

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales  
Intensificación Eléctrica

Diseño de una herramienta de ayuda a la evaluación  
del impacto acústico de parques eólicos

Autor: José Miguel Riquelme Domínguez

Tutores: Manuel Burgos Payán, Jesús M. Riquelme Santos

Dep. Ingeniería Eléctrica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

# **Diseño de una herramienta de ayuda a la evaluación del impacto acústico de parques eólicos**

Autor:

José Miguel Riquelme Domínguez

Tutores:

Manuel Burgos Payán

Profesor titular de la Universidad de Sevilla

Jesús M. Riquelme Santos

Catedrático de la Universidad de Sevilla

Dep. Ingeniería Eléctrica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015



Trabajo Fin de Grado: Diseño de una herramienta de ayuda a la evaluación del impacto acústico de parques eólicos

Autor: José Miguel Riquelme Domínguez

Tutores: Manuel Burgos Payán, Jesús M. Riquelme Santos

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal

# Índice

## **Objetivo**

## **Introducción**

<b>1. Capítulo 1. Ruido.....</b>	<b>13</b>
1.1 Norma ISO 9613-2	
1.2 Frecuencia del sonido	
1.2.1 Ponderación	
1.3 Definiciones	
1.3.1 Ecuaciones básicas	
1.3.2 Cálculo de los términos de atenuación	
1.4 Exactitud y limitaciones del método	
1.5 Legislación actual	
<b>2. Capítulo 2. Generación.....</b>	<b>25</b>
2.1 Distribución de Weibull	
2.2 Ley de Prandtl	
2.3 Límite de Betz	
2.4 Curva de potencia de un aerogenerador	
2.5 Efecto estela	
2.5.1 Influencia de varios aerogeneradores aguas arriba	
<b>3. Capítulo 3. Metodología.....</b>	<b>39</b>
3.1 Algoritmos de optimización	
3.1.1 Técnicas metaheurísticas de optimización	
3.2 Evaluación económica de un parque eólico	
3.3 Metodología propuesta	
3.4 Presentación del programa	
3.4.1 Algoritmo principal	
3.4.2 Modificaciones realizadas en el algoritmo principal	
3.4.3 Codificación del individuo	
3.4.4 Operador selección	
3.4.5 Operador de cruce	
3.4.6 Operador de mutación	
3.4.7 Restricciones gestionadas por el algoritmo principal	
3.5 Algoritmo secundario: diseño de la instalación eléctrica	

<b>4. Capítulo 4. Funcional del programa.....</b>	<b>55</b>
4.1 La aplicación Matlab	
4.2 Datos de entrada al programa	
4.3 Finalidad de la herramienta de planificación	
4.4 Modos de ejecución del programa	
4.4.1 Modo de ejecución 1	
4.4.2 Modo de ejecución 2	
4.4.3 Modo de ejecución 3	
4.5 Introducción de los datos de entrada	
<b>5. Capítulo 5. Protocolo de ensayos.....</b>	<b>69</b>
5.1 Ensayo 1	
5.1.1 Ensayo 1 sin limitaciones de ruido	
5.1.2 Ensayo 1 con imitaciones de ruido	
5.2 Ensayo 2	
5.2.1 Ensayo 2a	
5.2.2 Ensayo 2b	
5.3 Ensayo 3	
5.3.1 Ensayo 3a	
5.3.2 Ensayo 3b	
5.4 Ensayo 4	
5.5 Ensayo 5	
5.5.1 Ensayo 5a	
5.5.2 Ensayo 5b	
<b>6. Capítulo 6. Conclusiones y líneas futuras.....</b>	<b>105</b>

# Índice de figuras

*Figura 1. Consumo global de energía primaria en las últimas décadas, expresado en MTep*

*Figura 2. Evolución de la potencia eólica instalada a nivel mundial*

*Figura 3. Diseño de un parque eólico obtenido mediante un experto (izquierda) y mediante un método de optimización (derecha).*

*Figura 4. Esquema de relaciones existentes entre los distintos módulos del problema de optimización*

*Figura 5. Tres distintas regiones para la determinación del efecto del suelo*

*Figura 6. Resumen de los límites de ruido impuestos por los países en estudio*

*Figura 7. Ejemplo de dos distribuciones de Weibull con un mismo parámetro de escala y dos parámetros de forma diferentes*

*Figura 8. Ejemplo de la variación de la velocidad del viento conforme aumenta la altura respecto al suelo*

*Figura 9. Modelo del disco actuante*

*Figura 10. Curva de potencia/velocidad de un aerogenerador*

*Figura 11. Interacción de la estela con el flujo de viento del ambiente*

*Figura 12. Representación de la estela de un aerogenerador*

*Figura 13. Ejemplo de curva coeficiente de empuje/velocidad*

*Figura 14. Ejemplo de solape parcial entre la estela de un aerogenerador y el rotor del aerogenerador situado aguas abajo.*

*Figura 15. Esquema de las distancias axiales y transversales entre dos aerogeneradores*

*Figura 16. Influencia de varios aerogeneradores aguas arriba*

*Figura 17. Clasificación de los algoritmos de optimización*

*Figura 18. Mapa de ruido del aerogenerador (4,3)*

*Figura 19. Mapa de ruido del aerogenerador (5,5)*

*Figura 20. Mapa de ruido total*

*Figura 21. Ejemplo de selección mediante el método de la ruleta*

*Figura 22. Datos generales de la hoja datos*



*Figura 23. Parámetros del problema de posicionamiento de la hoja datos*

*Figura 24. Parámetros del problema de conexionado de la hoja datos*

*Figura 25. Ejemplo de introducción de un camino principal*

*Figura 26. Datos a introducir sobre los aerogeneradores*

*Figura 27. Introducción de varios tipos de aerogeneradores en la hoja 'máquinas'*

*Figura 28. Ejemplo de la hoja 'restricciones\_ruido'*

*Figura 29. Localización del botón 'Guardar datos'*

*Figura 30. Ejecución del ensayo 1 sin restricciones de ruido*

*Figura 31. Disposición óptima y caminos de acceso del ensayo 1 sin restricciones de ruido*

*Figura 32. Disposición óptima 3D del ensayo 1 sin restricciones de ruido*

*Figura 33. Mapa de ruido del ensayo 1 sin restricciones de ruido*

*Figura 34. Datos económicos de la mejor solución del ensayo 1 sin restricciones de ruido*

*Figura 35. Restricciones de ruido del ensayo 1 con restricciones de ruido*

*Figura 36. Ejecución del ensayo 1 con restricciones de ruido*

*Figura 37. Disposición óptima y caminos de acceso del ensayo 1 con restricciones de ruido*

*Figura 38. Disposición óptima 3D del ensayo 1 con restricciones de ruido*

*Figura 39. Mapa de ruido del ensayo 1 con restricciones de ruido*

*Figura 40. Datos económicos del ensayo 1 con restricciones de ruido*

*Figura 41. Zonas prohibidas del ensayo 2a*

*Figura 42. Límites de ruido para el ensayo 2a*

*Figura 43. Ejecución del ensayo 2a*

*Figura 44. Disposición óptima y caminos de acceso del ensayo 2a*

*Figura 45. Disposición óptima 3D del ensayo 2a*

*Figura 46. Mapa de ruido del ensayo 2a*

*Figura 47. Datos económicos del ensayo 2a*

*Figura 48. Límite de ruido del ensayo 2b*

*Figura 49. Ejecución del ensayo 2b*

*Figura 50. Disposición óptima y caminos de acceso del ensayo 2b*

*Figura 51. Disposición óptima 3D del ensayo 2b*

*Figura 52. Mapa de ruido del ensayo 2b*

*Figura 53. Datos económicos del ensayo 2b*

*Figura 54. Valores de 'c' de la distribución de Weibull para el ensayo 3a*

*Figura 55. Ejecución del ensayo 3a*

*Figura 56. Caminos principales y de acceso del ensayo 3a*

*Figura 57. Disposición óptima 3D del ensayo 3a*

*Figura 58. Mapa de ruido del ensayo 3a*

*Figura 59. Datos económicos del ensayo 3a*

*Figura 60. Restricciones de ruido del ensayo 3b*

*Figura 61. Ejecución del ensayo 3b*

*Figura 62. Caminos principales y de acceso del ensayo 3b*

*Figura 63. Disposición 3D del ensayo 3b*

*Figura 64. Mapa de ruido del ensayo 3b*

*Figura 65. Datos económicos del ensayo 3b*

*Figura 66. Valores del parámetro C para el ensayo 4*

*Figura 67. Límites de ruido para el ensayo 4*

*Figura 68. Ejecución 10 del ensayo 4*

*Figura 69. Ejecución 5 del ensayo 4*

*Figura 70. Costes de media tensión para el ensayo 5*

*Figura 71. Costes de alta tensión para el ensayo 5*

*Figura 72. Coste de las subestaciones para el ensayo 5*

*Figura 73. Instalación eléctrica del ensayo 5a*

*Figura 74. Datos económicos del trazado eléctrico*

*Figura 75. Restricciones de ruido del ensayo 5b*

*Figura 76. Instalación eléctrica del ensayo 5b*

*Figura 77. Datos económicos del trazado eléctrico para el ensayo 5b*

# Índice de tablas

*Tabla 1. Distribución geográfica de la potencia eólica instalada, expresada en MW*

*Tabla 2. Comparación de la configuración realizada por un experto y mediante un método de optimización*

*Tabla 3. Coeficiente de absorción atmosférica para cada banda de octava*

*Tabla 4. Expresiones para calcular los valores de  $A_s$ ,  $A_r$  y  $A_m$*

*Tabla 5. Límites de ruido en los países especificados*

*Tabla 6. Clases y longitudes de rugosidad en función del tipo de paisaje*

*Tabla 7. Codificación de los individuos*

*Tabla 8. Resultados de las distintas ejecuciones realizadas para el ensayo 4*

# Resumen

El trabajo a realizar tiene como principal objetivo el diseño de una herramienta para la configuración de parques eólicos, de modo que maximice la producción de energía restringiendo los niveles de ruido emitidos. Para ello, se modificará una aplicación [1] creada anteriormente, de forma que permita alcanzar el propósito ya comentado.

El trabajo pone de manifiesto todos los conceptos necesarios para la percepción y el planteamiento del problema, para finalmente resolverlo. Así, esta memoria tiene la siguiente estructura:

- Capítulo 1: Ruido. Se aborda todo lo correspondiente al ruido en general, sus características, la propagación del sonido y la legislación actual que regula la contaminación acústica.
- Capítulo 2: Generación. Se hace un repaso de los conocimientos básicos acerca de la producción de energía eólica: curva de potencia, límite de Betz, ley de Prandtl, así como el efecto estela.
- Capítulo 3: Metodología. Se explica la forma en la que se va a resolver el problema, y de forma más concreta se estudian los algoritmos evolutivos. También se detallan tanto el algoritmo previo como las modificaciones realizadas al mismo.
- Capítulo 4: Funcional del programa. Se describen las entradas de datos al programa, las salidas, y todo lo referente a su correcta ejecución.
- Capítulo 5: Protocolo de ensayos. Finalmente se ejecuta el programa para una serie de situaciones distintas en las que se puede comprobar cómo trabaja el algoritmo realizado, para verificar su correcto funcionamiento.



# Introducción

Desde los orígenes de la humanidad, el progreso en búsqueda de una mayor prosperidad, ha estado inevitablemente ligado al uso de la energía. Durante el largo camino recorrido hasta el día de hoy, el hombre ha desarrollado la habilidad de explotar las más diversas fuentes de energía: desde las más primitivas, como el uso del fuego para calentar la comida o la fuerza animal para el transporte, hasta las complejas tecnologías existentes hoy en día. Sin lugar a duda la energía eólica ha estado presente desde las más tempranas etapas de este viaje. La primera evidencia del uso de la energía eólica corresponde a una representación encontrada en Kuwait datada en el quinto milenio antes de Cristo [2].

La aparición de la navegación a vela supuso un enorme impulso en actividades como la pesca, el comercio o incluso en aplicaciones bélicas. El aprovechamiento de la fuerza del viento para realizar desplazamientos marítimos desencadenó el desarrollo del comercio en las culturas sumerias y egipcias sobre los ríos Tigris, Éufrates y Nilo.

Sin embargo, la explotación del viento en las civilizaciones antiguas no se centraba exclusivamente en su aplicación a la navegación. Los primeros indicios de conversión de energía eólica a mecánica aparecen en el siglo XVII a.C. cuando el rey de Babilonia Hammurabi planteó el uso de la energía eólica en un proyecto de irrigación [3]. En el libro clásico Arthasastra (siglo IV a.C.) aparecen referencias a un dispositivo para elevar agua mediante el aprovechamiento del viento [4]. Sin embargo, no se tiene la certeza de que tales artilugios fueran materializados en la práctica.

La primera aplicación documentada del uso de la energía eólica como fuente de energía primaria para su transformación en energía mecánica data de en torno al año 200 a.C. tiempos en los que los persas utilizaban el viento para moler el grano. Estos molinos eran de eje vertical y el cuerpo de las aspas era de madera sobre las que se montaban las velas. El uso de la energía eólica para moler el grano adquirió gran popularidad en Europa durante los siglos XII y XIII. En este caso, los molinos eran de eje horizontal con torres habitualmente construidas en ladrillo; provistos de un sistema de orientación manual y dotados de mecanismos para protegerse de fuertes vientos. Durante el siglo XVIII se extendió ampliamente la aplicación de la energía eólica para el bombeo de agua en instalaciones de regadío. Estas turbinas estaban dotadas de un gran número de palas metálicas de longitudes relativamente pequeñas, constituyendo los habitualmente

denominados molinos americanos.

En el año 1887 se construyó en Escocia la primera turbina destinada a la generación de electricidad [5]. La aplicación del viento para producir energía eléctrica se difundió por el mundo y en países como Dinamarca o Estados Unidos su uso se intensificó rápidamente. Gracias a esta gran expansión se produjeron continuas mejoras en el diseño apareciendo los aerogeneradores bipala y tripala, junto nuevas concepciones como los aerogeneradores de eje vertical Daerrius y Savonius. La potencia nominal de las turbinas aumentó considerablemente y en el año 1931 se instaló en Rusia la primera instalación eólica marina consistente en un aerogenerador de 100 kW situado en el mar Caspio. Durante la década comprendida entre 1930 y 1940 se intensificó, sobre todo en Estados Unidos, la producción e instalación de turbinas relativamente pequeñas (con potencia nominal comprendida entre 200 y 3000 W) en instalaciones aisladas de la red eléctrica. Sin embargo, en los años siguientes, debido a la electrificación de las zonas rurales, el negocio de estos aerogeneradores dejó de ser rentable. En el año 1941 se instala en Estados Unidos el primer aerogenerador de gran potencia con una capacidad nominal de 1.25 MW. No obstante, como consecuencia del estado de desarrollo de los materiales de la época, la durabilidad de los componentes (sobre todo las palas) era extremadamente baja, por lo que el proyecto fue rápidamente desechado tras los primeros fallos mecánicos [6]. En el año 1958 se instala una turbina experimental de 800kW en Nogent le Roi (Francia). El proyecto es abandonado en el año 1963 debido nuevamente a los daños producidos en una de las palas [7]. Durante los años siguientes se sucedieron diferentes intentos fallidos. Sin embargo, es a partir de la crisis del petróleo de 1973 cuando la energía eólica sufre un nuevo impulso. En Estados Unidos la NASA junto con otras agencias estatales desarrolló numerosos prototipos y plantas experimentales. En Europa el interés por la energía eólica también estaba en auge y países como Dinamarca, Suecia y Alemania se embarcaron también en diferentes proyectos con el propósito de desarrollar la energía eólica como alternativa a los combustibles fósiles. De estos estudios surgieron las principales características de las turbinas modernas como el concepto de torre tubular, palas de material compuesto, control del ángulo de paso, etc. En los años siguientes, diferentes empresas privadas comenzaron a interesarse en la creciente rentabilidad de la energía eólica. Además, gobiernos como los de Estados Unidos y Dinamarca ofrecían ventajas fiscales y subvenciones para la implantación de proyectos eólicos. Por ello, a mediados de los años 80 comenzaron a surgir las primeras explotaciones privadas

compuestas por agrupaciones de aerogeneradores de relativamente baja potencia nominal.

En España se pone en marcha, en el año 1979, un plan de investigación y desarrollo para la aplicación de la energía eólica en la producción de electricidad. El primer prototipo es instalado en Tarifa en el año 1981. La potencia nominal del aerogenerador era de 100 kW con un diámetro de pala de 20 m. El primer aerogenerador conectado a la red se instaló el 10 marzo de 1984 en Vilopriu (Gerona) con una potencia nominal de 15 kW, mientras que el primer parque eólico fue inaugurado el 9 de abril de ese mismo año en el municipio de Garriguella (también en la provincia de Gerona). Dicho parque estaba constituido por tres aerogeneradores con una potencia nominal de 24 kW.

### **Situación actual de la energía eólica**

Actualmente la energía es uno de los factores que más influencia tiene sobre el desarrollo económico de las sociedades modernas. Concretamente, el nivel de consumo de energía por parte de un país es un buen indicador de su nivel de desarrollo. En 2014 la demanda de energía a nivel mundial fue cubierta mediante diferentes fuentes de energía primaria: los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo o el gas natural suponen aproximadamente el 87.3% de la energía primaria consumida, la energía nuclear cubre un 3.4%, la hidráulica un 6.8% y las energías renovables como la solar y la eólica aportan un 2.5% del consumo [8]. En la figura 1 se muestra la evolución del consumo mundial de energía primaria, expresada en millones de toneladas equivalentes de petróleo, dividido según las diferentes fuentes. El consumo energético mundial durante el año 2014 tan sólo creció un 0.9%, convirtiéndose en el año de menor crecimiento desde 1998. Aunque este patrón de consumo ha sido similar durante las últimas décadas, y la incidencia de las energías renovables es todavía relativamente reducida a nivel mundial, su tasa de crecimiento es muy elevada, alcanzando valores por encima del 10%.



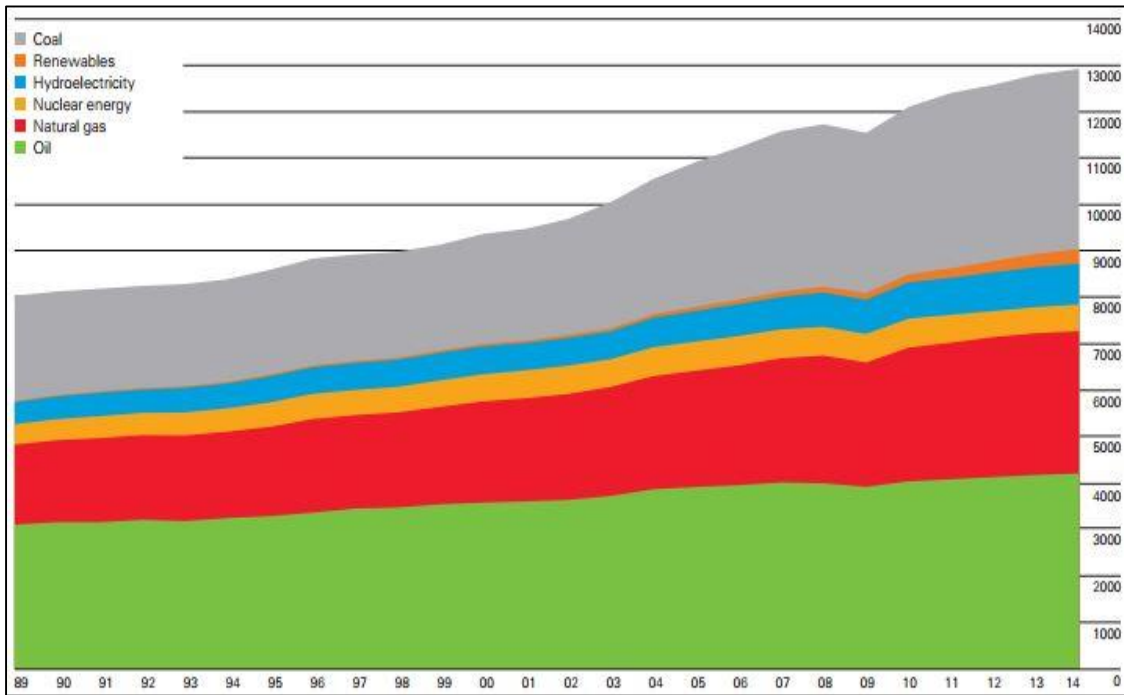


Figura 1. Consumo global de energía primaria en las últimas décadas, expresado en MTEp

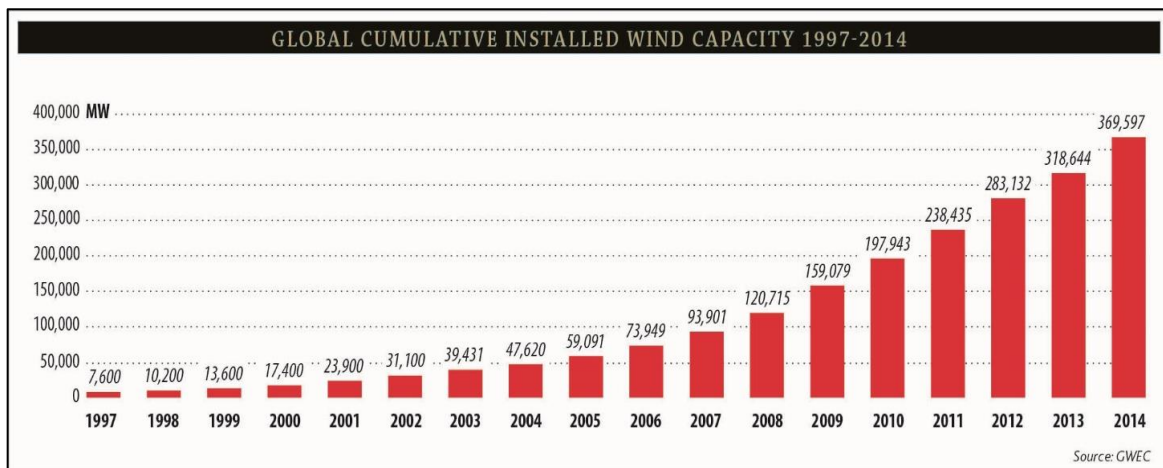


Figura 2. Evolución de la potencia eólica instalada a nivel mundial

De entre todas las energías renovables, a día de hoy, la eólica es la que ha alcanzado mayor grado de desarrollo y madurez tecnológica. A finales de 2014, la potencia instalada en todo el mundo llegaba hasta los 369.597 MW [9]. En la figura 2 se muestra la evolución de este tipo de tecnología desde el año 1997.

La tabla 1 muestra la distribución geográfica de la potencia eólica instalada en todo el mundo [9]. En ella se puede comprobar que los principales productores de energía eólica son China, EE.UU y Alemania. Por su parte, España se encuentra en el cuarto lugar con casi 23 GW de potencia instalada a finales de 2014.

Zona geográfica		Periodo		
		Finales de 2013	Instalados durante 2014	Finales de 2014
África y Oriente Medio	Marruecos	487	300	787
	Sudáfrica	10	560	570
	Egipto	550	60	610
	Túnez	245		245
	Etiopía	171		171
	Cabo Verde	24		24
	Otro	115	14	129
	Total	1602	934	2536
Asia	China	91413	23196	114609
	India	20150	2315	22465
	Japón	2669	130	2799
	Taiwán	614	18	632
	Otro	1123	347	1470
	Total	115969	26006	141975
Europa	Alemania	34250	5279	39529
	España	22959	28	22987
	Reino Unido	10711	1736	12447
	Francia	8243	1042	9285
	Italia	8558	108	8666
	Suecia	4382	1050	5432
	Portugal	4730	184	4914
	Dinamarca	4807	105	4912
	Polonia	3390	444	3834
	Turquía	2958	804	3762
	Rumanía	2600	354	2954
	Otro	13985	1723	15708
	Total	121573	12857	134430
América latina y Caribe	Brasil	3466	2472	5938
	Chile	331	506	837
	Uruguay	59	405	464
	Argentina	218	53	271
	Otro	703	314	1017
	Total	4777	3750	8527
Norte América	EEUU	61110	4854	65964
	Canadá	7823	1871	9694
	México	1917	634	2551
	Total	70850	7359	78209
Australia	Australia	3239	567	3806
	Nueva Zelanda	623		623
	Islas del pacífico	12		12
	Total	3874	567	4441
Total mundial		318645	51473	370118

Tabla 1. Distribución geográfica de la potencia eólica instalada, expresada en MW

En los próximos años se espera que las tecnologías renovables, en especial la energía eólica, ganen protagonismo en el escenario mundial de generación de electricidad. Esto se debe a diferentes factores. Por un lado, el amplio desarrollo de la tecnología en los últimos años ha conducido a un gran estado de madurez que hace de la energía eólica una de las fuentes de energía más prometedora en los años venideros. Y por otro lado, diferentes aspectos socioeconómicos juegan a favor de la expansión de las energías renovables. Entre dichos aspectos cabe destacar los siguientes:

- La creciente preocupación social sobre la emisión de gases de efecto invernadero y sus posibles efectos sobre el clima hace que las fuentes de energía renovables libres de emisiones como la energía eólica, fotovoltaica y solar térmica resulten cada vez más atractivas como alternativa a las fuentes de generación basadas en combustibles fósiles.
- Los riesgos que supone la energía nuclear y el tratamiento de sus residuos ha provocado que parte de la sociedad muestre un rechazo creciente hacia dicha tecnología.
- El carácter perecedero de las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles hace necesario la búsqueda y mejora de nuevas fuentes de generación de energía.
- El gran impacto ambiental asociado a la construcción de grandes centrales hidroeléctricas junto a la saturación de las cuencas hidrográficas provoca que la producción de energía mediante esta tecnología se mantenga prácticamente constante con el transcurso de los años, sobre todo en los países más desarrollados donde ya existe un aprovechamiento hídrico casi total.

## **Descripción del problema**

El diseño de un parque eólico es una tarea con un alto grado de complejidad. Por un lado, dicha tarea comprende áreas del conocimiento tan diversas como la ingeniería, economía, medio ambiente e incluso el derecho. A la hora de decidir el emplazamiento definitivo de un parque eólico es necesario tener en cuenta diferentes factores que resultan fundamentales para evaluar la aptitud técnica y económica del proyecto:

- *Condiciones de viento en el emplazamiento.* Este factor es, sin lugar a dudas, el que mayor influencia tendrá sobre el comportamiento económico del proyecto. Los valores promedio de intensidad del viento deben ser lo suficientemente

elevados con el fin de asegurar viabilidad económica del parque eólico. Por otro lado, la orografía del terreno y la presencia de obstáculos tienen una gran incidencia sobre el nivel de turbulencias que afectan directamente a la fiabilidad de las turbinas.

- *Disponibilidad y accesibilidad del terreno.* El emplazamiento del parque eólico debe tener espacio suficiente para alcanzar un grado de compacidad de las turbinas adecuado, de forma que el efecto de las estelas entre turbinas no sea excesivo y, al mismo tiempo, la distancia entre aerogeneradores no sea muy elevada afectando negativamente a costes como la instalación eléctrica, pérdidas eléctricas en el sistema y costes de operación y mantenimiento.
- *Factores medioambientales.* El impacto medioambiental de la implantación de un parque eólico debe ser lo más reducido posible, y por ello, es necesario tener presente diversos factores como zonas de paso de aves migratorias, presencia de núcleos cercanos de población, así como el impacto acústico y visual.
- *Acceso a la red de transporte y distribución de energía eléctrica.* La interconexión del parque eólico con la red de transporte resulta un factor clave en la ubicación de un parque eólico. Ya que, por un lado, la distancia al punto de conexión tendrá una fuerte influencia sobre la inversión inicial a realizar y, por otro lado, es necesario evaluar la viabilidad técnica de dicha conexión en términos de límite de potencia admitido por la línea de evacuación y estabilidad del sistema.

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

## **Introducción al planteamiento determinista del problema**

Hasta la fecha, la tendencia general en cuanto al posicionamiento de los aerogeneradores en un parque eólico ha sido —en el caso de parques eólicos en tierra firme— situar los aerogeneradores en las posiciones donde el potencial de viento es mayor, guardando en la dirección predominante del viento una determinada distancia entre turbinas, con el fin de disminuir el efecto de las estelas. Por otro lado, en parques marítimos la tendencia general es situar los aerogeneradores formando estructuras regulares guardando una

mayor separación entre turbinas según la dirección predominante del viento [10][11].

Sin embargo, diversos trabajos muestran que este tipo de configuraciones regulares no son necesariamente las más adecuadas en cuanto a la rentabilidad final del proyecto se refiere [12]. Esto es debido principalmente a que el perfil de velocidades del viento es modificado notablemente cuando el flujo de aire atraviesa el rotor de una turbina. En un parque eólico, compuesto por una agrupación de aerogeneradores, esta alteración hace que el campo de velocidades sea muy variable en función de la posición de las turbinas que lo forman.

En la figura 3 pueden apreciarse dos disposiciones diferentes de los aerogeneradores para un parque concreto: una de ellas corresponde al diseño realizado por un experto (con 59 turbinas) y la otra corresponde a la obtenida mediante un programa de optimización (33 aerogeneradores) [12]. Las principales características correspondientes a ambas soluciones se muestran en la tabla 2.

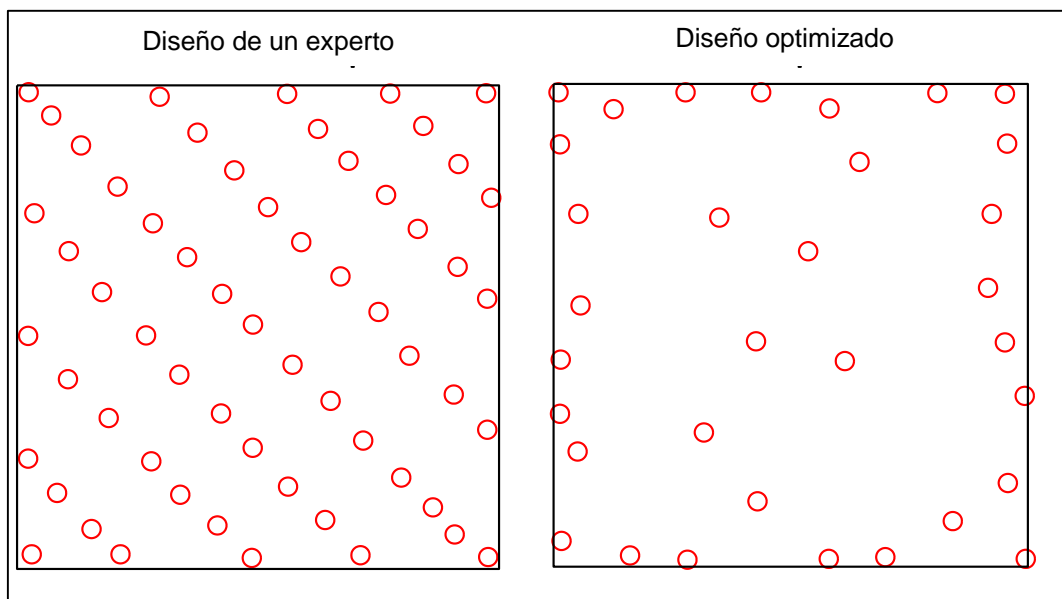


Figura 3. Diseño de un parque eólico obtenido mediante un experto (izquierda) y mediante un método de optimización (derecha).

Adicionalmente, no sólo el potencial eólico influye en la posición de las turbinas, ya que también está influenciada por otros aspectos como la orografía del terreno (o la profundidad del lecho marino en el caso de un parque eólico marino), tipología del terreno, posición de las líneas de evacuación, costes de adquisición e instalación de los equipos, precio de venta de la energía, indicadores económicos, etc. Todo ello, da lugar a que el problema de posicionamiento óptimo de las turbinas implique un elevado grado de complejidad desde un punto de vista matemático.

<b>Concepto</b>	<b>Tipo de solución</b>	
	Experto	Optimizado
Número de turbinas	59	33
Beneficio económico (MDKK)	-12.82	13.10
Rendimiento de las estelas (%)	78.00	88.90

MDKK: Millones de Coronas Danesas

*Tabla 2. Comparación de la configuración realizada por un experto y mediante un método de optimización*

Por otro lado, el comportamiento económico de un proyecto eólico está sujeto a un cierto grado de incertidumbre debido a diversos factores, en especial la propia naturaleza aleatoria del viento, pero también otros como la posible evolución futura de los precios de venta de la energía e indicadores económicos, incertidumbre en los costes de adquisición e instalación de los diversos componentes, cambios regulatorios, etc.

La figura 4 muestra, de forma esquemática, las relaciones existentes entre las diferentes variables que intervienen en el problema y cuál es la influencia que cada una de ellas tiene sobre los diferentes módulos de cálculo. Adicionalmente, el conjunto de variables señaladas en color rojo son aquellas que están sujetas a mayor grado de incertidumbre, mientras que el conjunto de variables rotuladas en color azul presentan un menor grado de incertidumbre.

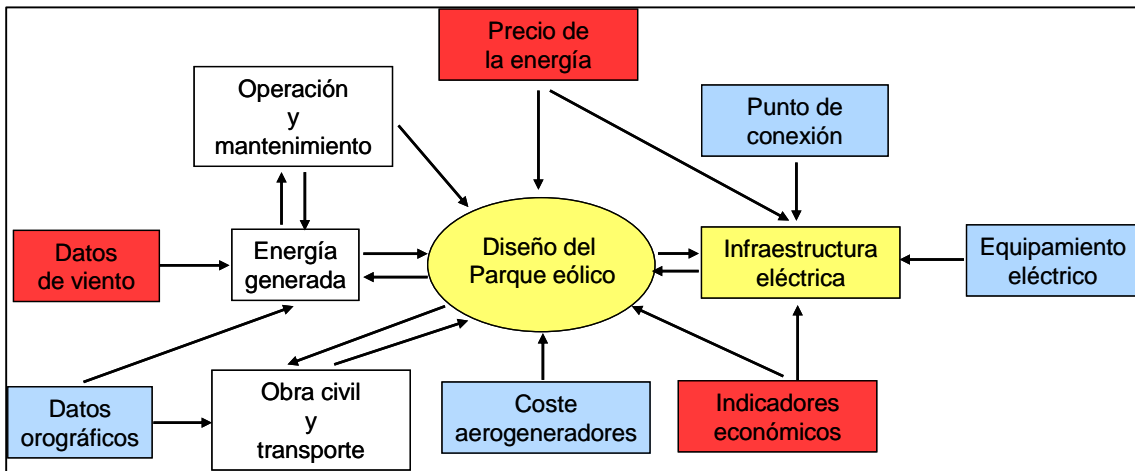


Figura 4. Esquema de relaciones existentes entre los distintos módulos del problema de optimización

La complejidad del problema aumenta notablemente cuanto mayor es el tamaño del parque (tanto en lo referente a superficie de la parcela como al número de aerogeneradores). Por ello, la mayoría de trabajos desarrollados hasta la fecha se han limitado a tamaños de parque relativamente pequeños en los que se pone de manifiesto la enorme dificultad que supone el problema que se pretende resolver.

# Capítulo I. Ruido

Las emisiones sonoras provenientes de un aerogenerador en funcionamiento se pueden caracterizar de dos formas distintas dependiendo de su origen: ruido mecánico y ruido aerodinámico. El ruido mecánico se genera en los componentes mecánicos de la máquina, principalmente en la caja de cambios y el generador, ambos instalados en la góndola. Este tipo de ruido tiene una energía dominante en las frecuencias por debajo de 1000 Hz y puede contener componentes de tono discreto. En los aerogeneradores instalados durante los diez últimos años, los fabricantes han sido capaces de disminuir el ruido mecánico a un nivel inferior al ruido aerodinámico. Esto se debe también al hecho de que el tamaño de las turbinas se ha incrementado y el ruido mecánico no aumenta proporcionalmente tanto con las dimensiones del aerogenerador como lo hace el ruido aerodinámico. Por su parte el ruido aerodinámico es típicamente la parte dominante de ruido del generador eólico en la actualidad. Contiene un ruido de banda ancha y una modulación de amplitud. El ruido se origina principalmente por el flujo de aire alrededor de la parte exterior de las palas. Existe una fuerte relación entre la velocidad del viento y el ruido que producen las palas. A medida que aumenta la velocidad aumenta el ruido. A su vez, está directamente vinculado a la producción de energía, por lo tanto es inevitable su existencia, a pesar de que se podría reducir en cierta medida modificando el diseño de las palas [13].

## 1.1 Norma ISO 9613

La norma internacional ISO 9613 fue creada para establecer una estandarización sobre la acústica, y de forma más concreta sobre la atenuación del sonido durante su propagación en exteriores [14]. Está estructurada en dos partes: la primera de ellas se centra en el cálculo de la absorción del sonido por la atmósfera, y la segunda presenta un método general de cálculo.

El método general permite calcular la atenuación del sonido durante su propagación en exteriores con el objetivo de predecir los niveles de ruido ambiente en función de la distancia y una variedad de fuentes. Como hipótesis iniciales se toman: condiciones meteorológicas favorables para la propagación, niveles de emisión sonoras en el emplazamiento de la fuente conocidos y cálculo realizado aguas abajo de la fuente. El



término aguas abajo se refiere al espacio que se encuentra detrás de la fuente visto según la dirección incidente del viento. La norma permite que la fuente sea móvil o estacionaria. El método está específicamente desarrollado para bandas de octava, con frecuencias nominales que van desde los 63 Hz hasta los 8 kHz. El cálculo incluye los siguientes efectos físicos de atenuación:

- Divergencia geométrica
- Absorción atmosférica
- Efecto del suelo
- Reflexión en superficies
- Pantallas provocadas por obstáculos

Por otra parte, el sonido puede ser producido por una única fuente puntual o por un conjunto de éstas. Por esta razón este cálculo se puede extrapolar a distintas situaciones, como por ejemplo a los transportes por carretera o por railes, fuentes industriales de ruido o actividades relacionadas con la construcción.

## **1.2 Frecuencia del sonido**

La frecuencia es el número de variaciones de presión por unidad de tiempo, y se mide generalmente en Hercios (Hz). El ruido normalmente está compuesto por este tipo de variaciones a diferentes frecuencias. Sin embargo el oído humano no está capacitado para percibir sonidos en todo el espectro de frecuencias, sino que el sonido audible se encuentra en el rango de 20 a 20.000 Hz [15]. Además, no todas las frecuencias son recibidas con la misma intensidad, siendo el oído humano más sensible a la banda comprendida entre los 500 y 6.000 Hz. Dada la amplia gama de frecuencias audibles, para realizar estudios no es posible analizarlas una a una, por lo que dicha banda ha sido discretizada en diez bandas más pequeñas denominadas octavas, conocidas por sus frecuencias centrales: 31.5, 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 y 8.000 Hz.

### **1.2.1 Ponderación**

Puesto que el oído humano no tiene la misma sensibilidad para todas las frecuencias, resulta lógico que al efectuar una medición de ruido se tenga en cuenta esta particularidad. Para ello, existen y se han normalizado tres curvas de ponderación, las cuales siguen de

forma aproximada la misma ley que el oído en cuanto a sensibilidad en función de la frecuencia.

- Curva A, que se aproxima a la curva de audición de baja sensibilidad
- Curva B, que se aproxima a la curva de audición de media sensibilidad
- Curva C, que se aproxima a la curva de audición de alta sensibilidad

El nivel de presión sonora más utilizado es el de ponderación A, debido a que es el que más protege al hombre contra la agresión del ruido. El tipo de ponderación se puede apreciar porque el nombre de la curva entre paréntesis suele acompañar a la unidad de medida de presión sonora. Por ejemplo: dB(A).

### 1.3 Definiciones

A continuación se presentan una serie de definiciones y ecuaciones básicas, todas ellas extraídas de la norma ISO 9613 [14], necesarias para la comprensión del modelo empleado en el cálculo de la propagación del sonido.

- Nivel de presión sonora equivalente medido en dB(A)

$$L_{AT} = 10 \log \left\{ \left[ \frac{1}{T} \int_0^T p_A^2(t) dt / p_0^2 \right] \right\} \quad (1)$$

Donde

$p_A(t)$  es la presión sonora instantánea, medida en pascales

$p_0$  es la referencia de presión sonora ( $= 20 \times 10^{-6} Pa$ )

$T$  es un intervalo de tiempo, en segundos

- Nivel de presión sonora de banda de octava equivalente aguas abajo

$$L_{fT}(DW) = 10 \log \left\{ \left[ \frac{1}{T} \int_0^T p_f^2(t) dt / p_0^2 \right] \right\} \quad (2)$$

Donde

$p_f(t)$  es la presión sonora instantánea de banda de octava aguas abajo medida en pascales. El subíndice  $f$  representa la frecuencia nominal del filtro de banda de octava.

### 1.3.1 Ecuaciones básicas

$$L_{fT}(DW) = L_W + D_c - A \quad (3)$$

Donde

$L_W$  es el nivel de potencia sonora banda de octava, medido en decibelios, producido en el punto sonoro de la fuente, y relativo a una potencia sonora de referencia de valor igual a un picowatio ( $1 \text{ pW}$ )

$D_c$  es la corrección de directividad, medida en decibelios. Describe la cantidad de presión sonora que se desvía en una determinada dirección comparado con un punto omnidireccional. Para un punto omnidireccional radiando en un espacio abierto y libre: ( $D_c = 0 \text{ dB}$ )

$A$  es la atenuación de banda de octava, medida en decibelios, que ocurre durante la propagación del sonido desde la localización de la fuente hasta la del receptor. A su vez, este parámetro puede descomponerse en:

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc} \quad (4)$$

Donde

$A_{div}$  es el término correspondiente a la divergencia geométrica

$A_{atm}$  es el término correspondiente a la absorción atmosférica

$A_{gr}$  es el término que representa al efecto del suelo

$A_{bar}$  es la atenuación debido a una barrera u obstáculo

$A_{misc}$  es la atenuación debida a otros efectos

Hasta ahora se ha visto el caso en el que sólo haya una fuente emisora de ruido. En el caso de existir más de una, el procedimiento es el siguiente: partiendo del punto en el que

se quiera calcular el ruido, se calcula para ese punto la aportación de nivel de presión sonora que cada fuente de ruido produce en ese punto de manera independiente, y luego se aplica la siguiente fórmula:

$$L_{AT}(DW) = 10 \log \left\{ \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{j=1}^8 10^{0,1[L_{fT}(ij)]} \right] \right\} \quad (5)$$

Donde

$n$  es el número de fuentes emisoras de ruido

$j$  es el índice que indica la frecuencia de octava correspondiente entre 63 Hz y 8 kHz

### 1.3.2 Cálculo de los términos de atenuación

- Divergencia geométrica: este término representa la dispersión esférica en campo libre que experimenta una fuente sonora puntual, expresada en decibelios.

$$A_{div} = [20 \log(d/d_0) + 11] \quad (6)$$

Donde

$d$  es la distancia desde la fuente hasta el receptor, medida en metros

$d_0$  es la distancia de referencia (= 1 metro)

Nota: la constante que aparece en el segundo sumando de la ecuación (6) proviene del nivel de presión sonora a la distancia de referencia para una fuente puntual que emite en todas las direcciones.

- Absorción atmosférica: la atenuación debida a la absorción atmosférica, depende de la distancia entre la fuente y el receptor, y se puede calcular de la siguiente forma:

$$A_{atm} = \alpha d / 1000 \quad (7)$$

Donde

$\alpha$  es el coeficiente de absorción atmosférica, medido en decibelios por kilómetro. En la tabla 3 pueden verse los valores de  $\alpha$  para algunos valores de humedad y temperatura.

Temperature °C	Relative humidity %	Atmospheric attenuation coefficient $\alpha$ , dB/km							
		Nominal midband frequency, Hz							
		63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
10	70	0,1	0,4	1,0	1,9	3,7	9,7	32,8	117
20	70	0,1	0,3	1,1	2,8	5,0	9,0	22,9	76,6
30	70	0,1	0,3	1,0	3,1	7,4	12,7	23,1	59,3
15	20	0,3	0,6	1,2	2,7	8,2	28,2	88,8	202
15	50	0,1	0,5	1,2	2,2	4,2	10,8	36,2	129
15	80	0,1	0,3	1,1	2,4	4,1	8,3	23,7	82,8

Tabla 3. Coeficiente de absorción atmosférica para cada banda de octava

- Efecto del suelo: la atenuación del suelo se debe principalmente a la interacción del ruido reflejado en la superficie del suelo con el que proviene directamente de la fuente. Depende en gran medida de las propiedades de las superficies del suelo más cercanas a la fuente y al receptor. Tan sólo es válido para suelos planos, tanto para aquellos horizontales como para aquellos con una pequeña inclinación constante. Para este cálculo, hay que distinguir tres regiones del suelo diferentes (Véase figura 5):

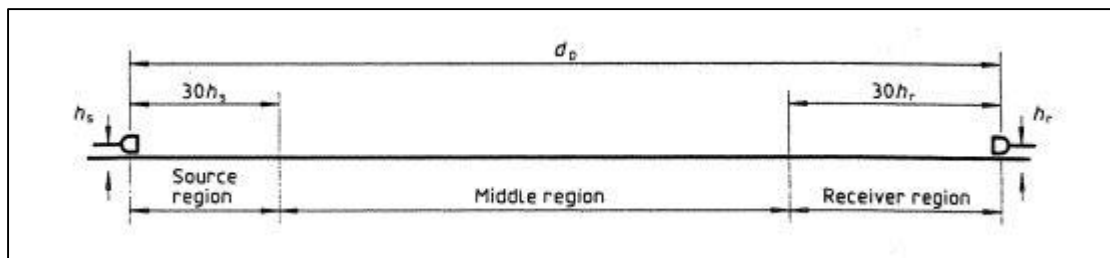


Figura 5. Tres distintas regiones para la determinación del efecto del suelo

- Región de la fuente, que se extiende desde el emplazamiento de la misma hasta 30 veces su altura.
- Región del receptor, que se extiende desde el emplazamiento del mismo hasta 30 veces su altura.
- Región media, que es aquella comprendida entre la región de la fuente y la del receptor. En el caso de que ambas regiones se solapen, no habrá región media. Matemáticamente, esto ocurre cuando la distancia entre

fuente y receptor proyectada sobre el suelo ( $dp$ ) es menor que la suma de las longitudes de las regiones de la fuente y receptor.

Las propiedades acústicas del suelo vienen determinadas por un factor de suelo  $G$ , y dependiendo de este, los suelos se pueden clasificar en tres tipos:

- Suelos duros, incluyendo pavimentos, agua, hielo y en general todas las superficies que tengan poca porosidad. Estos suelos tienen un factor  $G$  nulo.
- Suelos porosos, que engloban los suelos recubiertos por hierba, árboles o cualquier tipo de vegetación, así como las tierras de cultivo. Todos ellos tienen un factor  $G=1$ .
- Suelos mixtos, aquellos que tienen una mezcla de propiedades de los dos anteriores, y por tanto tienen un  $G$  comprendido entre 0 y 1.

Por lo tanto, para calcular la atenuación del suelo para una octava de banda específica, hay que determinar primero la atenuación para las tres regiones, como indica la siguiente fórmula:

$$A_{gr} = A_s + A_r + A_m \quad (8)$$

Nótese que el subíndice  $s$  hace referencia a la fuente,  $r$  al receptor y  $m$  a la región media. El cálculo de cada uno de estos términos está detallado en la tabla 4.

## 1.4 Exactitud y limitaciones del método

La atenuación del sonido propagándose en exteriores entre una fuente fija y un receptor fluctúa debido a las variaciones de las condiciones meteorológicas a lo largo de la propagación. Por otra parte, el método explicado en este capítulo está limitado a posiciones aguas abajo de la fuente emisora de ruido, por lo que no abarca todas las direcciones posibles. Finalmente no se incluyeron los términos de atenuación por barreras u otros obstáculos porque se consideró que para los escenarios en los que este trabajo va a estar involucrado no tienen cabida. A pesar de estos inconvenientes, los resultados son muy válidos para lo que el ámbito de este trabajo exige.

Nominal midband frequency Hz	$A_s$ or $A_r$ <sup>1)</sup> dB	$A_m$ dB
63	- 1,5	- 3q <sup>2)</sup>
125	- 1,5 + G × a'(h)	- 3q(1 - G <sub>m</sub> )
250	- 1,5 + G × b'(h)	
500	- 1,5 + G × c'(h)	
1 000	- 1,5 + G × d'(h)	
2 000	- 1,5(1 - G)	
4 000	- 1,5(1 - G)	
8 000	- 1,5(1 - G)	
NOTES		
$a'(h) = 1,5 + 3,0 \times e^{-0,12(h-5)^2} (1 - e^{-d_p/50}) + 5,7 \times e^{-0,09h^2} (1 - e^{-2,8 \times 10^{-6} \times d_p^2})$		
$b'(h) = 1,5 + 8,6 \times e^{-0,09h^2} (1 - e^{-d_p/50})$		
$c'(h) = 1,5 + 14,0 \times e^{-0,46h^2} (1 - e^{-d_p/50})$		
$d'(h) = 1,5 + 5,0 \times e^{-0,9h^2} (1 - e^{-d_p/50})$		
<p>1) For calculating <math>A_s</math>, take <math>G = G_s</math> and <math>h = h_s</math>. For calculating <math>A_r</math>, take <math>G = G_r</math> and <math>h = h_r</math>. See 7.3.1 for values of <math>G</math> for various ground surfaces.</p> <p>2) <math>q = 0</math> when <math>d_p \leq 30(h_s + h_r)</math></p> $q = 1 - \frac{30(h_s + h_r)}{d_p} \quad \text{when } d_p > 30(h_s + h_r)$ <p>where <math>d_p</math> is the source-to-receiver distance, in metres, projected onto the ground planes.</p>		

Tabla 4. Expresiones para calcular los valores de  $A_s$ ,  $A_r$  y  $A_m$

## 1.5 Legislación actual

En este apartado se pretende dar una visión general sobre la legislación actual correspondiente a la contaminación acústica producida por los parques eólicos. Este aspecto tiene gran influencia a la hora de diseñar un parque eólico, ya que el no cumplimiento de las leyes conlleva a penalizaciones económicas que pueden tornar el proyecto inviable económicamente hablando.

En primer lugar cabe destacar que cada país tiene su propia legislación, y por lo tanto cada proyecto debe ser evaluado en función las restricciones impuestas por el gobierno correspondiente. Hay países como España, en los que existe una ley de contaminación acústica para cada comunidad autónoma, lo que dificulta un estudio exhaustivo de cada situación. No obstante aquí se expondrá una comparación entre una gran muestra de productores eólicos a nivel mundial, que servirá de referencia para el estudio de otros casos que se encuentren en condiciones similares.

A continuación se muestra la tabla 5 con los límites de ruido de los siguientes países [16]: Alemania, Bélgica, Francia, Países Bajos, Reino Unido, Dinamarca, Suecia, Noruega, Finlandia, Australia, Nueva Zelanda, Estados Unidos de América y Canadá.

Gobierno	Método de medición	Área rural	Área residencial
Bélgica - Flanders	$L_{Aeq}$ - 95 % de la potencia nominal [dB(A)]	Día: 48	Día: 44
		Noche: 43	Noche: 39
Bélgica - Wallonia	$L_{Aeq}$ - todas las velocidades de viento [dB(A)]	45	
Canadá	Sin legislación para el ruido producido por turbinas eólicas		
Canadá - Alberta	$L_{Aeq}$ [dB(A)]	40	40
Canadá - Ontario	$L_{Aeq}$ [dB(A)]	40	40
Canadá - Prince Edward Island	Imposición de una distancia de 3 veces la altura de los aerogeneradores a la zona residencial más próxima		
Dinamarca	$L_r$ [dB(A)]	42	37
Finlandia	$L_{Aeq}$ [dB(A)]	Día: 45	
		Noche: 40	
Francia	$L_{Aeq}$ - todas las velocidades de viento [dB(A)]	Día: incremento de 5 dB(A) respecto al ruido de fondo	
		Noche: incremento de 3 dB(A) respecto al ruido de fondo	
Alemania	$L_r$ - todas las velocidades de viento [dB(A)]	Día: 60	Día: 50-55
		Noche: 45	Noche: 35-40
Países bajos	$L_{den}$ [dB]	Día: 47	
	$L_{night}$ [dB]	Noche: 41	
Nueva Zelanda	$L_{A90(10min)}$ [dB(A)]	35 ó ruido de fondo +5	40 ó ruido de fondo + 5
Noruega	$L_{den}$ [dB]	45	
Australia del sur	$L_{Aeq,10}$ [dB(A)]	35 ó ruido de fondo +5	40 ó ruido de fondo + 5
Suecia	$L_{Aeq}$ [dB(A)]	35	40
Reino Unido	$L_{A90(10min)}$ [dB(A)]	Día: Ruido de fondo + 5 dB(A), límite inferior 35-40	



		Noche: Ruido de fondo + 5 dB(A), límite inferior 43
Estados Unidos de América	$L_{dn}$ [dB(A)]	55
Colorado	Sin legislación para el ruido producido por turbinas eólicas	
Colorado - Arapahoe County	$L_{Aeq}$ [dB(A)]	Día: 55
		Noche: 50
Georgia	$L_{Aeq}$ [dB(A)]	55
Illinois	Análisis por bandas de octava	
Indiana	Sin legislación para el ruido producido por turbinas eólicas	
Indiana - Tipton County	$L_{Aeq,10}$ [dB(A)]	45
Michigan	$L_{Aeq}$ [dB(A)]	55 ó ruido de fondo + 5
Michigan - Huron County	$L_{A10}$ [dB(A)]	45 ó ruido de fondo +5
Minnesota	$L_{Aeq}$ [dB(A)]	50
Minnesota - Lincoln County	$L_{Aeq}$ [dB(A)]	50
Nevada	Sin legislación para el ruido producido por turbinas eólicas	
Nevada - Lyon County	$L_{Aeq}$ [dB(A)]	55
Nueva México	Sin legislación para el ruido producido por turbinas eólicas	
Nueva México - San Miguel County	$L_{Aeq}$ [dB(A)]	< ruido de fondo
Nueva York	Sin legislación para el ruido producido por turbinas eólicas	
Nueva York - Town of Jefferson	$L_{A10}$ [dB(A)]	50 ó ruido de fondo +5
North Carolina	$L_{Aeq}$ [dB(A)]	55
Oregon	$L_{A50}$	Día: 55
		Noche: 50
Pensilvania	Sin legislación para el ruido producido por turbinas eólicas	
Pensilvania - Potter County	$L_{Aeq}$ [dB(A)]	ruido de fondo + 5
Wisconsin	$L_{Aeq}$ [dB(A)]	Día: 50
		Noche: 45

Wisconsin - Shawano County	$L_{Aeq}$ [dB(A)] / Análisis por bandas de octava	ruido de fondo + 5
Wyoming	Sin legislación para el ruido producido por turbinas eólicas	
Wyoming - Laramie County	$L_{Aeq}$ [dB(A)]	50

Tabla 5. Límites de ruido en los países especificados

Como se puede ver en la tabla 5, existe una gran variedad de límites de ruido a lo largo de toda la geografía mundial. Además, dichos valores están definidos según el tipo de medición predeterminada y según las condiciones del emplazamiento del parque. Es decir, los límites establecidos dependen de si los aerogeneradores se encuentran cerca de una zona rural o una zona residencial, del momento del día, de la velocidad y dirección del viento, etc. A modo de resumen se presenta la figura 6, en la que se puede comprobar gráficamente las diferencias de legislación entre los países anteriormente citados.

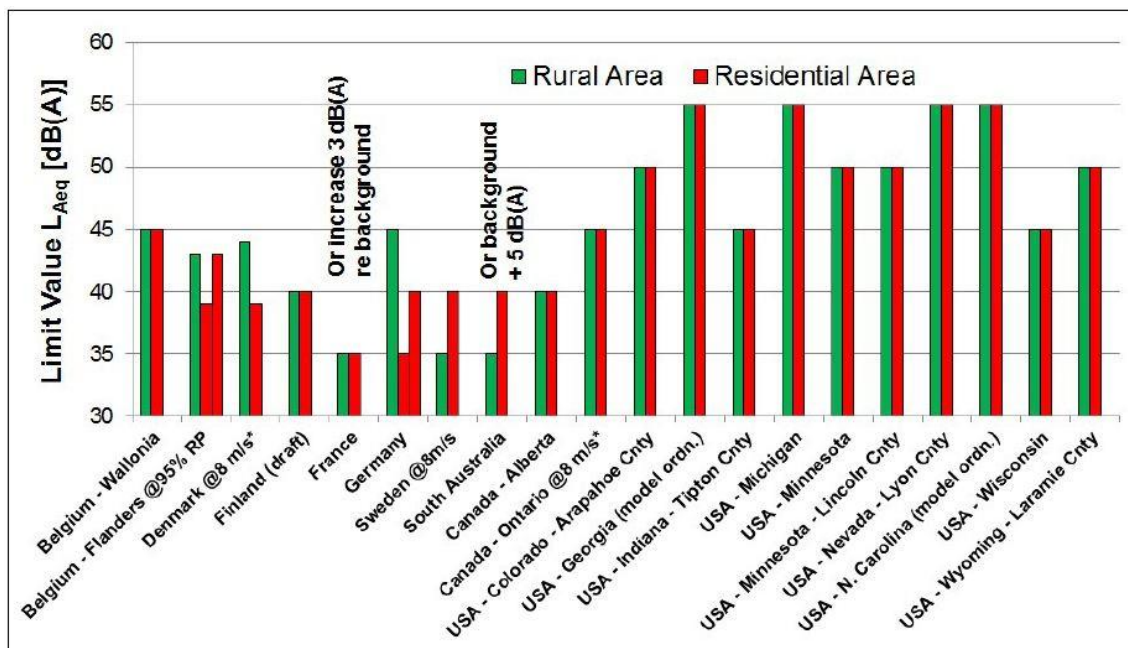


Figura 6. Resumen de los límites de ruido impuestos por los países en estudio



# Capítulo II. Generación

Los aerogeneradores son diseñados de manera que sean capaces de extraer la mayor cantidad de energía del viento. La energía contenida en una masa en movimiento se conoce como energía cinética, y se puede calcular según la expresión:

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2 \quad (9)$$

Siendo:

$m$  la masa en movimiento expresada en kg

$V$  la velocidad expresada en m/s

Por otra parte, la potencia disponible en el viento viene determinada por:

$$P = \frac{1}{2} \rho_a A_T V^3 \quad (10)$$

Siendo:

$\rho_a$  la densidad del aire expresada en kg/m<sup>3</sup>

$A_T$  el área barrida por las palas del aerogenerador

$V$  la velocidad del viento expresada en m/s

Tal y como se puede apreciar en las expresiones de la energía cinética y de la potencia disponible, la velocidad del viento es una componente fundamental. Por ello, es muy importante predecir la probabilidad de ocurrencia de las distintas velocidades en el rango de operación de un aerogenerador. Existen varios métodos que realizan esta función, pero aquí se tratará solamente el más conocido, la distribución de Weibull.

## 2.1 Distribución de Weibull

La distribución probabilística de Weibull es normalmente considerada como la más adecuada para obtener la función de densidad de probabilidad de una determinada

velocidad de viento en una determinada localización [17]. Este lugar debe ser caracterizado por dos parámetros:

$c$  : parámetro de escala, que indica la velocidad media anual de viento

$k$  : parámetro de forma, que mide la dispersión del viento en dicho local

Así, la expresión matemática de la función de densidad de probabilidad de Weibull es la siguiente:

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (11)$$

En la figura 7 se han representado dos distribuciones de Weibull diferentes. Ambas tienen un parámetro de escala igual a 10 metros por segundo, pero cada una tiene un parámetro de forma distinto, pudiéndose comprobar así la influencia que tiene este valor sobre la distribución.

## 2.2 Ley de Prandtl

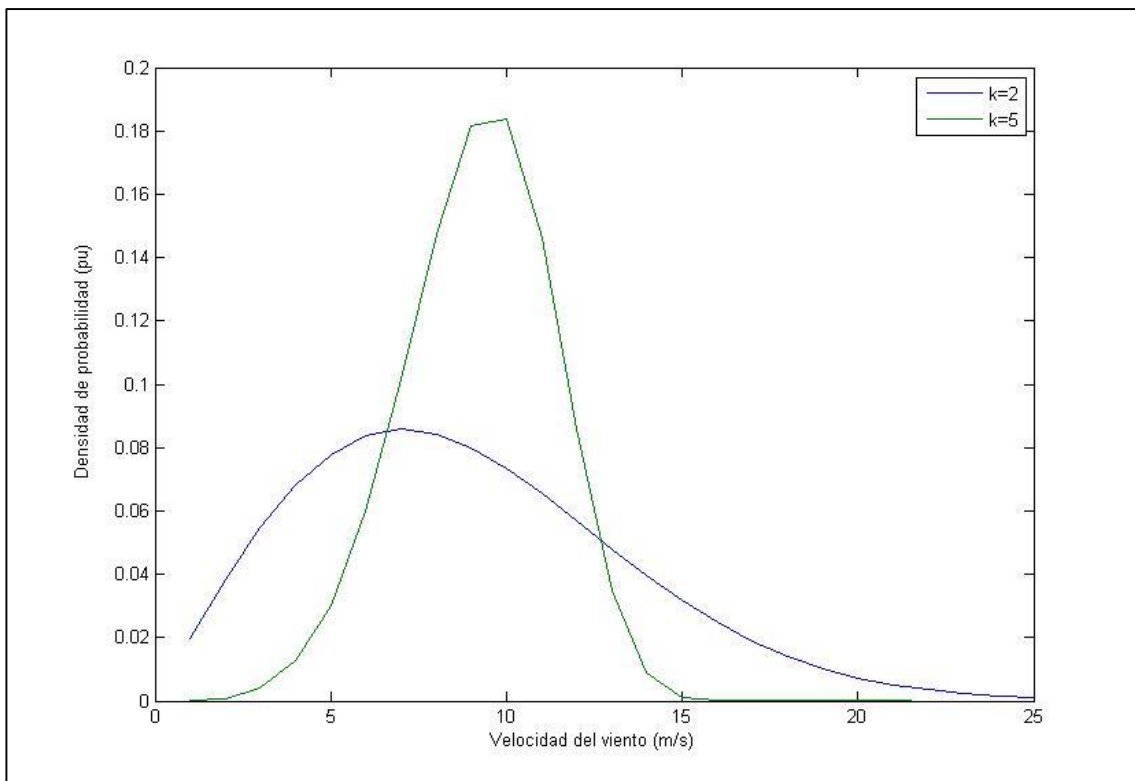


Figura 7. Ejemplo de dos distribuciones de Weibull con un mismo parámetro de escala y dos parámetros de forma diferentes

El viento es aproximadamente constante a una altura de 10 km sobre la superficie terrestre, pero no ocurre lo mismo para las capas más próximas al suelo, donde la velocidad del viento depende fuertemente de la fricción con la superficie. Este efecto no desaparece hasta una altura aproximada de 2000 metros, por lo que hay que tenerlo en cuenta para la producción de energía en un parque eólico, ya que los aerogeneradores tienen una altura de entre 30 y 120 metros. La fricción del viento con el suelo puede ser modelada en base a la orografía y rugosidad del terreno, y evaluada según la ley logarítmica de Prandtl:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (12)$$

Donde:

$u(z)$  es la velocidad del viento a una altura  $z$

$u_*$  es la velocidad de fricción

$k$  es la constante de Von Karman, de valor 0,4

$z_0$  es la longitud característica de la rugosidad del suelo, representando una medida de la textura del suelo.

A su vez, la velocidad de fricción depende de la rugosidad del suelo, de la velocidad del viento y de las fuerzas que se desarrollan en la atmósfera, y por tanto, es difícil de calcular. Es por eso que normalmente se recurre a la ley práctica de Prandtl para calcular la variación de la velocidad del viento con la altura respecto al suelo:

$$\frac{u(z)}{u(z_R)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_R}{z_0}\right)} \quad (13)$$

Donde:

$u(z_R)$  es la velocidad media a una altura de referencia  $z_R$

En la figura 8 se ha representado una aplicación práctica de la ley de Prandtl. Los datos de entrada son:

- Altura de referencia igual a 10 metros

- Velocidad a la altura de referencia igual a 10 metros por segundo
- Rugosidad del suelo igual a 0,055 metros

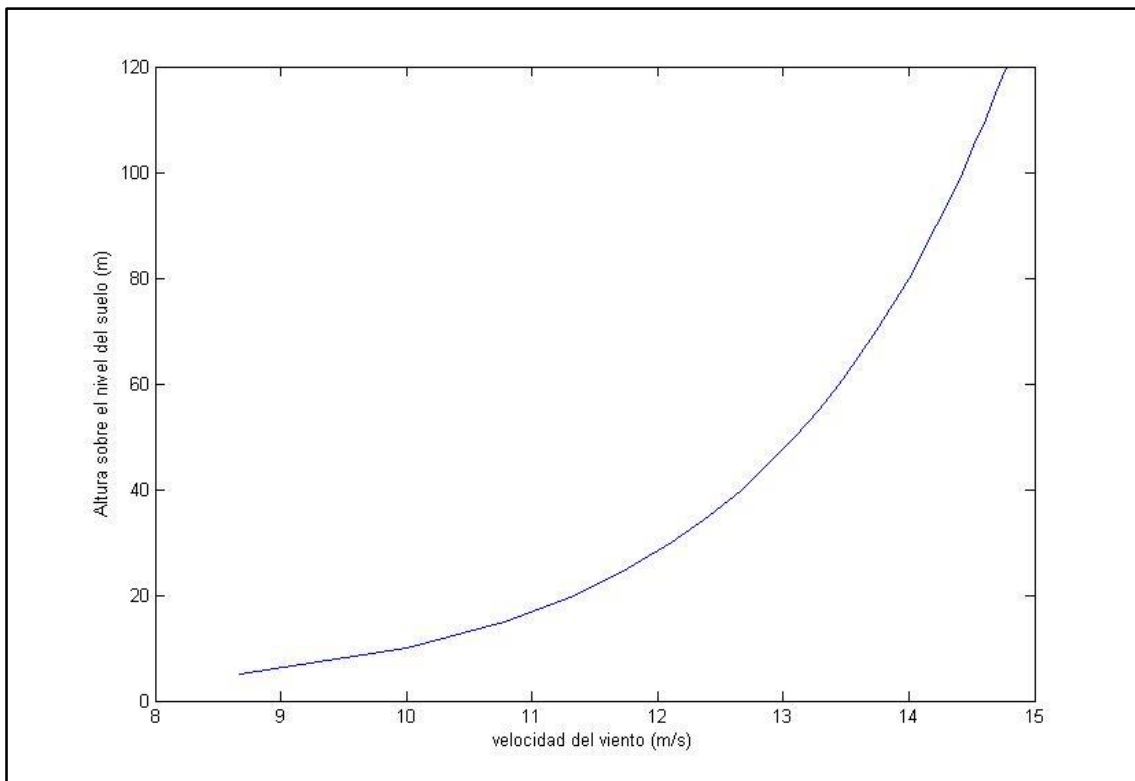


Figura 8. Ejemplo de la variación de la velocidad del viento conforme aumenta la altura respecto al suelo

A esta variación suele llamarse cizallamiento del viento, y es un aspecto importante en el diseño de los aerogeneradores, ya que en el momento en el que la pala se encuentra en la posición más alta la fuerza que ejerce el viento sobre ella es bastante mayor que cuando se encuentra en la posición más baja.

En la tabla 6 se muestran los distintos tipos de clases y longitudes de rugosidad en los que puede ser clasificado un suelo [17]. Esta clasificación se lleva a cabo en función del tipo de paisaje, que puede ser desde una superficie de agua hasta una gran ciudad con grandes rascacielos.

Tipo de terreno	Clase	Longitud de rugosidad $z_0$ (m)
Superficie del agua	0	0,0002
Terreno abierto con superficie plana	0,5	0,0024
Terreno de agricultura sin vegetación y con construcciones muy dispersas	1	0,03
Terreno de agricultura con vegetación de hasta 8 metros y alguna construcción en una distancia de 1 kilómetro	1,5	0,055
Terreno de agricultura con alguna construcción y vegetación de hasta 8 metros de altura en una distancia de 500 metros	2	0,1
Terreno de agricultura con mucha construcción, arbustos y árboles de hasta 8 metros de altura, en una distancia de 250 metros	2,5	0,2
Pueblos, terrenos de agricultura con vegetación alta, bosques	3	0,4
Ciudades con edificios altos	3,5	0,8
Grandes ciudades con rascacielos	4	1,6

Tabla 6. Clases y longitudes de rugosidad en función del tipo de paisaje

### 2.3 Límite de Betz

Utilizando el modelo del disco actuante, Albert Betz demostró que existía un máximo teórico en la conversión eolomecánica (ver Figura 9).

Resumidamente, lo que Betz demostró fue que un aerogenerador no puede convertir toda la energía cinética contenida en una masa de aire, ya que esto significaría que el viento saldría del aerogenerador con velocidad nula, y por tanto el aire se acumularía aguas abajo del mismo [18]. Según el físico alemán, la máxima potencia que el rotor puede extraer viene dado por:

$$P = \frac{1}{2} \rho_a A_T V^3 a (1 - a)^2 \quad (14)$$



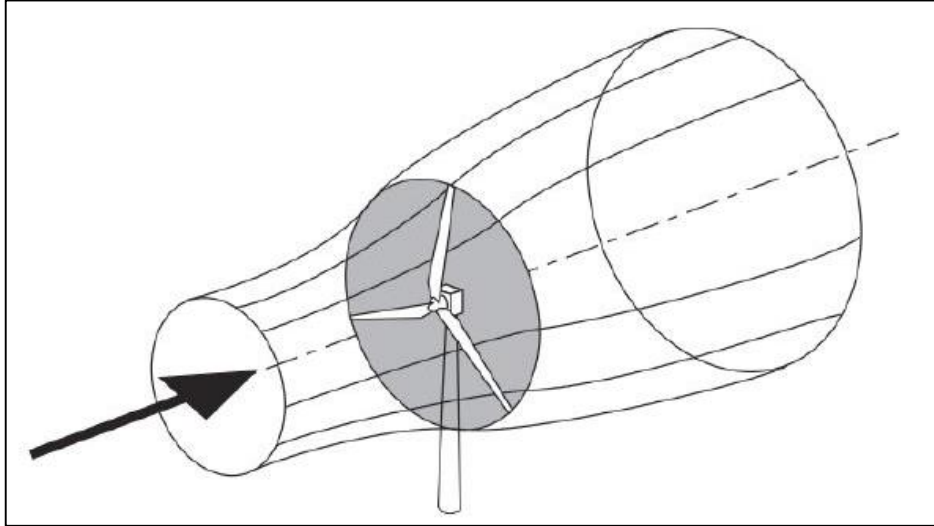


Figura 9. Modelo del disco actuante

Donde:

$a$  es el factor de inducción axial

Entonces se puede calcular el coeficiente de potencia como la máxima potencia que el aerogenerador puede extraer dividido por la potencia disponible en el viento:

$$C_p = \frac{\frac{1}{2}\rho_a A_T V^3 a(1-a)^2}{\frac{1}{2}\rho_a A_T V^3} = a(1-a)^2 \quad (15)$$

Derivando la expresión del coeficiente de potencia respecto del factor de inducción axial se obtiene:

$$\frac{dC_p}{da} = 4(1-a)(1-3a) \quad (16)$$

E igualando a cero para obtener el máximo:

$$4(1-a)(1-3a) = 0 \rightarrow a = 1/3 \rightarrow C_p \leq \frac{16}{27} \cong 59,3\% \quad (17)$$

Finalmente se puede expresar la potencia que un aerogenerador es capaz de generar como:

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho_a A_T V^3 \quad (18)$$

## 2.4 Curva de potencia de un aerogenerador

Generalmente no se utiliza la fórmula (18) para calcular la potencia que obtiene un aerogenerador, sino que es el propio fabricante el que proporciona los valores de la potencia producida para cada valor de la velocidad del viento, en una gráfica conocida como la curva de potencia/velocidad.

En estas curvas (ver Figura 10) se pueden identificar una serie de parámetros característicos, como son la velocidad de arranque, velocidad de parada, velocidad nominal y potencia nominal.

- La velocidad de arranque ( $v_d$ ) es la velocidad mínima que tiene que tener el viento para que el aerogenerador empiece a producir energía. Normalmente tiene un valor de entre 3 y 5 metros por segundo. No se empieza a producir energía para velocidades de viento menores porque no compensa.
- La velocidad de parada ( $v_{\infty}$ ) suele tener un valor de entre 25 y 30 metros por segundo. A pesar de que la energía que se obtendría para velocidades más grandes sería mucho mayor, esto no compensa porque los aerogeneradores tendrían que ser considerablemente más robustos para garantizar un funcionamiento seguro, con el coste que esto implica.
- La velocidad nominal ( $v_N$ ) es aquella a la que se empieza a producir la potencia nominal ( $P_N$ ) del aerogenerador. Las turbinas son diseñadas para ese valor de velocidad, que suele estar en el rango de 13 a 16 metros por segundo. Como se ha señalado en el punto anterior, para velocidades mayores no compensa aumentar la producción de energía, ya que serían necesarios aerogeneradores más robustos, y se procede a lo que se llama control de potencia. El control de potencia lo que hace es disminuir intencionadamente el rendimiento de la conversión de forma que se siga produciendo la potencia nominal.

## 2.5 Efecto estela

Cuando el viento atraviesa el rotor de un aerogenerador, sufre una pérdida de energía en forma de velocidad. Además, el viento adquiere un carácter turbulento debido a la interacción con las palas de la máquina. Este hecho no tiene ninguna consecuencia para el aerogenerador considerado, pero sí para aquellos que se encuentran aguas abajo de éste.

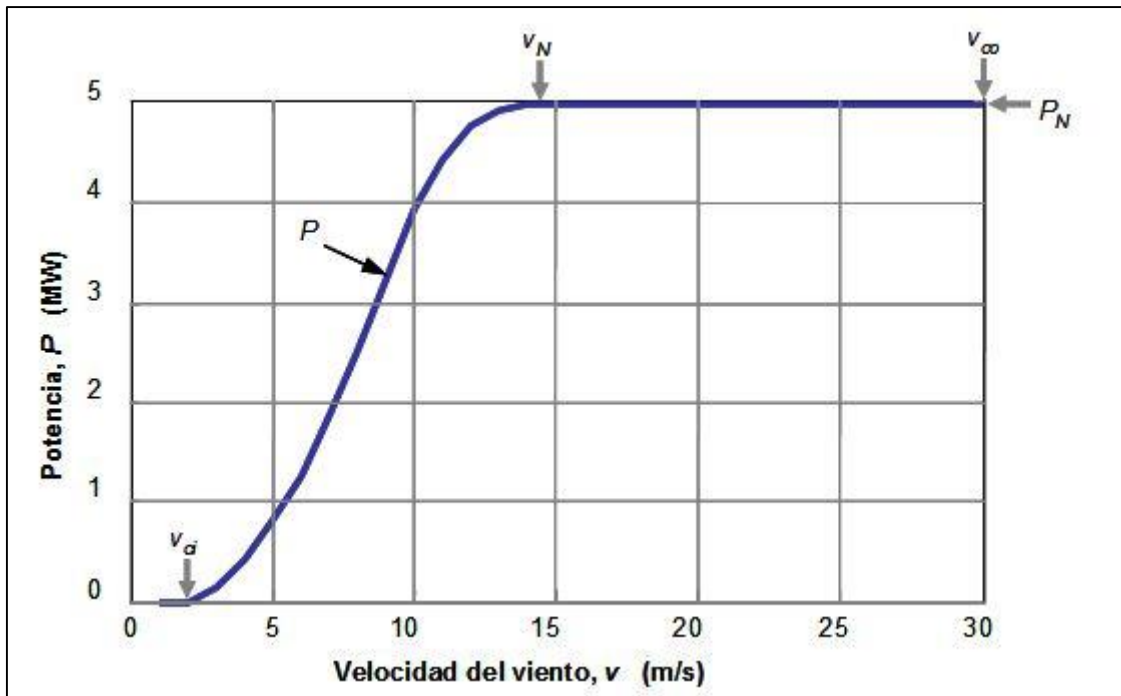


Figura 10. Curva de potencia/velocidad de un aerogenerador

En primer lugar, la reducción de velocidad supone que los aerogeneradores aguas abajo tengan una capacidad inferior de producción de energía. En segundo lugar, el carácter turbulento del viento provoca que las fuerzas ejercidas sobre las palas de los aerogeneradores sean mayores, lo que se traduce en una reducción considerable de la vida útil de las máquinas. En la figura 11 se representan ambos fenómenos. Es por esto que se torne de gran importancia el modelado de esta circunstancia que se conoce como la estela de un aerogenerador [19].

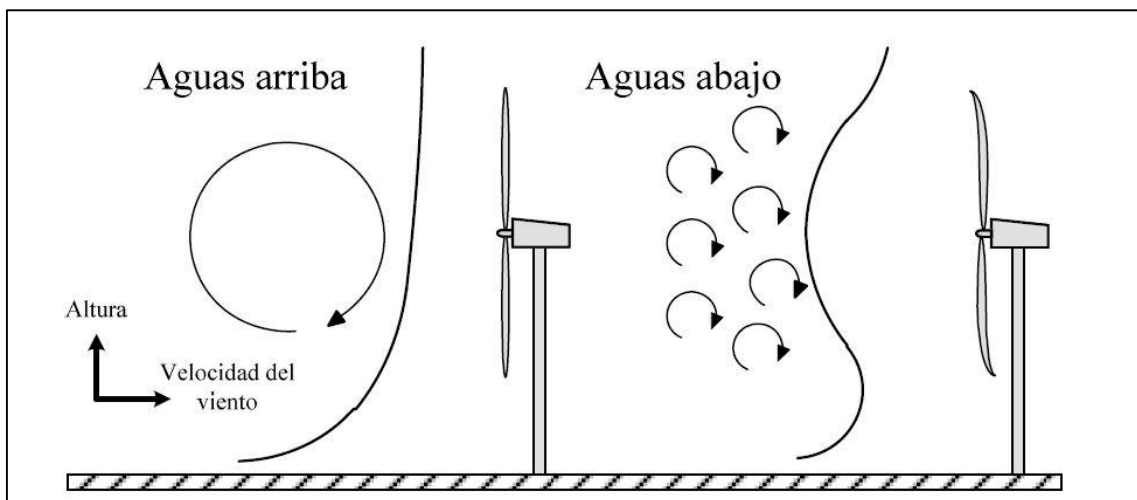


Figura 11. Interacción de la estela con el flujo de viento del ambiente

En la figura 12 se puede ver representado el flujo de aire que atraviesa el rotor de un aerogenerador. Se puede comprobar que, por el teorema de conservación de la masa, al disminuir la velocidad del aire que sale del aerogenerador, el área de la estela ( $A_{SHADOW}$ ) debe de aumentar para mantener el flujo másico de aire constante.

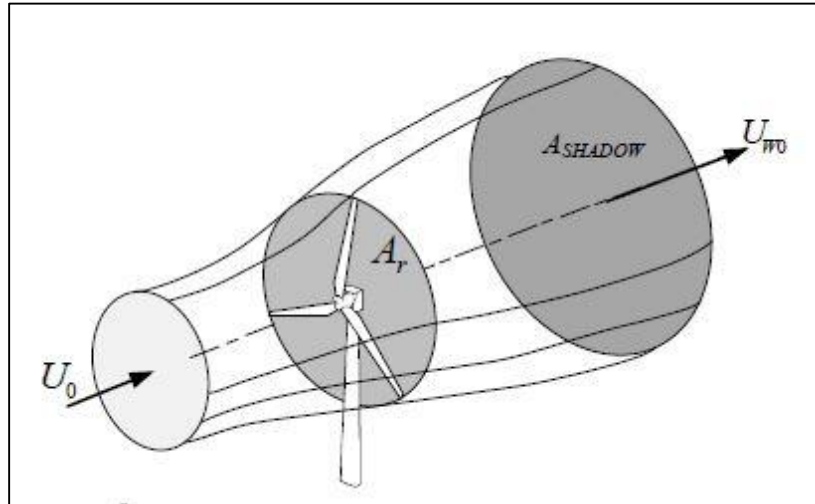


Figura 12. Representación de la estela de un aerogenerador

La velocidad del aire contenido en la estela puede ser calculada de la forma que se detalla en la expresión (19) [20]:

$$U_{w0}(d) = U_0 \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 - 2C_T(U_0) \left( \frac{D_r}{D_{SHADOW}(d)} \right)^2} \right) \quad (19)$$

Donde:

$d$  es la distancia desde la turbina hasta el punto en el que se quiera calcular la velocidad de la estela, según la dirección del viento incidente.

$U_0$  es la velocidad del viento incidente en la turbina.

$C_T(U_0)$  es el coeficiente de empuje adimensional, en función de la velocidad del viento incidente en la turbina.

$D_r$  es el diámetro del rotor del aerogenerador.

$D_{SHADOW}(d)$  es el diámetro de la estela a una distancia  $d$  del aerogenerador considerado.

En la práctica, al igual que en el caso de la curva de potencia, la relación coeficiente de empuje-velocidad del viento la suministra el fabricante de la turbina. Como puede apreciarse en la Figura 13, el coeficiente de empuje,  $C_T$ , presenta una alta dependencia de la velocidad del viento. El valor más alto aparece para la velocidad de comienzo de generación y, a medida que la velocidad del viento aumenta, el coeficiente de empuje es cada vez menor.

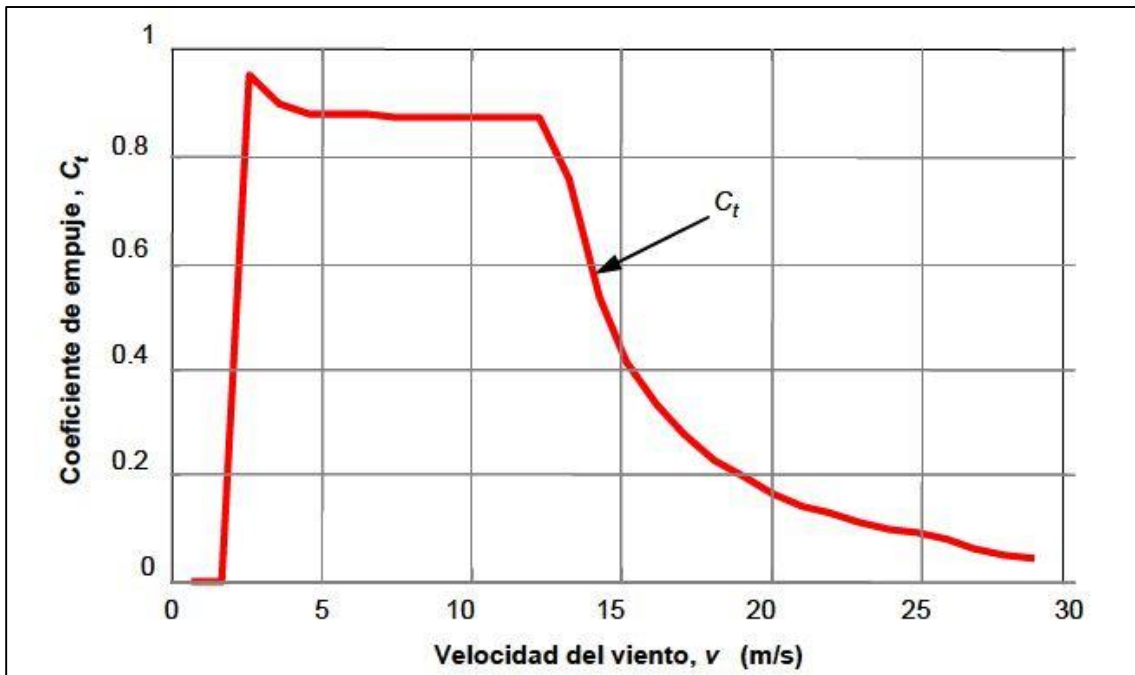


Figura 13. Ejemplo de curva coeficiente de empuje/velocidad

Por otra parte, es posible calcular el diámetro de la estela en función del diámetro del rotor de la máquina y de la distancia entre el aerogenerador y el punto en el que se pretende calcular la estela, como indica la expresión (20):

$$D_{SHADOW}(d) = D_r + 2 k_W d \quad (20)$$

Donde:

$k_W$  es el ángulo de expansión de la estela. Estudios anteriores [20] recomiendan valores del ángulo de expansión de la estela de 0.075 para parques eólicos terrestres y 0.05 para parques eólicos situados en el mar.

Sin embargo, la expresión (19) únicamente es válida cuando el área de sombra de un aerogenerador cubre totalmente el área del rotor de la turbina situada aguas abajo. Es

posible que dicha sombra sólo solape parcialmente el rotor del segundo aerogenerador, como se muestra en la figura 14:

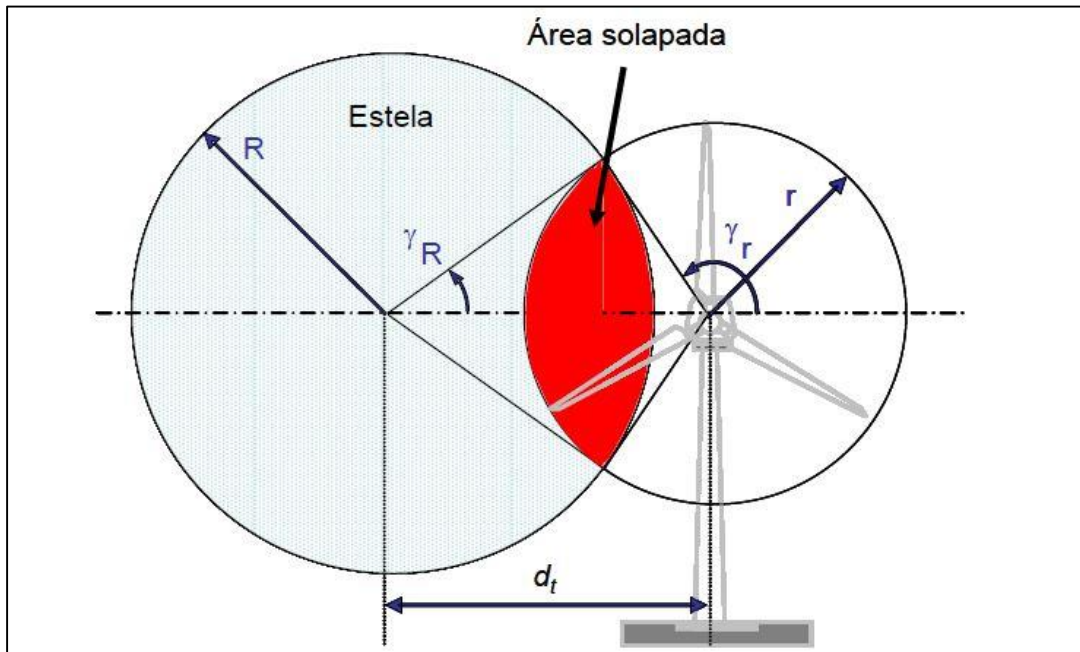


Figura 14. Ejemplo de solapa parcial entre la estela de un aerogenerador y el rotor del aerogenerador situado aguas abajo.

Para calcular el área sombreada de la figura 14, es necesario conocer las distancias que se muestran en la figura 15:

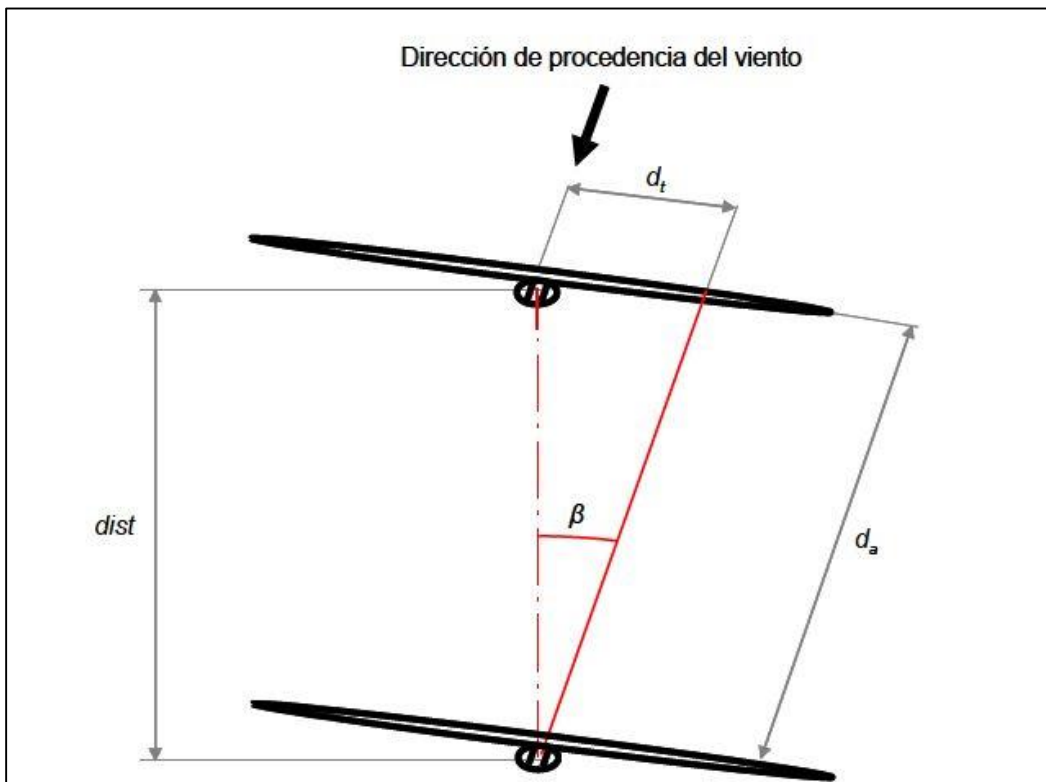


Figura 15. Esquema de las distancias axiales y transversales entre dos aerogeneradores

Donde:

$dist$  es la distancia entre los bujes de las turbinas

$\beta$  es el ángulo que forman la línea que une los centros de las turbinas y la dirección de procedencia del viento

Mediante estos dos parámetros es posible calcular la distancia transversal ( $d_t$ ) y la distancia axial ( $d_a$ ) como muestran las expresiones (21) y (22):

$$d_t = dist \cdot \text{sen}(\beta) \quad (21)$$

$$d_a = dist \cdot \text{cos}(\beta) \quad (22)$$

Para calcular el área solapada, es necesario conocer previamente los ángulos  $\gamma_R$  y  $\gamma_r$ :

$$\gamma_R = \text{COS}^{-1} \left( \frac{R^2 + d_t^2 - r^2}{2d_t R} \right) \quad (23)$$

$$\gamma_r = \text{COS}^{-1} \left( \frac{R^2 - d_t^2 - r^2}{2d_t R} \right) \quad (24)$$

Donde:

$R$  es el radio de la estela

$r$  es el radio del rotor del aerogenerador en estudio

La expresión (25) muestra el cálculo del área solapada:

$$A_{solapada} = R^2 \left( \gamma_R - \frac{\text{sen}(2\gamma_R)}{2} \right) + r^2 \left( \gamma_r - \frac{\text{sen}(2\gamma_r)}{2} \right) \quad (25)$$

Finalmente es posible determinar la pérdida de velocidad para el caso en que las estelas afectan de forma parcial:

$$\left( v_{estela\_parcial} - U_0 \right)^2 = \frac{A_{solapada}}{\pi r^2} \left( v_{estela} - U_0 \right)^2 \quad (26)$$

### 2.5.1 Influencia de varios aerogeneradores aguas arriba

En este caso se va a contemplar la situación en la que sean varios aerogeneradores los que den sombra a otro situado aguas debajo de estos. En particular, considérense seis aerogeneradores denominados: a, b, c, d, e y f como se muestra en la figura 16.

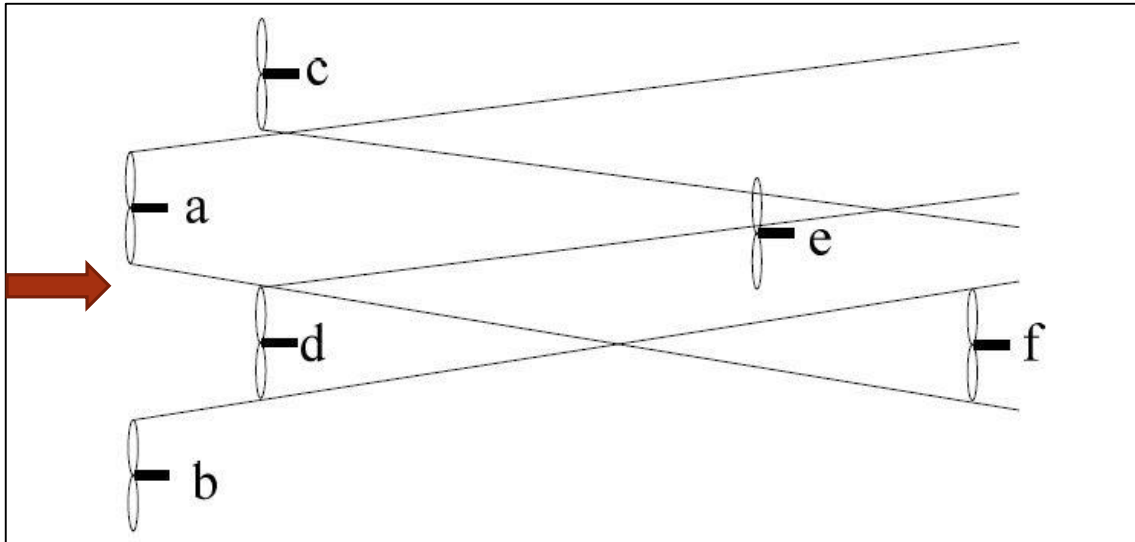


Figura 16. Influencia de varios aerogeneradores aguas arriba

Supóngase que el viento no perturbado llega a este parque eólico con la dirección que marca la flecha de la figura 16. Entonces, se puede comprobar que el aerogenerador “e” es afectado por las sombras de “a” completamente y por las sombras de “c” y “d” parcialmente. Por su parte, el aerogenerador “f” es afectado completamente por las sombras de “a”, “b” y “d”. Nótese que el área de sombra de un aerogenerador se incrementa cuando aumenta la distancia con el aerogenerador situado aguas abajo.

De forma general, el cálculo de la pérdida de velocidad cuando un aerogenerador es afectado por las estelas de más de uno se muestra en la expresión (27):

$$\left(v_{estela\_total} - U_0\right)^2 = \sum_{i=1}^{N_t} \frac{A_{solapada\_i}}{\pi r^2} \left(v_{estela\_i} - U_0\right)^2 \quad (27)$$

Finalmente, es posible calcular la producción de energía anual de un parque eólico a partir de la expresión (28):

$$E_{PE} = k_{dis} \cdot T \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_s} p_{ij} \int_{v_{ci}}^{v_{co}} P_{Gen}(v_{ijestela}) p(v_{ijestela}) dv \quad (28)$$



Donde:

$k_{dis}$  es el coeficiente de disponibilidad, debido a reparaciones, mantenimiento, etc.

$T$  son las horas anuales, con valor de 8760 horas.

$N_t$  es el número de turbinas que componen el parque.

$N_s$  es el número de sectores circulares en los que se ha dividido la rosa de los vientos.

$p$  representa la probabilidad de ocurrencia de una dirección de viento determinada o bien de una determinada velocidad de viento para una determinada dirección.

$V_{ci}$  es la velocidad de arranque de los aerogeneradores.

$V_{co}$  es la velocidad de parada de los aerogeneradores.

$P_{Gen}$  son los valores de la curva de potencia de los aerogeneradores.

$V_{estela}$  es la velocidad del viento incluyendo el efecto de la estela.

# Capítulo III. Metodología

## 3.1 Algoritmos de optimización

En general, las técnicas de optimización se pueden dividir en dos categorías: algoritmos deterministas y algoritmos estocásticos [20]. Los algoritmos deterministas siguen un proceso riguroso, ya que tanto el camino seguido durante la optimización como el valor que toman sus variables de diseño se repetirán si se parte de las mismas condiciones iniciales. Por otro lado, los algoritmos estocásticos siempre tienen una componente aleatoria. Los algoritmos genéticos son una buena muestra de un algoritmo estocástico. El conjunto de soluciones contenido en la población será diferente cada vez que se realiza la optimización. Sin embargo, las soluciones finales pueden ser las mismas o muy parecidas. Es decir, a pesar de que el algoritmo alcance la misma solución los caminos recorridos pueden ser muy diferentes durante el proceso de optimización.

La mayoría de los métodos convencionales o clásicos son deterministas. Por ejemplo, el método simplex de programación lineal es determinista. Algunas técnicas de optimización determinista utilizan el gradiente para realizar la búsqueda del óptimo. Por ejemplo, el método de Newton-Raphson se basa en el gradiente, ya que usa el valor de la función y su derivada. Sin embargo, este tipo de algoritmos no tienen un comportamiento adecuado cuando existen discontinuidades en la función objetivo. O cuando lo que se quiere optimizar es el resultado de un proceso del que no se dispone de una expresión analítica. En este caso, es preciso recurrir a algoritmos no basados en el gradiente. Este tipo de algoritmos únicamente hacen uso del valor de la función objetivo.

Por otro lado, los algoritmos estocásticos se diferencian en dos tipos: heurísticos y metaheurísticos. A grandes rasgos, los algoritmos heurísticos son aquellos que utilizan técnicas de prueba y error para el cálculo de una solución de calidad en un tiempo razonablemente reducido. Este tipo de algoritmos son adecuados para aquellos problemas en los que no es preciso alcanzar la solución óptima global.

Los algoritmos metaheurísticos corresponden a una evolución de los algoritmos heurísticos. Como característica general de este tipo de algoritmos cabe destacar la existencia de un intercambio de información durante el proceso de búsqueda aleatoria del

óptimo, que permite orientar dicho proceso de búsqueda hacia las regiones donde potencialmente se encuentran las soluciones de mayor calidad. En la figura 17 puede apreciarse una clasificación de los algoritmos de optimización en función de su propia naturaleza [21].

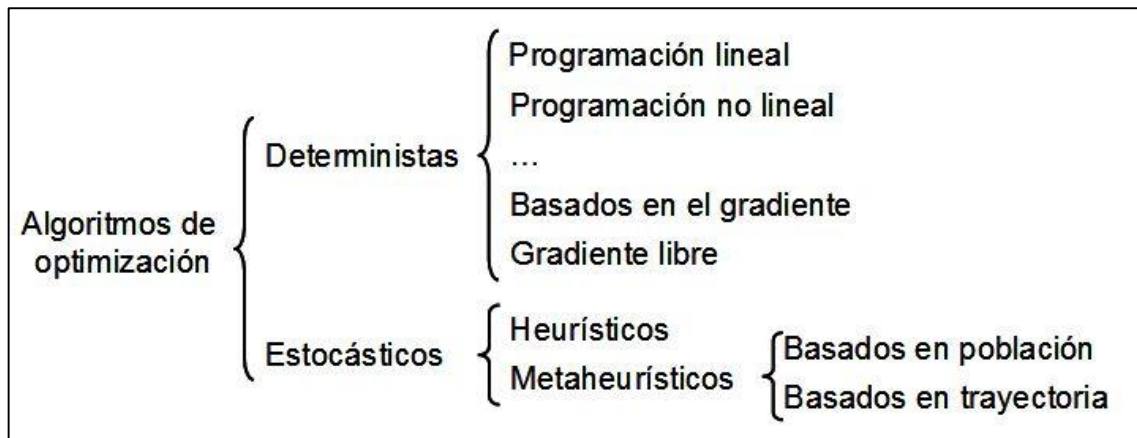


Figura 17. Clasificación de los algoritmos de optimización

A la hora de seleccionar el método de optimización más adecuado para afrontar un determinado problema resulta fundamental analizar las propiedades de la función objetivo. Especial atención merece la propiedad de que dicha función pueda ser expresada de forma analítica y sus condiciones de derivabilidad a lo largo del dominio sobre el que se pretende realizar la optimización.

En la evaluación de la función objetivo del problema tratado en este trabajo están implicadas tanto variables discretas como continuas, debido a la propia naturaleza de los datos de entrada. Por otro lado, la función objetivo no puede ser expresada en su totalidad de forma analítica por lo que su evaluación es el resultado de un proceso y, por tanto, no es posible obtener información acerca de su derivada. Además, existen diferentes restricciones como rangos de valores no permitidos para algunas variables o limitaciones de carácter técnico que únicamente pueden ser gestionadas mediante la evaluación de la función objetivo o funciones auxiliares.

Todo ello lleva a que el problema no sea abordable mediante los algoritmos de optimización clásicos, por tanto es necesario recurrir a los algoritmos de optimización metaheurísticos, como muestran los trabajos desarrollados anteriormente sobre el problema planteado [22], [23], [24]-[38].

### **3.1.1 Técnicas metaheurísticas de optimización**

Las técnicas metaheurísticas de optimización más frecuentemente utilizadas en la resolución de problemas de planificación son los algoritmos genéticos, el recocido simulado, sistemas de colonias de hormigas, búsqueda tabú y optimización por enjambre de partículas. Estos métodos se caracterizan por su facilidad de implementación y su capacidad de búsqueda de la solución óptima en situaciones en la que los métodos de optimización clásicos no pueden ser aplicados. A continuación se presentan los algoritmos genéticos, que es el método elegido para la realización de este trabajo.

La principal ventaja de los algoritmos metaheurísticos es que son conceptualmente simples. Parten de una solución inicial —generada habitualmente de forma aleatoria— seguido de un conjunto de modificaciones aplicadas iterativamente en búsqueda del óptimo. La calidad de cada una de las posibles soluciones es asignada mediante un valor numérico que permite comparar entre sí el conjunto de soluciones. Además, no es necesario conocer mayor información acerca del comportamiento de la función objetivo en el campo de búsqueda, en particular, sobre la derivabilidad de la función y el cálculo de su gradiente.

#### **Algoritmos genéticos**

Los algoritmos genéticos son una familia de técnicas metaheurísticas de optimización, usados con éxito en muchas aplicaciones de gran complejidad. Fueron inicialmente propuestos por Fraser [39], [40] y posteriormente por Bremermann [41] y Reed et al. [42]. Sin embargo, es el trabajo de Holland [43] el que popularizó su uso y por ello Holland es habitualmente conocido como el padre de los algoritmos genéticos.

Los algoritmos genéticos operan sobre una población de individuos. Cada individuo es una potencial solución de un problema dado y puede ser codificado como una cadena de números binarios, de números reales o incluso cadenas de caracteres. Después de la generación de la población inicial (de forma aleatoria o heurística) el algoritmo hace evolucionar a la población secuencial e iterativamente, mediante la aplicación de tres operadores: selección, cruce y mutación.

Para problemas de optimización que involucran un gran número de variables es posible incorporar soluciones iniciales basadas en el conocimiento previo del usuario. Sin

embargo, este procedimiento no puede ser aplicado junto con una reducción drástica del tamaño de la población, ya que puede desencadenar en la convergencia del algoritmo en un óptimo local. Normalmente, el tamaño de la población se selecciona en función de la longitud del cromosoma (que está directamente relacionado con el número de variables del problema).

La ejecución de un algoritmo genético consiste básicamente de dos etapas. Inicialmente, partiendo de la población existente en punto determinado de la evolución, se realiza la selección de una nueva subpoblación. Seguidamente se efectúan las operaciones de cruce y mutación creando una nueva generación de soluciones potenciales.

Por otro lado, resulta esencial una codificación apropiada del individuo, ya que ésta afecta notablemente a la capacidad del algoritmo de alcanzar la solución óptima. Otro aspecto que resulta de vital importancia es la selección adecuada de las tasas de cruce y mutación. Una tasa elevada de cruce conllevaría a una saturación de la población (la mayoría de los individuos tendrían carga genética similar) y, por tanto, las probabilidades de convergencia en un óptimo local aumentarían. Por otro lado, una tasa de mutación excesivamente alta equivaldría a una búsqueda prácticamente aleatoria.

Los algoritmos evolutivos pueden aplicarse a cualquier problema que pueda ser formulado como una función o una tarea de optimización. Es necesaria una estructura de datos para representar las soluciones, un indicador de la aptitud de cada una de las soluciones, y diferentes operadores que generen nuevas soluciones a partir de las antiguas. El conjunto del espacio de búsqueda puede ser no convexo y poseer zonas no permitidas. Además, tienen la capacidad de tratar con problemas definidos tanto por variables continuas como por variables enteras o por ambos tipos simultáneamente.

### **3.2 Evaluación económica de un parque eólico**

El objetivo del problema planteado en este trabajo es realizar el diseño óptimo de un parque eólico en función de un criterio económico. Para ello, se propone uno de los criterios más utilizados a la hora de evaluar el comportamiento económico de proyectos de inversión, el criterio de máximo Valor Actual Neto (VAN). Dicho criterio consiste en actualizar al momento inicial todos los flujos de caja existentes durante el tiempo de vida útil del proyecto. La expresión general empleada para su cálculo es:

$$VAN = -I_0 + \sum_{k=1}^{TV} \frac{FC_k}{(1+i)^k} \quad (29)$$

Donde

$I_0$  es la inversión inicial

$TV$  es la vida útil del proyecto expresada en años

$i$  es la tasa de interés

$FC_k$  son los flujos de caja obtenidos en el año k-ésimo

A grandes rasgos, la inversión necesaria para la puesta en funcionamiento de un parque eólico puede dividirse en tres conceptos bien diferenciados:

- Inversión en aerogeneradores
- Inversión en obra civil
- Inversión en instalación eléctrica

La adquisición de turbinas es el concepto que representa una mayor relevancia a la hora de acometer el proyecto. Este factor depende únicamente del modelo de aerogenerador y del número de máquinas a instalar en el parque. Por su parte, la inversión en obra civil depende principalmente de los costes de cimentación y de ejecución de los caminos de accesos auxiliares. Por último, el diseño de la instalación eléctrica está condicionada por diversos factores como la potencia nominal de los aerogeneradores, energía producida, costes de los equipos, distancia al punto de conexión, etc.

Por otro lado, el término correspondiente a los flujos de caja representa los ingresos obtenidos debido a la producción y venta de la energía generada en el parque eólico. Por tanto, los flujos de caja son función de las condiciones de viento existentes en el emplazamiento, del número de turbinas del parque y de su posición relativa, ya que este último concepto condicionará las pérdidas de producción por el efecto de las estelas y pérdidas en la propia instalación eléctrica.

### **3.3 Metodología propuesta**

La metodología propuesta consiste en dos algoritmos genéticos anidados. El algoritmo principal tiene como objetivo el cálculo óptimo de la posición, tipo y altura de cada uno de los aerogeneradores. Para ello, se empleará el VAN del proyecto como criterio económico. Para cada uno de los individuos del algoritmo principal (una posible configuración de aerogeneradores) es relativamente sencillo determinar la mayoría de los términos correspondientes a la expresión de cálculo del VAN. Sin embargo, los términos correspondientes a la instalación eléctrica (inversión inicial y pérdidas) han de ser calculados teniendo en cuenta el diseño óptimo de dicha instalación. Por este motivo se propone un algoritmo de optimización secundario para acometer el diseño óptimo de la infraestructura eléctrica que ha de ser ejecutado para cada uno de los individuos del algoritmo principal. El empleo de un algoritmo secundario implica un elevado coste computacional, ya que sería preciso ejecutar el algoritmo secundario para cada potencial solución del problema. Para ello, se ejecuta el algoritmo secundario únicamente cuando el algoritmo principal ha alcanzado un cierto grado de evolución. Es decir, durante las primeras generaciones (en las que la bondad de los individuos todavía se encuentra distante del óptimo, ya que dichos individuos tienen una fuerte componente aleatoria) no se realiza el cálculo de la instalación eléctrica. Mediante este enfoque es posible reducir, en la medida de lo posible, el tiempo de ejecución del algoritmo, aunque se incurre en el riesgo de comprometer la calidad de la solución óptima en el caso de que el algoritmo secundario sea introducido demasiado tarde.

### **3.4 Presentación del programa**

La finalidad de este trabajo es desarrollar una herramienta informática que sea capaz de realizar de forma eficiente la planificación óptima de parques eólicos con restricciones de ruido. Para ello ha sido necesario realizar un estudio exhaustivo de una aplicación creada con anterioridad [1], con el fin de ser modificada para alcanzar los objetivos propuestos. Conocer todas las variables involucradas en el problema, así como las funciones definidas y la forma en la que éstas están relacionadas entre sí es un proceso lento pero indispensable para dar solución al problema planteado.

### 3.4.1 Algoritmo principal

A continuación se describe el algoritmo previo y cómo se ha modificado para obtener la configuración óptima del parque eólico con restricciones de ruido. Dicho algoritmo realiza una búsqueda heurística de la mejor solución, tomando como criterio de evaluación la maximización del valor actual neto (VAN).

Como se ha señalado anteriormente, los algoritmos evolutivos son técnicas robustas de búsqueda del óptimo que operan imitando los mecanismos de selección natural observados en la naturaleza [44], [45]. Este tipo de algoritmos trata de resolver problemas cuya estructura contiene una función objetivo,  $y = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , que se quiere maximizar o minimizar y está sujeta a una serie de restricciones. La función objetivo,  $F$ , proporciona una medida de la bondad (*fitness*) o grado de excelencia de cada individuo como potencial solución del problema. Así, se realizará una codificación del problema que permita tener en forma de vector cada una de las posibles soluciones (individuo), de manera que el conjunto de soluciones posibles (población) vaya evolucionando tras cada iteración (generación).

El algoritmo parte de la población inicial compuesta por un conjunto de individuos que pueden ser generados de forma aleatoria o mediante técnicas heurísticas. A continuación se procede a la evaluación de dicha población inicial, en base a la cual, se realiza la selección de los individuos que van a participar en el cruce y la mutación en función de su fitness. El operador de cruce se aplica sobre dos individuos (padres), que son combinados formando nuevos individuos (hijos) correspondientes a una mezcla entre los genes de sus padres. El operador de mutación actúa sobre un individuo modificando uno o más genes de forma aleatoria. Cuando la población está confinada en torno al máximo local, este operador es clave para una eventual salida de la zona de atracción de dicho máximo, con lo que se potencia que el algoritmo evolucione hacia el óptimo global.

Tras la evaluación de los nuevos individuos surgidos de las operaciones de cruce y de mutación aquellos que merezcan —en base a su fitness— ser incluidos en la población reemplazarán a los antiguos individuos, formando así una nueva población.

El proceso se repite de forma iterativa hasta que durante un número determinado de generaciones, establecido por el parámetro de convergencia, el algoritmo no haya conseguido una mejora sobre la mejor solución.

### 3.4.2 Modificaciones realizadas en el algoritmo principal



El algoritmo principal está estructurado de la siguiente forma:

- Función ‘algevo’
  - Definición de las variables globales
  - Lectura de los datos de entrada al programa
  - Generación de la población inicial
  - Bucle principal
    - Cálculo del fitness de la población
    - Aplicación de los cruces, mutaciones y almacenamiento de la nueva población en una población auxiliar
    - Cálculo del fitness de la población auxiliar
    - Clasificación de los individuos de la población auxiliar en función de su fitness
    - Generación de la nueva población
    - Actualización de las gráficas interactivas
  - Fin del bucle principal
    - Generación de las gráficas y del informe final

En primer lugar, dentro de la lectura de datos de entrada, ha sido necesario añadir la lectura de las restricciones de ruido. Esto se hace mediante la función ‘leeruido’. Las restricciones de ruido se definen en un documento Excel denominado ‘opciones.xls’ junto con el resto de parámetros de entrada al programa. Seguidamente, el documento ofrece mediante una macro la posibilidad de guardar todos los datos en documentos de texto. Una vez convertidos en ficheros de texto, el programa es capaz de leerlos y almacenarlos en las variables correspondientes.

La segunda modificación afecta a la función objetivo, dentro del cálculo del fitness. La función objetivo ‘objfun’ es la que se encarga de, para un individuo en concreto, calcular el VAN de su inversión. Es decir, calcula la inversión en aerogeneradores, el coste de la obra civil, la inversión del trazado eléctrico y el coste de transporte. Es en este punto en el que se incluye el cálculo del ruido, realizado por la función ‘calculo\_ruido’. La metodología es la que sigue: la función ‘calculo ruido’ recibe como entrada un individuo, es decir, un conjunto de aerogeneradores y sus posiciones dentro del parque eólico, y

devuelve el mapa de ruido del parque. Recuérdese que el cálculo de la propagación del ruido fue estudiado en el capítulo 2 del presente trabajo.

La determinación del mapa de ruido se hace de la siguiente manera: para cada uno de los aerogeneradores que componen el parque se calcula el mapa de ruido que individualmente producen en el terreno. Para ello se aplica la ecuación (3). A continuación se muestra un ejemplo: supóngase un parque compuesto por dos aerogeneradores, uno situado en la posición (4,3) y otro en la (5,5). La figura 18 muestra el mapa de ruido producido por el primer aerogenerador y la figura 19 el mapa de ruido del segundo.

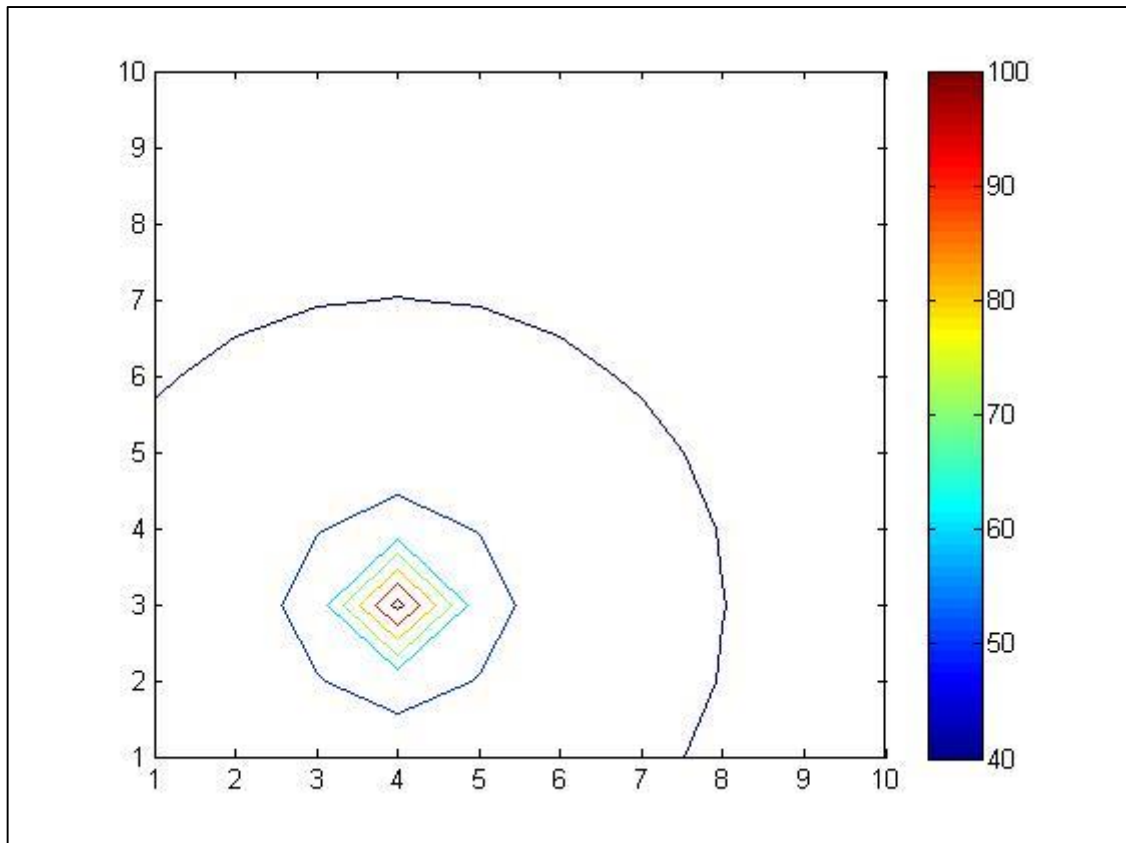


Figura 18. Mapa de ruido del aerogenerador (4,3)

Una vez calculado el mapa de ruido de cada uno de los aerogeneradores, es posible determinar en cada punto el ruido total producido mediante la expresión (5). De esta forma se puede elaborar el mapa de ruido total que se muestra en la figura 20.

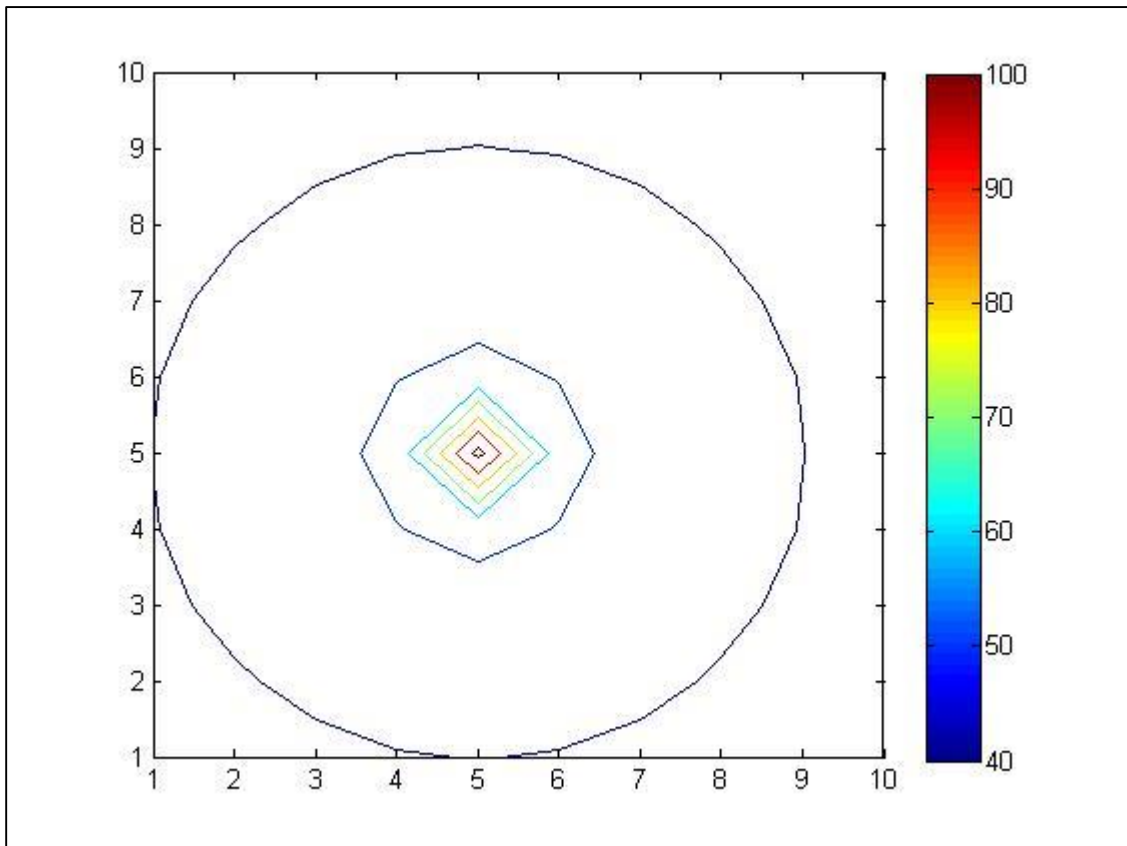


Figura 19. Mapa de ruido del aerogenerador (5,5)

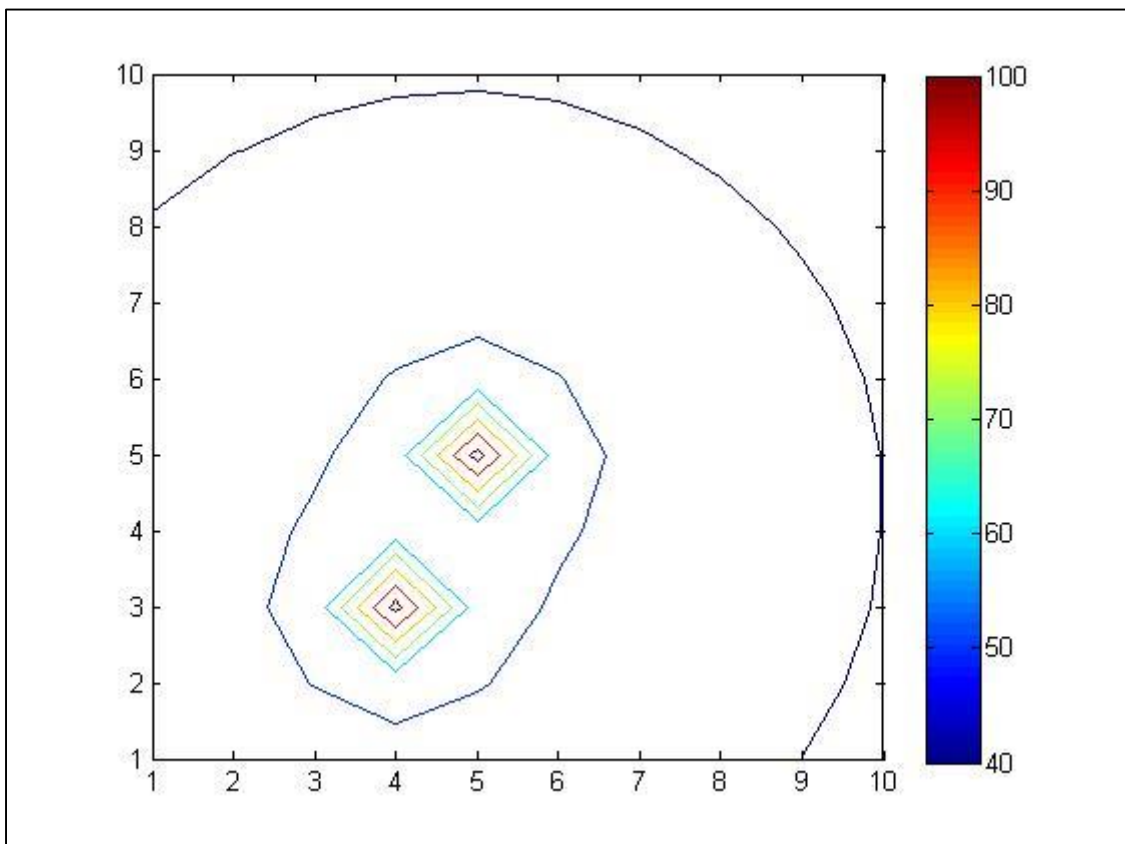


Figura 20. Mapa de ruido total

Una vez determinado el mapa de ruido total, dentro de la función objetivo se hace una comparación entre el ruido total producido en cada punto del parque y el límite impuesto por las restricciones también para cada punto. El exceso de ruido se almacena en una variable denominada ‘ $\Delta$ Ruido’ que penalizará el VAN del individuo correspondiente, tal y como muestra la expresión (30):

$$VAN = -I_0 + \sum_{k=1}^{TV} \frac{FC_k}{(1+i)^k} - 100000000 \cdot \Delta Ruido \quad (30)$$

De esta forma, los individuos que incumplan las restricciones de ruido impuestas por el usuario son duramente penalizados, y el algoritmo evolucionará hacia aquellos individuos que sí respetan los límites establecidos. Nótese que la constante que multiplica la variable ‘ $\Delta$ Ruido’ en la expresión (30) es muy grande para que la penalización sea excesiva, ya que el no cumplimiento de las leyes de contaminación acústica acarrearían multas que afectarían al VAN del proyecto.

Por último, se han hecho las modificaciones oportunas para mostrar tanto en las figuras interactivas como en las figuras relativas a la mejor solución el mapa de ruido del parque, así como un mapa de excesos de ruido, que permite comprobar si en algún punto del terreno el nivel de ruido supera las restricciones impuestas.

### 3.4.3 Codificación del individuo

Cada potencial solución (individuo) se codifica de modo que queden definidos todos los parámetros de manera unívoca empleando para ello una notación numérica entera:

- La posición de cada aerogenerador,  $X_k$  e  $Y_k$
- El tipo de aerogenerador,  $T_k$
- La altura de la torre de cada aerogenerador,  $H_k$ .

	<b>Turbina 1</b>	<b>Turbina 2</b>		<b>Turbina <math>k</math>-ésima</b>
Coordenada $X$	$X_1$	$X_2$	...	$X_k$
Coordenada $Y$	$Y_1$	$Y_2$	...	$Y_k$
Tipo de turbina	$T_1$	$T_2$	...	$T_k$
Altura de la torre	$H_1$	$H_2$	...	$H_k$

Tabla 7. Codificación de los individuos

En la tabla 7 se muestra el esquema de la codificación empleada. Cada individuo queda caracterizado en forma de matriz. Cada elemento de ésta es denominado gen. Las dos primeras filas de dicha matriz representan las coordenadas de la posición geográfica de cada turbina, la tercera fila corresponde al tipo de aerogenerador, mientras la última representa la altura. Hay que destacar que el número de columnas puede ser variable dependiendo del número de aerogeneradores que sean considerados en cada individuo.

### 3.4.4 Operador de selección

El objetivo del operador de selección es determinar aquellos individuos que van participar en las operaciones de cruce y mutación. La operación consiste en asignarle a cada uno de los individuos una probabilidad de selección ponderada según el *fitness* o bondad de dicho individuo. De esta forma, aquellos individuos con mayor bondad tendrán una probabilidad de ser seleccionados mayor que aquellos cuya bondad sea menor. Este método de selección se denomina ruleta debido a su similitud con la ruleta de un casino donde la probabilidad de que una determinada combinación sea agraciada es proporcional al sector que dicha combinación abarca en la propia ruleta (Figura 21).

El objetivo de realizar la selección de individuos mediante una selección elitista como la selección por ruleta es aumentar la probabilidad de obtener una mejora sobre la población actual, ya que es de esperar un mayor éxito al realizar las operaciones de cruce y mutación sobre individuos con una mayor bondad.

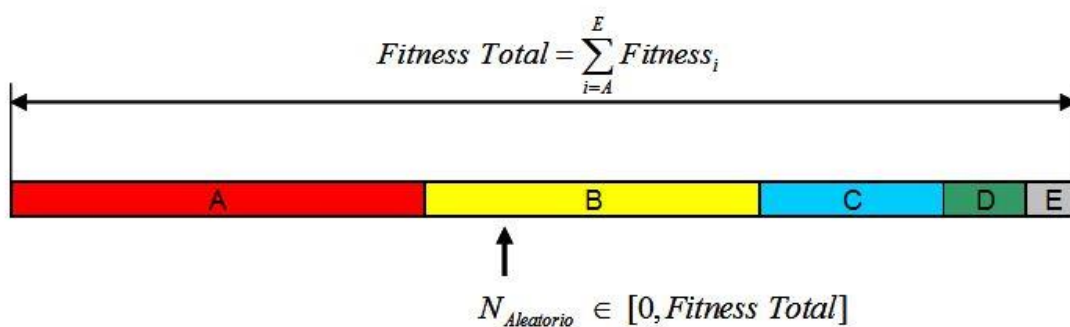


Figura 21. Ejemplo de selección mediante el método de la ruleta

### 3.4.5 Operador cruce

La operación de cruce es la herramienta principal que permite la evolución de la población hacia la solución óptima. El fundamento de este operador consiste en recombinar los

genes de dos individuos (padres) para formar otros dos nuevos individuos (hijos). La mezcla de las cualidades de ambos padres tiene como objetivo la obtención de individuos que potencialmente puedan superar la calidad de los existentes en la población actual.

Los padres se seleccionan de manera aleatoria en base a su bondad, según el operador de selección. Por otro lado, es importante señalar que el cruce ha de ser realizado con cautela, ya que un uso excesivo de este operador puede conducir a una pérdida de diversidad y, por tanto, la capacidad de búsqueda del óptimo global del algoritmo puede verse comprometida. Con el objetivo de controlar el número de cruces realizados en cada generación, se ha incluido un parámetro denominado *probabilidad de cruce*. De modo que una vez seleccionados los padres, la operación se llevará a cabo sólo si un número elegido al azar supera el valor del citado parámetro.

En este trabajo se han implementado los cinco tipos de cruce específicos para el problema de diseño óptimo de parques eólicos desarrollados por J. Castro et al. [25]:

- *Cruce simple*. Consiste en seleccionar un punto de corte para cada uno de los atributos existentes en la codificación del individuo, es decir: coordenada geográfica según el eje de ordenadas, coordenada geográfica en el eje de abscisas, altura de la torre y tipo de aerogenerador. Por tanto, una vez seleccionados los cuatro puntos de corte, se procede a la recombinación de los genes de ambos padres.
- *Cruce media*. Los hijos son generados calculando la media aritmética de las cualidades individuales de cada padre. El objetivo de este cruce es reducir el número de aerogeneradores de los individuos existentes en la población conservando, en la medida de lo posible, los atributos de los padres.
- *Cruce unión*. Los hijos se generan a partir de la unión de los cromosomas de ambos padres. En este caso, al contrario de lo que ocurre con el *cruce media*, el objetivo es aumentar el número de aerogeneradores de los individuos existentes en la población.
- *Cruce unión mixto*. Se seleccionan los puntos de corte correspondientes a cada uno de los atributos y, posteriormente, se unen las dos submatrices primeras para formar el primer hijo y las segundas submatrices para generar el segundo hijo.
- *Cruce intercambio*. El primer paso consiste en seleccionar aleatoriamente los genes que van a ser intercambiados entre ambos individuos. Posteriormente, se procede a realizar dicho intercambio elemento a elemento. El objetivo de este tipo

de cruce es permitir el intercambio de la carga genética de ambos padres independientemente de la disposición de los genes en el propio individuo.

Una vez seleccionados ambos padres, la selección del tipo de cruce a efectuar se realiza de forma aleatoria, de manera que durante el proceso evolutivo la repercusión de cada tipo sea la misma.

### **3.4.6 Operador mutación**

La mutación es el operador que permite la evolución cuando la población está estancada en torno a un máximo local, permitiendo continuar la prospección del espacio de soluciones en busca del máximo global.

Al igual que en la operación de cruce, se aplica el operador *selección* para elegir los individuos que van a ser mutados. De esta forma, la operación será realizada preferentemente sobre los individuos de mayor *fitness*. Por otro lado, también es importante señalar que un uso intensivo del operador de mutación sería semejante a una búsqueda aleatoria y, por tanto, requeriría la evaluación innecesaria de un elevado número de individuos, retardando la ejecución del algoritmo. Por ello, se ha introducido un parámetro denominado *probabilidad de mutación* que permite controlar el número de mutaciones realizadas en cada generación.

Una vez seleccionado el individuo, el primer paso consiste en la selección aleatoria de los genes a mutar. El número de genes que van a ser mutados sobre un individuo debe ser moderado, ya que el objetivo es realizar pequeñas modificaciones aleatorias que potencialmente permitan continuar con la búsqueda del óptimo global. Por ello, en este trabajo el número de mutaciones a realizar sobre un mismo individuo se ha limitado como máximo a una por cada atributo del individuo (coordenadas geográficas, altura de la torre y tipo de aerogenerador).

### **3.4.7 Restricciones gestionadas por el algoritmo principal**

El algoritmo de optimización principal tiene la capacidad de gestionar un conjunto de restricciones que, por un lado, tienen como objetivo asegurar la generación de soluciones factibles y, por otro lado, permiten abordar el problema de posicionamiento óptimo de las turbinas de una forma realista.

Las restricciones relativas a la generación de soluciones factibles se gestionan mediante operaciones regenerativas después de las operaciones de cruce y mutación. De esta forma, se corrigen las posibles incongruencias existentes en los individuos, dando lugar a individuos potencialmente aptos para formar parte de la nueva población. En este sentido las restricciones que gestiona el algoritmo son:

- *Turbinas en la misma posición.* Como resultado de las operaciones de cruce y de mutación es posible que un mismo individuo contenga varios aerogeneradores en una misma posición. Sin embargo, resulta incuestionable que en la práctica esta situación no es posible. Por ello la operación correctiva consiste en la identificación de aerogeneradores repetidos y, posteriormente, modificación aleatoria de la posición de uno de ellos hasta que se sitúe en una posición factible.
- *Límites de las variables.* Los valores de cada uno de los genes han de estar comprendidos entre unos determinados límites, en función del atributo que represente dicho gen. Por un lado, aquellos genes que correspondan a las coordenadas geográficas de los aerogeneradores han de tener valores que estén comprendidos dentro de las dimensiones del terreno. Por otro lado, los genes correspondientes al tipo de aerogenerador han de ser acordes con el número de aerogeneradores existentes en la base de datos que se esté considerando para el caso concreto estudiado. Finalmente, los genes correspondientes a la altura de la torre también tienen que estar comprendidos entre unos determinados límites de altura máxima y mínima que, a su vez, están también relacionados con el tipo de aerogenerador correspondiente. El algoritmo regenerativo opera de forma similar al caso de turbinas repetidas, identificando las posibles incongruencias y mutando los genes correspondientes hasta que alcancen un valor apropiado.

Por otro lado, las restricciones introducidas sobre las características propias del diseño del parque eólico son:

- *Gestión de los niveles de ruido emitidos.* El algoritmo ofrece la posibilidad de establecer restricciones de ruido, para que la solución obtenida cumpla en todo momento la normativa sobre contaminación acústica. Este aspecto permite ubicar una zona residencial cercana al parque eólico, y diseñar este último de forma que se respeten los límites de ruido definidos para ese tipo de situaciones.



- *Gestión de zonas prohibidas.* Es posible que, por diferentes razones, no sea viable la ubicación de aerogeneradores en determinadas posiciones. Por ello, se ha introducido en el algoritmo la capacidad de administrar este tipo de restricciones. En este caso también se ha implementado un algoritmo regenerativo que localiza y modifica la posición de aquellos aerogeneradores ubicados en zonas no permitidas. Por otro lado, también es importante señalar que mediante la inserción de esta restricción es también posible el tratamiento de parcelas cuyos límites constituyen formas geométricas complejas.
- *Limitación del máximo número de aerogeneradores.* Es habitual que en la implantación de proyectos eólicos, la capacidad máxima a instalar esté limitada por la legislación correspondiente y, por tanto, este límite afecta también al número de aerogeneradores a implantar en una determinada parcela. De nuevo, esta restricción se trata de forma correctiva mediante un algoritmo regenerativo que elimina al azar el excedente de turbinas, en el caso de que lo hubiera, en un determinado individuo.
- *Limitación de la inversión inicial.* El capital disponible por los promotores para acometer el parque eólico es limitado. Por ello, esta restricción dota de un mayor realismo el problema tratado. En este caso la restricción ha de ser controlada una vez el individuo ha sido evaluado, ya que es preciso conocer la inversión inicial correspondiente a dicho individuo. Si se viola esta limitación, el individuo se penaliza descartándolo como potencial solución del problema.

### **3.5 Algoritmo secundario: diseño de la instalación eléctrica**

Para la resolución de este problema se parte, tanto de los datos de los aerogeneradores (posición, potencia nominal y energía producida) obtenidos para una configuración determinada del problema de posicionamiento, como del trazado de las líneas de transporte existentes, costes de los equipos y precio de venta de la energía. Adicionalmente, es preciso tener en cuenta restricciones de tipo físico, como la existencia de zonas prohibidas, o de tipo técnico (límites de evacuación de potencia de las líneas de alta tensión, intensidades máximas admisibles o caídas de tensión). En este trabajo se propone una metodología híbrida compuesta por un algoritmo genético para el cálculo del conexionado de distribución óptimo más un algoritmo Newton-Raphson para el cálculo de la posición óptima de las subestaciones.

# Capítulo IV. Funcional del programa

## 4.1 La aplicación Matlab

MATLAB es el nombre abreviado de “MATrix LABoratory”. MATLAB es una herramienta de cálculo técnico y científico, usada en problemas de ingeniería para realizar operaciones numéricas con vectores y matrices. Como caso particular puede también trabajar con números escalares -tanto reales como complejos-, con cadenas de caracteres y con otras estructuras de información más complejas. Una de las capacidades más atractivas es la de realizar una amplia variedad de gráficos en dos y tres dimensiones. MATLAB tiene también un lenguaje de programación propio [1].

Para ciertas operaciones MATLAB es muy rápido, pudiendo ejecutar sus funciones en código nativo con los tamaños más adecuados para aprovechar sus capacidades de vectorización. En otras aplicaciones resulta bastante más lento que el código equivalente desarrollado en C/C++ o Fortran. Sin embargo, siempre es una magnífica herramienta de alto nivel para desarrollar aplicaciones técnicas, fácil de utilizar y que, como ya se ha dicho, aumenta significativamente la productividad de los programadores respecto a otros entornos de desarrollo. Actualmente integra computación, visualización y programación en un entorno fácil de usar. El entorno de programación de Matlab comprende de una serie de usos típicos:

- Matemáticas y computación
- Desarrollo de Algoritmos
- Modelado, simulación y creación de prototipos
- Análisis, exploración y visualización de datos
- Generación de gráficos
- Desarrollo de Aplicaciones.

## 4.2 Datos de entrada al programa

- La zona del terreno donde se va a implantar el parque eólico consiste en una región mallada donde se representa una discretización de toda la extensión del territorio.
- La superficie mallada anterior abarca una representación fiel de la orografía de la zona, es decir, el problema que se trata realiza un enfoque tridimensional de la superficie, donde se tiene las dimensiones del terreno tanto en extensión como en cotas.
- En cuanto a la geografía del lugar, el algoritmo permite introducir zonas donde la ubicación de un aerogenerador está prohibida debida a múltiples motivos, como puede ser la presencia de una zona rocosa donde no sea posible instalar y montar el aerogenerador, o bien la existencia de una zona pantanosa, u otro accidente geográfico. Además, es posible introducir restricciones de ruido, de modo que la solución obtenida respete la normativa referente a contaminación acústica.
- También es posible el trazado de una carretera cercana a la ubicación del parque, que puede ser usada para el traslado de aerogeneradores y de grúas en el proceso de montaje.
- En cuanto a la obra civil, se requiere los costes de transporte de los aerogeneradores hasta el camino principal antes mencionado. Además de datos relacionados con el encarecimiento de la implantación de los aerogeneradores a medida que se alejan del camino y se adentran en el territorio disponible.
- Como entrada se dispone de los datos de viento de la región del terreno donde se estudia implantar el parque eólico. Estos datos son los parámetros de forma y escala de la distribución de Weibull que modela el viento, para cada uno de los puntos de la discretización antes mencionada y para cada una de las direcciones de viento. Estos parámetros vienen referenciados a una altura dada. Así el parámetro de escala variará según la altura del aerogenerador debido al cizallamiento del viento.
- Además de los niveles de viento el programa admite la indicación de una dirección de viento predominante. Ésta se tendrá en cuenta para evitar cualquier problema en el rendimiento de la instalación, como pudiera ser la obstaculización entre aerogeneradores de cara al aprovechamiento del viento según esta dirección predominante.

- En la disposición de los aerogeneradores se considera que la separación entre ellos sea suficiente como para evitar cualquier problema técnico.
- Se dispone de una base de datos que cubre suficientemente la amplia variedad de aerogeneradores presentes en el mercado actual, no sólo en cuanto a niveles de potencia sino también a las distintas tecnologías, ya sean aerogeneradores de paso fijo o variable, para poder configurar el parque eólico.
- La restricción del número de aerogeneradores del parque puede ser fijada directamente mediante una cantidad, o mediante un valor de inversión máxima admisible en euros.
- Es necesario conocer la disposición de las líneas de alta tensión que transcurren sobre el terreno del parque eólico, así como la potencia que cada una de ellas es capaz de evacuar.
- Se dispone también de, una base de datos en la que están determinados los datos necesarios para el cálculo de costes fijos y variables de los conductores y subestaciones.

### **4.3 Finalidad de la herramienta de planificación**

- El algoritmo debe ser capaz de elegir entre los aerogeneradores disponibles el que ofrezca mejor rendimiento con un menor coste para los datos de viento introducidos, tal que el conjunto seleccionado maximice el beneficio del proyecto.
- El programa debe ser capaz de generar el mapa de ruido de la solución obtenida, cumpliendo estas restricciones impuestas por el usuario.
- El programa debe generar los costes de realización de los caminos de acceso y transporte de los aerogeneradores para cada lugar donde se puedan ubicar estos. El aumento de este coste es lineal a medida que nos alejamos del camino principal y está comprendido entre unos valores máximo y mínimo prefijados según la distancia.
- El algoritmo tiene por objetivo seleccionar la torre con la altura más adecuada para cada aerogenerador, para así aprovechar las mejores condiciones de viento. De este modo también se determinará la tecnología más adecuada, paso fijo o variable.

- Por el hecho de instalar un aerogenerador en un sitio en concreto el algoritmo debe ser capaz de aplicar el concepto de reducción económica que conlleva instalar un aerogenerador en una celda próxima a la suya. Esto es debido a que para este segundo aerogenerador se han aprovechado los caminos de acceso para su implantación. Esta reducción en los costes auxiliares se produce de forma lineal.
- Esta herramienta de planificación debe ser capaz de disponer los aerogeneradores según la dirección del viento predominante en el caso de que se indique alguna. Esta dirección se tendrá en cuenta penalizando la energía generada por el aerogenerador que reciba la sombra de viento según dicha dirección.
- El programa determinará el trazado eléctrico óptimo, determinando por tanto los costes derivados de este.

## **4.4 Modos de ejecución del programa**

### **4.4.1 Modo de ejecución 1**

Como se ha señalado anteriormente, el programa resolverá de forma acoplada el problema de selección y posicionamiento de aerogeneradores y el problema del trazado eléctrico entre aerogeneradores y líneas de alta tensión. Como el problema del trazado eléctrico óptimo requiere también de un algoritmo evolutivo para su resolución, y éste ha de ejecutarse para cada individuo del algoritmo del problema de posicionamiento, el coste computacional del programa es enorme. Con el fin de reducir este coste, y consecuentemente el tiempo de ejecución, el programa permite retardar el cálculo del trazado eléctrico hasta un determinado porcentaje del parámetro de convergencia del algoritmo para el cálculo del problema de posicionado, con esto se persigue que cuando comience el cálculo del trazado eléctrico ya haya existido una selección de individuos en el problema de posicionamiento, y por tanto el cálculo eléctrico solo se realizará sobre los mejores individuos.

También, para reducir el tiempo de ejecución, se permite que la resolución del problema de conexionado se realice de manera aproximada en las primeras iteraciones en las que se realiza el cálculo eléctrico, para posteriormente realizarlo de manera exacta. De esta manera se realizará una selección inicial considerando la inversión del trazado eléctrico, que aunque ésta no sea la exacta de cada individuo, sí supondrá una inversión similar a la

óptima, lo que permitirá al algoritmo del problema de conexionado seleccionar los individuos teniendo en cuenta la inversión derivada del trazado eléctrico.

#### 4.4.2 Modo de ejecución 2

En este modo el programa resuelve únicamente el problema de selección y posicionamiento de aerogeneradores en el parque eólico, sin tener en cuenta la inversión que supone la ejecución del trazado eléctrico.

#### 4.4.3 Modo de ejecución 3

El programa resuelve únicamente el problema del trazado eléctrico, por lo que en este caso será necesario introducir la posición y potencia de los generadores que se pretenden interconectar.

### 4.5 Introducción de los datos de entrada

Los datos de entrada se introducen en un fichero Excel denominado ‘opciones.xls’. Este archivo está compuesto por una serie de hojas en las que se definen todas las características necesarias para modelar el parque eólico y parámetros importantes del algoritmo.

	A	B
1	<b>Datos Generales</b>	
2	Número de celdas en eje horizontal:	10
3	Número de celdas en eje vertical:	10
4	Longitud del parque en el eje X (m):	5000
5	Longitud del parque en el eje Y (m):	5000
6	Considerar camino principal:	1
7	Considerar zonas prohibidas:	1
8	Máxima inversión en la solución final (€):	10000000
9	Vida de la inversión (años):	20
10	Tasa de actualización (%):	3
11	Precio del kwh (€/kWh):	0,08
12	Incremento anual del precio del kwh (%):	3
13	Gastos de operación y mantenimiento (€/año):	0
14	Tasa de incremento de gastos de operación y mantenimiento (%):	0
15	Porcentaje de ejecución para inicio del cálculo eléctrico (%):	0
16	Porcentaje de ejecución para inicio del cálculo eléctrico exacto (%):	0
17	Modo de ejecución:	2

Figura 22. Datos generales de la hoja datos

#### 4.5.1 Hoja ‘datos’

Esta hoja comprende tres tipos de datos bien diferenciados: datos generales (Figura 22), datos acerca del problema de posicionamiento (Figura 23) y datos acerca del problema de conexionado (Figura 24).

18	<b>Parámetros del problema de posicionamiento.</b>	
19	Tamaño de la población:	500
20	Máximo número de generaciones:	5000
21	Nº de repeticiones de la mejor solución para finalizar algoritmo	400
22	Probabilidad de cruce (tanto por uno):	80
23	Probabilidad de mutación (tanto por uno):	100
24	Penalización por cruce (tanto por uno):	100
25	Penalización por mutación (tanto por uno):	100
26	N. de generadores en la población inicial:	40
27	N. máx. de generadores en solución final:	25
28	Coefficiente de linealidad (€/m):	25
29	Número máximo de generadores a partir del que se reducen los costes auxiliares:	10
30	Altura de referencia (m):	50
31	Sobrecoste cimentación al superar la torre una altura de 50m (%):	30
32	Sobrecoste cimentación en zona de baja capacidad portante (%):	100
33	Coefficiente de rugosidad del terreno:	0,0055
34	Código correspondiente a la dirección predominante de viento:	0
35	Tasa de incremento de la producción anual (tanto por uno):	0
36	Modo de cálculo del VAN:	1
37	Permitir varios caminos principales:	0
38	Considerar solución inicial:	0
39	Considerar efecto sombra:	1
40	Factor de indisponibilidad:	0.95
41	Costes de desmantelamiento:	3
42	Retorno de la inversión	10

Figura 23. Parámetros del problema de posicionamiento de la hoja datos

Una vez introducidos todos los datos debe pulsarse el botón ‘generar hojas’ para generar las hojas sucesivas ya con el terreno discretizado con el número de filas y columnas definidos en la sección datos generales de la hoja ‘datos’.

43	<b>Parámetros del problema de conexionado.</b>	
44	Tamaño de la población:	10
45	Número máximo de generaciones:	1000
46	Nº de repeticiones de la mejor solución para finalizar algoritmo	2
47	Probabilidad de cruce:	75
48	Probabilidad de mutación:	5
49	Tasa de eliminación:	20
50	Número de veces que se repite el mejor:	6
51	Número de líneas de alta tensión.	1

Figura 24. Parámetros del problema de conexionado de la hoja datos

#### 4.5.2 Hoja ‘camino’.

En esta hoja (Figura 25) se introducirán los vértices de los caminos de acceso principales que existen en el terreno correspondiente al parque eólico, es decir, se introducirán las casillas en las que existe un cambio de dirección en los caminos. La matriz tendrá las dimensiones de la discretización del terreno, siendo todos los valores nulos excepto en las casillas donde existe un cambio de dirección del camino. El modo de introducir estos vértices será mediante un número de dos dígitos, el primero indicará la numeración del camino correspondiente comenzando la numeración en el número ‘1’, y el segundo hace referencia a la numeración de los vértices del camino correspondiente comenzando la numeración de los vértices en el número ‘0’, de manera que cada vértice se unirá con él que le sigue en numeración,

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	10	0	0	0	0	0	0	0	0	11
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 25. Ejemplo de introducción de un camino principal

#### 4.5.3 Hoja ‘costes’

Estos datos de entrada se corresponden con el coste del transporte de los aerogeneradores a pie de camino principal. Son los valores utilizados para calcular los costes de los caminos de accesos a los aerogeneradores así como el coste del transporte hasta la ubicación final de los mismos. Los costes serán introducidos mediante un vector columna, de tal manera que el primer elemento introducido corresponderá a los costes de transporte de un aerogenerador hasta el camino principal 1, y así progresivamente hasta el número de caminos principales existentes en el parque eólico.



#### **4.5.4 Hoja ‘z\_prohib\_aerog’**

Contiene las casillas en las que no se puede ubicar un aerogenerador debido a las múltiples causas que puede llevar a esto, como puede ser la presencia de una zona rocosa en la zona de ubicación, o bien, la presencia de una zona pantanosa o un lago. En definitiva se trata de zonas prohibidas para el algoritmo del cálculo del problema de posicionamiento debido a la orografía del lugar. El contenido de esta hoja es una matriz cuyas dimensiones coinciden con el número de filas y columnas en que se ha dividido el terreno. Esta matriz tiene todos los elementos nulos, excepto en las posiciones donde exista una zona prohibida, cuyo valor será la penalización, es decir, un coste elevado en euros. Así habrá tantos elementos no nulos como casillas penalizadas existan.

#### **4.5.5 Hoja ‘cotas’**

Es necesario introducir los datos referentes al nivel de cota del parque eólico. Esta matriz contiene el nivel de cota de todo el terreno que ocupa el parque eólico discretizado según la rejilla de puntos que se haya seleccionado. La dimensión de esta matriz coincide con el número de filas y columnas en que se ha dividido el terreno, y almacena en cada celda el nivel de cota.

#### **4.5.6 Hoja ‘zonas’**

En esta hoja se presenta una estructuración de los datos en forma de matriz, con tantas filas y columnas según sean la división del terreno. El contenido de la misma será ‘1’, o bien ‘2’, dependiendo del tipo de terreno de que se trate. Los tipos de terrenos que se contemplan son dos, según su capacidad portante, por un lado el tipo ‘1’ que se corresponde con un terreno de mayor capacidad portante lo que conlleva una cimentación mediante zapata aislada, y por otro el tipo ‘2’ que se corresponde con un tipo de terreno de menor capacidad portante, tipo arcilloso, que conlleva una cimentación mediante zapata pilotada y por tanto más cara.

#### **4.5.7 Hojas ‘WeiC’**

Estas hojas albergan una matriz con el mismo número de filas y columnas que el terreno. Hay definidas ocho hojas de este tipo, una para cada posible dirección: norte, nordeste,

este, sureste, sur, suroeste, oeste y noroeste. En cada elemento de la matriz se almacena el valor del parámetro de escala de la distribución de Weibull a una altura de referencia definida en la hoja ‘datos’.

#### **4.5.8 Hojas ‘WeiK’**

Estas hojas albergan una matriz con el mismo número de filas y columnas que el terreno. Al igual que ocurre con las hojas ‘WeiC’, existen ocho hojas del tipo ‘WeiK’. En cada elemento de la matriz se almacena el valor del parámetro de forma de la distribución de Weibull.

#### **4.5.9 Hoja ‘frecuencias’**

En esta hoja deben ser introducidas las frecuencias en tanto por ciento con la que sopla el viento en cada una de las ocho direcciones, en el caso de que se ejecute el programa sin considerar una dirección de viento predominante. La suma de todas las frecuencias introducidas debe ser 100.

#### **4.5.10 Hoja ‘coef\_rugosidad’**

En el caso de que el programa sea ejecutado sin considerar una dirección de viento predominante es necesario introducir la longitud de rugosidad según las ocho direcciones de viento posibles.

#### **4.5.11 Hoja ‘zonasP’**

Esta hoja contiene las casillas por las que no puede discurrir un trazado eléctrico debido a las múltiples causas que puede llevar a esto, como puede ser la presencia de una zona rocosa en la zona de ubicación, o bien, la presencia de una zona pantanosa o un lago. Se trata de las zonas prohibidas para el algoritmo de cálculo del trazado eléctrico. Esta matriz tendrá las dimensiones correspondientes a la discretización del terreno conteniendo un valor de ‘1’ para las casillas en las que no puede realizarse el trazado eléctrico, y un valor de ‘0’ para el resto de casillas.

#### **4.5.12 Hoja ‘líneas’**

En esta hoja se introducirán los vértices de las líneas de alta tensión que existen en el terreno correspondiente al parque eólico, es decir, las casillas en las que hay un cambio de dirección en el trazado de la línea de alta tensión. Como ya se hiciera con la hoja ‘camino’, la forma de introducir las líneas de alta tensión es la misma: los vértices se representarán mediante un número de dos dígitos, el primero de ellos indica la numeración de la línea correspondiente comenzando la cuenta en el número ‘1’, y el segundo hace referencia a la numeración de los vértices de la línea, comenzando en el número ‘0’, de manera que cada vértice se unirá con el que le sigue en numeración.

#### **4.5.13 Hoja ‘capacidades’**

Se introducirá mediante un vector columna la potencia, en kW, que es capaz de transportar cada una de las líneas. El primer elemento corresponderá a la capacidad de la línea uno, y así respectivamente hasta llegar al número de líneas de alta tensión existentes en el parque eólico.

#### **4.5.14 Hoja ‘pos\_gen’**

Esta hoja sólo será necesaria cuando se pretenda que el algoritmo parta de una solución inicial establecida por el usuario. Así, la matriz tendrá las dimensiones de la discretización del terreno, y estará formada por elementos nulos salvo en las posiciones en las que esté ubicado un aerogenerador. La forma de codificar los aerogeneradores es la siguiente:

- Una parte entera, cuyo valor será el correspondiente al tipo de máquina, definido en la hoja ‘máquinas’, que se presentará más adelante.
- Una parte decimal, que constará de dos cifras cuyo valor indicará la altura de la torre expresada en decímetros.

#### **4.5.15 Hoja ‘máquinas’**

Esta hoja contiene todos los datos necesarios sobre los aerogeneradores a usar en el algoritmo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Marca del aerogenerador:	NEG-Micon								
2	Modelo del aerogenerador:	NM 600 (Paso Fijo)								
3	Potencia en kw:	600								
4	Altura mínima de torre en metros:	30								
5	Altura máxima de torre en metros:	100								
6	Coste del aerogenerador en euros:	400000								
7	Coste por metro de la torre en euros / metro:	1000								
8	Coste cimentación en euros:	70000								
9	Curva de potencia en kW:	0	0	0	21,2	49,3	83,2	130,7	202	280,8

Figura 26. Datos a introducir sobre los aerogeneradores

En cuanto a la curva de potencia, es necesario aclarar que los datos introducidos son la potencia producida, expresada en kilovatios, para cada velocidad de viento, siendo el primer valor para 1 m/s, el segundo para 2 m/s y así hasta la velocidad de parada de la máquina.

En esta hoja se encuentran los aerogeneradores disponibles para una ejecución del programa en concreto. La base de datos de los aerogeneradores está almacenada en otra hoja denominada 'base\_datos\_máquinas'. El modo de operación consiste en copiar la información de los aerogeneradores de la base de datos y pegarla en la hoja 'máquinas', a continuación del aerogenerador anterior, como se puede ver en la figura 27.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Marca del aerogenerador:	NEG-Micon										
2	Modelo del aerogenerador:	NM 600 (Paso Fijo)										
3	Potencia en kw:	600										
4	Altura mínima de torre en metros:	30										
5	Altura máxima de torre en metros:	100										
6	Coste del aerogenerador en euros:	400000										
7	Coste por metro de la torre en euros / metro:	1000										
8	Coste cimentación en euros:	70000										
9	Curva de potencia en kW:	0	0	0	21,2	49,3	83,2	130,7	202	280,8	361,6	433,7
10	Marca del aerogenerador:	GAMESA										
11	Modelo del aerogenerador:	G83 Paso variable										
12	Potencia en kw:	2000										
13	Altura mínima de torre en metros:	60										
14	Altura máxima de torre en metros:	100										
15	Coste del aerogenerador en euros:	2200000										
16	Coste por metro de la torre en euros / metro:	1500										
17	Coste cimentación en euros:	80000										
18	Curva de potencia en kW:	0	0	0	73,3	162,2	296,8	483,7	729,3	1035	1374	1673
19	Marca del aerogenerador:	Ecotecnia										
20	Modelo del aerogenerador:	Mod 80.20 Paso Variable										
21	Potencia en kw:	2000										
22	Altura mínima de torre en metros:	60										
23	Altura máxima de torre en metros:	80										
24	Coste del aerogenerador en euros:	2000000										
25	Coste por metro de la torre en euros / metro:	1500										
26	Coste cimentación en euros:	80000										
27	Curva de potencia en kW:	0	0	0	32	97	197	346	549	815	1124	1798

Figura 27. Introducción de varios tipos de aerogeneradores en la hoja 'máquinas'

#### 4.5.16 Hojas ‘costes\_MT’, ‘costes\_AT’ y ‘costes\_subestaciones’

En estas hojas se dispone de la base de datos necesaria para el cálculo de la inversión correspondiente al trazado eléctrico. Los datos se refieren a líneas de media tensión, alta tensión y subestaciones. Para cada una de ellas se disponen los datos siguientes: potencia máxima, resistencia de los conductores, costes fijos de instalación y tensión nominal.

#### 4.5.17 Hoja ‘restricciones\_ruido’

En esta hoja hay que introducir los límites de ruido, expresados en decibelios, que se quieran establecer en el parque eólico. La matriz tiene unas dimensiones que coinciden con la discretización del terreno. En la figura 28 se muestra un ejemplo de la hoja ‘restricciones\_ruido’.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
2	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
3	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
4	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
5	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
6	110	110	110	110	110	110	110	40	40	40
7	110	110	110	110	110	110	110	40	40	40
8	110	110	110	110	110	110	110	40	40	40
9	110	110	110	110	110	110	110	40	40	40
10	110	110	110	110	110	110	110	40	40	40
11										

Figura 28. Ejemplo de la hoja 'restricciones\_ruido'

Una vez cumplimentadas todas las hojas del archivo ‘opciones.xls’, el siguiente paso consiste en guardar los datos. Para ello, es necesario presionar el botón ‘guardar datos’ que aparece en la hoja ‘Datos’. Los datos son almacenados en el directorio ‘C:\datos’ en forma de ficheros de texto, los cuales serán las entradas del programa del algoritmo principal. Una vez realizada esta acción, es posible ejecutar el algoritmo.

	A	B	C	D
1	<b>Datos Generales</b>			
2	Número de celdas en eje horizontal:	10	Guardar datos	
3	Número de celdas en eje vertical:	10		
4	Longitud del parque en el eje X (m):	5000		
5	Longitud del parque en el eje Y (m):	5000		
6	Considerar camino principal:	1	Generar hojas	
7	Considerar zonas prohibidas:	1		
8	Máxima inversión en la solución final (€):	10000000	Duplicar el tamaño de las celdas	
9	Vida de la inversión (años):	20		
10	Tasa de actualización (%):	3		
11	Precio del kwh (€/kWh):	0,08	Disminuir el tamaño de las celdas	
12	Incremento anual del precio del kwh (%):	3		
13	Gastos de operación y mantenimiento (€/año):	0		
14	Tasa de incremento de gastos de operación y mantenimiento (%):	0		
15	Porcentaje de ejecución para inicio del cálculo eléctrico (%):	0		
16	Porcentaje de ejecución para inicio del cálculo eléctrico exacto (%):	0		
17	Modo de ejecución:	2		
18	<b>Parámetros del problema de posicionamiento.</b>			
19	Tamaño de la población:	500		
20	Máximo número de generaciones:	5000		
21	Nº de repeticiones de la mejor solución para finalizar algoritmo	400		
22	Probabilidad de cruce (tanto por uno):	80		
23	Probabilidad de mutación (tanto por uno):	100		

Figura 29. Localización del botón 'Guardar datos'



# Capítulo V. Protocolo de ensayos

En este capítulo se van a resolver distintos escenarios seleccionados estratégicamente para exponer las capacidades de la aplicación implementada. Para ello se presentan cinco ensayos con un aumento gradual de la complejidad.

## 5.1 Ensayo 1

El primer ensayo consiste en la comprobación del correcto funcionamiento del programa y la incorporación de las restricciones de ruido. La idea es introducir unos datos de entrada muy simples en cuanto al número de aerogeneradores, dirección predominante del viento, caminos principales, etcétera, que permitan sacar conclusiones acerca de las soluciones obtenidas. En primer lugar se ejecutará el programa sin limitaciones de ruido.

### 5.1.1 Ensayo 1 sin limitaciones de ruido

Este ensayo tiene las siguientes características:

- Número de aerogeneradores: 10. Tipo: Ecotecnia 80.20 Paso variable. Potencia nominal: 2 MW.
- Existencia de un único camino principal, lo que va a provocar que todos los generadores se ubiquen cerca del mismo, para evitar el coste de la construcción de caminos secundarios y por tanto el aumento de la obra civil.
- 100% de probabilidad de viento con dirección norte-sur.

A continuación se muestran las gráficas (Figuras de la 30 a la 34) de la solución obtenida para este escenario.

Nota: los ejes cardinales representados en la figura 31 se mantendrán constantes durante todos los ensayos presentados en este trabajo.



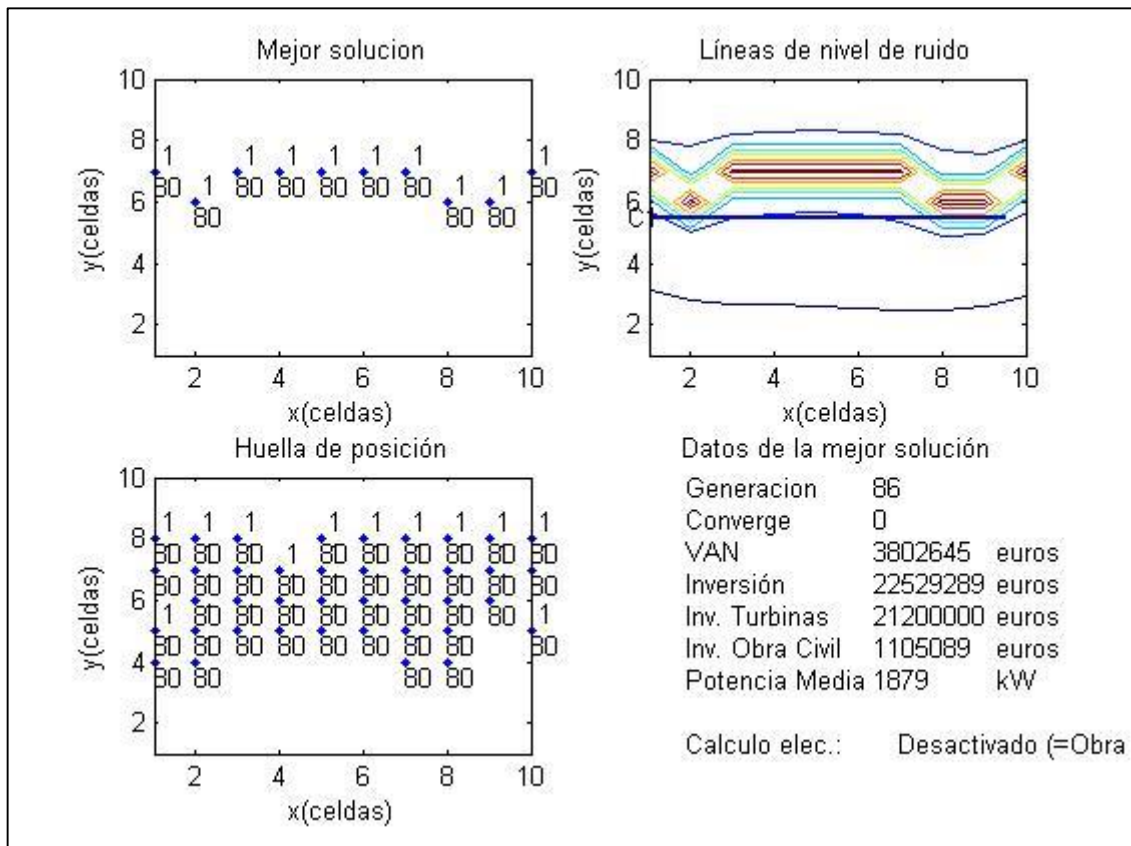


Figura 30. Ejecución del ensayo 1 sin restricciones de ruido

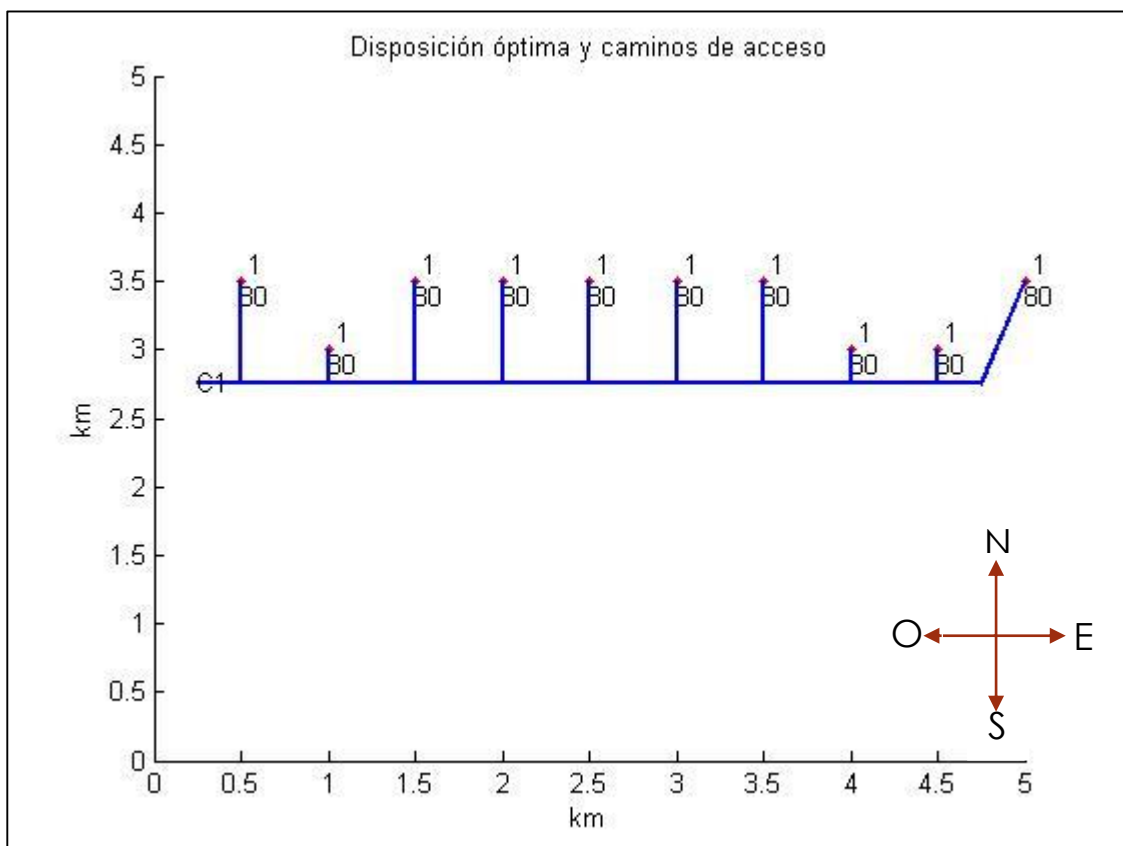


Figura 31. Disposición óptima y caminos de acceso del ensayo 1 sin restricciones de ruido

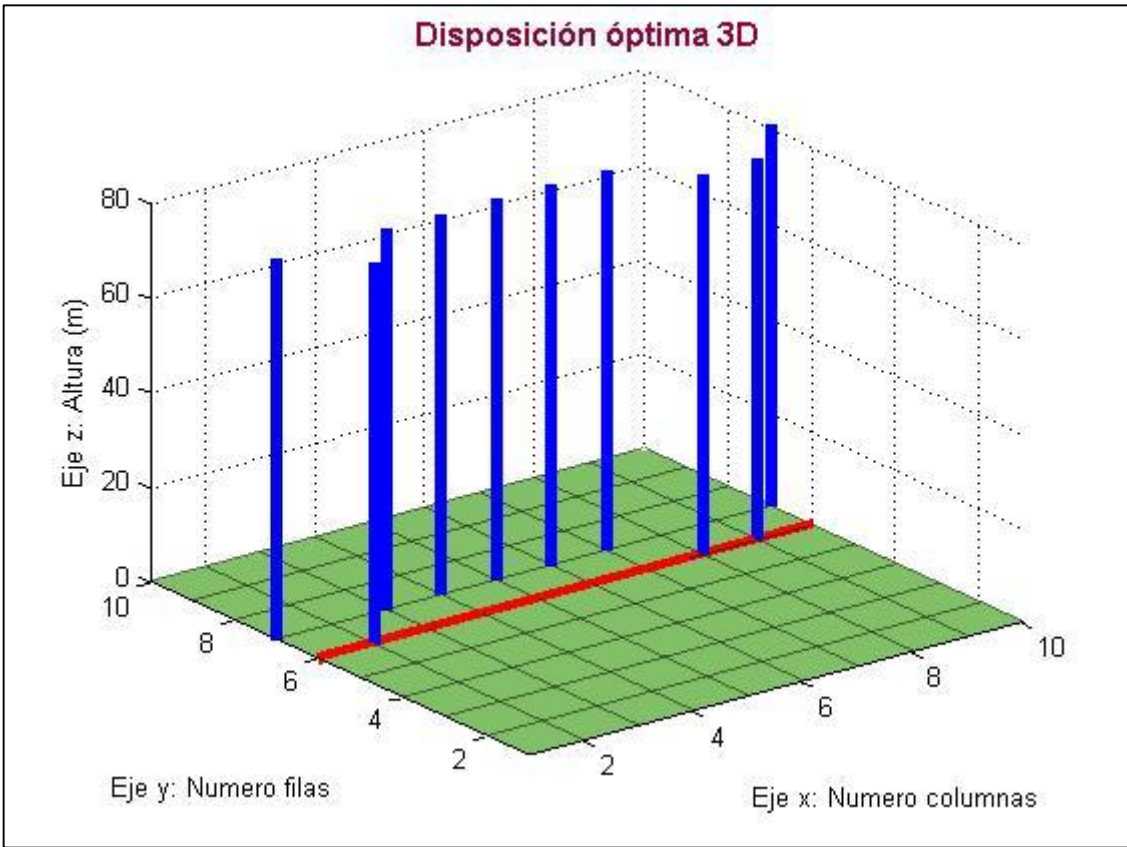


Figura 22. Disposición óptima 3D del ensayo 1 sin restricciones de ruido

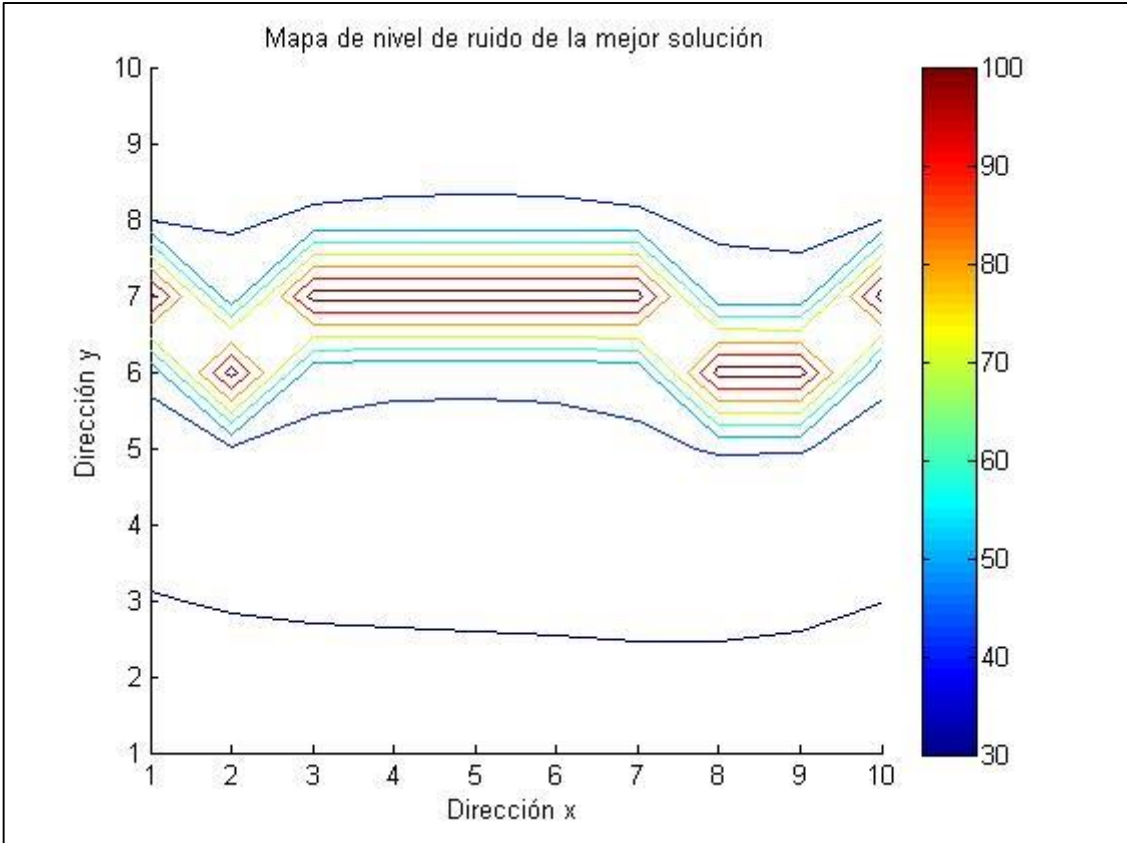


Figura 33. Mapa de ruido del ensayo 1 sin restricciones de ruido



Figura 34. Datos económicos del ensayo 1 sin restricciones de ruido

Del ensayo 1 sin restricciones de ruido, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- Como se puede ver en la gráfica ‘Huella de posición’ de la figura 30, en los momentos finales de la ejecución del algoritmo, el programa únicamente busca ubicar los aerogeneradores en una zona próxima al camino principal, que como ya se comentó previamente, implica un coste reducido en obra civil. Además de situar los aerogeneradores cerca del camino principal, el algoritmo busca que estos no se solapen según la dirección predominante del viento, que en este caso es la dirección norte-sur, para minimizar el efecto estela y la consecuente pérdida de producción de energía. El camino principal y los secundarios son mostrados en la figura 31, junto con las posiciones de los aerogeneradores de la mejor solución.
- En la figura 32 se muestra la disposición del parque eólico en tres dimensiones, donde se puede apreciar de forma clara la altura de las máquinas. En este caso dicho valor es 80 metros, que coincide con la altura máxima para el tipo de turbinas que se habían considerado en este ensayo. Este resultado es lógico, ya

que debido al cizallamiento del viento, las mayores velocidades de éste se producen cuanto mayor sea la altura sobre el suelo.

- En la figura 33 se ha representado un mapa de nivel de ruido del parque eólico, que aunque en este ejemplo no se hayan establecido restricciones, es siempre interesante comprobar los niveles de ruido para una configuración de aerogeneradores determinada.
- Por último, en la figura 34 están los datos económicos de la mejor solución. Los que son más significativos para este ensayo son los siguientes:
  - Valor Actual Neto (VAN) de la inversión: 3.802.645 €
  - Inversión en Obra Civil: 1.105.089 €
  - Potencia media: 1879 kW

Estos valores servirán de referencia para el ensayo 1 con restricciones de ruido, que se presenta a continuación.

### 5.1.2 Ensayo 1 con limitaciones de ruido

Los datos de entrada son exactamente los mismos que para el ensayo anterior, con la salvedad de que ahora existen restricciones de ruido. Es decir, mismo número de aerogeneradores, misma dirección predominante del viento, mismos parámetros de la distribución de Weibull, etc Las restricciones establecidas para este escenario están representadas en la figura 35.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	110	45	110	45	110	45	110	45	110	45
2	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
3	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
4	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
5	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
6	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
7	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
8	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
9	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
10	110	45	110	45	110	45	110	45	110	45
11										

Figura 35. Restricciones de ruido del ensayo 1 con restricciones de ruido

Respecto a las restricciones de ruido, tal y como se puede ver en la figura 35, son muy estrictas, de forma que los aerogeneradores tienen una ubicación definida de antemano. Un aerogenerador produce de media unos 100 decibelios a la altura del buje, por esta razón se puede predecir que los aerogeneradores se situarán en las casillas donde aparecen

restricciones de ruido de 110 decibelios, ya que en cualquier otra posición el exceso de ruido sería muy grande y por tanto el VAN de la inversión se vería reducido notablemente.

En las figuras 36 a 40 se muestran los resultados de la ejecución para el ensayo 1 con restricciones de ruido.

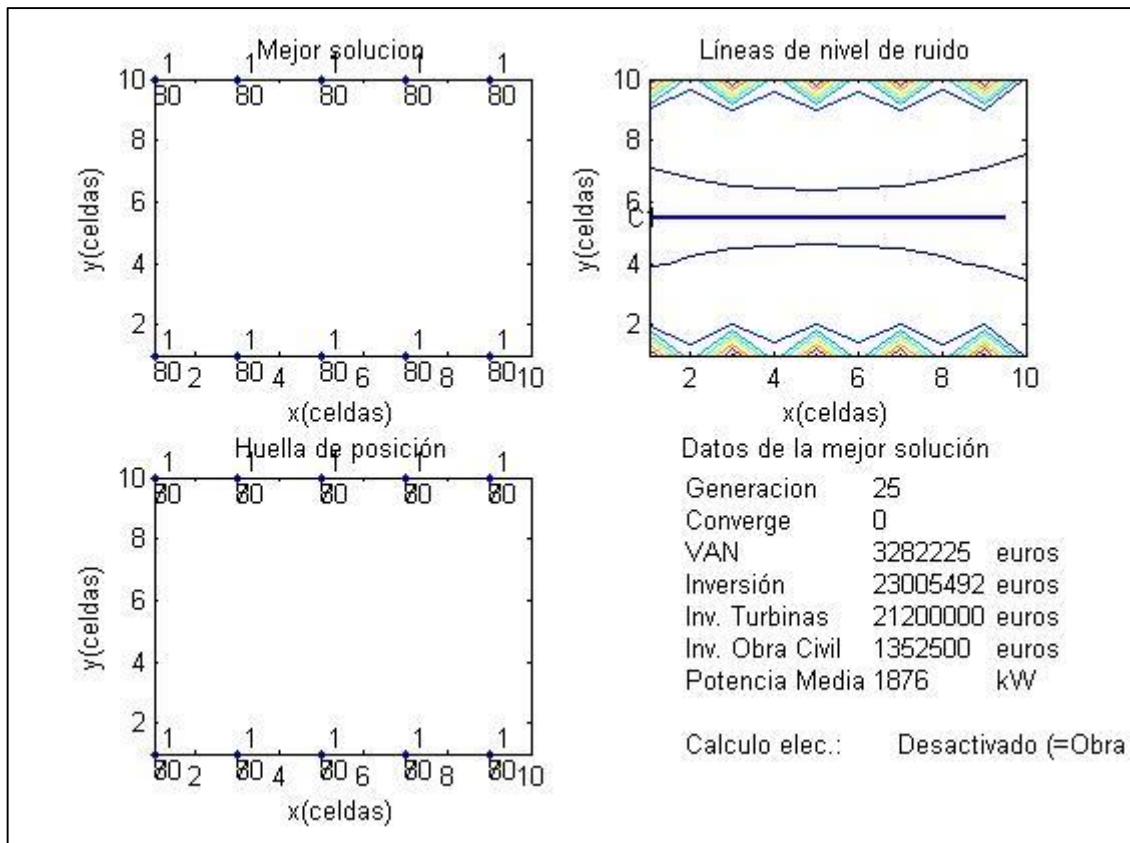


Figura 36. Ejecución del ensayo 1 con restricciones de ruido

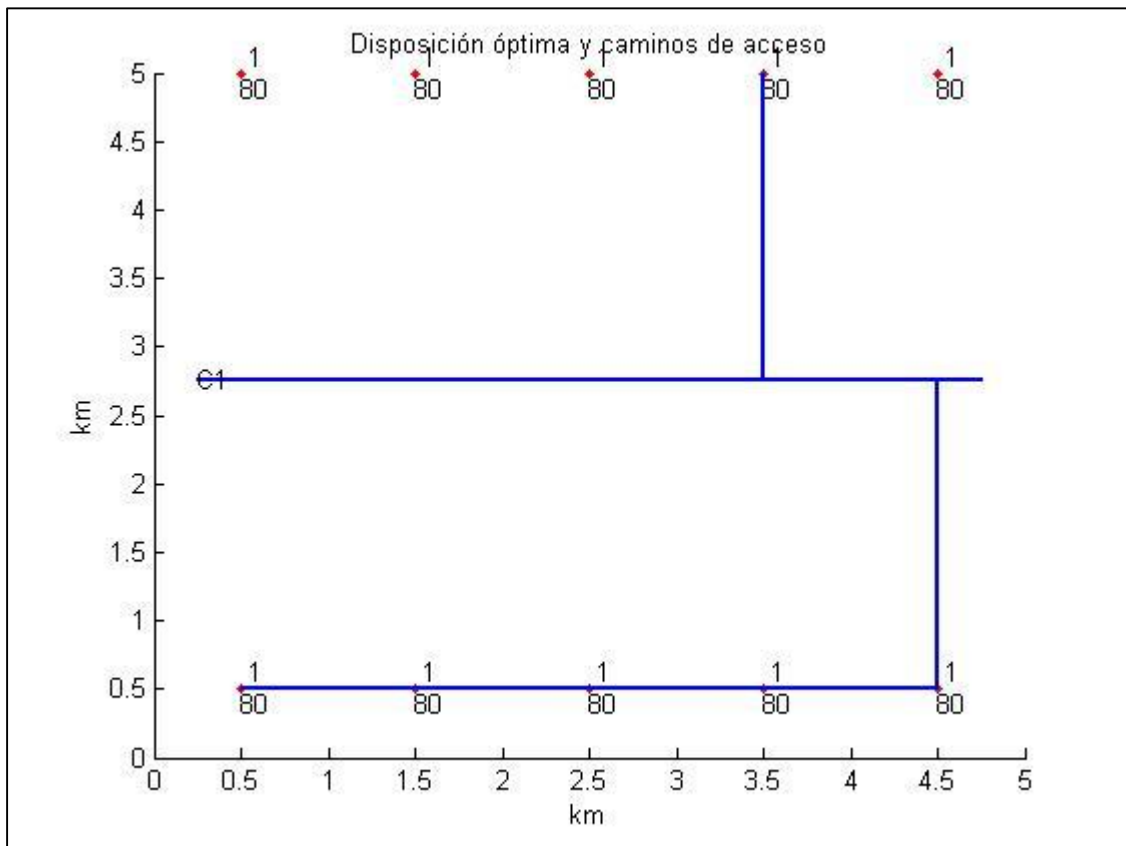


Figura 37. Disposición óptima y caminos de acceso del ensayo 1 con restricciones de ruido

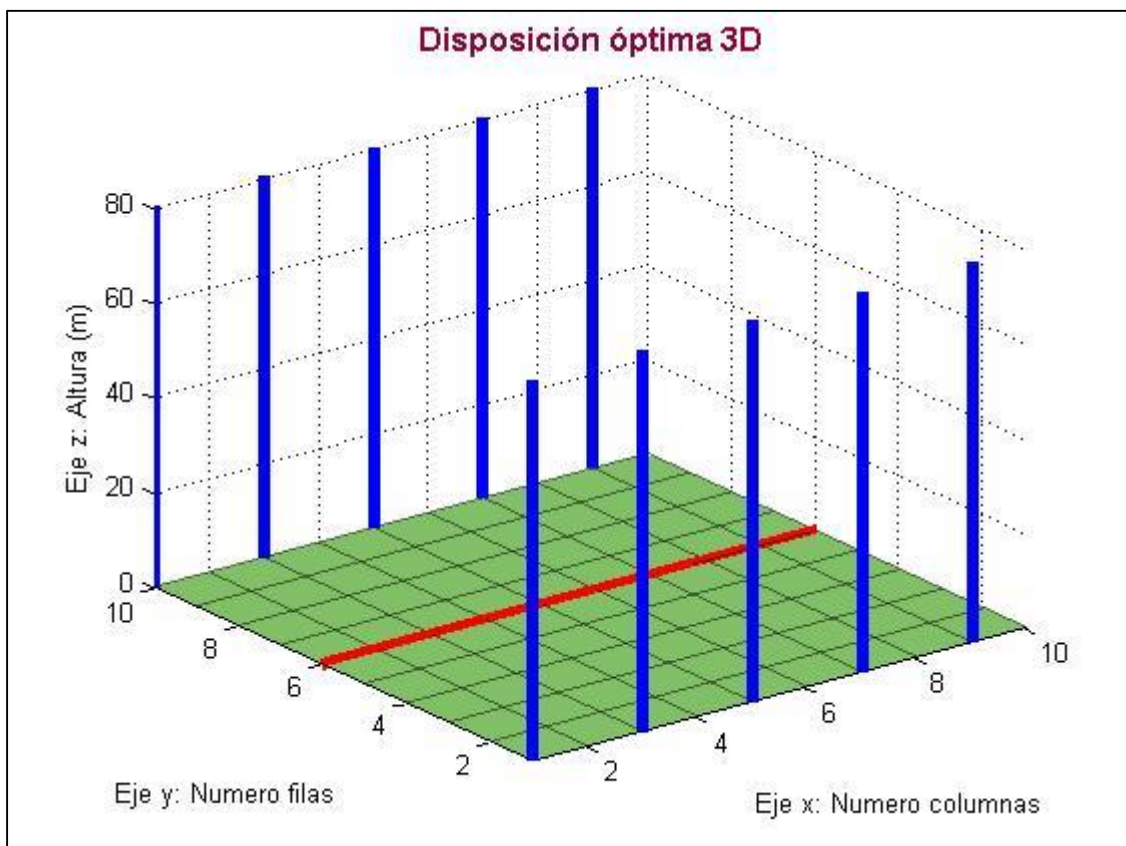


Figura 38. Disposición óptima 3D del ensayo 1 con restricciones de ruido



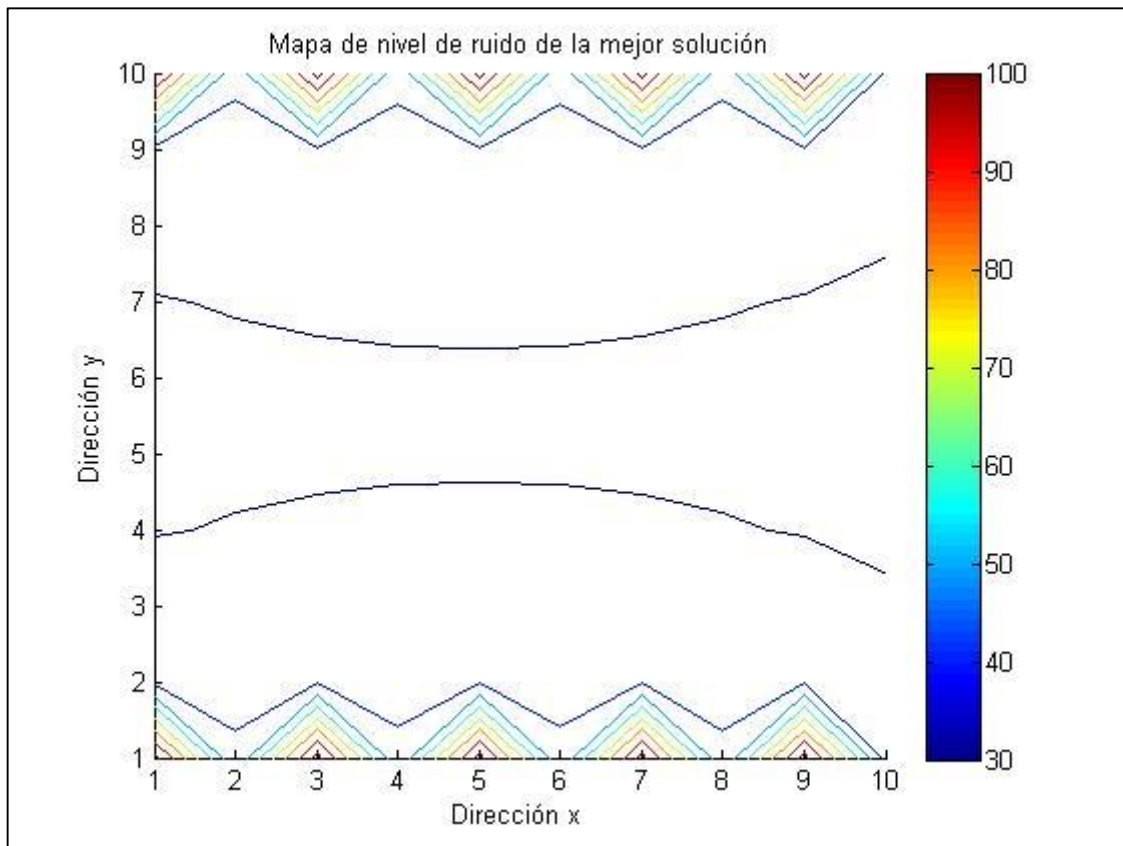


Figura 39. Mapa de ruido del ensayo 1 con restricciones de ruido

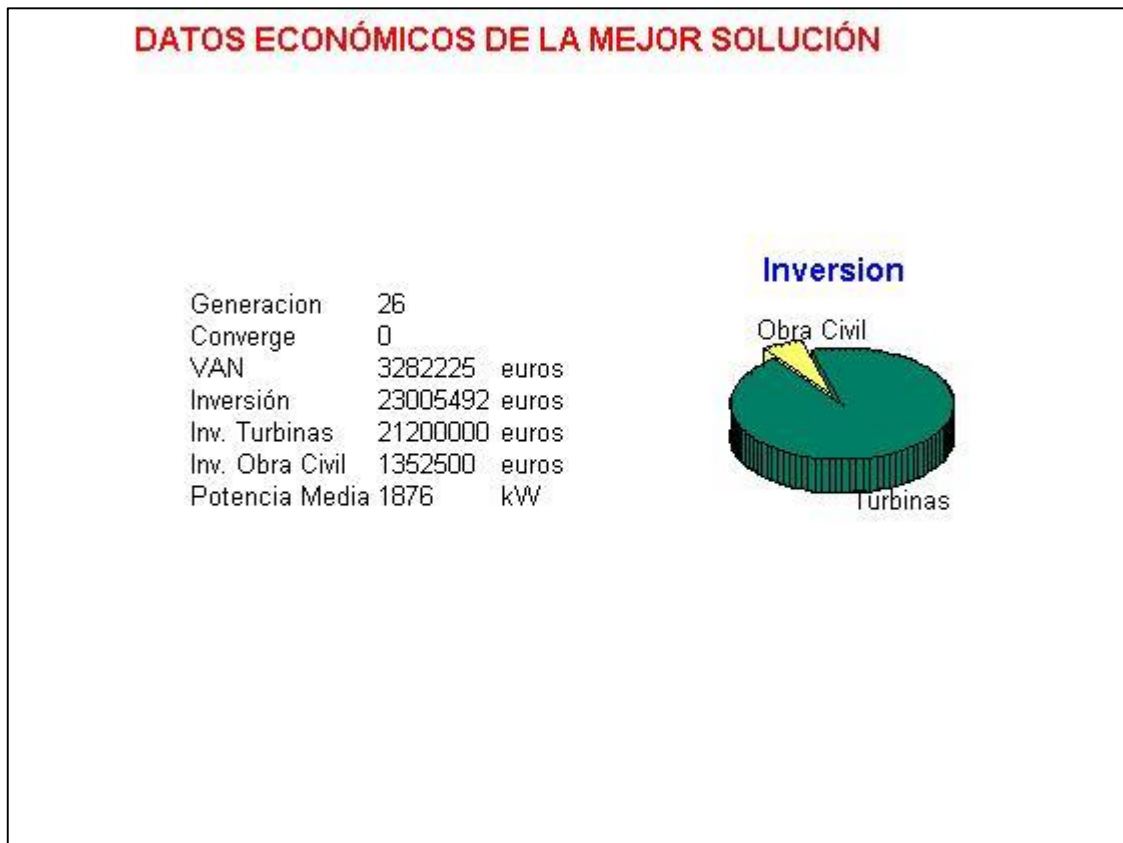


Figura 40. Datos económicos del ensayo 1 con restricciones de ruido

Del ensayo 1 con restricciones de ruido se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Como se había previsto, al incorporar unas restricciones de ruido tan estrictas, los aerogeneradores estaban obligados a ser ubicados en las posiciones donde las restricciones eran menores.
- En la figura 37 se pueden observar el camino de acceso principal así como los secundarios. El aumento de la longitud de los caminos secundarios respecto al caso anterior se verá reflejado en un incremento del coste de la obra civil.
- En la figura 39 está representado el mapa de ruido del parque eólico. Comparando esta figura con la figura 35 se puede ver que el algoritmo cumple con las restricciones de ruido impuestas.
- Por último, en la figura 40 se encuentran los datos económicos de la mejor solución. Al igual que se hizo en el caso anterior, a continuación se detallan los más característicos:
  - Valor Actual Neto (VAN) de la inversión: 3.282.225 €
  - Inversión en Obra Civil: 1.352.500 €
  - Potencia media: 1876 kW

Se puede comprobar cómo la inversión en obra civil ha aumentado en este caso como consecuencia del incremento de la longitud de los caminos auxiliares. Por otra parte existe una disminución de la potencia media que se puede achacar al efecto estela, ya que las turbinas están situadas detrás de otras según la dirección del viento incidente. Esta disminución no es muy grande debido a que la distancia entre ellas es bastante importante. Nótese que tanto en el ensayo sin restricciones como en el ensayo con restricciones no se ha activado el cálculo de la instalación eléctrica, si no que se ha utilizado una aproximación (este hecho se puede comprobar en la esquina inferior derecha de las figuras 30 y 36). La aproximación consiste en igualar los costes eléctricos a los costes en obra civil. Por ello, el aumento del coste de la obra civil es doblemente importante en este caso. En base a esto se puede explicar la diferencia del orden de 500.000€ entre los VAN de ambos proyectos.



## 5.2 Ensayo 2

### 5.2.1 Ensayo 2a

En este caso se va a tratar una situación más realista que la anterior. Concretamente se estudiará la opción de implantar un parque eólico en un terreno cuyas características más importantes son la presencia de una zona prohibida para aerogeneradores (figura 41) y una zona rural (figura 42), lo que provocará que el diseño del parque esté obligado a cumplir la legislación referente a la contaminación acústica. Como se vio en el apartado 5 del primer capítulo, dicha legislación varía según el país en el que se pretende instalar el parque, en este ensayo se va a considerar uno de los países más restrictivos, Suecia. El gobierno sueco impone que en zonas rurales el límite de ruido no sobrepase los 35 decibelios. En el otro extremo se encuentra Alemania, que para el mismo tipo de zonas permite un ruido de hasta 60 decibelios, y será estudiado en el ensayo 2b. Así, partiendo de un terreno con las mismas características y distinta limitación de ruido, se comprobará la influencia que esta tiene en el diseño de parques eólicos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 41. Zonas prohibidas del ensayo 2a

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
2	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
3	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
4	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
5	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
6	110	110	110	110	110	35	35	35	35	35
7	110	110	110	110	110	35	35	35	35	35
8	110	110	110	110	110	35	35	35	35	35
9	110	110	110	110	110	35	35	35	35	35
10	110	110	110	110	110	35	35	35	35	35

Figura 42. Límites de ruido para el ensayo 2a

En cuanto a las características técnicas, el ensayo está compuesto por:

- Un terreno de 25.000.000 m<sup>2</sup>, discretizado en una rejilla de 10×10.
- Número de aerogeneradores a instalar: 20. Cada uno de ellos con una potencia nominal de 2 MW, por tanto constituyendo un parque con una potencia instalada de 40 MW.
- Direcciones predominantes del viento: norte-sur y sur norte, ambas con una probabilidad de ocurrencia de 50%.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el ensayo 2a (Figuras 43 a 47):

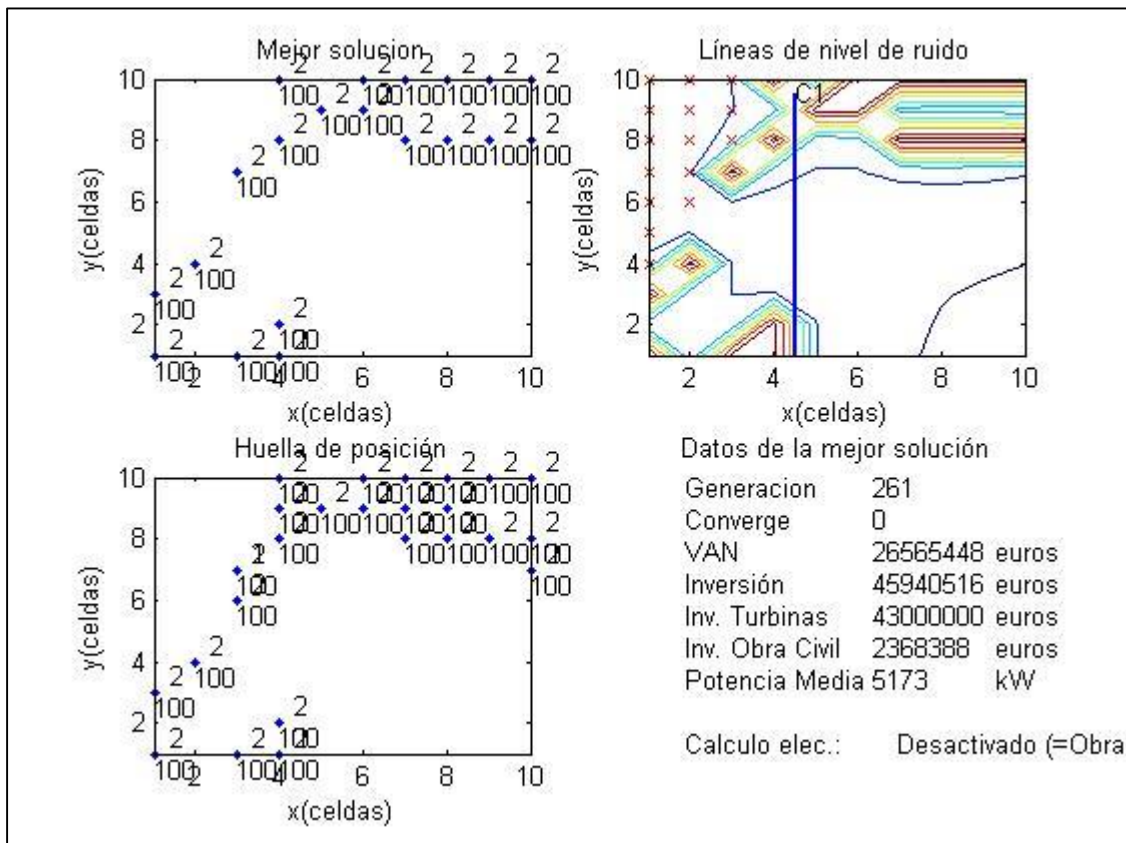


Figura 43. Ejecución del ensayo 2a

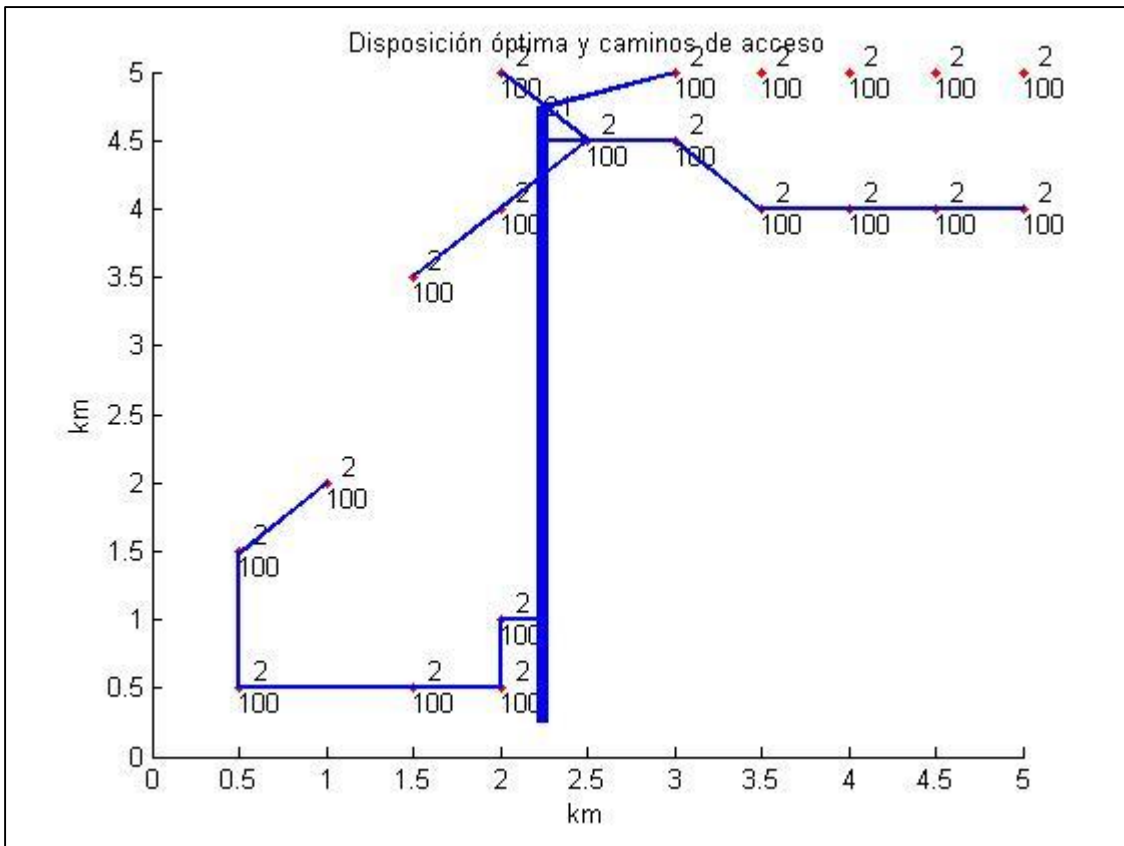


Figura 44. Disposición óptima y caminos de acceso del ensayo 2a

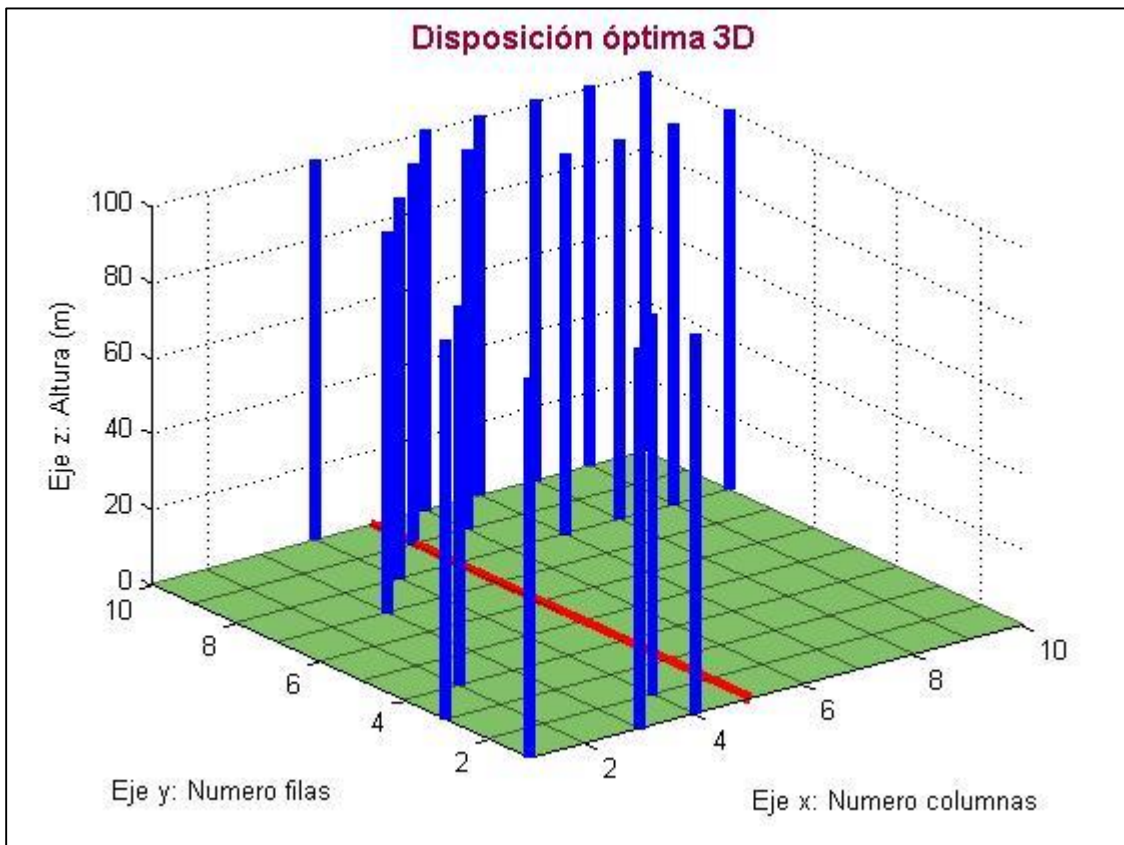


Figura 45. Disposición óptima 3D del ensayo 2a

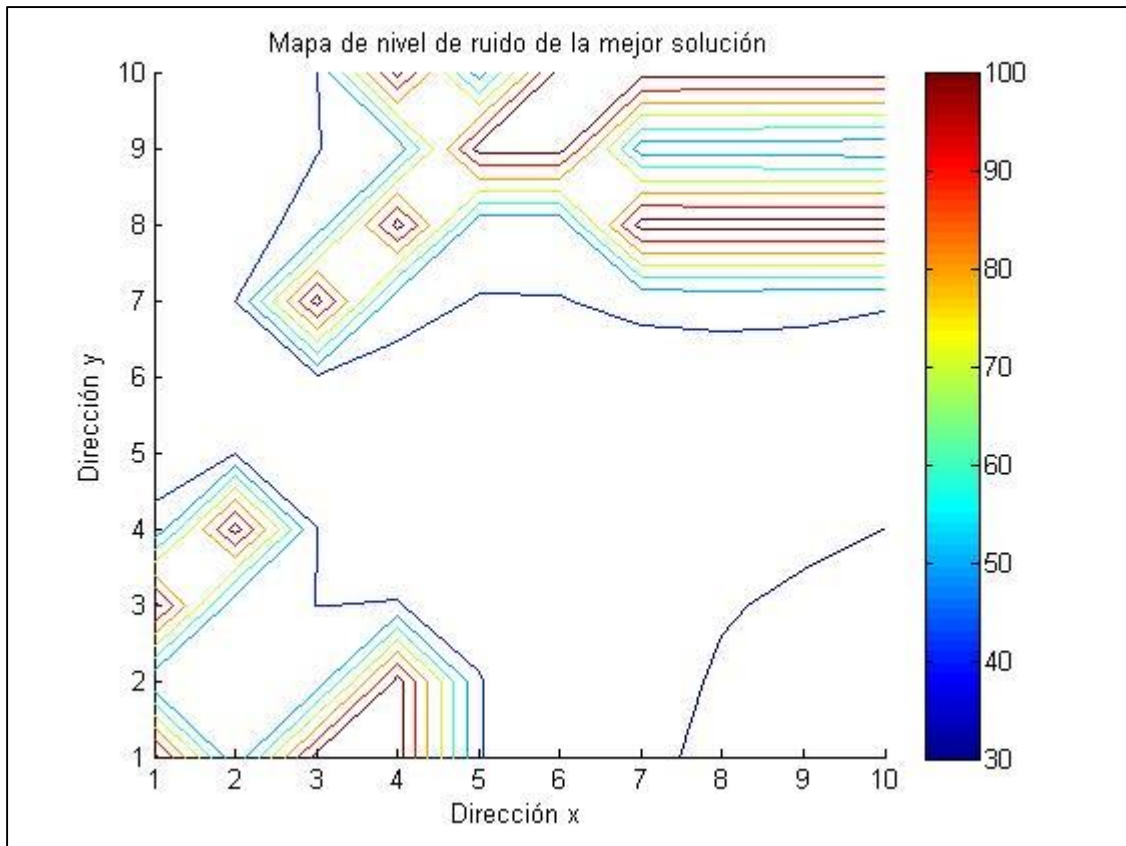


Figura 46. Mapa de ruido del ensayo 2a



Figura 47. Datos económicos del ensayo 2a

Tal y como se puede ver en las figuras 43-47, la solución cumple con las restricciones impuestas, respetando tanto la zona prohibida para la instalación de aerogeneradores como la zona rural. En la figura 46, correspondiente al mapa de ruido de la solución obtenida, se puede comprobar que la línea de nivel de ruido que pasa por la zona rural es la de 30 decibelios, y por tanto se cumple la restricción de 35.

Por otro lado, cabe destacar los datos económicos ofrecidos por la figura 47, que servirán de referencia para compararlos con aquellos obtenidos en el ensayo 2b:

- Valor Actual Neto (VAN) de la inversión: 26.565.448 €
- Inversión en Obra Civil: 2.368.388 €
- Potencia media: 5173 kW

### 5.2.2 Ensayo 2b

Como se comentó al inicio del ensayo 2a, el escenario para este ensayo se mantendrá igual, cambiando únicamente el límite de ruido permitido en la zona rural, el cual es mostrado en la figura 48.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
2	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
3	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
4	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
5	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
6	110	110	110	110	110	60	60	60	60	60
7	110	110	110	110	110	60	60	60	60	60
8	110	110	110	110	110	60	60	60	60	60
9	110	110	110	110	110	60	60	60	60	60
10	110	110	110	110	110	60	60	60	60	60

Figura 48. Límite de ruido del ensayo 2b

Ahora se va a suponer que el terreno donde se pretende instalar el parque eólico se encuentra en Alemania, y por tanto el límite de ruido es de 60 decibelios. Con esta modificación se pretende evaluar el efecto que tiene la restricción de ruido a la hora del diseño de un parque eólico. Las características técnicas del ensayo son idénticas a las del caso anterior. A continuación se muestran los resultados obtenidos para el ensayo 3 (Figuras 49 a 53):



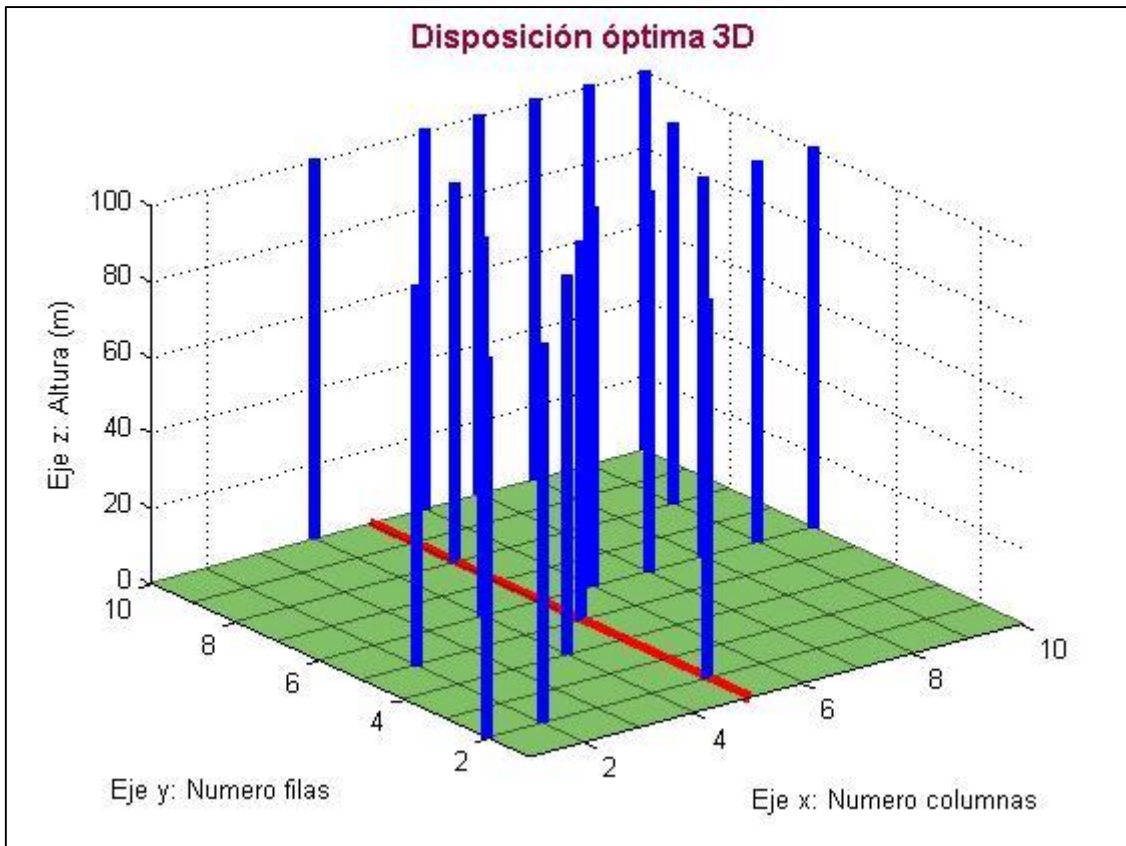


Figura 51. Disposición óptima 3D del ensayo 2b

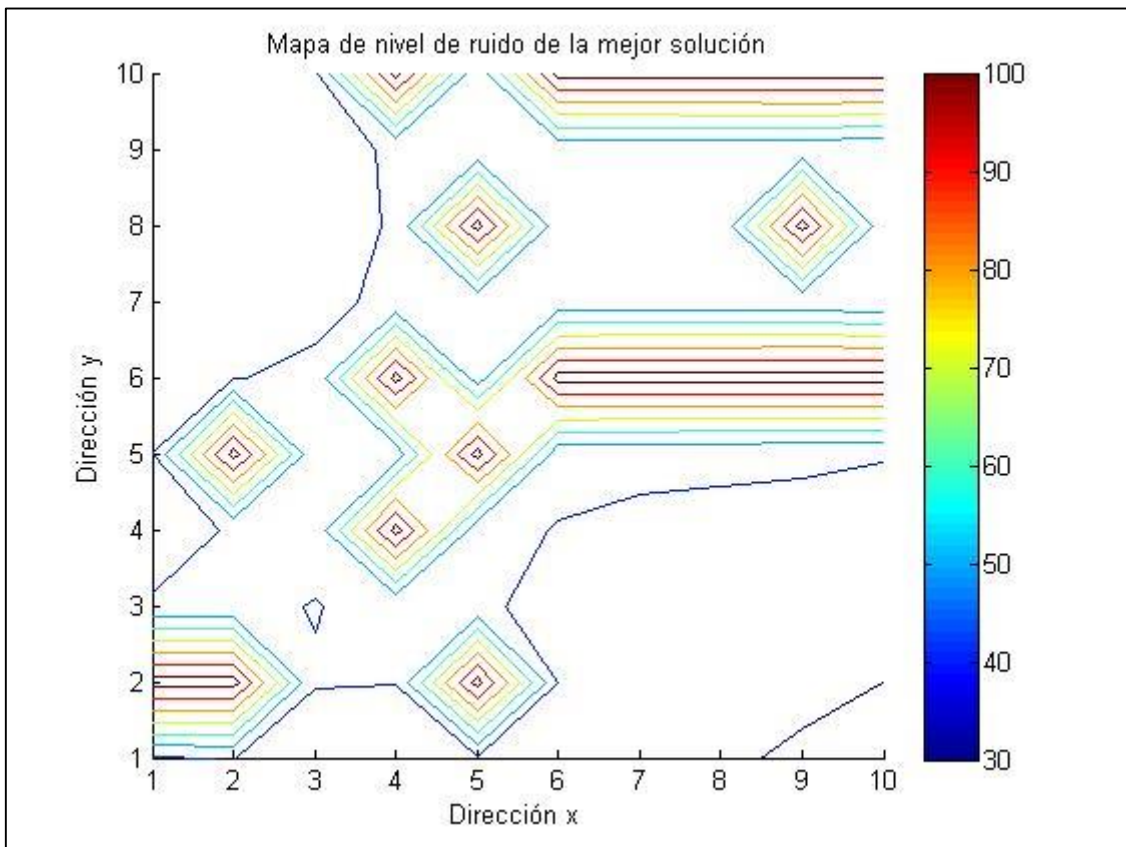


Figura 52. Mapa de ruido del ensayo 2b



Figura 53. Datos económicos del ensayo 2b

En este caso también se puede comprobar que la solución cumple con las restricciones impuestas. A diferencia del ensayo 2a, en la figura 52, correspondiente al mapa de ruido de la solución obtenida en el ensayo 2b, se puede ver cómo al ser el límite de ruido de 60 decibelios, los aerogeneradores se pueden ubicar en las celdas próximas a la zona rural.

Los datos económicos referentes al ensayo 2b se pueden visualizar en la figura 53. A continuación se destacan los más significativos:

- Valor Actual Neto (VAN) de la inversión: 27.241.378 €
- Inversión en Obra Civil: 2.366.162 €
- Potencia media: 5221 kW

Comparando estos resultados con los obtenidos en el ensayo 2a, se puede concluir:

- El hecho de que el ensayo 2a tuviese una restricción de ruido mayor, hace que los aerogeneradores no tengan tantas posibilidades de ser ubicados y por tanto su producción de energía se pueda ver afectada. Este hecho se puede ver comparando el valor actual neto del ensayo 2a y el del ensayo 2b, que difieren en unos 700.000 €.

- Por otra parte, el hecho de que las turbinas no tengan tanta libertad para ser ubicadas, puede provocar que éstas se sitúen lejos de los caminos principales, aumentando el coste de la obra civil.
- Por último, y como consecuencia de lo anterior, la potencia media producida por cada parque es distinta, debido al efecto estela, ya que al estar los aerogeneradores concentrados en zonas más próximas, existe una disminución de velocidad de viento y por tanto una disminución de producción de energía.



### 5.3 Ensayo 3

La novedad que introduce este ensayo es la presencia de una zona con mejores condiciones de viento dentro del terreno bajo estudio. Al igual que se ha hecho en casos anteriores, primero se ejecutará sin restricciones de ruido (ensayo 3a), y posteriormente se llevará a cabo el mismo ensayo con restricciones de ruido (ensayo 3b).

#### 5.3.1 Ensayo 3a

Las características técnicas del ensayo se citan a continuación:

- Número de aerogeneradores: 20. Tipo: Ecotecnia 80.20 Paso Variable, potencia nominal 2 MW.
- Terreno de dimensiones 2000×2000 m<sup>2</sup>, representado en una malla de 20×20.
- Probabilidad de viento norte-sur 50% y este-oeste 50%, con los valores del parámetro de escala de la distribución de Weibull mostrados en la figura 54:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
8	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
9	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
10	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
11	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
13	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
14	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
15	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
16	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
17	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
18	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
19	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
20	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5

Figura 54. Valores de 'c' de la distribución de Weibull para el ensayo 3a

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la ejecución de este ensayo figuras 55 a 59:

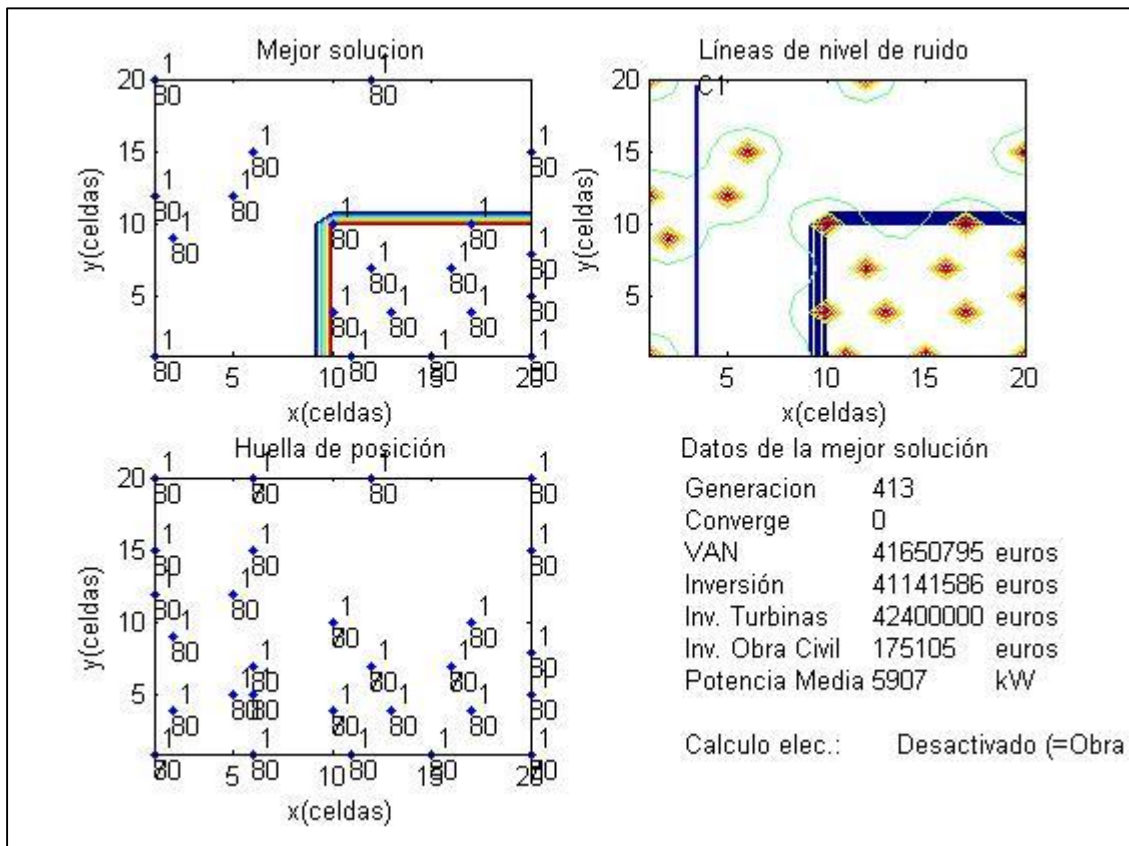


Figura 55. Ejecución del ensayo 3a

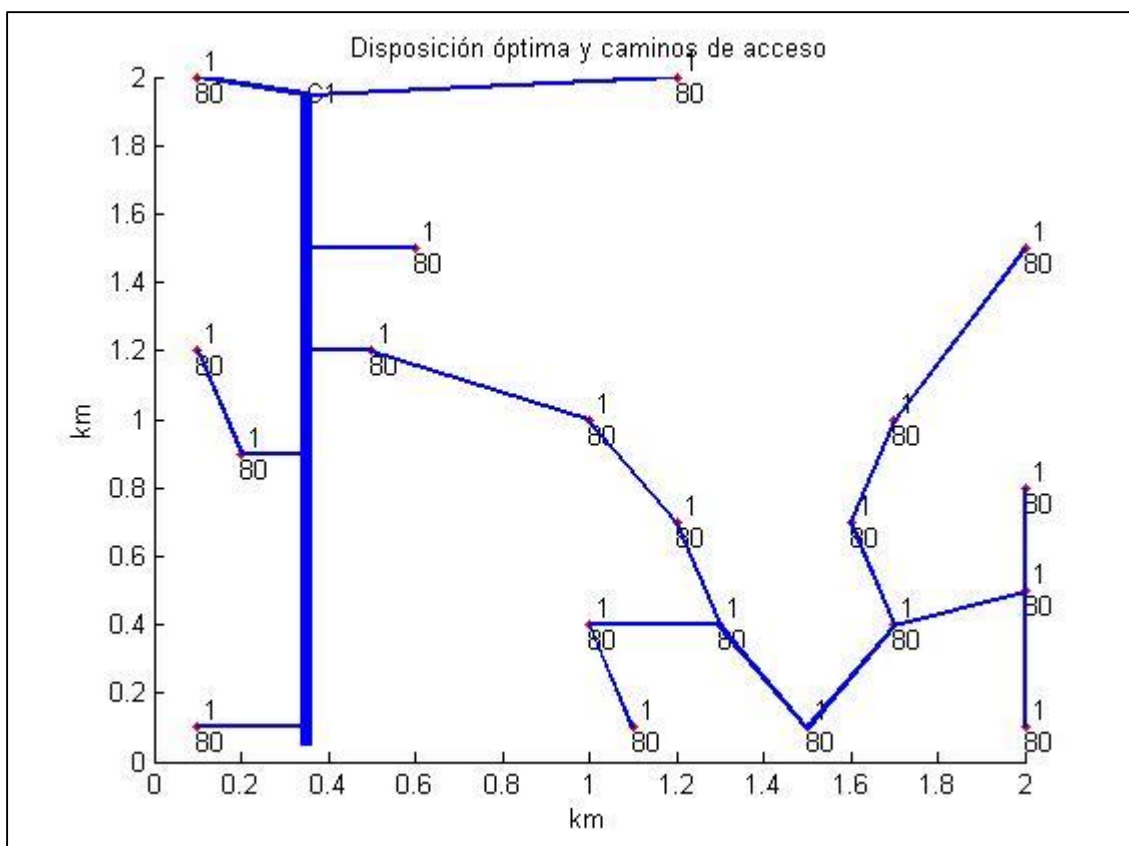


Figura 56. Caminos principales y de acceso del ensayo 3a

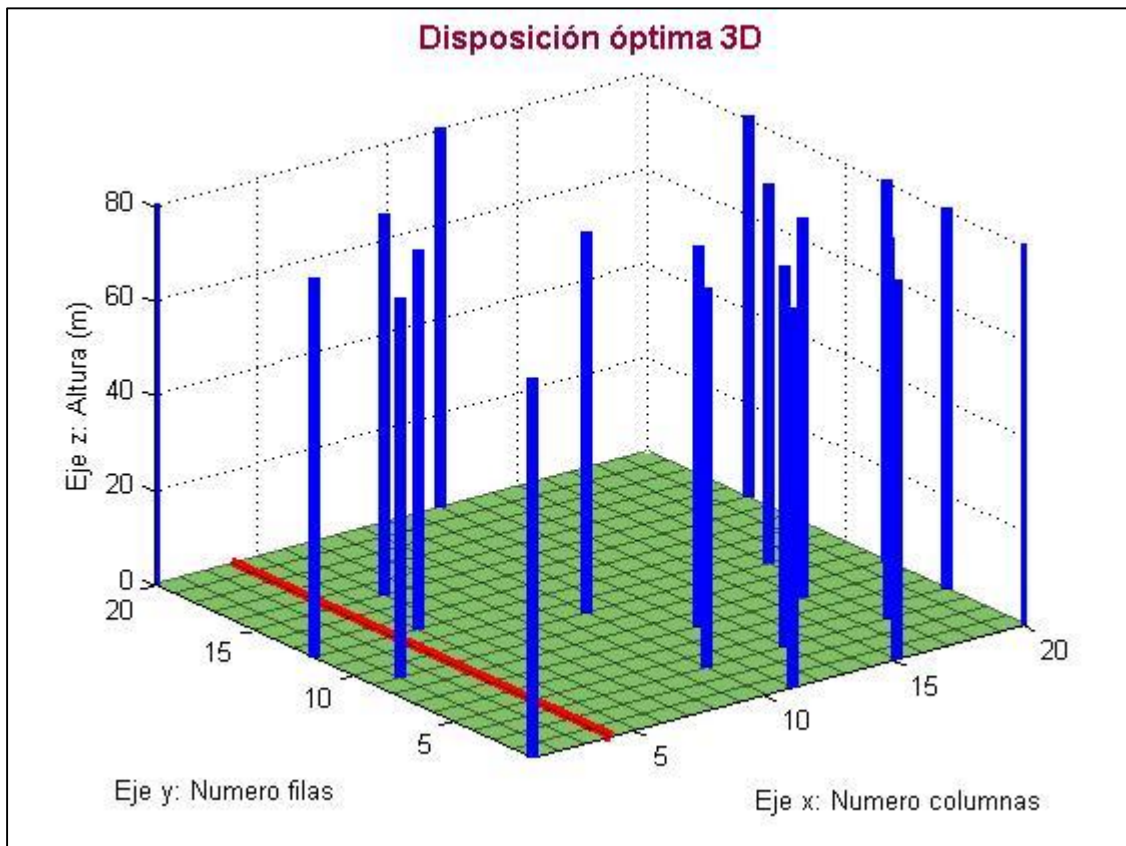


Figura 57. Disposición óptima 3D del ensayo 3a

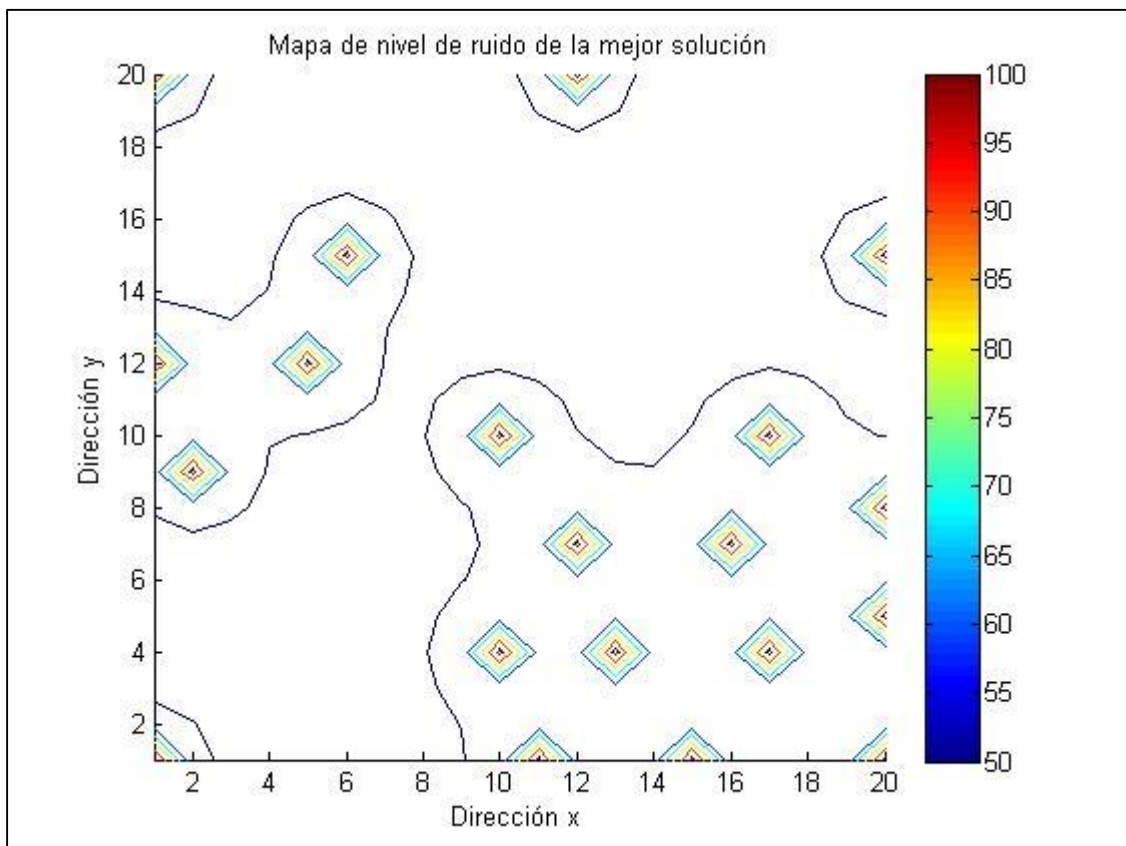


Figura 58. Mapa de ruido del ensayo 3a



Figura 59. Datos económicos del ensayo 3a

De los resultados obtenidos en este ensayo, se puede destacar cómo los aerogeneradores se ubican en la zona donde las condiciones de viento son mejores, en la esquina inferior derecha del parque. A pesar de esto, hay algunos aerogeneradores que se sitúan fuera de esta región, con el objetivo de disminuir el efecto estela. Por otra parte, se resaltan los datos económicos del ensayo 3a:

- Valor Actual Neto (VAN) de la inversión: 41.650.795 €
- Inversión en Obra Civil: 175.105 €
- Potencia media: 5907 kW

Estos valores servirán de referencia para evaluar el ensayo 3b, que se presenta a continuación.



### 5.3.2 Ensayo 3b

El ensayo 3b es idéntico al 3a, con la particularidad de que en este existe una restricción de ruido en la zona en la que se encuentran las mejores condiciones de viento. En la figura 60 se muestran estas restricciones:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
2	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
3	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
4	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
5	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
6	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
7	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
8	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
9	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
10	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
11	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
12	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
13	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
14	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
15	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
16	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	50	50	50	50	50
17	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	50	50	50	50	50
18	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	50	50	50	50	50
19	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	50	50	50	50	50
20	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	50	50	50	50	50

Figura 60. Restricciones de ruido del ensayo 3b

En las figuras 61 a 65 se muestran los resultados obtenidos para este ensayo:

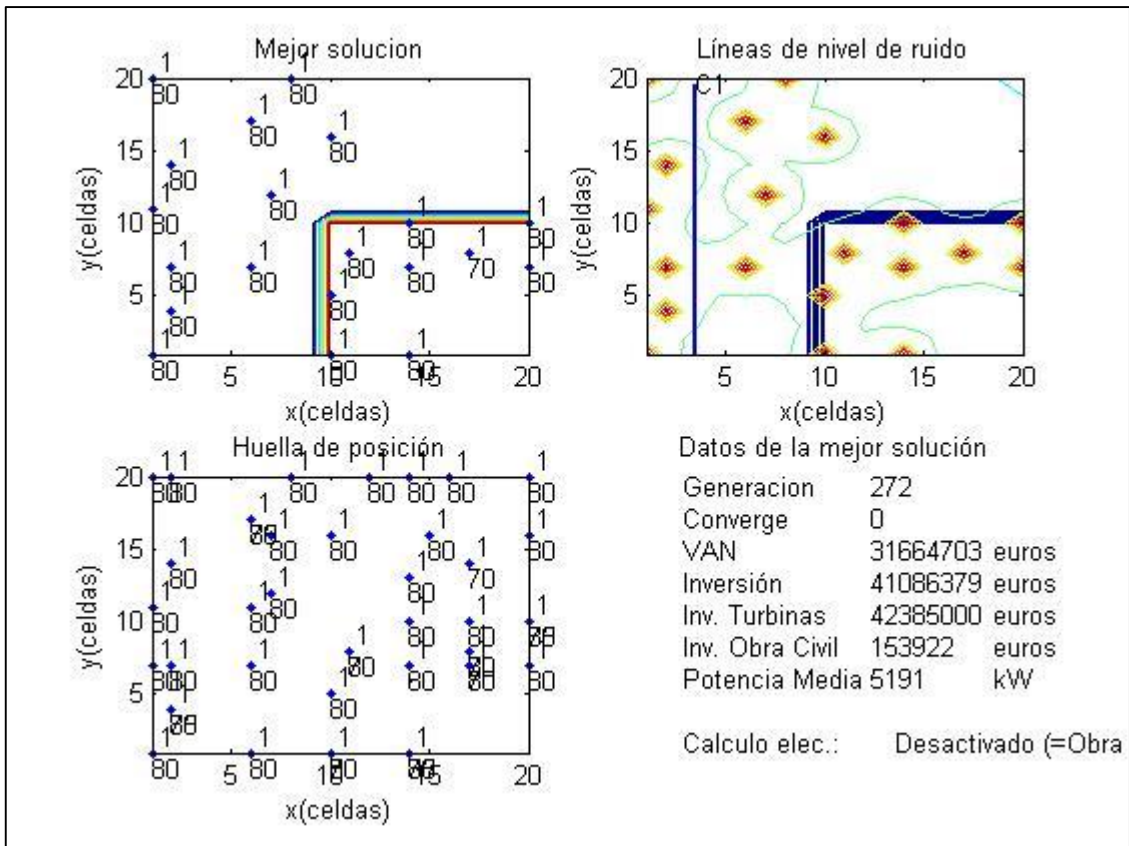


Figura 61. Ejecución del ensayo 3b

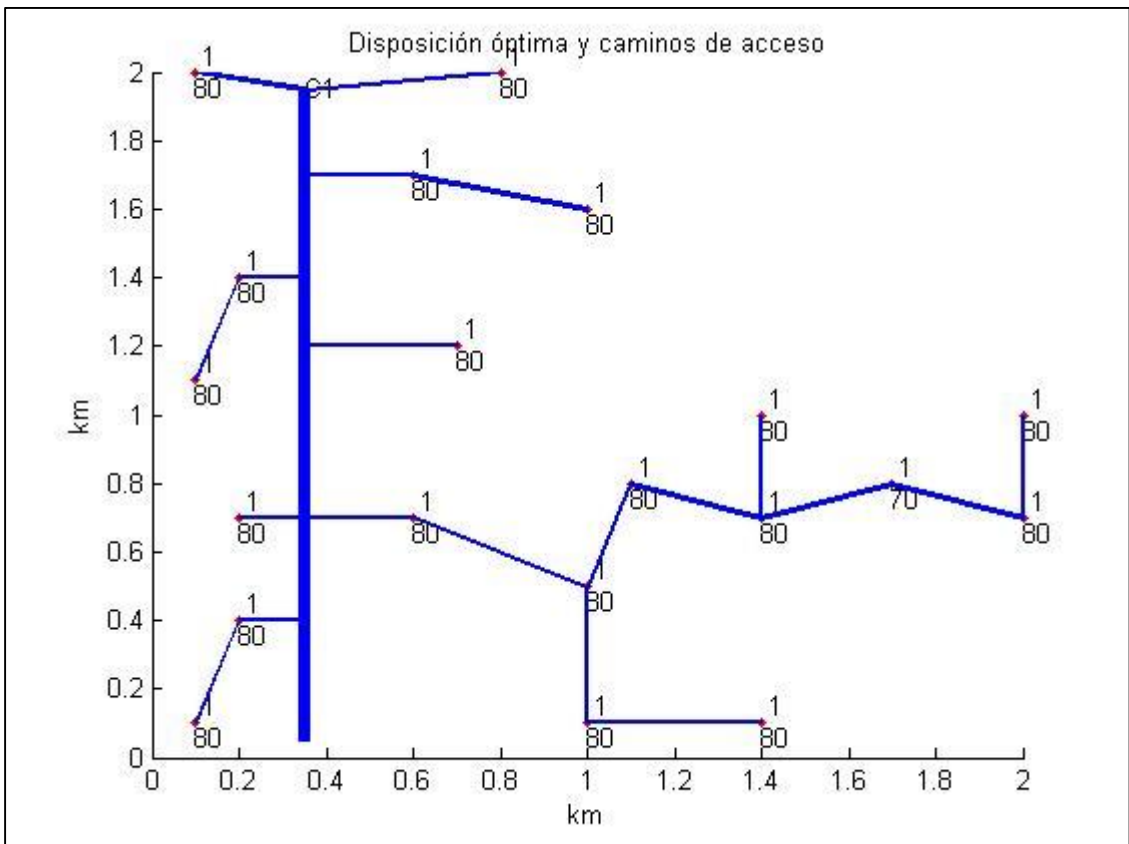


Figura 62. Caminos principales y de acceso del ensayo 3b

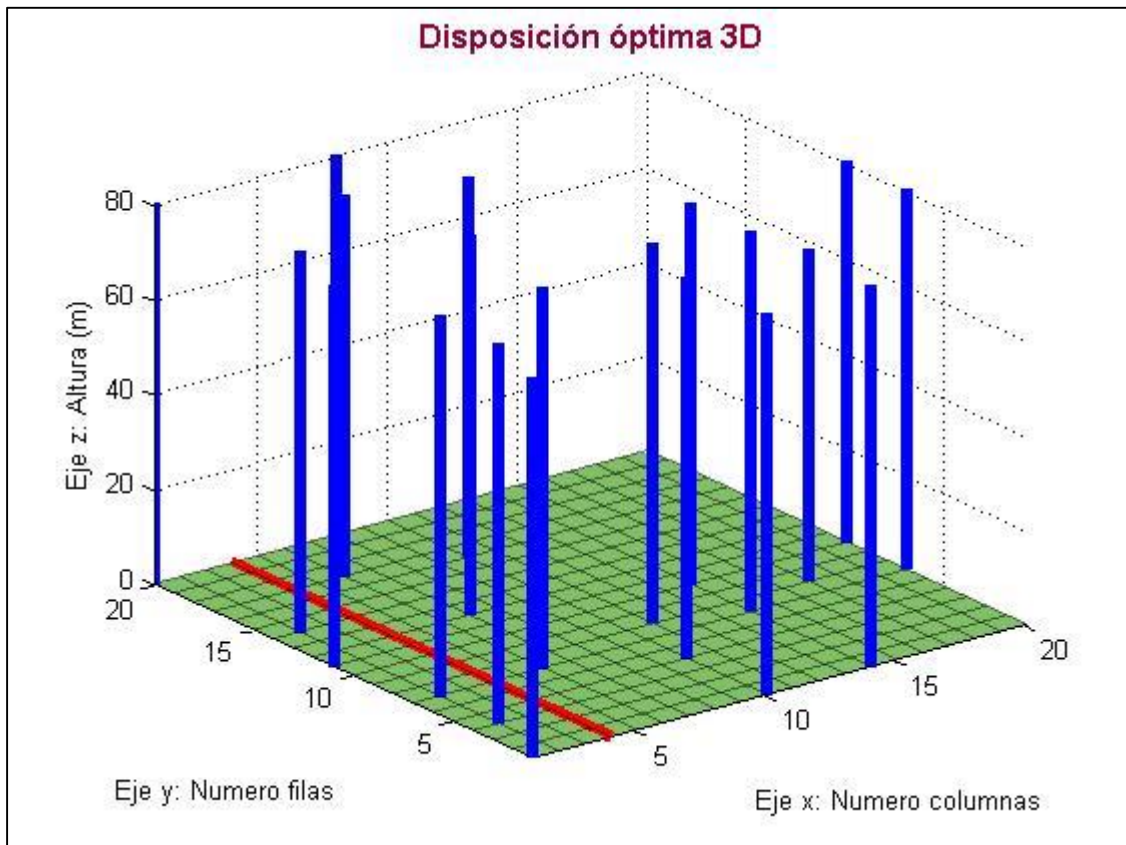


Figura 63. Disposición 3D del ensayo 3b

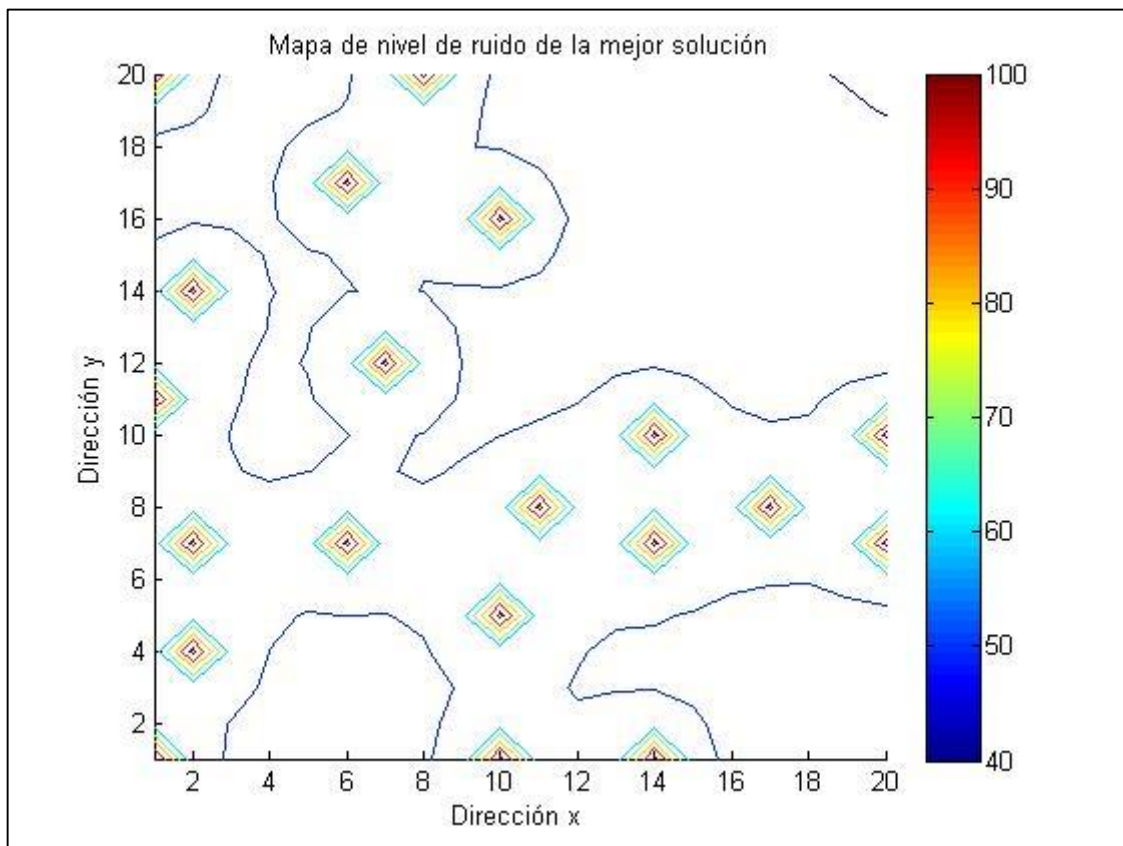


Figura 64. Mapa de ruido del ensayo 3b

## DATOS ECONÓMICOS DE LA MEJOR SOLUCIÓN

Generación	273
Converge	0
VAN	31664703 euros
Inversión	41086379 euros
Inv. Turbinas	42385000 euros
Inv. Obra Civil	153922 euros
Potencia Media	5191 kW



Figura 65. Datos económicos del ensayo 3b

En la figura 64, correspondiente al mapa de ruido del ensayo 3b, se puede comprobar que la solución obtenida por el algoritmo respeta los límites de ruido establecidos. Estos límites suponen una disminución del VAN de la inversión con respecto al ensayo 3a, ya que la restricción de ruido obliga a los aerogeneradores a situarse fuera de la zona en la que existen unas mejores condiciones de viento. A continuación se destacan los datos económicos del ensayo 3b:

- Valor Actual Neto (VAN) de la inversión: 31.664.703 €
- Inversión en Obra Civil: 153.922 €
- Potencia media: 5191 kW

Es muy significativo la disminución del VAN, que para el ensayo 3a resultó ser 41 millones de € y ahora tan sólo es de 31. Como ya se ha comentado, la restricción de ruido obliga a desplazar algunos aerogeneradores de la zona de mejor viento, provocando una disminución de la potencia generada de 5907 a 5191 kW.



## 5.4 Ensayo 4

El ensayo 4 tiene como principal objetivo el estudio de las distintas soluciones obtenidas por el algoritmo cuando éste se ejecuta en múltiples ocasiones manteniendo constantes los datos de entrada. Tal y como se explicó en el capítulo 3, los algoritmos genéticos parten de una solución inicial que puede ser generada de forma aleatoria o no. En este trabajo siempre se han considerado soluciones iniciales aleatorias lo que puede provocar que la solución encontrada por el algoritmo varíe entre una ejecución y otra. En este ensayo se va a estudiar un ejemplo concreto de la influencia de este factor en las soluciones.

### Características técnicas del ensayo 4:

- Terreno de dimensiones  $3000 \times 3000 \text{ m}^2$ , discretizado en una malla de  $10 \times 10$ .
- Número máximo de aerogeneradores a instalar: 15. Tipo: Ecotecnia 80.20 de 2MW de potencia nominal.
- Direcciones predominantes de viento: norte-sur y este-oeste, cada una de ellas con una probabilidad de ocurrencia del 50%.
- Además, existe una zona del terreno con mejores condiciones de viento. En la figura 66 se muestran los valores del parámetro de escala de la distribución de Weibull.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
4	5	5	5	5	7	7	5	5	5	5
5	5	7	7	7	7	7	7	5	5	5
6	5	7	7	7	7	7	7	5	5	5
7	5	5	5	5	7	7	5	5	5	5
8	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
9	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
10	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Figura 66. Valores del parámetro C para el ensayo 4

- También existe una zona rural que obliga a respetar los niveles de ruido mostrados en la figura 67:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
2	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
3	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
4	40	40	40	110	110	110	110	110	110	110
5	40	40	40	110	110	110	110	110	110	110
6	40	40	40	110	110	110	110	110	110	110
7	40	40	40	110	110	110	110	110	110	110
8	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
9	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
10	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110

Figura 67. Límites de ruido para el ensayo 4

En la tabla 8 se encuentran recogidas las mejores soluciones obtenidas para las diez ejecuciones que se han realizado para este ensayo. Para cada ejecución se muestran: el número de generaciones hasta la convergencia, el VAN (€), la inversión en turbinas (€), la inversión en obra civil (€), la potencia media (kW) y la desviación con respecto a la mejor solución (%).

Ejecución	Nº de generaciones	VAN	Inv. Turbinas	Inv. Obra Civil	Potencia Media	Desviación
1	432	27309448	31800000	171312	4155	0,27
2	219	26740271	23320000	97012	3522	2,35
3	282	26652658	23320000	100214	3517	2,67
4	393	27226957	31800000	137946	4145	0,57
5	272	26232095	25440000	103983	3633	4,21
6	385	26388334	21200000	79630	3349	3,63
7	253	26603326	23320000	90107	3512	2,85
8	321	26563014	31800000	136696	4126	3,00
9	413	26928502	23320000	99462	3536	1,66
10	353	27383639	29680000	107714	4006	0,00

Tabla 8. Resultados de las distintas ejecuciones realizadas para el ensayo 4

La ejecución 5 es la que tiene un menor VAN, mientras que en la ejecución 10 el algoritmo encontró la mejor solución. La principal diferencia entre las distintas soluciones se encuentra en la columna referente a la inversión en turbinas. Cada ejecución evolucionó de una forma diferente, haciendo que el número de turbinas instaladas pudiera variar. En las figuras 68 y 69 se muestran las ejecuciones 10 y 5 respectivamente. En ambas figuras se puede ver cómo los aerogeneradores tratan de situarse en la zona donde las condiciones de viento son mejores, respetando las limitaciones de ruido de la figura

67. Los aerogeneradores que no pueden ser instalados en esa zona por falta de espacio, se sitúan en las proximidades del camino principal, con el fin de reducir en la medida de lo posible el coste de la obra civil. En concreto, la ejecución 10 instaló 14 turbinas, consiguiendo generar una potencia media de 4006 kW, mientras que la ejecución 5 instaló 12 aerogeneradores, lo que significó una producción media de potencia de 3633 kW. Esta diferencia de potencia media producida es la que determina la desviación del 4,21% entre el VAN de la mejor solución y el VAN de la peor solución.

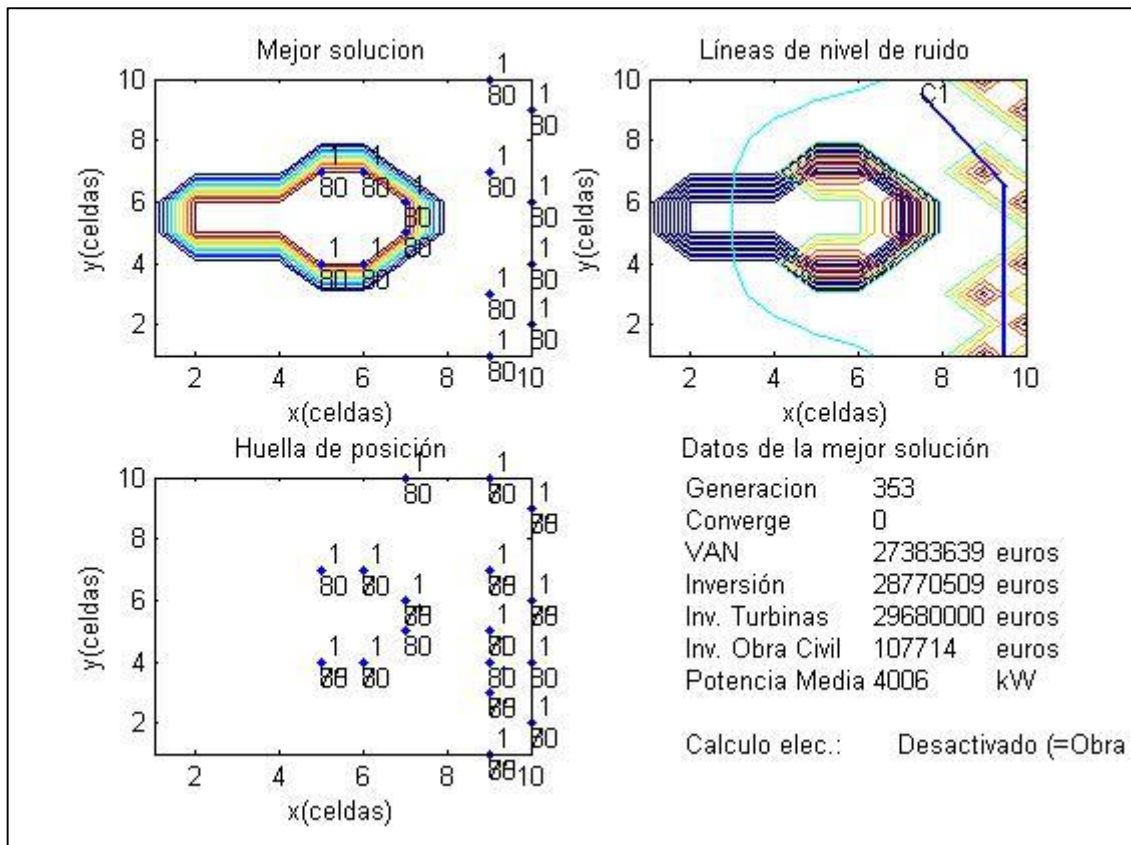


Figura 68. Ejecución 10 del ensayo 4

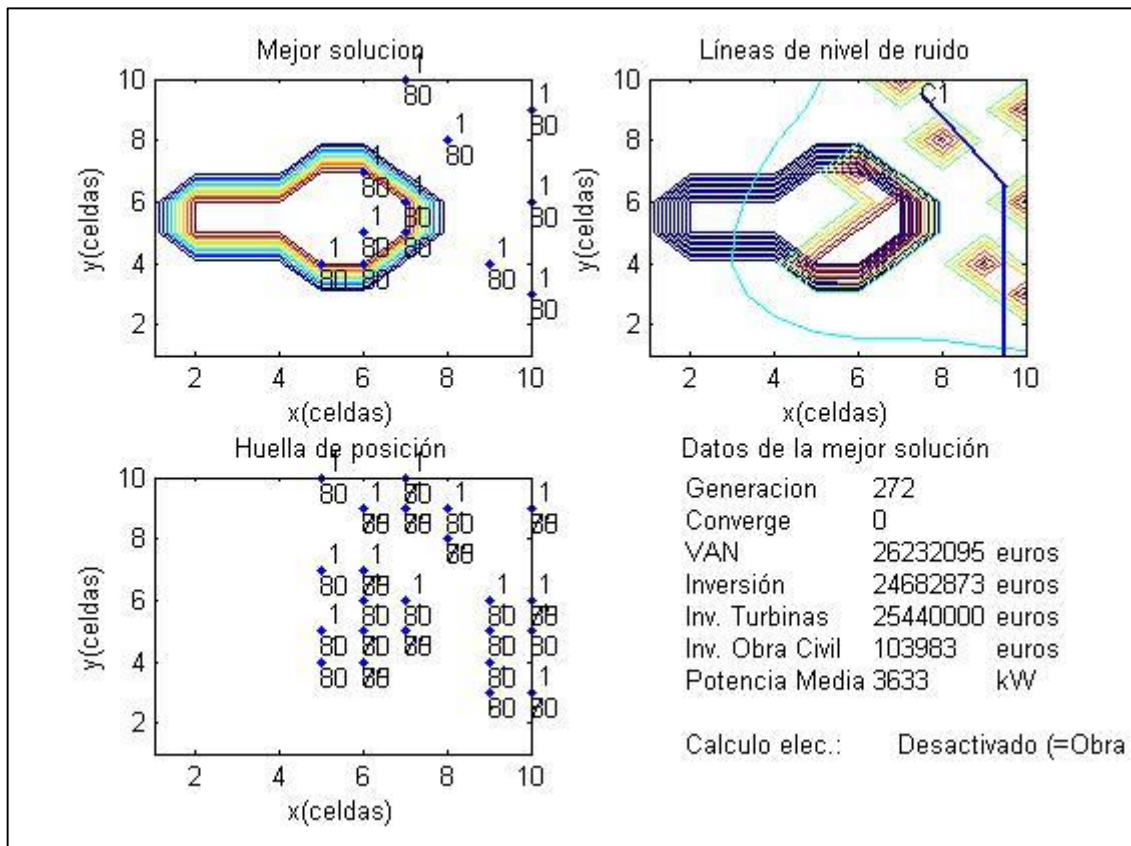


Figura 69. Ejecución 5 del ensayo 4

## 5.5 Ensayo 5

En este ensayo se presenta la ejecución completa del programa (modo de ejecución 1). Es decir, dado un potencial terreno donde instalar un parque eólico, determinar las posiciones de los aerogeneradores constituyentes del parque, así como la realización del trazado eléctrico y la ubicación de las subestaciones necesarias para conducir la energía producida hasta la línea de alta tensión más cercana. Al igual que se ha hecho en otros ensayos, se ejecutará una vez sin restricciones de ruido (ensayo 5a) y otra con restricciones (ensayo 5b). Ambos ensayos poseen las mismas características técnicas:

- Las dimensiones del terreno son 25.000.000 m<sup>2</sup>, discretizados en una rejilla de 10×10.
- Van a ser instalados un máximo de 10 aerogeneradores de 3 MW de potencia nominal, configurando en total un parque eólico de hasta 30 MW de potencia instalada.
- El parque es atravesado por una línea de alta tensión, con capacidad suficiente para evacuar la energía producida en el parque.
- La dirección predominante del viento es la sur-norte, con una probabilidad del 100%.

Como novedad, en el caso de que se quiera resolver el trazado eléctrico, el programa representa los costes relacionados con la media y alta tensión, así como el coste de las subestaciones. En este ejemplo, estos costes son idénticos para el ensayo 5a y el ensayo 5b, y están representados en las figuras 70 a 72.

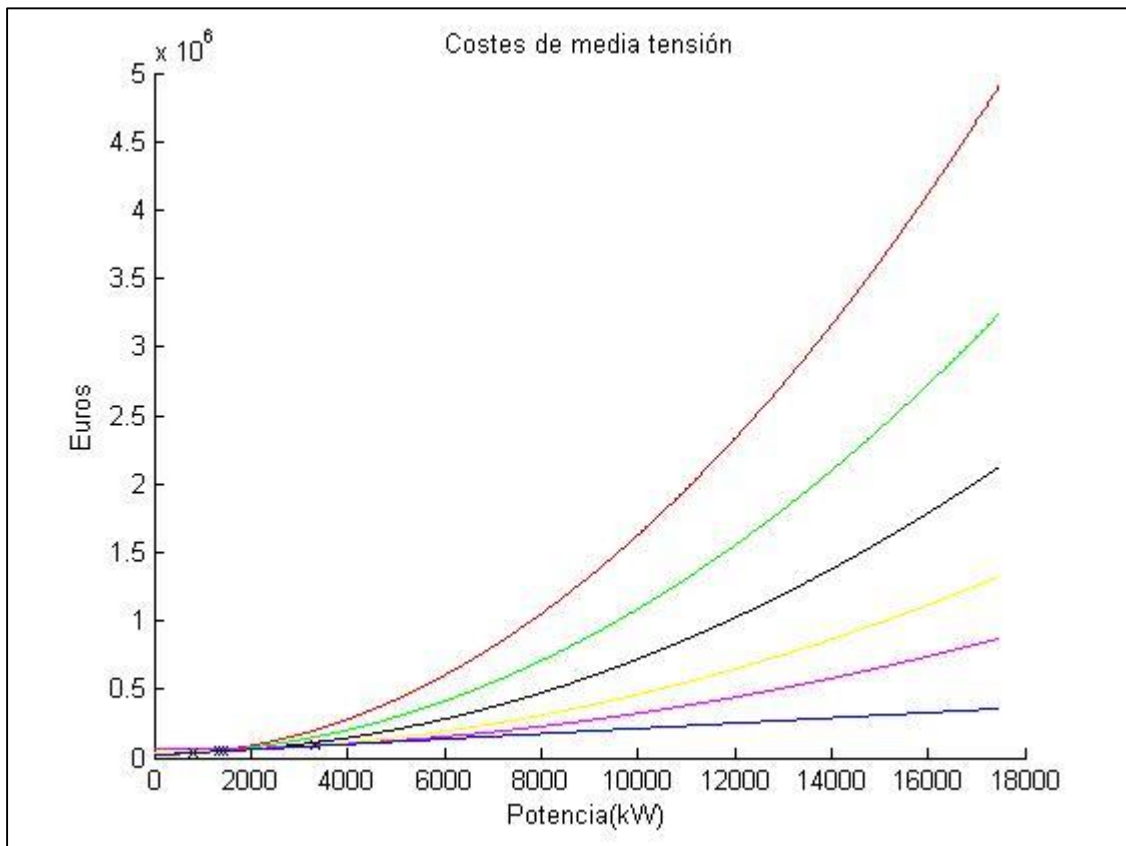


Figura 70. Costes de media tensión para el ensayo 5

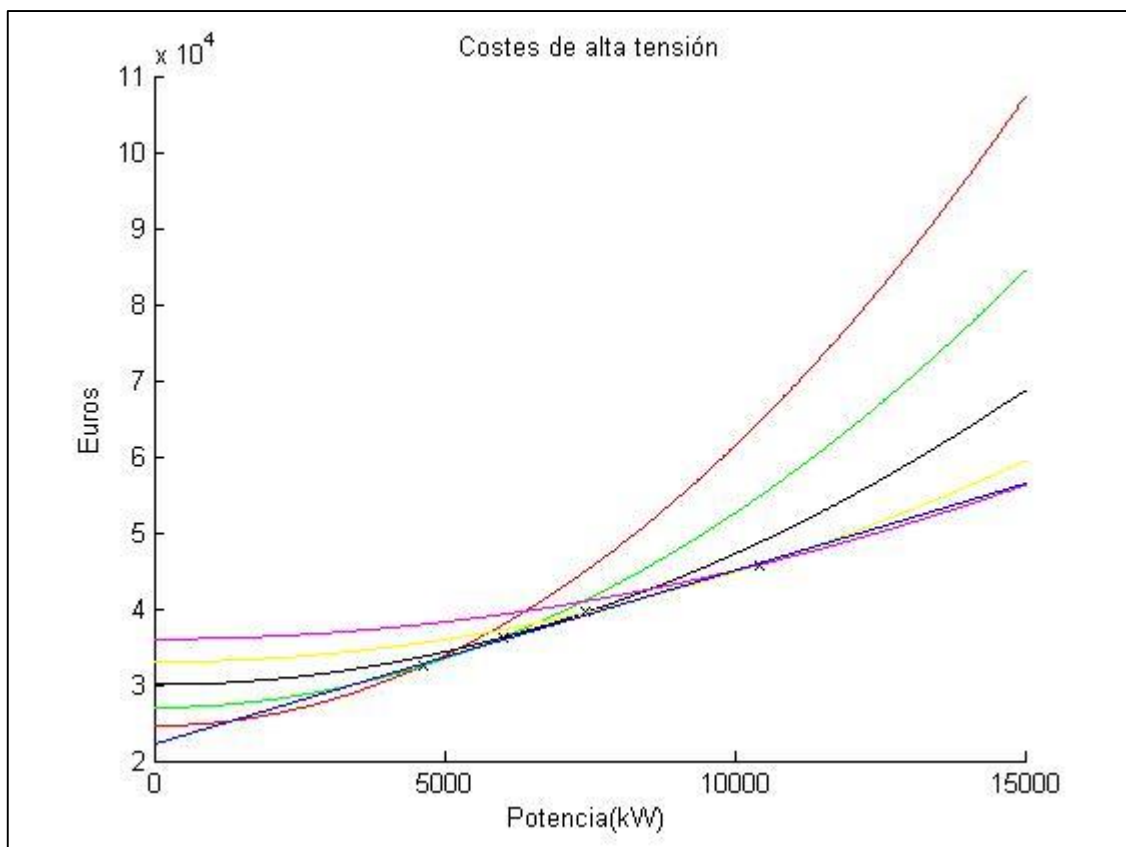


Figura 71. Costes de alta tensión para el ensayo 5

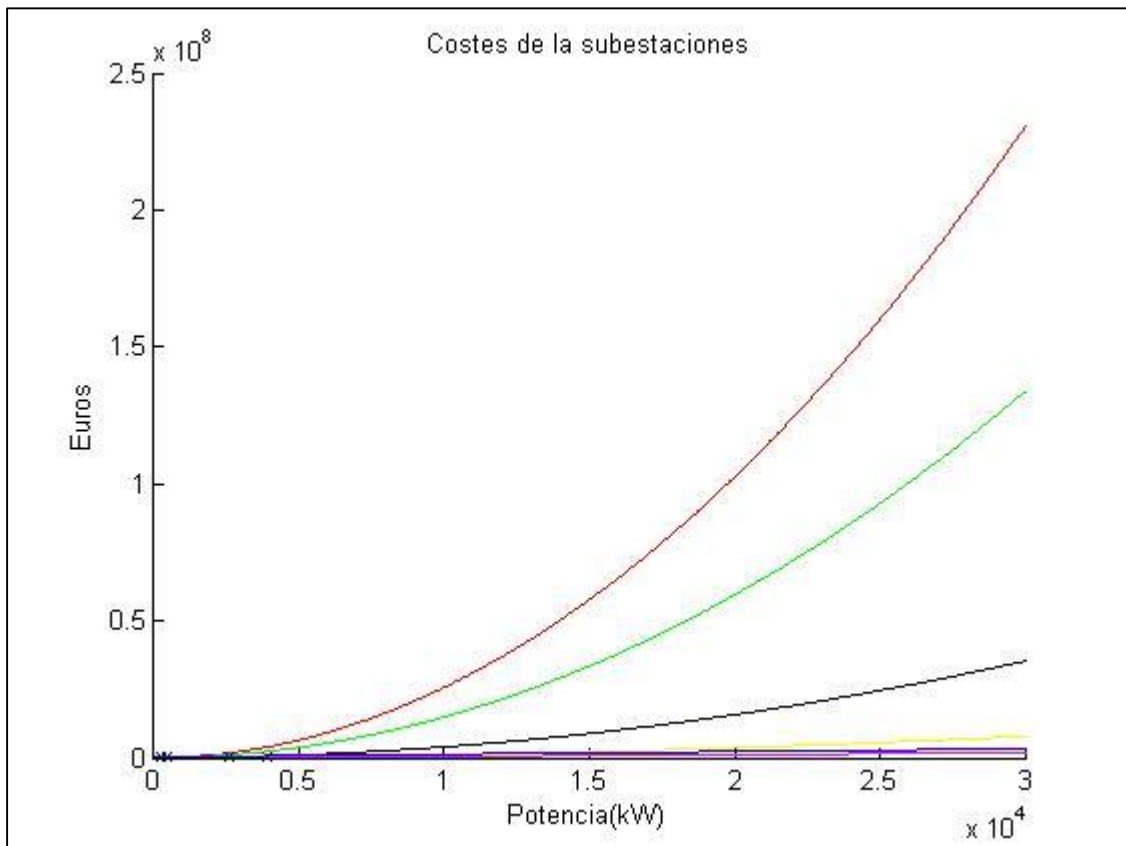


Figura 72. Coste de las subestaciones para el ensayo 5

### 5.5.1 Ensayo 5a

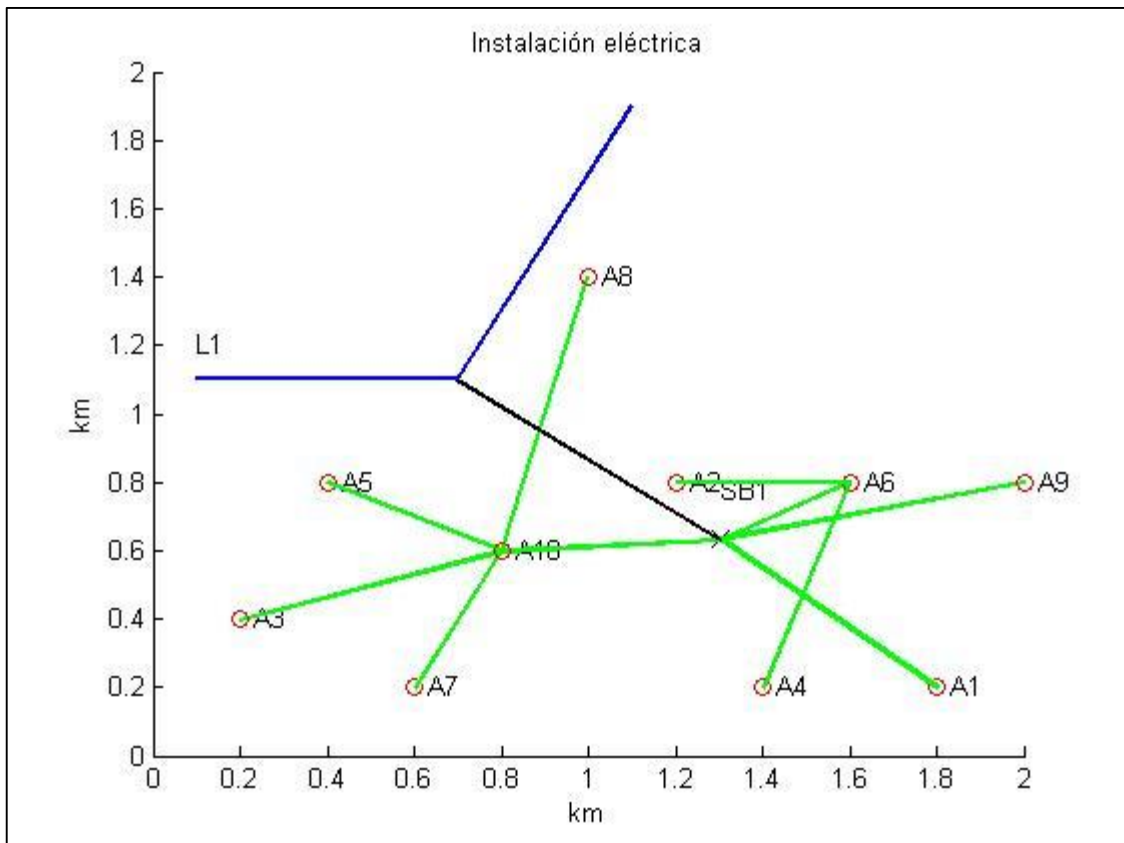


Figura 73. Instalación eléctrica del ensayo 5a

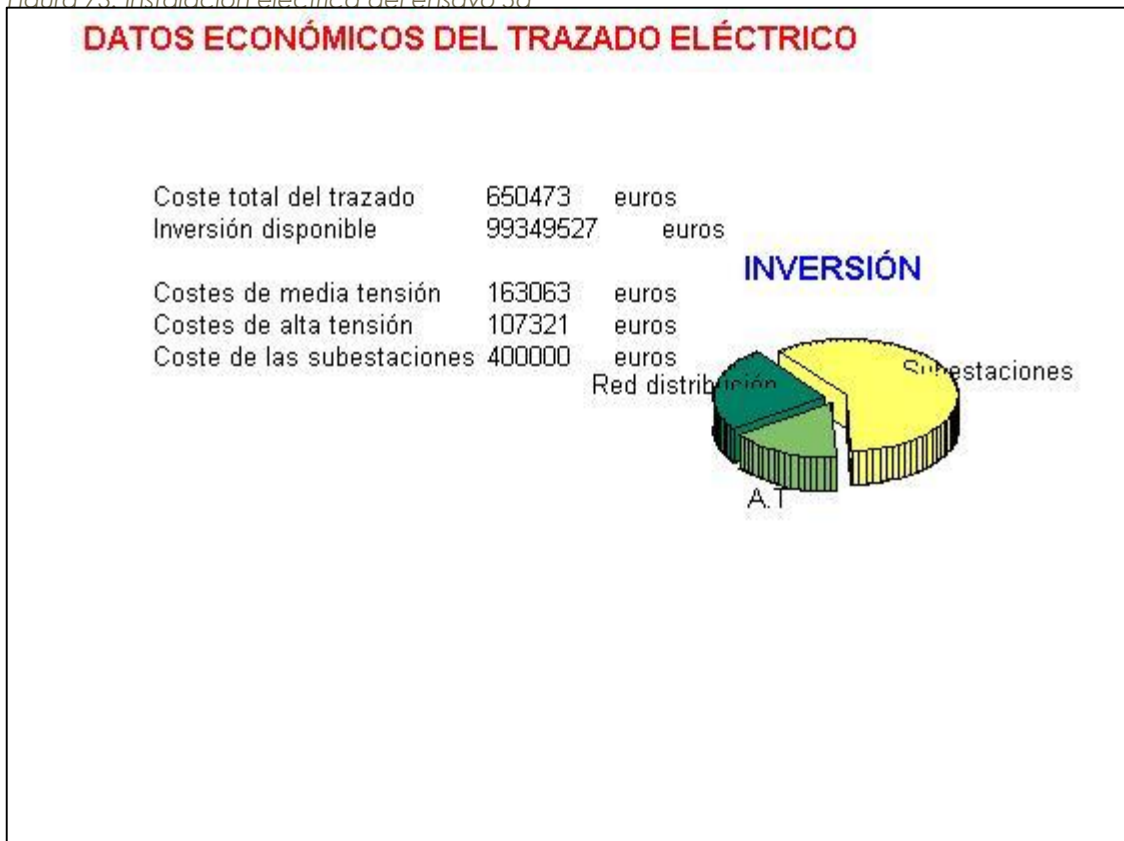


Figura 74. Datos económicos del trazado eléctrico



### 5.5.2 Ensayo 5b

Las restricciones de ruido para el ensayo 5b se muestran en la figura 75:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
2	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
3	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
4	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
5	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
6	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
7	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
8	110	110	110	110	110	110	110	35	35	35
9	110	110	110	110	110	110	110	35	35	35
10	110	110	110	110	110	110	110	35	35	35

Figura 75. Restricciones de ruido del ensayo 5b

Por su parte, los resultados referentes a la instalación eléctrica del ensayo 5b se muestran en las figuras 76 y 77.

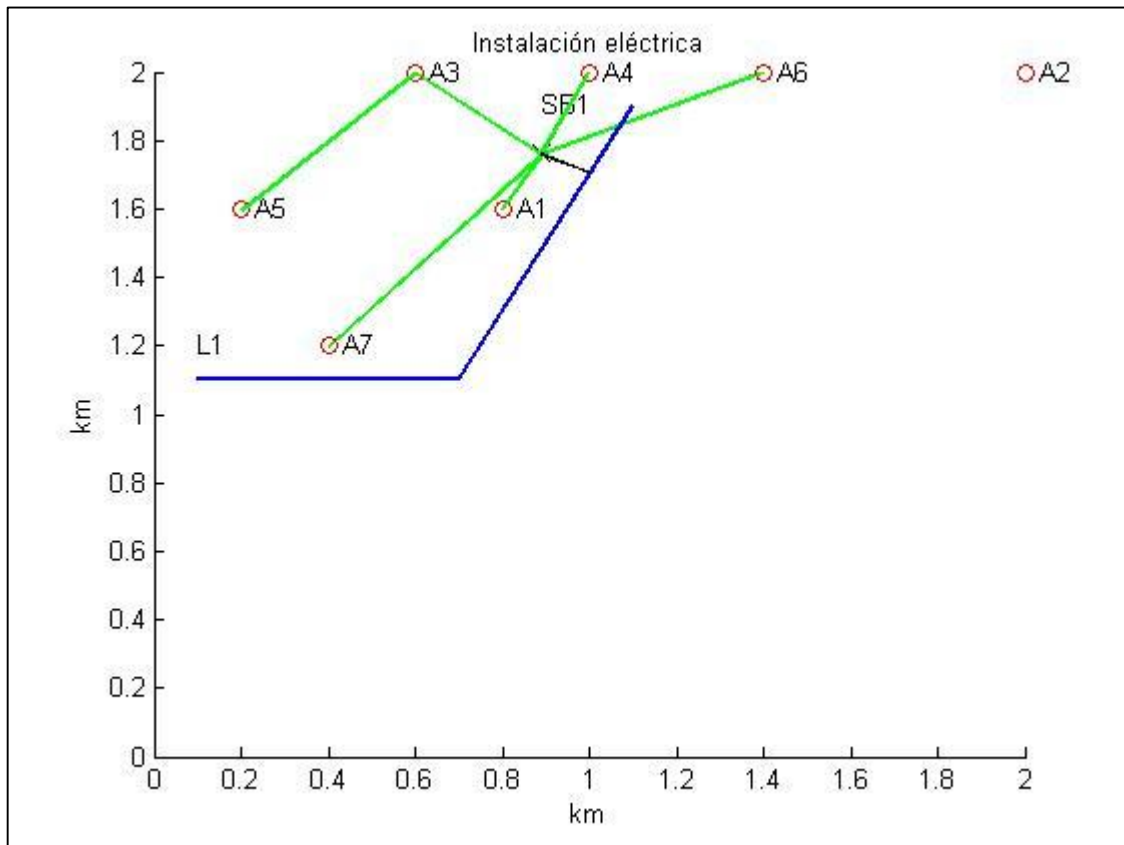


Figura 76. Instalación eléctrica del ensayo 5b

## DATOS ECONÓMICOS DEL TRAZADO ELÉCTRICO

Coste total del trazado 567999 euros  
Inversión disponible 99432001 euros

Costes de media tensión 125091 euros  
Costes de alta tensión 81254 euros  
Coste de las subestaciones 400000 euros

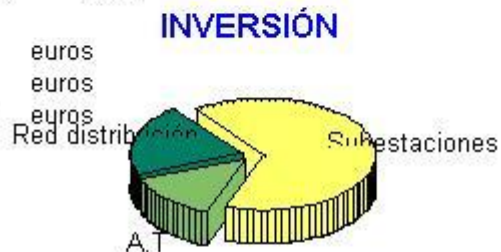


Figura 77. Datos económicos del trazado eléctrico para el ensayo 5b

Cabe destacar que como consecuencia de las restricciones de ruido, en el ensayo 5b sólo se instalaron 7 aerogeneradores. Por ello, existe una reducción considerable en los costes del trazado eléctrico para esta situación. Sin embargo, el menor número de turbinas provoca una menor producción de energía, y finalmente el VAN de la inversión del ensayo 5a es del orden de 6 millones de euros superior al del ensayo 5b.



# Capítulo VI. Conclusiones y líneas futuras

En este trabajo se ha llevado a cabo un estudio sobre el impacto acústico producido por un parque eólico. Para alcanzar dicho objetivo, ha sido necesario entender cómo se produce el ruido y de qué forma se propaga, y por otra parte todos los aspectos relacionados con la producción de energía eléctrica a través de aerogeneradores. Una vez asentados todos los conocimientos, ha sido necesario configurar una herramienta realizada con anterioridad para el diseño óptimo de parques eólicos, para incorporar en ella el cálculo y la imposición de restricciones de ruido. Esto ha conllevado un análisis exhaustivo del algoritmo previamente desarrollado. Seguidamente se ha probado el nuevo algoritmo en un conjunto de escenarios que han permitido comprobar la bondad del algoritmo desarrollado. Los ensayos presentados en este trabajo muestran las capacidades de las que dispone la herramienta de diseño.

Con vistas al futuro, existe la posibilidad de mejorar la herramienta aquí presentada. Por un lado, el ruido que se genera cuando los aerogeneradores se encuentran en funcionamiento, es un fenómeno difícil de caracterizar. En el capítulo 1 ya se comentó este aspecto. En este trabajo se ha supuesto que los aerogeneradores son fuentes puntuales de ruido, lo que no deja de ser una aproximación. Además, la norma ISO 9613-2 que modela la propagación del sonido en exteriores no contempla el hecho de que la propagación del ruido depende de la velocidad del viento, por lo que este aspecto también podría ser mejorado. Por otra parte existe otro tipo de impacto ambiental como es el impacto visual que podría ser incluido a la hora de diseñar un parque eólico. De esta forma sería posible evaluar y, eventualmente, atenuar en la medida de lo posible el impacto ambiental de los aerogeneradores en su conjunto



# Bibliografía

- [1] Javier Serrano González, “Desarrollo de una herramienta de optimización global de un parque eólico mediante algoritmos evolutivos”, Proyecto Fin de Carrera, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Sevilla, 2007.
- [2] R. Carter, "Boat remains and maritime trade in the Persian Gulf during the sixth and fifth millennia BC," *Antiquity*, Volume 80, N.307, 2006.
- [3] M. Sathyajith, “Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics”, Springer, Berlin Heidelberg, 2006.
- [4] B. Sorensen, "History of, and recent progress in, wind-energy utilization," *Annual Review of Energy and the Environment*, Vol. 20, pp. 387-424, 1995.
- [5] E Golding, “The generation of electricity by wind power”, *Halsted Press*, 1976.
- [6] “The Return of Windpower to Grandpa's Knob and Rutland County”, *Noble Environmental Power*, LLC, 2007.
- [7] E. Hau, “Wind turbines fundamentals, technologies, application, economics”. *Springer Verlag*, 2000.
- [8] “Statistical Review of World Energy”, *BP*, disponible en: [bp.com/statisticalreview](http://bp.com/statisticalreview)
- [9] “Global statistics”, *Global Wind Energy Council*, disponible en: <http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>
- [10] S. Donovan, “Wind farm optimization”, disponible en: <http://www.orsnz.org.nz/Prizes/Papers/2005WindFarmOptimization.pdf>.
- [11] GL. Johnson, “Wind energy systems”, *KS*, disponible en: <http://eece.ksu.edu/~gjohnson/Windbook.pdf>, 2006.
- [12] H.G. Beyer, T. Ruger, G. Schafer, H.P. Waldl. "Optimization of Wind Farm Configurations with Variable Number of Turbines," *EUWEC*, 1996.
- [13] Christian A. Henin, Gino Iannace, Luigi Maffei, Ignacio E. Roggio y German A. Miretti. “Ruido de generadores eólicos: Análisis y aplicación de la metodología de medición según la normativa vigente”, *2º Congreso Internacional de Acústica UNTREF*, 2010.
- [14] ISO 9613-2: “Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors”, *International Standard*, 1996.
- [15] Ángel F. Ramos Ridaó, “Medidas de ruido”, *Apuntes de clase*, Universidad de Granada, disponible en: [http://www.ugr.es/~ramosr/CAMINOS/conceptos\\_ruido.pdf](http://www.ugr.es/~ramosr/CAMINOS/conceptos_ruido.pdf)

- [16] Erik Koppen, Kevin Fowler, "International Legislation for Wind Turbine Noise", *EWEA Workshop Wind Turbine Sound*, 2014.
- [17] Teresa Alexandra Nogueira, "Energía eólica e Ambiente", *Apuntes de clase*, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.
- [18] Carlos Silva Santos, "Aerogeradores: Aerodinâmica", *Apuntes de clase*, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2013.
- [19] Carlos Méndez, Francisco González-Longatt, Enrique Gavorskis, Oswaldo Ravelo "Evaluación del efecto de la estela en el desempeño de un parque eólico", *UNEFA*, 2010.
- [20] Javier Serrano González, "Diseño óptimo de parques eólicos de gran dimensión incluyendo análisis de riesgos", *Tesis doctoral*. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Sevilla., 2012.
- [21] XS. Yang, "Engineering optimization—an introduction with metaheuristic Applications". Wiley, Hoboken, 2010.
- [22] G. Mosetti, C. Poloni, B. Diviacco, "Optimization of wind turbine positioning in large wind farms by means of a genetic algorithm," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol 51, no. 1, pp. 105–16, 1994.
- [23] UA. Ozturk, BA. Norman. "Heuristic methods for wind energy conversion system positioning," *Electric Power Systems Research*; vol. 70(3):179-85, 2004.
- [24] SA. Grady, MY. Hussaini, MM. Abdullah, "Placement of wind turbines using genetic algorithms," *Renewable Energy*, vol. 30(2):259-70, 2005.
- [25] J. Castro Mora, M. Calero Barón, JM. Riquelme Santos, M. Burgos Payán. "An evolutive algorithm for wind farm optimal design," *Neurocomputing*; vol. 70, pp. 2651–2658, 2007.
- [26] J. Castro Mora. "Optimización Global de Parques Eólicos Mediante Algoritmos Evolutivos,". *Tesis doctoral*. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Sevilla. Disponible en: <http://fondosdigitales.us.es/tesis/tesis/863/optimizacionglobal-de-parques-eolicos-mediante-algoritmos-evolutivos/>.
- [27] G. Marmidis, S. Lazarou, E. Pyrgioti. "Optimal placement of wind turbines in a wind park using Monte Carlo simulation," *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 1455-1460, 2008.
- [28] A. Wan, J. Wang, G. Yang, X. Zhang. "Optimal micro-siting of wind farms by Particle Swarm Optimization," *Advances in swarm intelligence*, vol. 6145; pp. 198-205, 2010.
- [29] I. Mustakerov, D. Borissova, "Wind turbines type and number choice using combinatorial optimization," *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 1887-1894, 2010.
- [30] A. Kusiak, Z. Song, "Design of wind farm layout for maximum wind energy capture," *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 685-694, 2010.

- [31] A. Emami, P. Noghreh. "New approach on optimization in placement of wind turbines within wind farm by genetic algorithms," *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 1559-1564, 2010.
- [32] B. Saavedra Moreno, S. Salcedo Sanz, A. Paniagua Tineo, L. Prieto, A. Portilla-Figueras. "Seeding evolutionary algorithms with heuristics for optimal wind turbines positioning in wind farms," *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 2838-2844, 2011.
- [33] H. Huang, "Distributed Genetic Algorithm for Optimization of Wind Farm Annual Profits," *2007 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems*, pp. 1-6, 2007.
- [34] F. Wang, D. Liu, and L. Zeng, "Study on computational grids in placement of wind turbines using genetic algorithm," *2009 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference*, pp. 1-4, 2009,.
- [35] Z. Changshui, H. Guangdong, W. Jun. "A fast algorithm based on the submodular property for optimization of wind turbine positioning," *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 2951-2958, 2011.
- [36] F. Wang, D. Liu, and L. Zeng, "Modeling and simulation of optimal wind turbine configurations in wind farms," *2009 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference*, pp. 1-5, 2009.
- [37] C. Wan, J. Wang, G. Yang, and X. Zhang, "Optimal Siting of Wind Turbines Using Real-Coded Genetic Algorithms," in *EWEC 2009*, 2009.
- [38] H. Huang, "Efficient hybrid distributed genetic algorithms for wind turbine positioning in large wind farms," *2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 2196-2201, 2009.
- [39] A.S. Fraser. "Simulation of Genetic Systems by Automatic Digital Computers I: Introduction," *Australian Journal of Biological Science*, 10:484-491, 1957.
- [40] A.S. Fraser. "Simulation of Genetic Systems by Automatic Digital Computers II: Effects of Linkage on Rates of Advance Under Selection," *Australian Journal of Biological Science*, 10:492-499, 1957.
- [41] H.J. Bremermann. *Optimization through Evolution and Recombination*, In M.C. Yovits, G.T. Jacobi, and G.D. Goldstine, editors, *Self-Organization Systems*, pages 93-106. Spartan Books, 1962.
- [42] J. Reed, R. Toombs, and N.A. Barricelli, "Simulation of Biological Evolution and Machine Learning," *Journal of Theoretical Biology*, 17:319-342, 1967.
- [43] J.H. Holland, "Adaptation in Natural and Artificial Systems", University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [44] D. Goldberg, "Genetic algorithms in search, optimization and learning", Addison-Wesley Pub. Co. Inc., 1989.



[45] R. Spillman, "Genetic algorithms, nature's way to search for the best," *Dr. Dobb's Journal*, vol. 8, no. 2, pp. 26–30, Feb. 1993.