

# Índice sistemático

|                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Sumario .....                                                           | 7         |
| Prólogo .....                                                           | 9         |
| Abreviaciones .....                                                     | 11        |
| <b>Capítulo 1. Introducción a la energía eólica .....</b>               | <b>15</b> |
| Objetivos del capítulo .....                                            | 15        |
| 1. Introducción .....                                                   | 16        |
| 2. Historia de la energía eólica .....                                  | 17        |
| 3. La energía eólica en cifras .....                                    | 20        |
| 3.1. <i>Ranking</i> de la energía eólica en tierra a nivel global ..... | 21        |
| 3.2. <i>Ranking</i> de la energía eólica en el mar a nivel global ..... | 22        |
| 3.3. La energía eólica en España .....                                  | 23        |
| 4. Asociaciones empresariales del sector eólico .....                   | 25        |
| 4.1. Asociaciones internacionales .....                                 | 25        |
| 4.2. Asociaciones nacionales .....                                      | 27        |
| Conceptos básicos .....                                                 | 28        |
| Actividades de repaso .....                                             | 28        |
| Referencias bibliográficas .....                                        | 28        |
| <b>Capítulo 2. El recurso eólico .....</b>                              | <b>31</b> |
| Objetivos del capítulo .....                                            | 31        |
| 1. Características del viento .....                                     | 32        |
| 1.1. Escalas meteorológicas .....                                       | 32        |
| 1.1.1. Macroescala .....                                                | 33        |
| 1.1.2. Mesoescala .....                                                 | 34        |
| 1.1.3. Microescala .....                                                | 34        |
| 2. Medición del recurso eólico .....                                    | 34        |
| 2.1. Estación anemométrica .....                                        | 35        |
| 2.2. Nuevas tecnologías de medición de datos .....                      | 37        |
| 2.3. Medición de datos en el mar .....                                  | 38        |
| 3. Campañas de medición .....                                           | 39        |
| 4. Fuentes en línea de recursos eólicos .....                           | 41        |
| 4.1. Global Wind Atlas .....                                            | 42        |
| Conceptos básicos .....                                                 | 44        |
| Actividades de repaso .....                                             | 44        |
| Referencias bibliográficas .....                                        | 45        |

|                                                                            |               |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>Capítulo 3. Análisis estadístico y procesamiento de los datos .....</b> | <b>47</b>     |
| Objetivos del capítulo .....                                               | 47            |
| 1. Variables utilizadas en la evaluación del recurso eólico .....          | 48            |
| 1.1. Valor medio anual de la velocidad .....                               | 48            |
| 1.2. Distribución de probabilidad del viento .....                         | 49            |
| 1.3. Variación del viento con la altura .....                              | 51            |
| 1.4. Rosa de los vientos .....                                             | 54            |
| 1.5. Turbulencia .....                                                     | 57            |
| 1.6. Rafagosidad .....                                                     | 58            |
| 1.7. Temperatura y presión .....                                           | 58            |
| 2. Estimación de la energía producida .....                                | 58            |
| 2.1. Método estático .....                                                 | 58            |
| 2.2. Ejemplo de cálculo .....                                              | 60            |
| Conceptos básicos .....                                                    | 63            |
| Actividades de repaso .....                                                | 63            |
| Referencias bibliográficas .....                                           | 64            |
| <br><b>Capítulo 4. Aerogeneradores .....</b>                               | <br><b>65</b> |
| Objetivos del capítulo .....                                               | 65            |
| 1. Evolución de la tecnología eólica .....                                 | 66            |
| 1.1. Tecnología eólica terrestre .....                                     | 66            |
| 1.2. Tecnología eólica marina .....                                        | 67            |
| 2. Norma IEC 61400-1 .....                                                 | 68            |
| 3. Componentes de un aerogenerador .....                                   | 70            |
| 3.1. Componentes generales .....                                           | 71            |
| 3.1.1. Rotor .....                                                         | 72            |
| 3.1.1.1. Palas .....                                                       | 72            |
| 3.1.1.2. Buje .....                                                        | 73            |
| 3.1.2. Torre .....                                                         | 73            |
| 3.1.3. Góndola .....                                                       | 74            |
| 3.1.3.1. Multiplicador y ejes .....                                        | 75            |
| 3.1.3.2. Generador eléctrico .....                                         | 75            |
| 3.1.4. Sistemas .....                                                      | 76            |
| 3.1.4.1. Sistema de frenos .....                                           | 76            |
| 3.1.4.2. Sistemas de control .....                                         | 76            |
| 3.1.4.3. Sistemas de refrigeración .....                                   | 76            |
| 3.1.5. Transformador .....                                                 | 77            |
| 4. Coeficientes de potencia y de empuje .....                              | 77            |
| 4.1. Coeficiente de potencia .....                                         | 77            |
| 4.2. Coeficiente de empuje .....                                           | 77            |
| 4.3. Ejemplo de aerogenerador/coeficientes .....                           | 78            |
| 5. Selección del aerogenerador .....                                       | 79            |

|                                                                                       |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Conceptos básicos .....                                                               | 80         |
| Actividades de repaso .....                                                           | 80         |
| Referencias bibliográficas .....                                                      | 80         |
| <b>Capítulo 5. Diseño de un parque eólico. <i>Micrositing</i> .....</b>               | <b>83</b>  |
| Objetivos del capítulo .....                                                          | 83         |
| 1. Introducción .....                                                                 | 84         |
| 2. Proceso de toma de decisión multicriterio .....                                    | 84         |
| 2.1. Partes generales del proceso de toma de decisión multicriterio .....             | 84         |
| 3. Factores que intervienen en la localización óptima de emplazamientos eólicos ..... | 85         |
| 4. Informe técnico del emplazamiento eólico .....                                     | 90         |
| 4.1. Datos .....                                                                      | 92         |
| 4.1.1. Ejemplo .....                                                                  | 93         |
| 4.2. Caracterización del viento a largo plazo .....                                   | 94         |
| 4.3. Distribución de los aerogeneradores .....                                        | 95         |
| 4.3.1. Zonas de mayor potencial .....                                                 | 95         |
| 4.3.2. Distancias entre aerogeneradores .....                                         | 97         |
| 4.4. Cálculos de la estimación de la producción .....                                 | 97         |
| Conceptos básicos .....                                                               | 100        |
| Actividades de repaso .....                                                           | 100        |
| Referencias bibliográficas .....                                                      | 102        |
| <b>Capítulo 6. Caso de estudio. Parque eólico en tierra .....</b>                     | <b>103</b> |
| Objetivos del capítulo .....                                                          | 103        |
| 1. Introducción .....                                                                 | 104        |
| 2. Obtención de datos .....                                                           | 104        |
| 3. Caracterización del viento .....                                                   | 106        |
| 3.1. Distribución de probabilidad del viento .....                                    | 107        |
| 3.2. Variación estacional y horaria .....                                             | 109        |
| 3.3. Turbulencias .....                                                               | 111        |
| 3.4. Rosa de los vientos de energía .....                                             | 111        |
| 4. Distribución de los aerogeneradores .....                                          | 113        |
| 4.1. Selección de aerogeneradores .....                                               | 113        |
| 4.2. Distribución de los aerogeneradores .....                                        | 115        |
| 5. Estimación de la producción .....                                                  | 115        |
| 6. Aplicaciones informáticas .....                                                    | 117        |
| 6.1. Específicas del sector eólico .....                                              | 117        |
| 6.1.1. Windographer .....                                                             | 117        |
| 6.1.2. WAsP .....                                                                     | 118        |
| 6.2. Aplicaciones de apoyo .....                                                      | 120        |
| Conceptos básicos .....                                                               | 121        |

|                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| Actividades de repaso .....                                              | 121        |
| Referencias bibliográficas .....                                         | 122        |
| <b>Capítulo 7. Obra civil .....</b>                                      | <b>125</b> |
| Objetivos del capítulo .....                                             | 125        |
| 1. Introducción .....                                                    | 126        |
| 2. Viales .....                                                          | 127        |
| 2.1. Transporte de las palas .....                                       | 129        |
| 3. Zanjas .....                                                          | 131        |
| 4. Plataformas de montaje .....                                          | 132        |
| 5. Edificio de control .....                                             | 133        |
| 6. Cimentaciones de los aerogeneradores .....                            | 134        |
| 6.1. Tipos de cimentaciones de aerogeneradores terrestres .....          | 135        |
| 6.2. Investigaciones en cimentaciones con pilotes .....                  | 137        |
| 7. Planificación de la infraestructura de la obra civil .....            | 139        |
| Conceptos básicos .....                                                  | 140        |
| Actividades de repaso .....                                              | 140        |
| Referencias bibliográficas .....                                         | 142        |
| <b>Capítulo 8. Obra eléctrica .....</b>                                  | <b>143</b> |
| Objetivos del capítulo .....                                             | 143        |
| 1. Introducción .....                                                    | 144        |
| 2. Caracterización de las principales instalaciones eléctricas .....     | 145        |
| 2.1. Red de BT .....                                                     | 145        |
| 2.2. Centro de transformación .....                                      | 145        |
| 2.3. Red de cables subterráneos .....                                    | 148        |
| 2.3.1. Red de tierra .....                                               | 148        |
| 2.3.2. Red de MT .....                                                   | 149        |
| 2.3.3. Red de fibra óptica .....                                         | 150        |
| 2.4. Subestación eléctrica (MT/AT) .....                                 | 151        |
| 2.5. Línea aérea eléctrica .....                                         | 153        |
| 3. Dimensionamiento eléctrico .....                                      | 154        |
| 3.1. Dimensionamiento de la red eléctrica interna. Ejemplo .....         | 155        |
| 4. Investigaciones de optimización de la infraestructura eléctrica ..... | 160        |
| Conceptos básicos .....                                                  | 161        |
| Actividades de repaso .....                                              | 161        |
| Referencias bibliográficas .....                                         | 163        |
| <b>Capítulo 9. Estudio económico de proyectos eólicos .....</b>          | <b>165</b> |
| Objetivos del capítulo .....                                             | 165        |
| 1. Introducción .....                                                    | 166        |

|                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| 2. Costes .....                                                       | 166        |
| 2.1. CAPEX .....                                                      | 167        |
| 2.1.1. Costes de investigación/desarrollo .....                       | 167        |
| 2.1.2. Costes de construcción .....                                   | 168        |
| 2.2. OPEX .....                                                       | 170        |
| 2.3. DECEX .....                                                      | 171        |
| 3. Ingresos .....                                                     | 172        |
| 4. Viabilidad económica .....                                         | 173        |
| 4.1. VAN de la inversión .....                                        | 173        |
| 4.2. TIR .....                                                        | 174        |
| 4.3. Periodo de recuperación .....                                    | 174        |
| 4.4. Selección de un proyecto según los indicadores financieros ..... | 175        |
| 5. LCOE .....                                                         | 175        |
| 5.1. Tendencia del LCOE en el sector eólico terrestre .....           | 176        |
| 5.2. Tendencia del LCOE en el sector eólico marino .....              | 177        |
| Conceptos básicos .....                                               | 180        |
| Actividades de repaso .....                                           | 180        |
| Referencias bibliográficas .....                                      | 184        |
| <b>Capítulo 10. Minieólica .....</b>                                  | <b>185</b> |
| Objetivos del capítulo .....                                          | 185        |
| 1. Introducción .....                                                 | 186        |
| 2. Estadísticas .....                                                 | 187        |
| 3. Tipologías .....                                                   | 189        |
| 3.1. Aisladas o conectadas a red .....                                | 189        |
| 3.2. Situación física .....                                           | 190        |
| 4. Tecnología .....                                                   | 193        |
| 4.1. Clasificación .....                                              | 193        |
| 4.2. Principales fabricantes .....                                    | 195        |
| 5. Estudios relacionados .....                                        | 197        |
| 6. Sistemas híbridos .....                                            | 198        |
| Conceptos básicos .....                                               | 200        |
| Actividades de repaso .....                                           | 200        |
| Referencias bibliográficas .....                                      | 201        |

