

## ÍNDICE SISTEMÁTICO

|                                                               | PÁGINA |
|---------------------------------------------------------------|--------|
| Sumario .....                                                 | 5      |
| Prólogo .....                                                 | 7      |
| <b>Unidad didáctica 1. El campo electrostático (I)</b> .....  | 9      |
| Objetivos de la unidad .....                                  | 12     |
| 1. Introducción .....                                         | 13     |
| 1.1. ¿Campo eléctrico o electrostático? .....                 | 13     |
| 2. La carga: el origen de la interacción electrostática ..... | 13     |
| 2.1. Interacciones entre partículas .....                     | 13     |
| 2.2. Carga eléctrica .....                                    | 14     |
| 2.2.1. ¿Qué es la carga eléctrica? .....                      | 14     |
| 2.2.2. La carga eléctrica en el mundo macroscópico .....      | 15     |
| 2.2.3. El signo de la carga .....                             | 16     |
| 2.3. Distribuciones de carga .....                            | 17     |
| 2.3.1. Cargas puntuales (o distribuciones puntuales) .....    | 17     |

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.2. Distribuciones volumétricas de carga .....            | 18 |
| 2.3.3. Distribuciones de superficie y lineales .....         | 19 |
| 2.4. Conservación de la carga .....                          | 21 |
| 3. La interacción electrostática .....                       | 21 |
| 3.1. La ley de Coulomb .....                                 | 21 |
| 3.2. El campo electrostático .....                           | 25 |
| 3.2.1. Otra forma de entender la ley de Coulomb .....        | 25 |
| 3.2.2. Un nuevo esquema mental .....                         | 26 |
| 3.2.3. Propiedades básicas del campo electrostático .....    | 27 |
| 3.2.3.1. Es un campo vectorial .....                         | 27 |
| 3.2.3.2. Las fuentes del campo son las cargas .....          | 27 |
| 3.2.3.3. El campo cumple el principio de superposición ..    | 28 |
| 3.2.3.4. El campo solo toma un valor en un punto .....       | 28 |
| 3.2.3.5. Es un campo conservativo .....                      | 28 |
| 3.2.4. Dibujando el campo electrostático .....               | 29 |
| 3.2.4.1. Líneas de campo .....                               | 30 |
| 3.2.4.2. Propiedades de las líneas de campo electrostático   | 31 |
| 4. Cálculo del campo electrostático en el vacío .....        | 32 |
| 4.1. Campo de una distribución de cargas discretas .....     | 33 |
| 4.2. Campo de una distribución de carga continua .....       | 35 |
| 5. El campo del dipolo eléctrico .....                       | 38 |
| 5.1. ¿Qué podemos esperar del campo del dipolo? .....        | 38 |
| 5.2. Líneas de campo del dipolo .....                        | 39 |
| 5.3. Momento dipolar .....                                   | 39 |
| 5.4. Cálculo del campo del dipolo a una gran distancia ..... | 40 |
| 5.4.1. Campo del dipolo a lo largo del eje $z$ .....         | 40 |
| 5.4.2. Campo del dipolo en el plano $xy$ .....               | 42 |
| 5.5. Importancia del dipolo eléctrico .....                  | 44 |
| 5.5.1. Molécula de agua y otras moléculas polares .....      | 44 |
| 6. El flujo del campo electrostático y la ley de Gauss ..... | 45 |
| 6.1. Flujo de un campo vectorial .....                       | 45 |
| 6.2. La ley de Gauss .....                                   | 47 |
| 6.2.1. En versión diferencial .....                          | 47 |

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.2.2. En versión integral .....                                                 | 48 |
| 6.2.3. Consecuencias de la ley de Gauss .....                                    | 49 |
| 6.2.4. Uso de la ley de Gauss para calcular el campo .....                       | 50 |
| 6.2.4.1. Campo de una carga puntual en el origen .....                           | 51 |
| 6.2.4.2. Esfera cargada uniformemente .....                                      | 53 |
| 6.2.4.3. Campo creado por un hilo infinito .....                                 | 57 |
| 6.2.5. Campo creado por una superficie cargada infinita .....                    | 59 |
| 6.2.6. Otros ejemplos y contraejemplos de aplicabilidad de la ley de Gauss ..... | 62 |
| 6.2.6.1. Sí son simetrías esféricas .....                                        | 62 |
| 6.2.6.2. No son simetrías esféricas .....                                        | 63 |
| 6.2.6.3. Sí son simetrías cilíndricas .....                                      | 63 |
| 6.2.6.4. No son simetrías cilíndricas .....                                      | 64 |
| 7. Conductores en equilibrio electrostático .....                                | 64 |
| 7.1. ¿Qué es un conductor? .....                                                 | 65 |
| 7.1.1. Metales .....                                                             | 65 |
| 7.1.2. Otros conductores .....                                                   | 65 |
| 7.2. ¿Qué significa en equilibrio electrostático? .....                          | 65 |
| 7.3. Campo en el interior del metal .....                                        | 66 |
| 7.4. Campo en la superficie del metal .....                                      | 68 |
| 7.4.1. Forma del campo .....                                                     | 68 |
| 7.4.2. Valor del campo y de la densidad de carga superficial .....               | 69 |
| 7.4.3. Campo y curvatura del metal .....                                         | 71 |
| 8. Postulados fundamentales del campo electrostático .....                       | 72 |
| 8.1. Teorema de Helmholtz .....                                                  | 72 |
| 8.1.1. Enunciado del teorema .....                                               | 72 |
| 8.1.2. Fuentes escalares y fuentes vectoriales de un campo .....                 | 73 |
| 8.1.3. Clasificación de los campos .....                                         | 74 |
| 8.1.3.1. Campos solenoidales .....                                               | 74 |
| 8.1.3.2. Campos irrotacionales o conservativos .....                             | 74 |
| 8.1.3.3. Campos mixtos .....                                                     | 75 |
| 8.2. El campo electrostático .....                                               | 75 |
| Actividades de autocomprobación .....                                            | 76 |
| Referencias bibliográficas .....                                                 | 80 |

|                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Unidad didáctica 2. El campo electrostático (II): energía y potencial .....</b> | <b>81</b> |
| Objetivos de la unidad .....                                                       | 84        |
| 1. Introducción .....                                                              | 85        |
| 2. Energía electrostática de una carga puntual en un campo electrostático .....    | 85        |
| 2.1. Diferencia de energía potencial entre dos puntos .....                        | 85        |
| 2.2. Energía potencial en un punto cualquiera .....                                | 87        |
| 2.3. Independencia del camino elegido: el campo es conservativo .....              | 88        |
| 2.4. Otras consecuencias de la independencia del camino .....                      | 89        |
| 3. El potencial electrostático .....                                               | 89        |
| 3.1. Primera visión: la consecuencia de los postulados .....                       | 89        |
| 3.1.1. Demostración breve .....                                                    | 90        |
| 3.1.2. Relación entre el campo y el potencial en términos matemáticos .....        | 91        |
| 3.2. Segunda visión: una interpretación física del potencial .....                 | 92        |
| 3.3. Unidades del potencial .....                                                  | 93        |
| 3.4. Valor absoluto del potencial y otros potenciales .....                        | 94        |
| 3.5. Otras propiedades del potencial .....                                         | 95        |
| 4. Potencial, superficies equipotenciales y las líneas del campo .....             | 95        |
| 4.1. Gradiente de una función escalar .....                                        | 96        |
| 4.2. La altura del campo electrostático .....                                      | 97        |
| 4.2.1. Un pozo de potencial .....                                                  | 98        |
| 4.3. Lugares equipotenciales .....                                                 | 99        |
| 4.3.1. Definición de una «superficie equipotencial» .....                          | 100       |
| 4.3.2. El campo y las superficies equipotenciales .....                            | 100       |
| 4.3.3. Potencial y líneas de nivel .....                                           | 101       |
| 4.3.4. Trabajo y lugares equipotenciales .....                                     | 102       |
| 5. Potencial asociado a una distribución de cargas .....                           | 103       |
| 5.1. Potencial electrostático generado por una carga puntual .....                 | 103       |
| 5.2. Potencial generado por una distribución de cargas discretas .....             | 106       |
| 5.3. Potencial creado por una distribución de carga continua .....                 | 106       |
| 5.3.1. Ejemplo: potencial creado por un anillo cargado a lo largo de su eje .....  | 108       |

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 6. Otra forma de calcular el campo electrostático .....              | 110 |
| 6.1. El campo calculado desde el potencial .....                     | 110 |
| 6.1.1. Campo generado por un disco cargado .....                     | 110 |
| 6.2. Unicidad de la solución .....                                   | 112 |
| 7. Ecuaciones de Poisson y Laplace: el problema electrostático ..... | 113 |
| 7.1. El operador laplaciano en cartesianas .....                     | 114 |
| 7.2. Ecuación de Poisson .....                                       | 114 |
| 7.3. Ecuación de Laplace .....                                       | 115 |
| 7.4. El problema electrostático .....                                | 115 |
| 7.5. Potencial electrostático entre dos placas conductoras .....     | 116 |
| 7.5.1. Resolución de la ecuación de Laplace .....                    | 116 |
| 7.5.2. Condiciones en la frontera .....                              | 117 |
| 7.5.3. Cálculo del campo eléctrico .....                             | 118 |
| 8. Conductores y el potencial electrostático .....                   | 118 |
| 8.1. Diferencia de potencial entre dos puntos en el conductor .....  | 118 |
| 8.2. El conductor es un volumen equipotencial .....                  | 119 |
| 8.3. Poner a tierra un conductor .....                               | 120 |
| 8.4. Potencial de una esfera conductora cargada .....                | 120 |
| 9. Energía de una distribución de carga .....                        | 123 |
| 9.1. Energía de una distribución de tres cargas puntuales .....      | 123 |
| 9.2. Las distribuciones almacenan energía .....                      | 125 |
| 9.3. Energía positiva y energía negativa .....                       | 126 |
| 9.4. Energía de una distribución discreta de cargas .....            | 126 |
| 9.5. Energía de una distribución continua de carga .....             | 127 |
| 9.5.1. ¿Qué quiere decir esta expresión? .....                       | 127 |
| 9.5.2. Energía de una esfera conductora cargada .....                | 129 |
| 10. La energía almacenada en el campo .....                          | 130 |
| 10.1. Demostración previa .....                                      | 130 |
| 10.2. Implicación 1: el campo tiene energía .....                    | 133 |
| 10.3. Implicación 2: el campo mide una densidad de energía .....     | 134 |
| 10.4. Implicación 3: el campo como entidad propia .....              | 134 |
| Actividades de autocomprobación .....                                | 136 |
| Referencias bibliográficas .....                                     | 140 |

|                                                                                              |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Unidad didáctica 3. El campo electrostático (III): dieléctricos y condensadores .....</b> | <b>141</b> |
| Objetivos de la unidad .....                                                                 | 143        |
| 1. Introducción .....                                                                        | 144        |
| 2. Presentación de los condensadores eléctricos .....                                        | 144        |
| 2.1. Almacenando energía eléctrica .....                                                     | 144        |
| 2.2. ¿Qué es un condensador eléctrico? .....                                                 | 146        |
| 2.2.1. Presentación del condensador plano de placas paralelas .....                          | 147        |
| 2.3. Estructuras habituales de condensadores .....                                           | 148        |
| 3. ¿Cómo funciona un condensador? La capacidad .....                                         | 149        |
| 3.1. Análisis del condensador de placas planas paralelas .....                               | 149        |
| 3.2. La ecuación del condensador: capacidad .....                                            | 152        |
| 4. Usos y aplicaciones .....                                                                 | 153        |
| 4.1. Símbolo circuital del condensador .....                                                 | 155        |
| 5. Determinación de la capacidad de un condensador .....                                     | 155        |
| 5.1. Condensador plano de placas paralelas .....                                             | 156        |
| 5.2. Condensador cilíndrico .....                                                            | 158        |
| 5.3. Condensador esférico .....                                                              | 160        |
| 6. Asociación de condensadores .....                                                         | 161        |
| 6.1. Asociación de dos condensadores en paralelo .....                                       | 162        |
| 6.2. Asociación de varios condensadores en paralelo .....                                    | 163        |
| 6.3. Asociación de dos condensadores en serie .....                                          | 164        |
| 6.4. Asociación de varios condensadores en serie .....                                       | 166        |
| 7. Energía almacenada en un condensador .....                                                | 167        |
| 7.1. Cálculo de la energía mediante el análisis de la distribución de carga .....            | 167        |
| 7.2. Cálculo de la energía usando el proceso de carga del condensador ....                   | 169        |
| 7.3. Cálculo de la energía en función de los campos internos .....                           | 171        |
| 7.4. Fuerza entre las placas de un condensador plano .....                                   | 173        |
| 7.4.1. Cálculo de la fuerza haciendo uso de la ley de Coulomb .....                          | 173        |
| 7.4.2. Cálculo de la fuerza haciendo uso de la energía almacenada .....                      | 174        |
| 8. Dieléctricos .....                                                                        | 175        |
| 8.1. Experimento de Faraday con dieléctricos .....                                           | 176        |
| 8.2. ¿Qué es un dieléctrico? .....                                                           | 178        |

|                                                                                    |                |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 8.3. Comportamiento de los dieléctricos ante un campo eléctrico .....              | 178            |
| 8.3.1. Dipolos moleculares .....                                                   | 178            |
| 8.3.2. El dieléctrico sumergido en un campo eléctrico .....                        | 179            |
| 8.4. Carga de polarización .....                                                   | 180            |
| 8.5. Campo interno y campo total .....                                             | 181            |
| 8.5.1. Campo generado por una carga puntual en el interior de un dieléctrico ..... | 182            |
| 8.6. Constante dieléctrica y permitividad de un dieléctrico .....                  | 183            |
| 8.7. Ruptura de un dieléctrico .....                                               | 184            |
| 9. Dieléctricos y condensadores .....                                              | 185            |
| 9.1. El experimento de Faraday (de nuevo) .....                                    | 185            |
| 9.2. Cálculo de la capacidad de un condensador con un dieléctrico .....            | 185            |
| 9.2.1. Capacidades de los condensadores habituales .....                           | 186            |
| 9.3. Ventajas de los dieléctricos .....                                            | 187            |
| Actividades de autocomprobación .....                                              | 188            |
| Referencias bibliográficas .....                                                   | 191            |
| <br><b>Unidad didáctica 4. Circuitos de corriente continua .....</b>               | <br><b>193</b> |
| Objetivos de la unidad .....                                                       | 196            |
| 1. Introducción .....                                                              | 197            |
| 2. Corriente eléctrica .....                                                       | 197            |
| 2.1. Un experimento de (casi) electrostática .....                                 | 197            |
| 2.2. Definición de «corriente eléctrica» .....                                     | 199            |
| 2.3. Densidad de corriente .....                                                   | 200            |
| 2.4. Relación entre la corriente y la densidad de corriente .....                  | 202            |
| 2.5. La densidad de corriente superficial .....                                    | 203            |
| 3. Ley de Ohm .....                                                                | 204            |
| 3.1. Movimiento de las cargas dentro de un conductor: conducción .....             | 204            |
| 3.2. Deducción de la ley de Ohm .....                                              | 206            |
| 3.3. Resistencia y resistividad de un conductor .....                              | 208            |
| 3.3.1. Variación de la resistencia con la temperatura .....                        | 210            |
| 3.4. Materiales lineales y materiales no lineales .....                            | 210            |

|                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4. Ley de Joule: potencia disipada en un conductor .....                              | 211 |
| 4.1. La experiencia de Joule .....                                                    | 211 |
| 4.2. El conductor se calienta .....                                                   | 211 |
| 4.3. Deducción de la ley de Joule .....                                               | 212 |
| 5. Circuitos eléctricos y componentes de los circuitos .....                          | 213 |
| 5.1. Componentes de los circuitos eléctricos .....                                    | 214 |
| 5.1.1. Fuentes de tensión .....                                                       | 214 |
| 5.1.1.1. Relación tensión/corriente ( $I$ - $V$ ) de una fuente de<br>tensión .....   | 215 |
| 5.1.1.2. Potencia en una fuente de tensión .....                                      | 215 |
| 5.1.2. Fuentes de corriente .....                                                     | 216 |
| 5.1.2.1. Relación tensión/corriente ( $I$ - $V$ ) de una fuente de<br>corriente ..... | 217 |
| 5.1.2.2. Potencia en una fuente de tensión .....                                      | 217 |
| 5.1.3. Cables o hilos conductores (o pistas eléctricas o conexiones) .....            | 218 |
| 5.1.3.1. Relación tensión/corriente ( $I$ - $V$ ) de un hilo de un<br>circuito .....  | 218 |
| 5.1.3.2. Potencia en un hilo de interconexión .....                                   | 218 |
| 5.1.4. Resistencias .....                                                             | 219 |
| 5.1.4.1. Relación tensión/corriente ( $I$ - $V$ ) de una resistencia .....            | 219 |
| 5.1.4.2. Potencia en una resistencia .....                                            | 220 |
| 5.1.5. Otros componentes .....                                                        | 220 |
| 5.2. Circuito eléctrico de parámetros concentrados .....                              | 222 |
| 6. Potencia en circuitos eléctricos en corriente continua .....                       | 222 |
| 7. Asociación de resistencias .....                                                   | 224 |
| 7.1. Asociación de dos resistencias en serie .....                                    | 224 |
| 7.2. Asociación de $N$ resistencias en serie .....                                    | 225 |
| 7.3. Asociación de dos resistencias en paralelo .....                                 | 226 |
| 7.3.1. Regla del producto partido por la suma .....                                   | 227 |
| 7.4. Asociación de $N$ resistencias en paralelo .....                                 | 227 |
| 7.4.1. $N$ resistencias iguales en paralelo .....                                     | 228 |
| 7.5. Comparación con la asociación de condensadores .....                             | 228 |
| 7.6. Asociaciones complejas .....                                                     | 228 |

|                                                                             |            |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8. Resolución de circuitos-leyes de Kirchhoff .....                         | 229        |
| 8.1. Topología de un circuito: nudos, ramas y mallas .....                  | 230        |
| 8.1.1. Nudo .....                                                           | 230        |
| 8.1.2. Rama .....                                                           | 231        |
| 8.1.3. Malla .....                                                          | 231        |
| 8.2. Leyes de Kirchhoff .....                                               | 232        |
| 8.2.1. Primera ley de Kirchhoff: ley de los nudos o de las corrientes ..... | 233        |
| 8.2.2. Segunda ley de Kirchhoff: ley de las mallas o de las tensiones ..... | 234        |
| 8.3. Aplicación de las leyes de Kirchhoff para resolver un circuito .....   | 234        |
| 8.4. Método de las mallas .....                                             | 237        |
| 9. Equivalentes de un puerto: Thévenin y Norton .....                       | 242        |
| 9.1. Teorema de Thévenin .....                                              | 243        |
| 9.2. Teorema de Norton .....                                                | 243        |
| 9.3. Cálculo del equivalente de Thévenin .....                              | 244        |
| 9.3.1. Cálculo de la tensión de Thévenin .....                              | 245        |
| 9.3.2. Cálculo de la resistencia de Thévenin .....                          | 246        |
| 9.4. Cálculo del equivalente de Norton .....                                | 248        |
| 10. Ecuaciones de Kennelly .....                                            | 248        |
| 10.1. Transformación triángulo ( $\pi$ ) a estrella (T) .....               | 249        |
| 10.2. Transformación estrella (T) a triángulo ( $\pi$ ) .....               | 249        |
| Actividades de autocomprobación .....                                       | 250        |
| Referencias bibliográficas .....                                            | 254        |
| <b>Unidad didáctica 5. Circuitos en régimen transitorio .....</b>           | <b>255</b> |
| Objetivos de la unidad .....                                                | 258        |
| 1. Introducción .....                                                       | 259        |
| 2. ¿En qué regímenes puede funcionar un circuito? .....                     | 259        |
| 2.1. Régimen permanente en continua .....                                   | 260        |
| 2.2. Régimen permanente sinusoidal .....                                    | 260        |
| 2.3. Régimen transitorio .....                                              | 261        |

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 3. Componentes de un circuito en régimen transitorio .....          | 262 |
| 3.1. Resistencias .....                                             | 263 |
| 3.1.1. Comportamiento dinámico de las resistencias .....            | 263 |
| 3.1.2. Ejemplos de variaciones temporales de tensión y corriente .. | 263 |
| 3.2. Condensadores .....                                            | 264 |
| 3.2.1. Comportamiento dinámico de los condensadores .....           | 264 |
| 3.2.2. Ejemplos de variaciones temporales de tensión y corriente .. | 267 |
| 3.3. Bobinas o inductancias .....                                   | 268 |
| 3.3.1. Comparación entre una bobina y un condensador .....          | 268 |
| 3.3.2. Comportamiento dinámico de las bobinas .....                 | 269 |
| 3.3.3. Ejemplos de variaciones temporales de tensión y corriente .. | 270 |
| 4. Análisis de regímenes transitorios .....                         | 271 |
| 5. Análisis del transitorio en un circuito $R$ - $C$ .....          | 272 |
| 5.1. Transitorio de encendido en un circuito $R$ - $C$ .....        | 272 |
| 5.1.1. Presentación del circuito .....                              | 272 |
| 5.1.2. Aplicación de las leyes de Kirchhoff al circuito .....       | 273 |
| 5.1.3. Resolución de la ecuación diferencial .....                  | 274 |
| 5.1.4. Cálculo de la constante de integración .....                 | 276 |
| 5.1.5. Tensión y corriente en función del tiempo .....              | 276 |
| 5.1.6. Constante de tiempo .....                                    | 277 |
| 5.2. Transitorio de apagado en un circuito $R$ - $C$ .....          | 278 |
| 5.2.1. Presentación del circuito .....                              | 278 |
| 5.2.2. Aplicación de las leyes de Kirchhoff al circuito .....       | 278 |
| 5.2.3. Resolución de la ecuación diferencial .....                  | 279 |
| 5.2.4. Cálculo de la constante de integración .....                 | 280 |
| 5.2.5. Tensión y corriente en función del tiempo .....              | 280 |
| 5.2.6. Constante de tiempo .....                                    | 281 |
| 6. Análisis del transitorio en un circuito $R$ - $L$ .....          | 282 |
| 6.1. Transitorio de encendido en un circuito $R$ - $L$ .....        | 282 |
| 6.1.1. Presentación del circuito .....                              | 282 |
| 6.1.2. Aplicación de las leyes de Kirchhoff al circuito .....       | 282 |
| 6.1.3. Resolución de la ecuación diferencial .....                  | 283 |
| 6.1.4. Cálculo de la constante de integración .....                 | 285 |
| 6.1.5. Tensión y corriente en función del tiempo .....              | 285 |
| 6.1.6. Constante de tiempo .....                                    | 286 |

|                                                                              |            |
|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.2. Transitorio de apagado en un circuito $R-L$ .....                       | 287        |
| 6.2.1. Presentación del circuito .....                                       | 287        |
| 6.2.2. Aplicación de las leyes de Kirchhoff al circuito .....                | 288        |
| 6.2.3. Resolución de la ecuación diferencial .....                           | 289        |
| 6.2.4. Cálculo de la constante de integración .....                          | 289        |
| 6.2.5. Tensión y corriente en función del tiempo .....                       | 290        |
| 6.2.6. Constante de tiempo .....                                             | 291        |
| 7. Energía y potencia en los transitorios .....                              | 291        |
| 7.1. Potencia en régimen dinámico .....                                      | 291        |
| 7.2. Energía almacenada y energía disipada: conservación de la energía ..    | 292        |
| 7.2.1. Transitorio de apagado $R-C$ .....                                    | 292        |
| 7.2.2. Transitorio de apagado $R-L$ .....                                    | 294        |
| 8. Importancia del análisis transitorio .....                                | 295        |
| Actividades de autocomprobación .....                                        | 297        |
| Referencias bibliográficas .....                                             | 300        |
| <b>Unidad didáctica 6. Circuitos en régimen permanente sinusoidal ..</b>     | <b>301</b> |
| Objetivos de la unidad .....                                                 | 304        |
| 1. Introducción .....                                                        | 305        |
| 1.1. Facilidad de transformación de tensión. La distribución eléctrica ..... | 305        |
| 1.2. Otras ventajas de la corriente alterna .....                            | 307        |
| 2. Circuitos en RPS .....                                                    | 307        |
| 2.1. El concepto de «RPS» .....                                              | 307        |
| 2.2. Estructura de un circuito en RPS .....                                  | 308        |
| 3. Componentes de un circuito en RPS .....                                   | 308        |
| 3.1. Fuentes en un circuito en RPS .....                                     | 308        |
| 3.1.1. Parámetros clave de la señal sinusoidal .....                         | 309        |
| 3.1.2. Simbología de las fuentes en circuitos de alterna .....               | 311        |
| 3.1.3. ¿Por qué usamos señales sinusoidales? .....                           | 312        |
| 3.2. Resistencias en RPS .....                                               | 312        |
| 3.2.1. Condensadores en RPS .....                                            | 314        |
| 3.2.2. Bobinas en RPS .....                                                  | 317        |

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3. Cuadro-resumen del comportamiento de los componentes pasivos en RPS ..... | 319 |
| 4. Interludio: breve recordatorio de números complejos .....                   | 320 |
| 4.1. El concepto de «número complejo» .....                                    | 320 |
| 4.2. Partes de un número complejo: el plano complejo .....                     | 321 |
| 4.3. Representación de números complejos: módulo y argumento .....             | 322 |
| 4.3.1. Forma binómica .....                                                    | 322 |
| 4.3.2. Módulo-argumento .....                                                  | 322 |
| 4.3.3. Otras formas de representación .....                                    | 323 |
| 4.3.4. Cambio de forma módulo-argumental a binómica .....                      | 323 |
| 4.3.5. Cambio de forma binómica a módulo-argumental .....                      | 324 |
| 4.4. Operaciones con números complejos .....                                   | 325 |
| 4.4.1. Suma y resta .....                                                      | 325 |
| 4.4.2. Multiplicación .....                                                    | 325 |
| 4.4.3. División .....                                                          | 326 |
| 4.4.4. El conjugado de un número complejo .....                                | 326 |
| 4.4.5. Inverso y opuesto .....                                                 | 328 |
| 5. Tensiones y corrientes en RPS como números complejos .....                  | 328 |
| 5.1. Parámetros fundamentales de las señales sinusoidales (de nuevo) .....     | 328 |
| 5.2. Funciones sinusoidales y números complejos .....                          | 329 |
| 5.2.1. Cambio de formato .....                                                 | 330 |
| 5.3. Operaciones con funciones sinusoidales .....                              | 331 |
| 5.3.1. Suma de dos corrientes .....                                            | 331 |
| 5.3.2. Desfase y multiplicación .....                                          | 333 |
| 6. Ley de Ohm generalizada: la impedancia eléctrica .....                      | 333 |
| 6.1. Impedancia de un condensador .....                                        | 333 |
| 6.2. Impedancia de una bobina .....                                            | 334 |
| 6.3. Impedancia de una resistencia .....                                       | 335 |
| 6.4. ¿Qué es la impedancia? .....                                              | 336 |
| 6.5. Cuadro-resumen de impedancias .....                                       | 336 |
| 7. Asociación de impedancias .....                                             | 336 |
| 7.1. Caso 1: resistencia y condensador en serie .....                          | 337 |
| 7.2. Caso 2: resistencia y bobina en serie .....                               | 338 |
| 7.3. Caso 3: condensador y bobina en serie .....                               | 339 |
| 7.4. Caso general .....                                                        | 340 |

|                                                                                        |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8. Términos de la impedancia .....                                                     | 341        |
| 8.1. Parte real de la impedancia .....                                                 | 341        |
| 8.2. Parte imaginaria de la impedancia .....                                           | 341        |
| 8.3. Admitancias .....                                                                 | 342        |
| 9. Resolución de circuitos en RPS .....                                                | 343        |
| 9.1. Equivalente matemático del análisis RPS al análisis en continua .....             | 343        |
| 9.2. Leyes de Kirchhoff .....                                                          | 344        |
| 9.3. Método de las mallas generalizado .....                                           | 345        |
| 9.4. Equivalente de Thévenin .....                                                     | 345        |
| 9.5. Principio de superposición: circuitos con fuentes de diferentes pulsaciones ..... | 346        |
| 10. Valor eficaz de una tensión y una corriente .....                                  | 348        |
| 10.1. El valor máximo .....                                                            | 348        |
| 10.2. Medida de la potencia de la señal de tensión .....                               | 349        |
| 10.3. Valor eficaz .....                                                               | 351        |
| 10.4. Significado del valor eficaz (de nuevo) .....                                    | 352        |
| 10.5. Uso del valor eficaz .....                                                       | 353        |
| 11. Potencia en RPS .....                                                              | 353        |
| 11.1. Potencia en una impedancia .....                                                 | 354        |
| 11.1.1. Potencia activa en la impedancia .....                                         | 356        |
| 11.1.2. Potencia reactiva en la impedancia .....                                       | 357        |
| 11.1.3. Relación con el desfase entre ambas señales .....                              | 358        |
| 11.2. Potencia aparente .....                                                          | 359        |
| 11.3. Términos de la potencia aparente .....                                           | 360        |
| 11.3.1. Potencia activa .....                                                          | 361        |
| 11.3.2. Potencia reactiva .....                                                        | 361        |
| 11.3.3. Potencia aparente .....                                                        | 362        |
| 11.3.4. Importancia de la potencia aparente y el factor de potencia .                  | 362        |
| Actividades de autocomprobación .....                                                  | 364        |
| Referencias bibliográficas .....                                                       | 369        |
| <b>Unidad didáctica 7. El campo magnetostático .....</b>                               | <b>371</b> |
| Objetivos de la unidad .....                                                           | 374        |

|                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Introducción .....                                                                    | 375 |
| 1.1. Algunas aplicaciones del campo magnetostático .....                                 | 375 |
| 1.2. ¿Por qué estudiamos antes el campo electrostático que el magnetostático? .....      | 376 |
| 2. Primera aproximación al campo magnetostático .....                                    | 376 |
| 2.1. El camino que vamos a seguir .....                                                  | 376 |
| 2.2. ¿Qué es el campo magnetostático y qué lo crea? .....                                | 377 |
| 2.2.1. Fuentes del campo magnético .....                                                 | 377 |
| 2.2.2. Un experimento mental: el campo magnético de un hilo de corriente .....           | 378 |
| 2.3. ¿Sobre qué actúa el campo magnético? .....                                          | 379 |
| 2.4. ¿Campo magnético o campo magnetostático? .....                                      | 379 |
| 3. Segunda aproximación al campo magnetostático .....                                    | 380 |
| 3.1. Presentación formal .....                                                           | 380 |
| 3.2. Postulados fundamentales del campo .....                                            | 380 |
| 3.3. Características muy básicas del campo magnetostático .....                          | 381 |
| 3.3.1. Cumple el principio de superposición .....                                        | 381 |
| 3.3.2. Es un campo solenoidal .....                                                      | 382 |
| 3.3.3. Es un campo no conservativo .....                                                 | 383 |
| 3.4. ¿Cómo es el campo magnético creado por una corriente o una carga? .....             | 383 |
| 3.5. Interacción del campo magnético: relación de Lorentz .....                          | 383 |
| 4. Creando campo magnetostático .....                                                    | 384 |
| 4.1. Campo creado por una carga puntual en movimiento .....                              | 384 |
| 4.1.1. Características del campo creado por una carga puntual .....                      | 387 |
| 4.1.2. Unidades del campo magnético (de nuevo) .....                                     | 388 |
| 4.2. Campo magnético generado por una corriente eléctrica. La ley de Biot y Savart ..... | 389 |
| 4.2.1. Corriente frente a carga en movimiento .....                                      | 389 |
| 4.2.2. Ley de Biot y Savart .....                                                        | 389 |
| 4.2.3. Campo generado por algunas distribuciones de corriente ....                       | 391 |
| 4.2.3.1. Campo creado por un segmento rectilíneo de corriente .....                      | 391 |
| 4.2.3.2. Campo creado por un hilo infinito .....                                         | 393 |
| 4.2.3.3. Campo en el centro de una espira cuadrada .....                                 | 394 |

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.4. Campo en el eje de una espira circular .....                                 | 396 |
| 4.2.5. Regla de la mano derecha .....                                               | 398 |
| 5. Midiendo el efecto del campo magnetostático .....                                | 399 |
| 5.1. El efecto del campo magnético sobre una carga .....                            | 399 |
| 5.1.1. Recordatorio de la ley de Lorentz .....                                      | 399 |
| 5.1.2. Forma de la fuerza magnética sobre una carga .....                           | 399 |
| 5.1.3. Características de la fuerza magnética .....                                 | 400 |
| 5.1.4. La fuerza magnética no varía la energía de las partículas cargadas .....     | 401 |
| 5.2. Efecto del campo magnético sobre una corriente eléctrica en un conductor ..... | 401 |
| 5.2.1. Corriente eléctrica en el interior de un conductor .....                     | 401 |
| 5.2.2. Fuerza magnética sobre un diferencial de corriente .....                     | 402 |
| 5.2.3. Fuerza magnética sobre una corriente rectilínea constante ...                | 403 |
| 5.2.4. Fuerza magnética sobre una corriente filiforme cualquiera ..                 | 404 |
| 5.3. Fuerza entre dos conductores paralelos .....                                   | 404 |
| 5.3.1. Deducción de la fuerza .....                                                 | 404 |
| 5.3.2. Fuerza por unidad de longitud .....                                          | 405 |
| 5.3.3. Similitud con la fuerza de Coulomb .....                                     | 406 |
| 6. Acción del campo sobre espiras de corriente .....                                | 406 |
| 6.1. Efecto sobre una espira rectangular .....                                      | 407 |
| 6.2. Fuerza neta del campo sobre una espira cualquiera .....                        | 409 |
| 6.3. Par de fuerzas sobre una espira rectangular .....                              | 409 |
| 6.4. Momento magnético de una espira .....                                          | 410 |
| 7. Ley circuital de Ampère .....                                                    | 412 |
| 7.1. Enunciado de la ley .....                                                      | 412 |
| 7.2. Origen de la ley .....                                                         | 412 |
| 7.3. Aplicabilidad de la ley .....                                                  | 413 |
| 7.4. La ley tiene dirección y sentido .....                                         | 415 |
| 7.5. La ley de Ampère nos permite calcular el campo .....                           | 416 |
| 7.5.1. Una corriente rectilínea infinita .....                                      | 416 |
| 7.5.2. Un cilindro de corriente de longitud infinita .....                          | 418 |
| 7.5.2.1. Campo en el exterior del cilindro .....                                    | 418 |
| 7.5.2.2. Campo en el interior del cilindro .....                                    | 419 |

|                                                                                                               |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.5.3. Campo en el interior de un solenoide .....                                                             | 421        |
| 7.5.3.1. Aproximación de solenoide infinito .....                                                             | 421        |
| 7.5.3.2. Aplicación de la ley de Ampère .....                                                                 | 422        |
| 8. ¿Y los imanes? El campo magnético en la materia .....                                                      | 424        |
| 8.1. Imanación .....                                                                                          | 424        |
| 8.2. El campo $\vec{H}$ y la permeabilidad relativa .....                                                     | 427        |
| 8.2.1. Tipos de materiales según su comportamiento magnético ...                                              | 427        |
| 9. Los polos .....                                                                                            | 428        |
| 9.1. Polos de una espira .....                                                                                | 429        |
| Actividades de autocomprobación .....                                                                         | 431        |
| Referencias bibliográficas .....                                                                              | 435        |
| <b>Unidad didáctica 8. Introducción a la electrodinámica clásica: inducción y ecuaciones de Maxwell .....</b> | <b>437</b> |
| Objetivos de la unidad .....                                                                                  | 440        |
| 1. Introducción .....                                                                                         | 441        |
| 2. Ley de Faraday: primera unificación de los campos .....                                                    | 441        |
| 2.1. Experimentos de Faraday .....                                                                            | 441        |
| 2.1.1. Primer experimento de Faraday: solenoide de doble bobinado .....                                       | 442        |
| 2.1.2. Segundo experimento de Faraday: una espira y un imán .....                                             | 443        |
| 2.2. ¿Fuerza electromotriz o tensión eléctrica? .....                                                         | 444        |
| 2.3. Enunciado de la ley de Faraday (o Faraday-Lenz) .....                                                    | 444        |
| 2.3.1. Aplicabilidad .....                                                                                    | 445        |
| 2.3.2. Flujo del campo magnético .....                                                                        | 446        |
| 2.3.3. Variación del flujo del campo magnético .....                                                          | 447        |
| 2.3.4. Lo que mide el voltímetro: la tensión de circuito abierto .....                                        | 447        |
| 2.4. Ley de Faraday según Maxwell o la primera unión de los campos .....                                      | 448        |
| 2.4.1. Investigando el interior del conductor .....                                                           | 448        |
| 2.4.2. Forma puntual de la ley de Faraday .....                                                               | 449        |
| 2.4.3. Forma integral de la ley de Faraday .....                                                              | 450        |
| 2.4.3.1. Cuando el circuito no cambia con el tiempo .....                                                     | 450        |
| 2.4.3.2. Cuando el circuito sí cambia con el tiempo .....                                                     | 452        |
| 2.4.4. Relatividad en el experimento de Faraday .....                                                         | 452        |

|                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3. Inductancia .....                                                              | 453 |
| 3.1. Flujo del campo magnético .....                                              | 453 |
| 3.1.1. Breve recordatorio de la ley de Gauss .....                                | 453 |
| 3.1.2. Importancia del flujo magnético .....                                      | 454 |
| 3.2. Bobinas e inductores .....                                                   | 455 |
| 3.2.1. Condensadores y bobinas .....                                              | 455 |
| 3.2.2. Flujo en el interior del solenoide .....                                   | 455 |
| 3.2.3. Concepto de «inductancia» .....                                            | 457 |
| 3.2.3.1. Tipos de inductancia .....                                               | 458 |
| 3.2.4. Ecuación de la bobina .....                                                | 458 |
| 3.2.5. Construcción de una bobina .....                                           | 459 |
| 3.2.6. Dinámica de la bobina .....                                                | 459 |
| 4. Algunos sistemas electrodinámicos .....                                        | 460 |
| 4.1. Transformadores .....                                                        | 461 |
| 4.1.1. Descripción .....                                                          | 461 |
| 4.1.2. Análisis físico .....                                                      | 462 |
| 4.1.3. Relaciones de transformación .....                                         | 465 |
| 4.1.4. Características de los transformadores .....                               | 466 |
| 4.1.5. Aplicaciones .....                                                         | 466 |
| 4.2. Alternadores .....                                                           | 467 |
| 4.2.1. Descripción .....                                                          | 467 |
| 4.2.2. Análisis físico .....                                                      | 468 |
| 4.2.3. Características básicas de un alternador .....                             | 470 |
| 5. Energía almacenada en el campo magnético .....                                 | 470 |
| 5.1. Densidad de energía del campo magnético .....                                | 470 |
| 5.2. Energía almacenada en una bobina .....                                       | 471 |
| 5.2.1. Demostración de la expresión de la energía en una bobina ..                | 472 |
| 5.2.2. Energía de una bobina solenoidal .....                                     | 473 |
| 6. Ley de Ampère-Maxwell: segunda unificación de los campos .....                 | 475 |
| 6.1. El fallo de la ley de Ampère .....                                           | 475 |
| 6.2. La ley de Ampère-Maxwell .....                                               | 477 |
| 6.2.1. Generalización de la ley de Ampère en el caso de un conden-<br>sador ..... | 477 |

|                                                                                                   |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.2.2. Ley de Ampère-Maxwell al completo .....                                                    | 479        |
| 6.2.3. Importancia de la ley .....                                                                | 479        |
| 6.3. Segunda unificación de los campos .....                                                      | 480        |
| 7. Ecuaciones de Maxwell .....                                                                    | 481        |
| 7.1. Cuando el tiempo no es un problema .....                                                     | 481        |
| 7.2. La electrodinámica clásica al completo .....                                                 | 482        |
| Actividades de autocomprobación .....                                                             | 484        |
| Referencias bibliográficas .....                                                                  | 487        |
| <b>Unidad didáctica 9. Introducción a las ondas .....</b>                                         | <b>489</b> |
| Objetivos de la unidad .....                                                                      | 492        |
| 1. Introducción .....                                                                             | 493        |
| 2. ¿Qué son las ondas? .....                                                                      | 493        |
| 2.1. Una primera definición .....                                                                 | 493        |
| 2.2. ¿Qué es la ecuación de onda? .....                                                           | 495        |
| 2.3. ¿De dónde sale la ecuación de onda? Modelado de sistemas .....                               | 496        |
| 2.3.1. Modelado del campo electromagnético .....                                                  | 496        |
| 2.3.2. Modelado de una cuerda tensa .....                                                         | 497        |
| 2.4. ¿Qué es una perturbación? .....                                                              | 498        |
| 2.4.1. Perturbación en la superficie de un estanque .....                                         | 498        |
| 2.4.2. Perturbación en una cuerda tensa .....                                                     | 499        |
| 2.4.3. Perturbación electromagnética .....                                                        | 499        |
| 2.5. ¿Cómo es una onda? las funciones de onda .....                                               | 500        |
| 2.6. ¿Qué es lo que determina una solución u otra? ¿Qué es lo que genera una onda? .....          | 502        |
| 2.7. ¿Qué es lo que realmente se propaga en una onda? .....                                       | 503        |
| 3. La ecuación de onda .....                                                                      | 504        |
| 3.1. ¿Cómo es la ecuación de onda? Análisis de la ecuación de onda escalar en una dimensión ..... | 504        |
| 3.2. ¿Qué significa la ecuación de onda? .....                                                    | 506        |
| 3.3. Una ecuación lineal: el principio de superposición de las ondas .....                        | 509        |
| 3.4. ¿Qué significa el término $v^2$ ? .....                                                      | 511        |
| 3.4.1. ¿Es $v$ siempre una constante? .....                                                       | 513        |
| 3.5. Ecuación de onda en dos y tres dimensiones .....                                             | 513        |

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.6. ¿Y las perturbaciones vectoriales? .....                                                         | 514 |
| 3.7. Otras ecuaciones parecidas, pero que no son ecuación de onda .....                               | 516 |
| 3.7.1. Ecuación de calor .....                                                                        | 516 |
| 3.7.2. Ecuación de advección .....                                                                    | 517 |
| 4. La solución general a la ecuación de onda .....                                                    | 517 |
| 4.1. ¿Cómo son esas soluciones generales? .....                                                       | 518 |
| 4.2. ¿Cumple esta solución general la ecuación de onda? .....                                         | 519 |
| 4.3. Demostración de D'Alembert .....                                                                 | 520 |
| 4.4. ¿Podemos sacar algo en claro de la solución general? .....                                       | 524 |
| 4.5. Condiciones de contorno para la solución de D'Alembert .....                                     | 529 |
| 5. Soluciones armónicas a la ecuación de onda .....                                                   | 531 |
| 5.1. El coseno (o el seno) como solución de la ecuación de onda .....                                 | 531 |
| 5.2. Soluciones monocromáticas .....                                                                  | 533 |
| 5.2.1. La exponencial compleja .....                                                                  | 533 |
| 5.2.2. ¿Es la exponencial compleja una solución de la ecuación de onda? .....                         | 534 |
| 5.3. Expresiones armónicas sin la variable tiempo .....                                               | 535 |
| 5.4. Características de las soluciones armónicas .....                                                | 535 |
| 5.4.1. Frecuencia, periodo y pulsación o frecuencia angular .....                                     | 537 |
| 5.4.2. Amplitud .....                                                                                 | 539 |
| 5.4.3. Longitud de onda, número de onda o constante de propagación .....                              | 540 |
| 5.4.4. Relación entre frecuencia, longitud de onda y velocidad de propagación .....                   | 541 |
| 5.4.5. Fase de la onda y fase inicial o fase en el origen .....                                       | 542 |
| 6. Superposición de ondas armónicas: interferencia .....                                              | 543 |
| 6.1. Ondas armónicas unidimensionales .....                                                           | 544 |
| 6.1.1. Dos ondas armónicas de la misma frecuencia que se propagan en el mismo sentido .....           | 544 |
| 6.1.2. Recuerda: a veces, luz + luz es oscuridad – interferencia destructiva .....                    | 545 |
| 6.1.3. Superposición de dos ondas de la misma frecuencia que se propagan en sentidos contrarios ..... | 547 |
| 6.1.4. Ondas que no son ni totalmente estacionarias ni totalmente viajeras .....                      | 550 |
| 6.2. Ondas armónicas multidimensionales .....                                                         | 551 |

|                                                                                        |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7. Otros comportamientos asociados a las ondas .....                                   | 553        |
| 7.1. Reflexión y transmisión .....                                                     | 553        |
| 7.1.1. Reflexión en una cuerda tensa .....                                             | 553        |
| 7.1.2. Reflexión total de ondas.....                                                   | 556        |
| 7.1.3. Reflexión parcial y transmisión .....                                           | 556        |
| 7.2. Refracción .....                                                                  | 557        |
| 7.3. El efecto Doppler .....                                                           | 559        |
| 7.4. Difracción .....                                                                  | 561        |
| 8. La ondas dentro de las ecuaciones de Maxwell .....                                  | 562        |
| Actividades de autocomprobación .....                                                  | 566        |
| Referencias bibliográficas .....                                                       | 570        |
| <b>Unidad didáctica 10. Introducción a la electrónica de estado sólido</b> .....       | <b>571</b> |
| Objetivos de la unidad .....                                                           | 573        |
| 1. Introducción .....                                                                  | 574        |
| 2. Materiales semiconductores .....                                                    | 574        |
| 2.1. Conductores, aislantes y semiconductores: aproximación cristalina ...             | 574        |
| 2.1.1. Conductores .....                                                               | 574        |
| 2.1.2. Aislantes .....                                                                 | 575        |
| 2.1.3. Semiconductores .....                                                           | 576        |
| 2.2. Conductores, aislantes y semiconductores: aproximación de bandas de energía ..... | 578        |
| 2.2.1. Concepto de «bandas de energía» .....                                           | 578        |
| 2.2.2. Tipos de materiales .....                                                       | 579        |
| 2.2.3. Electrones en las bandas de valencia y conducción .....                         | 580        |
| 2.3. Corriente eléctrica en materiales semiconductores .....                           | 581        |
| 2.3.1. Corriente de conducción: electrones, huecos y conductividad del material .....  | 581        |
| 2.3.2. Corriente de difusión: ley de Fick .....                                        | 585        |
| 2.4. Tipos de materiales semiconductores .....                                         | 588        |
| 2.4.1. Intrínsecos .....                                                               | 588        |
| 2.4.2. Ley de acción de masas .....                                                    | 589        |
| 2.4.3. Dopado: semiconductores extrínsecos .....                                       | 590        |

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.5. Cálculo de concentraciones .....                               | 591 |
| 2.5.1. Ionización total .....                                       | 591 |
| 2.5.2. Ley de neutralidad del semiconductor .....                   | 592 |
| 2.5.3. Ley de acción de masas en semiconductores extrínsecos .....  | 592 |
| 3. Uniones $P$ - $N$ : el diodo .....                               | 593 |
| 3.1. Estructura de la unión $P$ - $N$ .....                         | 594 |
| 3.2. Análisis del equilibrio de la unión $P$ - $N$ .....            | 594 |
| 3.2.1. Concentraciones de portadores .....                          | 594 |
| 3.2.2. Difusión de portadores .....                                 | 595 |
| 3.2.3. Campo interno y arrastre de portadores .....                 | 596 |
| 3.2.4. Equilibrio de corrientes .....                               | 597 |
| 3.2.5. Zona de vaciamiento y barrera de potencial interna .....     | 597 |
| 3.3. Análisis de la dinámica de la unión $P$ - $N$ .....            | 598 |
| 3.3.1. Unión $P$ - $N$ en directa .....                             | 599 |
| 3.3.2. Unión $P$ - $N$ en inversa .....                             | 601 |
| 3.3.3. Comportamiento en directa e inversa .....                    | 602 |
| 3.3.4. Ecuación del diodo de Shockley .....                         | 602 |
| 3.4. Símbolo circuital .....                                        | 604 |
| 3.5. Aproximaciones de gran señal .....                             | 604 |
| 3.5.1. Aproximación 1: rectificador ideal .....                     | 604 |
| 3.5.2. Aproximación 2: rectificador ideal con tensión de codo ..... | 607 |
| 3.6. Aplicaciones de la unión $P$ - $N$ .....                       | 610 |
| 3.6.1. Rectificadores .....                                         | 611 |
| 3.6.2. Diodos LED .....                                             | 611 |
| 3.6.3. Láser de estado sólido .....                                 | 611 |
| 3.6.4. Células solares fotovoltaicas .....                          | 611 |
| 3.6.5. Construcción de dispositivos más complejos .....             | 611 |
| 3.6.6. Otras aplicaciones .....                                     | 612 |
| Actividades de autocomprobación .....                               | 614 |
| Referencias bibliográficas .....                                    | 617 |

