

IMPLICACIONES DEL PINTADO DE PALAS DE NEGRO

MEDIDAS DE PREVENCIÓN PARA LA AVIFAUNA

FEBRERO 2023

INFORME ELABORADO POR LA ASOCIACIÓN EMPRESARIAL EÓLICA

 **AEE**
Asociación Empresarial Eólica

www.aeeolica.org

Este documento ha sido elaborado por la **Asociación Empresarial Eólica**.

Datos de contacto

AEE

C/ Sor Ángela de la Cruz, 2 – 14º - 28020 Madrid

www.aeeolica.org

aeeolica@aeeolica.org

Control de Versiones

Versión	Motivo/ Cambio	Fecha
V1	Primer documento	03/2022
V2	Actualización de datos y revisión de la información.	02/2023

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	4
2	IMPLICACIONES DEL PINTADO DE LAS PALAS DE NEGRO.....	6
1.	Implicaciones Técnicas.....	6
2.	Implicaciones Legales.....	7
3.	IMPLICACIONES EN LA VIDA DEL PRODUCTO	8
4.	Implicaciones Ambientales	8
3	POSIBLES SOLUCIONES ALTERNATIVAs.....	10
4	CONCLUSIONES	11
	ANEXO I. Plan de Validación realizado por fabricantes de palas.....	12
1.	Ensayo Acelerado de Transferencia de Calor.....	12
2.	Ensayo de Envejecimiento Natural	14
3.	Experiencia de los Fabricantes de Pintura	16
4.	Conclusiones	16

1 INTRODUCCIÓN

El impacto de los aerogeneradores en la avifauna constituye una gran preocupación dentro del sector eólico. Por ello, durante las fases de diseño y tramitación de parques eólicos se realizan **exhaustivos estudios de impacto ambiental** que incluyen estudios de avifauna de ciclo completo, para minimizar los efectos sobre las especies de aves y murciélagos locales.

Además, el sector se encuentra en constante **búsqueda de soluciones que permitan reducir aún más los efectos que pueden tener los aerogeneradores sobre las aves**. Entre las soluciones analizadas se encuentra la integración de **señales visuales pasivas** que aumenten la visibilidad de los parques eólicos para las aves y les permitan tomar **acciones evasivas a tiempo**.

En 2020 el Norwegian Institute for Nature Research (NINA) publicó un **estudio** en el cual se analizaba el **efecto que podía suponer pintar de un color de contraste una de las tres palas del aerogenerador** como estrategia para aumentar la visibilidad del rotor en movimiento¹. El informe afirma que, al pintar de negro una de las palas en 4 aerogeneradores del parque eólico noruego de Smøla, se consiguió una reducción del 70% en la mortalidad de determinadas especies de aves autóctonas, en comparación con los aerogeneradores adyacentes.

Aunque esto supone un resultado prometedor, se trata **únicamente de un proyecto piloto desarrollado en un hábitat muy concreto**. El propio artículo concluye que **es necesario realizar más estudios** para confirmar si los resultados obtenidos en esas condiciones y para unas especies de aves determinadas son extrapolables a otros escenarios. Esto es debido a que el estudio se realizó sobre aerogeneradores de pequeño tamaño (2,1-2,3 MW de potencia y una altura de buje de 70 m), en una localización terrestre específica, y con un color de contraste muy particular (negro sobre un ambiente nevado). Además, el proyecto se realizó en una región donde se registran temperaturas bajas-medias (de alrededor de 16°C), y en los estudios no se consideraron los efectos que podían tener las altas temperaturas y elevados niveles de radiación solar en el color de palas planteado.

De la misma manera, y tal como recoge un informe de AWWI (*American Wind Wildlife Institute*) donde se analiza dicho estudio noruego, el pequeño número de fatalidades reportadas tanto antes como después de aplicar el tratamiento a las palas, limita la validez de las conclusiones que se pueden obtener del efecto de la pintura negra: una reducción o aumento de un par de colisiones supone un importante impacto en los resultados².

Durante el año 2020 aparecieron en prensa algunas informaciones sobre **proyectos piloto desarrollados en parques eólicos españoles**, consistentes en el pintado de las palas y en el vinilado de las torres con ojos para proteger a las aves (Figura 1)³.

¹ May et al. (2020) *Paint it black: Efficacy of increased wind turbine rotor blade visibility to reduce avian fatalities*.

² AWWI (2021) *Paint it Black: Does Painting Wind Turbine Blades Increase Visibility to Reduce Bird Fatalities?* Recuperado el 7 de julio de 2022 de: <https://rewi.org/resources/paint-it-black/>

³ Energías Renovables (2021) *Aerogeneradores espantapájaros que alejan a la avifauna de los parques eólicos*. Recuperado el 1 de marzo de 2022 de: <https://www.energias-renovables.com/eolica/aerogeneradores-espantapajaros-que-alejan-a-la-avifauna-20211013>



Figura 1: Vinilado de torre de aerogenerador con ojos (izquierda) y pintado de negro de una pala (derecha) (Fuente: Energías Renovables).

A raíz de estos proyectos experimentales, en las *Evaluaciones de Impacto Ambiental* de nuevos parques eólicos, algunas **Administraciones han empezado a exigir como medida compensatoria el pintado de 2/3 de una de las palas en negro** para todos los nuevos aerogeneradores.

Desde esta Asociación se considera que **la exigencia de estas medidas no es lo más adecuado**, debido a que el pintado de las palas en negro podría tener **implicaciones técnicas negativas** sobre el **comportamiento de los aerogeneradores**, y, hasta la fecha, sólo se han aplicado en proyectos piloto. Los propios informes alertan de las limitaciones de los estudios y de la necesidad de llevar a cabo **nuevas investigaciones para confirmar los resultados** en otras localizaciones. Además, antes de exigir medidas concretas, AEE considera que **deben analizarse otras alternativas** que podrían **igualar o mejorar dichos beneficios**, conjuntamente con el sector.

2 IMPLICACIONES DEL PINTADO DE LAS PALAS DE NEGRO

Técnicamente cualquier color puede ser aplicado a las palas de los aerogeneradores, pero existen **razones muy justificadas para que la industria haya elegido colores como el gris claro (RAL 7035) o colores blanquecinos**, como el RAL 9018 (blanco papiro) o el RAL 9010 (blanco puro). El pintado de 2/3 de una pala de negro supone varios problemas técnicos, legales, medioambientales y comerciales, los cuales se exponen a continuación.

1. IMPLICACIONES TÉCNICAS

Existen diversas implicaciones técnicas como consecuencia de pintar una pala de negro, dado que la **pintura negra tiene diferentes propiedades materiales** que las pinturas grises o blancas. Las principales repercusiones negativas son:

1. La pintura negra se trata en general de una pintura **más débil y menos resistente** a impactos, lo que provoca fenómenos acelerados de desgaste y agrietamiento.
2. La pintura negra supone un **calentamiento excesivo** de las palas en los días soleados. La radiación solar en verano causará un aumento considerable de la temperatura de la pala negra, previéndose un incremento significativo de los **esfuerzos térmicos** soportados por la pala. Estos calentamientos excesivos influirán negativamente en su **vida útil** y pueden causar la **delaminación de la estructura**, conllevando en última estancia el **fallo de la pala**. Los estudios realizados por los fabricantes muestran que las palas negras alcanzan temperaturas que pueden provocar el fallo de la estructura (resinas y adhesivos). Estos resultados, que se han validado en ensayos en palas, concuerdan con la experiencia de los fabricantes de pinturas, mostrando que las palas con pinturas negras pueden llegar a alcanzar temperaturas 17°C superiores a las alcanzadas por pinturas grises/blancas. Se detallan los estudios llevados a cabo por fabricantes en el **Anexo**.
3. La pintura negra presenta **propiedades conductivas diferentes** que las pinturas grisáceas o blancas, lo que puede influir negativamente en el sistema de protección de rayos de las palas del aerogenerador.
4. Al pintar una pala de negro **también deben pintarse sus complementos**, como los generadores de vórtices, aletas Gurney, receptores de rayos, winglets o bordes serrados, etc. Los pigmentos y otros aditivos **pueden afectar a la resistencia y funcionalidad** de estos componentes.
5. El **peso adicional** que supone la pintura de negro de la pala puede conllevar mayores sollicitaciones a fatiga que reduzcan su vida útil y afecten al rendimiento económico de los activos.

Por estas razones, cambiar el diseño de la pala pintándola de negro puede tener un impacto en la **depreciación y el rendimiento técnico de la pala, reduciendo potencialmente la producción energética** del aerogenerador debido a un desgaste y fisuración prematuros, o por el exceso de materiales de protección a añadirse.

2. IMPLICACIONES LEGALES

Los colores de las palas deben cumplir una serie de **normativas nacionales e internacionales en materia de servidumbres aeronáuticas**. En España la *Guía de Señalamiento e Iluminación de Turbinas y Parques Eólicos*⁴, aprobada por la **Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA)**, define las especificaciones que deben cumplir los aerogeneradores que, por su altura, pueden ser considerados como **obstáculos para el tráfico aéreo**.

En esta guía AESA señala que, con el fin de garantizar la **seguridad y la regularidad de las operaciones de las aeronaves**, las palas de los aerogeneradores deben pintarse de colores blancos o grisáceos. Un cambio de color debería estar coordinado con las normativas de servidumbres aplicables.

5.2.1 Señalamiento

Como norma general, para la señalización de parques eólicos se pintarán íntegramente de color blanco o grisáceo los álabes del rotor, la barquilla y los 2/3 superiores del mástil de soporte de todas las turbinas eólicas, cuya cromaticidad estará comprendida dentro de los límites establecidos en el Real Decreto 862/2009, de 14 de mayo, Normas Técnicas de Diseño y Operación de Aeródromos de Uso Público, Apéndice 1; Figura A1-2 Colores de luces aeronáuticas de superficie.

El promotor de la nueva instalación puede determinar, justificándolo adecuadamente, la idoneidad de otro tipo de señalamiento debido al entorno del emplazamiento, como el caso de parques eólicos ubicados en zonas donde haya nieve gran parte del año (Ilustración 5.2.). En caso de elegir otro tipo de señalamiento, éste deberá garantizar un nivel de seguridad equivalente y ser aceptado por AESA (Imagen 5.1.).

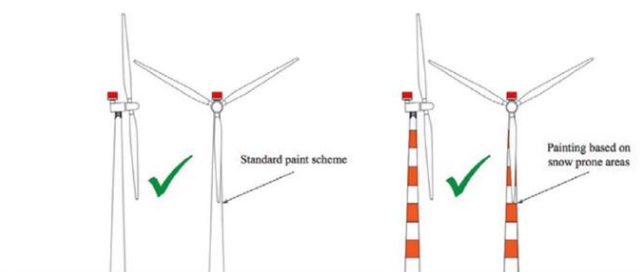


Ilustración 5.2. Señalización de fuste en el caso general y en zonas nevadas (FAA Advisory Circular 70/7460-1L)



Imagen 5.1. Señalamiento de fuste alternativo 1

5.2.2 Colores

Los colores de señalamiento serán, con regla general, blanco tráfico (RAL 9016) y naranja tráfico (RAL 2009). Alternativamente, estará permitido el color rojo tráfico (RAL 3020), en el caso de aerogeneradores junto con el blanco grisáceo (RAL 9002), gris ágata (RAL 7038) o gris claro (RAL 7035). Alternativamente, estará permitido el color rojo tráfico (RAL 3020) junto con el blanco grisáceo (RAL 9002), gris ágata (RAL 7038) o gris claro (RAL 7035). Estará permitido utilizar los colores luminosos diurnos pertinentes.

La **legislación de seguridad aérea europea** establece que los componentes de los aerogeneradores instalados en el mar **deben ser pintados en color blanco**.

En otros países europeos vecinos, se exige **aplicar franjas rojas o puntos en las palas como medida para garantizar la seguridad aérea**, requisito que no es fácilmente combinable con el pintado de las

⁴ AESA (2017), *Guía de Señalamiento e Iluminación de Turbinas y Parques Eólicos*.
<https://www.seguridadaerea.gob.es/sites/default/files/ssaa-17-gui-126-a01.pdf>

palas de negro. Esto supone un **problema para los fabricantes** de palas, quienes necesitan **estandarizar lo máximo posible las especificaciones de producto** con el objetivo de producir palas de características similares, reducir la complejidad en su cadena productiva y mantener la competitividad.

Por último, es necesario tener en cuenta que para su comercialización todos los modelos de aerogenerador deben pasar por un exhaustivo **proceso de ensayos y certificación**. Los sistemas de pintura de los aerogeneradores se encuentran intrínsecamente embebidos en la certificación tipo de la turbina. Los fabricantes invierten grandes esfuerzos en desarrollar los mejores sistemas de pintura, **no siendo una tarea sencilla la recertificación de un sistema de pintura diferente**.

3. IMPLICACIONES EN LA VIDA DEL PRODUCTO

Desde la perspectiva del fabricante, la pintura de una pala de negro requiere **inversión adicional en equipos de pintado de palas**, dado que **no es posible mezclar las líneas de pintura** para evitar que se mezclen los colores.

Asimismo, dado que las **palas son fabricadas en lotes de tres**, introducir una pala negra incrementa la **complejidad logística** del proceso, en su manipulación, transporte hasta el parque eólico e instalación.

Desde la perspectiva del **mantenimiento**, las inspecciones de palas son típicamente realizadas con cámaras y drones. Es de esperar que la **inspección de las palas negras sea más difícil que las de colores más claros**, complicándose la detección de fisuras y de otros posibles defectos críticos. De la misma manera, dado que los complementos de la pala negra deberán ser del mismo color, se **incrementan las necesidades de inventario de las empresas mantenedoras**, a la vez que se añade complejidad a logística y a la cadena de suministro.

4. IMPLICACIONES AMBIENTALES

Como se ha comentado en la introducción, el **estudio realizado en el parque eólico de Smøla (Noruega) tiene diversas limitaciones**.

1. Se probaron 4 palas pintadas de negro obteniendo un descenso en la mortalidad de las aves en los 4 aerogeneradores marcados respecto a los 4 aerogeneradores adyacentes a los mismos. Esto conlleva a que los resultados deban ser tratados con cuidado debido al **limitado número de máquinas estudiadas**, tal como concluye el propio estudio.
2. El estudio comprobó la reducción de la mortalidad de la perdiz blanca de sauce (*Lagopus Lagopus* o “*Moerassneeuwhoen*), **sin poder evaluar el efecto que ha tenido en otras especies** de avifauna local.
3. La baja mortalidad reportada, tanto antes como después de aplicar la pintura a las palas, limita las conclusiones que se pueden obtener del efecto de la pintura negra.

4. Las **condiciones del emplazamiento son muy específicas**, dado que el estudio se ha realizado **pintando de negro una pala de aerogeneradores blanco o grisáceos en un ambiente terrestre nevado**. Esto supone que los aerogeneradores puedan ganar visibilidad por una pala negra y/o, especialmente, por franjas negras en la torre. De hecho, se hipotetiza que las franjas negras en la torre del aerogenerador tendrían un mayor efecto.
5. El estudio se basa en el informe de NREL, donde, en primer lugar, se **concluye que el negro no era el color más efectivo**, prefiriéndose otros como el **azul, verde y, sobre todo, el rojo y el amarillo**⁵. Se recomienda el negro al entenderse como el color más económico. Sin embargo, esta conclusión aplicaba únicamente al caso de palas con un fondo blanco neutro. Al realizar el **estudio con un fondo colorido**, usando imágenes de California donde predominan los colores amarillos, marrones sobre un cielo azul, similares a los que se tiene en el paisaje español, **se obtuvieron resultados distintos**: se concluyó que los **resultados variaban según el color del paisaje**, aumentando considerablemente la visibilidad de las palas sin pintar en este tipo de fondo. Es decir, en este caso, los resultados muestran que no hay diferencias significativas entre usar una pala sin pintar y una pintada, y que los **colores más visibles eran el azul y el verde**. El **negro y rojo obtenían resultados similares**.

Por ello, **se requieren estudios más amplios para corroborar la eficacia de estas medidas**. Uno de los proyectos que se está llevando a cabo se ubicará en Países Bajos, donde a 7 turbinas del parque eólico Eemshaven se les pintará una pala de negro para investigar su efecto en la avifauna⁶. No obstante, en este parque se han instalado aerogeneradores de pequeño tamaño en tierra, por lo que se requerirán estudios complementarios en el futuro.

Es decir, **antes de generalizar la práctica del pintado de palas, es necesario asegurar que es eficaz, probando además otras configuraciones que puedan mitigar las implicaciones técnicas, legales y comerciales**.

Por último, uno de los mayores problemas a los que se enfrenta la eólica es el **impacto visual** de los aerogeneradores. Para mitigar este impacto, se han realizado **numerosos estudios cuyo objetivo era encontrar los colores más neutros**, uno de los motivos por los cuales las palas de los aerogeneradores y sus torres son pintadas de colores grisáceos o blancos. El pintado de una pala de negro supondría un **aumento del impacto visual de los parques**, aumentando el rechazo local a los mismos.

⁵ NREL (2003) *Minimization of Motion Smear: Reducing Avian Collisions with Wind Turbines*. NREL/SR-500-33249

⁶ REVE (2022), *Las palas de turbina eólica negras reducen las colisiones con aves*. Recuperado el 25 de febrero de 2022 de: <https://www.evwind.com/2022/02/02/las-palas-de-turbina-eolica-negras-reducen-las-colisiones-con-aves/>

3 POSIBLES SOLUCIONES ALTERNATIVAS

La hipótesis de aplicar una pintura de contraste a una pala del aerogenerador busca reducir el desenfoque por movimiento del rotor, que permita reducir la colisión de aves. Sin embargo, otras tipologías y colores diferentes al negro también pueden ser válidos para lograr este objetivo.

Desde la **Asociación Empresarial Eólica** se proponen **tipologías y colores alternativos**, que alcanzarían el objetivo de lograr un contraste entre los aerogeneradores y el paisaje aumentando su visibilidad, sin que el impacto visual se incremente excesivamente.

Los **ejemplos de tipologías propuestas** se muestran en la Figura 2. Incluye la pala con la punta de otro color; y el pintado de dos o tres franjas de tamaños diversos.

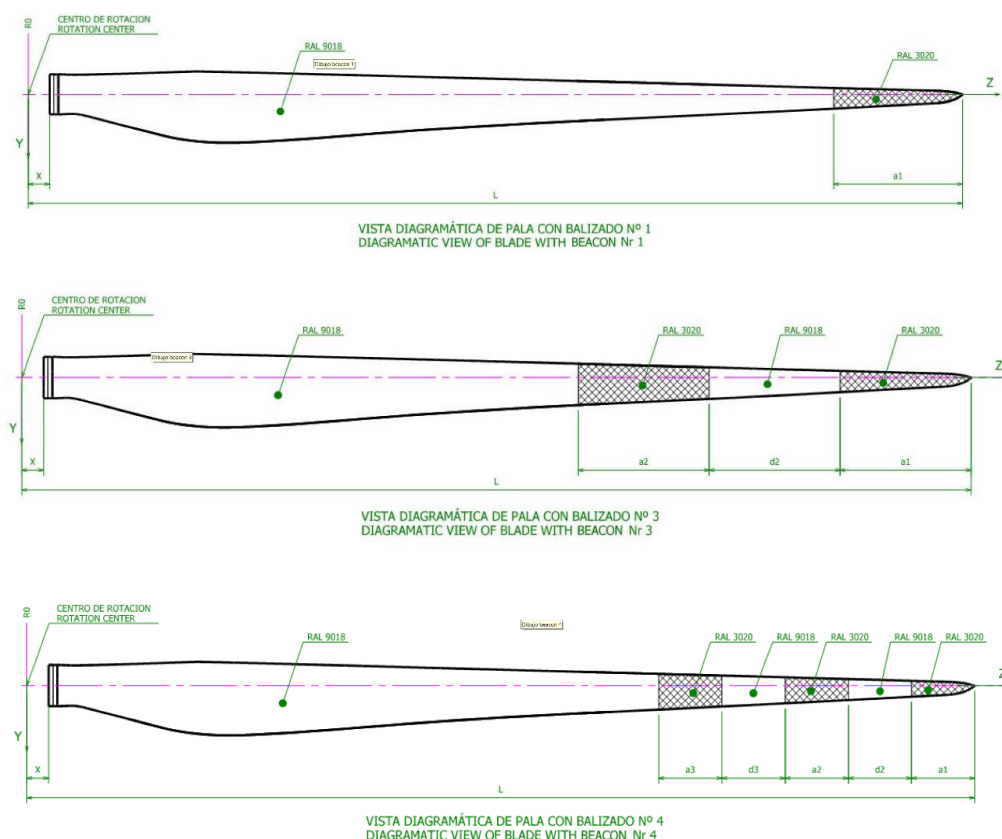


Figura 2: Propuestas alternativas para aumentar la visibilidad de las palas para la avifauna.

Los colores propuestos como alternativa al negro son el rojo tráfico (RAL 3020) y el naranja tráfico (RAL 2009), tal como se muestran en la Figura 3. Es importante tener en cuenta para esta elección la temperatura ambiental del parque eólico.



Figura 3: Propuesta de colores alternativos.

Otros beneficios de estas opciones es que ya se encuentran incluidas en los catálogos de los fabricantes y podrían comenzar a fabricarse sin necesidad de certificaciones previas. Además, están conforme a los diseños exigidos por organismos aeronáuticos para la señalización de obstáculos de aeronaves.

4 CONCLUSIONES

El **pintado de palas en color negro conlleva diversos efectos desconocidos sobre los aerogeneradores e interfieren con la regulación vigente** en materia de servidumbres aeronáuticas.

Además, los beneficios de estas medidas **no están contrastados ni validados científicamente**.

Por todo ello, desde esta Asociación se solicita lo siguiente

1. **Eliminar la exigencia del pintado de 2/3 de una de las palas del aerogenerador en negro como medida compensatoria de los procesos de evaluación de impacto ambiental de nuevos parques eólicos.**
2. **Avanzar en el análisis de soluciones alternativas, que contribuyan a reducir el impacto de los parques eólicos sobre la avifauna, sin afectar al rendimiento y a las características técnicas de los aerogeneradores.**
3. **Aprovechar para ello los diferentes mecanismos de financiación disponibles en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), como pueden ser las medidas recogidas en el PERTE de Energías Renovables, Hidrógeno y Almacenamiento.**
4. **Alinear cualquier requisito adicional con la legislación de seguridad aérea y AESA.**

ANEXO I. PLAN DE VALIDACIÓN REALIZADO POR FABRICANTES DE PALAS.

Con el objetivo de comprobar la viabilidad técnica de pintar las palas de negro, los fabricantes de palas han llevado a cabo un plan de validación consistente en una serie de estudios y ensayos. En particular, se quería comprobar las temperaturas que alcanzaría la pala negra al estar expuesta a la radiación solar. Se llegó a la conclusión de que la pintura negra suponía un riesgo para las palas dado que estas podían alcanzar temperaturas superiores a los 70°C debido a la radiación solar y las temperaturas ambientales.

A continuación, se describen los ensayos realizados.

1. ENSAYO ACELERADO DE TRANSFERENCIA DE CALOR

En primer lugar, se llevó a cabo un ensayo acelerado de transferencia de calor en un centro tecnológico, “Estudio de la temperatura superficial bajo radiación solar simulada”.

Este ensayo se realizó de acuerdo con la norma UNE EN ISO 12543-4:2011 “*Vidrio para la edificación. Vidrio laminado y vidrio laminado de seguridad. Parte 4: Métodos de ensayo de durabilidad.*”, y en las siguientes condiciones:

- Radiación solar simulada: $900 \pm 100 \text{ W/m}^2$. La IEC 61400 establece un valor de 1.000 W/m^2 .
- Temperatura ambiente inicial de la cámara de ensayo: 25°C
- Temperatura ambiente alcanzada durante el ensayo: 37°C
- Duración del ensayo: 1 hora desde que se alcanza una estabilización de la temperatura.

En la Figura 4 se muestran la disposición de los paneles y de los sensores de temperatura utilizados: T1 y T2 corresponden a la muestra pintada de negro (RAL 9004); T3 y T4 a la muestra gris (RAL 7035); y T9 a la temperatura ambiente. Se muestra esquemáticamente en la Figura 5.

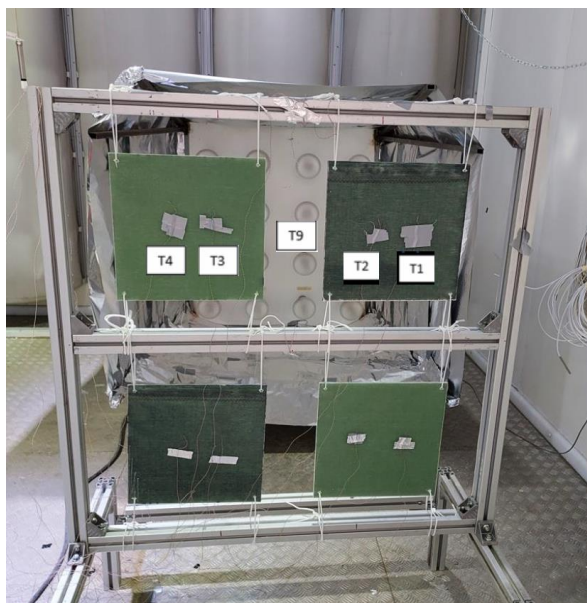


Figura 4: Estudio de la temperatura superficial bajo radiación solar simulada.

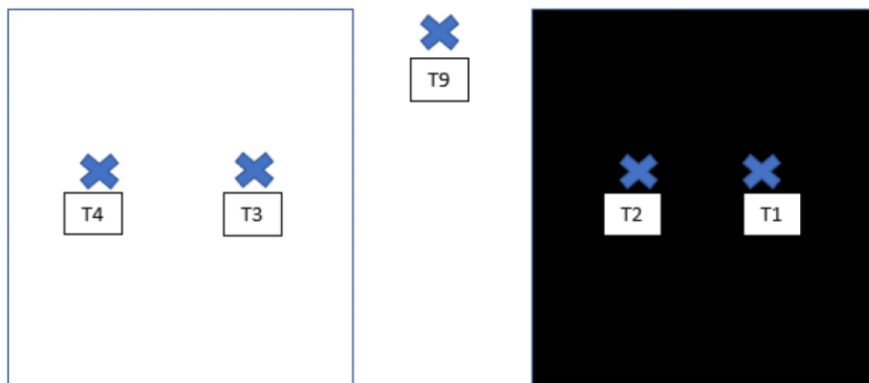


Figura 5: Sensores de temperatura en las muestras.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 6 y en la Tabla 1. Se comprueba como las temperaturas alcanzadas en la pala pintada de negro (71,3°C de media) son sensiblemente superiores respecto a la muestra gris (59,5°C de media), para una temperatura ambiente de 37,7°C. Es decir, se obtiene una diferencia de 11°C entre las temperaturas medias alcanzadas entre las muestras de ambos colores. Además, se observa una diferencia de 13°C en las temperaturas máximas.

Tabla 1: Resultados del estudio de la temperatura superficial bajo radiación solar simulada

Color Muestra	Sensor	T media ensayo (°C)	T media muestra (°C)	T máxima ensayo (°C)	Desviación Estándar
Negro	T1	69	71,3	71,3	0,4
	T2	73,6		75,4	0,4
Gris	T3	61,6	59,5	62,5	0,3
	T4	57,3		58,3	0,3
T ambiente	T9	37,7	-	37,7	1

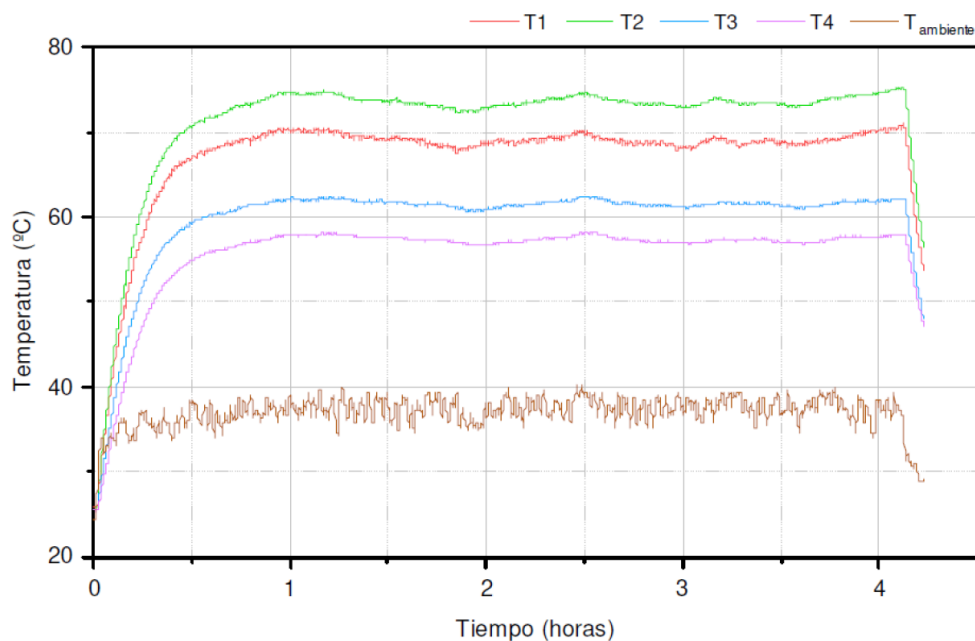


Figura 6: Resultados del estudio de la temperatura superficial bajo radiación solar simulada.

A la vista de estos resultados, y teniendo en cuenta que la temperatura de transición vítrea (T_g) es de 72°C para la resina epoxi del material compuesto y de 65°C para el adhesivo, **el pintado de las palas de negro supondría un gran riesgo de afección de las propiedades mecánicas de los materiales críticos de las palas** por las temperaturas que se pueden alcanzar en su superficie.

La temperatura de transición vítrea es la temperatura a la cual la resina epoxi o el adhesivo pasan de un estado vítreo (sólido) a un estado blando y gomoso. Puede considerarse el punto en el que se produce una reducción apreciable de las propiedades físicas, resultante de la exposición a temperaturas elevadas⁷.

Es decir, el ensayo acelerado en laboratorio muestra que en las palas pintadas de negro se alcanzarían temperaturas cercanas o superiores a las críticas de sus materiales estructurales (resina y adhesivos). Por ello, **los fabricantes no pueden recomendar técnicamente el uso de pintura negra en las palas pues implica una alta probabilidad de fallo estructural de la pala a estas temperaturas críticas**.

2. ENSAYO DE ENVEJECIMIENTO NATURAL

Como siguiente paso del plan de validación, se realizó un ensayo de envejecimiento natural para corroborar las conclusiones anteriores. En este, dos secciones de pala reales, una pintada en negro (RAL 9004) y otra utilizada como referencia pintada de gris (RAL 7035), son expuestas a radiación solar natural. Como condiciones del ensayo:

- Ángulo de Incidencia: 15°-30° y orientación sur.
- Temperatura máxima media de la localización del ensayo: 27°C.
- Ubicación ensayo: Navarra.
- Monitorización con termopares.
- Duración: un mes.



Figura 7: Ensayo de envejecimiento natural de dos secciones de pala.

⁷ Wessex Resins (2023), *Glosario de Términos Técnico. Términos Térmicos*. Recuperado el 16 de enero de 2023 de: <https://es.wessexresins.co.uk/epoxi-versatil-para-compuestos-de-alto-rendimiento/glosario-de-terminos-tecnicos/terminos-termicos/>

Ambas secciones se instrumentaron con 8 termopares, tal como se muestra en la Figura 8. Tres de ellos se ubicaron en la superficie de la pala (P2, P3 y P9), y otros 5 en el interior (P6 en el adhesivo, P4 y P8 en los largueros, y P5 y P7 en la resina).



Figura 8: Sección de pala pintada de negro con 8 termopares.

Los datos de temperatura fueron monitorizados y recogidos cada 10 minutos durante el mes de junio. Los valores máximos recogidos en ambas secciones se muestran en la Tabla 2. En la Figura 9 se ejemplifica la evolución de las temperaturas en ambas secciones de palas (N para los sensores de la pala negra, y G para los de la pala pintada de gris) en los días más calurosos del mes.

Tabla 2: Temperatura máxima medida en cada sección de la pala en la superficie de la pala (P2, P3 y P9) y en su interior (P4, P5, P6, P7 y P8).

	Superficie			Adhesivo	Largueros		Resina	
	Tmax (°C) P2	Tmax (°C) P3	Tmax (°C) P9	Tmax (°C) P6	Tmax (°C) P4	Tmax (°C) P8	Tmax (°C) P5	Tmax (°C) P7
Negro (RAL 9004)	82,6	88,8	90,2	61,3	75,8	72,6	72,2	75,7
Gris (RAL 9018)	74,9	81,2	76,1	51,2	62	57,4	57,6	58,4
Diferencia de Temperatura (°C)	7,7	7,6	14,1	10,1	13,8	15,2	14,6	17,3
Ambiente (°C)	40,1							

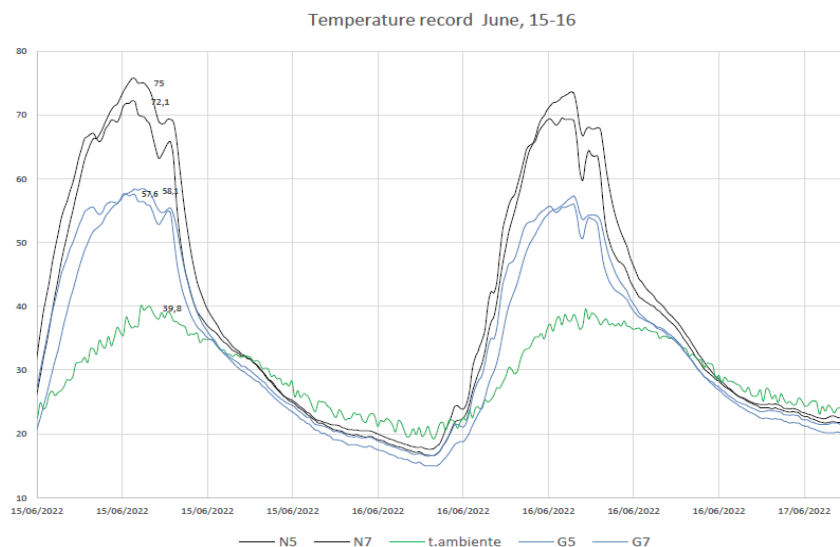


Figura 9: Ejemplo de la evolución de las temperaturas en dos de los termopares de ambas secciones de palas (N para los sensores de la pala negra, y G para los de la pala pintada de gris) en los días más calurosos del mes.

Los resultados obtenidos corroboran las conclusiones alcanzadas en el “estudio de la temperatura superficial bajo radiación solar simulada” detallado en el apartado anterior. En la pala pintada de negro se alcanzan temperaturas de hasta 90°C, con diferencias de hasta 17°C respecto a la pala gris. Además, las temperaturas más críticas se alcanzan en las zonas con adhesivo o resina, donde se acercan o superan las temperaturas de transición vítrea (T_g) de los materiales.

3. EXPERIENCIA DE LOS FABRICANTES DE PINTURA

Por último, en base a la experiencia de los fabricantes de palas, la temperatura alcanzada en servicio en la superficie de las palas pintadas en blanco o gris (RAL 7035 o RAL 9018) se encuentra entre los 40-50°C. Los fabricantes de pinturas, en base a sus ensayos de laboratorio internos y su experiencia, establecen que la pintura negra alcanza temperaturas 30-40°C superiores a las alcanzadas por las pinturas grises y blancas.

Los estudios que se habían llevado a cabo sobre las temperaturas alcanzadas por una pintura en función de su color llegan a la conclusión de que, en un día soleado con poco viento y una temperatura ambiental de 33°C, una superficie pintada de negro puede alcanzar los 90°C, tal como se observa en la Figura 10⁸.

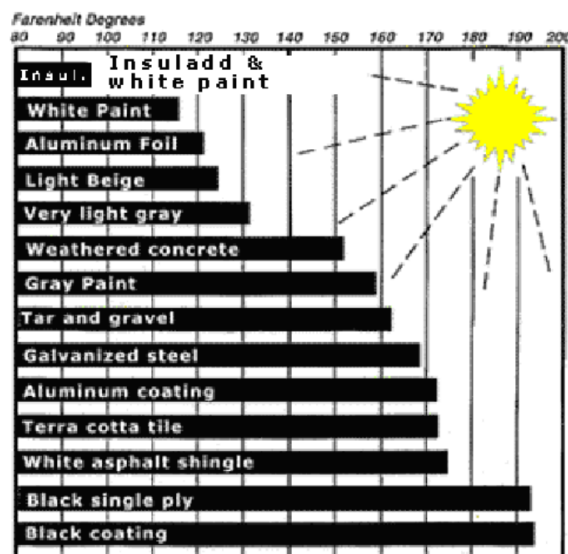


Figura 10: Comparación de las temperaturas alcanzadas según el color de la pintura aplicada en un día soleado con una temperatura ambiente de 33°C (90°F), donde se observa que la pintura negra alcanza los 90°C (190°F) (Fuente: Pockett, 2010).

4. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los resultados de los experimentos llevados a cabo, se puede concluir que existe riesgo estructural en las palas pintadas de negro en los climas cálidos, como es el caso de España. Por lo tanto, **no se recomienda el uso del color negro en las palas de los aerogeneradores.**

⁸ Pockett, J. (2010), *A Review of Heat-Reflective Paints*.

Los materiales estructurales de la pala más sensibles a la temperatura son la resina ($T_g=72^{\circ}\text{C}$) y el adhesivo ($T_g=65^{\circ}\text{C}$). Las temperaturas obtenidas durante ambos ensayos se aproximaban, e incluso, superaban las temperaturas críticas de dichos materiales, por lo que sus propiedades mecánicas se verían afectadas, influyendo negativamente en su vida útil y conllevando en última estancia el **fallo de la pala**.

A photograph of several wind turbines against a sunset sky. The sky transitions from a deep blue at the top to a warm orange and red near the horizon. The turbines are silhouetted against this colorful background. One turbine is prominently featured in the foreground on the right, with its three blades clearly visible. Another turbine is visible to its left, and a third one is partially seen on the far left edge of the frame. The overall mood is serene and emphasizes renewable energy.

C/ Sor Ángela de la Cruz, 2. planta 14 D

28020, Madrid

Tel. +34 917 451 276

www.aeeolica.org