

Índice

CAPÍTULO 1. Introducción

1.1 El viento como recurso energético -----	pág. 1
1.2 La energía eólica -----	pág. 2
1.2.1 La energía eólica en España -----	pág. 2
1.2.2 La energía eólica en el mundo -----	pág. 6
1.2.3 El futuro de la energía eólica -----	pág. 7
1.3 Ventajas e inconvenientes de las plantas eólicas -----	pág. 10

CAPÍTULO 2. Caracterización del viento

2.1 Introducción -----	pág. 13
2.2 La velocidad del viento -----	pág. 14
2.3 Variación de la velocidad de viento con la altura -----	pág. 18
2.4 Cálculo del parámetro α -----	pág. 20
2.5 Variación de la densidad del aire con la altura -----	pág. 21
2.6 Dirección del viento -----	pág. 22
2.7 Análisis estadístico del viento medido en las estaciones -----	pág. 24

CAPÍTULO 3. Modelos para la predicción de viento

3.1 Tipos de modelos de predicción -----	pág. 37
3.2 Elaboración y elección del modelo de predicción -----	pág. 40
3.3 Resultados de los modelos y conclusiones -----	pág. 49
3.4 Relación entre el módulo y la dirección del viento -----	pág. 50

CAPÍTULO 4. Elección del modelo de aerogenerador

4.1 Generalidades de los aerogeneradores -----	pág. 57
4.2 Costes asociados a un parque de aerogeneradores -----	pág. 59
4.3 Modelos de aerogenerador utilizados -----	pág. 61

4.4 Cálculo del aerogenerador más adecuado -----	pág. 65
4.4.1 Análisis inicial del aerogenerador óptimo -----	pág. 65
4.4.2 Análisis económico de los modelos -----	pág. 73
4.4.3 Rentabilidad de la central de Isla Laitec -----	pág. 75
4.4.4 Rentabilidad de la central en Sibaya -----	pág. 83
CAPÍTULO 5. Optimización del sistema de almacenamiento	
5.1 El sistema de almacenamiento -----	pág. 91
5.1.1 Batería S-NA -----	pág. 94
5.1.2 Batería de Ni-Cd -----	pág. 94
5.1.3 Batería de Pb-ácido -----	pág. 94
5.1.4 Batería de Flujo -----	pág. 94
5.1.5 Sistemas de baterías elegidos -----	pág. 94
5.2 La función de optimización -----	pág. 95
5.3 Optimización del sistema -----	pág. 100
5.3.1 Análisis de los tiempos de mejora -----	pág. 100
5.3.2 Análisis de Sibaya -----	pág. 102
5.3.3 Análisis de Isla Laitec -----	pág. 114
ANEXO I -----	pág. 127
ANEXO II -----	pág. 135
BIBLIOGRAFÍA -----	pág. 141

Índice de figuras

CAPÍTULO 1. Introducción

Figura 1.1: Evolución de la potencia eólica instalada en España durante el periodo de 2001 a 2012. ----- pág. 3

Figura 1.2: Intercambios de energía eléctrica de España con los países extranjeros en 2011. ----- pág. 4

Figura 1.3: Evolución de la potencia eólica instalada a nivel mundial desde 2001. ----- pág. 7

Figura 1.4: Distribución de la velocidad de viento en España medida a una altura genérica de un aerogenerador de 80 m. Fuente IDAE. ----- pág. 8

Figura 1.5: Evolución de la estructura de generación en el periodo entre 2010-2020 por fuentes. ----- pág. 9

Figura 1.6: Evolución de la potencia eléctrica instalada en España durante el periodo 2005-2020. ----- pág. 9

Figura 1.7: Situación del empleo asociado a las diferentes energías renovables en 2010. ----- pág. 11

CAPÍTULO 2. Caracterización del viento

Figura 2.1: Velocidad media del viento a cada instante del día en la estación de Isla Laitec. ----- pág. 14

Figura 2.2: Velocidad media del viento para cada hora del día en la estación de Sibaya. ----- pág. 15

Figura 2.3: Curva de la demanda diaria de energía para los días miércoles 22 de Junio a la izquierda y jueves 24 de Noviembre, a la derecha, ambos del año 2011. Fuente: REE ----- pág. 16

Figura 2.4: Velocidad media de las medidas de viento entre el 01-11-2002 a 31-10-2003 en Isla Laitec. ----- pág. 16

Figura 2.5: Velocidad media de las medidas de viento entre el 17-12-2003 a 31-12-2004 en Sibaya. ----- pág. 17

Figura 2.6: Diferentes perfiles de la velocidad del viento según el emplazamiento. ----- -----	pág. 18
Figura 2.7: Variación de la velocidad del viento con la altura para diferentes valores del exponente de Hellman. -----	pág. 19
Figura 2.8: Rosa de los vientos de la estación de Isla Laitec para las medidas recogidas entre el 01-11-2002 al 31-10-2003. -----	pág. 22
Figura 2.9: Rosa de los vientos de la estación de Sibaya para las medidas recogidas entre el 17-12-2003 a 31-12-2004. -----	pág. 23
Figura 2.10: Rosa de los vientos de la estación de Sibaya con una mala elección del número de porciones comparada con la auténtica. -----	pág. 23
Figura 2.11: Representación de la función de densidad de Weibull para diferentes valores del parámetro de forma k . -----	pág. 24
Figura 2.12: Distribución de densidad de probabilidad de Rayleigh para diferentes valores del parámetro σ . -----	pág. 25
Figura 2.13: Representación del histograma de la velocidad medida por el anemómetro colocado a veinte metros sobre el suelo. Arriba se han representado los datos de Isla Laitec y abajo los de Sibaya. -----	pág. 26
Figura 2.14: Arriba, función de distribución de probabilidad de Weibull para las velocidades de Isla Laitec a la altura de 138 m (i). En medio, el histograma de las velocidades en Isla Laitec a esa altura (ii). Abajo, la curva característica de potencia velocidad del aerogenerador (iii). -----	pág. 27
Figura 2.15: Arriba la distribución de Weibull del aerogenerador E33 con menor factor de escala y abajo la distribución para el E82, el aerogenerador de mayor altura y por consiguiente mayor parámetro de escala. -----	pág. 28
Figura 2.16: Aproximación, a partir de la distribución de Weibull, de la energía generada por la central situada en Isla Laitec, suponiendo la instalación de modelos E82. -----	pág. 29
Figura 2.17: Aproximación, a partir del histograma de los datos, de la energía generada por la central situada en Isla Laitec suponiendo la instalación de modelos E82. ----- -----	pág. 30
Figura 2.18: Curvas de potencia y coeficiente de potencia del modelo E33 de ENERCON. -----	pág. 31
Figura 2.19: Curvas de potencia y coeficiente de potencia del modelo E44 de ENERCON. -----	pág. 32

Figura 2.20: Curvas de potencia y coeficiente de potencia del modelo E48 de ENERCON. -----	pág. 33
Figura 2.21: Curvas de potencia y coeficiente de potencia del modelo E53 de ENERCON. -----	pág. 34
Figura 2.22: Curvas de potencia y coeficiente de potencia del modelo E70 de ENERCON. -----	pág. 35
Figura 2.23: Curvas de potencia y coeficiente de potencia del modelo E82 de ENERCON. -----	pág. 36

CAPÍTULO 3. Modelos para la predicción de viento

Figura 3.1: Ajuste de la velocidad del viento en Isla Laitec con un modelo AR(1) y un horizonte de predicción de una hora. -----	pág. 41
Figura 3.2: Estimación de la velocidad del viento en la estación de Sibaya con un horizonte de predicción de 24 h y un modelo AR(144). -----	pág. 43
Figura 3.3: Representación del ciclo de la velocidad del viento en Sibaya y de un caso anómalo que condiciona la predicción de días sucesivos. -----	pág. 44
Figura 3.4: Corrección del comportamiento anómalo del viento en Sibaya por el modelo AR(144) con horizonte 1h. -----	pág. 45
Figura 3.5: Estimación de la velocidad del viento en la estación de Sibaya con un horizonte de predicción de 24 h y un modelo ARMA(144,4). -----	pág. 45
Figura 3.6: Modelo ARMA(144,8) en un horizonte de 24 h para los datos de viento de Sibaya. -----	pág. 46
Figura 3.7: Representación del ajuste del modelo ARMA(288,8) para los horizontes de predicción de una hora (i) y de veinticuatro horas (ii). -----	pág. 47
Figura 3.8: Representación de la estimación de la velocidad del viento en m/s de un modelo ARMA(432,8) para los horizontes de predicción de 1 h (i) y de 24 h (ii). -----	pág. 48
Figura 3.9: Representación de la dirección y del módulo de la velocidad del viento en la estación de Sibaya para un intervalo de datos históricos. -----	pág. 51
Figura 3.10: Histograma de las velocidades según su procedencia para la estación de Sibaya. -----	pág. 52
Figura 3.11: Histograma de las velocidades según su procedencia para la estación de Isla Laitec. -----	pág. 53

Figura 3.12: Representación de la dirección y del módulo de la velocidad del viento en la estación de Isla Laitec para un intervalo de datos históricos. ----- pág. 54

Figura 3.13: Ajuste logrado por la estimación de un modelo ARMA(8,8) para la dirección del viento en la estación de Isla Laitec en un horizonte temporal de 1 hora. ---
----- pág. 55

CAPÍTULO 4. Elección del modelo de aerogenerador

Figura 4.1. Esquema genérico de un aerogenerador. ----- pág. 58

Figura 4.2: Esquema del generador en anillo y el sistema de alimentación de red de los aerogeneradores de Enercon [13]. ----- pág. 59

Figura 4.3: Costes de inversión de un parque eólico en tierra para una estimación de una potencia de 50 MW durante el año 2010. ----- pág. 60

Figura 4.4. Variación de la velocidad del viento con la altura según la ley de Hellman y donde se muestran los diferentes modelos de aerogenerador para sus alturas características de instalación. Los datos representados son para la estación de Isla Laitec. ----- pág. 63

Figura 4.5: Curvas velocidad-potencia características facilitadas por el fabricante de los modelos de aerogenerador usados en la comparativa de este estudio. ----- pág. 64

Figura 4.6: Representación de las diferentes curvas potencia-velocidad modificadas a la referencia de velocidad que ve el modelo más alto y a la potencia de la central de 20 MW. ----- pág. 66

Figura 4.7: Representación del histograma de la velocidad del viento a 138 m de altura en la estación de Isla Laitec sobre las curvas modificadas de los aerogeneradores a la referencia de 138 m y una central de 20 MW aproximadamente. ----- pág. 67

Figura 4.8: Representación del histograma de la velocidad del viento a 138 m de altura en la estación de Sibaya sobre las curvas modificadas de los aerogeneradores a la referencia de 138 m y una central de 20 MW aproximadamente. ----- pág. 68

Figura 4.9: Distribución de la energía anual estimada a partir de la distribución de Weibull y de la curva de potencia de cada aerogenerador, para la estación de Isla Laitec. ----- pág. 69

Figura 4.10: Distribución de energía estimada a partir del histograma de los datos históricos y de la curva de potencia de cada aerogenerador, para la estación de Isla Laitec. ----- pág. 70

- Figura 4.11: Comparativa entre la distribución de Weibull y el uso del histograma de los datos históricos para la estimación de la energía que se que será posible generar en un año en la futura central de Isla Laitec. ----- pág. 71
- Figura 4.12: Distribución de energía estimada a partir del histograma de los datos históricos y de la curva de potencia de cada aerogenerador, para la estación de Sibaya. --
----- pág. 72
- Figura 4.13: Comparativa de la energía anual que producirían los diferentes modelos en función de la ubicación de la central eólica, sea esta en Sibaya o en Isla Laitec. -----
----- pág. 73
- Figura 4.14: Representación de los beneficios, bruto y neto anuales, y sus costes asociados para una central sito en Isla Laitec, de 20 MW, con un horizonte de predicción de 1 h. ----- pág. 75
- Figura 4.15: Beneficio neto anual de la central según el modelo de aerogenerador que instale para la estación de Isla Laitec con un horizonte de predicción de 1 h. -----
----- pág. 76
- Figura 4.16: Representación de los ingresos y los costes anuales durante el tiempo de vida de la inversión a), los flujos de caja anuales b) y acumulados c) para la inversión de una planta eólica con aerogeneradores E82 en Isla Laitec suponiendo que vende la energía con un horizonte de predicción de 1 h. ----- pág. 77
- Figura 4.17: Representación de los beneficios, bruto y neto, y sus costes asociados según el modelo de aerogenerador E82, para una central situada en Isla Laitec, de 20 MW, con un horizonte de predicción de 24 h. ----- pág. 78
- Figura 4.18: Beneficio neto anual de la central según el modelo de aerogenerador que se instale en la estación de Isla Laitec con un horizonte de predicción de 24 h. -----
----- pág. 79
- Figura 4.19: Representación de los beneficios, bruto y neto, y sus costes asociados según el modelo de aerogenerador elegido, para una central situada en Isla Laitec, de 20 MW, con un horizonte de predicción de 6 h. ----- pág. 80
- Figura 4.20: Representación de los ingresos y los costes anuales durante el tiempo de vida de la inversión a), los flujos de caja anuales b) y acumulados c) para la inversión de una planta eólica con aerogeneradores E82 en Isla Laitec suponiendo que vende la energía con un horizonte de predicción de 6 h. ----- pág. 81
- Figura 4.21: Representación de los beneficios, bruto y neto, y sus costes asociados según el modelo de aerogenerador elegido, para una central situada en Isla Laitec, de 20 MW, con un horizonte de predicción de 12 h. ----- pág. 82

Figura 4.22: Representación de los beneficios bruto y neto, y sus costes asociados, para una central de 20 MW situada en Sibaya, con un horizonte de predicción de 1 h. -----
----- pág. 84

Figura 4.23: Beneficio neto anual para las diferentes opciones de aerogenerador a instalar en la central de 20 MW situada en Sibaya, con un horizonte temporal de 1 h. ---
----- pág. 84

Figura 4.24: Representación de los ingresos y los costes anuales durante el tiempo de vida de la inversión a), los flujos de caja anuales b) y acumulados c) para la inversión de una planta eólica con aerogeneradores E82 en Sibaya suponiendo que vende la energía con un horizonte de predicción de 1 h. ----- pág. 86

Figura 4.25: Representación de los beneficios bruto y neto, y sus costes asociados para una central de 20 MW situada en Sibaya, con un horizonte de predicción de 24 h. -----
----- pág. 87

Figura 4.26: Beneficio neto anual para las diferentes opciones de aerogenerador a instalar en la central de 20 MW situada en Sibaya, con un horizonte temporal de 24 h. -
----- pág. 88

Figura 4.27: Representación de los ingresos y los costes anuales durante el tiempo de vida de la inversión a), los flujos de caja anuales b) y acumulados c) para la inversión de una planta eólica con aerogeneradores E82 en Sibaya suponiendo que vende la energía con un horizonte de predicción de 24 h. ----- pág. 89

CAPÍTULO 5. Optimización del sistema de almacenamiento

Figura 5.2: Estructura de la generación en dos momentos con muy diferente contribución eólica. Fuente Red Eléctrica de España. ----- pág. 92

Figura 5.2: Escalón en la producción eólica de energía eléctrica en España debido a una disminución generalizada en la velocidad del viento. ----- pág. 92

Figura 5.3: Relación de las diferentes tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica en función de su rango de potencia y su tiempo de descarga [14]. --- pág. 93

Figura 5.4: Implantación de un sistema de almacenamiento con baterías S-Na, para la planta eólica de Sibaya con modelos E82 y un horizonte de predicción de 1 h. -----
----- pág. 103

Figura 5.5: Resultado del beneficio neto anual obtenido en la planta eólica de Sibaya para un sistema de almacenamiento de baterías S-Na, aerogeneradores E82 y una venta de energía con horizonte de predicción de 1 h. ----- pág. 104

- Figura 5.6: Representación de los ingresos y los costes anuales durante el tiempo de vida de la instalación a), los flujos de caja anuales b) y acumulados c) para la inversión en una planta eólica con aerogeneradores E82 en Sibaya, sistema de almacenamiento de baterías S-NA de 9.2 MWh y suponiendo que vende la energía con un horizonte de predicción de 1 h. ----- pág. 105
- Figura 5.7: Implantación de un sistema de almacenamiento con baterías de flujo, para la planta eólica de Sibaya con modelos E82 y un horizonte de predicción de 1 h. ----- pág. 107
- Figura 5.8: Representación de los ingresos y los costes anuales durante el tiempo de vida de la instalación a), los flujos de caja anuales b) y acumulados c) para la inversión en una planta eólica con aerogeneradores E82 en Sibaya, sistema de almacenamiento de baterías de flujo de 12.4 MWh y suponiendo que vende la energía con un horizonte de predicción de 1 h. ----- pág. 108
- Figura 5.9: Variación de los beneficios bruto y neto en función de los costes para la central de 20 MW situada en Sibaya con un horizonte de 24 h, usando modelos de aerogenerador E82 y con sistema de baterías S-Na. ----- pág. 109
- Figura 5.10: Resultados de la optimización para la planta eólica en Sibaya con un horizonte de 24 h y modelos de aerogenerador E53 para un sistema de almacenamiento de baterías S-Na. ----- pág. 110
- Figura 5.11: Optimización del beneficio neto para la planta eólica de Sibaya conforme varía la capacidad de almacenamiento con el aerogenerador E82 y horizonte de 24 h. A la izquierda para baterías de flujo y a la derecha para baterías S-Na. ----- pág. 111
- Figura 5.12: Comparación entre los resultados entre los modelos E82 y E53, según el sistema de baterías implementado en el sistema de almacenamiento para la planta eólica situada en Sibaya con un horizonte de predicción de 24 h. ----- pág. 112
- Figura 5.13: Representación de los ingresos y los costes anuales durante el tiempo de vida de la instalación a), los flujos de caja anuales b) y acumulados c) para la inversión en una planta eólica con aerogeneradores E82 en Sibaya, sistema de almacenamiento de baterías S-NA de 4.2 MWh y suponiendo que vende la energía con un horizonte de predicción de 24 h. ----- pág. 113
- Figura 5.14: Representación que compara el beneficio neto máximo en una planta eólica de 20 MW en Isla Laitec según el modelo de aerogenerador instalado, un horizonte de 1 h y según se usen baterías S-NA, baterías de flujo o que no se use sistema de almacenamiento. ----- pág. 115
- Figura 5.15: Resultados de la optimización para la planta eólica en Isla Laitec con un horizonte de 1 h y modelos de aerogenerador E82 para un sistema de almacenamiento de baterías S-NA. ----- pág. 116

Figura 5.16: Representación de los ingresos y los costes anuales durante el tiempo de vida de la instalación a), los flujos de caja anuales b) y acumulados c) para la inversión en una planta eólica con aerogeneradores E82 en Isla Laitec, sistema de almacenamiento de baterías S-Na de 9.3 MWh y suponiendo que vende la energía con un horizonte de predicción de 1 h. ----- pág. 117

Figura 5.17: Representación que compara el beneficio neto máximo en una planta eólica de 20 MW en Isla Laitec según el modelo de aerogenerador instalado, un horizonte de 24 h y según se usen baterías S-Na, baterías de flujo o que no se use sistema de almacenamiento. ----- pág. 118

Figura 5.17: Optimización del beneficio neto para la planta eólica de Isla Laitec conforme varía la capacidad de almacenamiento con el aerogenerador E53 y horizonte de 24 h. A la izquierda para baterías de flujo y a la derecha para baterías S-Na. ----- pág. 119

Figura 5.18: Optimización del beneficio neto para la planta eólica de Isla Laitec conforme varía la capacidad de almacenamiento con el aerogenerador E82 y horizonte de 24 h para las dos tecnologías de almacenamiento estudiadas. ----- pág. 119

Figura 5.19: Optimización del beneficio neto para la planta eólica de Isla Laitec conforme varía la capacidad de almacenamiento con tecnología de baterías de flujo, con el aerogenerador E82 y horizonte de 24 h. ----- pág. 120

Figura 5.20: Representación de los ingresos y los costes anuales durante el tiempo de vida de la instalación a), los flujos de caja anuales b) y acumulados c) para la inversión en una planta eólica con aerogeneradores E82 en Isla Laitec, sistema de almacenamiento de baterías S-Na de 10.5 MWh y suponiendo que vende la energía con un horizonte de predicción de 6 h. ----- pág. 122

Figura 5.21: Representación de los ingresos y los costes anuales durante el tiempo de vida de la instalación a), los flujos de caja anuales b) y acumulados c) para la inversión en una planta eólica con aerogeneradores E82 en Isla Laitec, sistema de almacenamiento de baterías de flujo de 49.6 MWh y suponiendo que vende la energía con un horizonte de predicción de 6 h. ----- pág. 124

Índice de Tablas

CAPÍTULO 1. Introducción

Tabla 1.1: Desglose de la generación eléctrica anual en España en el periodo comprendido entre 2004-2010. Fuente: MiTyC. -----	pág. 5
--	--------

CAPÍTULO 2. Caracterización del viento

Tabla 2.1: Información inicial que se tiene de las estaciones de Sibaya e Isla Laitec. ---- -----	pág. 13
Tabla 2.2: Valores típicos del parámetro α para diferentes terrenos [4]. -----	pág. 19
Tabla 2.3: Resultados obtenidos del cálculo del exponente de Hellman por los dos métodos comentados. -----	pág. 21
Tabla 2.4: Se muestran los parámetros característicos de la distribución de probabilidad de Weibull estimados para los datos de velocidades de viento para cada aerogenerador en la estación ubicada en Isla Laitec. -----	pág. 28
Tabla 2.5: Características del modelo E33. Fuente Enercon. -----	pág. 31
Tabla 2.6: Características del modelo E44. Fuente Enercon. -----	pág. 32
Tabla 2.7: Características del modelo E48. Fuente Enercon. -----	pág. 33
Tabla 2.8: Características del modelo E53. Fuente Enercon. -----	pág. 34
Tabla 2.9: Características del modelo E70. Fuente Enercon. -----	pág. 35
Tabla 2.10: Características del modelo E82. Fuente Enercon. -----	pág. 36

CAPÍTULO 3. Modelos para la predicción de viento

Tabla 3.1: Valores de Ajuste para los diferentes horizontes de predicción de los mejores modelos calculados inicialmente para las estaciones de Sibaya e Isla Laitec. -	pág. 42
Tabla 3.2: Resumen de los resultados de cada modelo de estimación de viento para los dos horizontes de predicción estudiados con los datos de la estación de Sibaya. ----- -----	pág. 49

Tabla 3.3: Resumen de los resultados de cada modelo de estimación de velocidad de viento para los horizontes de predicción de 1 h y 24 h, con los datos históricos de la estación situada en Isla Laitec. ----- pág. 50

CAPÍTULO 4. Elección del modelo de aerogenerador

Tabla 4.1: Características de los modelos de aerogenerador usados para los cálculos del estudio y número de unidades instaladas en una central para tener 20 MW de potencia instalada. ----- pág. 62

CAPÍTULO 5. Optimización del sistema de almacenamiento

Tabla 5.2: Resumen de los diferentes costes asociados a la implementación de un sistema de almacenamiento para las diferentes tecnologías estudiadas, junto con sus características de eficiencia y vida media [15]. ----- pág. 95

Tabla 5.3: Porcentaje de tiempo en el que la planta eólica genera penalizaciones o desaprovecha energía durante el periodo de funcionamiento para diferentes rangos de permisividad del error de la estimación en Isla Laitec para diferentes casos de horizonte de predicción y de uso de almacenamiento. ----- pág. 101

Tabla 5.3: Porcentaje de tiempo en el que la planta eólica genera penalizaciones o desaprovecha energía durante el periodo de funcionamiento para diferentes rangos de permisividad del error de la estimación en Sibaya para diferentes casos de horizonte de predicción y de uso de almacenamiento. ----- pág. 102