



# Contenido

|                                                                                                     |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Acerca del autor .....                                                                              | ix       |
| Prólogo .....                                                                                       | xi       |
| Al estudiante .....                                                                                 | xv       |
| <b>Capítulo 1. Introducción a la teoría de los circuitos eléctricos .....</b>                       | <b>1</b> |
| 1.1. Introducción .....                                                                             | 2        |
| 1.2. Variables que intervienen en el estudio de los circuitos eléctricos. Convenio de signos ..     | 3        |
| 1.2.1. Corriente eléctrica .....                                                                    | 4        |
| 1.2.2. Potencial eléctrico. Tensión. Diferencia de potencial .....                                  | 5        |
| 1.2.3. Potencia eléctrica .....                                                                     | 7        |
| 1.3. Elementos activos ideales. Fuentes o generadores .....                                         | 9        |
| 1.4. Tipos de excitación y formas de onda .....                                                     | 12       |
| 1.4.1. Clasificación de ondas .....                                                                 | 12       |
| 1.4.2. Ondas periódicas: valores asociados .....                                                    | 13       |
| 1.5. Elementos pasivos .....                                                                        | 15       |
| 1.5.1. Resistencia .....                                                                            | 16       |
| 1.5.2. Bobina. Inductancia .....                                                                    | 21       |
| 1.5.3. Condensador .....                                                                            | 23       |
| 1.6. Impedancia y admitancia operacional .....                                                      | 28       |
| 1.7. Topología de redes: conceptos fundamentales .....                                              | 30       |
| 1.7.1. Definiciones .....                                                                           | 30       |
| 1.7.2. Propiedades .....                                                                            | 32       |
| 1.8. Lemas de Kirchhoff .....                                                                       | 32       |
| 1.8.1. Primer lema de Kirchhoff .....                                                               | 33       |
| 1.8.2. Segundo lema de Kirchhoff .....                                                              | 34       |
| 1.8.3. Elección de las ecuaciones independientes para la aplicación de los lemas de Kirchhoff ..... | 36       |
| 1.9. Elementos activos reales .....                                                                 | 41       |
| 1.10. Asociación y transformación de fuentes .....                                                  | 43       |
| 1.11. Asociación de elementos pasivos .....                                                         | 48       |
| 1.11.1. Conexión en serie .....                                                                     | 49       |
| 1.11.2. Conexión en paralelo .....                                                                  | 50       |
| 1.11.3. Equivalencia estrella-triángulo. Teorema de Kennelly .....                                  | 52       |

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 1.12. Análisis de circuitos por el método de las mallas .....        | 60  |
| 1.12.1. Método de las mallas. Formulación general .....              | 60  |
| 1.12.2. Método de las mallas con generadores de corriente .....      | 66  |
| 1.13. Análisis de circuitos por el método de los nudos .....         | 71  |
| 1.13.1. Formulación general .....                                    | 71  |
| 1.13.2. Método de los nudos con generadores de tensión .....         | 76  |
| 1.14. Principio de superposición .....                               | 82  |
| 1.15. Teoremas de Thévenin y Norton .....                            | 86  |
| 1.16. Otros teoremas de circuitos .....                              | 94  |
| 1.16.1. Teorema de sustitución .....                                 | 94  |
| 1.16.2. Teorema de reciprocidad .....                                | 96  |
| 1.16.3. Teorema de Millman .....                                     | 97  |
| 1.16.4. Teorema de Tellegen .....                                    | 99  |
| 1.17. Cuadripolos .....                                              | 102 |
| 1.18. El amplificador operacional .....                              | 110 |
| 1.19. Bobinas con acoplamiento magnético .....                       | 116 |
| 1.19.1. Análisis de los flujos magnéticos en bobinas acopladas ..... | 117 |
| 1.19.2. Energía magnética almacenada con bobinas acopladas .....     | 122 |
| Problemas .....                                                      | 124 |
| Biografías .....                                                     | 135 |
| Referencias .....                                                    | 138 |

## Capítulo 2. Circuitos de corriente alterna sinusoidal ..... 141

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1. Introducción .....                                                                 | 142 |
| 2.2. Onda sinusoidal: generación y valores asociados .....                              | 144 |
| 2.3. Representación compleja de una magnitud sinusoidal .....                           | 149 |
| 2.4. Derivada e integral de una magnitud sinusoidal .....                               | 155 |
| 2.5. El dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia .....                          | 156 |
| 2.6. Respuesta sinusoidal de los elementos pasivos .....                                | 161 |
| 2.7. Impedancia y admitancia complejas .....                                            | 165 |
| 2.8. Análisis de circuitos en régimen permanente sinusoidal .....                       | 168 |
| 2.8.1. Generalidades .....                                                              | 168 |
| 2.8.2. Asociación de elementos pasivos .....                                            | 175 |
| 2.8.3. Método de las corrientes de malla .....                                          | 177 |
| 2.8.4. Método de las tensiones de nudo .....                                            | 179 |
| 2.8.5. Principio de superposición .....                                                 | 183 |
| 2.8.6. Teoremas de Thévenin y Norton .....                                              | 187 |
| 2.9. Potencia en un circuito eléctrico en régimen de corriente alterna sinusoidal ..... | 193 |
| 2.10. Potencia compleja .....                                                           | 202 |
| 2.11. Factor de potencia: su importancia práctica .....                                 | 209 |
| 2.12. Corrección del factor de potencia .....                                           | 213 |
| 2.13. Medida de la potencia en c.a. ....                                                | 223 |
| 2.14. Transferencia máxima de potencia .....                                            | 228 |
| 2.15. Resonancia en c.a. ....                                                           | 231 |
| 2.16. Los filtros eléctricos .....                                                      | 237 |
| 2.17. Circuitos eléctricos con señales no sinusoidales .....                            | 241 |

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.17.1. Introducción .....                                                          | 241 |
| 2.17.2. Revisión matemática. Series de Fourier .....                                | 242 |
| 2.17.3. Aplicaciones de las series de Fourier a los circuitos eléctricos .....      | 247 |
| 2.17.4. Circuitos eléctricos con tensión sinusoidal y corriente no sinusoidal ..... | 251 |
| Problemas .....                                                                     | 256 |
| Biografías .....                                                                    | 275 |
| Referencias .....                                                                   | 277 |

## **Capítulo 3. Circuitos trifásicos ..... 279**

|                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1. Introducción .....                                                                                      | 280 |
| 3.2. Generación de tensiones trifásicas .....                                                                | 281 |
| 3.3. Conexión en estrella equilibrada .....                                                                  | 285 |
| 3.4. Conexión en triángulo equilibrado .....                                                                 | 296 |
| 3.5. Cargas desequilibradas .....                                                                            | 305 |
| 3.5.1. Cargas desequilibradas conectadas en estrella .....                                                   | 305 |
| 3.5.2. Cargas desequilibradas conectadas en triángulo .....                                                  | 315 |
| 3.6. Potencia en sistemas trifásicos .....                                                                   | 321 |
| 3.6.1. Generalidades .....                                                                                   | 321 |
| 3.6.2. Potencias en sistemas trifásicos equilibrados .....                                                   | 322 |
| 3.7. Corrección del factor de potencia en trifásica .....                                                    | 329 |
| 3.8. Medida de la potencia en sistemas trifásicos .....                                                      | 333 |
| 3.8.1. Generalidades .....                                                                                   | 333 |
| 3.8.2. Medida de la potencia en circuitos equilibrados .....                                                 | 335 |
| 3.9. Transporte de energía eléctrica: ventaja de los sistemas trifásicos frente a los mono-<br>fásicos ..... | 345 |
| 3.10. Componentes simétricas .....                                                                           | 346 |
| 3.10.1. Generalidades .....                                                                                  | 346 |
| 3.10.2. El operador trifásico «a» .....                                                                      | 347 |
| 3.10.3. Componentes simétricas de fasores desequilibrados .....                                              | 348 |
| 3.10.4. Impedancias debidas a las corrientes de diferente secuencia .....                                    | 355 |
| 3.10.5. Redes de secuencia .....                                                                             | 356 |
| 3.10.6. Cálculo de faltas en sistemas de potencia .....                                                      | 357 |
| Problemas .....                                                                                              | 362 |
| Biografías .....                                                                                             | 387 |
| Referencias .....                                                                                            | 389 |

## **Capítulo 4. Régimen transitorio de los circuitos eléctricos ..... 391**

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1. Introducción .....                                                 | 392 |
| 4.2. La respuesta completa de una red lineal .....                      | 393 |
| 4.3. Condiciones iniciales de los elementos .....                       | 395 |
| 4.3.1. Resistencia .....                                                | 395 |
| 4.3.2. Inductancia .....                                                | 395 |
| 4.3.3. Capacidad .....                                                  | 396 |
| 4.4. Análisis clásico de transitorios en sistemas de primer orden ..... | 400 |
| 4.4.1. Respuesta transitoria de un circuito $R-L$ .....                 | 400 |
| 4.4.2. Respuesta transitoria de un circuito $R-C$ .....                 | 406 |

|                                                                                                             |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.5. Solución sistemática de redes de primer orden .....                                                    | 409        |
| 4.6. Análisis clásico de transitorios en sistemas de segundo orden .....                                    | 423        |
| 4.6.1. Respuesta transitoria de un circuito $R-L-C$ .....                                                   | 423        |
| 4.7. Transformada de Laplace .....                                                                          | 438        |
| 4.8. Función de transferencia. Diagrama de polos y ceros .....                                              | 440        |
| 4.9. Aplicaciones de la transformada de Laplace en el estudio de transitorios de circuitos eléctricos ..... | 444        |
| 4.9.1. Respuesta de los elementos pasivos simples en el plano «s» .....                                     | 444        |
| 4.10. Análisis de circuitos eléctricos por variables de estado .....                                        | 460        |
| 4.10.1. El concepto de estado .....                                                                         | 460        |
| 4.10.2. Planteamiento sistemático de las ecuaciones de estado .....                                         | 463        |
| 4.10.3. Solución de las ecuaciones de estado por la transformada de Laplace .....                           | 466        |
| Problemas .....                                                                                             | 472        |
| Biografías .....                                                                                            | 483        |
| Referencias .....                                                                                           | 486        |
| <b>Apéndice 1. Circuitos eléctricos: Aspectos históricos .....</b>                                          | <b>489</b> |
| A.1.1. Ley de Ohm y lemas de Kirchhoff .....                                                                | 490        |
| A.1.2. Algunos teoremas de los circuitos eléctricos .....                                                   | 491        |
| A.1.3. Circuitos de corriente alterna. El cálculo simbólico .....                                           | 492        |
| A.1.4. La potencia en corriente alterna .....                                                               | 494        |
| A.1.5. Los sistemas polifásicos y el método de las componentes simétricas .....                             | 494        |
| A.1.6. El cálculo operacional de Heaviside .....                                                            | 496        |
| A.1.7. Los filtros eléctricos. La síntesis de los circuitos eléctricos .....                                | 497        |
| A.1.8. La realimentación y otras contribuciones en circuitos .....                                          | 498        |
| A.1.9. Las innovaciones electrónicas y los circuitos activos .....                                          | 500        |
| A.1.10. De la teoría de circuitos a la teoría de sistemas .....                                             | 501        |
| A.1.11. El estudio de los circuitos eléctricos con ayuda de ordenador .....                                 | 503        |
| Referencias .....                                                                                           | 504        |
| <b>Apéndice 2. Transformada de Laplace .....</b>                                                            | <b>509</b> |
| A.2.1. Introducción histórica .....                                                                         | 510        |
| A.2.2. Definición de transformada de Laplace .....                                                          | 510        |
| A.2.3. Teoremas sobre la transformada de Laplace .....                                                      | 511        |
| A.2.4. Desarrollo de pares de transformadas .....                                                           | 519        |
| A.2.5. Síntesis de ondas utilizando el operador retardo del tiempo .....                                    | 523        |
| A.2.6. Función impulso. Delta de Dirac .....                                                                | 526        |
| A.2.7. Síntesis de ondas utilizando la función impulso .....                                                | 530        |
| A.2.8. Transformada inversa de Laplace. Tablas de transformadas .....                                       | 532        |
| A.2.9. La integral de convolución .....                                                                     | 538        |
| A.2.10. Interpretación gráfica de la convolución .....                                                      | 541        |
| A.2.11. Propiedades de la integral de convolución .....                                                     | 544        |
| <b>Índices .....</b>                                                                                        | <b>549</b> |
| Índice analítico .....                                                                                      | 551        |
| Índice biográfico .....                                                                                     | 557        |