

# 1 Introducción

El uso de la energía eólica para la producción de energía eléctrica es una tecnología prometedora y, a la vez, madura que cada vez adquiere mayor importancia dentro del escenario de generación de energía eléctrica en los países occidentales. Esto es especialmente válido para el escenario energético español dominado por las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles.

Hoy día, el interés por un recurso energético renovable, como es el caso de la energía eólica, tiene fundamentalmente un doble soporte. Por un lado, están los aspectos económicos y políticos, como pueden ser la tendencia alcista en los precios de los combustibles fósiles y la inseguridad de abastecimiento. Por otro, están aspectos sociales y medioambientales, consecuencia de la cada vez más creciente concienciación social por los efectos nocivos de la emisión de gases de efecto invernadero que, entre otras cosas, está produciendo el cambio climático a nivel planetario.

De entre todas las energías renovables, a día de hoy, la energía eólica es la que ha alcanzado mayor grado de desarrollo y madurez tecnológica. Como muestra, la potencia eólica instalada en el mundo a principios de 2009 asciende a un total de 121.19 GW, de los que 66.16 GW corresponden a Europa y, de estos, 16.74 GW, a España. La tasa de crecimiento de la potencia total instalada en el mundo ha sido de un 29% en el año 2008, tendencia que se ha mantenido en valores similares durante la última década y que nada hace prever que no siga manteniéndose en los años venideros.

El diseño de una instalación eólica destinada a la generación de energía eléctrica y su correcta explotación, a lo largo de la vida útil de la instalación, es una tarea compleja y multidisciplinar en la que intervienen desde las más diversas áreas de la ingeniería hasta aspectos relacionados con otras ciencias más o menos limítrofes, como pueden ser la meteorología, la economía o el derecho. En la tarea inicial de identificación de un lugar adecuado para instalar una central eólica o parque eólico hay que considerar tres factores clave:

- 1) *Disponibilidad de viento.* Promedio anual de velocidad de viento elevado, que garantice una cierta cantidad de energía generada y un bajo nivel de turbulencias, que atenuará la incidencia de problemas graves de rotura asociados a mayor fatiga mecánica de los componentes.
- 2) *Disponibilidad y acceso a la red de transporte y distribución de energía eléctrica.* Es necesario disponer de una línea eléctrica próxima, con suficiente capacidad de transporte disponible para la evacuación de la energía producida.
- 3) *Disponibilidad y acceso al terreno.* Debe haber espacio suficiente para instalar los aerogeneradores y buen acceso por carretera para los vehículos de transporte pesado que deberán transportar al lugar los componentes de las turbinas (palas, secciones de las torres, etcétera). No debe haber impedimentos de tipo social, de protección ecológica o de cualquier tipo,

ya que podrían dificultar, demorar o incluso impedir la obtención de los permisos administrativos pertinentes.

Estos tres factores son los más importantes, pero no los únicos a considerar. También es necesario que el terreno tenga una elevada capacidad portante, baja actividad kerámica, que la zona no sea propensa a la presencia de huracanes u otras catástrofes naturales.

Cuando un inversor toma la decisión de afrontar la construcción y posterior explotación de un parque eólico, no son pocas las dificultades a las que debe hacer frente. No es únicamente una empresa muy compleja, desde un punto de vista tecnológico, sino que también presenta un grado de incertidumbre, bastante mayor de lo que sería deseable, en cuanto al retorno o la rentabilidad que obtendrá de su explotación durante el periodo de vida útil. Son muchos los factores que influyen en la incertidumbre de la rentabilidad del parque, de entre los que cabe destacar los que se enumeran a continuación:

- *El comportamiento aleatorio del viento.* En el caso de un parque eólico, el viento es la fuente de energía primaria y, por tanto, resulta crucial tener el mayor conocimiento posible sobre su comportamiento, para poder evaluar con la mayor certeza posible la generación anual de energía, cuya venta constituye la principal fuente de ingresos que reportará el parque.
- *El precio de la energía.* Para poder estimar el retorno por la venta de la energía eléctrica producida es preciso conocer su precio de venta lo largo de toda la vida útil en servicio del parque. El comportamiento futuro de los precios es, obviamente desconocido, como desconocida es también la evolución la tasa de actualización del dinero, que va a intervenir en la actualización de estos ingresos.
- *Estimación de costes.* Es necesario conocer los costes de distintos factores que influyen en el normal desarrollo del proyecto, especialmente durante sus fases de construcción y explotación (costes de construcción de la obra civil, plazos de ejecución, averías, cambios legislativos, etcétera), pero también en su fase final de desmantelamiento.

El correcto posicionamiento de cada una de las turbinas dentro de un parque eólico es uno de los factores que más incidencia tiene en la rentabilidad de la instalación a lo largo de todo su ciclo de vida útil en explotación. Cuando un inversor toma la decisión de acometer un proyecto de este tipo debe tener en cuenta dos cuestiones básicas. Por un lado, las condiciones meteorológicas del emplazamiento, especialmente en lo que se refiere al viento y, por otro lado, las curvas de potencia (potencia-velocidad) de los aerogeneradores utilizados, lo que le permitirá hacer una evaluación muy preliminar del potencial de energía extraíble del emplazamiento analizado. Sin embargo, en la práctica la energía eléctrica realmente generada se verá reducida por toda una serie de factores, de entre los que cabe destacar los siguientes [1]:

- *Pérdidas en la red de distribución.* Típicamente están comprendidas entre el 1 y 3% de la energía teórica que se obtendría considerando únicamente las curvas de potencia de los aerogeneradores.
- *Suciedad de las palas.* La suciedad adherida a la superficie de la palas deteriora su aerodinámica, lo que repercute negativamente en su

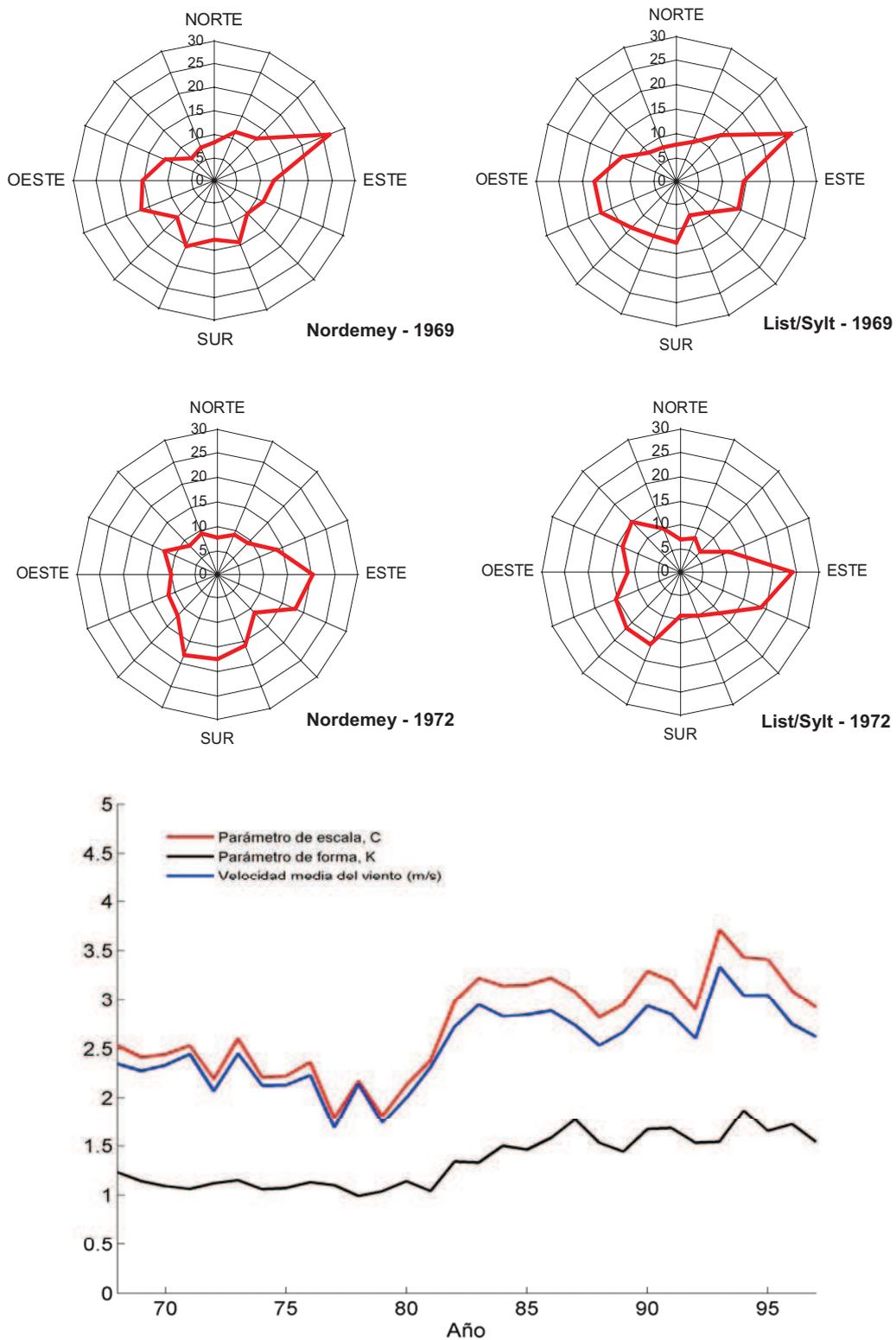
funcionamiento. Esto hace que cuando las palas no están perfectamente limpias, el rendimiento de la turbina se deteriora entre un 1 y un 2%.

- *Indisponibilidad de los aerogeneradores (averías/mantenimiento)*. En general, las turbinas modernas tienen una fiabilidad bastante elevada, en torno a un 98%, lo que significa que las pérdidas de producción debidas a este concepto son de un 2%, aproximadamente.
- *Pérdidas por cambios bruscos en la dirección del viento*. Cuando se produce un cambio repentino en la dirección del viento es necesario reorientar el eje de la turbina, para que la corriente de aire incida normalmente a la superficie rotórica. Dado que este ajuste no puede hacerse de forma instantánea, se producen unas pérdidas que, generalmente, son muy reducidas, en torno a un 1%.
- *Pérdidas debidas al efecto de las estelas*. Estas pérdidas se producen por el efecto de apantallamiento que produce el rotor de un aerogenerador sobre otro situado a sotavento (aguas abajo en la dirección del viento). Esto hace que la turbina situada en la estela de la primera producirá menor cantidad de energía que si la turbina estuviese expuesta al flujo libre de la corriente de aire. Estas pérdidas típicamente toman un valor entre un 5% - 10%.

De los factores citados, únicamente el último es en cierta medida controlable, ya que depende de la ubicación geográfica de las turbinas. Además es el factor que mayores pérdidas produce con respecto al potencial de producción teórico. Sería posible reducir el efecto de la estelas separando los aerogeneradores tanto como fuese posible, pero este planteamiento supone, por el contrario un aumento de la extensión de terreno necesaria, aumentando también la distancia total de los caminos de acceso, así como de la longitud de los conductores, lo que haría incurrir al inversor en mayores costes de inversión y produciría mayores pérdidas en la instalación eléctrica interior del parque.

Por tanto, es fundamental analizar detalladamente la rentabilidad del proyecto teniendo en cuenta la posición de los aerogeneradores, de tal manera, que la suma de los costes de inversión (en caminos auxiliares e instalación eléctrica) y de las pérdidas (debidas al efecto de las estelas y al calentamiento de los conductores por efecto Joule) sea mínima.

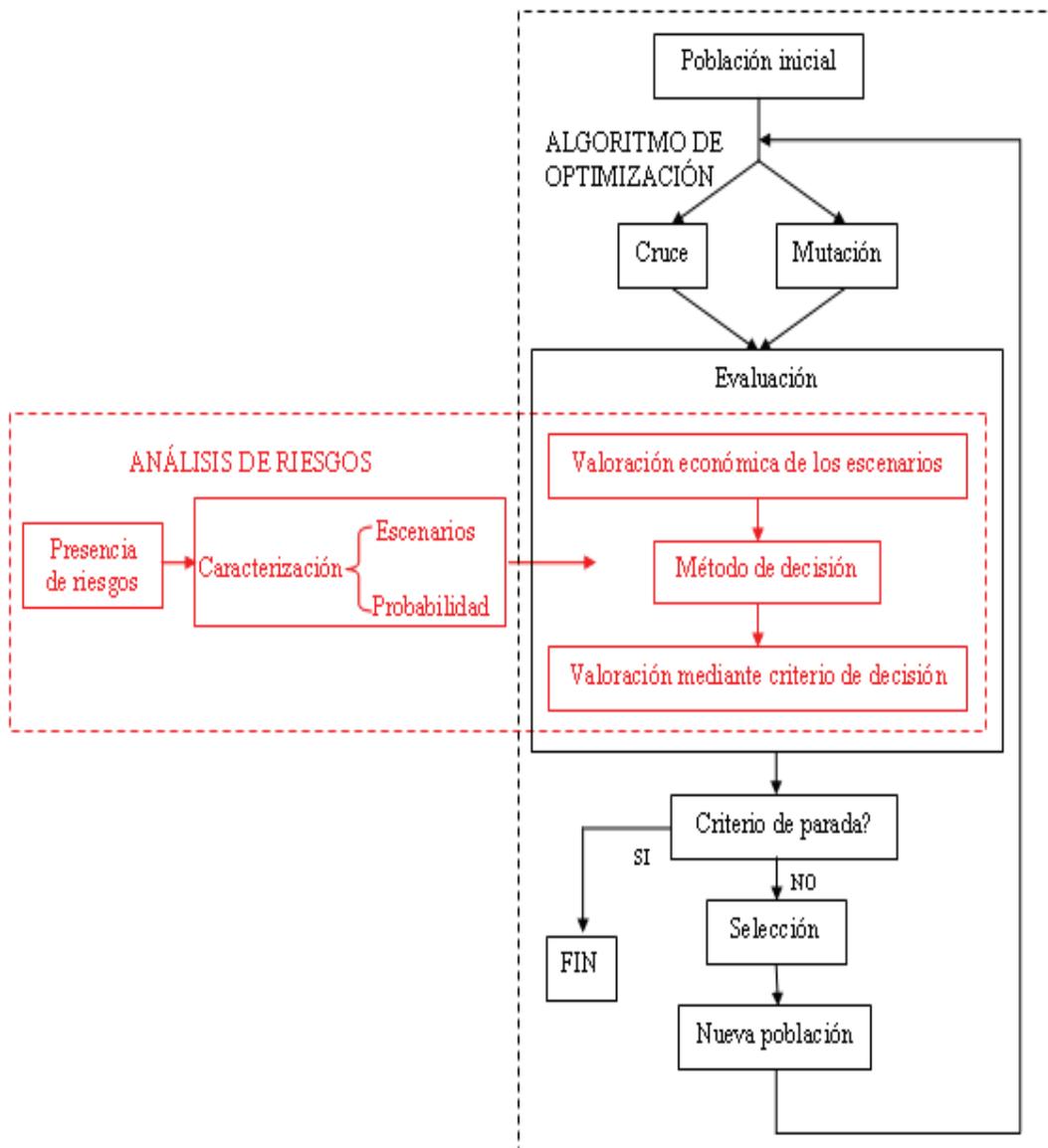
Para realizar dicha tarea se tendrá en cuenta la rosa de los vientos caracterizada mediante el estudio meteorológico del emplazamiento, así como la probabilidad de que se produzcan alteraciones sobre dicha caracterización, una vez el proyecto esté en fase de explotación. En la Figura 1a se muestra, a modo de ejemplo, los cambios en la rosa de los vientos en el mismo emplazamiento, Norderney y List/Sylt (Alemania), medida en los años 1969 y 1972 [2]. La Figura 1b muestra las variaciones en la velocidad del viento caracterizadas mediante los parámetros de escala,  $C$ , y de forma,  $K$ , de la distribución de Weibull observados durante 30 años en el mismo emplazamiento, Hong Kong [3]. Puede observarse como las direcciones predominantes del viento y las intensidades pueden variar sustancialmente a lo largo del tiempo.



**Figura 1. a)** Ejemplo de variación anual en la rosa de los vientos. Rosa de los vientos de Norderney y List/Sylt (Alemania) correspondientes a los años 1969 y 1972. **b)** Variación de la velocidad media del viento en Hong Kong desde el año 1968 hasta 1997.

Para tratar de acotar este tipo de efectos adversos en la rentabilidad esperada de la instalación, en este trabajo se analizará detalladamente el posicionamiento de las turbinas teniendo en cuenta la incertidumbre existente en la caracterización estadística del viento, es decir, considerando incertidumbre tanto en la intensidad (velocidad) del viento como en su dirección. El objetivo es determinar la configuración óptima del parque, de tal forma que la incertidumbre en la rentabilidad se ajuste al nivel de riesgo que el inversor esté dispuesto a asumir.

Por otro lado, el estudio permitirá poner en conocimiento del inversor las cotas máximas y mínimas de rentabilidad del proyecto, lo cual resulta fundamental en la decisión del inversor de acometer o no el proyecto.



**Figura 2** Diagrama de flujos del algoritmo implementado en este proyecto.

En la Figura 2 se muestra de forma esquemática el procedimiento adoptado en este trabajo para la optimización de parque eólicos en presencia de riesgo.

Para realizar el estudio de riesgos, se recurrirá a la teoría de toma de decisiones cuyo fundamento se detallará en el primer capítulo de este trabajo. Los métodos de decisión permiten analizar y comparar el comportamiento de las posibles soluciones en ambiente de riesgo, atendiendo a un determinado criterio, que en este trabajo será la rentabilidad del proyecto caracterizada mediante el Valor Actual Neto (VAN). Para estimar dicha rentabilidad es necesario definir el modelo del parque eólico [4], así como la caracterización estadística del viento y su modelo de comportamiento, tal y como se detallará en el tercer capítulo. Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo es obtener la configuración óptima del parque. El método de optimización implementado para ello, será un algoritmo evolutivo [5] que se detallará en el cuarto capítulo. Por último, el quinto capítulo se analizarán una serie de casos, en los que se mostrará la capacidad de los métodos desarrollados en este trabajo, así como las ventajas que éstos suponen frente al planteamiento determinista [6].

## 1.1 Riesgo e incertidumbre

Los riesgos en un proyecto son eventos que, de producirse, causan cambios inesperados en el coste, la programación o el comportamiento técnico [7] de la instalación o dispositivo proyectado. De esta manera, la aparición de un riesgo tiene un efecto negativo sobre el proyecto. Los riesgos pueden ser caracterizados mediante (cuantificados en) dos aspectos:

- *Probabilidad.* Los riesgos son sucesos estadísticos a los que se les puede asignar una probabilidad de que se produzcan.
- *Impacto.* Todo riesgo produce un impacto económico sobre el proyecto que será necesario evaluar.

La incertidumbre es la probabilidad de que se produzcan sucesos que afecten al resultado, ya sea de forma positiva o negativa. Es preciso analizar la incertidumbre con el propósito de poder hacer una correcta evaluación del riesgo. En un proyecto, este análisis debe estar focalizado a la medida del riesgo de que no se cumplan con los objetivos establecidos.

El objetivo del análisis de riesgos es identificar con suficiente antelación y haciendo uso de toda la información disponible, los riesgos que pueden aparecer en un proyecto, evaluando las posibles consecuencias. Esta evaluación debería permitir la adopción de las medidas correctoras pertinentes para que la repercusión sobre la rentabilidad del proyecto durante su ciclo de vida, sea lo menor posible.

En términos generales, el proceso de análisis de riesgos [8] puede ser caracterizado mediante los pasos que se enumeran a continuación (Figura 3):

1. *Identificación de riesgos.* El objetivo de esta etapa es la de detectar, con suficiente antelación, aquellos posibles sucesos que puedan tener consecuencias negativas sobre el proyecto.

2. *Evaluación del impacto de los riesgos.* En este paso se pretende cuantificar cuales serán los efectos sobre el proyecto que tendría la aparición de cada uno de los posibles riesgos. Esta evaluación tendrá como objetivo también la determinación de la probabilidad de aparición que tiene cada uno de los riesgos. Esta tarea implica a menudo el empleo de técnicas subjetivas de asignación de probabilidad, en particular cuando no es posible evaluar la probabilidad mediante métodos objetivos o cuantitativos, como podría ser el modelado y la simulación del proyecto.
3. *Priorización de riesgos.* Una vez identificados el conjunto de riesgos y sus potenciales impactos sobre el proyecto, así como la probabilidad de ocurrencia de cada uno de ellos, es necesario evaluar cuales de ellos pueden tener un impacto más crítico sobre el normal desarrollo del proyecto.
4. *Planificación de la mitigación de riesgos.* Por último, una vez conocidos aquellos riesgos cuyas consecuencias sobre el proyecto son más críticas, es necesario realizar un plan con el propósito de eliminar o atenuar, en la medida de lo posible, el riesgo hasta un nivel aceptable.



**Figura 3** Proceso del análisis de riesgos.

