

5 Casos

En este capítulo se mostrará la capacidad de los métodos de decisión, combinados con el algoritmo de optimización, para seleccionar la configuración más adecuada a cada situación. En los tres casos planteados se considerará incertidumbre en los datos referentes al viento. En el primer caso se tratará la incertidumbre en las direcciones de procedencia del viento. En el segundo caso, se estudiarán los efectos de la incertidumbre en la caracterización de la velocidad. Por último, en el tercer caso se obtendrá la configuración óptima considerando incertidumbre, tanto en la intensidad del viento, como en las direcciones de procedencia del viento.

5.1 Caso 1.

En este primer ejemplo se consideran cuatro distintos escenarios posibles de viento. En todas las celdas el campo de velocidad del viento está caracterizado por el mismo factor de escala ($C=6.5$ m/s) y de forma ($K=2$), radican la diferencia entre dichos escenarios en las direcciones de procedencia del viento. En la Tabla 3 y en la Figura 13 pueden observarse los tres escenarios, representados mediante la probabilidad de procedencia del viento para cada una de las direcciones, siendo dicha probabilidad nula para el resto de direcciones de la rosa de los vientos.

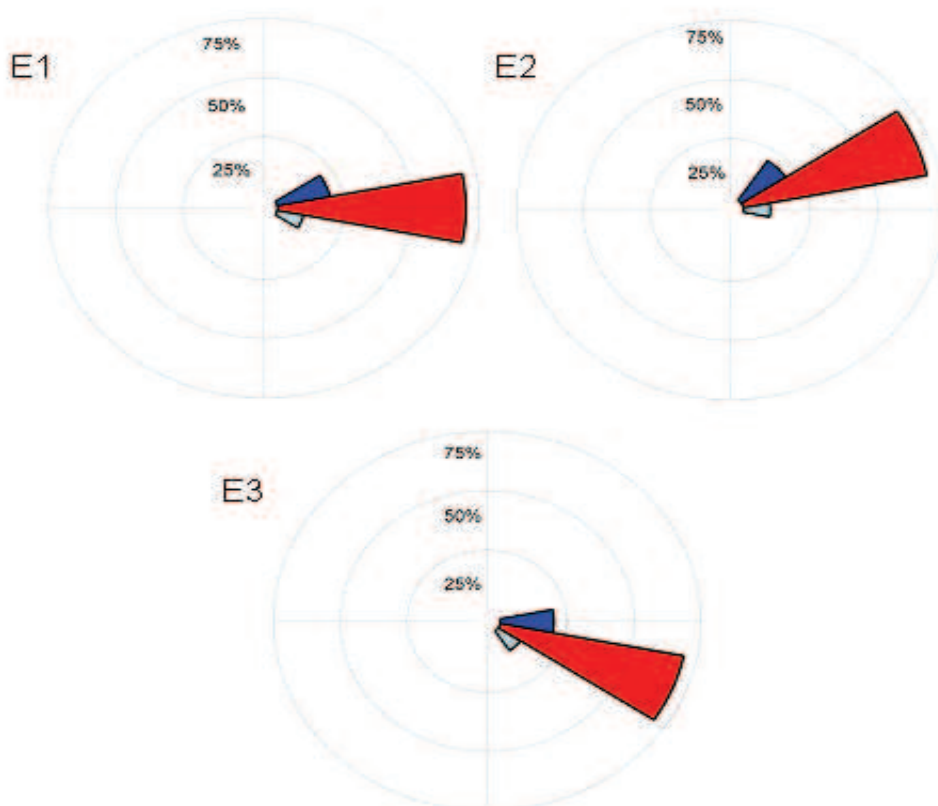


Figura 13 Rosa de probabilidades para cada uno de los escenarios.

Tabla 3 Escenarios de procedencia del viento.

Escenario	Probabilidad	NE	ENE	E	ESE	SE
1	15	0	20	70	10	0
2	65	20	70	10	0	0
3	20	0	0	20	70	10

En este caso se estudiará el emplazamiento de las turbinas de un parque eólico en un terreno cuadrado de dimensiones 3km×3km. Para seleccionar las posibles ubicaciones de los aerogeneradores se discretiza el terreno en 10×10 celdas, de manera que, la dimensión de cada celda es de 300m×300m.

La parcela es atravesada por una carretera de Este a Oeste en su zona más septentrional (ver Figura 14). Se considerará que la capacidad portante del terreno es tal, que es posible realizar la cimentación mediante zapatas, excepto en una parte de la parcela situada en la zona nordeste, donde al ser la capacidad portante del terreno más reducida, será necesario realizar la cimentación mediante pilotes, por lo que habría que asumir un coste superior al realizar dicha cimentación.

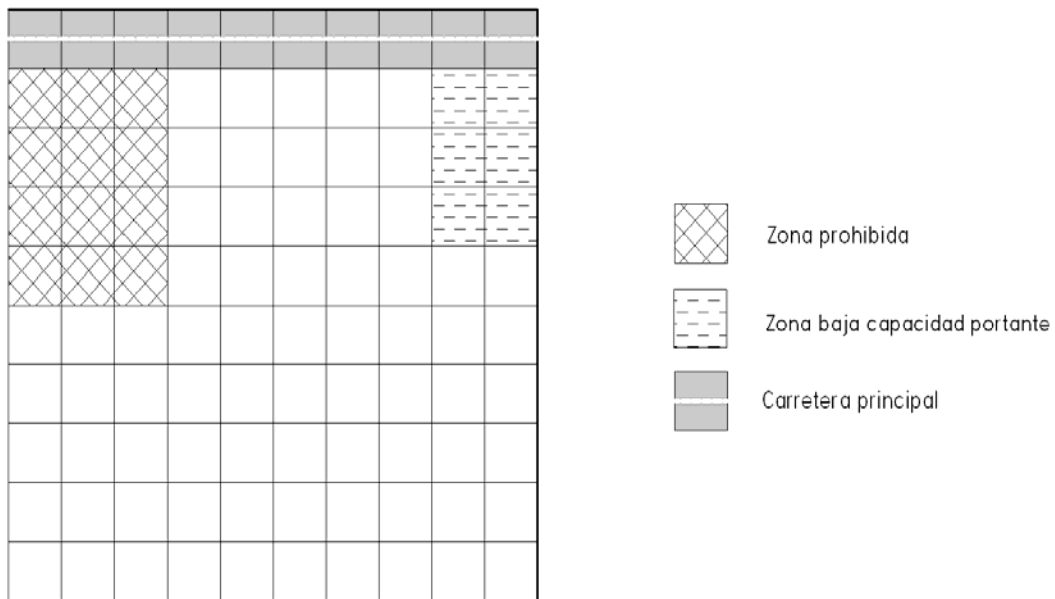


Figura 14 Características del terreno considerado en el ensayo.

En la Tabla 4 se muestran los principales datos técnicos y económicos de entrada al algoritmo, que se suponen conocidos con total certeza.

Tabla 4 Principales datos técnicos y económicos de entrada.

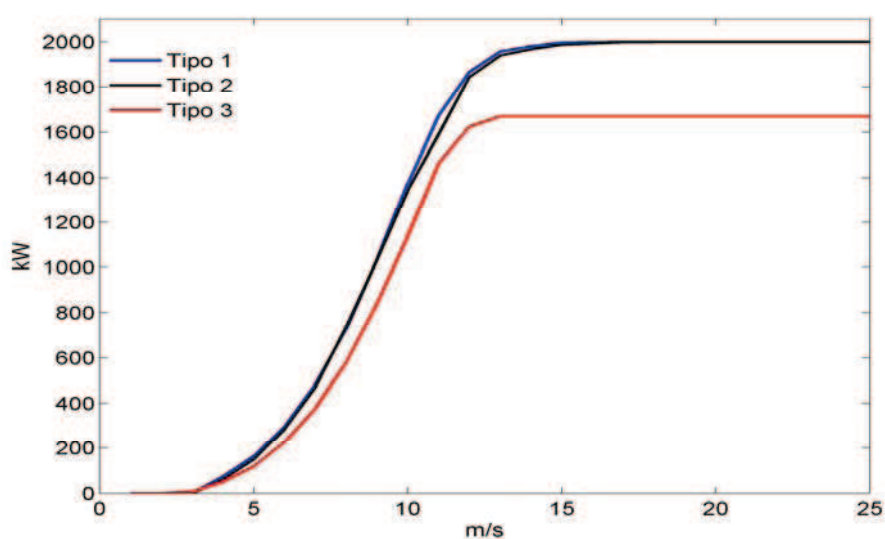
Vida de la inversión (años)	20
Tasa de actualización (%)	6
Precio del kWh (€/kWh)	0.07
Número máximo de generadores en solución final	8
Coste de realización de los caminos (€/m)	100
Sobrecoste cimentación al superar la torre una altura de 50m (%)	50
Sobrecoste cimentación en zona de baja capacidad portante (%)	25
Longitud de rugosidad del terreno (m)	0.0055
Factor de disponibilidad (%)	95
Valor actualizado de los costes de desmantelamiento (%)	3
Valor residual actualizado (%)	3

El algoritmo tiene la capacidad de seleccionar la turbina más apropiada de las que se detallan a continuación.

Tabla 5 Características de las turbinas utilizadas.

	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Potencia (kW)	2000	2000	1670
Altura mínima (m)	60	60	60
Altura máxima (m)	100	100	80
Coste del aerogenerador (€)	2100000	2000000	1670000
Coste por metro de la torre (€/m)	1500	1500	1500
Coste cimentación (€)	80000	80000	80000

Las curvas de potencia-velocidad de los aerogeneradores considerados se representan en la Figura 15.

**Figura 15** Curvas de potencia de los aerogeneradores.

5.1.1 Criterio de máximo valor esperado.

En la Figura 16 se muestran los resultados obtenidos tomando como función objetivo el valor máximo esperado. En este caso, el algoritmo alcanza la solución óptima en 254 generaciones.

La posición de los aerogeneradores es señalada con un punto de color rojo, acompañado de dos números, el situado sobre el punto indica el tipo de turbina seleccionada, mientras que el situado debajo indica la altura óptima de la torre en metros. Los caminos auxiliares de acceso son representados mediante líneas de color azul. Las zonas prohibidas, en las que no es posible instalar un aerogenerador son marcadas con una cruz, mientras que las celdas donde la capacidad portante del terreno es reducida se representan en color amarillo.

Los aerogeneradores se disponen en tres columnas en formación a tresbolillo. La turbina más apropiada es de ‘tipo 2’ con una altura de la torre de 100 m.

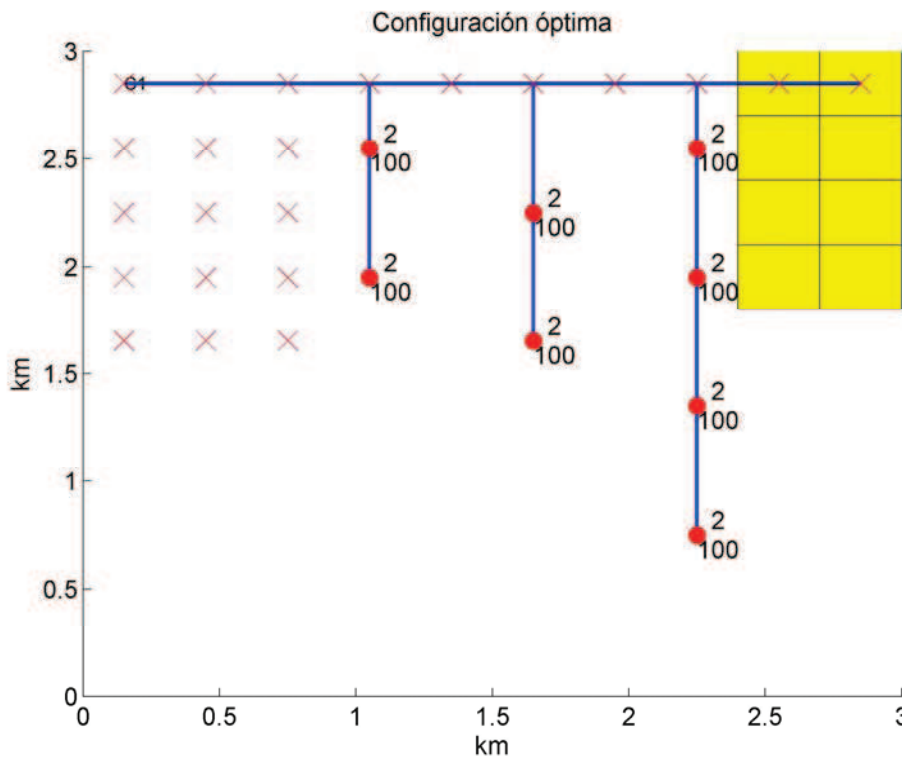


Figura 16 Configuración óptima del caso 1 (Criterio de máximo valor esperado).

En la Tabla 6 se muestran los resultados económicos más relevantes obtenidos por el algoritmo.

Tabla 6 Principales resultados económicos.

VME del VAN	21101043 €
Inversión total	19792000 €
Inversión en turbinas	17200000 €
Inversión en obra civil	1296000 €
VME de la Potencia Media	4044 kW

5.1.2 Criterio de máxima utilidad esperada.

En este caso, el objetivo a maximizar es la utilidad esperada, considerando la función de utilidad exponencial descrita en (25). El ensayo se ha repetido en sucesivas ocasiones alterando el valor de tolerancia al riesgo, ρ . En la Tabla 7 se muestran los valores de VAN (en Euros) obtenidos para cada configuración óptima en función de la tolerancia al riesgo. Las tres primeras columnas muestran el VAN que se obtendría para cada uno de los tres escenarios considerados, mientras que la cuarta columna muestra el valor esperado correspondiente a cada solución. Como puede apreciarse, para actitudes aversivas o neutrales al riesgo ($\rho > 0$ o $\rho = \infty$), la solución óptima obtenida es la misma que mediante el criterio de máximo valor esperado.

Por otro lado, cuando el decisor toma una actitud de preferencia por el riesgo ($\rho < 0$), la solución obtenida no es la que maximiza el valor esperado, ya que el equivalente de certeza del decisor es superior al máximo valor esperado (el decisor no se conforma con éste, pretendiendo obtener como mínimo, el equivalente de certeza correspondiente a su nivel de riesgo). Por ello, a medida que aumenta la preferencia por el riesgo del decisor (tomando ρ valores negativos cada vez más pequeños), la solución óptima tiende a aumentar el VAN correspondiente al *escenario 2*, a pesar de reducir el valor medio esperado. Por tanto, el decisor toma cada vez, una actitud más arriesgada, ya que obtendría un valor superior al VME en el caso de que la ocurrencia del *escenario 2* sea superior a la esperada, en cambio, si esto no fuese así, el VAN obtenido sería inferior que en el caso de haber adoptado una actitud más conservadora.

Por último, aparecen dos casos extremos, cuando la actitud del decisor es muy aversiva (ρ positivo muy próximo a cero) o cuando la actitud es muy arriesgada (ρ negativo muy cercano a cero). En el primer caso ($\rho = 0.002$ en la Tabla 7), el decisor es tan aversivo al riesgo que su equivalente de certeza toma el mínimo valor del VAN que aceptaría para acometer el proyecto, lo que hace que se conforme con cualquier solución que proporcione un VAN superior a dicho valor mínimo. En esta situación, el decisor le asigna la máxima utilidad a cualquier VAN superior al equivalente de certeza, lo que hace que el problema a optimizar sea completamente plano y cualquier solución sea considerada como óptima.

Por otro lado, en el caso extremo de que el decisor sea muy arriesgado, la solución óptima que proporciona el algoritmo, es la misma que la que se obtendría con el planteamiento determinista, considerando únicamente el *escenario 2* (representada en la Figura 18), ya que ésta obtiene la configuración que maximiza el VAN para

dicho escenario, sin tener en consideración el valor medio esperado del planteamiento en ambiente de riesgo.

Tabla 7 Resultados del caso 1 variando ρ . (Criterio de máxima utilidad esperada).

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	VME
$\rho=0.002$	(*)	(*)	(*)	(*)
$\rho=0.005$	21101043 €	21101043 €	21101043 €	21101043 €
$\rho=0.1$	21101043 €	21101043 €	21101043 €	21101043 €
$\rho=\infty$	21101043 €	21101043 €	21101043 €	21101043 €
$\rho=-0.1$	20812709 €	21185396 €	18203901 €	20533193 €
$\rho=-0.005$	20694837 €	21202182 €	17143417 €	20314327 €
$\rho=-0.002$	20429441 €	21221749 €	14883283 €	19835209 €

(*) Cualquier valor superior al mínimo que aceptaría el decisor para afrontar el proyecto (10^7 €)

En la Figura 17 pueden observarse las cuatro configuraciones óptimas obtenidas al variar el parámetro de preferencia por el riesgo.

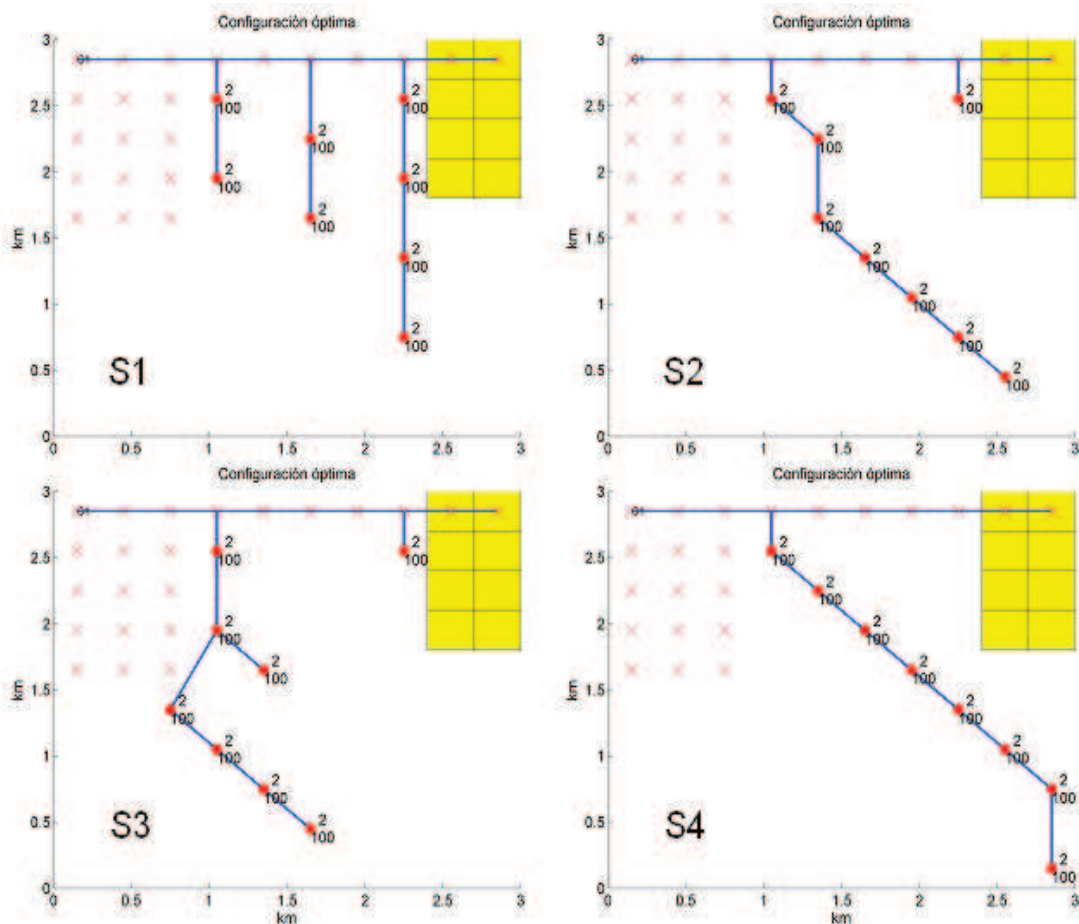


Figura 17 Configuraciones óptimas según el parámetro de preferencia por el riesgo. S1 ($\rho=\infty$), S2 ($\rho=-0.1$), S3 ($\rho=-0.005$) y S4 ($\rho=-0.002$).

5.1.3 Planteamiento determinista

A continuación se muestra la solución obtenida por el algoritmo de optimización, considerando que se presenta el *escenario 2* (que es el que tiene mayor probabilidad de ocurrencia).

Para dicha situación el algoritmo obtiene la configuración óptima es la representada en la Figura 18.

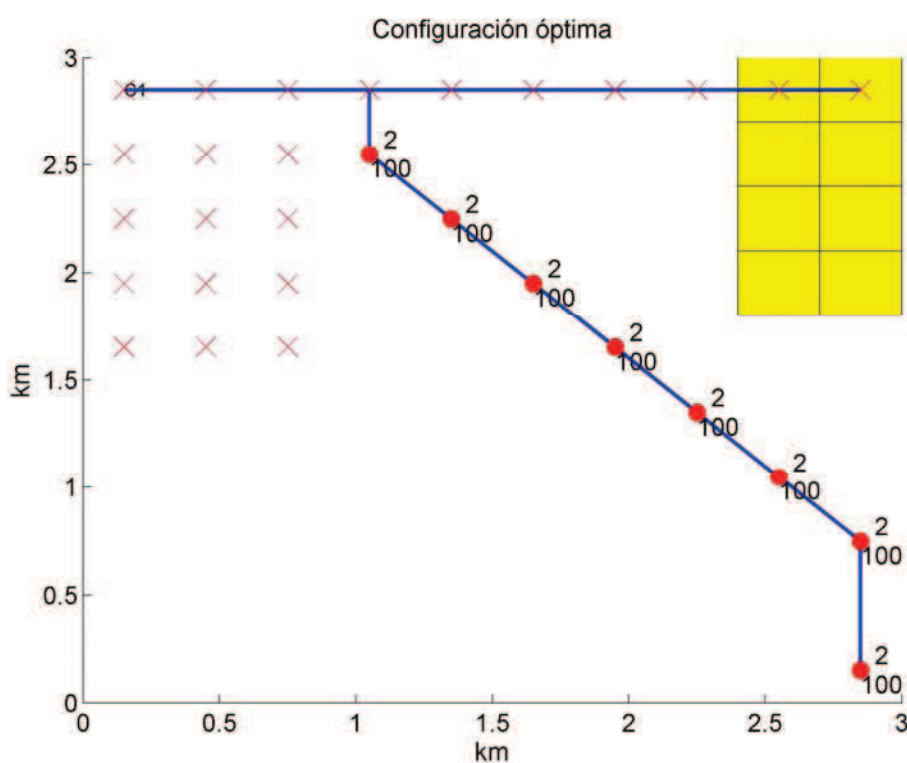


Figura 18 Solución óptima para el planteamiento determinista.

En la Tabla 8 pueden observarse los principales resultados económicos obtenidos para la configuración óptima del planteamiento determinista.

Tabla 8 Principales resultados económicos para el planteamiento determinista.

VME del VAN	21221749 €
Inversión total	19671294 €
Inversión en turbinas	17200000 €
Inversión en obra civil	1235647 €
Potencia Media	4044 kW

En la Tabla 9 se muestran los valores del VAN (en Euros) que se alcanzarían con cada uno de los escenarios, para la solución obtenida mediante el análisis de riesgos, utilizando el criterio de máxima utilidad esperada, con actitud de aversión al riesgo, así como para la solución al problema determinista (considerando el *escenario 2*).

Tabla 9 Comparación de los resultados para los planteamientos determinista y análisis de riesgos.

	<i>Escenario 1</i>	<i>Escenario 2</i>	<i>Escenario 3</i>	VME
Análisis de riesgos	21101043 €	21101043 €	21101043 €	21101043 €
Planteamiento determinista	20429441 €	21221749 €	14883283 €	19835209 €

El mayor VAN se logra para el planteamiento determinista y el Escenario 2. Puede observarse que, si se implantase la configuración calculada mediante este planteamiento, los valores del VAN que se obtendrían si aconteciesen los escenarios 1 ó 3 serían sensiblemente inferiores, a los que se lograrían para la configuración determinada mediante análisis de riesgos. Siendo esta distribución, más insensible a la presentación de los distintos escenarios posibles.

Por último, en la Tabla 10 se muestra la utilidad esperada para las dos soluciones, tomando como referencia para su cálculo los siguientes valores:

1. Utilidad nula para el mínimo valor del VAN que el inversor estaría dispuesto a aceptar para acometer el proyecto, en este caso se tomará 10^7 €.
2. Utilidad unitaria para el máximo valor de VAN de la Tabla 9, 21221749 €.

Tabla 10 Comparación de la utilidad para la soluciones determinista y con análisis de riesgos.

	$\rho = -0.002$	$\rho = 0.002$
Solución con análisis de riesgos	0.0582	0.9892
Solución determinista	0.6500	0.8764

Puede observarse como la solución determinista tiene mayor utilidad cuando la actitud del decisor es preferente por el riesgo, ya que es esta solución, la que permitiría obtener mayor rentabilidad en el caso de que el escenario 2 tuviese una ocurrencia mayor que su probabilidad asignada.

5.2 Caso 2

En este caso se repetirán las condiciones planteadas en el ensayo anterior, con la salvedad de que se supondrán conocidas con certeza, la probabilidad de que el viento proceda de cada una de las direcciones que constituyen la rosa de los vientos. En cambio, se supondrá que los valores del factor de escala de la distribución de Weibull pueden tomar valores distintos, pero iguales para todas las

celdas y direcciones de la rosa de los vientos, cada uno de los cuales tiene asignada una probabilidad, tal como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11 Escenarios y probabilidades para el ensayo 2.

	<i>Escenario 1</i>	<i>Escenario 2</i>	<i>Escenario 3</i>
Factor de escala (C)	5.5	6,5	7.5
Probabilidad (%)	30	55	15

La probabilidad de procedencia del viento de cada una de las direcciones es mostrada en la Tabla 12.

Tabla 12 Probabilidad de procedencia del viento para cada dirección de la rosa de los vientos.

Dirección	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO
Probabilidad	0	0	20	70	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

En la Figura 19 se puede observar las distribuciones de probabilidad de la velocidad del viento para cada uno de los escenarios a considerar en este caso.

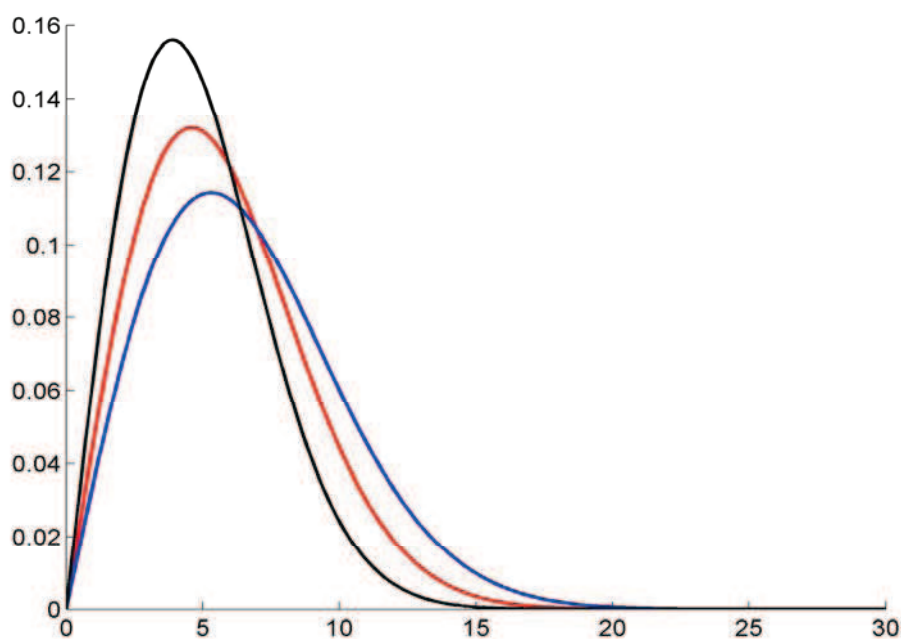


Figura 19 Distribuciones de probabilidad de la velocidad del viento para los tres escenarios considerados.

5.2.1 Criterio de máximo valor esperado.

El algoritmo determina la solución óptima después de 150 generaciones. El valor esperado del VAN asociado a dicha solución es de 18738890 €. La configuración óptima se representa en la Figura 20. De nuevo, todos los aerogeneradores seleccionados son de ‘tipo 2’ y con una altura de la torre de 100 m, siete de ellos se sitúan formando dos diagonales, separadas para atenuar lo máximo posible el efecto de reducción de energía, producido por las estelas de un octavo aerogenerador que se posiciona contiguo al camino principal.

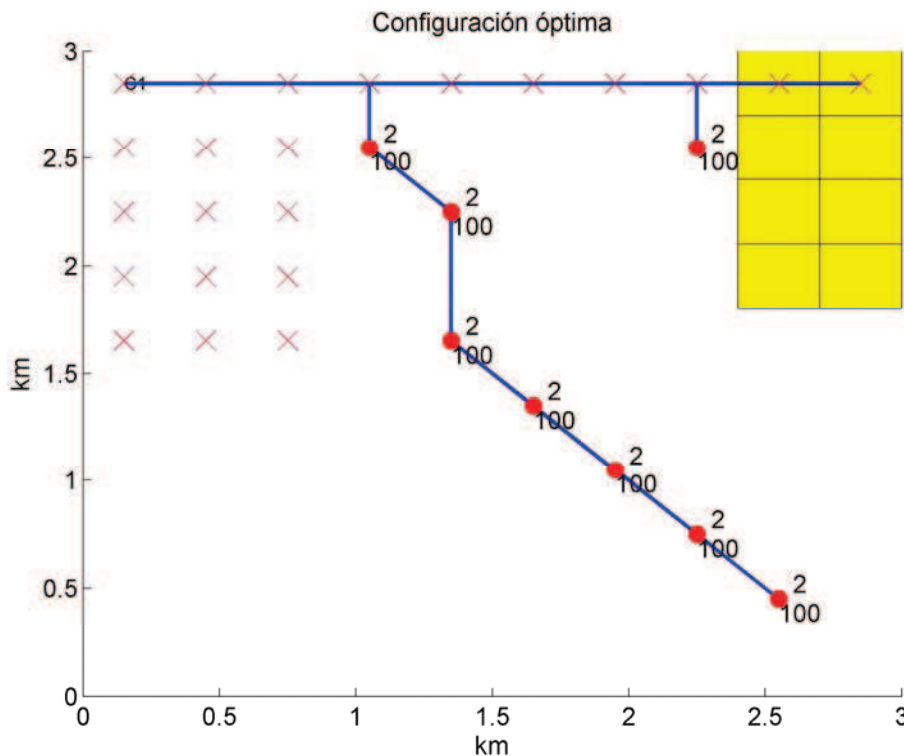


Figura 20 Configuración óptima del caso 2 (Criterio de máximo valor esperado).

En la Tabla 13 se muestran los resultados económicos más relevantes.

Tabla 13 Principales resultados económicos para el planteamiento determinista.

VME del VAN	19202768 €
Inversión total	19651411 €
Inversión en turbinas	17200000 €
Inversión en obra civil	1225706 €
VME de la Potencia Media	3842 kW

5.2.2 Criterio de máxima utilidad esperada.

Repitiendo el caso para el criterio de máxima utilidad esperada se obtienen distintas disposiciones del parque eólico al variar la preferencia por el riesgo del decisor, el VAN (en Euros) asociado a cada una de las soluciones se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14 Resultados del ensayo 2 variando ρ . (Criterio de máxima utilidad esperada).

	<i>Escenario 1</i>	<i>Escenario 2</i>	<i>Escenario 3</i>	<i>Valor Medio Esperado</i>
$\rho=0.1$	7589919 €	21241632 €	34952629 €	19202768 €
$\rho=\infty$	7589919 €	21241632 €	34952629 €	19202768 €
$\rho=-0.1$	7454175 €	21210176 €	35001515 €	19152077 €
$\rho=-0.005$	7434783 €	21205682 €	35008498 €	19144835 €

La solución correspondiente a actitudes aversivas al riesgo ($\rho > 0$) coincide con la calculada mediante el criterio de máximo valor esperado (19,203 M€), mientras que al aumentar la preferencia por el riesgo, la configuración tiende disminuir el valor esperado con el propósito de aumentar el rendimiento de la inversión, en el caso de que el escenario 3 tenga una ocurrencia superior a su probabilidad asignada. A pesar de ser el escenario con menor probabilidad, el decisor arriesga para tener la posibilidad de obtener una rentabilidad superior al valor máximo esperado.

La configuración óptima tomando el parámetro de preferencia por el riesgo ($\rho = -0.005$) es la mostrada en la Figura 21. En ella puede observarse como la disposición geográfica de los turbinas coincide con la obtenida por el criterio de máximo valor esperado (Figura 20), con la salvedad de que en este caso los aerogeneradores seleccionados son de ‘tipo 1’, con una altura de torre de 100 m. Esto se debe a que para el escenario 3, este modelo de turbina suministra mayor cantidad de energía anual, resultando más rentables, a pesar de tener un coste de inversión superior a los aerogeneradores de ‘tipo 2’.

Para el valor del parámetro de preferencia por el riesgo, $\rho = -0.1$ se obtiene una solución intermedia en la que la disposición geográfica vuelve a ser idéntica, la diferencia en este caso es que siete de los aerogeneradores son de ‘tipo 1’ y uno de ellos es de ‘tipo 2’, con lo cual se consigue una configuración menos arriesgada (ver Figura 22).

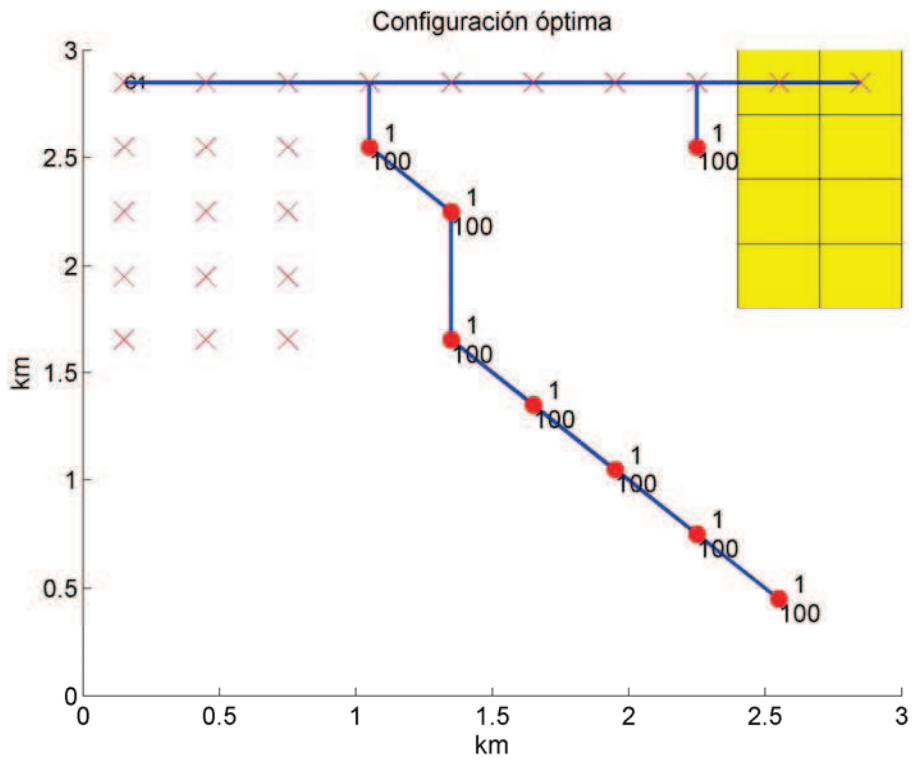


Figura 21 Configuración óptima para $\rho = -0.005$.

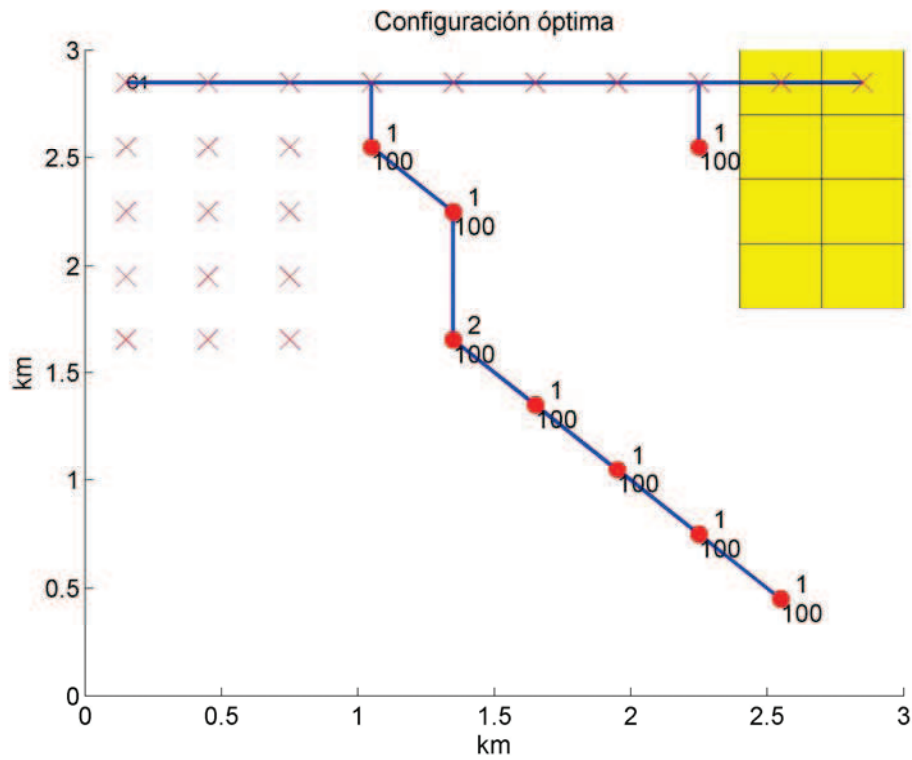


Figura 22 Configuración óptima para $\rho = -0.1$.

5.3 Caso 3

El caso 3 se realiza sobre las mismas condiciones detalladas en el caso 1, añadiendo la incertidumbre en el parámetro de escala de la distribución de Weibull, que toma los valores y probabilidades especificados en el caso 2. De esta manera, combinando la incertidumbre en la dirección y velocidad del viento se generan los nueve escenarios mostrados en la Tabla 15.

Tabla 15 Escenarios y probabilidades para el Caso 3.

Escenario	Probabilidad (%)	Factor de escala C (m/s)	Direcciones (probabilidad %)		
			ENE (20%)	E (70%)	ESE (10%)
1	2,25	7,5	ENE (20%)	E (70%)	ESE (10%)
2	8,25	6,5	ENE (20%)	E (70%)	ESE (10%)
3	4,50	5,5	ENE (20%)	E (70%)	ESE (10%)
4	9,75	7,5	NE (20%)	ENE (70%)	E (10%)
5	35,75	6,5	NE (20%)	ENE (70%)	E (10%)
6	19,50	5,5	NE (20%)	ENE (70%)	E (10%)
7	3,00	7,5	E (20%)	ESE (70%)	SE (10%)
8	11,00	6,5	E (20%)	ESE (70%)	SE (10%)
9	6,00	5,5	E (20%)	ESE (70%)	SE (10%)

5.3.1 Criterio de máximo valor esperado.

En la Figura 23 se muestra la solución alcanzada por el algoritmo, considerando el criterio máxima utilidad esperada. Dicha solución está constituida por tres filas de aerogeneradores disponiéndose en formación de tresbolillo.

En la Tabla 16 se muestran los resultados económicos más relevantes obtenidos para esta configuración.

Tabla 16 Principales resultados económicos correspondiente al Caso 3 con el criterio del máximo valor esperado.

VME del VAN	19062178 €
Inversión total	19792000 €
Inversión en turbinas	17200000 €
Inversión en obra civil	1296000 €
VME de la Potencia Media	3842 kW

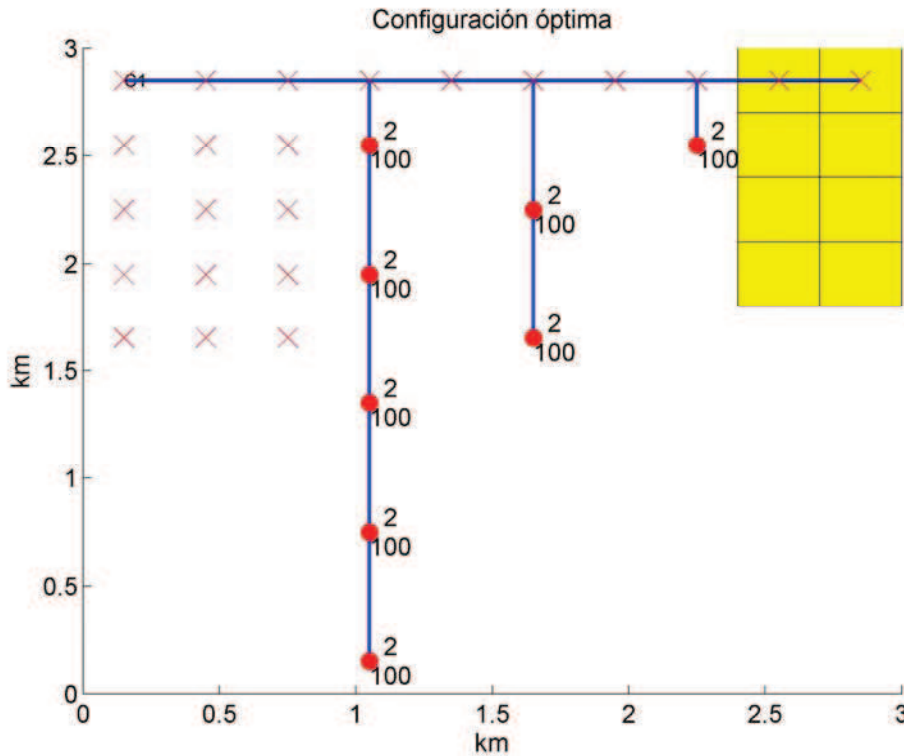


Figura 23 Configuración óptima del Caso 3 (Criterio de máximo valor esperado).

5.3.2 Criterio de máxima utilidad esperada.

A continuación, en la Tabla 17, se muestran los resultados logrados con el criterio de máxima utilidad esperada, variando la preferencia por el riesgo del decisor.

Tabla 17 Resultados del Caso 2 variando la preferencia por el riesgo del decisor.

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	VME
$\rho = 0,1$	34,812	21,101	7,449	34,812	21,101	7,449	34,812	21,101	7,449	19,062
$\rho = \infty$	34,812	21,101	7,449	34,812	21,101	7,449	34,812	21,101	7,449	19,062
$\rho = -0,1$	34,868	21,065	7,294	34,868	21,065	7,294	34,868	21,065	7,294	19,004
$\rho = -0,03$	34,260	20,558	6,941	35,009	21,206	7,435	29,022	16,022	3,492	18,066

Cada columna representa el VAN, en millones de euros, que se obtendría para cada escenario. La última columna muestra el valor medio esperado que corresponde a la configuración óptima, según el nivel de riesgo del decisor esta dispuesto a asumir.

De nuevo, puede observarse como la solución alcanzada para actitudes neutrales y aversivas al riesgo ($\rho \geq 0$), es la misma que con el criterio de valor máximo esperado. La solución es distinta para actitudes preferentes por el riesgo ($\rho < 0$), en las que el decisor arriesga para tener la posibilidad de aumentar la rentabilidad

por encima del valor medio esperado. Por ello, aumenta la rentabilidad para el *escenario 4*, ya que junto con el *escenario 1*, son los que mayor VAN reportarían, a pesar de no ser los que mayor probabilidad de ocurrencia tienen. Es precisamente la mayor probabilidad asignada al *escenario 4* (en comparación con la del *escenario 1*), la que hace que el algoritmo se decante por aumentar la rentabilidad de dicho escenario en detrimento del primero.

En la Figura 24 y Figura 25 se muestran las soluciones obtenidas para los niveles de preferencia por el riesgo $\rho = -0,1$ y $\rho = -0,03$ respectivamente.

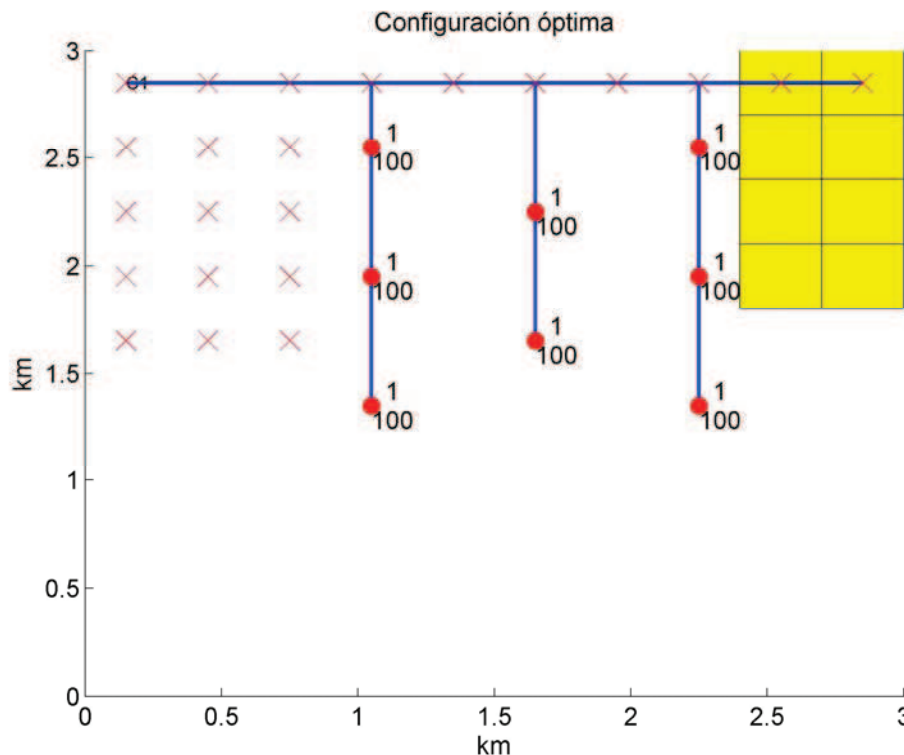


Figura 24 Configuración óptima. Criterio máxima utilidad esperada ($\rho = -0,1$).

Como puede apreciarse en ambas figuras, al aumentar la preferencia por el riesgo del decisor las turbinas seleccionadas son de 'tipo 1', ya que tienen la capacidad de proporcionar mayor potencia, a pesar de requerir una mayor inversión inicial. Puede observarse también cómo al aumentar el riesgo, incrementando ρ de $-0,1$ a $-0,03$, la solución óptima pasa a ser la misma que la obtenida para la situación más arriesgada del caso 2 (ver Figura 22), ya que las condiciones de dicho ensayo coinciden con el *escenario 4* de este caso.

