (estados degenerados comparten la misma

energía). Así vemos que un solo átomo tiene un nivel de una cierta energía. Si se añade otro átomo, se forman dos niveles. Con 3 átomos hay 3 niveles, con N átomos hay N niveles. Cuando una gran cantidad de átomos se une, como en las estructuras sólidas, el número de los niveles de energía más altos es tan grande y la diferencia de energía entre cada uno de ellos, tan pequeña que se puede considerar que si los niveles de energía forman **bandas** continuas.

La **banda de conducción** está ocupada por los electrones libres, es decir, aquellos que se han desligado de sus átomos y pueden moverse fácilmente. Estos electrones son los responsables de conducir la corriente eléctrica.

La **banda de valencia** está ocupada por los electrones de valencia de los átomos, es decir, aquellos electrones que se encuentran en la última capa o nivel energético de los átomos. Los electrones de valencia son los que forman los enlaces entre los átomos, pero no intervienen en la conducción eléctrica.

La **energía de Fermi** es la energía del nivel más alto ocupado por un sistema cuántico a temperatura 0 K. Los **fermiones** son partículas de spin semientero que verifican el principio de exclusión de Pauli que dicta que dos fermiones no pueden ocupar simultáneamente el mismo estado cuántico. La energía de Fermi es importante a la hora de entender el comportamiento de las partículas fermiónicas, como por ejemplo los electrones.

En los **metales** no hay ningún intervalo de energías prohibidas entre las bandas de valencia y de conducción. La energía de Fermi está dentro de la banda de conducción. En los buenos conductores metálicos, tales como el Cu, Ag y Al, su estructura cristalina es tal que los electrones de valencia están compartidos por todos los átomos y pueden moverse libremente por todo el material.

En los **aislantes** aparece una **banda prohibida** por encima de la banda de valencia, seguida de una banda de conducción a energías aún mayores. Esto significa que cuando se aplica un campo eléctrico los electrones no pueden incrementar su energía (es decir, no pueden ser acelerados). La banda prohibida es ancha, con un valor típico de $E_g = (5-10) eV$. A temperatura cero la banda de valencia está llena.

En los materiales **semiconductores** aparece una banda prohibida por encima de la banda de valencia, seguida de una banda de conducción a energías aún mayores. En este caso, la banda prohibida es estrecha, de valor típico $E_g = (0.5 - 2) eV$. A temperatura cero los semiconductores son aislantes. A temperaturas finitas ocurre una formación de

parejas electrón – hueco y los semiconductores empiezan conducir. Cuanto más pequeña es la banda prohibida o “*gap*” E_g , más fácil es que el material pueda conducir.

Un **hueco** es la ausencia de un electrón en la banda de valencia. Esta banda de valencia estaría normalmente completa sin huecos. El hueco junto al electrón son los portadores de carga que contribuyen al paso de corriente eléctrica. El hueco tiene valores absolutos de la misma carga que el electrón pero con carga positiva. Los huecos no son partículas, sino la falta de un electrón en un semiconductor

Como ejemplo de semiconductor, consideramos los átomos del silicio (Si) con valencia 4. El silicio forma una estructura tetraédrica mediante enlaces covalentes entre sus átomos. A temperatura cero es aislante. A temperatura ambiente algunos electrones pueden absorber la energía necesaria para saltar a la banda de conducción dejando un hueco en la banda de valencia. La concentración de electrones (cargas negativas) es igual a la concentración de huecos (cargas positivas). Aplicando un campo eléctrico, se produce movimiento de carga, en otras palabras por el material pasa una corriente eléctrica. Hay dos contribuciones a la corriente eléctrica: la de electrones y la de huecos, $I = I_e + I_h$. Un hueco se comporta como una carga positiva.

En semiconductores **intrínsecos** hay solo un tipo de átomos. Son semiconductores puros. La concentración de electrones (cargas negativas) es igual a la concentración de huecos (cargas positivas). Si a un semiconductor intrínseco se le añade un pequeño porcentaje de impurezas, es decir, elementos trivalentes o pentavalentes, el semiconductor se denomina **extrínseco**, y se dice que está **dopado**.

Un semiconductor **tipo n** se obtiene llevando a cabo un proceso de dopado, añadiendo un cierto tipo de átomos para poder aumentar el número de portadores de carga libres (en este caso negativos o electrones). Un átomo de 5 electrones de valencia, como el fósforo (*P*), se incorpora a la red cristalina en el lugar de un átomo de silicio (*Si*). Un electrón extra da como resultado la formación de “electrones libres”. Los electrones son portadores mayoritarios de carga y los huecos son portadores minoritarios de carga. Las impurezas aportan electrones libres al material y por eso son impurezas dadoras. Prácticamente todas impurezas dan un electrón a la banda de conducción.

El propósito del dopaje **tipo p** es el de crear abundancia de huecos. En el caso del silicio se le une un átomo con tres electrones de valencia (ej. *Al, Ga, B, In*), ese átomo tendrá tres enlaces covalentes y un hueco que se encontrará en condición de aceptar un electrón libre. Los electrones son portadores minoritarios de carga y los huecos son portadores mayoritarios de carga. Las impurezas introducen una carga positiva en el

material y por eso son impurezas aceptoras. Prácticamente todas impurezas aportan un hueco la banda de valencia.

3.3. Diodo de unión $p-n$: rectificador de corriente.

La invención del transistor es un buen ejemplo de cómo el uso de la física cuántica puede influir en la tecnología moderna, y sobre todo en un gran progreso en informática. Los diodos semiconductores son más pequeños y ligeros, no requieren calentamiento ni se producen pérdidas térmicas (lo que sí sucede en el caso de los tubos), una construcción más resistente.

Un **diodo** es un componente electrónico de dos terminales que permite la circulación de la corriente eléctrica a través de él en un solo sentido. Los primeros diodos eran válvulas o tubos de vacío, constituidos por dos electrodos rodeados de vacío en un tubo de cristal, con un aspecto similar al de las lámparas incandescentes. El diodo semiconductor es más común en la actualidad; consta de una pieza de cristal semiconductor conectada a dos terminales eléctricos.

Una **unión $p-n$** consiste en la unión de dos semiconductores, dopados con impurezas dadoras y aceptoras. La zona p está compuesta por semiconductor tipo p (N_a impurezas aceptoras, por ejemplo átomos con tres electrones de valencia) y la zona n , de semiconductor tipo n (N_d impurezas dadoras, por ejemplo átomos con cinco electrones de valencia). En la zona de transición se producen los fenómenos importantes.

Los portadores mayoritarios dependen de la zona. En la zona p , los portadores mayoritarios son huecos con concentración $p_p \approx N_a$. Los portadores minoritarios son electrones, con una concentración despreciable, $n_p \approx 0$. En la zona n los portadores mayoritarios son electrones con concentración $n_n \approx N_d$ y los portadores minoritarios son los huecos, de concentración insignificante $p_n \approx 0$. En la zona de transición, los electrones que vienen de la zona n recombinan con los huecos que vienen desde la zona p .

El exceso de concentración de portadores en una parte produce un desplazamiento de carga desde las zonas de mayor concentración a las de menor concentración, creando las **corrientes de difusión**. Entonces, hay una corriente de huecos, I_{dp} , dirigida desde la zona p hacia a la zona n . De misma manera, hay una corriente de electrones, I_{dn} , dirigida desde la zona p hacia a la zona n .

En la zona de transición queda carga negativa en la zona p ($-Q_0$) y con carga positiva en la zona n ($+Q_0$). Por la separación de las cargas (Q_0 y $-Q_0$) aparece un campo eléctrico E dirigido desde la zona n hacia a la zona p . Valores típicos del campo: (10^3 - 10^5) V/m. La fuerza que el campo eléctrico ejerce sobre los iones provocará el movimiento de estos. De este modo se originará una corriente eléctrica, conocida como la **corriente de arrastre**, de huecos (I_{ap}) y de electrones (I_{an}).

En un estado estacionario hay un equilibrio dinámico, $I_d + I_a = 0$. Las corrientes de huecos se compensan, $I_{dp} + I_{ap} = 0$, y las corrientes de electrones también, $I_{dn} + I_{an} = 0$.

El **potencial de contacto** en la unión p - n en equilibrio, es la diferencia de potencial existente en la zona de transición.

El efecto producido por un campo eléctrico externo, es muy diferente para los dos direcciones posibles. La **polarización** directa corresponde a aplicar una diferencia de potencial entre los extremos, aplicando una tensión negativa (-) en la zona n . La polarización inversa se realiza aplicando una tensión positiva (+) en la zona n .

En la **polarización directa**, el campo externo va en dirección contraria al campo eléctrico creado por las cargas en la unión, entonces las cargas pueden acercarse más y como resultado la zona de transición disminuye. La barrera de potencial, V_b , disminuye y la corriente de difusión aumenta mucho (más portadores saltan la barrera). La corriente de arrastre disminuye poco. A partir de una cierta **tensión umbral** V_γ la corriente puede circular sin apenas resistencia.

En **polarización inversa** el campo externo aparta todavía más las cargas en la unión, los electrones libres se acumulan en un extremo y los agujeros en el otro. La zona de transición se hace más grande. La barrera de potencial V_b aumenta. La corriente de difusión disminuye. La corriente de arrastre se mantiene, y circula una corriente muy pequeña, llamada corriente inversa de saturación.

Un **diodo** es un componente electrónico que permite la circulación de la corriente eléctrica a través de él en un solo sentido. Como hemos visto anteriormente, un diodo puede ser formado por una unión p - n . Las propiedades de un diodo vienen descritas con la **curva característica** de la dependencia de la intensidad I que atraviesa el diodo por el voltaje V aplicado. Para tensiones negativas (polarización inversa) la corriente es muy pequeña, del orden de microamperios. Para tensiones positivas (polarización directa), aparece una corriente en el diodo. La intensidad crece de forma exponencial. En la física del estado sólido se demuestra la ecuación de Shockley, $I = I_0 (\exp\{V / \eta V_\tau\} - 1)$, donde I_0

es la corriente de la saturación inversa, $V_{\tau} = k_B T / e$ potencial equivalente y el coeficiente $\eta \approx 1$.

Un modelo simplificado utilizado para describir un diodo es un **diodo ideal**. En una manera aproximada se puede considerar que el diodo no conduce cuando la diferencia de potencial entre sus bornes V es negativa (polarización inversa, $V < 0$) o es positiva, pero menor que la tensión umbral $V < V_{\gamma}$. Cuando el diodo conduce, la diferencia de potencial entre bornes no varía mucho y aproximadamente es de $V \approx V_{\gamma}$. El valor de la tensión umbral está definido por los materiales usados y es de $V_{\gamma} = 0,7 \text{ V}$ en el caso del silicio a $T = 300 \text{ K}$.

Consideramos algún uso práctico de diodos. La mayoría de las redes eléctricas utilizan corriente alterna, debido a la facilidad de adaptación de tensión por transformadores. Igualmente, en muchas aplicaciones, se requiere el uso de tensión continua. Un **rectificador** es el elemento o circuito que permite convertir la corriente alterna en corriente continua.

Poniendo un diodo en serie en un circuito de corriente alterna obtenemos **rectificación de media onda**. Es decir si el voltaje de entrada es sinusoidal, el voltaje de salida (tensión sobre la resistencia) tendrá solo la mitad de la onda, por ejemplo la parte positiva.

Aunque la onda resultante de un rectificador de media onda no cambia de signo, la mitad de tiempo da intensidad cero y no hay transporte de energía. Una forma de pasar más energía es hacer una **rectificación de onda completa** por un puente de diodos. En sentido matemático, en la salida se obtiene el valor absoluto de la corriente alterna. Pero esa todavía oscila y por eso difiere mucho de ser un valor constante, como interesa tener en un circuito eléctrico de corriente continua. Se puede suavizar más la señal poniendo en paralelo un condensador. La descarga de un condensador tiene una forma exponencial con el tiempo característico proporcional a la capacidad del condensador. Para capacidades suficientemente grandes, la señal en la salida es casi constante.

Utilizando un diodo para rectificar la corriente alterna se puede construir de una manera sencilla un receptor de ondas radio. Un circuito simple está compuesto por una bobina, acoplada con la antena, un condensador variable (para sintonizar la frecuencia a la de estación radio) y una resistencia en serie. En paralelo con la resistencia se pone el diodo y los auriculares. La **modulación de amplitud (AM)** es una técnica utilizada para la transmisión de sonido a través de una onda portadora de radio. La señal portadora de radio tiene alta frecuencia y una amplitud constante, mientras que la señal

de audio frecuencia tiene una frecuencia baja y no es una señal constante. La unión de estas dos señales en el modulador de amplitud origina la señal modulada de AM en la cual se puede observar como la amplitud varía en función de la señal de audio. Las ondas electromagnéticas que alcanzan la antena generan en ésta, mediante el fenómeno de la inducción electromagnética, una corriente alterna. A causa del fenómeno de resonancia se produce un máximo de tensión para la frecuencia sintonizada en el circuito acoplado. A la salida del diodo se observa una tensión que varía de la misma forma que la moduladora, y se oye en los auriculares.

3.4. Diodo emisor de luz (LED).

Los diodos luminiscentes (LED, del inglés *Light Emitting Diode*) se comportan del mismo modo que los diodos y no permiten el paso de la corriente en un sentido, y sí en el contrario. Además presentan una característica singular de gran aplicación tecnológica: la emisión de luz.

Algunos electrones procedentes de la zona *n* se recombinan con huecos de la zona *p*, eliminándose mutuamente y desprendiendo una cantidad de energía igual a la energía de la banda prohibida. En los diodos de silicio y germanio esta energía es mayoritariamente en forma de calor. En los de fosfuro y arseniuro de galio (GaAsP) y fosfuro de galio (GaP) es en forma de luz visible, por lo que el diodo al ser polarizado de forma directa, emitirá luz, fenómeno denominado **electroluminiscencia**.

La energía $E = h \nu$ de los fotones emitidos (donde ν es la frecuencia y $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ es constante de Planck), y por lo tanto el color de la luz, depende de la diferencia de energía entre la banda de conducción y la banda de valencia, es decir, de la anchura de la banda prohibida, por lo que dependiendo del semiconductor y el material dopante utilizados, el diodo emitirá luz de diferente color.

La descripción **RGB** (del inglés *Red, Green, Blue*) de un color hace referencia a la composición del color en términos de la intensidad de los colores primarios con que se forma. Es un modelo de color basado en la síntesis aditiva, con el que es posible representar un color mediante la mezcla por adición de los tres colores primarios de la luz. El uso de los LED de tres colores básicos del sistema RGB permite reproducir una gama vasta de colores.

Existe también un efecto contrario a la electroluminiscencia. Se llama efecto **fotoeléctrico** o fotovoltaico y consiste en la emisión de electrones por un metal cuando

se hace incidir sobre él una radiación electromagnética (luz visible o ultravioleta). Este efecto permite crear celdas fotovoltaicas para transformar la luz solar en electricidad.

3.5. Diodo Zener: limitador de tensión.

El **diodo Zener** es un diodo construido para funcionar en las zonas de rupturas y recibe el nombre por su inventor, Clarence Zener. Cuando se conecta en paralelo con una fuente de tensión variable de modo que se polariza en inversa, un diodo Zener empieza a conducir cuando la tensión alcanza la tensión de ruptura inversa del diodo. A partir de ahí, la baja impedancia del diodo mantiene la tensión aproximadamente constante. Se consiguen tensiones de ruptura de (2 – 200)V y potencias máximas de entre 0,5 W y 50 W.

El **efecto Zener** se produce cuando la intensidad del campo eléctrico es muy elevada y consigue arrancar electrones desde la banda de valencia en un diodo polarizado inversamente. La polarización inversa hace que la banda de valencia del material p corresponda al nivel de energía de la banda de conducción en el material n . Bajo esta condición, los electrones de valencia del material p pueden cruzar la región de unión sin adquirir ninguna energía adicional, esto lleva a un gran número de portadores de carga libres. Esta acción también se denomina **efecto túnel**. Este fenómeno sólo tiene lugar en los diodos muy dopados, como son los diodos Zener.

Existe también otro mecanismo para crear una gran cantidad de cargas libres llamado **efecto avalancha**. Cuando la tensión en polarización inversa alcanza el valor de la tensión de ruptura, los electrones que han saltado a la banda de conducción por efecto de la temperatura se aceleran debido al campo eléctrico incrementando su energía cinética, de forma que al colisionar con electrones de valencia los liberan, éstos a su vez, se aceleran y colisionan con otros electrones de valencia liberándolos también, produciéndose una avalancha de electrones cuyo efecto es incrementar la corriente conducida por el diodo sin apenas incremento de la tensión.

La curva característica del diodo Zener tiene tres zonas diferentes. En polarización directa la intensidad es mínima hasta la tensión umbral, $V < V_\gamma$. Para tensiones más elevadas el diodo empieza a conducir hasta que llega a la intensidad máxima I_{max} que puede circular sin que el diodo se estropee por efecto Joule. En polarización inversa ($V > -V_z$) el diodo prácticamente no conduce hasta la tensión Zener V_z . Para tensión negativa de un valor absoluto más grande de V_z , el diodo empieza a conducir y la

intensidad de corriente puede ser bastante elevada antes de llegar a la tensión máxima en polarización inversa, $I_{\max, z}$. La corriente en polarización inversa puede ser mucho más intensa que en polarización directa.

Un modelo simplificado que describe un **diodo Zener ideal** asume que el diodo conduce en polarización directa cuando la diferencia de potencial en sus extremos es mayor que V_γ . El valor de la diferencia de potencial se mantiene constante en V_γ por cualquier valor de la intensidad. El diodo Zener ideal conduce en polarización inversa cuando la diferencia de potencial en sus extremos es mayor que V_z , i.e. para $V < -V_z$. El valor de la diferencia de potencial se mantiene constante en V_z para cualquier valor de la intensidad.

Como en polarización inversa la diferencia de potencial en los extremos del diodo Zener es muy estable y la intensidad de corriente puede ser elevada, su principal aplicación es como **limitador de tensión** para proteger de sobretensiones un circuito o una parte de un circuito. Para ello un diodo Zener se conecta en paralelo al circuito o la parte del circuito a proteger.

3.6. Transistores MOSFET de enriquecimiento. Puertas lógicas.

El **transistor** es un dispositivo electrónico semiconductor que cumple funciones de amplificador, oscilador, conmutador o rectificador. El término «transistor» es la contracción en inglés de “*transfer resistor*”. El transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor o **MOSFET** (en inglés, *Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor*) es un transistor utilizado para amplificar o conmutar señales electrónicas. MOSFET es el transistor más utilizado en la industria microelectrónica.

Los transistores tienen varias ventajas sobre los tubos de vacío. Cualquier aparato que use válvulas de vacío no funciona inmediatamente después de haberse conectado. El transistor no requiere calentamiento. El uso de un transistor en lugar de tubos de vacío ahorra mucha energía, y por tanto, resulta más económico. La respuesta del transistor a señales de frecuencias muy altas es muy efectiva, lo cual no ocurre con las válvulas termoiónicas. Como el tamaño de un transistor es mucho menor que el de los tubos de vacío, con él se inició la miniaturización de los aparatos electrónicos.

El transistor es el componente fundamental de la electrónica moderna, tanto digital como analógica. En los circuitos digitales se usan como interruptores, y disposiciones especiales de transistores configuran las puertas lógicas, memorias RAM y otros

dispositivos. En los circuitos analógicos se usan principalmente como amplificadores. Los MOSFET de enriquecimiento han revolucionado la industria de los ordenadores, ya que son ideales como dispositivos de conmutación por su tensión de umbral.

Hay varios tipos de transistores:

- BJT: Transistores bipolares de unión.
- FET: Transistores de efecto de campo.
- JFET: Transistores de efecto de campo de unión.
- MESFET: Transistores de efecto de campo de metal semiconductor.
- MOSFET: Transistores de efecto de campo de metal-óxido-semiconductor.

Típicamente, un transistor está formado por dos uniones $p-n$ en un solo cristal semiconductor, separados por una región muy estrecha. De esta manera quedan formadas tres regiones: drenador D, compuerta G (de inglés “*gate*”) y fuente o surtidor S (en inglés “*source*”). Los **MOSFET de enriquecimiento** se basan en la creación de un canal entre el drenador y el surtidor, al aplicar una tensión en la compuerta. La tensión de la compuerta atrae portadores minoritarios hacia el canal, de manera que se forma una región de inversión, es decir, una región con dopado opuesto al que tenía el sustrato originalmente. El término **enriquecimiento** hace referencia al incremento de la conductividad eléctrica debido a un aumento de la cantidad de portadores de carga en la región correspondiente al canal. El canal puede formarse con un incremento en la concentración de electrones (en un nMOSFET o **NMOS**), o huecos (en un pMOSFET o **PMOS**). De este modo un transistor NMOS se construye con un sustrato tipo p y tiene un canal de tipo n con el orden de sustratos $n-p-n$, mientras que un transistor PMOS se construye con un sustrato tipo n y tiene un canal de tipo p con el orden de sustratos $p-n-p$.

Los MOSFET tienen tres regiones operativas diferentes: región de corte, región lineal región de saturación. Para entender, en qué región está funcionando un MOSFET hay que analizar cuales son las diferencias de potencial:

- V_{GS} entre la compuerta G y es surtidor S,
- V_{DS} entre el drenador D y es surtidor S,
- V_T , la tensión de umbral del transistor (prácticamente del diodo, formado por unión $p-n$ entre compuerta G y el surtidor S)

Para un transistor **NMOS**:

La **región de corte**, definida por $V_{GS} < V_T$, corresponde a una diferencia de potencial entre drenador y surtidor menor a la tensión umbral del transistor. No existe un canal entre la fuente y el drenador, entonces no hay conducción entre el surtidor y el drenador y el MOSFET se comporta como un interruptor abierto. El dispositivo se encuentra apagado.

En la **región óhmica** (región lineal), definida por $V_{GS} > V_T$ y $V_{DS} < (V_{GS} - V_T)$, la diferencia de potencial entre drenador y surtidor es mayor que la tensión umbral del transistor y el transistor conduce. El transistor se comporta como una resistencia controlada por la tensión de compuerta. La corriente entre el drenador y la fuente es modelada por medio de la ecuación $I_D = \beta [(V_{GS} - V_T) V_{DS} - V_{DS}^2 / 2]$, donde β es un parámetro característico del transistor, con unidades A/V².

En el límite de V_{DS} pequeño se puede aproximar la intensidad con $I_D = \beta [(V_{GS} - V_T) V_{DS} - V_{DS}^2 / 2] \approx \beta (V_{GS} - V_T) V_{DS}$. Entonces hay relación lineal entre la intensidad I_D y V_{DS} . La relación lineal entre voltaje e intensidad puede ser interpretada como la ley de Ohm, $V_{DS} = I_D r_{DS}$, donde la resistencia r_{DS} del canal es $r_{DS} = 1 / [\beta (V_{GS} - V_T)]$.

En la **región de saturación**, definida por $V_{GS} > V_T$ y $V_{DS} > (V_{GS} - V_T)$, la corriente entre fuente y drenador se hace independiente de la diferencia de potencial entre ambos terminales y viene dada por la ecuación $I_D = \beta / 2 \times (V_{GS} - V_T)^2$.

Para un transistor **PMOS** las regiones se definen por la diferencia de potenciales en el siguiente modo:

- $V_{GS} > V_T$, la región de corte,
- $V_{GS} > V_T$ y $V_{DS} < (V_{GS} - V_T)$, la región de saturación,
- $V_{GS} > V_T$ y $V_{DS} > (V_{GS} - V_T)$, la región óhmica.

En el símbolo eléctrico la flecha siempre apunta en la dirección p hacia n , de forma que un NMOS (canal n en una tina p o sustrato p) tiene la flecha apuntando hacia adentro (desde el sustrato hacia el canal).

Una **puerta lógica** es un dispositivo electrónico con una función booleana. Se pueden aplicar a tecnología electrónica, mecánica, hidráulica, etcétera.

El álgebra de Boole es una estructura algebraica que esquematiza las operaciones lógicas Y, O, NO y SI (AND, OR, NOT, IF), así como el conjunto de operaciones unión, intersección y complemento.

En el álgebra de Boole se utilizan leyes de De Morgan para expresar las conjunciones y disyunciones puramente en términos de “sí” vía negación. En adición a la utilidad formal en la simplificación de las expresiones lógicas, las leyes de De Morgan pueden ser utilizadas para la optimización de los circuitos digitales mediante la sustitución de algunos elementos por otros elementos lógicos.

Las leyes de De Morgan son:

- La negación de la conjunción es la disyunción de las negaciones.
- La negación de la disyunción es la conjunción de las negaciones.

3.7. Inversor CMOS.

CMOS (del inglés “*complementary metal–oxide–semiconductor*”) es un dispositivo formado por un NMOS y un PMOS, realizados sobre la misma oblea. La “simetría complementaria” se refiere al hecho que el CMOS utiliza pares complementarios y simétricos de NMOS y PMOS para funciones lógicas. Utilizando CMOS es posible diseñar un circuito inversor cuya disipación de potencia en corriente continua sea prácticamente nula porque solo consume potencia en los transitorios que representan cambios de estado a la salida.

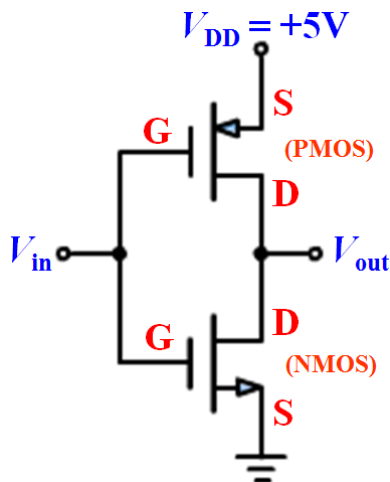


Ilustración 1. Un circuito de Inversor CMOS.

Una posible implementación de operación lógica de inversión, basada en circuito CMOS está presentada en la Ilustración 1. La operación necesita una entrada, codificada por el voltaje V_{in} y tiene solo una salida, codificada con voltaje V_{out} .

3.8. Retraso y potencia en circuitos digitales.

Las cifras de mérito para un circuito digital son la velocidad y el consumo de energía. La “velocidad de cambio” describe cuantas veces por segundo un inversor NOT puede cambiar el estado de TRUE a FALSE. Un circuito lógico más rápido puede lograr más operaciones en el mismo tiempo. En circuitos digitales hay disipación de energía debido a cambios del voltaje desde bajo voltaje (típicamente, $V_{\text{LOW}} = 0 \text{ V}$) a alto voltaje (típicamente, $V_{\text{HIGH}} = 5 \text{ V}$) y, también, a la carga y descarga de capacidades parásitas.

En lo siguiente, consideraremos un circuito digital como una red de interruptores con capacidades parásitas, que se pueden describir estadísticamente en términos de valores medios. Por lo tanto, examinamos un interruptor, el cual carga y descarga una capacidad representativa C (valores típicos son de $1\mu\text{F}$) con tensión de alimentación V_{DD} y corriente I .

La **potencia total** del consumo de energía es la suma de un componente dinámico de carga y descarga de la capacitancia y de un componente estático de la corriente de fuga, $P_{\text{tot}} = p f_c C V_{\text{DD}}^2 + I \cdot V_{\text{DD}}$, donde f_c es la frecuencia de reloj (*clock*) y p es la probabilidad de conmutación, también denominada relación de actividad.

Otra medida de consumo es la **energía de conmutación** $E = C V_{\text{DD}}^2 + I \cdot V_{\text{DD}} / (p f_c)$.

La descarga del condensador no es inmediata pero tiene una forma exponencial, $I(t) = I(t=0) \exp\{-t/\tau\}$. Eso causa un **retraso** en el cambio de estado. El tiempo característico es $\tau = RC$. En el modelo considerado no hay resistencia explícita, pero la podemos aproximar desde la relación $R = V_{\text{DD}} / I$, lo que resulta en el tiempo característico de retraso $\tau = V_{\text{DD}} C / I$. Considerando la lógica CMOS creada por el uso de MOSFET la resistencia típica asociada al circuito es $R = 1 / [\beta V_{\text{DD}}]$, así obtenemos aproximadamente $\tau = C / [\beta V_{\text{DD}}]$.

3.9. Lógica CMOS.

En la actualidad, la mayoría de los circuitos integrados que se fabrican utilizan la tecnología CMOS. Esto incluye microprocesadores, memorias, procesadores digitales de señales y muchos otros tipos de circuitos integrados digitales cuyo consumo es considerablemente bajo. Vamos a considerar ejemplos de implementación de circuitos lógicos con la tecnología CMOS.

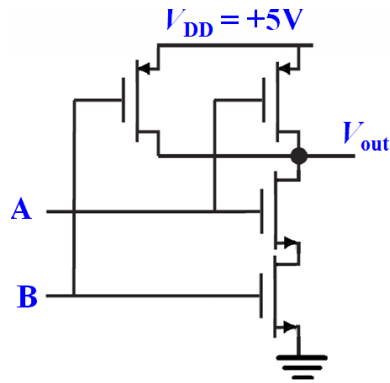


Ilustración 2. Un circuito NAND.

Una posible implementación CMOS de operación lógica de NAND está gráficamente descrita en la Ilustración. En este caso hay dos entradas A y B con voltaje alto o bajo. El resultado de la operación NAND se lee a la salida, codificado por el voltaje V_{out} .

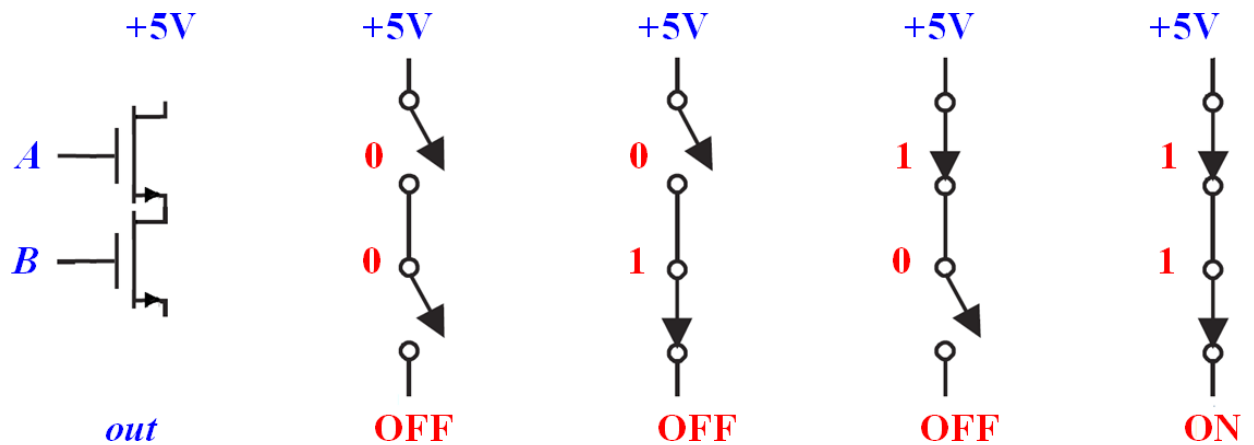


Ilustración 1. Operación AND implementada por NMOS en serie.

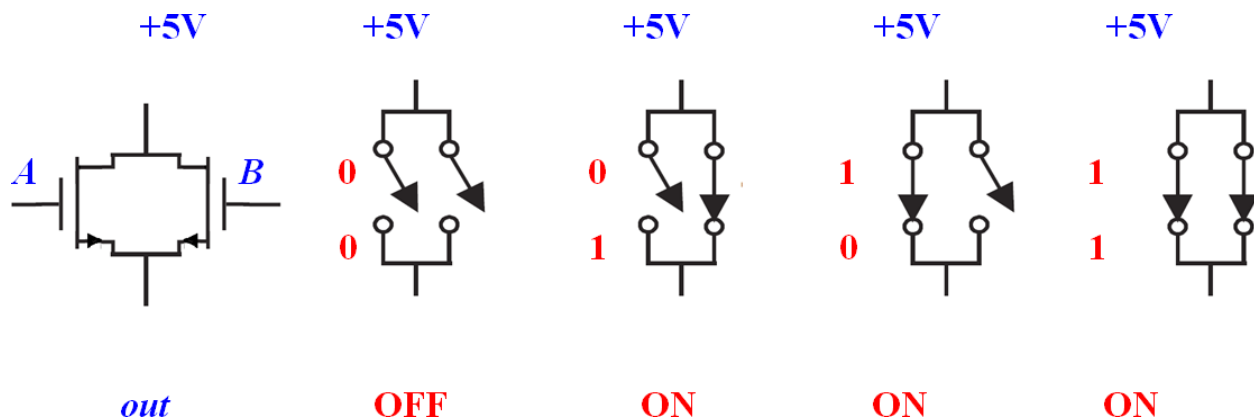


Ilustración 2. Operación OR implementada por NMOS en paralelo.

Utilizando NMOS y/o PMOS en serie o en paralelo se pueden crear circuitos electrónicos, correspondientes a una deseada expresión lógica. Como ejemplo, la

operación AND puede ser implementada por dos NMOS en serie (Ilustración 1), la operación NOR por dos PMOS en serie; la operación OR por dos NMOS en paralelo (Ilustración 2); la operación NAND por dos PMOS en paralelo. Combinando los circuitos de AND, OR, NAND y NOR e inversión se puede codificar cualquier expresión de la lógica booleana.

4. Ondas

La **teoría de ondas** es una rama de la física que se ocupa de las propiedades de los fenómenos ondulatorios. Una peculiaridad de estos fenómenos es que el estudio de sus características no depende del tipo de onda en cuestión. Por ejemplo, la acústica se diferencia de la óptica en que las ondas sonoras están relacionadas con aspectos más mecánicos que las ondas electromagnéticas.

4.1 Tipos de ondas. Función de onda.

En física, una **onda** consiste en la propagación de una perturbación de alguna propiedad de un medio, implicando un transporte de energía sin transporte de materia. Las perturbaciones pueden ser observadas en cantidades muy diferentes, como densidad y presión en el caso del sonido o campo eléctrico-magnético en el caso de la luz. Igualmente, los medios de propagación de ondas pueden ser muy diferentes, por ejemplo aire, agua, metales e, incluso, inmaterial como el vacío. Las ondas se pueden clasificar en función de la necesidad o no de un medio de propagación a: ondas mecánicas (necesitan un medio para propagarse) y electromagnéticas (existen también en vacío).

Las **ondas electromagnéticas** no necesitan un medio para su movimiento, y viajan a través del vacío a la velocidad de la luz, $c = 299\,792\,458$ m/s.

Las **ondas mecánicas** son las ondas que necesitan un medio material para transportarse, como el agua, el aire, la superficie de un líquido, la cuerda, etc. También se pueden clasificar las ondas comparando la dirección de propagación de la onda y la dirección de movimiento del medio. Hay tres tipos de ondas mecánicas: transversales, longitudinales y superficiales:

1. En las **ondas transversales** las partículas del medio oscilan perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda. Por ejemplo, una

onda que se mueva hacia la derecha, pero en la que el desplazamiento del medio es hacia arriba y hacia abajo formando ángulos rectos respecto al movimiento de la onda. Las ondas en las cuerdas de un violín son ejemplos representativos de ondas transversales.

2. En **ondas longitudinales** las partículas del medio se mueven paralelamente a la dirección de propagación de la onda. El desplazamiento del medio es en la misma dirección del movimiento de la onda. Ejemplos de este tipo de ondas son el sonido y algunas ondas sísmicas generadas en un terremoto.
3. Las **ondas superficiales** son una mezcla de ondas longitudinales y transversales. Es decir cuando las ondas profundas en un lago o en el océano son longitudinales, pero en la superficie del agua las partículas se mueven tanto en paralelo como perpendicularmente a la dirección de la onda.

La clasificación de las ondas también puede ser hecha por la geometría de la propagación y por la forma que crea el frente de una onda libre. Se denomina **frente de onda** al lugar geométrico en que los puntos del medio son alcanzados en un mismo instante por una determinada onda y, entonces, comparten la misma fase. Dada una onda propagándose en el espacio o sobre una superficie, los frentes de onda pueden visualizarse como superficies o líneas que se desplazan a lo largo del tiempo alejándose de la fuente sin tocarse. Tipos de ondas en función del frente de onda son ondas unidimensionales, bidimensionales (superficiales) y tridimensionales (esféricas).

1. Las **ondas unidimensionales** son aquellas que se propagan a lo largo de una sola dirección del espacio. Por ejemplo, las ondas en los muelles o en las cuerdas son unidimensionales. Si la onda se propaga en una dirección única, sus frentes de onda son planos y paralelos.
2. Las **ondas bidimensionales** son ondas que se propagan en dos direcciones. Pueden propagarse en cualquiera de las direcciones de una superficie, por ello, se denominan también ondas superficiales. Un ejemplo son las ondas que se producen en una superficie líquida en reposo cuando se deja caer una piedra en ella.
3. Las **ondas tridimensionales** son ondas que se propagan en tres direcciones. Las ondas tridimensionales se conocen también como ondas esféricas, porque sus frentes de ondas son esferas concéntricas que salen de la fuente de perturbación expandiéndose en todas direcciones. Por ejemplo, el sonido es una onda tridimensional.

Las ondas también se pueden diferenciar por la forma y presencia (o ausencia) de la periodicidad.

1. Las **ondas periódicas** están generadas por una perturbación local que se produce en ciclos repetitivos. Un ejemplo de una onda periódica es una onda sinusoidal.
2. En las **ondas no periódicas**, la perturbación que las genera se produce aisladamente o, en el caso de que se repita, las perturbaciones sucesivas tienen características diferentes.
3. Las **ondas aisladas** no periódicas también se denominan pulsos.

Una **onda electromagnética** es la forma de propagación de la radiación electromagnética a través del espacio. Las ondas electromagnéticas son transversales; las direcciones de los campos eléctrico y magnético son perpendiculares a la de propagación. Las ondas electromagnéticas no necesitan de un medio material para propagarse; es decir, pueden desplazarse por el vacío.

Una **onda acústica** es el sonido audible que produce oscilaciones de la presión del aire. La propagación del sonido es similar en los fluidos, donde el sonido toma la forma de fluctuaciones de presión.

Para una descripción matemática de una onda periódica se utilizan los siguientes términos:

- El período T es el tiempo que tarda la onda en ir de un punto de máxima amplitud al siguiente.
- La amplitud es la distancia vertical entre una cresta y el punto medio de la onda.
- La frecuencia f es el número de veces que es repetida dicha vibración por unidad de tiempo.
- La longitud de onda λ es la distancia que hay entre el mismo punto de dos ondulaciones consecutivas, o la distancia entre dos crestas consecutivas.
- El nodo es el punto donde la onda cruza la línea de equilibrio.

La función de onda $f(\mathbf{r}, t)$ es la función que describe la evolución espacial y temporal de la perturbación. Por ejemplo, para una onda acústica, la función $f(\mathbf{r}, t)$ puede describir la densidad en cada punto del espacio en cualquier momento. Para una onda electromagnética, la función $f(\mathbf{r}, t)$ puede representar el valor del campo eléctrico. Consideramos una onda descrita por la función de onda $f(\mathbf{r}, t) = f(kx - \omega t)$. El frente de onda está formado por puntos que comparten la misma fase, por tanto en un instante

dado t un frente de onda está formado por el lugar geométrico (superficie o línea) de todos los puntos cuyas coordenadas satisfacen la relación $kx - \omega t = \text{const}$. La **velocidad de fase** v_f de una onda es la tasa a la cual la fase de la misma se propaga en el espacio. Ésta es la velocidad a la cual la fase de cualquier componente en frecuencia de una onda se propaga (que puede ser diferente para cada frecuencia). La velocidad de fase está dada en términos de la velocidad angular de la onda ω y del vector de onda k por la relación: $v_f = \omega / k$. Considerando el desplazamiento de la posición de la fase cero, $kx - \omega t = 0$, encontramos la **dirección de propagación** de onda, $x/t = +\omega/k$, es decir la onda propaga hacia la derecha (abscisas positivas). Una onda descrita por función de onda $f(kx + \omega t)$ resulta en $x/t = -\omega/k$ y en caso caso, la onda se dirige hacia la izquierda (abscisas negativas).

Una clase importante de ondas periódicas son las ondas armónicas.

4.2 Ondas armónicas.

Una **onda armónica** unidimensional es aquella que propagándose en una dimensión puede ser descrita mediante una función sinusoidal (seno o coseno). Muchos fenómenos físicos pueden ser descritos por estas ondas, además cualquier movimiento ondulatorio puede expresarse como superposición de ondas armónicas por el teorema de Fourier.

La fuente que produce la perturbación describe un movimiento armónico simple, $f(x=0, t) = A \sin(2\pi f t)$, donde f es la frecuencia del movimiento armónico y $x=0$ es la posición de la fuente. En un punto situado a distancia x la dependencia con el tiempo es $f(x, t) = A \sin(2\pi f (t - t_x))$ donde t_x es el tiempo de propagación de señal entre la fuente y el punto. Suponemos la velocidad de propagación v constante en el medio elegido, es decir $x = v \cdot t_x$, lo que resulta en $f(x, t) = A \sin(2\pi f (t - x/v)) = A \sin(2\pi f (t/T - x/\lambda)) = A \sin(\omega t - kx)$. Aquí, $T = 1/f$ es el periodo, $\lambda = v T$ es la longitud de onda (es decir, la distancia que hay entre una partícula y la más próxima en fase), $\omega = 2\pi/T$ es la frecuencia angular, $k = 2\pi/\lambda$ es el número de onda.

4.3 Ondas electromagnéticas. Densidad de energía. Intensidad.

Una onda **electromagnética** es la forma de propagación de la radiación electromagnética a través del espacio. Las ondas electromagnéticas no necesitan un medio material para propagarse y pueden desplazarse por el vacío. Las ondas luminosas son ondas electromagnéticas cuya frecuencia está dentro del rango de la luz visible.

Las ondas electromagnéticas son transversales; las direcciones de los campos eléctrico y magnético son perpendiculares a la de propagación. Los aspectos teóricos están relacionados con la solución en forma de onda que admiten las ecuaciones de Maxwell.

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \vec{E} &= 4\pi\rho \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} &= 0 \\ \nabla \times \vec{B} - \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} &= 4\pi\vec{J}\end{aligned}$$

Las **ecuaciones de Maxwell** son un conjunto de cuatro ecuaciones que describen por completo los fenómenos electromagnéticos. Lo que para la Mecánica Clásica significan las Leyes de Newton lo son las Ecuaciones de Maxwell para los fenómenos Eléctricos y Magnéticos.

La **permeabilidad eléctrica** es la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de ella los campos eléctricos. La permeabilidad absoluta ϵ está dada por la relación entre el desplazamiento eléctrico D en el material y la intensidad del campo eléctrico E que aparece en el interior de dicho material $\epsilon = D / E$. La constante dieléctrica (**permeabilidad del vacío**) es $\epsilon_0 = 8.85... \times 10^{-12}$ F/m.

La **permeabilidad magnética** es la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de los campos magnéticos. La permeabilidad absoluta μ está dada por la relación entre la inducción magnética B en el material y la intensidad de campo magnético H que aparece en el interior de dicho material., $\mu = B / H$. La constante magnética es: $\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$ T m A⁻¹.

La **velocidad de la luz** en el vacío es una constante universal de valor 299 792 458 m/s (suele aproximarse a $3 \cdot 10^8$ m/s). Se simboliza con la letra c , proveniente del latín *celeritās* (celeridad o rapidez). Es la velocidad máxima a la que toda energía, materia y la información puede viajar en el universo. Es la velocidad de todas las partículas sin

masa y campos asociados — incluyendo la radiación electromagnética como la luz, en el vacío, y se prevé en la teoría actual que la velocidad de la gravedad (es decir, las ondas gravitacionales).

La velocidad de la luz c , la permitividad eléctrica ϵ_0 y la constante magnética del vacío μ_0 están relacionadas por la fórmula $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$.

La ecuación diferencial para el campo eléctrico E se puede obtener desde ecuaciones de

Maxwell y es $\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$. En un caso de propagación de una onda plana en una

dirección (el eje x) la ecuación diferencial es $\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$, con solución

$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 \cos(kx \pm \omega t + \delta)$, donde E_0 es la amplitud y δ es la fase. Hay dos soluciones posibles, correspondientes a ondas armónicas con propagación en las direcciones positiva y negativa.

También las ecuaciones de Maxwell permiten escribir la ecuación diferencial para el

campo magnético B y es $\nabla^2 \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$, con la solución en una dimensión

$\vec{B}(x, t) = \vec{B}_0 \cos(kx \pm \omega t + \delta)$, donde B_0 es la amplitud del campo magnético. Los campos eléctrico y magnético son mutuamente perpendiculares y vibran en fase.

Los módulos de los campos eléctrico y magnético son linealmente proporcionales, $E_0 = c \cdot B_0$, con el coeficiente de proporción dado por la velocidad de la luz c .

Las ondas electromagnéticas son transversales, es decir los campos eléctrico y magnético son perpendiculares a la dirección de propagación. Si el vector u es paralelo a

aquella dirección tenemos, $\vec{B} = \frac{1}{c} [\vec{u} \times \vec{E}]$ y $\vec{E} = \frac{1}{c} [\vec{B} \times \vec{u}]$.

El **producto vectorial**, $\vec{c} = [\vec{a} \times \vec{b}]$, es una operación binaria entre dos vectores de un espacio euclídeo tridimensional que da como resultado un vector ortogonal a los dos vectores originales. El módulo de c está dado por $c = |a| |b| \sin \vartheta$ donde ϑ es el ángulo entre los vectores a y b . La dirección del vector c , que es ortogonal a a y ortogonal a b , está dada por la **regla de la mano derecha**. Usamos los tres dedos consecutivos de la mano derecha, empezando con el pulgar, índice y, finalmente, el dedo medio, los cuales se posicionan apuntando a tres direcciones diferentes perpendiculares: el pulgar

determina la primera dirección vectorial, el índice la segunda, el corazón nos indicará la dirección del tercero.

Sea un sistema de referencia $\{i; j; k\}$ en el espacio vectorial. Se dice que es una **base ortonormal** derecha si cumple con las siguientes condiciones: los tres vectores son ortogonales entre sí, los vectores son vectores unitarios, los vectores cumplen la regla de la mano derecha.

Una **onda plana** es una onda de frecuencia constante cuyos frentes de onda (superficies con fase constante) son planos paralelos de amplitud constante normales al vector velocidad de fase. En una onda plana los campos dependen de una única coordenada espacial. La onda del campo eléctrico puede tener dos componentes vectoriales perpendiculares (transversales) a la dirección de propagación. Las dos componentes vectoriales transversales varían su amplitud con el tiempo, y la suma de ambas va trazando una figura geométrica. Si dicha figura es una recta, la **polarización** se denomina **lineal**, cuando es un círculo se denomina **circular**.

Un campo almacena energía. La **densidad instantánea** de un campo eléctrico es

$$\eta(x, t) = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0} = \varepsilon_0 E^2 = \varepsilon_0 E_0^2 \sin^2(kx \pm \omega t + \delta)$$

La densidad de energía instantánea asociada con el campo magnético de una onda electromagnética es igual a la densidad de energía instantánea asociada con el campo eléctrico. La densidad instantánea de un campo eléctrico es

$$\eta(x, t) = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0} = \varepsilon_0 E^2 = \varepsilon_0 E_0^2 \sin^2(kx \pm \omega t + \delta)$$

La densidad media es

$$\eta = \langle \eta(x, t) \rangle = \varepsilon_0 E_0^2 \langle \sin^2(kx \pm \omega t + \delta) \rangle = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E_0^2 = \frac{1}{2}\frac{B_0^2}{\mu_0}$$

La intensidad instantánea que posee una onda electromagnética, es decir, la energía que por unidad de tiempo atraviesa la unidad de superficie, colocada perpendicularmente a la dirección de propagación es $I(x, t) = P / S = c\eta(x, t)$. La intensidad media que se propaga es $I = c\eta$.

En mecánica ondulatoria la **ley de la inversa del cuadrado** establece que para una onda como, por ejemplo, el sonido o la luz, que se propaga desde una fuente puntual en todas direcciones por igual, la intensidad de la misma disminuye de acuerdo con el

cuadrado de la distancia a la fuente de emisión, $I=P/S = c\eta(x,t)=P/(4\pi r^2)$.

4.4 Espectro electromagnético.

Se denomina **espectro electromagnético** a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. El espectro electromagnético se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, desde los rayos gamma y los rayos X, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como las ondas de radio. El espectro electromagnético se puede expresar en función de la frecuencia f de onda, $f=1/T$, la longitud λ de onda, $\lambda = c T$, o la temperatura de emisión del cuerpo negro.

Las **ondas de radiofrecuencia** son aquellas con frecuencia de onda $f \in [1 \text{ Hz}, 10^9 \text{ Hz}]$ o longitud de onda $\lambda \in [1 \text{ km}, 0.3 \text{ m}]$. Son las ondas emitidas y captadas por los circuitos eléctricos de radio. Las ondas radio se clasifican en

- ondas de frecuencia ultraalta (UHF) con $f > 0.3 \text{ GHz}$ y $0.3 \text{ m} < \lambda < 1$
- ondas de frecuencia muy alta (VHF) con $f > 30 \text{ MHz}$ y $1 \text{ m} < \lambda < 10 \text{ m}$
- ondas de radio cortas y medias AM con f en MHz y $10 \text{ m} < \lambda < 1 \text{ km}$
- ondas de radio largas con la f en kHz y $\lambda > 1 \text{ km}$.

Las **microondas** tienen la frecuencia de onda $f \in [10^9 \text{ Hz}, 10^{11} \text{ Hz}]$ y la longitud de onda $\lambda \in [0.1 \text{ cm}, 30 \text{ cm}]$. Las frecuencias de onda típicas de las microondas coinciden con la frecuencia de vibración de las moléculas de agua de 2.45 GHz lo que se utiliza en la base de los hornos microondas. Son las ondas utilizadas en radares para detectar objetos por la reflexión. Los navegadores satelitales GPS utilizan microondas (1.2 GHz - 1.6 GHz).

Las ondas **infrarrojas** engloban las frecuencias de onda $f \in [10^{11} \text{ Hz}, 10^{14} \text{ Hz}]$ y se dividen en subintervalos en función de la longitud de onda en:

- IR cercano: $780 \text{ nm} < \lambda < 3000 \text{ nm}$
- IR intermedio: $3000 \text{ nm} < \lambda < 6000 \text{ nm}$
- IR lejano: $6000 \text{ nm} < \lambda < 15000 \text{ nm}$
- IR extremo: $15000 \text{ nm} < \lambda < 1 \text{ mm}$

Aproximadamente la mitad de la energía electromagnética del sol está emitida en infrarrojo. Cualquier molécula por encima del cero absoluto radiará en el infrarrojo. Los cuerpos calientes radian infrarrojo en un espectro continuo (por ejemplo un radiador) y el cuerpo humano también radia infrarrojos. Esta emisión se utiliza para visión nocturna y algunos animales pueden ver en infrarrojo (ej. serpientes, algunos peces, mosquitos, etc.). Los mandos a distancia funcionan con ondas infrarrojas.

La **luz visible** se compone del conjunto de ondas electromagnéticas que pueden ser vistos por el ojo humano. La longitud de onda es $\lambda \in [400\text{nm}, 700\text{nm}]$ y la frecuencia $f \in [4 \times 10^{14} \text{ Hz}, 8 \times 10^{14} \text{ Hz}]$. Newton fue el primero en reconocer que la luz blanca es la mezcla de todos los colores del espectro visible. El color no es una propiedad de la luz en sí misma, sino una manifestación de nuestro sistema de percepción. La luz no es amarilla, la vemos amarilla, ya que con distintas mezclas de distintas longitudes de onda podemos obtener la misma respuesta en nuestro ojo. Se puede establecer la siguiente categorización en cuanto a las longitudes de onda y el color que vemos:

- 625 nm $< \lambda < 740$ nm: rojo,
- 590 nm $< \lambda < 625$ nm: naranja,
- 565 nm $< \lambda < 590$ nm: amarillo,
- 520 nm $< \lambda < 565$ nm: verde,
- 500 nm $< \lambda < 520$ nm: cian,
- 435 nm $< \lambda < 500$ nm: azul,
- 380 nm $< \lambda < 435$ nm: violeta.

Las ondas **ultravioletas** tienen longitudes de onda $\lambda \in [10\text{nm}, 400\text{nm}]$ y la frecuencia de onda $f \in [7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}, 3 \times 10^{16} \text{ Hz}]$. Los rayos ultravioletas del sol ionizan los átomos de la atmósfera superior y así se crea la ionosfera. El ozono absorbe estos rayos en la atmósfera. Los seres humanos no ven las ondas ultravioletas porque las absorbe la córnea y el cristalino.

Los **rayos X** fueron descubiertos por Röntgen (1845-1923). Tienen frecuencias $f \in [3 \times 10^{16} \text{ Hz}, 3 \times 10^{19} \text{ Hz}]$ y longitudes de onda $0.1 \text{ \AA} < \lambda < 100 \text{ \AA}$, donde un Angstrom es $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ y corresponde al tamaño típico de un átomo. La energía de estas ondas es muy elevada $0.124 \text{ keV} < E < 124 \text{ keV}$, y por eso los rayos X pueden ser peligrosos. Coinciden con las frecuencias de transición entre capas de átomo. Se utilizan en medicina para radiodiagnóstico. También existen microscopios de rayos X.

Los **rayos gamma** tienen frecuencias de onda muy elevadas $f > 3 \times 10^{19}$ Hz y longitudes de onda muy pequeñas $\lambda = c/f < 10^{-11} \text{ m} = 0.1 \text{ \AA}$, menores del radio de Bohr (lo que es una dimensión típica de un átomo) $a_0 = \hbar^2 / k m_e e^2 = 0.52 \times 10^{-10} \text{ m}$. La energía $E = hf > 0.124 \text{ MeV}$ (muy energético y peligroso). Son emitidas por partículas que están sujetas a transiciones dentro del núcleo atómico.

4.5 Polarización. Pantallas de cristal líquido.

Un fenómeno que comprueba que la luz es una onda transversal es el fenómeno de la **polarización**. Cuando el movimiento ondulatorio es transversal, las partículas vibran perpendicularmente en cualquiera de las direcciones de propagación de la onda, mientras en una onda longitudinal, las partículas vibran en la misma dirección de propagación de la onda, tal es el caso del sonido. Entonces, en una onda de luz hay más de una posibilidad de orientación del campo electromagnético.

Las dos componentes vectoriales transversales del campo electromagnético varían su amplitud con el tiempo, y la suma de ambas va trazando una figura geométrica. Si dicha figura es:

- una recta, la polarización se denomina **lineal**
- un círculo, la polarización es **circular**
- una elipse, la polarización es elíptica.

Se fabrican **filtros polarizadores**, los cuales dejan pasar solo las ondas de una polarización deseada. Por ejemplo, un filtro polarizador plano sólo permitirá el paso de las vibraciones que están alineados con la dirección del filtro. Después de pasar el filtro, la luz estará linealmente polarizada. La luz se puede polarizar por reflexión, doble refracción, o absorción selectiva. Por ejemplo, la luz reflejada por la arena de una playa se encuentra parcialmente polarizada en el plano horizontal, poniendo un filtro polarizador se puede suprimir los rayos que están polarizados horizontalmente. Los filtros polarizados pueden impedir el deslumbramiento reflejado en las carreteras o en el pavimento. También existen filtros de polarización circular utilizados, por ejemplo, en fotografía.

Consideramos con más detalle que pasa con la luz después de pasar el **primer filtro polarizador**. Supongamos, que el filtro polarizador esté orientado en la dirección horizontal. El filtro deja pasar solo la componente horizontal de una onda eléctrica,

$\vec{E}_{out} = \vec{E}_{\parallel}$. La onda en la entrada puede ser descompuesta en la dirección paralela, \vec{u}_{\parallel} , y perpendicular, \vec{u}_{\perp} , al filtro, $\vec{E}_{in} = E_{\parallel}\vec{u}_{\parallel} + E_{\perp}\vec{u}_{\perp}$. Cuando la luz incidente no está polarizada las amplitudes en la dirección paralela y perpendicular son iguales, $E_{\parallel} = E_{\perp}$, y la amplitud en la entrada es $E_0 = \sqrt{2}E_{\parallel} = \sqrt{2}E_{\perp}$. La amplitud disminuye de factor $1/\sqrt{2}$. La energía $\eta = \frac{1}{2}\epsilon_0 E_0^2$ disminuye de factor $1/2$.

Cuando una luz polarizada pasa por un **segundo filtro polarizador** ese deja pasar solo la componente de la misma dirección $\vec{E}_{out} = \vec{E}_{\parallel}$. Si el ángulo entre el eje del polarizador y el eje de polarización de la luz incidente es α ,

$\vec{E}_{in} = E_{\parallel}\cos(\alpha)\vec{u}_{\parallel} + E_{\perp}\sin(\alpha)\vec{u}_{\perp}$. La amplitud del campo eléctrico disminuye en un factor $|\vec{E}_{out} / \vec{E}_{in}| = \cos(\alpha)$. La energía del campo disminuye en un factor $\eta_{out} / \eta_{in} = \cos^2(\alpha)$.

Hemos visto que cuando un rayo de luz polarizado linealmente atraviesa un polarizador perfecto, la intensidad en la salida $I_{out} = I_{in} \cos^2(\alpha)$. Esta relación tiene el nombre de **ley de Malus**.

Cuando la luz incidente no está polarizada, la podemos considerar como un campo aleatorio y calcular el valor medio sobre la ley de Malus, $I_{out} = I_{in} \langle \cos^2(\alpha) \rangle = \frac{1}{2} I_{in}$. Este resultado coincide con el obtenido anteriormente.

Cuando un rayo de luz polarizado linealmente atraviesa **N filtros polarizadores** perfectos cada uno de las cuales gira la luz un ángulo de $\alpha = 90^\circ / N$, la intensidad de la luz en la salida es $I_{out} = I_{in} \cos^{2N}(90^\circ / N)$. En el límite de un número grande de filtros polarizadores obtenemos $\lim_{N \rightarrow \infty} \cos^{2N}(90^\circ / N) = 1$. El resultado es bastante sorprendente, porque significa que se puede girar la polarización sin pérdidas en la intensidad.

Una **pantalla de cristal líquido LCD** (sigla del inglés “*liquid crystal display*”) es una pantalla delgada y plana formada por un número de píxeles en color o monocromos colocados delante de una fuente de luz o reflectora. En el estado sólido, las moléculas tienden a mantener su orientación y posición siempre de la misma forma. El estado líquido se caracteriza porque las moléculas cambian su orientación y se mueven a través del líquido. En el **cristal líquido**, las moléculas mantienen su orientación pero se

pueden mover a otras posiciones. Las moléculas de cristal líquido necesitan ser alineadas para permitir que la luz se refracte a lo largo de la cadena y alcanzar el otro lado. Mediante el anclaje de las moléculas del cristal a cada lado de la pantalla a través de canales en el vidrio, su estado natural crea las alineaciones necesarias. Cuando se aplica una corriente a cualquier elemento de la pantalla, las moléculas pierden la alineación necesaria, de forma que cualquier luz es bloqueada por el polarizador opuesto. El color se produce en forma RGB con celdas individuales de cristal líquido para el rojo, verde y azul.

4.6 Reflexión y refracción. Fibras ópticas.

Cuando una onda alcanza la superficie de separación de dos medios de distinta naturaleza se producen, en general, dos nuevas ondas: una que retrocede hacia el medio de partida y otra que atraviesa la superficie límite y se propaga en el segundo medio. El primer fenómeno se denomina reflexión y el segundo recibe el nombre de refracción.

Entonces, la **reflexión** es el cambio de dirección de un rayo o una onda que ocurre en la superficie de separación entre dos medios, de tal forma que regresa al medio inicial. Se llama plano de incidencia al formado por el rayo incidente justo antes de la superficie de separación y la normal en el punto de incidencia. Los rayos reflejado y refractado se encuentran en el plano de incidencia. El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

El **índice de refracción** n es una medida que determina la reducción de la velocidad de la luz al propagarse por un medio homogéneo. El índice está definido como el cociente de la velocidad c de un fenómeno ondulatorio como luz o sonido en el de un medio de referencia respecto a la velocidad de fase v en dicho medio, $n = v / c$. En el vacío la velocidad de la luz es $v=c$ y el índice de refracción es $n=1$. En agua $n=1,33$; en vidrio $n=1,50-1,70$; en diamante $n=2,42$.

El índice de refracción depende de la longitud de onda de la luz y este hecho se conoce como **dispersión cromática**. Utilizando un prisma, en el siglo XVIII, Isaac Newton descompuso la luz blanca en los diferentes colores que la componen. También la dispersión cromática provoca un retardo espectral (deformación) de un pulso óptico conforme se propaga por la fibra. La fibra óptica tiene un coeficiente de dispersión positivo. Esto quiere decir que a mayores longitudes de onda se tiene un mayor tiempo de tránsito a través de la fibra comparado con las longitudes de onda cortas.

Una onda (o luz) cruzando la frontera con otro medio cambia algunas características y mantiene otras: f – frecuencia (color) se mantiene, $T=1/f$ – periodo se mantiene, v – velocidad de la onda (o luz) cambia. Entrando desde el vacío (velocidad de luz c) cambia $n=c/v$ veces (velocidad en medio es más lenta). La longitud de onda cambia n veces $\lambda' = v T = (c T) / n = \lambda / n$, es decir la longitud en medio es más pequeña.

La **refracción** es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio a otro de distinta densidad óptica. El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal están en un mismo plano. La refracción cumple la **ley de Snell**, si ϑ_1 es el ángulo incidente, ϑ_2 - ángulo transmitido, n_1 - índice de refracción del primer medio, n_2 - índice de refracción del segundo medio, entonces $n_1 \cdot \sin \vartheta_1 = n_2 \cdot \sin \vartheta_2$.

La **reflexión interna total** es el fenómeno que se produce cuando un rayo de luz atraviesa un medio de índice de refracción n_2 , menor que el índice de refracción n_1 en el que éste se encuentra. La onda se refracta de tal modo que no es capaz de atravesar la superficie entre ambos medios reflejándose completamente. La reflexión total se produce solo para ángulos de incidencia superiores a un cierto valor crítico, ϑ_c . La reflexión interna total solamente ocurre en rayos viajando de un medio de alto índice refractivo hacia medios de menor índice de refracción, por ejemplo desde agua al aire.

El **ángulo crítico** o ángulo límite es el ángulo mínimo de incidencia en el cual se produce la reflexión interna total. El ángulo crítico se puede encontrar a partir de la ley de Snell poniendo el ángulo de refracción de 90° . Eso lleva a $\vartheta_c = \arcsin (n_2 / n_1)$, donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los medios con $n_2 < n_1$ y el argumento de arcsin es menor de uno.

La **fibra óptica** es un medio de transmisión empleado habitualmente en redes de datos. Es un hilo muy fino de material transparente, típicamente plástico, por el que se envían pulsos de luz que representan los datos a transmitir. El haz de luz queda completamente confinado y se propaga por el interior de la fibra con un ángulo de reflexión por encima del ángulo límite de reflexión total, en función de la ley de Snell. La fuente de luz puede ser láser o un LED. Cada filamento consta de un núcleo central de plástico o cristal (óxido de silicio y germanio) con un alto índice de refracción, rodeado de una capa de un material similar con un índice de refracción ligeramente menor. Cuando la luz llega a una superficie que limita con un índice de refracción menor, siendo el ángulo de incidencia grande, se habla de reflexión interna total.

El uso de fibra óptica para envío de datos tiene sus ventajas y desventajas. Las ventajas son que da una banda de paso muy ancha, lo que permite flujos muy elevados (del orden

del GHz); tiene pequeño tamaño y ocupa poco espacio; tiene gran flexibilidad, el radio de curvatura puede ser inferior a 1 cm lo que facilita la instalación; tiene una gran ligereza, el peso es del orden de algunos gramos por kilómetro, - unas nueve veces menos que el de un cable convencional de metal; tiene inmunidad total a las perturbaciones de origen electromagnético; no produce interferencias; es resistente al calor, frío, corrosión; tiene un coste menor respecto al cobre.

Las desventajas del uso de la fibra óptica son la alta fragilidad de las fibras; la necesidad de usar transmisores y receptores más caros; los empalmes entre fibras son difíciles de realizar lo que dificulta las reparaciones en caso de ruptura del cable; no se puede transmitir electricidad para alimentar repetidores intermedios; la necesidad de efectuar, en muchos casos, procesos de conversión eléctrica-óptica; la fibra óptica convencional no puede transmitir potencias elevadas; no existen memorias ópticas.

4.7 Interferencias.

La **interferencia** es un fenómeno en el que dos o más ondas se superponen para formar una onda resultante de mayor o menor amplitud. Este fenómeno puede ser observado en cualquier tipo de ondas, como luz, radio, sonido, ondas en la superficie del agua, etcétera.

Un caso importante de interferencia es la superposición de ondas con la misma frecuencia. Consideramos dos ondas de misma dirección, polarización y frecuencia, con el campo eléctrico dado por $\vec{E}_1 = \vec{E}_0 \sin(kx_1 - \omega t + \varphi_1) = \vec{E}_0 \sin \phi_1$ y

$\vec{E}_2 = \vec{E}_0 \sin(kx_2 - \omega t + \varphi_2) = \vec{E}_0 \sin \phi_2$, donde ϕ_1 y ϕ_2 son las fases de la ondas. Por el principio de superposición, $\vec{E}_1 + \vec{E}_2 = 2\vec{E}_0 \cos\left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2}\right) \sin\left(\frac{\phi_2 + \phi_1}{2}\right)$, o la dependencia explícita de las coordenadas y el tiempo,

$\vec{E}_1 + \vec{E}_2 = 2\vec{E}_0 \cos\left(\frac{k(x_2 - x_1) + \varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) \sin\left(\frac{k(x_2 + x_1)}{2} - \omega t + \frac{\varphi_2 + \varphi_1}{2}\right)$. El argumento del coseno

no incluye el tiempo y depende solo de las coordenadas y las fases iniciales. Podemos considerar este termino como la amplitud de la onda resultante,

$\vec{E}_o' = 2\vec{E}_0 \cos\left(\frac{k(x_2 - x_1) + \varphi_2 - \varphi_1}{2}\right) = 2\vec{E}_0 \cos\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)$, donde $\Delta\varphi = k(x_2 - x_1) + \varphi_2 - \varphi_1$ es la

deferencia de fase. La superposición de dos ondas corresponde a la propagación de una

onda, $\vec{E}_1 + \vec{E}_2 = 2\vec{E}_0' \sin(x' - \omega t + \varphi')$, con la posición $x' = \frac{x_2 + x_1}{2}$ y la fase $\varphi' = \frac{\varphi_2 + \varphi_1}{2}$. La intensidad de la onda obtenida es proporcional al cuadrado de la amplitud,

$I = \frac{c\varepsilon_0(E_0')^2}{2} = 4E_0'^2 \cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) = 2E_0'^2(1 + \cos \Delta\varphi)$. El cambio en la intensidad depende de la diferencia de fase $(1 + \cos \Delta\varphi)$.

La interferencia **constructiva** es una superposición de dos o más ondas de frecuencias diferentes, a cuales al interferir crean un nuevo patrón de ondas de mayor intensidad (amplitud). En el caso considerado anteriormente, la intensidad máxima es cuatro veces más grande que la de cada una de las ondas, $I = 4I_0$, y se obtiene cuando $(1 + \cos \Delta\varphi) = 1$.

La diferencia de fase en el punto de observación tiene que ser $\Delta\varphi = 0$ ó $\Delta\varphi = 2\pi m$, donde m es un número entero. Cuando las ondas llegan en fase, se produce la interferencia constructiva. Sus fases iniciales son iguales, $\varphi_1 = \varphi_2$, la condición del máximo es

$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta x}{\lambda} = 2\pi m$. Entonces, la distancia entre las dos fuentes de las ondas tiene que ser un número entero de longitudes de onda, $\Delta x = m\lambda$.

La **interferencia destructiva** es una superposición de dos o más ondas de frecuencia idéntica o similar que, al interferirse crean un nuevo patrón de ondas de menor intensidad (amplitud). En el nodo de la interferencia destructiva, la amplitud es cero. En el caso considerado anteriormente, la condición del mínimo en la amplitud es

$\cos \Delta\varphi = -1$ ó $\Delta\varphi = 2\pi m + \pi$. Sus fases iniciales son iguales, $\Delta\varphi = 2\pi \frac{\Delta x}{\lambda} = 2\pi m + \pi$ y

$$\Delta x = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda.$$

El **experimento de la doble rendija** fue realizado en 1801 por Thomas Young.

Young comprobó un patrón de interferencias en la luz procedente de una fuente lejana al difractarse en el paso por dos rejillas. Hay varias formas de hacer el experimento.

Imaginamos una onda plana que ilumina dos ranuras de separación d entre ellas. A una distancia grande D hay una pantalla en la cual se observa el patrón de la interferencia.

La distancia y en la cual se puede observar el primer máximo, hace un pequeño ángulo φ con la eje, $\varphi \approx \text{tg } \varphi = y/D$. La diferencia del camino óptico, $\Delta x = d \sin \varphi \approx d \cdot \varphi$, para el máximo tiene que ser un número entero de longitudes de onda $\Delta x = m\lambda = \lambda$. La condición del máximo es $d \cdot y/D = \lambda$.

4.8 Láser.

Un **láser** (del inglés “*light amplification by stimulated emission of radiation*”) es un dispositivo que utiliza el efecto de la emisión estimulada para generar un haz de luz coherente. La luz emitida desde un láser es **monocromática**, es decir, que es de un color (longitud) de onda. En contraste, la luz blanca ordinaria es una combinación de muchos colores (o longitudes de onda) de luz. Los láseres emiten luz que es muy **direccional**, es decir, la luz del láser es emitida como un rayo relativamente estrecho en una dirección específica. La luz ordinaria, como la de una bombilla, se emite en muchas direcciones desde de la fuente. La luz de un láser se dice que es **coherente**, lo que significa que las longitudes de onda de la luz del láser están en fase en el espacio y en el tiempo.

Los componentes de un láser son:

- **El medio** activo puede ser cristales sólidos tales como rubí o Nd: YAG, colorantes líquidos, gases como el CO₂ o helio / neón o semiconductores tales como GaAs. Los medios activos contienen átomos cuyos electrones pueden ser excitados a un nivel de energía metaestable por una fuente de energía.
- **Espejo** de alta reflectancia. Un espejo que refleja esencialmente el 100% de la luz láser.
- **Espejo** parcialmente **transmisivo**. Un espejo que refleja menos del 100% de la luz láser y transmite el resto.
- Los láseres de gas tienen un tubo lleno de gas colocado en la cavidad láser.

El **mecanismo de excitación** consiste en bombear energía en el medio activo por uno o más de los tres métodos básicos; óptico, eléctrico o químico. Un voltaje (la fuente de bombeo externo) se aplica al tubo para excitar los átomos en el gas a una **inversión de población**.

El funcionamiento de un láser puede ser resumido por las siguientes etapas:

- 1) Se aplica energía a un medio con el fin de elevar los electrones a un nivel de energía inestable.
- 2) Estos átomos decaen de manera espontánea a un nivel metaestable, de una energía menor y tiempo de vida relativamente largo.
- 3) La inversión de población se logra cuando la mayoría de los átomos han alcanzado este estado metaestable.

- 4) El efecto de *lasing* se produce cuando un electrón vuelve espontáneamente a su estado fundamental y produce un fotón.
- 5) La energía de este fotón estimulará la producción de otro fotón de la misma longitud de onda resultando en un efecto cascada.
- 6) El espejo altamente reflectante y un espejo parcialmente reflectante contribuyen a continuar la reacción por la dirección de los fotones de vuelta a través del medio a lo largo del eje longitudinal del láser.
- 7) El espejo parcialmente reflectante permite la transmisión de una pequeña cantidad de radiación que se observa como el "haz".
- 8) La radiación láser continuará mientras la energía se aplique al medio de acción láser.

Utilizando varios tipos de laser se pueden obtener varias longitudes de onda, en el espectro visible, ultravioleta o infrarrojo.

Los láseres emiten fotones coherentes de la misma longitud de onda. El **fotón** es la partícula elemental responsable de las manifestaciones cuánticas del fenómeno electromagnético. Es la partícula portadora de todas las formas de radiación electromagnética. El fotón tiene la masa invariante cero, y viaja en el vacío a la velocidad de la luz c . El fotón presenta tanto propiedades corpusculares como ondulatorias ("dualidad onda-corpúsculo").

La energía E y el momento lineal p de un fotón dependen únicamente de su frecuencia f o, lo que es equivalente, de su longitud de onda λ (relacionado por $f = c/\lambda$), por $E = hf$, donde $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s es la constante de Planck. También se usa la expresión con la frecuencia angular ω : $E = \hbar \omega$ con $\hbar = 1.0546 \times 10^{-34}$ J·s la constante reducida de Planck. El momento lineal es $E = \hbar k$.

Para transferir la energía E con la luz de frecuencia f , sirven N fotones con la relación $E = N h f$. El número de fotones necesarios es $N = E / (h f)$. Debido el valor muy pequeño de la constante de Planck, el número de fotones puede ser muy grande.

PRÁCTICAS DE LABORATORIO

Introducción

Las prácticas de Laboratorio de Física son fundamentales para formación completa de estudiantes. Se puede enumerar cinco grupos de objetivos que se pueden lograr a través del uso del laboratorio en las clases de ciencias:

1. desarrollo de habilidades - de investigación, de organización, de comunicación, de trabajo manual
2. desarrollo de conceptos - por ejemplo, hipótesis, modelo teórico
3. desarrollo de habilidades cognitivas - el pensamiento crítico, resolución de problemas, aplicación, análisis, síntesis
4. la comprensión de la naturaleza de la ciencia – el enfoque científico, la organización de la ciencia y interacción entre los científicos, la existencia de una multiplicidad de métodos científicos, las interrelaciones entre la ciencia y la tecnología y entre las diversas disciplinas de la ciencia
5. actitudes - por ejemplo, la precisión, la curiosidad, la objetividad, la confianza, la perseverancia, la responsabilidad, el consenso y la colaboración.

Enseñanza en Laboratorio asume que la experiencia de primera mano en la observación y manipulación de los materiales de la ciencia es superior a otros métodos de desarrollo de la comprensión y el aprecio.

Programa

En la Facultad de Informática de Barcelona (FIB) proponemos unas diez prácticas de Laboratorio y dentro del curso los alumnos tienen que asistir a seis sesiones de laboratorio, divididas en cinco prácticas y un examen, donde el alumno tiene que hacer una presentación de una de las prácticas asistidas. Las prácticas se actualizan según cambios en el programa teórico, enfocando en conceptos y fenómenos más relevantes para formación en el Grado en Ingeniería Informática.

Actualmente, la oferta de prácticas en funcionamiento es la siguiente

Práctica 0: Tratamiento de datos experimentales

La determinación experimental de cualquier magnitud física (masa, temperatura, voltaje, intensidad, ...) se realiza mediante aparatos de medida y el posterior tratamiento de los datos obtenidos. Cualquiera que sea el grado de complejidad de una medida, los datos experimentales que se obtienen siempre tienen una cierta imprecisión que hay que saber valorar. El grado de imprecisión de estos datos se caracteriza con una cantidad llamada error experimental. Este es el sentido que damos al concepto de error en ciencias experimentales, que no tiene nada que ver con la idea de equivocación.

Objetivos:

- a) Concepto de error experimental. Casos de aparatos digitales y analógicos de medida.
- b) Concepto de error accidental.
- c) Error absoluto y error relativo.
- d) Expresión de un resultado experimental.
- e) Propagación de errores.
- f) Regresión lineal.

Práctica 1: Funcionamiento del osciloscopio

Introducción al manejo del osciloscopio en el laboratorio de electromagnetismo. Aplicación a la medida de señales alternas producidas por un generador de señales: determinación del período y de las tensiones máximas y eficaces para señales de tipo sinusoidal y triangular.

Objetivos:

- a) Iniciarse en el manejo de un generador de funciones, una fuente de tensión y un osciloscopio.
- b) Aprender a medir resistencias, intensidades y voltajes en circuitos de corriente continuo con un polímetro, teniendo en cuenta que cuando actúa

como amperímetro la conexión es en serie, y cuando lo hace como voltímetro es en paralelo.

Práctica 2: Análisis de Fourier y medidas en corriente continua

Un emisor de ultrasonidos se utiliza para crear una onda acústica de forma sinusoidal o cuadrada. El sistema emisor-receptor tiene una curva de resonancia muy aguda, funcionando como un selector de frecuencias. Las lecturas de señal de receptor dan la amplitud de armónicas de Fourier para la frecuencia de resonancia. Eso permite establecer las amplitudes de armónicos de Fourier para señal cuadrada en manera experimental.

Objetivos:

- a) Iniciarse en el manejo de un generador de funciones, una fuente de tensión, un osciloscopio y un polímetro.
- b) Entender la descomposición de Fourier de una señal cuadrada periódico.
- c) Aprender a conectar un voltímetro y un amperímetro.
- d) Hacer una regresión lineal con Excel.

Práctica 3: Reglas de Kirchhoff

Se trata de comprobar en el Laboratorio las leyes de Kirchhoff estudiadas en clase de teoría. Mediante el tablero de conexiones, diferentes resistencias y las fuentes de fem se construye un circuito eléctrico sobre el que se comprueban las leyes de Kirchhoff para tensiones e intensidades. Las medidas experimentales obtenidas con el voltímetro y el amperímetro se contrastan con los cálculos teóricos realizados con anterioridad.

Objetivo: Comprobar las reglas de Kirchhoff para un circuito de corriente continua

Práctica 4: Equivalente Thévenin de un circuito de corriente continua

Se construye un circuito eléctrico sobre el que se comprueba la validez del teorema de Thévenin. Se determina experimentalmente el circuito equivalente de Thévenin mediante dos procedimientos: directamente y midiendo la recta de carga. Se aplica después el teorema conectando una resistencia entre los terminales. Se comparan los resultados obtenidos con los calculados previamente.

Objetivos:

- a) Medir la f.e.m. y resistencia de Thévenin de un circuito de corriente continua.
- b) Determinar el equivalente de Thévenin a partir del método de la recta de carga.
- c) Comprobar que la potencia disipada máxima se produce cuando el valor de la resistencia de carga coincide con el de la resistencia equivalente de Thévenin.
- d) Comprobar el teorema de Thévenin para una resistencia externa.

Práctica 5: Corriente alterna: Circuitos RC, RL y RLC en serie.

Estudio de propiedades de circuitos de corriente alterna, compuestos por una resistencia, un condensador y una bobina. Se construyen tres circuitos eléctricos. Las medidas de intensidad y de caída de tensión permiten deducir la capacidad del condensador y el coeficiente de autoinducción de la bobina.

Objetivos:

- a) Familiarizarse con los circuitos de corriente alterna haciendo uso del osciloscopio.
- b) Medir C y L de los circuitos RC y RL serie.
- c) Medir en un circuito RLC serie de corriente alterna las tensiones en bornes de los diferentes elementos, los desfases y la frecuencia de resonancia.

Práctica 6: Diodos. Características y aplicaciones

Estudio del comportamiento eléctrico de un diodo semiconductor. Mediante la ayuda de un osciloscopio se determina la curva característica de un diodo de unión y de un diodo Zener y se miden sus tensiones características V_V y V_Z . A continuación se diseña un rectificador de media onda y otro de onda entera mediante un puente de diodos. Finalmente se construye un circuito limitador de tensión con la ayuda de un diodo Zener.

Objetivos:

- a) Ver las curvas características de un diodo de unión y de un diodo Zener.
- b) Visualizar la rectificación de una onda con un diodo de unión y un puente de diodos.
- c) Montar un circuito limitador de tensión con un diodo Zener.

Práctica 7: Transistores NMOS y PMOS: Caracterización y la puerta NOT

Se utiliza un generador de funciones, una fuente de tensión continua y un osciloscopio para visualizar las curvas características de transferencia de transistor NMOS. Luego se estudia la curva característica de un PMOS. Se construye la tabla de verdad de un inversor CMOS.

Objetivos:

- a) Determinar los parámetros característicos de un transistor NMOS.
- b) Construcción de un inversor CMOS.

Práctica 8: Propagación e interferencia de ondas

Con la ayuda del osciloscopio, un generador de ultrasonidos y un receptor se realiza un dispositivo experimental para determinar cual es la velocidad del sonido. Mediante el desplazamiento relativo de generador y receptor se cuentan el número de ondas directamente observando la pantalla del osciloscopio y se mide la distancia recorrida. Se accede así a la longitud de onda y midiendo el período se calcula la velocidad de propagación del sonido.

Objetivos:

- a) Comprobar que las ondas sonoras son esféricas.
- b) Estudiar el fenómeno de la interferencia.
- c) Medir la velocidad del sonido.

Práctica 9: Redes de difracción

Se estudian las propiedades básicas de las ondas y los fenómenos de mecánica de ondas. En la primera parte se utiliza un emisor y un receptor de ultrasonidos y un osciloscopio para visualizar la señal original y captada por el receptor. Desplazando el receptor se puede ver cambio de fase y encontrar la longitud de la onda. Conociendo la frecuencia esto permite obtener la velocidad de sonido. En la segunda parte se hace el experimento de Young de dos de doble rendija para comprobar el patrón de interferencias de las ondas. Utilizando una red de difracción se consigue medir la longitud de onda de un láser. En la última parte del laboratorio se miden las distancias entre pistas de un CD y un DVD.

Objetivos:

- a) Medir la velocidad del sonido.
- b) Realizar el experimento de la doble rendija de Young.
- c) Determinar la longitud de onda de un láser con una red de difracción.
- d) Calcular la distancia entre las pistas de un CD y un DVD.

Cada estudiante asiste a seis sesiones de laboratorio que pasamos a describir a continuación detallando los objetivos que perseguimos en cada una de ellas.

Sesión 1

Descripción:

En la primera sesión de Laboratorio se trabaja sobre el tema del tratamiento numérico de datos experimentales. Después de una explicación teórica y unos ejemplos de aplicación el estudiante debe realizar por si solo unos ejercicios que presenta al profesor para su posterior corrección y evaluación. El resumen escrito sobre la práctica realizada es utilizado para la evaluación de la competencia genérica en comunicación eficaz oral y escrita.

Objetivos:

1. Capacidad de distinguir las fuentes de error sobre una medida experimental.
 2. Capacidad de expresar correctamente el resultado de una medida experimental.
 3. Capacidad de calcular la propagación de errores desde una o varias medidas directas hacia una medida indirecta.
-

Sesión 2

Descripción:

En la segunda sesión de Laboratorio se realiza una práctica relacionada con el Tema 1 del programa de la asignatura. El estudiante debe entregar al inicio de la sesión un ejercicio resuelto relacionado con la práctica que después realizará en el Laboratorio.

Al final de la sesión el estudiante entrega el informe con los resultados obtenidos y un resumen escrito sobre las actividades realizadas, que se evaluará en el apartado de la competencia eficaz oral y escrita.

Objetivos:

1. Capacidad de usar las leyes de Kirchhoff para determinar las intensidades y diferencias de potencial en un circuito de corriente continua de una o de múltiples mallas.
2. Capacidad de calcular la potencia de cualquier elemento de un circuito de corriente continua.
3. Capacidad de determinar el circuito equivalente de Thévenin entre dos puntos cualquiera de un circuito de corriente continua.
4. Capacidad de comportarse correctamente en el manejo del instrumental eléctrico del Laboratorio.
5. Capacidad de utilizar correctamente los instrumentos básicos de un laboratorio de electrónica: multímetro, osciloscopio, fuentes de alimentación y generadores de funciones.

Sesión 3

Descripción:

En la tercera sesión de Laboratorio se realiza la segunda práctica experimental, que está relacionada con el Tema 2 del programa de la asignatura. El estudiante debe entregar al inicio de la sesión un ejercicio resuelto relacionado con la práctica que después realizará en el Laboratorio. Al final de la sesión el estudiante entrega el informe con los resultados obtenidos y un resumen escrito sobre las actividades realizadas, que se evaluará en el apartado de la competencia eficaz oral y escrita.

Objetivos:

1. Capacidad de determinar las intensidades y diferencias de potencial en circuitos sencillos que contengan diodos.
2. Capacidad de describir correctamente el funcionamiento de los rectificadores de corriente.
3. Capacidad de determinar las intensidades y diferencias de potencial en circuitos sencillos que contengan transistores.
4. Capacidad de describir como se representa y manipula la información digital en circuitos electrónicos.
5. Capacidad de usar correctamente el instrumental del Laboratorio.
6. Capacidad de utilizar correctamente los instrumentos básicos de un laboratorio de electrónica: multímetro, osciloscopio, fuentes de alimentación y generadores de funciones.

Sesión 4

Descripción:

En la cuarta sesión de Laboratorio se realiza la tercera práctica experimental, que está relacionada con el Tema 3 del programa de la asignatura. El estudiante debe entregar al inicio de la sesión un ejercicio resuelto relacionado con la práctica que después realizará en el Laboratorio. Al final de la sesión el estudiante entrega el informe con los resultados obtenidos y un resumen escrito sobre las actividades realizadas, que se evaluará en el apartado de la competencia eficaz oral y escrita.

Objetivos:

1. Capacidad de identificar la amplitud, frecuencia, fase y valor eficaz de una señal sinusoidal.
 2. Conocimiento del concepto de fasor para determinar la respuesta estacionaria de un circuito de corriente alterna.
 3. Capacidad de calcular la potencia de un elemento cualquiera de un circuito de corriente alterna y de corregir el factor de potencia de un circuito dado.
 4. Capacidad de calcular el efecto de diferentes tipos de filtros sobre señales compuestas por una superposición de frecuencias.
 5. Capacidad de comportarse de forma correcta cuando se usa el equipamiento eléctrico del Laboratorio.
 6. Capacidad de utilizar correctamente los instrumentos básicos de un laboratorio de electrónica: multímetro, osciloscopio, fuentes de alimentación y generadores de funciones.
-

Sesión 5

Descripción:

En la quinta sesión de Laboratorio se realiza la tercera práctica experimental, que está relacionada con el Tema 4 del programa de la asignatura. El estudiante debe entregar al inicio de la sesión un ejercicio resuelto relacionado con la práctica que después realizará en el Laboratorio. Al final de la sesión el estudiante entrega el informe con los resultados obtenidos y un resumen escrito sobre las actividades realizadas, que se evaluará en el apartado de la competencia eficaz oral y escrita.

Objetivos:

1. Capacidad de determinar la función de onda correspondiente a una onda armónica unidimensional y a una onda electromagnética armónica plana.

2. Conocimiento de las características básicas del espectro electromagnético.
 3. Capacidad de calcular la intensidad de energía transportada por un haz de luz y la energía de los fotones que lo componen.
 4. Capacidad de determinar las figuras de interferencia de dos ondas coherentes.
 5. Capacidad de determinar las direcciones de los haces reflejado y refractado cuando la luz cambia de medio.
 6. Capacidad de comportarse de forma correcta cuando se usa el equipamiento eléctrico del Laboratorio.
 7. Capacidad de utilizar correctamente los instrumentos básicos de un laboratorio de electrónica: multímetro, osciloscopio, fuentes de alimentación y generadores de funciones.
-

Sesión 6

Descripción:

En la sexta y última sesión de Laboratorio el estudiante debe hacer una presentación oral individual, de una duración máxima de 10 minutos, de una de las prácticas realizadas en el Laboratorio. Al finalizar la exposición, el profesor realizará unas preguntas sobre la exposición presentada. Se evaluarán los objetivos específicos del tema tratado en la práctica escogida y la competencia oral a partir de la exposición realizada.

Objetivos:

Todos los objetivos técnicos detallados en las Sesiones anteriores.

EXPERIMENTOS EN LA CLASE DE TEORÍA

Los experimentos pueden ser muy útiles para introducir nuevas ideas o para aclarar aspectos desconcertantes del material presentado. Si el resultado de un experimento es sorprendente pero convincente, los estudiantes consiguen entender en una manera más fácil y profunda la nueva idea. La mayoría de los experimentos requieren instalaciones especiales, mucho espacio y tiempo, y por eso pueden hacerse solamente en el laboratorio de la física. Igualmente en la asignatura de Física hay unos experimentos simples, pero sorprendentes, en el apartado de la óptica y descomposición de señal.

Un método complementario es de hacer un *experimento virtual*, con ayuda de un ordenador para realizar una simulación instantánea del experimento. La imagen, generada por un ordenador, viene proyectada en la pizarra. El uso de métodos modernos crea un contorno más fácil de seguir, sobre todo para estudiantes de informática.

Experimentos

Filtros polarizadores y pantalla LCD.

Para aclarar la naturaleza transversal de las ondas electromagnéticas es muy ilustrativo demostrar experimentalmente el fenómeno de la polarización.

- 1) Para ver el efecto de polarización sirven **dos filtros** polarizadores. La intensidad de la luz no polarizada disminuye 2 veces al pasar un filtro polarizador ideal. Un filtro típico de fotografía reduce velocidades de obturación por $2\frac{1}{3}$ - 3 veces (ó $2\frac{1}{3}$ números *f-stop*, en lenguaje fotográfico). Después de pasar dos filtros polarizadores con ángulo α entre ellos, la intensidad es $I_{out} = \frac{1}{2} \cos^2(\alpha) I_{in}$. Girando un filtro respecto al otro se observa un cambio en la transparencia. Cuando los dos filtros están alineados, pasa el máximo de la luz. Para orientación ortogonal el sistema óptico de dos filtros bloquea totalmente la luz, lo que se ve como un filtro completamente negro.
- 2) Utilizando **un filtro** sólo, y girándolo, se puede observar un cambio del brillo en reflejos de luz en suelo, mesas, paredes, etcétera. El fenómeno es debido a polarización parcial que se produce en una luz reflejada. Cuando un rayo incide sobre una superficie, una parte de luz viene reflejada y una parte absorbida. La cantidad de la luz que se absorbe, puede depender de la polarización respecto de

la normal de la superficie, sobre todo en superficies no metálicas. Como resultado, la luz reflejada puede ser compuesta por diferente cantidad de polarización horizontal y vertical, resultando en una luz parcialmente polarizada.

- 3) La pantalla LCD de ordenador tiene una capa polarizante (el funcionamiento de pantalla de cristales líquidos hace parte de la asignatura de Física). Girando un filtro polarizador en frente de la pantalla, se puede ver cómo cambia la transparencia desde ser un filtro puro, $I_{out} = I_{in}$, hasta un filtro completamente negro, $I_{out} = 0$.



Ilustración 3 La luz solar (no polarizada) atraviesa dos filtros polarizadores lineales (o un filtro vertical, o un filtro horizontal). La intensidad de la luz disminuye y no depende de la dirección del filtro. Para un filtro ideal la intensidad disminuye factor 2, $I_{out} = \frac{1}{2} I_{in}$.

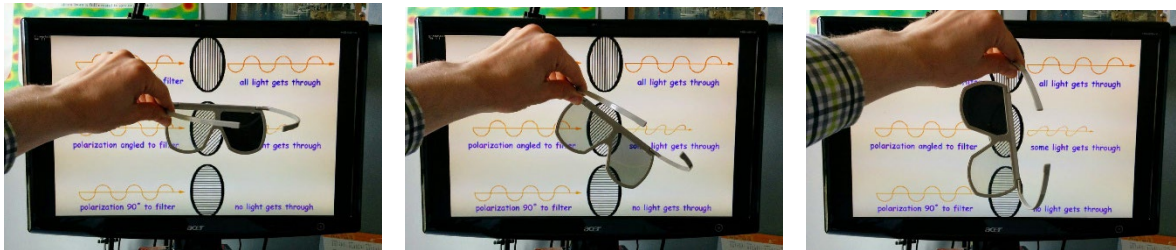


Ilustración 4 Una pantalla LCD emite luz polarizada linealmente (la construcción principal se explica en Tema 4.5). Un filtro polarizador puede estar completamente transparente, cuando esté alineado con la dirección de polarización de la luz, o completamente opaco, para orientación perpendicular.

Luz infrarroja

Luz infrarroja tiene longitud de onda λ más larga que la del espectro visible, $400\text{nm} < \lambda < 700\text{nm}$, y ojo humano no puede percibirla. Igualmente, los sensores de cámaras digitales pueden captar luz en infrarrojo cercano, $\lambda > 700\text{nm}$. Es un efecto parasitario, porque cambia el aspecto de la imagen, y para evitarlo los sensores en cámaras buenas se cubren con un filtro que bloquea la luz infrarroja. En aparatos más baratos, donde la cualidad de la imagen no es un aspecto crucial, el uso del filtro se omite. Ilustración 3 Ilustración 3 enseña la respuesta espectral de sensores típicos (CCD),

CMOS, etcétera) en comparación con la sensibilidad de ojo humano al espectro visible. Se puede observar que los sensores sin filtro son más eficaces en captar luz infrarroja que la del espectro visible, y pueden registrar espectro infrarrojo cercano, $700\text{nm} < \lambda < 1100\text{nm}$.

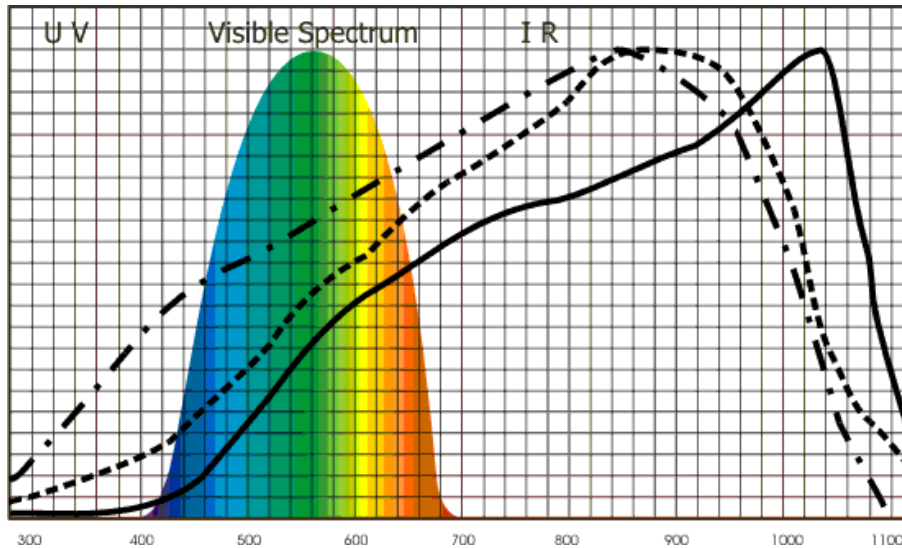


Ilustración 3. La figura muestra la respuesta espectral (sin filtrar) de tres sensores diferentes en función de la longitud de onda λ , [nm]. A estos se superpone la respuesta humana al espectro visible. Muchos sensores tienen una baja sensibilidad en la región ultravioleta y sensibilidad muy alta en la región infrarroja.

Es común utilizar un emisor de luz infrarroja en un mando a distancia de televisor, radio, etcétera. El uso de infrarrojos es conveniente porque no interfiere con luz visible y es suficiente para funcionar en visibilidad directa entre emisor y receptor. La longitud de onda infrarroja utilizada es típicamente alrededor de 870 nm o 930-950 nm.

Utilizando un mando a distancia como un emisor de ondas infrarrojas, y un teléfono móvil como un receptor, sensible a estas ondas, se puede visualizar las señales emitidas en una parte de espectro invisible. En la clase dejé el mando a distancia a los alumnos, así cada alumno interesado puede comprobar con su teléfono móvil propio la presencia de ondas infrarrojas.



Ilustración 5 La luz infrarroja viene captada por cámaras sin filtro infrarrojo, por ejemplo en teléfonos móviles.

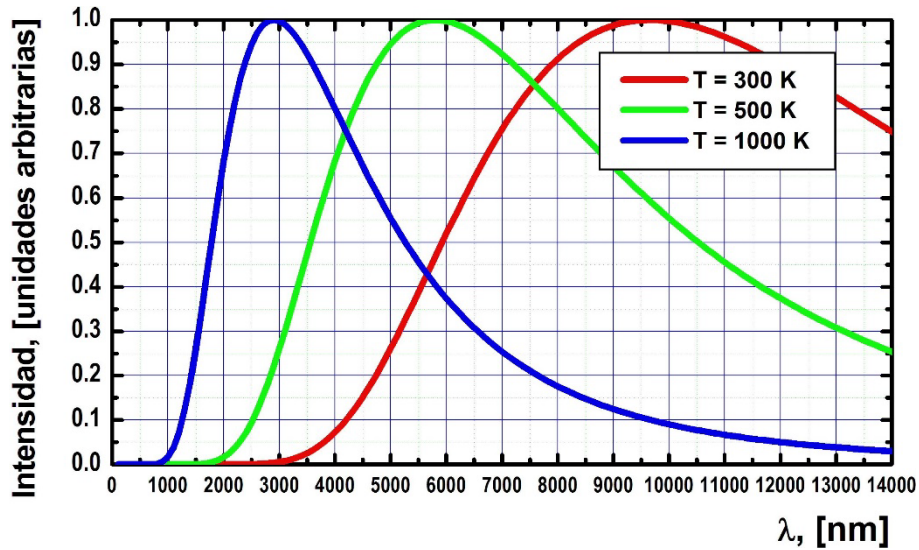


Ilustración 4. Intensidad de radiación de un cuerpo negro, normalizada al valor máximo, en función de la longitud de onda.

Surge la pregunta, como todos los cuerpos calientes emiten en el espectro infrarrojo: "¿Podemos captar con un sensor sencillo el calor de los cuerpos calientes, por ejemplo del cuerpo humano?". La respuesta es de no. La intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro de temperatura T viene dada por la ley de Planck,

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\{hc/(\lambda k_B T)\} - 1},$$

donde c es la velocidad de la luz, h es constante de Planck y k_B es la constante de Boltzmann.

Un cuerpo humano tiene la temperatura de $T = 300$ K aproximadamente, con el máximo de radiación a longitud de onda $\lambda \approx 10\,000$ nm = 10 μ m, es decir, mucho más grande que la longitud máxima captada por un sensor típico, $\lambda \approx 1\,100$ nm. Una plancha caliente típicamente tiene temperatura $T \approx 200$ C ≈ 500 K, un fuego de leña o una cigarra, $T \approx 700$ C ≈ 1000 K, con longitudes de onda en máximo de radiación iguales a $\lambda \approx 6000$ nm y $\lambda \approx 3000$ nm, correspondientemente. El sol tiene temperatura del cuerpo negro de $T = 5\,800$ K con el máximo de radiación a $\lambda \approx 500$ nm, lo que corresponde a luz verde y también al máximo de la sensibilidad del ojo humano.

Transformada de Fourier de sonidos periódicos y no periódicos.

En la asignatura de Física estudiamos la transformación de Fourier. Una función periódica puede ser representada en una suma de funciones periódicas simples de frecuencia múltiple. La transformada de Fourier discreta es el cálculo de los coeficientes

de las funciones sinusoidales (fundamental y armónicos) que forman la señal original. En el caso más genérico de funciones no periódicas, también se puede hacer una descomposición espectral, pero en este caso el espectro ya no es discreto, sino continuo. Un ejemplo es una onda acústica, descrita con la presión de aire o su densidad, $f(t)$, en función de tiempo t . La transformada de Fourier da el espectro de la señal, $F(\omega)$, en función de la frecuencia ω .

La rápida transformada de Fourier o FFT (de inglés, *fast Fourier transform*) es un algoritmo eficiente del cálculo de $F(\omega)$, utilizando un número de muestras igual a una potencia de dos, por ejemplo 1024. Utilizando un ordenador, es posible hacer FFT en tiempo real de señal acústica, captada por un micrófono.

Una nota musical es una señal periódica. El tono de la nota viene definida por la frecuencia fundamental del espectro discreto. El timbre viene determinado por la cantidad e intensidad de los armónicos superiores. La misma nota producida por instrumentos o voces diferentes tiene la misma frecuencia del armónico fundamental, pero diferentes amplitudes de armónicos. Cambiando dos veces la frecuencia de una nota se obtiene un intervalo entre dos notas igual a una octava.

Una señal que contiene frecuencias de todo el rango audible se percibe como ruido. Por ejemplo, ruido blanco está compuesto por todas las frecuencias del espectro audible con la misma amplitud.

Experimentos virtuales

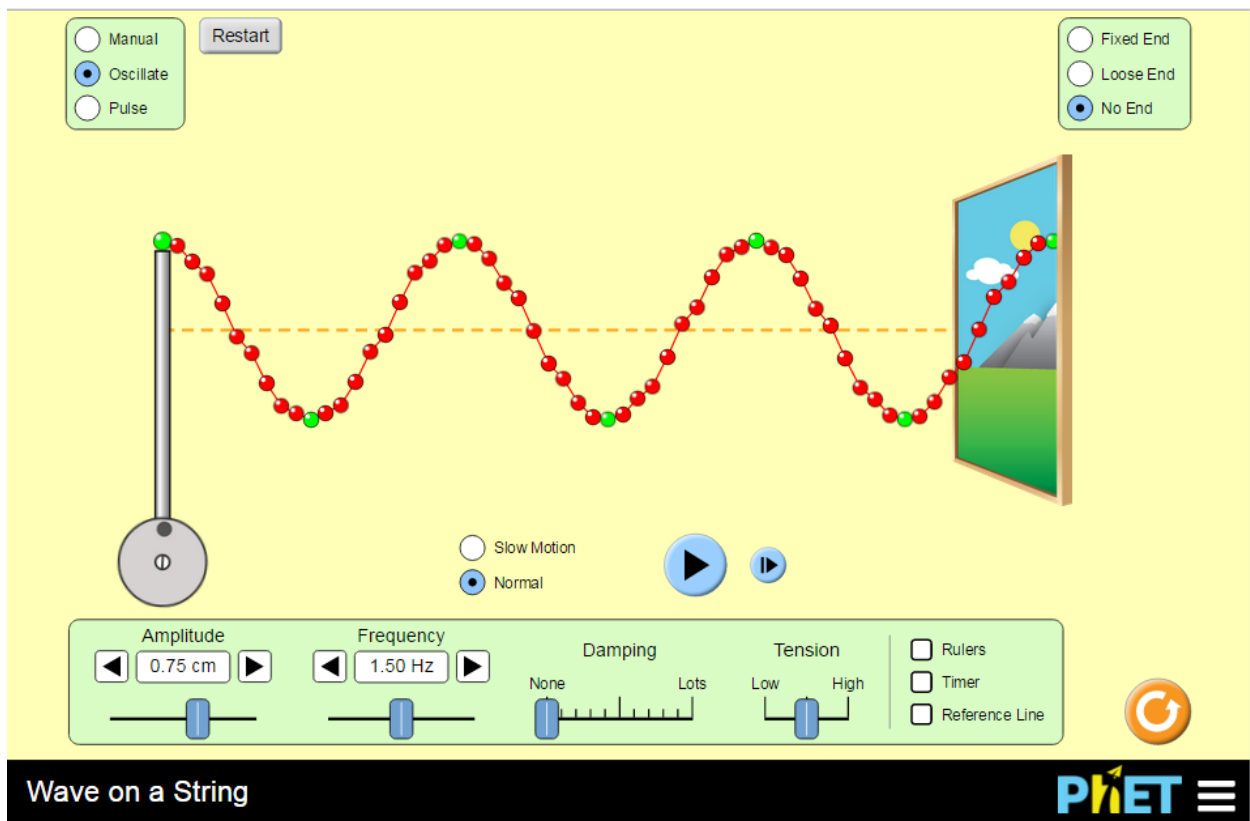
Un experimento virtual consiste en una modelación de procesos físicos utilizando ordenador y permite a los estudiantes explorar fenómenos físicos, estimular su pensamiento y les permiten poner a prueba sus predicciones. Cuando se cambia una variable en una simulación digital, los resultados de esas alteraciones se pueden ver instantáneamente, lo que aporta respuesta inmediata a expectativas de los alumnos.

Tren de ondas

Tema 4 está dedicado al estudio de ondas. En apartado 4.1 explicamos con detalle que es una onda y clasificamos varios tipos de onda. El caso de ondas armónicas está considerado en apartado 4.2. Hacemos la derivación de la función de onda armónica considerando dependencia temporal sinusoidal en el foco y calculando la propagación de la onda en una dirección. Como un ejemplo consideramos oscilaciones de una cuerda, sujeta de un lado. En este caso la función de onda $f(x,t)$ representa la

desviación de la cuerda (en cm) respecto la posición del reposo. Para ayudar visualización de la propagación de onda armónica utilizamos simulación interactiva disponible en el sito de Universidad de Boulder, Colorado, EEUU, con la dirección <http://phet.colorado.edu/en/simulation/wave-on-a-string>

La animación es ilustrativa para enseñar las características de una onda armónica. Eligiendo la amplitud en centímetros podemos ver cómo cambia la amplitud. Se explica la velocidad de propagación de la onda. Discutimos cómo depende la longitud de onda la frecuencia de la onda. Explicamos el concepto de la fase.



Esta simulación es también ilustrativa para clasificación de tipos de ondas en ondas periódicas, no periódicas, aislados (pulsos).

EVALUACIÓN

La evaluación de la asignatura de Física contiene pruebas para valorar el grado de cumplimiento de objetivos de los estudios. La nota que calificará el grado de cumplimiento de los objetivos de las competencias técnicas (NCT) se calcula por la

combinación ponderada

$$NCT = 0,8 NT + 0,2 NL,$$

entre la nota de contenidos teóricos NT y la nota de laboratorio NL.

La nota de teoría se obtiene de la media aritmética de cuatro exámenes parciales que se realizan en el proceso de evaluación continua (EC). En cada uno de estos exámenes se evalúan los contenidos de uno de los cuatro temas en que se organiza el temario del curso. El alumno dispone de una oportunidad al final del curso para mejorar su nota de teoría realizando un examen final de la materia (EF). La nota de teoría es entonces el valor máximo entre los dos valores EC y EF:

$$NT = \max\{EC, EF\}.$$

La nota de laboratorio NL corresponde a la evaluación de las actividades prácticas que el estudiante realiza en el Laboratorio de Física. La nota NL se obtiene del promedio entre las notas de los informes de las prácticas (50%) y de una exposición oral de una de las prácticas realizadas durante el semestre (50%). Este examen oral se hace en la última sesión de las clases prácticas.

La competencia de comunicación eficaz oral y escrita se evalúa en las clases de Laboratorio. La competencia escrita se valora a partir del resumen escrito que el alumno hace individualmente al final de cada informe técnico. La eficiencia en comunicación oral se examina, en la última sesión de Laboratorio, a partir de la presentación oral de una de las prácticas que ya han realizado previamente. La nota asignada es independiente de la nota de evaluación de las competencias técnicas y puede ser: sobresaliente (A), óptima (B), suficiente (C) o no superada (D).

BIBLIOGRAFÍA

Básica:

- Giró, A.; Canales, M.; Rey, R.; Sesé, G.; Trullàs, J., “*Física per a estudiants d'informàtica*”, Editorial UOC (2005).

- Tipler, P.; Mosca, G., “*Física para la ciencia y la tecnología*” Vol. 2, Reverté (2010).
- Gettys, W.E.; Keller, F.J.; Skove, M.J., “*Física clásica y moderna*”, McGraw-Hill (1989).
- Cogdell, J.R., “*Foundations of electrical engineering*”, Prentice Hall (1995).
- Montoto San Miguel, Luis, “*Fundamentos físicos de la Informática y las Comunicaciones*”, Paraninfo (2005).

Complementaria:

- Trullàs, J., “*Física bàsica amb ordinador*”, Edicions UPC (1993).
- Alcaraz, O; López, J.; López, V., “*Física: problemas y ejercicios resueltos*”, Pearson (2006).
- Nahvi, M; Edminister, J.A., “*Circuitos eléctricos y electrónicos*”, McGraw-Hill (2005).
- Míguez, J.V.; Mur, F.; Castro, M.A.; Carpio, J., “*Fundamentos físicos de la ingeniería: Electricidad y electrónica*”, McGraw-Hill (2009).
- Serway, R.A.; Jewett, J.W., “*Física*” Vol. 2, Thompson (2003).