



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

AUTORA: IOLANDA MARONDA TARRASA

TUTORA: SANDRA MARTÍNEZ SANCHÍS

COTUTORA: EVA MARÍA SÁNCHEZ ORGAZ

Curso Académico: 2019-20

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

AGRADECIMIENTOS

Ahora que tengo la oportunidad de expresar mis sentimientos, no quiero dejarla pasar y agradecer a todos aquellos que me han acompañado durante el grado, desde profesores a compañeros.

Gracias a mi familia y amigos por apoyarme en todas las decisiones que he tomado durante estos años y ayudarme en todo lo que estaba a su alcance. Os lo debo todo.

Gracias a mis tutoras, sobre todo a Eva María, que se ha embarcado en esta aventura conmigo sin dudarlo. Ha sido todo un placer trabajar contigo. Si pudiera volver atrás y elegir de nuevo, te seguiría escogiendo a ti. Gracias de todo corazón.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

RESUMEN

Durante las últimas décadas se ha optado por la producción de energía eólica para la transición ecológica. Esta energía se extrae del viento, que incide en las palas del generador y es transformada en eléctrica. Tras la transformación, se inyecta en la red para su distribución.

Los aerogeneradores domésticos son productos de baja potencia que pueden instalar particulares en sus viviendas, pero no están siendo explotados en su máxima capacidad por la población, en parte debido a su elevado precio.

El presente proyecto trata el problema del perfil de las palas de un aerogenerador doméstico. Se sabe que las palas son el elemento más caro de la máquina por sus características resistentes y su proceso de fabricación, así que nuestro objetivo es minimizar su volumen sin que esto afecte a su resistencia mecánica.

Para dicho estudio, van a ser empleados los programas de ANSYS para el modelado, modeFRONTIER para la posterior optimización, y Matlab para enlazar los programas anteriores.

El proceso de optimización se realiza mediante el algoritmo genético por las ventajas que presenta frente a otros algoritmos, ya que no se queda atrapado en óptimos locales. Tras realizar el proceso con acero, se presenta otra opción realizada con aluminio para su posterior comparación.

Palabras clave: aerogenerador; optimización; algoritmo genético; resistencia mecánica.

RESUM

Al llarg de les últimes dècades s'ha optat per la producció d'energia eòlica per a la transició ecològica. L'energia s'obté del vent que incideix en les pales del generador i es transformada en energia elèctrica. Després de la transformació, s'injecta a la xarxa per a la seua distribució.

Els aerogeneradors domèstics són productes de baixa potència que es poden instal·lar a les vivendes, però no estan sent explotats a la seua màxima capacitat per la població, en part degut al preu elevat.

El present projecte tracta el problema del perfil de pales d'un aerogenerador domèstic. És sabut que les pales són l'element més car de la màquina per les seues característiques de resistència i el seu procés de fabricació; així que el nostre objectiu és minimitzar el seu volum sense que això afecte a la resistència mecànica.

Per aquest estudi, van a ser utilitzats els programes: ANSYS per al modelat, modeFRONTIER per a la posterior optimització, i Matlab per a enllaçar els programes anteriors.

El procés d'optimització es realitza mitjançant l'algoritme genètic pels avantatges que presenta davant altres algoritmes, ja que no es queda atrapat en òptims locals. Després de realitzar el procés amb acer, es presenta una altra opció realitzada amb alumini per a la seua posterior comparació.

Paraules clau: aerogenerador; optimització; algoritme genètic; resistència mecànica.

ABSTRACT

In the last decades, wind energy production has been chosen for the ecological transition. This energy is extracted from the wind that reaches the blades of the generator and it is transformed into electrical energy. After the transformation, it is distributed through the grid.

Micro wind turbines are low power products that can be integrated in buildings, but they are not exploited to the maximum by the population due to their high price.

This project addresses the problem of the shape of micro wind turbine blades. It is known that the blades are the priciest element of the machine due to its resistant characteristics and its manufacturing process, so our objective is to minimize the volume without affecting the mechanical resistance.

The programs that are going to be used are: ANSYS for modelling, modeFRONTIER for the optimization and MATLAB for linking the above-mentioned programs.

The optimization process is carried out by means of a genetic algorithm due to the advantages when compared to other algorithms, since it does not get stuck at local optimal points. After performing the process with steel, another design is presented with aluminium for subsequent comparison.

Keywords: wind turbines; optimization; genetic algorithm; mechanical resistance.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

ÍNDICE

1. OBJETO DEL PROYECTO	1
2. ENERGÍA EÓLICA	2
2.1. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA	2
2.2. ENERGÍA EÓLICA EN LA ACTUALIDAD	2
2.2.1 ENERGÍA EÓLICA EN ESPAÑA	4
2.3. AEROGENERADORES	5
2.3.1 ELEMENTOS DE UN AEROGENERADOR	5
2.3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS AEROGENERADORES	6
2.3.3. MINIEÓLICA	8
2.3.4 VENTAJAS E INCONVENIENTES	9
2.3.5. MARCO LEGAL EN ESPAÑA	10
3. SOFTWARE PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LOS CÁLCULOS	12
3.1. modeFRONTIER	13
3.1.1. MODO DE EMPLEO	13
3.1.2. CONFIGURACIÓN PARA LOS CÁLCULOS	16
3.2. MATLAB	19
3.2.1 MODO DE EMPLEO	19
3.2.2. CONFIGURACIÓN PARA LOS CÁLCULOS	20
3.3 ANSYS	20
3.3.1. MODO DE EMPLEO	22
4 ENSAYOS Y CARGAS DE LAS PALAS DEL AEROGENERADOR	25
4.1 ENSAYOS DE PALAS	25
4.1.1. ENSAYO ESTÁTICO	25
4.1.2. ENSAYO FATIGA	26
4.1.3. ENSAYO DE ROTURA	26
4.2. HIPÓTESIS DE CARGA	27
4.2.1. HIPÓTESIS DE EMPUJE MÁXIMO	27
4.3. PARÁMETROS	27
4.3.1. AEROGENERADOR DE PARTIDA	27
4.3.2. CONSIDERACIONES DE DISEÑO	28
4.4. CONDICIONES DEL ESTUDIO	28

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

4.4.1. HIPÓTESIS DE EMPUJE MÁXIMO	28
4.4.2. ESTÁTICA	29
4.4.3. DINÁMICA.....	29
4.4.4. RESUMEN DE DATOS	33
4.5. LIMITACIONES	33
4.5.1. VON MISES	33
4.5.2. POTENCIA DE UN AEROGENERADOR.....	34
5. DISEÑO, PARAMETRIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL PERFIL DE PALA.....	35
5.1 MODELADO DEL LOS PUNTOS DEL DISEÑO	35
5.2. DISEÑOS DE PARTIDA	40
5.2.1. DISEÑO DE PARTIDA DE 12 PUNTOS.....	40
5.2.2. DISEÑO DE PARTIDA DE 14 PUNTOS.....	45
5.3. ESTÁTICA	47
5.3.1. DISEÑO A ESTÁTICA CON CUATRO VARIABLES	47
5.3.2. DISEÑO A ESTÁTICA CON OCHO VARIABLES	48
5.3.3. DISEÑO A ESTÁTICA CON NUEVE VARIABLES.....	49
5.4. FATIGA.....	52
5.4.1. CONFIGURACIÓN DE ANSYS PARA FATIGA	52
5.4.2. DISEÑO A ESTÁTICA CON NUEVE VARIABLES.....	54
5.5. DISEÑO ÓPTIMO DEL ACERO	55
5.6. ALUMINIO	57
5.6.1. DISEÑO ÓPTIMO DEL ALUMINIO	60
6. CONCLUSIONES.....	63
7. PRESUPUESTO.....	64
7.1. PRESUPUESTO DEL ESTUDIO	64
7.2. PRESUPUESTO DE LAS PALAS	66
7.2.1. PRESUPEUSTO DEL DISEÑO DE ACERO	67
7.2.1. PRESUPEUSTO DEL DISEÑO DE ALUMINIO	68
8. BIBLIOGRAFÍA	69
9. PLANOS	73

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CAPACIDAD EÓLICA INSTALADA GLOBAL. FUENTE: (PITTELOUD, 2019).	3
FIGURA 2. RATIOS GLOBALES DE CRECIMIENTO DE ENERGÍA EÓLICA DE 2016 A 2019. FUENTE: (PITTELOUD, 2019).....	3
FIGURA 3. CAPACIDAD EÓLICA INSTALADA POR PAÍSES. FUENTE: (PITTELOUD, 2019).	4
FIGURA 4. POTENCIA EÓLICA INSTALADA EN ESPAÑA POR AÑOS. FUENTE: (AEE, 2020).	4
FIGURA 5. INTERCONEXIÓN DE LOS PROGRAMAS.....	12
FIGURA 6. VENTANA DE INICIO MODEFRONTIER.	13
FIGURA 7. VENTANA DE TRABAJO MODEFRONTIER.	13
FIGURA 8. HERRAMIENTAS MODEFRONTIER, VISTO DESDE “LOGIC NOTES”.	14
FIGURA 9. ELEMENTOS DEL “SCHEDULER” DEL MODEFRONTIER	14
FIGURA 10. HERRAMIENTAS MODEFRONTIER, VISTA DESDE VARIABLES.....	15
FIGURA 11. ESPACIO DE TRABAJO DE MODEFRONTIER PARA 4 VARIABLES.....	16
FIGURA 12. CONECTORES DE VARIABLES MODEFRONTIER A MATLAB	17
FIGURA 13. CONFIGURACIÓN DEL “DOE PROPERTIES”.....	17
FIGURA 14. CONFIGURACIÓN DEL “SCHEDULER PROPERTIES”.	18
FIGURA 15. VENTANA DE TRABAJO DE MATLAB.	19
FIGURA 16. VENTANA DE TRABAJO DE ANSYS.....	21
FIGURA 17. VENTANA DE TEXTO DE ANSYS.....	21
FIGURA 18. INICIO DE ANSYS.	22
FIGURA 19. ELEMENT TYPE, VENTANA DE ANSYS.....	23
FIGURA 20. ADD ELEMENT TYPE, VENTANA DE ANSYS.....	23
FIGURA 21. VELOCIDADES MEDIAS EN VALENCIA, (GLOBAL WIND ATLAS, 2020).	29
FIGURA 22. DIAGRAMA S-N PARA EL ACERO.....	30
FIGURA 23. ESQUEMA EMPOTRAMIENTO PALA.....	35
FIGURA 24. LOCALIZACIÓN DE LOS 8 PUNTOS DEL PRIMER INTENTO EN ANSYS.	36
FIGURA 25. PRIMER DISEÑO EN ANSYS.	37
FIGURA 26. AMPLIACIÓN DEL PRIMER DISEÑO EN ANSYS.	37
FIGURA 27. DISEÑO DE PARTIDA EN ANSYS.	38
FIGURA 28. AMPLIACIÓN 1 DEL DISEÑO DE PARTIDA EN ANSYS.....	39
FIGURA 29. AMPLIACIÓN 2 DEL DISEÑO DE PARTIDA EN ANSYS.....	39
FIGURA 30. PROPIEDADES ACERO EN ANSYS.	40
FIGURA 31. LOCALIZACIÓN DE LOS 12 PUNTOS DE DISEÑO EN ANSYS.	41
FIGURA 32. DISEÑO DIVIDIDO DEL PERFIL DE PALA CON 12 PUNTOS EN ANSYS.....	42
FIGURA 33. VOLUMEN DE LA PALA DE DISEÑO EN ANSYS.....	42

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

FIGURA 34. CONDICIONES DEL MALLADO DE ANSYS.....	43
FIGURA 35. DISEÑO DE PARTIDA FINAL EN ANSYS.	43
FIGURA 36. LISTA DE SOLUCIÓN DE NODOS EN ANSYS.....	44
FIGURA 37. LISTADO TENSIONES EN LOS NODOS EN ANSYS.....	44
FIGURA 38. LOCALIZACIÓN DE LOS 14 PUNTOS DE DISEÑO EN ANSYS.	46
FIGURA 39. DISEÑO DIVIDIDO DEL PERFIL DE PALA CON 14 PUNTOS EN ANSYS.	46
FIGURA 40. RUTA PARA LA CREACIÓN DE LOS ARCHIVOS DE CARGAS EN ANSYS.	53
FIGURA 41. CREACIÓN DE LOS ARCHIVOS DE CARGAS EN ANSYS.	53
FIGURA 42. RESOLUCIÓN CON COMBINACIÓN DE CARGAS EN ANSYS.	53
FIGURA 43. REPRESENTACIÓN DE LAS TENSIONES DE VON MISES EN ANSYS PARA EL ÓPTIMO DEL ACERO.....	55
FIGURA 44. AMPLIACIÓN DEL LISTADO TENSIONES DE VON MISES EN ANSYS PARA EL ÓPTIMO DEL ACERO.....	56
FIGURA 45. REPRESENTACIÓN DE LAS TENSIONES DE VON MISES EN ANSYS DEL DISEÑO ÓPTIMO MODIFICADO.	56
FIGURA 46. AMPLIACIÓN DEL LISTADO TENSIONES DE VON MISES EN ANSYS PARA EL ÓPTIMO DEL ACERO MODIFICADO.....	57
FIGURA 47. REPRESENTACIÓN DE LAS TENSIONES DE VON MISES EN ANSYS PARA EL ÓPTIMO DEL ALUMINIO.....	60
FIGURA 48. AMPLIACIÓN DEL LISTADO TENSIONES DE VON MISES EN ANSYS PARA EL ÓPTIMO DEL ALUMINIO.....	60
FIGURA 49. REPRESENTACIÓN DE LAS TENSIONES DE VON MISES EN ANSYS PARA EL ÓPTIMO MODIFICADO DEL ALUMINIO.	61
FIGURA 50. AMPLIACIÓN DEL LISTADO TENSIONES DE VON MISES EN ANSYS PARA EL ÓPTIMO MODIFICADO DEL ALUMINIO.	61

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. PARÁMETROS BÁSICOS PARA LAS CLASES DE AEROGENERADORES PEQUEÑOS FUENTE: (AENOR, 2015).	9
TABLA 2. VALORES RECOMENDADOS PARA Γ_{EF} PARA DIFERENTES NÚMEROS DE CICLOS DE CARGA. FUENTE: (AENOR, 2015).	26
TABLA 3. FACTOR DE SUPERFICIE PARA ACEROS Y VIDA INFINITA. FUENTE: (BESA GONZÁLVEZ, 2016). ..	32
TABLA 4. FACTOR DE TEMPERATURA K_D PARA ACEROS. FUENTE: (BESA GONZÁLVEZ, 2016).	32
TABLA 5. CONFIABILIDAD K_E . FUENTE: (BESA GONZÁLVEZ & VALERO CHULIÁ, 2016).	32
TABLA 6. RECOPIACIÓN DE DATOS DE CÁLCULO	33
TABLA 7. COORDENADAS EN METROS DEL PRIMER INTENTO DE DISEÑO.	36
TABLA 8. COORDENADAS EN METROS DEL DISEÑO DE PARTIDA.	38
TABLA 9. COORDENADAS EN METROS DEL DISEÑO DE PARTIDA CON 4 PUNTOS AUXILIARES	41
TABLA 10. COORDENADAS EN METROS DEL DISEÑO DE PARTIDA CON 6 PUNTOS AUXILIARES	45
TABLA 11. VALORES DE CUATRO VARIABLES EN ESTÁTICA.	47
TABLA 12. RESULTADOS CON CUATRO VARIABLES EN ESTÁTICA.	47
TABLA 13. VALORES DE OCHO VARIABLES EN ESTÁTICA.	48
TABLA 14. RESULTADOS CON OCHO VARIABLES EN ESTÁTICA.	48
TABLA 15. VALORES DE NUEVE VARIABLES EN ESTÁTICA, PRIMERA APROXIMACIÓN.	49
TABLA 16. RESULTADOS CON NUEVE VARIABLES EN ESTÁTICA, PRIMERA APROXIMACIÓN.	50
TABLA 17. VALORES DE NUEVE VARIABLES EN ESTÁTICA, SEGUNDA APROXIMACIÓN.	51
TABLA 18. RESULTADOS CON NUEVE VARIABLES EN ESTÁTICA, SEGUNDA APROXIMACIÓN.	51
TABLA 19. COORDENADAS EN METROS DEL DISEÑO ÓPTIMO DEL ACERO.	52
TABLA 20. RESULTADOS CON NUEVE VARIABLES EN DINÁMICA	55
TABLA 21. RESULTADOS CON NUEVE VARIABLES DEL ALUMINIO.	57
TABLA 22. VALORES DE NUEVE VARIABLES EN ESTÁTICA, ALUMINIO, PRIMERA APROXIMACIÓN. <	58
TABLA 23. RESULTADOS CON DIEZ VARIABLES DEL ALUMINIO, PRIMERA PARTE.	58
TABLA 24. RESULTADOS CON DIEZ VARIABLES DEL ALUMINIO, SEGUNDA PARTE.	59
TABLA 25. COORDENADAS DEL DISEÑO ÓPTIMO DEL ALUMINIO.	59
TABLA 26. PRESUPUESTO RECURSOS HUMANOS DEL ESTUDIO DEL DISEÑO.	65
TABLA 27. PRESUPUESTO RECURSOS FÍSICOS DEL ESTUDIO DEL DISEÑO.	65
TABLA 28. PRESUPUESTO RECURSOS INFORMÁTICOS DEL ESTUDIO DEL DISEÑO.	65
TABLA 29. PRESUPUESTO COMPLETO DEL ESTUDIO DEL DISEÑO.	66
TABLA 30. PRESUPUESTO MATERIAL DE ACERO DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO.	67
TABLA 31. PRESUPUESTO COMPLETO MATERIAL DE ACERO DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO.	67
TABLA 32. PRESUPUESTO MATERIAL DE ALUMINIO DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO.	68
TABLA 33. PRESUPUESTO COMPLETO MATERIAL DE ALUMINIO DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO.	68

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

1. OBJETO DEL PROYECTO

Ante la emergencia climática que vivimos durante los últimos años, es imprescindible encontrar las mejores formas de producción energética para un desarrollo sostenible. El principal objetivo de las formas de producción tiene que centrarse en conseguir la independencia energética del carbón y del petróleo debido a sus altas emisiones contaminantes.

La energía eólica es una energía limpia que consiste en el aprovechamiento de las corrientes de viento para producir energía, en su mayor parte, mediante unos aerogeneradores. Dentro de esta rama se encuentra la minieólica que tiene muchas posibilidades para su expansión en las ciudades.

Uno de los motivos por lo que no se potencian es por el alto precio que tienen y que muchas familias no pueden afrontar. El objetivo perseguido en el siguiente proyecto es encontrar un perfil de pala óptimo que reduzca su volumen sin perder sus prestaciones para que esté más cerca del alcance de todos. Al reducir este término, no solo se consigue ahorrar en empleo de materiales, sino en producción y almacenamiento.

2. ENERGÍA EÓLICA

2.1. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

El primer uso del viento del que se tiene constancia se remonta a los años 3.000 A.C., en Egipto, cuando se crearon los primeros barcos de vela. Esta primera aproximación al uso de este recurso es debido a que la cultura egipcia tenía interés por satisfacer sus necesidades de desplazamientos (Universidad Castilla-La Mancha, 2020).

La siguiente necesidad que se quería satisfacer era regar los cultivos, lo que conllevaba desplazar grandes cantidades de agua. Aunque se dice que con Hammurabi se crearon los primeros molinos de viento para regar, no hay pruebas concluyentes al respecto (CECU, 2020).

Tras cientos de años el uso de los molinos se centró exclusivamente en el bombeo de agua, hasta que, en el siglo VII en Persia, se desarrolló un molino que no solo bombeaba agua, sino que tenía como finalidad moler el grano (Universidad Castilla-La Mancha, 2020).

Su uso se extendió por Europa a partir del siglo XII. Dos siglos después de que se adoptara su uso, en Francia se desarrolló un modelo que todavía se emplea como base hoy en día (Fernández Díez, Energía eólica, 2019).

En el siglo XIX Charles Brush creó la primera turbina eólica de funcionamiento automático generadora de electricidad, aunque el que se considera el pionero de las turbinas modernas es Poul la Cour, ya que introdujo esa turbina al molino de viento en 1890 (García, 2019). En estos científicos encontramos la base de la aerodinámica moderna.

La producción de energía eólica se ha desarrollado mucho desde aquel inicio con los anteriores estudiosos mencionados. Ha evolucionado tanto en su forma de obtener energía como en términos de expansión, puesto que ahora es una de las fuentes de energía más importantes.

2.2. ENERGÍA EÓLICA EN LA ACTUALIDAD

Ante la situación que afronta la sociedad en todo el planeta durante las últimas décadas, muchas instituciones se comprometieron a arrimar el hombro para contribuir en la creación de un futuro sostenible. Persiguiendo cumplir esas metas comunes, Naciones Unidas estableció los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) (Naciones Unidas, 2020). Dentro de estos objetivos, varios se refieren a la urgencia climática que actualmente vivimos como, por ejemplo, el número 7, que tiene por título: energía sostenible y no contaminante.

Acompañado por esta creciente concienciación, aparece esta expansión en la creación de instalaciones de producción de energía eólica. Podemos ver una tendencia creciente durante los últimos años y que parece que seguirá aumentando en los venideros (véase Fig. 1).

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

En cuanto a este aumento, en proporción ronda el 10% durante los cuatro últimos años como puede observarse en la Fig. 2, que a términos globales corresponden grandes cifras que avistan un futuro más preparado para el cambio.

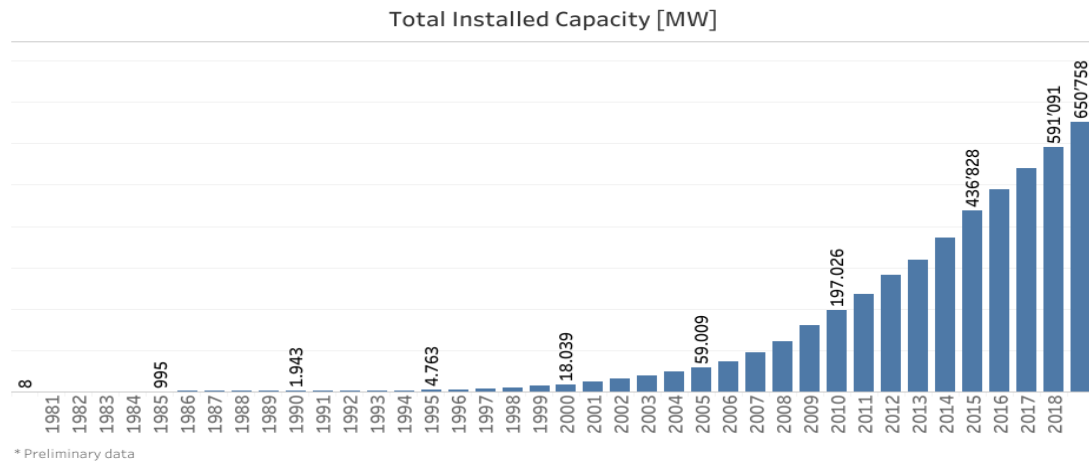


Figura 1. Capacidad eólica instalada global. Fuente: (Pitteloud, 2019).

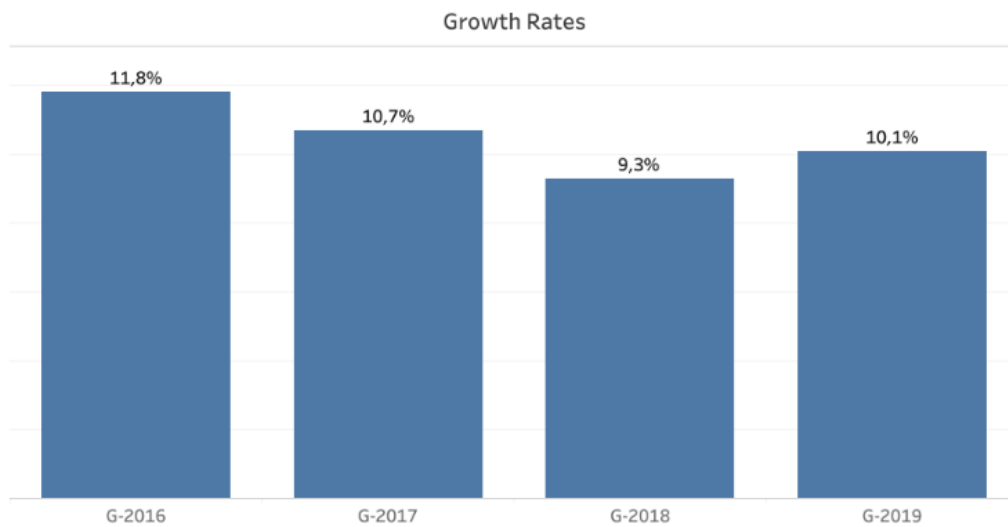


Figura 2. Ratios globales de crecimiento de energía eólica de 2016 a 2019. Fuente: (Pitteloud, 2019)

2.2.1 ENERGÍA EÓLICA EN ESPAÑA

A nivel internacional, España se encuentra entre los puestos más altos de capacidad instalada, pero es necesario observar los datos con detenimiento. En los últimos años, como indica la Fig. 3, el incremento ha sido bajo.

Se puede ver con la ayuda de la Fig. 4 el crecimiento real durante las dos últimas décadas. Hay un aumento significativo hasta llegar al 2012 cuando la tendencia se detiene casi por completo. De hecho, en 2015 y 2016 podemos identificar la misma potencia instalada, lo que significa que en este segundo año no hubo ningún proyecto de grandes dimensiones.

Installed Capacity by the end of 2019 (MW)

Country/Region	2019	2018	2017	2016	2015
China	237'029	209'529	188'390	168'730	148'000
United States	105'433	96'363	88'775	82'033	73'867
Germany	61'357	59'313	56'190	50'019	45'192
India	37'529	35'129	32'879	28'279	24'759
Spain	25'808	23'494	23'026	23'020	22'987
United Kingdom	23'515	20'743	17'852	14'512	13'614
France	16'646	15'313	13'760	12'065	10'293
Brazil	15'452	14'707	12'763	10'800	8'715
Rest of the World	127'989	116'501	107'204	99'050	89'402
Total general	650'758	591'091	540'840	488'508	436'828

Figura 3. Capacidad eólica instalada por países. Fuente: (Pitteloud, 2019).

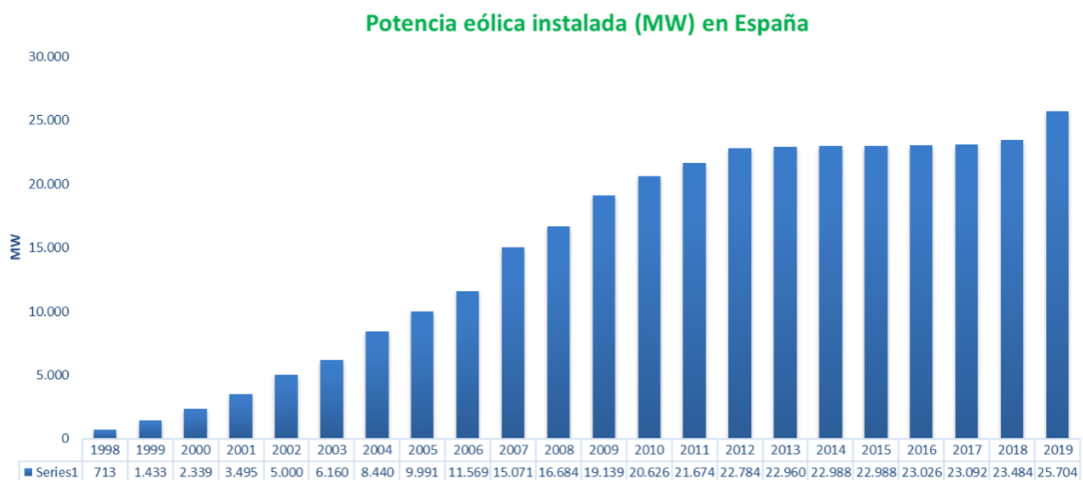


Figura 4. Potencia eólica instalada en España por años. Fuente: (AEE, 2020).

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

En la Fig. 4 podemos ver que finalmente el último año, 2019, se ha conseguido romper la tendencia anterior. De hecho, el año pasado, la energía eólica cubrió cerca del 20,8% de la energía que es consumida en España (AEE, 2020). Se trata de un dato alentador que debe seguir aumentando para conseguir así la independencia de las energías no renovables.

2.3. AEROGENERADORES

En el centro de la producción de la energía eólica se encuentra el aerogenerador. Según la RAE (RAE, 2020), se trata de un “aparato que transforma la energía eólica en energía eléctrica mediante rotores de palas”.

Para hacer esta transformación de energía han de trabajar una serie de elementos entre ellos. A continuación, se presenta cómo se transforma la energía pasando por cada componente.

2.3.1 ELEMENTOS DE UN AEROGENERADOR

El primer elemento que se ve implicado en la transformación energética del viento es el rotor, compuesto por las palas y el buje. El viento mueve las palas y la energía cinética se convierte en mecánica de rotación y es transmitida al buje (Sotavento, 2019).

Es necesario realizar un inciso en las palas del aerogenerador puesto que es el elemento esencial de este estudio.

Este componente es uno de los más caros que forman el equipo. Es necesario que presenten unas propiedades específicas para que sean resistentes ante las posibles condiciones meteorológicas que van a soportar además de la presión del viento, que va a ocasionar cargas constantes y fluctuantes.

En cuanto al diseño, presentan un perfil aerodinámico que minimiza el peso y tamaño al mismo tiempo que maximiza la potencia extraída.

Los materiales más empleados en estos elementos son el poliéster o epoxi reforzado con fibra de vidrio. Como material de refuerzo se pueden usar otros materiales como la fibra de carbono o aramidas (Iberdrola, 2020). Para los aerogeneradores domésticos, ya que la pala es de un tamaño mucho más reducido, pueden utilizarse otros materiales como el acero (OPEXenergy Operación y Mantenimiento S.L., 2020).

El siguiente componente por el que va a pasar la energía es el sistema de transmisión. En él, el multiplicador, como su nombre indica, eleva considerablemente el número de revoluciones por minuto (rpm) pasando por unas 2 o 3 etapas. El incremento, para tener unos órdenes de magnitud, puede ser de unas 15 a 1500 rpm (Fernández Díez, Evolución de los molinos de viento, 2019). Dentro del sistema de transmisión encontramos también el freno de emergencia, que entra en acción si falla el freno aerodinámico.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

A continuación, encontramos el generador, cuya misión es convertir finalmente la energía mecánica en eléctrica mediante alternadores trifásicos. Esta energía se conduce hasta la base de la torre para llevarla a una subestación que se encargará de elevar la tensión y distribuirla (Sotavento, 2019).

Otros elementos que no influyen directamente en la producción, pero son igualmente importante son: el sistema de orientación, que dirige el eje para un aprovechamiento máximo de la energía del viento; el sistema de regulación de potencia, cuya función es limitar la velocidad de giro y así evitar tensiones peligrosas; y la torre, que mantiene el peso y las fuerzas ocasionadas por el proceso.

2.3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS AEROGENERADORES

Durante los últimos años se han desarrollado todo tipo de aerogeneradores que cumplieran una necesidad específica, por lo que hoy en día existen muchos modelos y, por tanto, se pueden clasificar atendiendo a muchos criterios.

2.3.2.1. CLASIFICACIÓN POR POTENCIA

Generalmente podemos distinguir dos tipos de producción eólica por potencia. Los aerogeneradores que primero vienen a la mente cuando hablamos de producción eólica son los grandes molinos de viento.

En oposición a ella encontramos la “minieólica” o eólica doméstica. La diferenciación entre los dos grupos radica en la potencia generada. Se considera que un aerogenerador pertenece a la minieólica cuando su potencia es inferior a los 100 kW y el área de barrido de las aspas debe ser menor de 200 m² (APPA, Minieólica, 2020).

2.3.2.2. CLASIFICACIÓN POR TIPO DE EJE

Diferenciamos dos tipos de aerogeneradores por cómo incide el viento en las palas. Si el viento mueve las palas de forma perpendicular al viento, se trata de un aerogenerador de eje horizontal. Si, por el contrario, el viento es paralelo a su movimiento se trata de eje vertical.

Dentro de los aerogeneradores de eje horizontal podremos encontrar otras clasificaciones atendiendo al número de palas y al tipo de orientación.

2.3.2.2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS AEROGENERADORES DE EJE VERTICAL

Este grupo de aerogeneradores también es conocido como VAWTs (“vertical axis wind turbines” que se traduce por “turbinas de viento de eje vertical”). Hay tres tipos de aerogeneradores: Darrieus, Savonius y Giromill.

Los Savonius suele tener dos o tres palas y tienen forma de S. Aunque son poco costosos, tienen un rendimiento pobre (Structuralia, 2018).

Encontramos también los de tipo Giromill que está constituido por unas palas unidas al eje con una ligera forma cóncava. Debido a esta forma, puede acoplarse a la perfección a vientos en todas direcciones, pero, a diferencia del Darrieus, no permite obtener tan buenas prestaciones (Structuralia, 2018).

Los del tipo Darrieus tienen forma de D. Su forma también es adecuada desde el punto de vista de atrapar corrientes de viento por lo que tienen mayor rendimiento. Además, permite vientos de mayor intensidad respecto a los otros tipos (Structuralia, 2018).

2.3.2.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL

De forma análoga al grupo anterior, a este grupo también se los conoce como HAWTs (“horizontal axis wind turbines” o turbinas de viento de eje horizontal). La forma de clasificar esta categoría radica en el número de palas que posee.

Los que poseen una sola pala necesitan mayor velocidad de viento para una energía de salida determinada. Esto es debido a que, si solo hay una, no posee la inercia que otro aerogenerador con un número mayor de palas tiene (en los aerogeneradores de eje horizontal cuando la pala está en la parte inferior costará más levantarla sin ayuda de un peso extra). Se suele añadir un contrapeso para reducir este problema (Danish Wind Industry Assosiation, 2003).

Pero aun resolviendo lo mencionado anteriormente, los molinos “unipala” sufren unos esfuerzos muy elevados, lo que acorta su vida, además de que produce fuertes vibraciones y ruidos (ECOVIVE, 2020).

La siguiente posibilidad para estudiar es la instalación de dos palas. Se suele evitar el número par de palas ya que esto puede producir indeterminación en el sentido de movimiento. Además, al igual que en el caso de una pala, si elegimos dos encontramos inconvenientes a causa de vibraciones y ruido (ECOVIVE, 2020).

La mejor opción con menos número de palas es la de tres, donde evitamos los problemas de indeterminación e inercia. Las palas son los elementos más caros de estos molinos de viento por lo que tampoco interesa hacer más palas si no se va a conseguir mucha más potencia. Además, los problemas de sonido y vibración disminuyen considerablemente en comparación con los dos anteriores. Pero aparte de tres palas, también se pueden encontrar otros modelos que presentan buenos resultados que poseen 5 o 7 palas (Danish Wind Industry Assosiation, 2003).

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

También se pueden clasificar los aerogeneradores de eje horizontal por su sistema de orientación del viento. Los de eje vertical no necesitan orientación, por lo que no es posible clasificarlos de esta forma.

Hay dos posibilidades: orientación a barlovento y a sotavento (World press , 2020).

Con la orientación a barlovento el rotor es lo primero que encuentra el viento al chocar con el molino. Este es el diseño mayoritario en los diseños de los grandes aerogeneradores. Con la orientación a sotavento, el último elemento que el viento toca son las palas. Para los aerogeneradores de poca potencia este modelo es el que se usa más, acompañado normalmente por una veleta.

2.3.3. MINIEÓLICA

La minieólica se empezó a desarrollar en las décadas de los 30 y 40 en los Estados Unidos de América para dar electricidad a zonas alejadas de los consumos, pero no es hasta los 70 cuando realmente se potencia en el resto del mundo (EKIDOM, energías renovables, 2020)

En España, como asociación que potencia y desarrolla la eólica, encontramos la Asociación de Empresas de Energía Renovables (APPA). Según su sitio web, “agrupa a empresas y entidades cuyo objeto es el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía en todas sus formas” (APPA, asociación, 2020).

La APPA desea que se cree una regulación de este tipo de producción doméstica. Está en desacuerdo con las medidas tomadas en nuestro país puesto que la ley no incentiva la creación de estas instalaciones (APPA, marco regulatorio, 2020). Uno de los inconvenientes es que en las leyes no hay distinción entre la minieólica y la gran eólica, por lo que la primera queda desfavorecida.

En España también encontramos el Centro de Investigación Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) y, dentro de ella, el Centro de Desarrollo de Energía Renovables (CEDER). Su objetivo en cuanto a la eólica doméstica es *“desarrollar tecnología en el ámbito de los sistemas de generación de energía eólica en operación aislada de la red eléctrica y en entornos de redes débiles, incluyendo sistemas que faciliten su integración frente a fluctuaciones y nuevos sistemas de almacenamiento de energía”* (AECA Group, 2014).

2.3.3.1. CLASIFICACIÓN PALAS MINIEÓLICA

Es necesario hacer esta pequeña clasificación puesto que más adelante se mencionará a qué clase pertenece la pala a estudiar.

Las palas de un aerogenerador doméstico se pueden diferenciar atendiendo a las siguientes clases mencionadas en la norma UNE sobre aerogeneradores pequeños con el código: UNE-EN 61400-2 (AENOR, 2015).

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Tabla 1. Parámetros básicos para las clases de aerogeneradores pequeños Fuente: (AENOR, 2015).

Clase de AP	I	II	III	IV	S
V_{ref} (m/s)	50	42,5	37,5	30	Valores a especificar por el proyectista
V_{ave} (m/s)	10	8,5	7,5	6	
I_{15} (-)	0,18	0,18	0,18	0,18	
α (-)	2	2	2	2	

Según la norma mencionada: V_{ref} se refiere a la velocidad de referencia del viento promediada en 10 min y V_{ave} es la velocidad del viento media anual a la altura del buje.

2.3.4 VENTAJAS E INCONVENIENTES

Esta producción de energía, como todas las demás, presenta una serie de ventajas e inconvenientes. Es claro que, medioambientalmente hablando, es mejor puesto que se reducen las emisiones, pero presentan unos inconvenientes que es preciso tener en cuenta.

2.3.4.1. AEROGENERADORES

Este tipo de energía tiene una serie de ventajas que se enumeran a continuación (ANTALA, 2020), (Arriols, 2019):

- Se trata de una energía limpia (la eólica es la energía que menos impacto tiene sobre el medio ambiente). La generación eléctrica no genera gases contaminantes ni ningún tipo de residuo tóxico.
- No resulta en la contaminación del agua y tiene poco impacto sobre el suelo (no contamina, pero sí influye en las vibraciones).
- Contribuye al desarrollo sostenible.
- Es inagotable ya que depende exclusivamente del viento para la generación de energía.
- Tiene gran potencial y queda mucho por explotar.
- Fomenta la creación de empleo local.
- Posibilita el acceso a la electricidad en zonas aisladas del resto de la red eléctrica, y al ser una producción localizada en el mismo punto de consumo, no aparecen pérdidas de transporte ni de distribución.
- Requiere de un mantenimiento bajo.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Aunque pocos, los inconvenientes de este tipo de producción energética son los siguientes (ANTALA, 2020), (Arriols, 2019):

- El impacto ambiental: su influencia en el paisaje natural es notable. Desgraciadamente, numerosas aves mueren a causa de los aerogeneradores.
- Contaminación acústica y vibraciones al terreno difíciles de mitigar.
- La velocidad del viento no es constante. Puede que la velocidad no sea suficiente para mover las palas y puede que sea demasiado alta y comprometa la integridad de la estructura.
- Aunque la generación en si no produce residuos, durante la fabricación sí se encuentra este problema.
- Los huecos de tensión pueden dañar el aerogenerador.

2.3.4.2. AEROGENERADORES DOMÉSTICOS

De este subgénero de aerogeneradores eólicos encontramos también una serie de ventajas propias (EcoInventos, green technology, 2020):

- Se trata de una instalación sencilla con un coste bajo de mantenimiento.
- Se puede amortizar el coste de la instalación en pocos años.
- La mejor ventaja entre ellas es que puede ser combinada con la fotovoltaica, para crear las llamadas instalaciones híbridas.

Las instalaciones híbridas suponen una mejora puesto que, a parte de las ventajas claras de funcionamiento durante todo el año, esto supone que se reduce el número de cargas y descargas de las baterías, lo que aumenta su vida útil (Energías renovables, el periodismo de las energías limpias, 2017).

Por otra parte, encontramos también algunos inconvenientes asociadas a este tipo de tecnología (EcoInventos, green technology, 2020):

- Los costes de iniciales de la instalación son elevados además de que requieren de gran terreno.
- La eficiencia de las turbinas solo ronda el 30%, aunque es alto si lo comparamos con la fotovoltaica.
- El impacto visual y el ruido puede molestar a vecinos e, incluso, puede ser perjudicial para la salud.
- Pueden sufrir daños por agentes externos, como por ejemplo de rayos o huracanes.

2.3.5. MARCO LEGAL EN ESPAÑA

Como se ha mencionado en el epígrafe 2.2.1., la curva de crecimiento en España se ha convertido en prácticamente una horizontal durante los últimos años. Esto choca con el Plan Nacional de Energía Renovables aprobado en 2011 y que tenía por objetivo alcanzar los

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

35.000 MW para 2020. Mucho ha de cambiar este año para que incluso con pandemia se puedan alcanzar los casi 10.000 MW que faltan para llegar a ese valor.

Se ha creado un nuevo Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2012-2030 que ha sido remitido a la Comisión Europea. Se trata de un plan con nuevas medidas muy exigentes para poder lograr que el sector eléctrico alcance 100% de energías renovables en 2050 (Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, 2020).

Sobre la minieólica se puede añadir que se trata de un procedimiento breve y con plazos de respuesta cortos (unos diez días) (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2014).

Además, el gobierno ha intentado promocionar este tipo de instalación comentando las ventajas que presenta como el abaratamiento de la energía para la sociedad, reducción de las pérdidas debidas a la transmisión y la reducción de emisiones de CO₂, aunque no ha tenido mucho éxito (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2017).

Pero como ya se ha comentado, no hay un incentivo real que motive a los ciudadanos a invertir en este tipo de producción energética.

3. SOFTWARE PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LOS CÁLCULOS

Para el proceso de optimización van a ser necesarios tres programas: ANSYS, MATLAB y modeFRONTIER.

El programa que inicia la secuencia es modeFRONTIER, que crea unas combinaciones aleatorias de las variables que luego envía a MATLAB. Este segundo programa se encarga de preparar la “macro”, término que será explicado más adelante en el apartado 3.3., con la combinación de variables del modeFRONTIER de forma que pueda ser leída por ANSYS y luego la ejecuta. Con esta “macro”, ANSYS calcula las tensiones a las que se encuentra sometida la pala del aerogenerador.

Una vez obtenidos los resultados de ANSYS, esta devuelve los valores a MATLAB que leerá y seleccionará de entre ellos las variables de salida: la función objetivo, que en este estudio es el volumen, y la tensión de Von Mises como restricción.

En la Fig. 5 se puede observar la relación que hay entre los programas de forma esquemática para una total comprensión del proceso que se va a llevar a cabo.

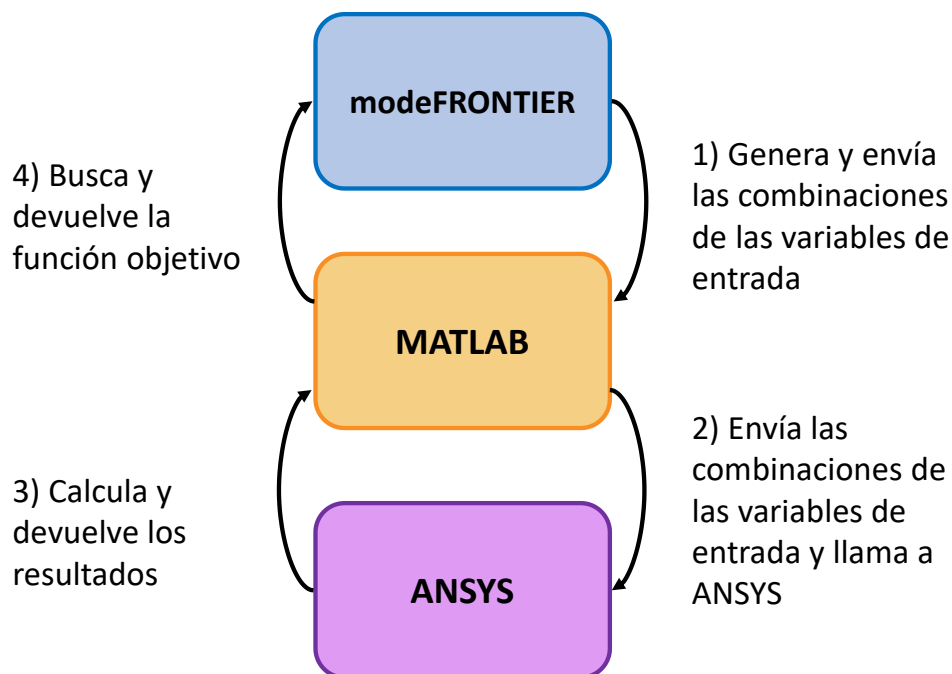


Figura 5. Interconexión de los programas

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

3.1. modeFRONTIER

Este programa se podría referir como “una plataforma de integración por multiobjetivo y optimización multidisciplinaria. Proporciona un acoplamiento perfecto con terceras herramientas de ingenieros, permite la automatización del proceso de simulación de diseño y facilita la toma de decisiones analíticas” (ESTECO, 2020).

El programa tiene diferentes algoritmos, entre ellos el genético, que se empleará para la optimización que se presenta. Este algoritmo se basa en la evolución genética que determina cuál de los posibles casos, que genera aleatoriamente dadas unas condiciones, es el que mejor responde ante una situación dada. Se trata de una analogía clara a Darwin y la supervivencia de los más fuertes (Laura Núñez, 2019).

3.1.1. MODO DE EMPLEO

En cuanto abrimos el programa nos aparece la ventana de la Fig. 6 que nos indica muestra las posibilidades de trabajo. Para empezar un proyecto nuevo hay que selección en “new project” y se abrirá un espacio de trabajo como el que se muestra en la Fig. 7.

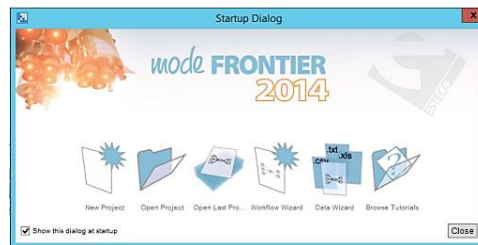


Figura 6. Ventana de inicio modeFRONTIER.

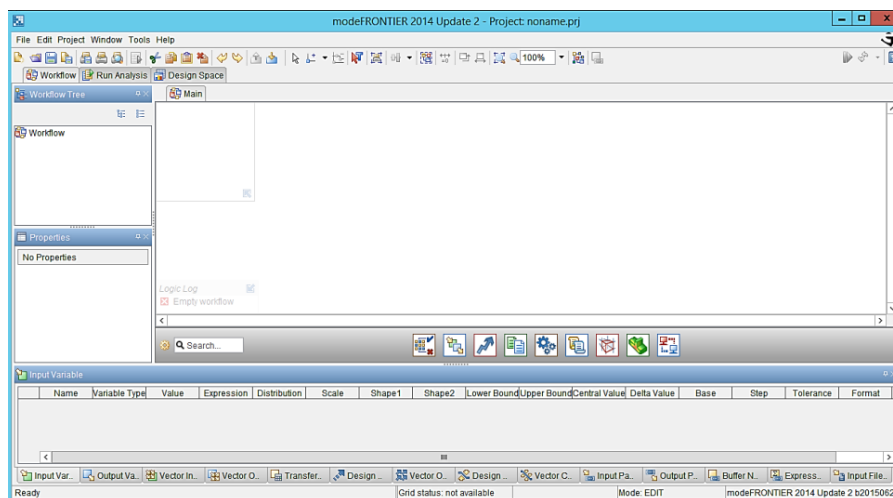


Figura 7. Ventana de trabajo modeFRONTIER.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

En el espacio en blanco es donde se irán colocando los elementos necesarios para la optimización y se irán uniendo de forma apropiada. Los elementos se encuentran en la barra de herramientas que se encuentra en la zona central de la ventana (véase Fig. 8). A continuación, se irán presentado las herramientas necesarias para configuración apropiada del programa.



Figura 8. Herramientas modeFRONTIER, visto desde “logic notes”.

En la parte inferior de la Fig. 8 se pueden observar en la fila inferior los grupos y en cada uno de ellos se encuentran una serie de elementos. En esta figura, se muestran los elementos del primer grupo, llamado “logic notes” y sus funciones giran en torno al manejo general del programa. El primer elemento de a fila superior es el “scheduler”, donde se introducen los datos de partida para la creación y análisis de los distintos modelos de estudio. Es el más importante del programa. El segundo, el que parece una flecha azul, corresponde con el final del análisis, “logic end”.

Se va a explicar un poco más a fondo el “scheduler” puesto que es donde va a residir la esencia del proceso. El “scheduler” está compuesto por dos elementos (Fig. 15), “doe properties” a la izquierda y “scheduler properties” a la derecha.



Figura 9. Elementos del “scheduler” del modeFRONTIER

En el “doe” se escoge cómo va a ser la selección de los valores de las variables. Crea una combinación dependiendo de la configuración que se requiera. El tipo “random”, que es el que se va a utilizar más adelante, crea, como su nombre indica, una combinación aleatoria de variables. Solo son necesarios rellenar dos campos: número de diseños y el “random generator seed”.

Este último campo puede tomar un valor comprendido entre 0 y 999, que corresponderá con una determinada secuencia de variables. Si por ejemplo se escoge el “1”, el modelo creará ciertos valores para llegar a esa optimización y siempre usará los mismos si no se cambia ese parámetro. Si se escoge el “2” el modelo partirá de otros valores para esas variables para alcanzar esa misma optimización. Para el “0” el funcionamiento es distinto. Si se introduce este

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

valor, el programa escogerá los valores de las variables dependiendo de la hora del reloj del ordenador, por lo tanto, cada vez que se genere la combinación de variables será distinta de la anterior. Esto se utiliza para la comprobación de que independientemente de la combinación de partida, se llega a un único diseño óptimo. Tras introducir los datos, es necesario pulsar “add doe sequence”.

Dentro del otro elemento, “scheduler properties”, se escoge el modelo de optimización. En este elemento también se puede elegir si se quiere que el estudio haga ciertos estudios como valorar los casos repetidos o valorar los casos inviables.



Figura 10. Herramientas modeFRONTIER, vista desde variables.

En el segundo grupo de la barra de herramientas encontraremos los componentes que tienen que ver con las variables (véase Fig. 10). Los iconos verdes corresponden con los “inputs” o entradas y los azules con los “outputs” o salidas.

Quedan dos elementos que van a ser relevantes en la optimización. En el tercer grupo de las herramientas, llamado “goal nodes”, se encuentran los elementos para introducir la/s funciones objetivo/s como minimizar un valor o restringirlo a máximo (no visibles en la Fig. 10).

El quinto grupo, el que tiene un dibujo de un engranaje, se llama “application nodes” y en él se encuentran las herramientas para enlazar otros programas con éste (tampoco visibles en la Fig. 10). Entre ellos se encuentra el MATLAB que tiene el mismo icono que dicho programa para su fácil identificación.

Cuando se ha diseñado todo el espacio de trabajo se puede empezar a calcular. En la parte superior derecha de la ventana se encuentra un símbolo con forma de “play” como se puede observar en la anterior Fig. 7 donde está la ventana al completo del programa.

Tras pulsarse, empiezan a aparecer los resultados de las combinaciones determinadas en el “doe”. Se pueden observar en dos ventanas distintas. Se puede acceder a ellas en la parte superior izquierda, donde aparece que hay tres ventanas diferentes de trabajo (son visibles en la Fig. 7). En la de “run analysis” se pueden observar datos como las combinaciones empleadas o el porcentaje de ellas que da resultados erróneos. En la otra, “design space”, aparece una lista de los valores que toman las variables de entrada y salida, además de las que han salido erróneas y las que superan los límites establecidos.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

3.1.2. CONFIGURACIÓN PARA LOS CÁLCULOS

A continuación, se presenta la forma en que debe configurarse para los posteriores cálculos. En la Fig. 11 se muestra cómo va a quedar el espacio de trabajo y cómo deben estar unidos los elementos entre sí para este estudio.

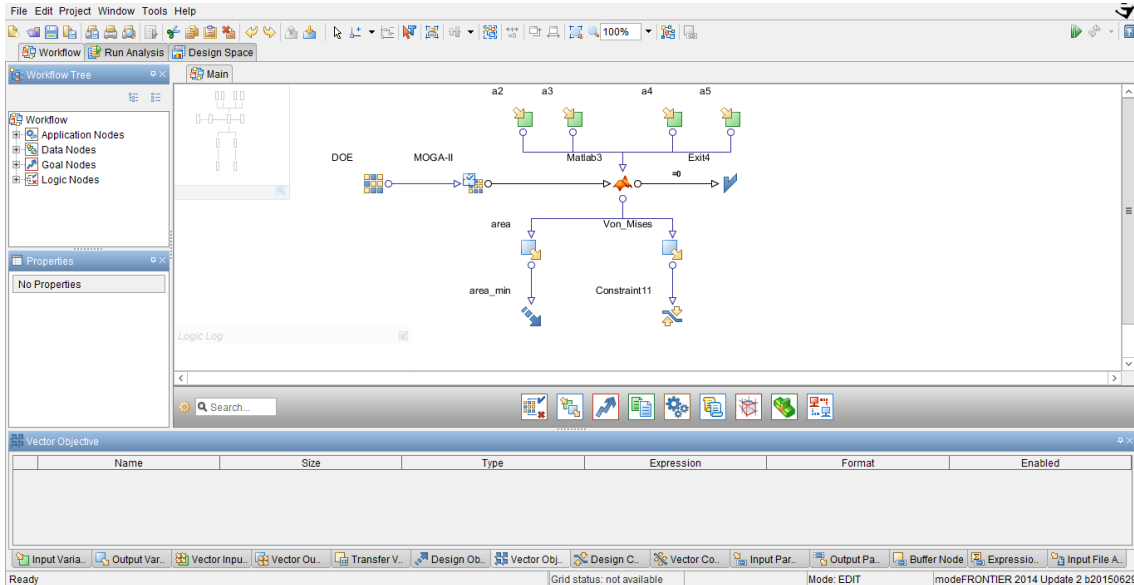


Figura 11. Espacio de trabajo de modeFRONTIER para 4 variables

Lo primero a configurar son las variables. A cada una se le asigna un nombre, que puede ser distinto al de MATLAB, y un rango en el que puede variar. Es preciso también indicar el paso o el número de variantes de esa variable. Como se verá más adelante en el epígrafe 5, en cada caso se mencionarán cuáles son las variables de entrada, puesto que la anterior figura solo muestra cuatro.

En las variables de salida solo hay que indicar el nombre que toman y lo que queremos conseguir. Se quiere encontrar un valor mínimo de volumen y que la tensión de Von Mises no supere la tensión de rotura. Esta tensión se encuentra definida más adelante en el apartado 4.3.3. No es necesario introducir más datos en estos elementos.

En el icono de MATLAB hay que introducir la ruta del script principal configurado en el punto siguiente. En la parte inferior hay que poner a qué variables corresponden las creadas en este programa (véase Fig. 12).

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

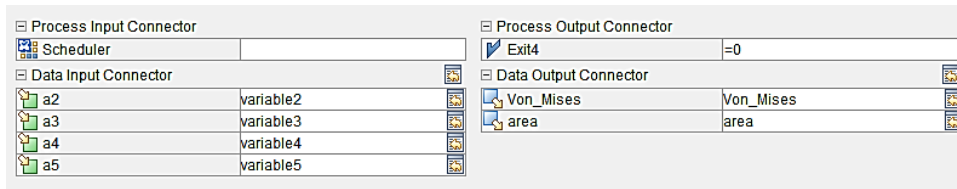


Figura 12. Conectores de variables modeFRONTIER a MATLAB

No es necesario configurar la salida, puesto que es algo automático, pero se puede introducir algún elemento extra que indique el final de una iteración.

Falta por introducir el “scheduler”. Es preciso que las variables de entrada hayan sido configuradas antes de pasar a este paso.

El “doe” quedará como aparece a continuación en la Fig. 13. Como se ha introducido antes, solo hay que marcar el estudio “random” y los parámetros. Se puede ir ajustando el número de diseños dependiendo del caso, puesto que habrá situaciones donde con pocas combinaciones será más que suficiente.

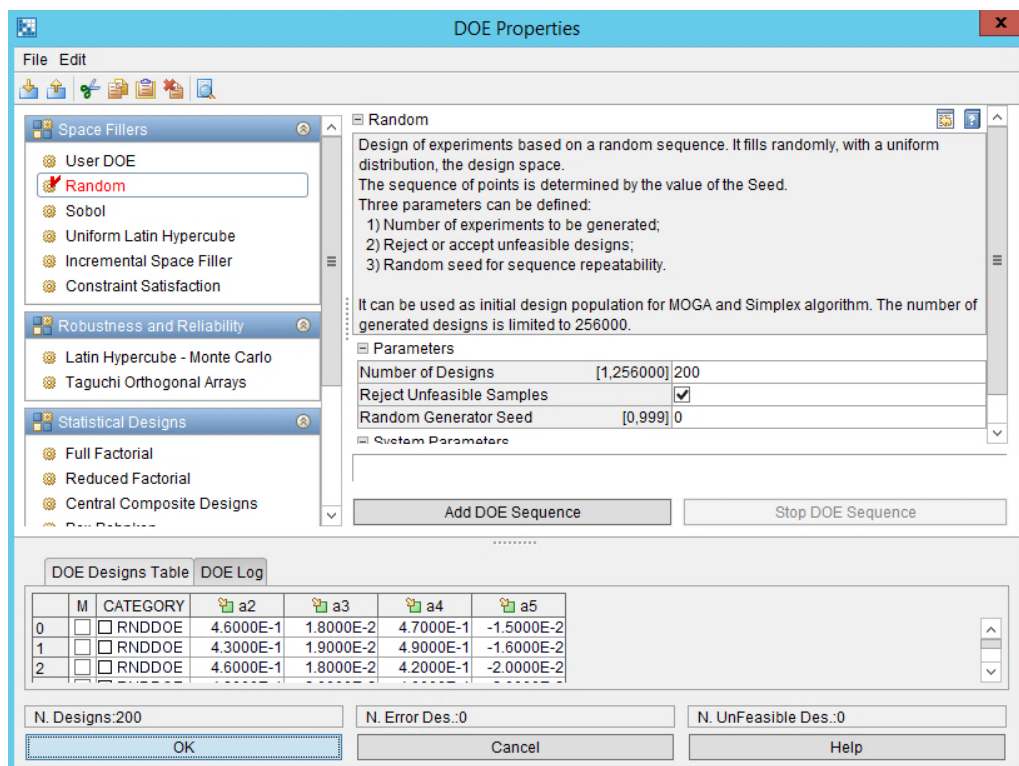


Figura 13. Configuración del “doe properties”.

El siguiente a configurar es el “scheduler properties” y en este reside la esencia del estudio. El algoritmo genético corresponde con el “moga II”, que se selecciona en la parte izquierda superior de la ventana (véase Fig. 14). Este algoritmo utiliza un operador multiobjetivo que tiene

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

como número total de pruebas las definidas en “number of design” (en el “doe”) por las definidas en “number of generations” (en “scheduler properties”).

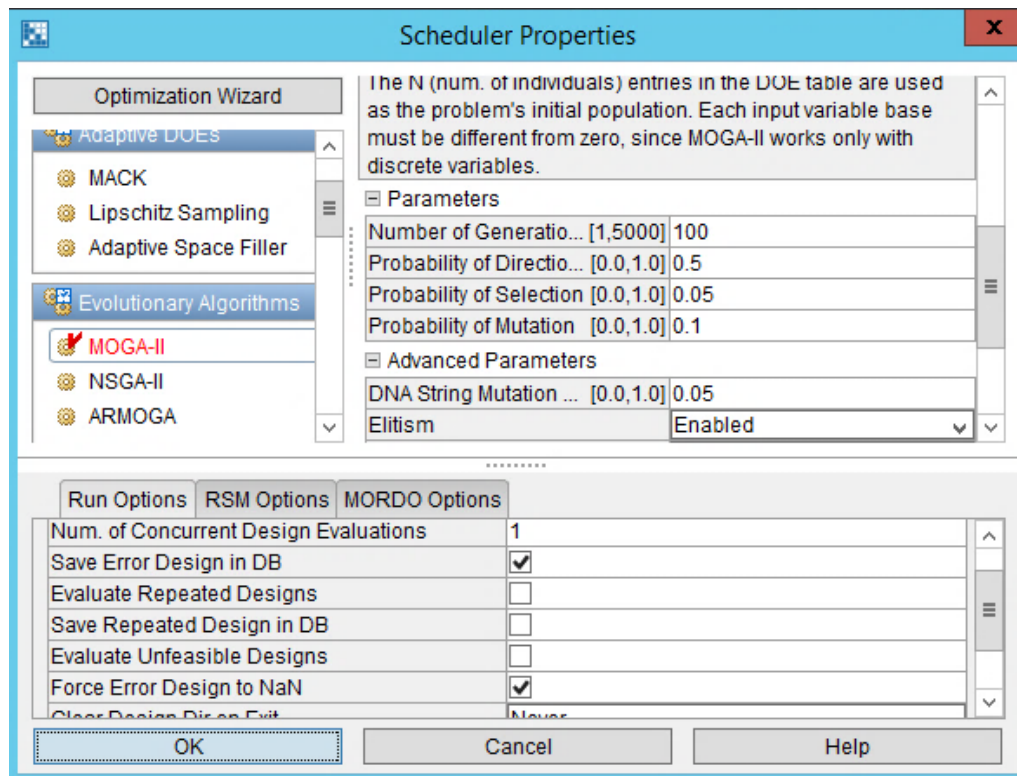


Figura 14. Configuración del “scheduler properties”.

El resto de los parámetros tienen las siguientes funciones sobre el programa:

“Probability of directional cross-over”: esta probabilidad determina la recombinación de los individuos para obtener otros con mejores características. Este operador es el principal operador del algoritmo.

“Probability of selection”: está relacionado con el anterior. Mientras que ese señalaba la probabilidad de recombinación, este indica la probabilidad de un individuo a no ser alterado.

“Probability of mutation”: es la probabilidad de que la configuración de diseño cambie de forma aleatoria.

“DNA string mutation ratio”: a cada individuo le corresponde una cadena de código binario. Este es un valor que corresponde con el porcentaje de bits que se modifican con las mutaciones del parámetro anterior.

“Elitism”: este parámetro afianza que las mejores soluciones se mantienen.

Tras el estudio de las modificaciones de estos valores, se decide que los parámetros que vienen de serie en el programa son los mejores para llevar a cabo el estudio (Sánchez Orgaz, 2011).

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

3.2. MATLAB

La definición que la página oficial del producto es la siguiente: “MATLAB combina un entorno de escritorio perfeccionado para el análisis iterativo y los procesos de diseño con un lenguaje de programación que expresa las matemáticas de matrices y arrays directamente”. (MathWorks, 2020).

Este programa se puede utilizar para diferentes campos de las matemáticas como son: analítica de datos, procesamiento de señales, finanzas, robótica o sistemas de control.

Tiene una apariencia similar a un programador informático y su funcionamiento también se asemeja, aunque éste tiene una finalidad más matemática.

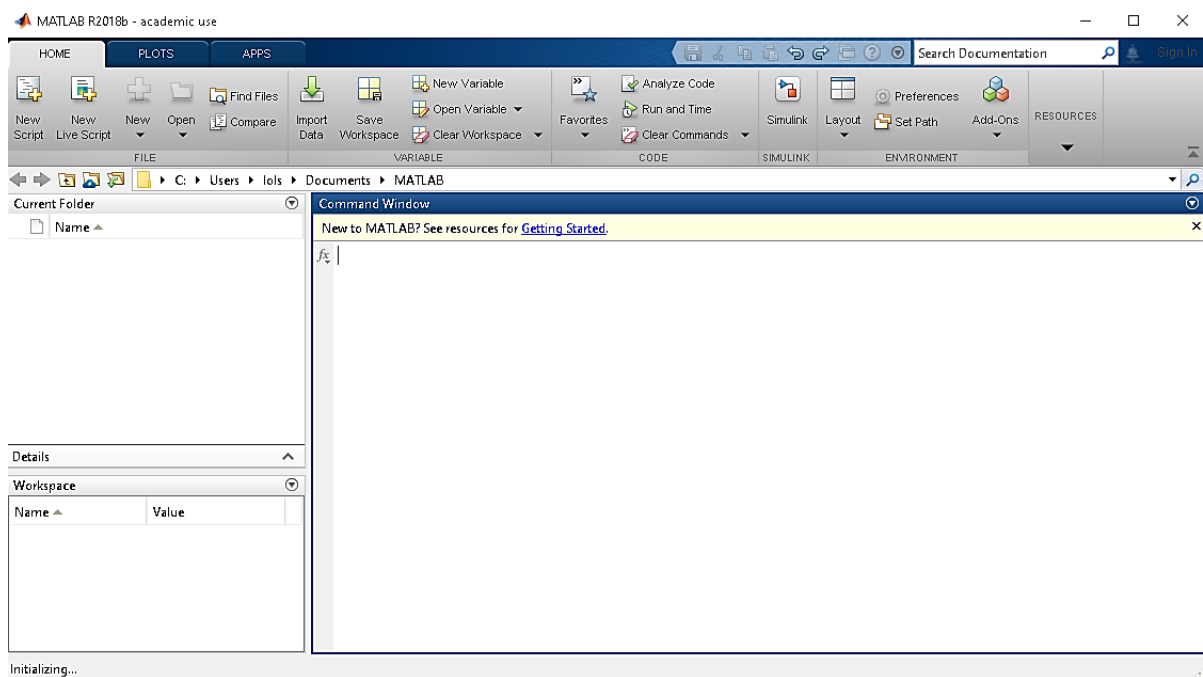


Figura 15. Ventana de trabajo de MATLAB.

3.2.1 MODO DE EMPLEO

En la ventana de comandos se introducen las operaciones que se quieren realizar.

Estas operaciones pueden ser de una línea o puede que se requiera de una serie de comandos a los que se va a recurrir. Para evitar que tener que introducir el mismo una y otra vez se recurre a la creación de scripts.

Para poder realizar todo lo anterior, es necesario conocer las funciones necesarias y cómo se aplica cada una de ellas.

3.2.2. CONFIGURACIÓN PARA LOS CÁLCULOS

Para utilizar MATLAB en este estudio son necesarios los siguientes documentos:

- El script de MATLAB, que realiza la llamada de ANSYS, cambia los valores de las variables de entrada en el diseño y muestra las de salida. Este es el principal archivo que une los que se van a mencionar a continuación. Además, es al que el programa de modeFRONTIER llama.
- Otro script de MATLAB cuya función es leer la “macro”, entendiéndose por tal el documento de texto de ANSYS que contiene los comandos utilizados para la creación del diseño (se puede ver en el punto 3.3.) y crea otro documento con la resolución del diseño con las variables sustituidas en cada caso.
- Otro script de MATLAB que lee la macro resultante y busca los datos que corresponden con las variables de salida.
- Un documento con extensión .dat cuya función es guardar las variables.
- Otro documento con extensión .dat que contendrá la macro. En este documento es necesario cambiar los datos de las coordenadas que van a varias por las variables escritas en el archivo anterior y añadir dos funciones al final con la escritura propia del programa: la función objetivo y la del volumen.

Para el primer archivo es necesario configurar varias cosas: la ruta de ANSYS en el comando de llamada (los cálculos se realizan en el modo batch de ANSYS), el nombre y ruta de la carpeta donde se encontrarán todos los archivos mencionados con anterioridad y determinar claramente cuáles son las variables de salida del modelo.

Al iniciar la secuencia de comandos desde el principal archivo, se crean una serie de archivos. Estos corresponden con todos los documentos que se crean al realizar un diseño y cálculos en ANSYS. Para no saturar la memoria, tras cada lectura del código se borran todos los archivos que han sido creados.

Para cada caso de estudio solo es necesario cambiar las variables por el número y nombre correspondiente, modificar el documento que las almacena y sustituir la macro por la de estudio con las variables.

3.3 ANSYS

Según el sitio oficial del programa, se trata de una herramienta que “ofrece un software completo que abarca todo el rango de la física, brindando acceso a prácticamente cualquier campo de simulación de ingeniería que requiera un proceso de diseño” (ANSYS, 2020) .

Dentro del amplio mundo de la física, se enfoca en el desarrollo de diversos campos como el diseño 3D, fluidos, estructuras o materiales.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

El programa presenta dos ventanas. La primera, Fig. 16, es la ventana de trabajo mientras que la otra, Fig. 17, es una ventana de texto que irá mostrando al usuario las operaciones que realiza.

Cuando se guarda el diseño, se crean diversos archivos con diferentes extensiones, cada uno con una finalidad. Uno de esos documentos es de texto (.log) donde se encuentran todos los pasos que se han realizado durante la creación y resolución del problema. Esto es lo mismo que se podría encontrar en la ventana de texto. En este estudio nos referiremos a esto como la “macro” del diseño.

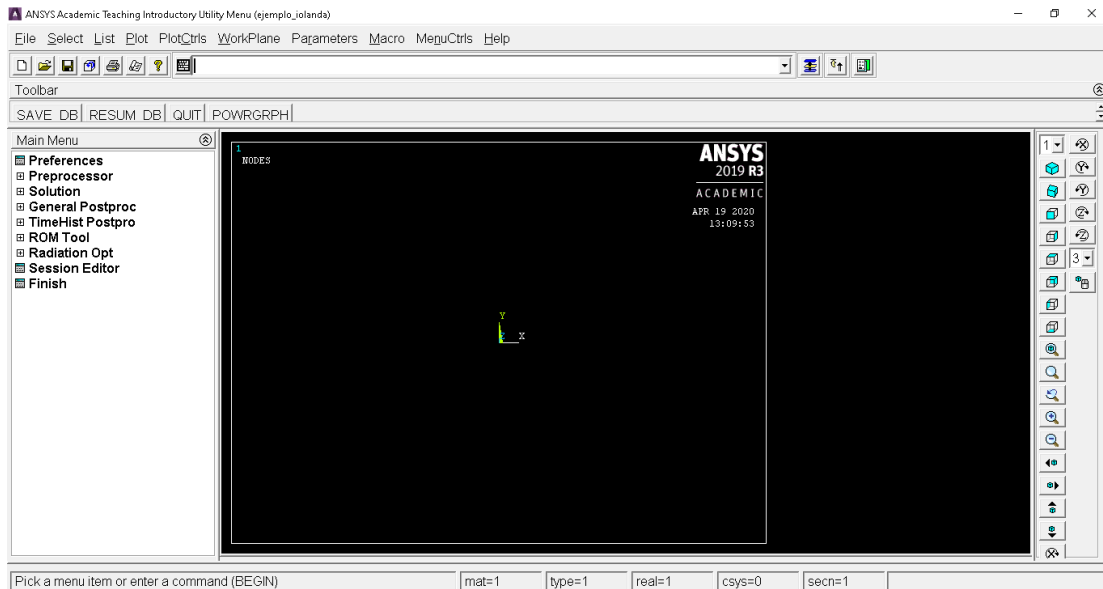


Figura 16. Ventana de trabajo de ANSYS.

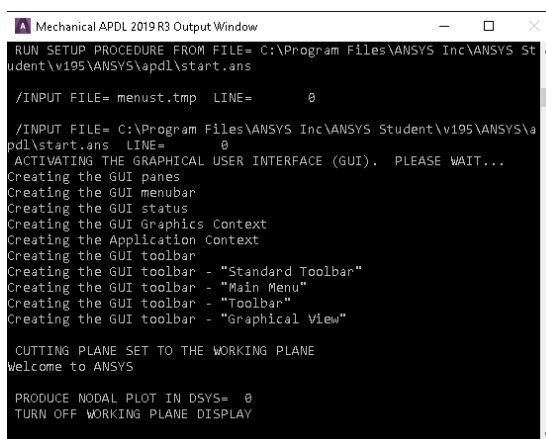


Figura 17. Ventana de texto de ANSYS.

3.3.1. MODO DE EMPLEO

Para poder trabajar con este programa, ese puede entrar desde “mechanical apdl product launcher”. Se abre una pestaña donde decides la localización del nuevo archivo y su nombre. Tras eso, hay que darle a Run en la parte inferior. Si quieres abrir un diseño con el que estabas trabajando, es necesario entrar de forma manual.

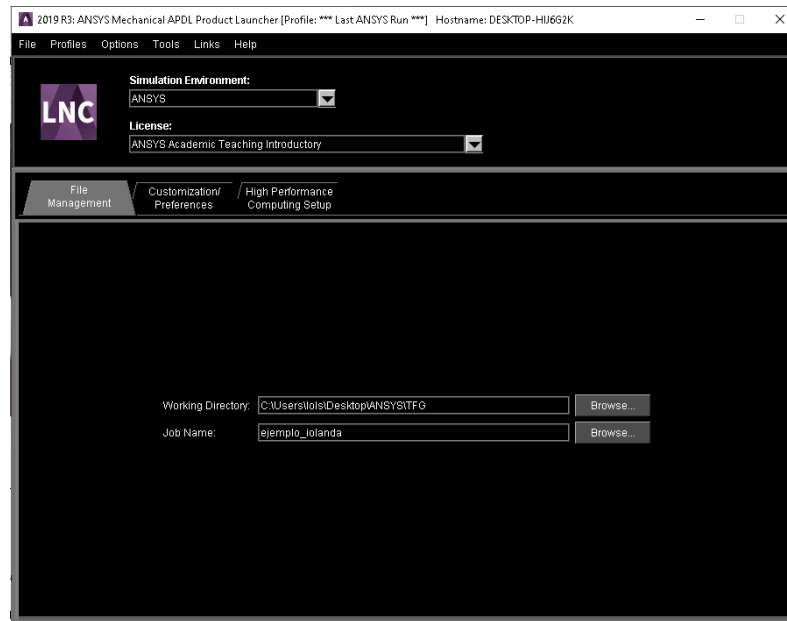


Figura 18. Inicio de ANSYS.

Los proyectos se empiezan con la selección del tipo de estudio se va a hacer y se establecen todas las propiedades necesarias por lo que el primer paso es seleccionar el tipo de proyecto que se va a realizar en la parte izquierda de la ventana de trabajo, en “preferences”.

Para introducir las propiedades que van a intervenir hay que entrar en “materials props”, dentro de “preprocessor”. Es importante que todas las propiedades que sean introducidas estén en las unidades del sistema internacional puesto que este programa trabajará con los valores que el usuario le introduzca y, para no realizar una mala interpretación, esta es la mejor forma.

El siguiente paso es establecer el tipo de elemento, que servirá para definir el número de nodos. Se encuentra dentro de “preprocessor”, “element type”, “add/edit/delete”, como aparece en la ventana mostrada en la Fig. 19. Dependiendo del tipo de diseño con el que se vaya a trabajar es recomendable uno u otro tipo, que se seleccionan en la ventana de la Fig. 20.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

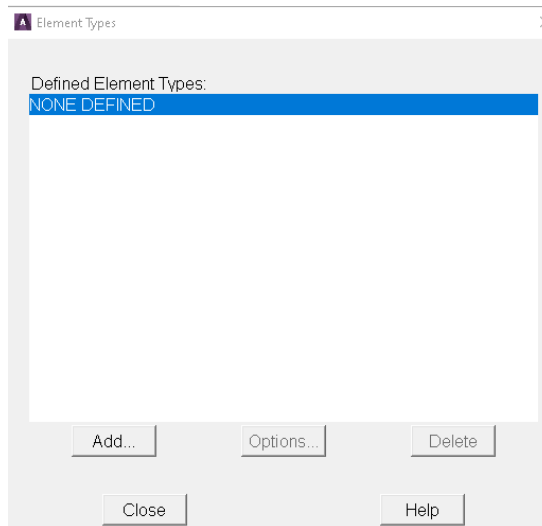


Figura 19. Element type, ventana de ANSYS.

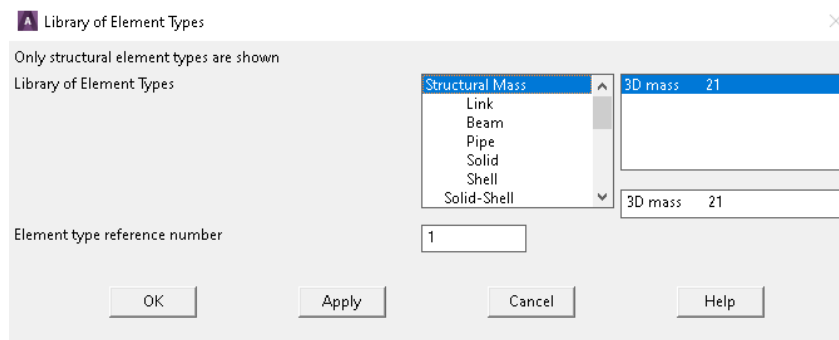


Figura 20. Add element type, ventana de ANSYS.

Ahora ya se puede pasar al diseño. Primero habrá que insertar los puntos necesarios para hacer el modelado. Para ello hay que entrar en los siguientes elementos: “preprocessor”, “modeling”, “create” y “keypoints”. En “create” encontraremos también “lines” y “area” que nos servirán para unir los puntos de diferentes formas y crear el área del elemento.

Cuando el área o volumen del elemento está definido apropiadamente, se pasa a la discretización de elementos finitos. Este es uno de los pasos más importantes. Es imprescindible seleccionar un tamaño apropiado. Si el tamaño es demasiado grande, el error de aproximación puede ser mayor de lo deseado. Por el contrario, un tamaño muy pequeño crearía un exceso de nodos y el proceso, entonces, tardaría más en realizar los cálculos. Cuando son necesarias hacer continuas iteraciones y de tiempos extensos, esta definición puede resultar crítica para los plazos de tiempo.

Las cargas y las restricciones del estudio se pueden aplicar en el apartado de “loads”. Al aplicar todas las condiciones, es necesario pulsar en “operate”, “transfer to fe” y “all solids lds”. Este paso se realiza con la finalidad de que las cargas de las superficies sean transferidas a los nodos.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Solo queda pasar a la resolución del diseño. Para ello hay que entrar en “solution”, “solve” y “current ls”. Aparecerá una ventana para confirmar y tras esto, informará si se ha realizado con éxito. Puede que encuentre algún fallo, que mostrará por pantalla identificando claramente de qué se trata.

Dentro de “general postproc” se pueden encontrar todos los análisis realizados por el programa. Antes de poder leerlos, las nuevas versiones requieren un paso previo: hay que pulsar en “read results”, “first set”.

4 ENSAYOS Y CARGAS DE LAS PALAS DEL AEROGENERADOR

4.1 ENSAYOS DE PALAS

Para este estudio se pretende someter a la pala a ensayos estáticos y de fatiga que nos permitan obtener el diseño óptimo. Para tener una base de cómo aplicar las cargas sobre el diseño se va a comentar brevemente en qué consisten.

Todos los elementos del aerogenerador han de pasar por una serie de ensayos para ver si cumplen unos de requisitos de diseño. Para garantizar su integridad, las palas del aerogenerador han de pasar por algunas de las pruebas más exigentes puesto que van a ser sometidas a mucho estrés y a condiciones extremas.

Se identifican tres tipos de ensayos de palas: el estático, el de fatiga (o dinámico) y el de rotura.

4.1.1. ENSAYO ESTÁTICO

Para este ensayo se aplica a la pala una carga extrema constante. Según la norma de AENOR “aerogeneradores parte 23: ensayos estructurales de palas a escala real” si no puede ser una carga constante, debe ser aplicada por más de 10 segundos (AENOR, 2014).

En cuanto a las cargas: se aplican con diferentes distribuciones simulando las diferentes condiciones extremas que puede sufrir. Es preciso tener en cuenta que tal vez la carga de diseño máxima no es la de mayor magnitud sino la que se aplica en una dirección específica. La pala, además, debe estar ensayada sin olvidar su conexión con el buje.

Según la norma menciona antes, hay diferentes coeficientes que deben considerados para la obtención de esta fuera objetivo:

$$F_{target-u} = F_{du} \cdot \gamma_{nu} \cdot \gamma_{su} \cdot \gamma_{lu} \quad (1)$$

F_{du} corresponde a la carga de diseño, γ_{nu} es el factor parcial para la consecuencia de fallos, γ_{su} es el factor de carga de ensayo para las variaciones de pala a pala y γ_{lu} es el factor de carga para los efectos de entorno (AENOR, 2014). El único valor que la norma ofrece es γ_{su} que es 1,1.

En cuanto a la minieólica, en la norma perteneciente específicamente a “aerogeneradores pequeños” encontramos los pasos a seguir (AENOR, 2015). Se busca conseguir un momento flector en la pala y distribución de este a lo largo del elemento que sea igual o superior a la carga

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

de diseño. La norma proporciona diez diferentes hipótesis de carga de diseño de entre las cuales habrá que seleccionar la que más se ajuste al estudio en concreto que se explicará un poco más adelante.

4.1.2. ENSAYO FATIGA

En este ensayo, se busca provocar una situación de fatiga similar al que sufrirá la pala en funcionamiento.

Este elemento es sometido a cargas oscilantes a la frecuencia natural de la pala. El valor de estas cargas se selecciona con el objetivo de disminuir el tiempo del ensayo (AENOR, 2014).

De manera similar a la carga objetivo en el caso de estática, para obtener la de fatiga es necesario multiplicar por los siguientes coeficientes:

$$F_{target-f} = F_{df} \cdot \gamma_{nf} \cdot \gamma_{sf} \cdot \gamma_{ef} \cdot \gamma_{lf} \quad (2)$$

Donde F_{df} es la carga de diseño equivalente de daño, γ_{nf} es el factor parcial para la consecuencia de los fallos, γ_{sf} es el factor de carga para las variaciones de pala, γ_{ef} es el factor de carga de ensayo para los errores de la formulación de fatiga y γ_{lf} es el factor de carga de ensayo para los errores de la formulación de fatiga (AENOR, 2014). Como antes, tenemos el coeficiente de variaciones de pala, que tiene el mismo valor: $\gamma_{sf}=1,1$.

En cuanto al coeficiente γ_{ef} , depende de la siguiente tabla que se encuentra también en la norma:

Tabla 2. Valores recomendados para γ_{ef} para diferentes números de ciclos de carga. Fuente: (AENOR, 2015).

Números de ciclos de carga	γ_{ef}
5×10^5	1,065
1×10^6	1,05
$2,5 \times 10^6$	1,035
5×10^6	1,025
1×10^7	1,015

4.1.3. ENSAYO DE ROTURA

No se realiza en todos los casos de inspección de palas. Solo se lleva a cabo cuando un diseño ha cambiado radicalmente o cuando se emplea un material nuevo, por lo tanto, no se va a realizar en este estudio.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Este ensayo consiste en aplicar una carga estática creciente hasta lograr el colapso completo de la pala para su posterior análisis.

4.2. HIPÓTESIS DE CARGA

En la norma de aerogeneradores pequeños se puede encontrar una lista con diferentes hipótesis de cálculo y cómo hallar las fuerzas o momentos aplicados (AENOR, 2015). Se recomienda elegir la que se acerque más a las condiciones del estudio.

Se ha elegido la siguiente hipótesis que responde ante el nombre de: hipótesis de empuje máximo.

4.2.1. HIPÓTESIS DE EMPUJE MÁXIMO

Se trata de “un coeficiente de fuerza simple combinado con una presión dinámica”. Encontramos la siguiente fórmula que ha de ser aplicada paralela a la dirección del eje.

$$F_{x-shaft} = C_T \frac{1}{2} \rho (2,5 * V_{ave})^2 \pi * R^2 \quad (3)$$

En esta fórmula, C_T es el coeficiente de empuje y toma el valor de 8/9; ρ es la densidad del viento; V_{ave} es la velocidad del viento media anual a la altura del buje y R es el radio del rotor. La fuerza está medida en N.

Esta fuerza de diseño es la que se debe aplicar a las ecuaciones mostradas anteriormente, la Ec. 1 y la Ec. 2, para mayorar las cargas teniendo en cuenta sus condiciones de estudio.

4.3. PARÁMETROS

4.3.1. AEROGENERADOR DE PARTIDA

Para no establecer un diseño de partida que aleje de la realidad, se ha considerado tomar un modelo medio de lo que se puede encontrar en el mercado. En porcentaje, los aerogeneradores domésticos suelen tener en su mayoría cinco palas, a diferencia de los grandes aerogeneradores que suelen tener tres. Esto es debido a que el rendimiento con tres para un aerogenerador doméstico es inferior que el de cinco (San Roman, 2013). Por este motivo, el aerogenerador a considerar tendrá cinco palas.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Otros datos que se han seleccionado mirando los aerogeneradores del mercado son potencia de 700 W, eje horizontal, orientación a barlovento y aerogenerador de clase I (se puede identificar en la Tabla 1).

4.3.2. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Los datos que se van a considerar se han tomado comparando varios modelos que seguían las características establecidas anteriormente. De toda la información que ofrece el fabricante, solo van a ser necesarios los siguientes datos:

- Diámetro de la rueda de viento: 170 cm.
- Diámetro del rotor: 20,82 cm.

Es necesario remarcar que vamos a crear un diseño nuevo, no se intenta imitar ninguno anterior. Simplemente se escogen estos datos para tomar un punto de partida.

El primer diseño que se va a desarrollar en las páginas posteriores es de acero. Este material es más económico que los compuestos y presenta una alta resistencia. De entre los tipos de acero, el acero seleccionado es un acero duro que presenta una resistencia a tracción (S_u) de 75 kg/mm², o 75 MPa (Búa, 2014). Además, se va a realizar otro estudio con el aluminio para su posterior comparación puesto que son muy distintos entre ellos. Se trata de un material más barato que el anterior y que presenta una resistencia a tracción inferior, de 10 MPa (Xunta de Galicia, 2020).

El espesor va a ser considerado constante en toda la superficie para simplificar los cálculos. Tras observar perfiles similares, se considerará que el espesor es de 1 cm.

4.4. CONDICIONES DEL ESTUDIO

4.4.1. HIPÓTESIS DE EMPUJE MÁXIMO

Los valores de los parámetros serían los siguientes:

$C_T = 8/9$ (dato adimensional que proporciona la norma).

$P = 1,225 \text{ kg/m}^3$ (la norma considera este valor).

$V_{ave} = 10 \text{ m/s}$ (determinado por la clase de pala, Tabla 1).

$R = 0,85 \text{ m}$ (parámetro de diseño).

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Con los datos anteriores, objetemos que la fuerza resultante $F_{x\text{-shaft}}=772,3627355$ N.

4.4.2. ESTÁTICA

En el caso de la estática, se busca una racha de viento máxima que no debe comprometer la integridad de la pala por lo que se conviene modificar la ecuación por una velocidad muy superior.

La alerta naranja abarca velocidades de viento de racha desde 90 a 130 km/h (AEMETblog, 2018). En España es muy poco probable que se alcance una alerta roja así que se toma como situación extrema la alerta naranja. La velocidad máxima, 130 km/h, corresponden con 36,1 m/s.

Sustituyendo en la ecuación, la fuerza máxima de diseño que se obtiene de los cálculos es de: 11.071,7 N. Al introducir el valor en ANSYS se redondeará hacia arriba hasta 11.100 N.

Se tendrá en cuenta la ecuación presentada en el apartado 4.1.1., la Ec. 1, para mayorar la carga. γ_{su} tomará el valor de 1,1 mientras que el resto de los coeficientes no es posible determinarlos con exactitud, por lo que este valor se incrementará a 1,25. Este coeficiente será aplicado al límite de rotura, que en el caso del acero disminuye hasta 60 MPa.

4.4.3. DINÁMICA

Para este caso sí se tiene en cuenta lo calculado en el apartado 4.4.1. puesto que la carga dinámica emplea una fuerza media, no una máxima.

Puede que la fuerza parezca un poco baja, pero se trata de velocidades medias. Como referencia, se puede presentar las velocidades medias en Valencia mostradas en la Fig. 21. De hecho, en general, España presenta pocas zonas que se acerquen al valor establecido en los cálculos anteriores (10 m/s).

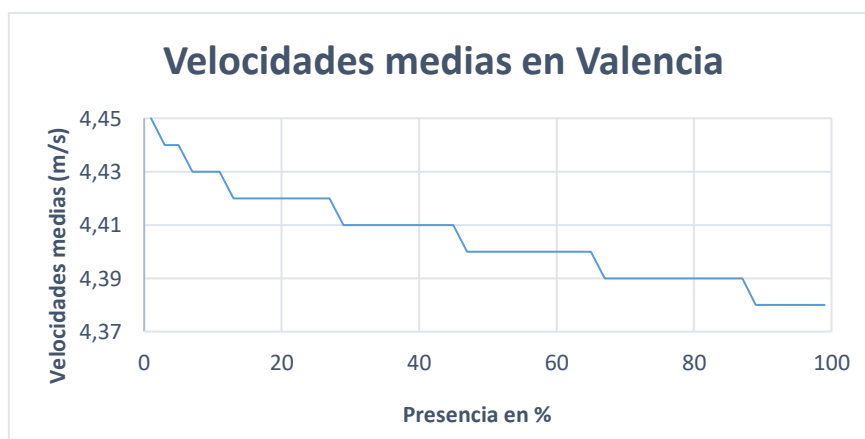


Figura 21. Velocidades medias en Valencia, (Global Wind Atlas, 2020).

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Entrando ya en el ensayo de resistencia a fatiga, se basará en el criterio de Goodman. Éste establece que la tensión equivalente se puede calcular de la siguiente forma:

$$\sigma_{eq} = \sigma_m + \sigma_a \frac{S_u}{S_e} \quad (4)$$

Los términos empleados en la ecuación 5 tienen los siguientes significados: σ_{eq} es la tensión equivalente, σ_m es la tensión media aplicada, σ_a es la tensión alternante aplicada, S_u es la resistencia a tracción y S_e resistencia a fatiga.

σ_m corresponderá con el valor medio de la carga calculada, es decir, 772,3627355 N, y σ_a con el valor alternante, es decir, con el resto de la carga que serían otros 772,3627355 N. En este caso, los coeficientes de seguridad de aplican directamente a las cargas puesto que es indiferente y para establecer los coeficientes es más sencillo plantearlo así.

Al mayorar la fuerza teniendo en cuenta la Ec. 3 de donde se extrae la carga de diseño, las fuerzas anteriores se han de multiplicar por varios coeficientes como indicaba la Ec. 2. Al igual que el caso anterior, γ_{su} tomará el valor de 1,1. El otro coeficiente que se va a tomar en cuenta es γ_{ef} , que es el que depende de los ciclos.

Al trabajarse con acero, la vida infinita se establece para los 10^6 ciclos (horizontal presentada en la Fig. 22) así que se descarta coger el coeficiente que corresponde con menor número de ciclos. Para decantarse por el lado de la seguridad, es aconsejable no tomar el coeficiente que corresponde con ese número exacto de ciclos, sino el siguiente. Por lo tanto, comprobando la Tabla 2, se establece un valor de $\gamma_{ef} = 1,035$ que corresponde con el número de ciclos de $2,5 \times 10^6$.

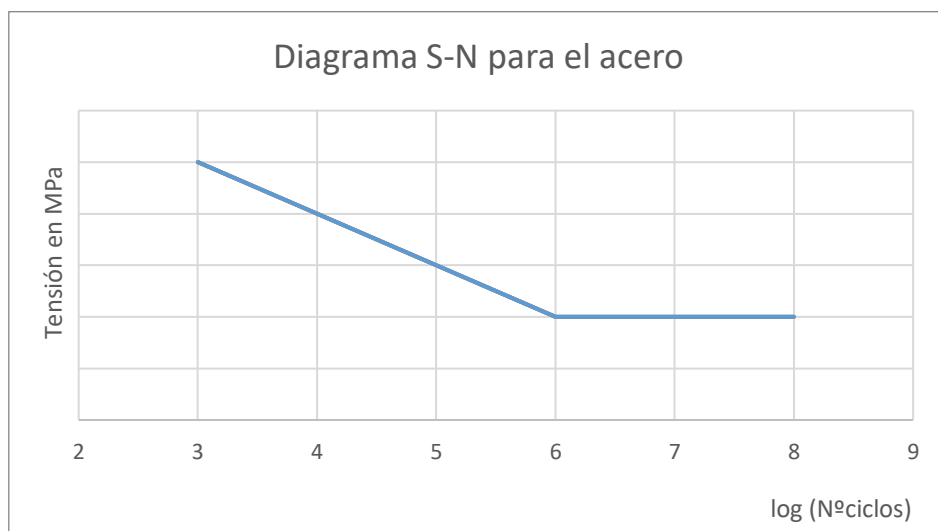


Figura 22. Diagrama S-N para el acero.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

La norma no proporciona suficiente información para ponderar los otros coeficientes. Con los dos que se tienen, la carga se mayoraría en 1,1385. Este valor se considera claramente bajo para una carga a fatiga por lo que hay que mayorar más. Como hay dos factores que se están omitiendo se establece que un coeficiente de 1,5 es más apropiado para el estudio que se va a realizar a continuación.

En conclusión, la carga media y alternante corresponde con: 1.158,4991 N. Para la simplificación a la hora de introducir los datos en el diseño, se considerará que ambas tensiones son de 1.160 N.

4.4.3.1. CÁLCULO DE LOS LÍMITES DE TENSIÓN

Ahora son necesarios los otros dos factores que intervienen en la ecuación de la tensión equivalente (Ec. 4). S_{ut} se había concretado anteriormente en 75 Mpa para el acero. No se realiza el del aluminio porque no será necesario como se verá en las páginas posteriores. Para el cálculo de S_e se requieren de unos cálculos extra:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e / k_f \quad (5)$$

Los coeficientes corresponden a las siguientes consideraciones: k_a es el factor de superficie, k_b es el factor de tamaño en flexión rotativa, k_c es el factor de tipo de carga, k_d es el factor de temperatura para aceros, k_e es el factor de confiabilidad y k_f es un factor de sensibilidad de entalla. De los descritos, los coeficientes que van a ser significativos serán k_a , k_c , k_d y k_e , el resto se tomarán como 1.

S'_e , al tener el material una tensión de rotura inferior a 1.400 MPa se calcula con la Ec. 6 y resulta en: $3,75 \times 10^7$.

$$S'_e = 0,5 S_{ut} \quad (6)$$

4.4.3.2. CÁLCULO DE COEFICIENTES

Puesto que $k_a = a S_u^b$, para el cálculo del primer coeficiente se emplea la Tabla 3. Se trata de un acero mecanizado o laminado en frío por lo que teniendo en cuenta la tensión de rotura k_a es 1,61227.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Tabla 3. Factor de superficie para aceros y vida infinita. Fuente: (Besa González & Valero Chuliá, 2016).

Acabado superficial	Factor a (MPa)	Exponente b
Rectificado	1,58	-0,085
Mecanizado o laminado en frío	4,51	-0,265
Laminado en caliente	57,7	-0,718
Forjado	272,0	-0,995

K_c depende del tipo de carga que se aplica. En este caso, al tratarse de una carga a flexión, toma el valor de 1.

Para k_d se tiene que acudir a la siguiente tabla donde se va a estimar la T como 20°C por simplificar, por lo que k_d se toma como 1:

Tabla 4. Factor de temperatura k_d para aceros. Fuente: (Besa González & Valero Chuliá, 2016).

T°C	20	50	100	200	250	300	350	400	450	500	550	600
k_d	1,000	1,010	1,020	1,025	1,020	0,975	0,927	0,922	0,840	0,766	0,670	0,546

Por último, el coeficiente k_e depende de la Tabla 5. Se estima que el valor de confiabilidad es del 99%, por lo tanto, k_e es 0,814.

Tabla 5. Confiabilidad k_e . Fuente: (Besa González & Valero Chuliá, 2016).

Confiabilidad	0,5	0,9	0,95	0,99	0,999
Factor de corrección	1,0	0,897	0,868	0,814	0,753

Teniendo en cuenta los datos extraídos de las tablas y de la Ec. 6, se concluye que S_e es 37.214.449,415 Pa.

Finalmente, se establece que el coeficiente que acompaña la tensión alternante corresponde con $S_w/S_e = 1,61227$. Este dato solo será empleado en el diseño de ANSYS para el cálculo del caso a fatiga.

4.4.4. RESUMEN DE DATOS

A modo de recopilar todos los datos anteriores para facilitar su búsqueda posterior, se realiza la siguiente tabla:

Tabla 6. Recopilación de datos de cálculo

Diámetro del rotor.	0,2082 m
Longitud de la pala.	0,85 m
Espesor de la pala.	0,01 m
Resistencia a tracción del acero	75 MPa
Resistencia a tracción del aluminio	10 MPa
Fuerza de presión en estática.	11.100 N
Fuerza de presión en dinámica, carga media.	1.160 N
Fuerza de presión de dinámica, carga alternante.	1.160 N
Relación resistencia a tracción y a fatiga para el acero (S_u/S_e)	1,61277

4.5. LIMITACIONES

4.5.1. VON MISES

La ecuación de Von Mises, o criterio de máxima energía de distorsión, se trata de una ecuación que se emplea para saber si la fuerza empleada es superior a la de fluencia, con una deformación permanente como consecuencia. Al estar tratando con un elemento metálico, acero, es conveniente analizarla.

Con esta ecuación se puede buscar una carga equivalente como se presentará en los datos a estudiar más adelante.

Para asegurar que no falla de esta forma, no se debe sobrepasar el límite elástico del material. Tras realizar el diseño con el programa ANSYS se pueden encontrar las tensiones de Von Mises en cada nodo y su tensión equivalente.

4.5.2. POTENCIA DE UN AEROGENERADOR

La potencia extraída por el aerogenerador se identifica mediante la siguiente ecuación:

$$P = A * \frac{1}{2} * \rho * v^3 \quad (7)$$

Donde la A corresponde con el área de barrido, ρ con la densidad del viento y v la velocidad del viento. Por tanto, para que nuestra pala siga cumpliendo el requisito de la potencia, 700 W, es necesario que el punto que corresponde con la longitud de la pala no varíe.

5. DISEÑO, PARAMETRIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL PERFIL DE PALA

5.1 MODELADO DEL LOS PUNTOS DEL DISEÑO

Como consideramos el ala plana, vamos a delimitar la zona donde va a encontrarse el perfil. Si dividimos la circunferencia en 5 partes, cada pala ocupa 72° del rotor. Las líneas azules de la Fig. 23 señalan la zona límite mientras que las rojas delimitan la zona que será empotrada directamente al rotor. Esta separación se ha tomado para que las palas no se choquen entre ellas. Los puntos donde estas rectas cortan con la circunferencia pueden ser conocidos sencillamente por trigonometría.

El punto más alejado de la pala también lo conocemos puesto que es mitad de la distancia de rueda de viento. Por lo tanto, ya tenemos tres puntos imprescindibles: $(0,09015; 0,05205)$, $(0,09015; -0,05205)$, $(0,85; 0)$. Todos los puntos que se van a ver a continuación están referidos en metros.

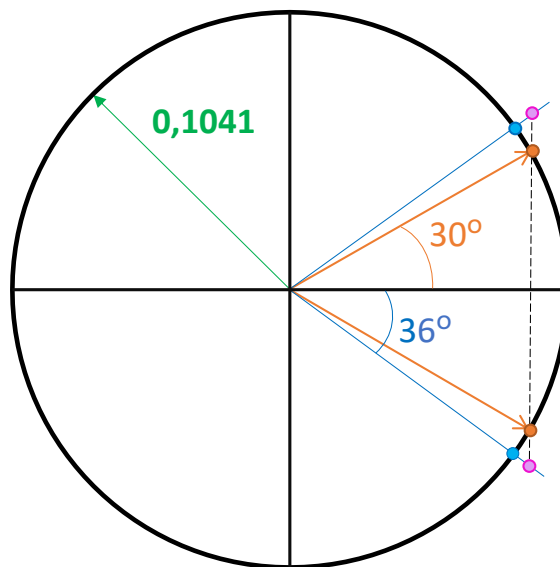


Figura 23. Esquema empotramiento pala.

Van a ser necesarios más puntos a parte de los tres mencionados. Se escoge el punto de la circunferencia que corresponde con el centro del arco seleccionado, $(0,1041; 0)$. Los puntos restantes se escogen dentro de la zona azul. Estos puntos escogidos son los rosas de la Fig. 23 que corresponden con: $(0,09015; 0,06549)$ y $(0,09015; -0,06549)$.

Se pretende colocar otro par de puntos en medio de estos dos para conseguir una curvatura realista. Se escoge el ángulo de 33° , término medio entre los dos ángulos anteriores para que

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

la transición entre los puntos toma la forma deseada. Se elige, por tanto, el punto: (0,0885; 0,058) y (0,0885; -0,058).

Ordenando todos los puntos anteriores, se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 7. Coordenadas en metros del primer intento de diseño.

Puntos	Coordenada en X	Coordenada en Y
1	0,85000	0,0000
2	0,09015	0,06549
3	0,08850	0,05800
4	0,09015	0,05205
5	0,10410	0,0000
6	0,09015	-0,05205
7	0,08850	-0,05800
8	0,09015	-0,06549

El próximo paso es pasar estos puntos a ANSYS y ver cómo se comportan. Se puede comprobar en la Fig. 24 que los puntos de la base están formando prácticamente una línea por lo que eso puede causar que se salga de la zona por la curva que va a unir los puntos.



Figura 24. Localización de los 8 puntos del primer intento en ANSYS.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Las curvas creadas con estos puntos se van a unir mediante “splines”. Se van a añadir también una circunferencia, que corresponde con el rotor, y una recta para delimitar el espacio de trabajo.

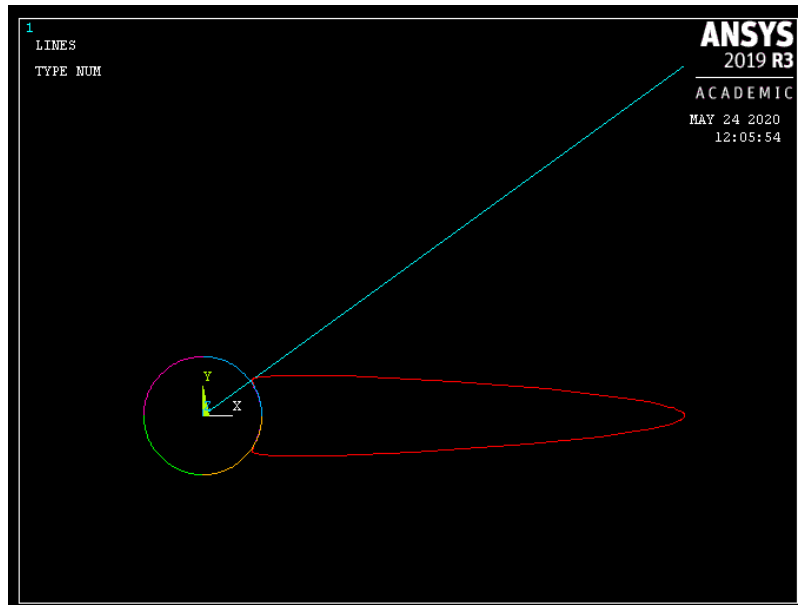


Figura 25. Primer diseño en ANSYS.

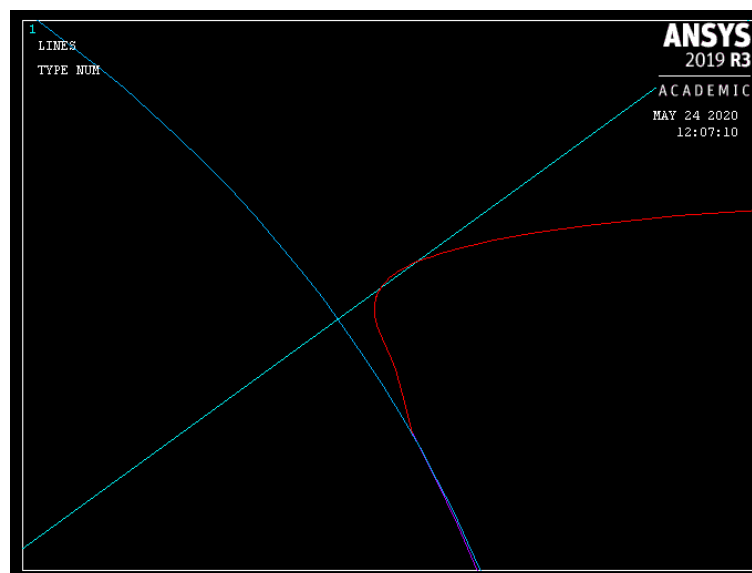


Figura 26. Ampliación del primer diseño en ANSYS.

Aunque en la Fig. 25 parece que será un diseño válido, solo hace falta ampliar, como se muestra en la Fig. 26, para ver que incumple una de las dos restricciones de espacio. Además, si nos fijamos detenidamente en la segunda imagen, se puede ver que la curva roja es algo cóncava y

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

es algo que es recomendable evitar puesto que a la hora de mecanizar será más complicado y para que no se concentren tensiones no deseadas en el empotramiento.

Para solucionar el primer problema, se va a acercar el punto que se encontraba sobre la recta auxiliar, el rosa de la Fig. 23, hacia el eje horizontal. De esta forma, se intenta que la curvatura del “spline” no sobresalga.

En cuando a la concavidad, el punto intermedio elegido va a ser colocado esta vez cerca de la recta que forman los límites, a la derecha de los puntos ya establecidos. Se escoge la coordenada que corresponde con el triángulo formado por el ángulo de 33° pero esta vez con una base de 0,1041 m. Las coordenadas son: (0,1041;0,0676) y, claro está, su simétrico respecto el eje x. La nueva tabla de puntos será:

Tabla 8. Coordenadas en metros del diseño de partida.

Puntos	Coordenada en X	Coordenada en Y
1	0,85000	0,0000
2	0,10410	0,06760
3	0,09015	0,06400
4	0,09015	0,05205
5	0,10410	0,00000
6	0,09015	-0,05205
7	0,09015	-0,06400
8	0,10410	-0,06760

Si estos puntos se unen mediante los splines se obtiene la siguiente distribución en el plano de trabajo:

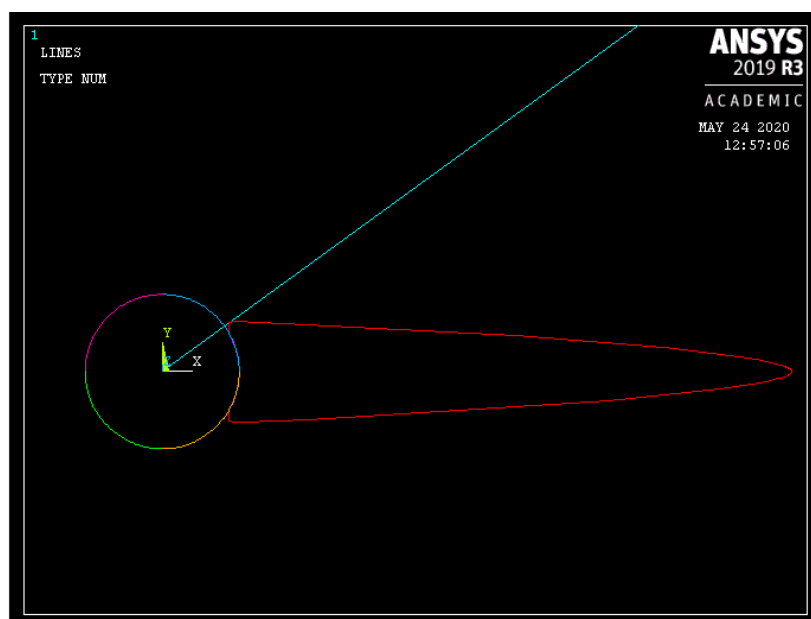


Figura 27. Diseño de partida en ANSYS.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Si se amplía en la zona que antes había planteado ciertos problemas, los dos están solucionados. Se puede ver en la Fig. 28 que la curvatura cerca de la circunferencia ahora sí es correcta y si se amplía más la zona cerca de la recta, Fig. 29, se puede ver que no cruza a la zona delimitada para la otra pala.

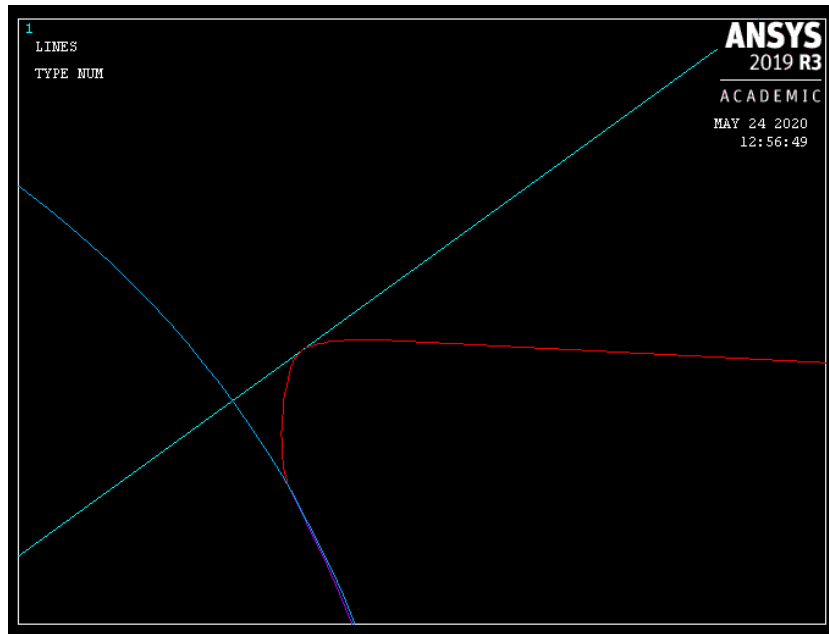


Figura 28. Ampliación 1 del diseño de partida en ANSYS.

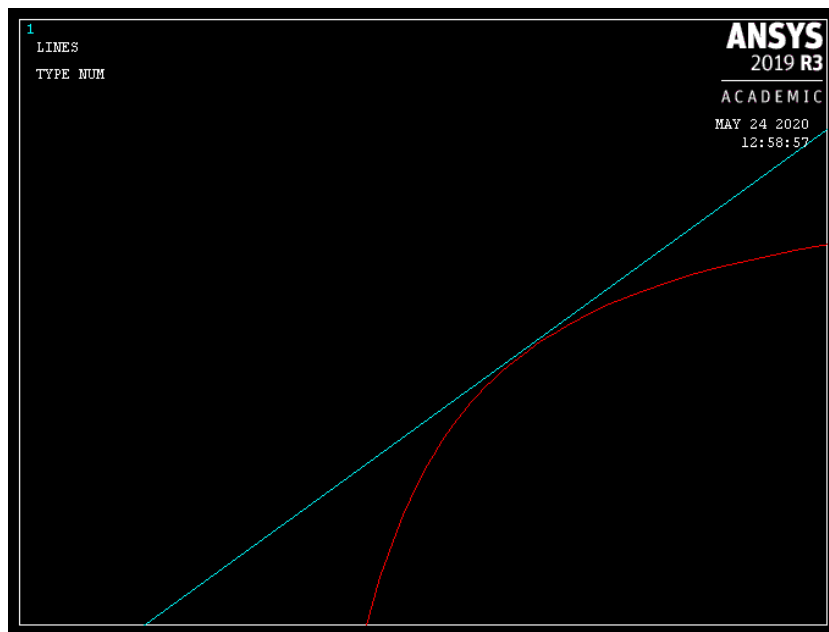


Figura 29. Ampliación 2 del diseño de partida en ANSYS.

5.2. DISEÑOS DE PARTIDA

5.2.1. DISEÑO DE PARTIDA DE 12 PUNTOS

Se vuelve a reproducir el diseño anterior sin la circunferencia y la recta auxiliar y se añaden los parámetros necesarios.

Primero se elige el tipo de problema, paso que ya ha sido introducido en el apartado 3.3. En “preferencias” se elige la opción de “structural” puesto que se trata de un estudio de cargas. En cuanto a los nodos: dentro de element type, se utilizará el “10 node 187” dentro de “solid”. Se ha escogido este tipo de elemento por sus características: se utiliza para diseños en 3D, con una interpolación cuadrática, con forma tetraédrica e ideal para mallas irregulares. Cada elemento tiene 10 nodos con tres grados de libertad cada uno (BUDAPEST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ECONOMICS, 2020).

Después, en “material props” se introducen las constantes: en “material models”, “structural”, “linear”, “elastic”, “isotropic”. En la pestaña que aparece como se muestra en la Fig. 30 se introduce el módulo de elasticidad (N/m^2) y el coeficiente de Poisson del acero (Ingemecánica, 2020).

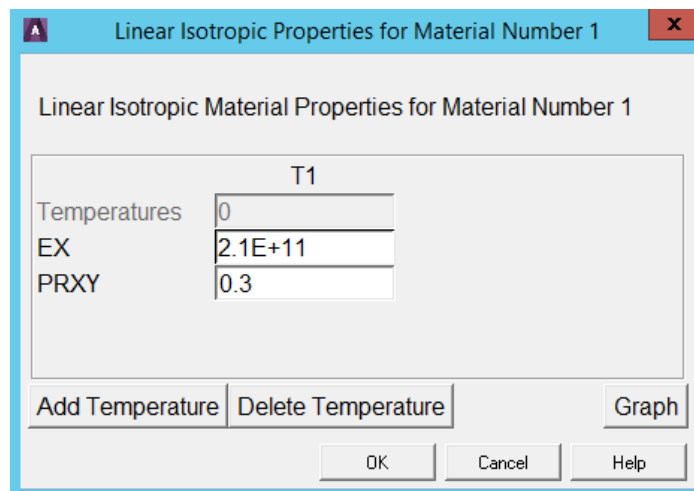


Figura 30. Propiedades acero en ANSYS.

Tomando como base los puntos de la Tabla 3, se van a añadir una serie de puntos que van a ser los que se irán modificando en las iteraciones.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Tabla 9. Coordenadas en metros del diseño de partida con 4 puntos auxiliares

Puntos	Coordenada en X	Coordenada en Y
1	0,85000	0,00000
2	0,10410	0,06760
3	0,09015	0,06400
4	0,09015	0,05205
5	0,10410	0,00000
6	0,09015	-0,05205
7	0,09015	-0,06400
8	0,10410	-0,06760
9	0,17500	0,06760
10	0,17500	-0,06760
11	0,60000	0,03000
12	0,60000	-0,03000

Para la mejor visualización de la posición de los puntos, se muestra en la Fig. 31 cómo quedarían:

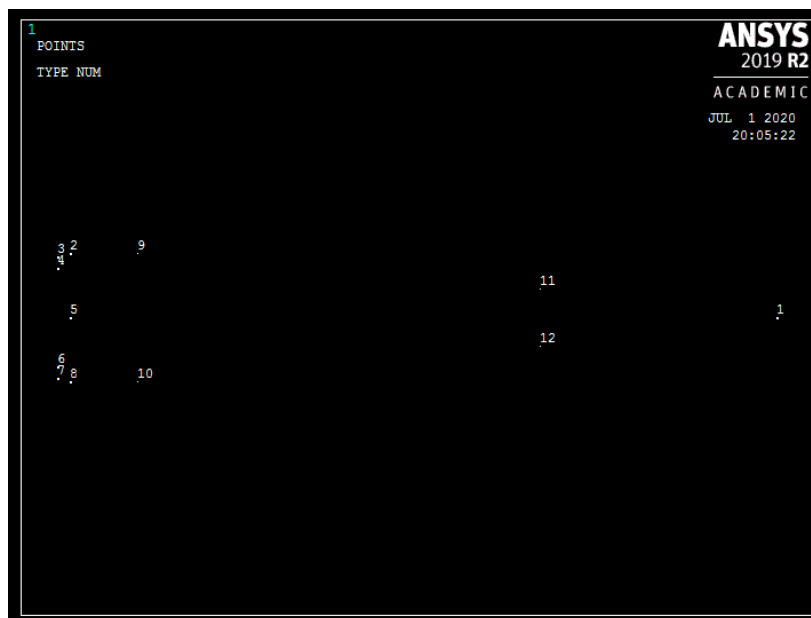


Figura 31. Localización de los 12 puntos de diseño en ANSYS.

Si se realizara un área completa uniendo todos estos puntos, a la hora de iterar en el programa de modeFRONTIER se encontraría que prácticamente todos los diseños dan error a excepción de unos pocos. Esto es debido a que el mallado en las zonas críticas se distorsiona de tal manera que el error de discretización se dispara.

Esto tiene una sencilla solución. En vez de crear una pala entera, se divide en tres zonas, cada una con sus líneas, y luego se unirán, como se muestra en la Fig. 32. Esto permite tener un mayor

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

control sobre el mallado, con lo que disminuirán este tipo de problemas asociados a la distorsión. Si no se crean líneas independientes (los mencionados splines, para ser exactos) no es posible crear áreas separadas.

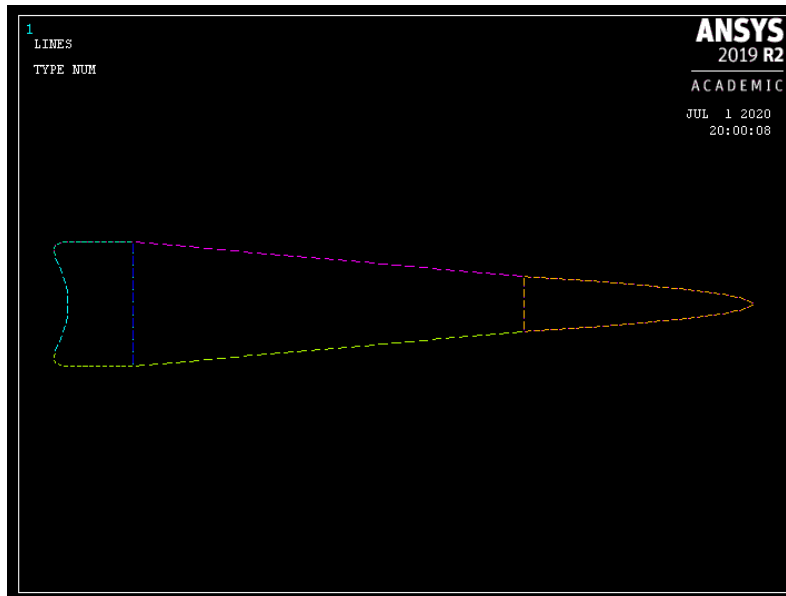


Figura 32. Diseño dividido del perfil de pala con 12 puntos en ANSYS.

Tras realizar las áreas, se puede extruir la superficie creada desde “modeling”, “operate”, “extrude”. Se extruirá 1 cm como se explicaba en el apartado 4.2.3., y ha de ser añadido, como siempre, en el sistema internacional (m), resultado que puede verse en la Fig. 33. En el mismo apartado en que se encuentra la opción de extruir, se encuentra la opción de “booleans” y “glue”. Esto permitirá unir las tres áreas individuales y crear una sola.

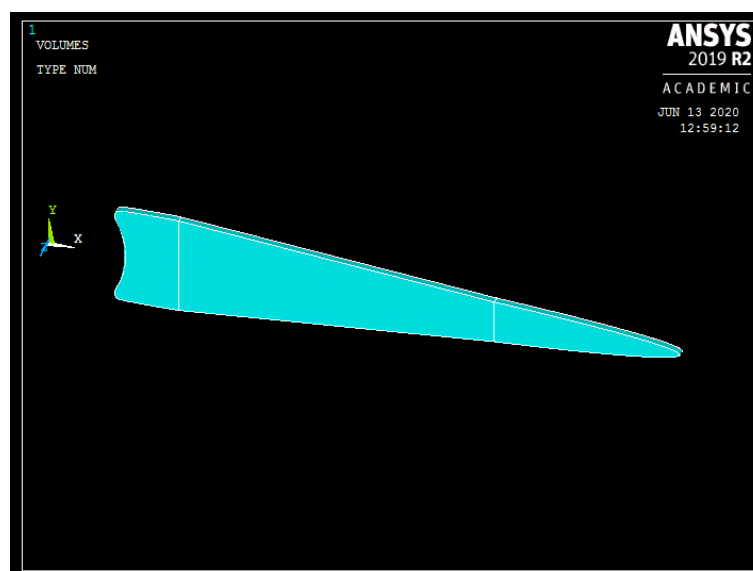


Figura 33. Volumen de la pala de diseño en ANSYS.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Lo siguiente es hacer la discretización que en el epígrafe 3.3 ha sido introducida. Solo es necesario seleccionar el “smart size” que se encuentra en la parte superior como indica la Fig. 34. Se decide esta forma de mallado para evitar así algunos problemas que pueden aparecer en las iteraciones si se fuerza un tipo concreto de tamaño. Como se pretende trabajar con volúmenes de tamaños diferentes a cada uno de ellos se le ajustará mejor un tipo de mallado. Tras eso, se selecciona cada elemento individualmente y se obtiene lo mostrado en la Fig. 35.

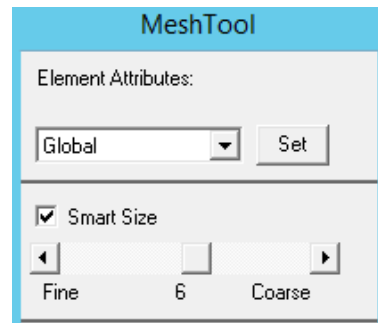


Figura 34. Condiciones del mallado de ANSYS.

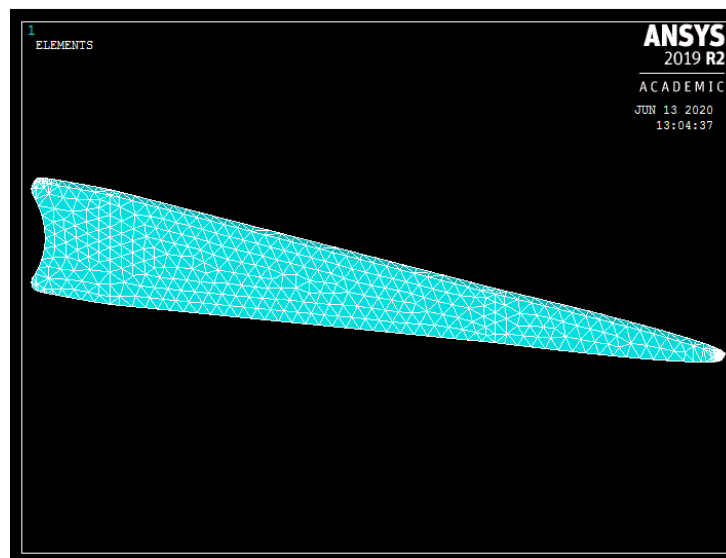


Figura 35. Diseño de partida final en ANSYS.

Con el diseño finalizado, se procede a introducir las condiciones de estudio.

Dentro del apartado de cargas se introducen las restricciones y las fuerzas mediante la opción de “apply”. La única restricción del caso se encuentra en el área empotrada en el rotor. Se selecciona y se aplican restricciones en todas las direcciones. La fuerza se aplica como presión homogénea en una de las caras de la pala. Por lo tanto, se han de seleccionar las áreas que se vayan a considerar la parte frontal y se introducen las cargas. A continuación, es necesario transferir as cargas como se ha explicado en el apartado 3.3. Ahora ya se tiene todo preparado

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

para la resolución. Se puede resolver este caso solo con pulsar “solve” y “current Is” dentro del apartado de “solution”.

Dentro del apartado de “general Postproc” se encuentran todo tipo de listados y representación de tensiones. Para el listado es necesario entrar en “list results” y “nodal solution”. Aparecerá una ventana como la mostrada en la Fig. 36 donde aparecen todos los tipos de listados que el programa calcula.

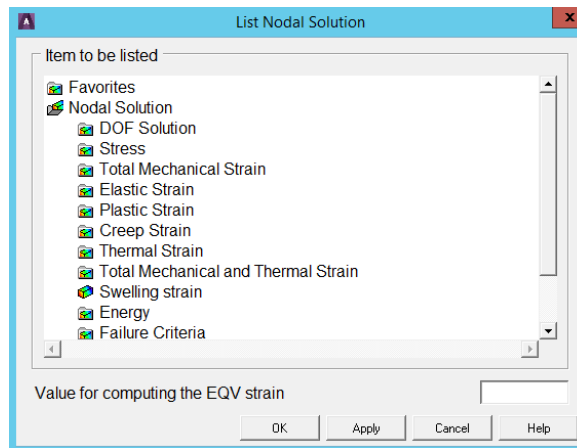
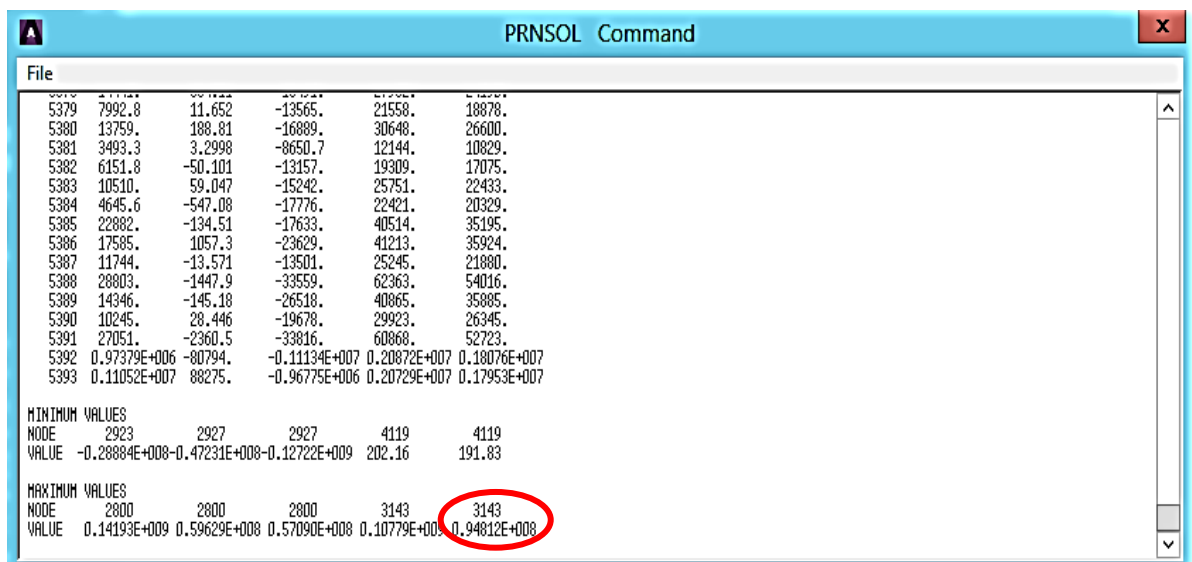


Figura 36. Lista de solución de nodos en ANSYS.

Lo que se busca en este estudio se encuentra en el apartado de “stress”, “von misses stress”. Tras pulsar “ok”, aparecerá una nueva ventana de lectura de texto donde muestra la situación de cada nodo. Al final de todo aparecen los valores máximos y mínimos y en qué nodo ocurren como presenta la Fig. 37. La columna que se encuentra más a la derecha corresponde con las tensiones equivalentes.



Node	1	2	3	4	5
5379	7992.8	11.652	-13565.	21558.	18878.
5380	13759.	188.81	-16889.	30648.	26600.
5381	3493.3	3.2998	-8650.7	12144.	10829.
5382	6151.8	-50.101	-13157.	19309.	17075.
5383	10510.	59.047	-15242.	25751.	22433.
5384	4645.6	-547.08	-17776.	22421.	20329.
5385	22882.	-134.51	-17633.	40514.	35195.
5386	17585.	1057.3	-23629.	41213.	35924.
5387	11744.	-13.571	-13501.	25245.	21880.
5388	28803.	-1447.9	-33559.	62363.	54016.
5389	14346.	-145.18	-26518.	40865.	35885.
5390	10245.	28.446	-19678.	29923.	26345.
5391	27051.	-2360.5	-33816.	60868.	52723.
5392	0.97379E+006	-80794.	-0.11134E+007	0.20872E+007	0.18076E+007
5393	0.11052E+007	88275.	-0.96775E+006	0.20729E+007	0.17953E+007
MINIMUM VALUES					
NODE	2923	2927	2927	4119	4119
VALUE	-0.28884E+008	-0.47231E+008	-0.12722E+009	202.16	191.83
MAXIMUM VALUES					
NODE	2800	2800	3143	3143	3143
VALUE	0.14193E+009	0.59629E+008	0.57090E+008	0.10779E+009	0.94812E+008

Figura 37. Listado tensiones en los nodos en ANSYS.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

El listado que se presenta en esta última figura es lo que el programa MATLAB ha de leer en búsqueda del máximo para cada iteración. El único valor que es relevante de todo el listado es el último que aparece (marcado en rojo en la Fig. 37).

5.2.2. DISEÑO DE PARTIDA DE 14 PUNTOS

Para la realización de los posteriores diseños, se plantean un par más de puntos aleatorios que van a poder ser modificados sin que se comprometa la funcionalidad del diseño.

Se toman estos nuevos puntos (13 y 14) como un lugar intermedio entre los otros puntos creados (del 9 al 12). Además, se creará un nuevo volumen cuando sea necesario emplear este caso, es decir, se partirá de cuatro distintos elementos que serán unidos en uno solo para evitar los problemas mencionados con anterioridad a causa de la discretización.

Tabla 10. Coordinadas en metros del diseño de partida con 6 puntos auxiliares

Puntos	Coordenada en X	Coordenada en Y
1	0,85000	0,00000
2	0,10410	0,06760
3	0,09015	0,06400
4	0,09015	0,05205
5	0,10410	0,00000
6	0,09015	-0,05205
7	0,09015	-0,06400
8	0,10410	-0,06760
9	0,17500	0,06760
10	0,17500	-0,06760
11	0,60000	0,03000
12	0,60000	-0,03000
13	0,40000	0,04000
14	0,40000	-0,04000

Como en el caso de los 12 puntos, para poder visualizar qué se está tratando es mejor mostrarlo de la forma que aparecerían en la ventana de ANSYS. Estos puntos se localizan en el plano de trabajo de la forma que presenta la Fig. 38:

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

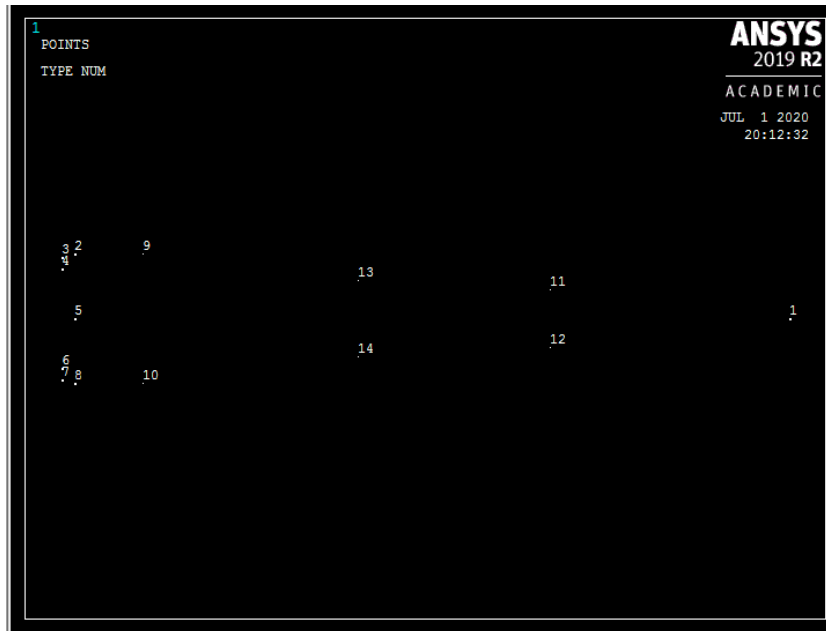


Figura 38. Localización de los 14 puntos de diseño en ANSYS.

Como se ha comentado previamente, estos puntos se unirán de tal forma que se crean cuatro divisiones de la pala, una más que en el estudio de 12 puntos. Y, como también se ha mencionado ya, a cada una le corresponderán unas curvas que la definen. Esto se puede observar en la Fig. 39.

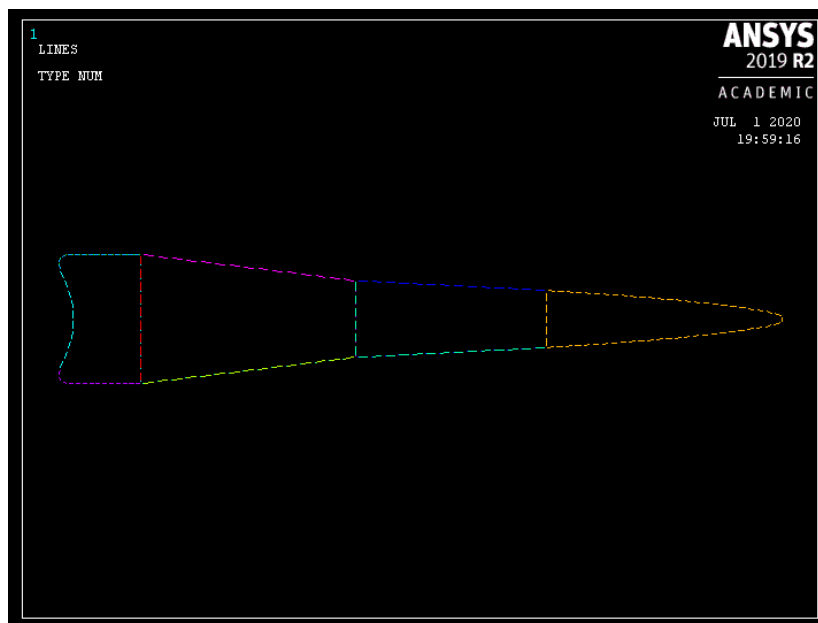


Figura 39. Diseño dividido del perfil de pala con 14 puntos en ANSYS.

5.3. ESTÁTICA

5.3.1. DISEÑO A ESTÁTICA CON CUATRO VARIABLES

Se toma como punto de partida el diseño de 12 puntos, es decir, los puntos de la Tabla 9, y se aplica la fuerza de 11.100 N. Se va a considerar en el primer caso de estática que solo los dos últimos de esta tabla pueden variar, el 11 y el 12. Ambos pueden moverse en vertical y horizontal, por lo que se obtienen, cuatro variables.

En el modeFRONTIER las variables se configurarán como muestra la Tabla 11:

Tabla 11. Valores de cuatro variables en estática.

PUNTO	V/H	VARIABLE	VALOR ORIGINAL	VALOR SUPERIOR	VALOR INFERIOR	PASO	BASE
11	H	A1	0,60	0,600	0,400	0,020	11
11	V	A2	0,03	0,030	0,015	0,003	6
12	H	A3	0,60	0,600	0,400	0,020	11
12	V	A4	-0,03	-0,015	-0,030	0,003	6

Tabla 12. Resultados con cuatro variables en estática.

ID	A1	A2	A3	A4	VOL.	RESTR.
669	0,40	0,015	0,40	-0,015	0,00038	40537000
266	0,40	0,018	0,40	-0,015	0,000392	44003000
451	0,40	0,015	0,40	-0,018	0,000392	43627000
1921	0,42	0,015	0,42	-0,015	0,000393	43740000
282	0,40	0,021	0,40	-0,015	0,000405	47571000

Tras la realización de los cálculos, se puede exportar a Excel y ordenar los datos por el volumen, donde se ha extraído la Tabla 12. Cada columna corresponde con lo siguiente: ID es el número de la iteración con una combinación única de variables, le siguen los valores que toman las variables, VOL. es el volumen de dicho modelo (m³) y finalmente RESTR. es la tensión equivalente máxima de Von Mises que detecta en el nodo crítico (N). Solo se han considerado los primeros cinco valores porque no son necesarios más para establecer una conclusión por ahora.

Las variables han tendido al valor mínimo del rango que se les ha proporcionado y han quedado muy lejos de la tensión límite. Se podría aumentar su rango, pero es innecesario si tenemos en cuenta lo dicho anteriormente, que puede soportar mucha más tensión. Esto quiere decir que

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

todavía se puede quitar mucho más material. Para eso, se añaden dos puntos más a estos cálculos.

Unos comentarios sobre los resultados: de los 1.667 casos estudiados, apenas el 20% de las combinaciones han sido satisfactorias. Esto es así a causa de que las variables horizontales (A1 y A3) se mueven mucho, creando mallados muy distorsionados entre ellos (cerca del 47%). El resto de los casos eran viables, pero superaban el límite de rotura (33%).

5.3.2. DISEÑO A ESTÁTICA CON OCHO VARIABLES

Para el caso de ocho variables no hay que olvidar modificar el MATLAB para las nuevas que van a ser introducidas. Además, es necesario introducir las cuatro variables en el modeFRONTIER y crear una nueva combinación de "doe".

Se tendrán en cuenta dos puntos más que, siguiendo con la tabla de 12 puntos, corresponden con los nombrados por 9 y 10. No se han modificado las características de los puntos 11 y 12 establecidas en la Tabla 11, pero se han introducido los siguientes parámetros para las nuevas variables:

Tabla 13. Valores de ocho variables en estática.

PUNTO	V/H	VARIABLE	VALOR ORIGINAL	VALOR SUPERIOR	VALOR INFERIOR	PASO	BASE
9	H	A5	0,1750	0,1500	0,3000	0,0150	11
9	V	A6	0,0676	0,0676	0,0400	0,0055	6
10	H	A7	0,1750	0,1500	0,3000	0,0150	11
10	V	A8	-0,0676	-0,0400	-0,0676	0,0055	6
11	H	A1	0,6000	0,6000	0,4000	0,0200	11
11	V	A2	0,0300	0,0300	0,0150	0,0030	6
12	H	A3	0,6000	0,6000	0,4000	0,0200	11
12	V	A4	-0,0300	-0,0150	-0,0300	0,0030	6

Tabla 14. Resultados con ocho variables en estática.

ID	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	VOL.	RESTR.
2659	0,40	0,015	0,40	-0,015	0,150	0,040	0,150	-0,04	2,87E-04	5,53E+07
2999	0,40	0,015	0,40	-0,015	0,165	0,040	0,150	-0,04	2,92E-04	5,28E+07
3664	0,40	0,015	0,40	-0,015	0,150	0,040	0,165	-0,04	2,92E-04	5,28E+07
4385	0,42	0,015	0,42	-0,015	0,150	0,040	0,150	-0,04	2,94E-04	5,73E+07
2957	0,40	0,015	0,40	-0,015	0,150	0,046	0,150	-0,04	2,95E-04	5,37E+07

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Tras realizar los cálculos y ordenarlos por menor volumen, se obtiene la Tabla 14. De forma similar al caso anterior, las variables han tendido a su menor valor del rango y la tensión, aunque más elevada que antes, aún podemos observar que puede aumentar algo hasta los 6E+07. Por lo tanto, como en el caso anterior, se decide añadir más variables buscando no solo disminuir el área sino aumentar las tensiones para un rendimiento máximo del volumen.

Si se observan los resultados, al igual que en el caso anterior hay un elevado porcentaje de casos que han dado error. De los 9.091 diseños evaluados el 57,5% entran en esa primera categoría debido a lo explicado en el caso anterior, las componentes horizontales. El porcentaje de casos viables ha disminuido un poco, a 19,5%, y el 23% restante supera las tensiones límites.

5.3.3. DISEÑO A ESTÁTICA CON NUEVE VARIABLES

Como en los anteriores cálculos se ha encontrado un número muy elevado de casos que dan error y ahora estaríamos añadiendo cuatro variables más, es poco útil seguir desperdiciando tiempo y memoria en cálculos que se sabe que van a fallar. La solución más sencilla es que los puntos simétricos tomen la misma componente horizontal pero que sigan pudiendo moverse independientemente sobre sus coordenadas verticales. Por lo tanto, por cada par de puntos se obtienen tres variables, una horizontal y dos verticales. En este caso se van a introducir los puntos 13 y 14 de la Tabla 10 con lo que se crea la siguiente lista de parámetros:

Tabla 15. Valores de nueve variables en estática, primera aproximación.

PUNTO	V/H	VARIABLE	VALOR ORIGINAL	VALOR SUPERIOR	VALOR INFERIOR	PASO	BASE
9	H	A4	0,1750	0,3000	0,1500	0,0150	11
9	V	A5	0,0676	0,0676	0,0400	0,0055	6
10	V	A6	-0,0676	-0,0400	-0,0676	0,0055	6
11	H	A1	0,6000	0,6000	0,5000	0,0100	11
11	V	A2	0,0300	0,0300	0,0150	0,0030	6
12	V	A3	-0,0300	-0,0150	-0,0300	0,0030	6
13	H	A7	0,4000	0,4500	0,3500	0,0200	11
13	V	A8	0,0400	0,0400	0,0200	0,0020	11
14	V	A9	-0,0400	-0,0200	-0,0400	0,0020	11

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
 MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Tabla 16. Resultados con nueve variables en estática, primera aproximación.

ID	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	VOL.	RESTR.
6031	0,5	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,02	-0,02	3,03E-04	6,23E+07
7055	0,51	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,02	-0,02	3,04E-04	6,30E+07
7270	0,52	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,02	-0,02	3,06E-04	6,37E+07
7631	0,5	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,022	-0,02	3,06E-04	6,33E+07
8194	0,5	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,02	-0,022	3,06E-04	6,30E+07
12146	0,53	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,02	-0,02	3,07E-04	6,40E+07
5223	0,5	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,37	0,02	-0,02	3,08E-04	6,35E+07
11516	0,51	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,022	-0,02	3,08E-04	6,40E+07
10404	0,54	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,02	-0,02	3,09E-04	6,52E+07
29244	0,51	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,37	0,02	-0,02	3,09E-04	6,42E+07
5243	0,5	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,0455	0,35	0,02	-0,02	3,09E-04	5,99E+07
5382	0,5	0,015	-0,015	0,15	0,0455	-0,04	0,35	0,02	-0,02	3,09E-04	5,98E+07
7989	0,52	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,022	-0,02	3,10E-04	6,48E+07
6541	0,5	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,024	-0,02	3,10E-04	6,39E+07
8857	0,5	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,022	-0,022	3,10E-04	6,41E+07

Tras resolver este caso se obtiene esta última tabla. Todos los resultados resaltados en amarillo son aquellos que superan la tensión límite, por lo que de entre los primeros quince diseños con menos área, solo dos cumplen con los requisitos. En este caso se puede observar que ya se ronda un diseño óptimo para las condiciones buscadas, minimizar el área y aumentar las tensiones que soportar.

Es notorio que las variables se hallan muy cerca del valor deseado. Por lo tanto, sería interesante estudiar de nuevo este caso, pero con unos rangos un poco inferiores y pasos más ajustados para ver su comportamiento alrededor de este primer punto que viable.

No es posible disminuir más las variables buscando un mínimo inferior y tomar este como un mínimo local más puesto que si los valores de las variables verticales disminuyen más, muchos de los casos llevan a error por el estrecho volumen que es creado en el centro de la pala, sobre el eje x.

Además, queda claro viendo la última tabla, que, en los casos estudiados anteriormente con menos variables, era innecesario volver a calcular con diferentes parámetros puesto que se hallaban lejos de un óptimo claro.

Los nuevos valores que toman las variables son los siguientes:

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Tabla 17. Valores de nueve variables en estática, segunda aproximación.

PUNTO	V/H	VARIABLE	VALOR ORIGINAL	VALOR ANTERIOR	VALOR SUPERIOR	VALOR INFERIOR	PASO	BASE
9	H	A4	0,1750	0,1500	0,1600	0,1500	0,00500	3
9	V	A5	0,0676	0,0400	0,0460	0,0400	0,00200	3
10	V	A6	-0,0676	-0,0455	-0,0400	-0,0460	0,00200	3
11	H	A1	0,6000	0,5000	0,5200	0,5000	0,00400	6
11	V	A2	0,0300	0,0150	0,0175	0,0150	0,00125	3
12	V	A3	-0,0300	-0,0150	-0,0150	-0,0175	0,00125	3
13	H	A7	0,4000	0,0350	0,3750	0,3500	0,01250	3
13	V	A8	0,0400	0,0200	0,0240	0,0200	0,00020	11
14	V	A9	-0,0400	-0,0200	-0,0200	-0,0240	0,00020	11

Tabla 18. Resultados con nueve variables en estática, segunda aproximación.

Id	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	VOL.	RESTR.
1637	0,5	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,02	-0,02	3,03E-04	6,23E+07
2682	0,504	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,02	-0,02	3,03E-04	6,26E+07
2029	0,508	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,02	-0,02	3,04E-04	6,29E+07
24063	0,512	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,02	-0,02	3,05E-04	6,32E+07
4590	0,516	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,02	-0,02	3,05E-04	6,32E+07
1283	0,5	0,015	-0,015	0,155	0,04	-0,04	0,35	0,02	-0,02	3,05E-04	5,95E+07
14643	0,52	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,02	-0,02	3,06E-04	6,37E+07
2570	0,504	0,015	-0,015	0,155	0,04	-0,04	0,35	0,02	-0,02	3,06E-04	5,98E+07
3130	0,5	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,3625	0,02	-0,02	3,06E-04	6,33E+07
3841	0,5	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,02	-0,022	3,06E-04	6,30E+07

En la Tabla 18 se pueden observar los primeros diez diseños ordenados por menor área como en los casos anteriores. Cerca del 70 % no eran viables puesto que superaban el límite de rotura, dato esperado al estar tan cerca del límite.

De nuevo, remarcar la idea de que no es posible disminuir más estos valores por los errores de discretización, es por esto por lo que el primer modelo que cumple con las condiciones anteriores se considera el óptimo. Este punto corresponde con las coordenadas que se presentan en la siguiente tabla:

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Tabla 19. Coordenadas en metros del diseño óptimo del acero.

Puntos	Coordenada en X	Coordenada en Y
1	0,85000	0,00000
2	0,10410	0,06760
3	0,09015	0,06400
4	0,09015	0,05205
5	0,10410	0,00000
6	0,09015	-0,05205
7	0,09015	-0,06400
8	0,10410	-0,06760
9	0,15500	0,04000
10	0,15500	-0,04000
11	0,50000	0,01500
12	0,50000	-0,01500
13	0,35000	0,02000
14	0,35000	-0,02000

Ahora se procede a estudiar el mismo caso a fatiga para ver si el resultado que se obtiene es más exigente que este.

5.4. FATIGA

5.4.1. CONFIGURACIÓN DE ANSYS PARA FATIGA

El modelado de la pala en ANSYS necesita una configuración diferente que el caso a estática. Las cargas se han de introducir de forma distinta y realizar la posterior lectura de los datos de una forma específica.

Hay que realizar dos archivos con las cargas para cada caso: uno con las del caso medias y otro con las alternantes.

Tras aplicar las cargas medias y hacer la transferencia a los nodos, se ha de crear el primer archivo. Para crear el archivo con la carga hay que entrar en “load step opts” y “write ls file” como muestra la Fig. 40 y, tras pulsar este, aparecerá una ventana que corresponde con la Fig. 41. En ella es necesario nombrar numéricamente el caso de carga.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

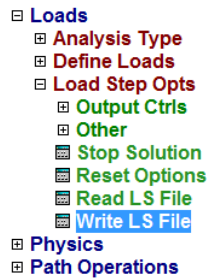


Figura 40. Ruta para la creación de los archivos de cargas en ANSYS.

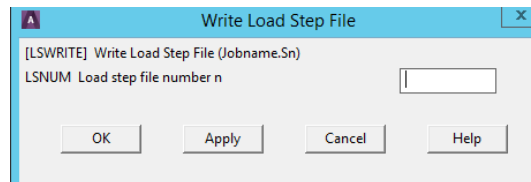


Figura 41. Creación de los archivos de cargas en ANSYS.

Tras haber creado este primer archivo habría que cambiar las cargas medias por las alternantes y crear otro estado con su nombre propio. En este estudio tiene la misma carga media y alternante por lo que no hace falta modificar las cargas, simplemente se crea otro archivo de carga con diferente nomenclatura numérica. Por ejemplo, los archivos se van a llamar 1 y 2 respectivamente.

Tras crear los dos archivos hay que pasar a resolver. En los casos anteriores, era suficiente con resolver desde "solve" y "current ls", pero para este caso es necesario combinar dos cargas y eso se puede hacer desde la otra opción de "solve", "from ls files". Se abrirá una ventana como la mostrada en la Fig. 42. Se introduce el número de los archivos creados, en la parte superior el que corresponde con las tensiones medias y en el segundo la alternante.

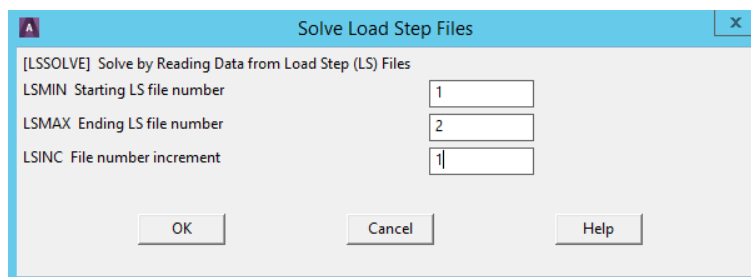


Figura 42. Resolución con combinación de cargas en ANSYS.

Tras la resolución de los cálculos, hay que introducir una serie de pasos en la barra de comandos en la parte superior de la ventana. Estos pasos son necesarios para obtener las tensiones equivalentes. También se podrían configurar desde "load case", dentro de "general postproc", pero es más visual hacerlo de esta forma. Los comandos que han de introducirse son:

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

- LCZERO
Este comando borra los resultados de la memoria
- LCDEF,1,1,,
Establece el primer caso como el de cargas medias.
- LCDEF,2,2,,
Establece el segundo caso como el de cargas alternantes.
- LCFACT,2,1.61227,
Aplica el coeficiente obtenido con la operación S_y/S_e que en este estudio se ha obtenido en el apartado 6.2.2.3.
- LCASE,1,
Carga los resultados del caso "1", el de las cargas medias.
- LCOPER,ADD,2,,,
Aplica los resultados conjuntos de las cargas media y alternantes, incluido el factor establecido dos pasos atrás.
- LCWRITE,1,'fatiga'
Se guarda un archivo con el nombre definido entre las comillas y la extensión ".I01".

Finalizado el archivo del diseño de pala ya es posible hacer el estudio de manera análoga al caso de estática.

Como se ha encontrado mediante los cálculos previos que el mínimo de puntos necesarios era el de 14, con 6 de ellos variables, se parte de estos valores para comparar el área resultante de este caso y el de estática.

5.4.2. DISEÑO A ESTÁTICA CON NUEVE VARIABLES

Se introducen las mismas variables con las mismas características que el estudio que se presenta en la Tabla 15 (el primero de 9 variables en estática) para comparar entre ellos. Se seleccionan solo los primeros cinco casos para comparar.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Tabla 20. Resultados con nueve variables en dinámica

Id	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	VOL.	REST.
3445	0,5	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,02	-0,02	3,03E-04	1,68E07
2310	0,51	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,02	-0,02	3,04E-04	1,70E07
5788	0,52	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,02	-0,02	3,06E-04	1,72E07
5438	0,5	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,022	-0,02	3,06E-04	1,70E07
3114	0,5	0,015	-0,015	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,02	-0,022	3,06E-04	1,71E07

De los resultados que muestra la Tabla 20 se puede obtener la siguiente conclusión: todos los diseños quedan muy por debajo del límite de rotura, por lo tanto, se considera más restrictivo el caso de estática y será el elegido para el diseño óptimo del acero.

5.5. DISEÑO ÓPTIMO DEL ACERO

Si introducimos el diseño óptimo en ANSYS y mostramos en el elemento las tensiones de Von Mises, obtenemos el siguiente diseño. Podemos ver que debido a que los splines son independientes entre ellos se han creado concentradores de tensiones cerca de la base de la pala y es ahí donde se localiza el máximo de tensión como se observa en la Fig. 43.

Es recomendable deshacerse de estos puntos críticos puesto que se trata de un punto concreto muy débil de la pala que puede llevarla al fallo crítico. Además, desde el punto de vista de fabricación, ese punto acumularía tensiones que podrían estar también envueltas en el fallo de la pala.

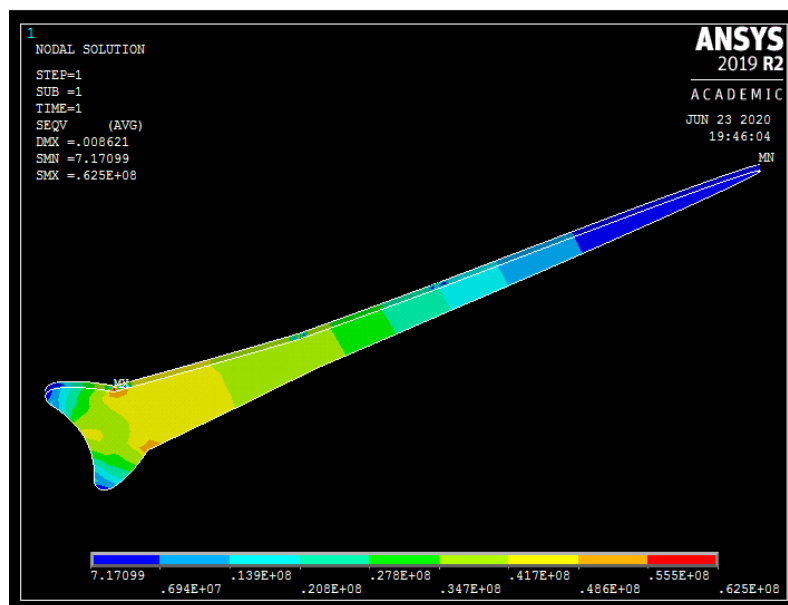


Figura 43. Representación de las tensiones de Von Mises en ANSYS para el óptimo del acero.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

NODE	S1	S2	S3	SINT	SEQV
MINIMUM VALUES					
NODE	90	90	92	8680	8680
VALUE	-0.24937E+008	-0.25651E+008	-0.61210E+008	8.3797	7.4176
MAXIMUM VALUES					
NODE	1	29	29	1	1
VALUE	0.60722E+008	0.24498E+008	0.21263E+008	0.60558E+008	0.59499E+008

Figura 44. Ampliación del listado tensiones de Von Mises en ANSYS para el óptimo del acero.

Si se muestran por pantalla las tensiones de Von Mises se puede ver al final de la lista que muestra la Fig. 44 que coincide con el número correspondiente con el obtenido en la Tabla 18.

Con el objetivo de eliminar la entalla, se procese a unir los splines creando solo dos áreas. En el diseño original, solo dos puntos eran unidos mediante splines por lo que sus formas, al ser independientes, pueden ser un poco abruptas teniendo en cuenta la totalidad del diseño. Si se crean menos splines uniendo más puntos, la forma del conjunto queda algo más suavizada. Es conveniente remarcar que esto no era posible hacerlo durante la optimización porque causaba errores en el mallado por la discretización.

Si se procede esta forma descrita, se obtiene la Fig. 45:

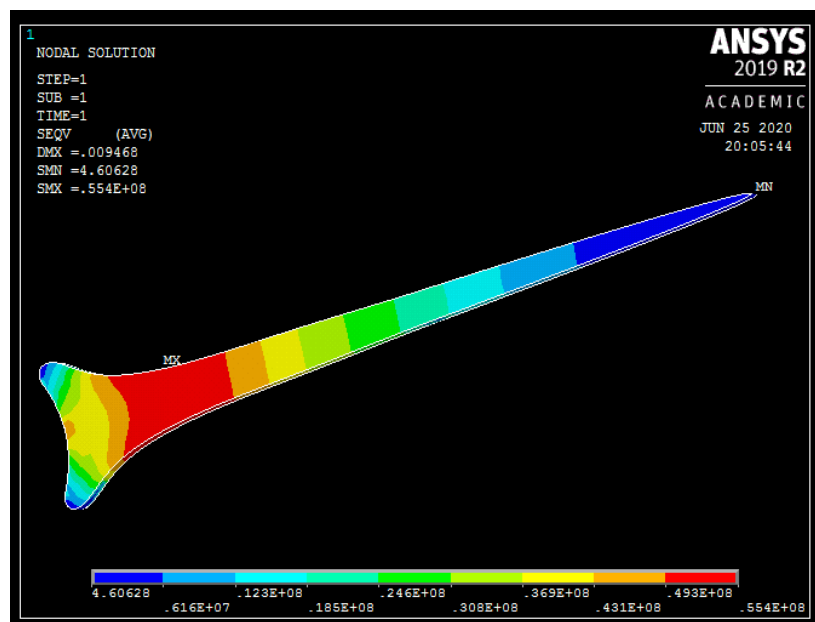


Figura 45. Representación de las tensiones de Von Mises en ANSYS del diseño óptimo modificado.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

MINIMUM VALUES					
NODE	188	190	188	2396	2396
VALUE	-0.25201E+008	-0.26287E+008	-0.61883E+008	5.4304	5.0363
MAXIMUM VALUES					
NODE	18	18	14	235	138
VALUE	0.57820E+008	0.22903E+008	0.18505E+008	0.55256E+008	0.55077E+008

Figura 46. Ampliación del listado tensiones de Von Mises en ANSYS para el óptimo del acero modificado.

Es importante comprobar que tras la modificación se sigue cumpliendo la restricción de la tensión. Al igual que antes, se puede observar al final del listado de tensiones de Von Mises, mostrado en la Fig. 46., que la tensión equivalente máxima es inferior a los 60 MPa.

Como el área ha variado levemente debido a la diferente forma de unirse los puntos es necesario comprobarla de nuevo, puesto que no será exactamente la que se mostraba en la Tabla 18. Este perfil corresponde, pues, con un área de $2,85 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, que es incluso menor que la proporcionada por los cálculos.

La densidad del acero es de 7.800 kg/m^3 (Didáctica, 2020), así que si se multiplica por el volumen se obtiene la masa requerida para la construcción de una pala. Este cálculo es necesario para poder realizar el presupuesto. Se obtiene que la masa de acero es de 2,223 kg.

5.6. ALUMINIO

Para el estudio del aluminio es necesario cambiar varios datos que eran propios del acero: las propiedades del material (ANSYS) los valores del módulo elástico y el coeficiente de Poisson son $7,17 \times 10^{10}$ y 0,34 respectivamente (Ingemecánica, 2020). El límite de rotura (modeFRONTIER) corresponde con 10 MPa como se ha mencionado en apartado 4.3.2., pero aplicando el mismo coeficiente de seguridad, (1,25), se obtienen 8 MPa.

Se realiza el estudio con las variables y rangos establecidos en la Tabla 17. Con esto obtendríamos los siguientes valores ordenados por el volumen.

Tabla 21. Resultados con nueve variables del aluminio.

Id	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	VOL.	RESTR.
5293	0,6	0,02	-0,02	0,2	0,03	-0,03	0,45	0,02	-0,02	3,58E-04	8,83E+07
5271	0,6	0,02	-0,02	0,2	0,03	-0,03	0,47	0,02	-0,02	3,60E-04	8,78E+07
4293	0,6	0,02	-0,02	0,2	0,03	-0,036	0,45	0,02	-0,02	3,69E-04	8,23E+07
5893	0,6	0,02	-0,02	0,2	0,036	-0,03	0,45	0,02	-0,02	3,69E-04	8,27E+07
6236	0,6	0,02	-0,02	0,2	0,036	-0,03	0,47	0,02	-0,02	3,71E-04	8,30E+07

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Estos primeros cinco resultados muestran como las restricciones están muy por encima del límite ($6E+06$) y, de hecho, ningún valor de los más de 8.000 casos que se han llegado a estudiar tiene un orden menor de 10^7 .

No es posible, por lo tanto, establecer un área con el mismo espesor que el acero porque no hay suficiente volumen para resistir con sus condiciones. Se procede, pues, a realizar los cálculos variando no solo la posición de los puntos, sino del espesor. Las variables serían las siguientes:

Tabla 22. Valores de nueve variables en estática, aluminio, primera aproximación.<

PUNTO	V/H	VARIABLE	VALOR ORIGINAL	VALOR SUPERIOR	VALOR INFERIOR	PASO	BASE
9	H	A4	0,1750	0,30	0,15	0,030	6
9	V	A5	0,0676	0,07	0,04	0,006	6
10	V	A6	-0,0676	-0,04	-0,07	0,006	6
11	H	A1	0,6000	0,70	0,55	0,003	6
11	V	A2	0,0300	0,03	0,01	0,004	6
12	V	A3	-0,0300	-0,01	-0,03	0,004	6
13	H	A7	0,4000	0,50	0,35	0,030	6
13	V	A8	0,0400	0,04	0,02	0,004	6
14	V	A9	-0,0400	-0,02	-0,04	0,004	6
Espesor	-	Esp.	0,0100	0,10	0,01	0,009	12

Se ordenan los resultados por volúmenes y lo primero que se puede observar es que la primera combinación de variables está lejos del primero de ellos. No es hasta la posición 525 con menor volumen que se encuentra la primera combinación que cumple. En las Tablas 23 y 24 se puede observar este caso y los que se hallan a su alrededor.

Tabla 23. Resultados con diez variables del aluminio, primera parte.

Id	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	Esp.
4674	0,55	0,01	-0,018	0,15	0,052	-0,058	0,41	0,032	-0,036	0,019
8130	0,58	0,01	-0,01	0,15	0,04	-0,04	0,35	0,02	-0,02	0,028
4954	0,58	0,01	-0,01	0,18	0,04	-0,07	0,47	0,028	-0,028	0,019
4649	0,61	0,03	-0,01	0,3	0,04	-0,04	0,35	0,02	-0,02	0,019
1222	0,67	0,018	-0,01	0,18	0,052	-0,058	0,35	0,036	-0,024	0,019

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Tabla 24. Resultados con diez variables del aluminio, segunda parte.

Id	VOL.	RESTR.
4674	8,00E-04	1,47E+07
8130	8,01E-04	5,93E+06
4954	8,03E-04	1,38E+07
4649	8,03E-04	1,81E+07
1222	8,03E-04	1,52E+07

Se pueden encontrar más soluciones viables treinta casos después de este primer válido con el mismo espesor. Además, ningún caso de 1 y 1,9 cm de esta variable cumple, mientras que la mayoría de 2,8 sí lo hace.

Por otra parte, no hay muchos casos que muestren resultados con error. A penas un 3% de ellos han fallado y presentaban espesores cercanos al límite superior, a los 10 cm, por lo que no comprometen el análisis del resultado.

Se decide, por tanto, que la combinación mostrada anteriormente en las Tablas 23 y 24 es la óptima del aluminio. Si se compara este resultado con el caso del acero, los puntos que han resultado son similares entre ellos. Solo dos variables han sido modificadas ligeramente respecto a aquel caso.

En la siguiente tabla se muestra cómo quedarían los puntos y el espesor:

Tabla 25. Coordenadas del diseño óptimo del aluminio.

Puntos	Coordenada en X	Coordenada en Y
1	0,85000	0,00000
2	0,10410	0,06760
3	0,09015	0,06400
4	0,09015	0,05205
5	0,10410	0,00000
6	0,09015	-0,05205
7	0,09015	-0,06400
8	0,10410	-0,06760
9	0,15000	0,04000
10	0,15000	-0,04000
11	0,58000	0,01000
12	0,58000	-0,01000
13	0,35000	0,02000
14	0,35000	-0,02000
Espesor	0,02800	

5.6.1. DISEÑO ÓPTIMO DEL ALUMINIO

Si los puntos del óptimo son introducidos en ANSYS, se obtiene el siguiente diseño con las tensiones de Von Mises, representado en la Fig. 47, y el listado de ellas, mostrado en la Fig. 48.

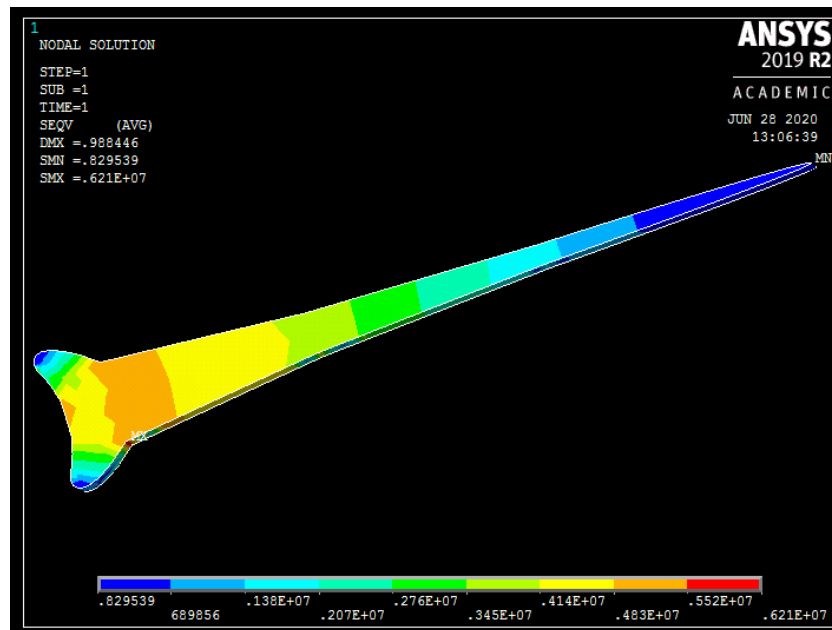


Figura 47. Representación de las tensiones de Von Mises en ANSYS para el óptimo del aluminio.

```
MINIMUM VALUES  
NODE      14      14      3      1580      1580  
VALUE -0.17860E+007 -0.25759E+007 -0.61863E+007 0.89695 0.85373  
  
MAXIMUM VALUES  
NODE      70      70      70      3      3  
VALUE 0.62550E+007 0.27124E+007 0.18543E+007 0.60710E+007 0.59260E+007
```

Figura 48. Ampliación del listado tensiones de Von Mises en ANSYS para el óptimo del aluminio.

Se han creado unos concentradores de tensiones al igual que en el caso del acero, y es ahí donde se localizan los máximos, visibles en la anterior Fig. 47. La tensión que marca el listado de ANSYS en la Fig. 48 se puede comprobar que coincide con la que se encontró en el estudio con modeFRONTIER.

De la misma forma que el estudio del óptimo del anterior material se ha modificado levemente para poder mejorar su forma y eliminar los concentradores de tensiones.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Es preferible deshacerse del punto donde se encuentra la máxima tensión, por lo que se plantea otro modelo con menor número de splines. Se trata de los mismos puntos que ha calculado el programa, pero creando solo dos volúmenes en vez de cuatro, de forma que el spline que une los puntos quedará creando uniones más suavizadas.

Procediendo de esta forma, se obtiene en la Fig. 49 este nuevo diseño que ya no posee concentradores localizados en un punto, sino en una zona más amplia:

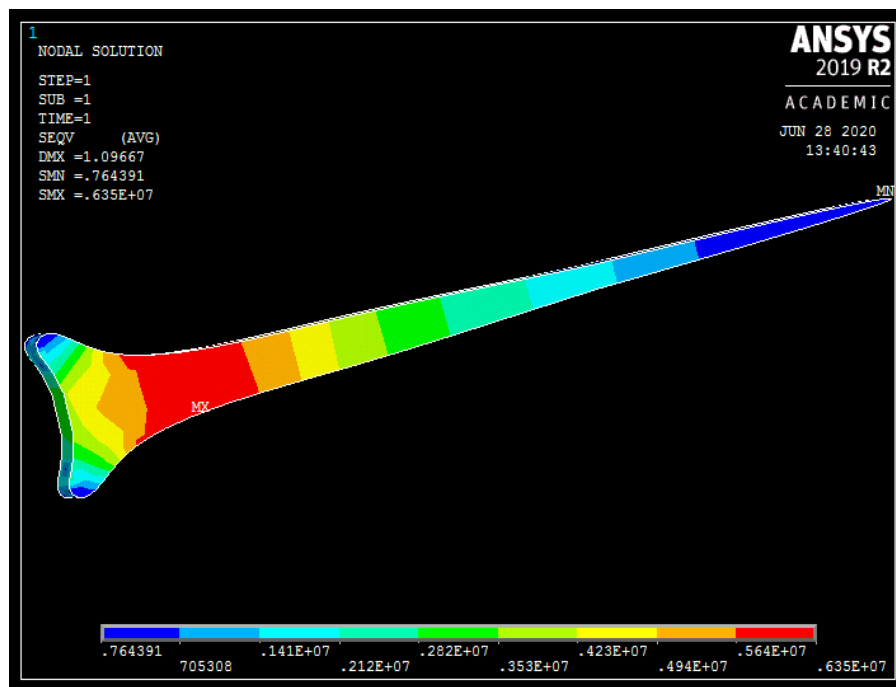


Figura 49. Representación de las tensiones de Von Mises en ANSYS para el óptimo modificado del aluminio.

MINIMUM VALUES					
NODE	171831	171831	171874	25092	25092
VALUE	-0.16112E+007	-0.24647E+007	-0.63196E+007	0.87543	0.76439

MAXIMUM VALUES					
NODE	172009	171968	171968	172009	172009
VALUE	0.63301E+007	0.27518E+007	0.22842E+007	0.63771E+007	0.63395E+007

Figura 50. Ampliación del listado tensiones de Von Mises en ANSYS para el óptimo modificado del aluminio.

En la Fig. 50 se puede observar que la tensión máxima equivalente es de $6,3395 \times 10^6$, por lo que ha aumentado un poco respecto a la anterior (visible en la Fig. 48). Este incremento no supone un problema para el diseño puesto que es menor que el límite que se había establecido de 8 MPa.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Su volumen también ha variado levemente. Como ha pasado con el acero, ha disminuido un poco hasta $7,73 \times 10^{-4} \text{ m}^3$.

Teniendo todo lo anteriormente mencionado en cuenta, se establece que este es el diseño óptimo final del aluminio.

Por último, se calcula la masa de una pala con este diseño. La densidad del aluminio es de 2.700 kg/m^3 (Didáctica, 2020), así que multiplicando este valor por el del volumen, la masa de la pala es de 2,0871 kg.

6. CONCLUSIONES

Se ha logrado conseguir el objetivo del proyecto, puesto que era encontrar un diseño óptimo que maximizara las tensiones con el menor volumen posible, y se han encontrado dos perfiles óptimos para los materiales seleccionados, acero y aluminio. Estos dos diseños han sido establecidos mediante el ensayo de carga estática y unas cargas máximas establecidas por una hipótesis de la norma.

En cuanto a los elementos diseñados, se puede ver claramente que los dos guardan cierto parecido. Los puntos que debían variar para alcanzar el máximo han tendido prácticamente a los mismos valores. Esto no hubiera sido posible si no fuera porque al aluminio se le ha incrementado el espesor, ya que no era capaz de soportar las mismas cargas con tan poco volumen.

El volumen que se obtiene mediante el estudio del aluminio es casi tres veces mayor que el de acero. Por el contrario, el acero es mucho más pesado por lo que no es posible establecer a simple vista cuál de los dos va a ser el mejor diseño. Es necesario comparar sus masas y luego sus precios.

Se ha calculado previamente en los apartados de cada estudio de diseño óptimo, la masa correspondiente. Para el acero se obtiene una cantidad de 2,223 kg mientras que para la del aluminio es de 2,0871 kg.

Se puede comprobar que, en términos de masa, los dos elementos tienen valores similares, quedando el acero un poco por encima del caso del otro. Ahora es necesario comprobar con sus precios cuál de las dos palas va a ser la más económica. Como se puede observar más adelante en el presupuesto, el acero es mucho más caro, así que es preferible la pala de aluminio frente a la otra.

Para seguir estudiando la forma del perfil de pala, sería necesario realizar algún proceso de iteración más con materiales distintos. Esto permitiría comprobar que la forma que se obtiene es un factor común entre los diseños y que, por lo tanto, el único valor necesario a modificar en casos posteriores sería el del espesor.

Por otra parte, la realización de este proyecto ha permitido establecer una serie de pasos a seguir para realizar el mismo estudio con otros materiales, el mismo planteado en las páginas anteriores, pero con diferentes estados de carga o hipótesis, u otros diseños que tengan unas circunstancias similares para su optimización.

7. PRESUPUESTO

7.1. PRESUPUESTO DEL ESTUDIO

El primer presupuesto, que corresponde con la dedicación al estudio del diseño, cuenta con una serie de elementos separados por categorías. A continuación, se presentan dichos elementos con sus respectivas definiciones:

A. RECURSOS HUMANOS

- Ingeniero: licenciado con los conocimientos necesarios para la realización de dicho estudio encargado de realizar todo el proyecto.

B. RECURSOS FÍSICOS

- Equipo informático: ordenador de gama media-alta para la ejecución de programas complejos de diseño y cálculo.
- UNE-EN 61400-23: Norma española de diciembre de 2014 con el título de: "Aerogeneradores, parte 23: ensayos estructurales de palas a escala real".
- UNE-EN 61400-2: Norma española de marzo de 2015 con el título de: "Aerogeneradores, parte 2: aerogeneradores pequeños".

C. RECURSOS INFORMÁTICOS

- WINDOWS 10 de uso personal: sistema operativo necesario para la redacción de informes y manejo de datos.
- MATLAB: programa matemático que presenta un lenguaje propio de la informática que permitirá el enlace de ANSYS y modeFRONTIER.
- ANSYS: programa de diseño y cálculo necesario para el desarrollo de la pala.
- modeFRONTIER: programa de optimización que posee algoritmo genético para la búsqueda del mejor diseño.
- INVENTOR: programa de diseño necesario para la creación de los planos al final del proyecto.

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Tabla 26. Presupuesto recursos humanos del estudio del diseño.

CAPÍTULO 1					
RECURSOS HUMANOS					
Código	Ud.	Descripción	Precio	Cantidad	Importe
A01	h	Ingeniero	300,000	15,00	4.500,00€
1					4.500,00€

Tabla 27. Presupuesto recursos físicos del estudio del diseño.

CAPÍTULO 2					
RECURSOS FÍSICOS					
Código	Ud.	Descripción	Precio	Cantidad	Importe
B01	Ud.	Equipo informático	700,000	1,00	700,00€
B02	Ud.	UNE-EN 61400-23	72,00	1,00	72,00€
B03	Ud.	UNE-EN 61400-2	140,00	1,00	140,00€
2					912,00€

Tabla 28. Presupuesto recursos informáticos del estudio del diseño.

CAPÍTULO 3					
RECURSOS INFORMÁTICOS					
Código	Ud.	Descripción	Precio	Cantidad	Importe
C01	Ud.	Windows 10 de uso personal	57,99	1,00	57,99€
C02	Ud.	MATLAB uso profesional	800,00	1,00	800,00€
C03	Ud.	Licencia de ANSYS	130,00	1,00	130,00€
C04	Ud.	Licencia de modeFRONTIER	1.800,00	1,00	1.800,00€
3					2.787,99€

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

Tabla 29. Presupuesto completo del estudio del diseño.

Capítulo	Descripción	Importe
1	Recursos humanos	4.500,00€
2	Recursos físicos	912,00€
3	Recursos informáticos	2.787,99€
	Presupuesto de ejecución	8.199,99€
	7% gastos generales y cargas fiscales	574,00€
	Presupuesto de ejecución por contrata	8.773,99€
	21% de IVA	1.842,54€
	Presupuesto base de licitación del proyecto	10.616,53€

7.2. PRESUPUESTO DE LAS PALAS

Se pueden obtener dos otros presupuestos de las palas diseñadas. No se va a estudiar el proceso de fabricación de cada una, pero sí se tiene en cuenta que cada aerogenerador tiene cinco palas.

La cantidad de material que se tiene cada diseño es el siguiente: 2,223 kg para el diseño de acero y 2,0871 kg para el caso del aluminio. Para calcular el precio de lo que costarían las palas de un aerogenerador es preciso multiplicar las dos masas por cinco. Por lo tanto, se necesitan 11,115 kg de acero y 10,4355 kg de aluminio.

Los precios establecidos por cada kg de material son de: 3,27 € para el acero y 1,42 € para el aluminio (Trading economics, 2020).

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
 MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

7.2.1. PRESUPEUSTO DEL DISEÑO DE ACERO

Tabla 30. Presupuesto material de acero de un aerogenerador doméstico.

CAPÍTULO 1					
PALA DE ACERO					
Código	Ud.	Descripción	Precio	Cantidad	Importe
D01	kg	Material, acero	3,27	11,115	36,35€
		1			36,35€

Tabla 31. Presupuesto completo material de acero de un aerogenerador doméstico.

Capítulo	Descripción	Importe
1	Material, acero	36,35€
	Presupuesto de ejecución	36,35€
	7% gastos generales y cargas fiscales	2,54€
	Presupuesto de ejecución por contrata	38,89€
	21% de IVA	8,17€
	Presupuesto base de licitación del proyecto	47,06€

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
 MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

7.2.1. PRESUPEUSTO DEL DISEÑO DE ALUMINIO

Tabla 32. Presupuesto material de aluminio de un aerogenerador doméstico.

CAPÍTULO 1					
PALA DE ACERO					
Código	Ud.	Descripción	Precio	Cantidad	Importe
E01	kg	Material, aluminio	1,42	10,4355	14,82€
		2			14,82€

Tabla 33. Presupuesto completo material de aluminio de un aerogenerador doméstico.

Capítulo	Descripción	Importe
1	Material, aluminio	14,82€
	Presupuesto de ejecución	14,82€
	7% gastos generales y cargas fiscales	1,04€
	Presupuesto de ejecución por contrata	15,86€
	21% de IVA	3,33€
	Presupuesto base de licitación del proyecto	19,19€

8. BIBLIOGRAFÍA

- AECA Group. (2014). *Mini-Eólica*. Obtenido de AECA Group: <https://aecagroup.com/mini-eolica-html/>
- AEE. (29 de marzo de 2020). *La eólica en España*. Obtenido de Asociación Empresarial Española: <https://www.aeeolica.org/sobre-la-eolica/la-eolica-espana>
- AEMETblog. (10 de octubre de 2018). *Umbral y niveles de aviso de AEMET*. Obtenido de AEMETblog: <https://aemetblog.es/2018/10/10/umbrales-y-niveles-de-aviso-de-aemet/>
- AENOR. (diciembre de 2014). *AENOR; Aerogeneradores parte 23: ensayos estructurales de pala a escala real*. Obtenido de EN 61400-23: <https://www.aenor.com>
- AENOR. (2015). *Aerogeneradores. Parte 2: Aerogeneradores pequeños*.
- Ajuntament de València. (julio de 2018). *Cuadro de precios de urbanización*. Obtenido de Ayuntamiento de Valencia.
- ANSYS. (2 de febrero de 2020). *ANSYS*. Obtenido de ANSYS: <https://www.ansys.com>
- ANTALA. (18 de junio de 2020). *Conoce las ventajas y desventajas de la energía eólica*. Obtenido de ANTALA speciality chemicals: <https://www.antala.es/ventajas-y-desventajas-energia-eolica/>
- APPA, asociación. (3 de febrero de 2020). *La asociación*. Obtenido de APPA, Asociación de Empresas de Energías Renovables: <https://www.appa.es/la-asociacion/>
- APPA, marco regulatorio. (31 de enero de 2020). *Marco regulatorio*. Obtenido de APPA, Asociación de EMpresas de Energías Renovables: <https://www.appa.es/appa-minieolica/marco-regulatorio-minieolica/>
- APPA, Minieólica. (29 de marzo de 2020). *¿Qué es la Energía Minieólica?* Obtenido de APPA, Asociación de Empresas de Energías Renovables: <https://www.appa.es/appa-minieolica/que-es-la-energia-minieolica/>
- Arriols, E. (14 de octubre de 2019). *Ventajas y desventajas de la energía eólica*. Obtenido de Ecología verde: <https://www.ecologiaverde.com/ventajas-y-desventajas-de-la-energia-eolica-1085.html>
- Besa González, A. J., & Valero Chuliá, F. (2016). *Diseño de máquinas*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Búa, M. T. (12 de Mayo de 2014). *Materiales de uno técnico*. Obtenido de Conselleria de cultura, educación e ordenación universitaria: https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947174/contido/428_clasificacin_de_los_aceros.html
- BUDAPEST UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ECONOMICS. (23 de junio de 2020). *Department of applied mechanics*. Obtenido de BME:

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_help_v182/ans_elem/Hlp_E_SOLID187.html

CECU. (5 de junio de 2020). *La energía eólica*. Obtenido de La energía que nos une: <https://cecu.es/laenergiaquenosune/index.php/energia-eolica>

Danish Wind Industry Assosiation. (10 de mayo de 2003). *Aerogeneradores, ¿cuántas palas?* Obtenido de Danish Wind Industry Assosiation: <http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/design/concepts.htm>

Danish Wind INdustry Assosiation. (23 de julio de 2003). *Aerogeneradores, ¿rotor a sotavento o barlovento?* Obtenido de Danish Wind INdustry Assosiation: <http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/design/updown.htm>

Didáctica. (24 de junio de 2020). Obtenido de Didáctica: <http://didactica.fisica.uson.mx/tablas/densidad.htm>

EcoInventos, green technology. (3 de febrero de 2020). *Las ventajas y desventajas de los aerogeneradores de minieólica*. Obtenido de EcoInventos, green technology: <https://ecoinventos.com/ventajas-desventajas-aerogeneradores-de-minieolica/>

ECOVIVE. (29 de enero de 2020). *Aerogeneradores según su número de palas*. Obtenido de ECOVIVE: <https://ecovive.com/los-aerogeneradores-segun-el-numero-de-palas/>

EKIDOM, energías renovables. (29 de enero de 2020). *Historia de la energía eólica*. Obtenido de EKIDOM: <http://www.ekidom.com/historia-de-la-energia-eolica>

Energías renovables, el periodismo de las energías limpias. (23 de noviembre de 2017). *Qué aporta la minieólica en instalaciones con almacenamiento*. Obtenido de Energías renovables, el periodismo de las energías limpias: <https://www.energias-renovables.com/eolica/que-aporta-la-minieolica-en-instalaciones-con-20171123>

Estampaciones JOM. (24 de septiembre de 2017). *Evolución del precio del acero en España*. Obtenido de JOM Metal Stamping Services: <https://www.jom.es/evolucion-del-precio-del-acero-espana/#:~:text=El%20acero%20en%20España%20se,1.50%20€%20a%202.50€>.

ESTECO. (30 de marzo de 2020). *modeFRONTIER*. Obtenido de esteco: <https://www.esteco.com/modefrontier>

Fernández Díez, P. (28 de diciembre de 2019). *Energía eólica*. Obtenido de Biblioteca sobre ingeniería energética: http://rsm1.redsauce.net/js/pdfjs/web/viewer.html?file=http%3A%2F%2Frsm1.redsauce.net%2FAppController%2Fcommands_RSM%2Fapi%2Fapi_getFile.php%3FitemID%3D84%26propertyID%3D20%26RStoken%3D59e8ac1045d03e2ff6564c0638315f38

Fernández Díez, P. (28 de diciembre de 2019). *Evolución de los molinos de viento*. Obtenido de Biblioteca sobre ingeniería energética: <http://files.pfernandezdiez.es/EnergiasAlternativas/eolica/PDFs/08Molinos.pdf>

García, J. M. (29 de diciembre de 2019). *Breve reseña sobre los molinos*. Obtenido de El Molino: http://rsm1.redsauce.net/js/pdfjs/web/viewer.html?file=http%3A%2F%2Frsm1.redsauce.net%2FAppController%2Fcommands_RSM%2Fapi%2Fapi_getFile.php%3FitemID%3D84%26propertyID%3D20%26RStoken%3D59e8ac1045d03e2ff6564c0638315f38

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

ce.net%2FAppController%2Fcommands_RSM%2Fapi%2Fapi_getFile.php%3FitemID%3D84%26propertyID%3D20%26RToken%3D59e8ac1045d03e2ff6564c0638315f38

Global Wind Atlas. (23 de junio de 2020). *Home*. Obtenido de Global Wind Atlas: <https://globalwindatlas.info>

Iberdrola. (22 de junio de 2020). *Palas de aerogeneradores*. Obtenido de Iberdrola: <https://www.iberdrola.com/sala-comunicacion/top-stories/palas-aerogeneradores>

Ingemecánica. (24 de junio de 2020). *Propiedades de los materiales*. Obtenido de Ingemecánica: <https://ingemecanica.com/tutoriales/materiales.html#tabla1>

Laura Núñez. (06 de febrero de 2019). *¿Qué son los algoritmos genéticos?* Obtenido de El País: https://elpais.com/elpais/2019/01/31/ciencia/1548933080_909466.html

MathWorks. (2 de febrero de 2020). *Matlab*. Obtenido de MathWorks: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>

Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. (31 de Marzo de 2020). *Últimas noticias*. Obtenido de MITECO: [https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/el-gobierno-envía-a-la-comisión-europea-el-plan-nacional-integrado-de-energía-y-clima-\(pniec\)-2021-2030/tcm:30-508439](https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/el-gobierno-envía-a-la-comisión-europea-el-plan-nacional-integrado-de-energía-y-clima-(pniec)-2021-2030/tcm:30-508439)

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (24 de Noviembre de 2014). *La energía eólica*. Obtenido de MITECO: https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/grupos-de-trabajo-y-seminarios/red-parques-nacionales/laenergiaeolica-jramonayuso_tcm30-168881.pdf

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (Abril de 2017). *Las bondades del autoconsumo eléctrico contadas en tres minutos*. Obtenido de MITECO: <https://www.miteco.gob.es/gl/ceneam/carpeta-informativa-del-ceneam/novedades/bondades-autoconsumo-electrico.aspx>

Naciones Unidas. (30 de mayo de 2020). *Objetivos de desarrollo sostenible*. Obtenido de Naciones Unidas: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

OPEXenergy Operación y Mantenimiento S.L. (22 de junio de 2020). *Eólica*. Obtenido de Opex Energy: http://opex-energy.com/eolica/palas_aerogenerador.html#:~:text=Los%20materiales%20más%20empleados%20son,sólo%20en%20aerogeneradores%20muy%20pequeños.

Pitteloud, J.-D. (2019). *Global Wind Installations*. Obtenido de Wind Energy International: <https://library.wwindea.org/global-statistics/>

RAE. (29 de enero de 2020). *Diccionario de la lengua española*. Obtenido de Real Academia Española: <https://dle.rae.es/?w=aerogenerador>

SAGE. (23 de junio de 2020). *Research methods*. Obtenido de SAGE: <https://methods.sagepub.com/reference/encyclopedia-of-survey-research-methods/n404.xml>

DISEÑO OPTIMIZADO DEL PERFIL DE PALA DE UN AEROGENERADOR DOMÉSTICO DE 700 W
MEDIANTE ALGORITMO GENÉTICO

- San Roman, Á. L. (2013). Obtenido de Diseño de un aerogenerador para uso particular: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/20245/TFG_Alvaro_Lucas_San_Roman.pdf?sequence=1
- Sánchez Orgaz, E. M. (2011). *Riunet*. Obtenido de UPV: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/64090/-Sánchez%20-%20Advanced%20numerical%20techniques%20for%20the%20acoustic%20modelling%20of%20materials%20and%20noise%20control....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Scrapmetalpricer. (2019). Obtenido de SMP: <https://www.scrapmetalpricer.com/es/>
- Sotavento. (29 de diciembre de 2019). *Funcionamiento de las instalaciones eólicas*. Obtenido de Parque eólico experimental Sotavento: <https://www.sotaventogalicia.com/area-tecnica/instalaciones-eolicas/funcionamiento/>
- Structuralia. (16 de julio de 2018). *Aerogenerador vertical*. Obtenido de Structuralia: <https://blog.structuralia.com/aerogeneradores-de-eje-vertical-y-horizontal-tipos-ventajas-e-inconvenientes>
- Temáticas.org. (27 de junio de 2020). Obtenido de Precio del aluminio: <https://tematicas.org/indicadores-economicos/economia-internacional/precios/precio-aluminio/>
- Trading economics. (02 de julio de 2020). *Steel*. Obtenido de Trading economics: <https://tradingeconomics.com/commodity/steel>
- Universidad Castilla-La Mancha. (26 de mayo de 2020). *Energía eólica*. Obtenido de https://previa.uclm.es/profesorado/ajbarbero/FAA/EEOLICA_Febrero2012_G9.pdf
- World press . (29 de enero de 2020). *Aerogeneradores*. Obtenido de Fuentes de energía: <https://fuentesdeenergiact.wordpress.com/fuentes-de-energia-renovables/eolica/aerogeneradores/>
- Xunta de Galicia. (23 de junio de 2020). *Metales ligeros*. Obtenido de Educación, Xunta de Galicia: https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947174/contido/532_metales_ligeros.html

9. PLANOS

