



POLITÉCNICA



INDUSTRIALES  
ETSII | UPM

# MANTENIMIENTO DE UN FRENO AERODINÁMICO DE AEROGENERADOR

Tomás Coronado González – 15090

Máster en Ingeniería Industrial

Mantenimiento  
y Seguridad  
Industrial

## Índice

<b>1. Introducción</b>	3
<b>2. Descripción del sistema</b>	5
2.1 Freno aerodinámico de aerogenerador	5
2.2 Conjunto de PLC, baterías y servos	7
2.3 Motores de cada pala	7
2.4 Reductor de cada pala	7
2.5 Anclaje manual de cada pala	7
2.6 Anclaje manual del buje mediante pernos	7
<b>3. Fiabilidad</b>	8
3.1 Historial de fallos	8
3.2 Fiabilidad e in fiabilidad de los elementos	9
3.3 Ajuste a distribución de Weibull de los elementos	10
3.4 Tasa de fallos de los elementos	12
3.5 Vida media de los elementos	13
3.6 Fiabilidad y vida media del sistema completo	14
3.7 Plan de mantenimiento	15
<b>4. Mantenibilidad</b>	19
4.1 Tiempos de reparación	19
4.2 Mantenibilidad de los elementos	20
4.3 Ajuste a distribución de Weibull de los elementos	21
4.4 Tiempos probables de reparación de los elementos	23
4.5 Mantenibilidad del sistema completo	24
<b>5. Disponibilidad</b>	26
<b>6. Costes del plan de mantenimiento</b>	26
<b>7. Referencias</b>	28

## 1. Introducción

Este trabajo presenta los conocimientos adquiridos en la asignatura de Mantenimiento y seguridad Industrial, aplicados a un caso de estudio concreto: el freno aerodinámico de un aerogenerador. En primer lugar, se hace una breve descripción del sistema escogido y de su integración con el conjunto del aerogenerador. Más adelante, se lleva a cabo un análisis de fiabilidad y mantenibilidad a partir de una información ficticia, pero que es posible ajustar mediante la distribución de probabilidad de Weibull. Y, finalmente, se presentan los costes que se derivan del plan de mantenimiento que se propone en esta memoria.

Los aerogeneradores extraen energía del viento para generar electricidad, y lo hacen por medio de unas palas, que giran cuando el viento incide contra ellas. Estas palas van acopladas a un eje de baja velocidad que se conecta, a su vez, al rotor, por medio del buje (hub en inglés). La góndola (o nacelle) es el habitáculo donde se encuentran los componentes del generador eléctrico, que es el responsable de transformar la energía mecánica en eléctrica y que cuenta con un multiplicador de velocidad y unos frenos, habitualmente de discos. Este multiplicador es imprescindible para que el eje de alta velocidad pueda girar unas cincuenta veces más rápido que el de baja velocidad y así las palas roten a las revoluciones que permiten una extracción óptima de la potencia. La Figura 1 muestra los elementos fundamentales de los aerogeneradores.

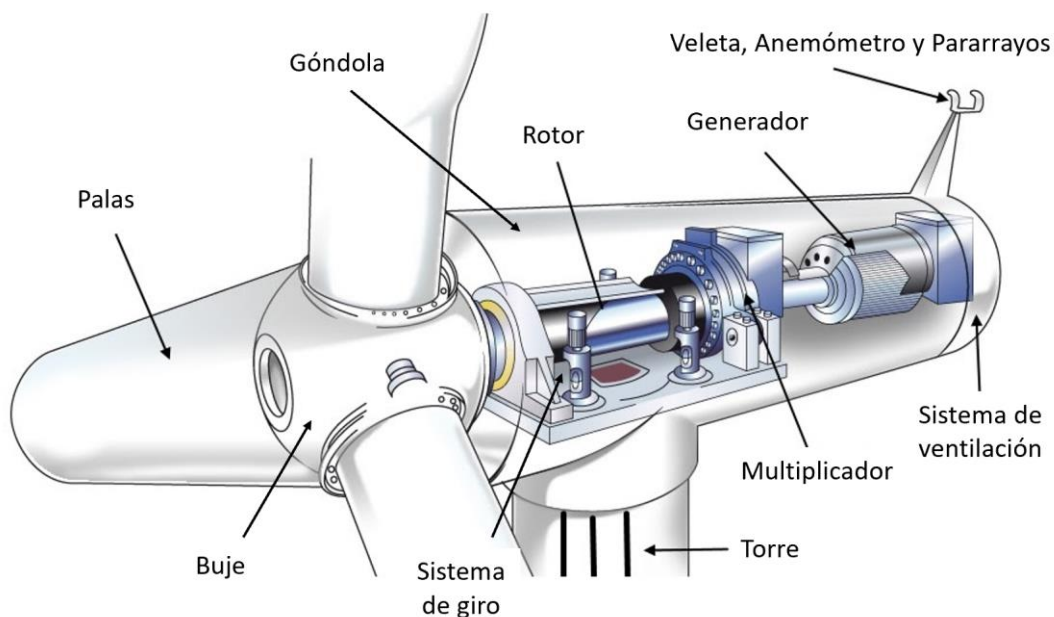


Figura 1. Elementos principales de un aerogenerador.

Los aerogeneradores comienzan a funcionar cuando el viento alcanza una velocidad próxima a los 3,5 metros por segundo, y llegan a la máxima producción de electricidad cuando el viento sopla a 14 metros por segundo, por término medio. A partir de ese valor de velocidad del viento, los aerogeneradores regulan su propia velocidad rotación de las palas, de modo que el generador eléctrico pueda estar aportando a la red una potencia nominal aproximadamente constante. No obstante, cuando el viento es muy fuerte, normalmente a partir de los 25 metros

por segundo, los aerogeneradores se paran por cuestiones de seguridad. La Figura 2 muestra la curva de potencia de un aerogenerador en función de la velocidad del viento.

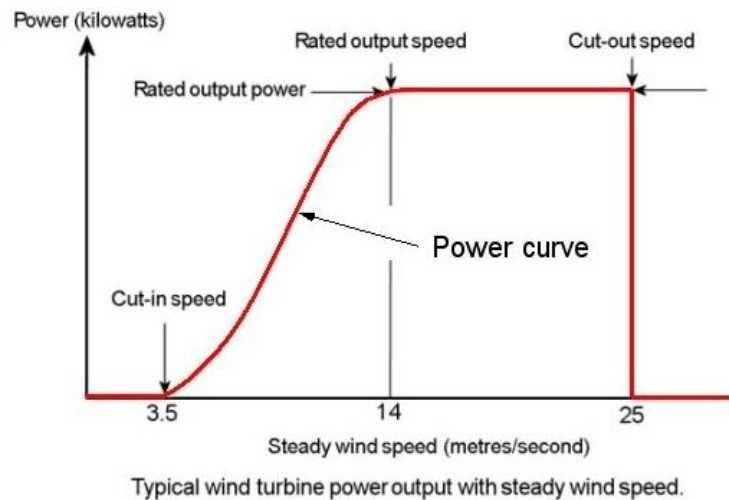


Figura 2. Curva de potencia de un aerogenerador en función de la velocidad del viento.

Cuando se interrumpe la producción de electricidad de un aerogenerador, por motivo de una excesiva velocidad del viento, es necesario parar también el giro de las palas que mueven al rotor. Por esta razón, además del freno mecánico (normalmente de tambor) situado entre el rotor y el generador eléctrico, también debe disponerse de un freno que pare el giro de las palas. De lo contrario, el buje, con las palas, comenzaría a girar a una velocidad demasiado elevada, para la cual no se ha diseñado la estructura del aerogenerador, y se producirían daños severos. Estos daños podrían ocasionar, incluso, la destrucción completa del aparato, como puede visualizarse en el popular video de youtube de la referencia [1].

El freno que detiene el movimiento rotatorio de las palas es de tipo aerodinámico. El accionamiento manual de este freno constituye el sistema de estudio para este trabajo. Su principio de funcionamiento se basa en la teoría de perfiles aerodinámicos:

- Cuando el viento incide contra las palas produce, en cada una de sus secciones, una fuerza de sustentación ( $F_L$ ) que origina el giro del rotor.
- No obstante, también produce una fuerza de arrastre ( $F_D$ ), perpendicular a la anterior, que no se aprovecha para generar potencia.

El cociente  $F_L/F_D$  depende de  $\alpha$ , o ángulo que forman la dirección del viento y el perfil aerodinámico. En condiciones normales de funcionamiento, esta relación se pretende maximizar, para así obtener un gran par en el buje y, por consiguiente, una elevada producción de energía eléctrica. Por tanto, en la fase de diseño se busca el  $\alpha$  óptimo que permite lograr este objetivo.

El freno aerodinámico aprovecha el efecto inverso. Cuando se desea parar el giro de las palas, unos mecanismos, colocados en el buje, hacen rotar a las palas entorno al propio eje de cada pala. El objetivo es el de aumentar el ángulo  $\alpha$  hasta valores próximos a  $90^\circ$ . Con ello se consigue que la fuerza  $F_L$  que las hace girar sea prácticamente nula. En esto consiste el freno aerodinámico de las palas de un aerogenerador. La Figura 3 es un esquema de los vectores de fuerza que resultan cuando el viento incide contra las palas.

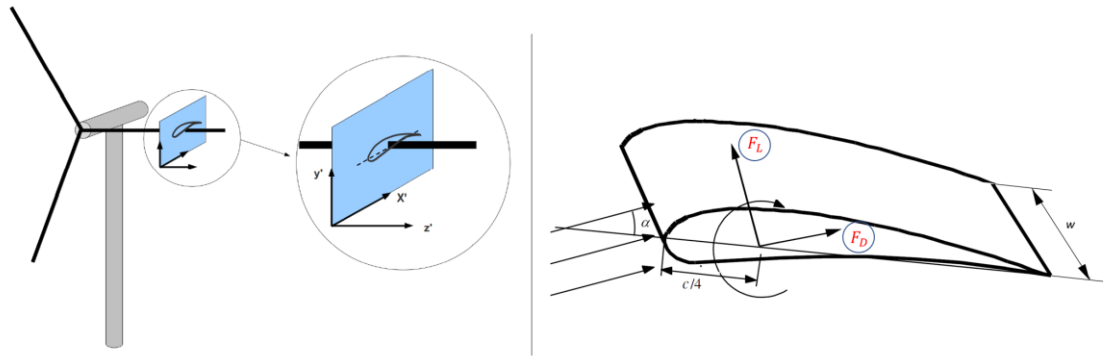


Figura 3. Geometría básica del aerogenerador y de los perfiles aerodinámicos.

El ángulo de giro de una pala, según su propio eje, es conocido como *pitch angle*. Este término es el que se va a utilizar en adelante por ser el más común en la bibliografía.

## 2. Descripción del sistema

### 2.1 Freno aerodinámico de aerogenerador

El frenado y fijación de las palas tiene dos fases que se describen a continuación. La primera está asociada al sistema de frenado propiamente dicho y la segunda, al anclaje del conjunto tras el frenado.

- **Frenado de las palas:**

Esta primera fase se lleva a cabo cuando la velocidad del viento es excesiva o bien cuando se toma la decisión, desde el exterior, de parar el aerogenerador. El controlador lógico recibe la instrucción de detener el giro de las palas y envía, a su vez, una señal a los motores para que actúen sobre el *pitch angle* de cada pala. De este modo, cada una de ellas es girada 90° aproximadamente y se detiene el giro. En el video de la referencia [5] puede visualizarse el resultado de aplicar este freno.

- **Anclaje manual:**

Como consecuencia de lo anterior, el buje deja de rotar, pero el sistema aún no está completamente parado. Por tanto, en esta segunda fase se lleva a cabo el anclaje del sistema para que el operario que se encuentre dentro pueda realizar su trabajo sin riesgo de sufrir un accidente asociado al movimiento del buje o de las palas. Es el propio operario quien realiza el anclaje manual del buje, una vez frenado.

En esta memoria se ha seleccionado el modelo *Pitch System 3*, de la empresa Moog, para realizar el plan de mantenimiento de su sistema de frenado. Los elementos del Pitch System 3 se listan a continuación y pueden observarse en la Figura 4:

- I. El sistema de frenado está constituido por:
  - Un controlador lógico que comanda los motores, mandándoles las señales necesarias para que estos se activen.
  - Un servo asociado a cada motor.
  - Un motor de corriente alterna para cada pala. Cada uno hace girar una pala, modificando su *pitch angle*. El control de este ángulo se hace de manera

individualizada pues, durante el funcionamiento normal de un aerogenerador, este ángulo debe variar en función de la posición angular de la pala.

- Una pareja de engranajes para cada pala que lleva a cabo las funciones de una reductora. Aumenta el par a la salida y reduce la velocidad.
- Y, además, un conjunto de baterías que alimentan tanto a los motores como a la unidad lógica.

Por otra parte, este equipo de Moog cuenta con un sistema de sensorización que aporta información acerca del estado de las palas del aerogenerador. No obstante, para el sistema de frenado y anclaje, estos sensores no tienen ninguna influencia.

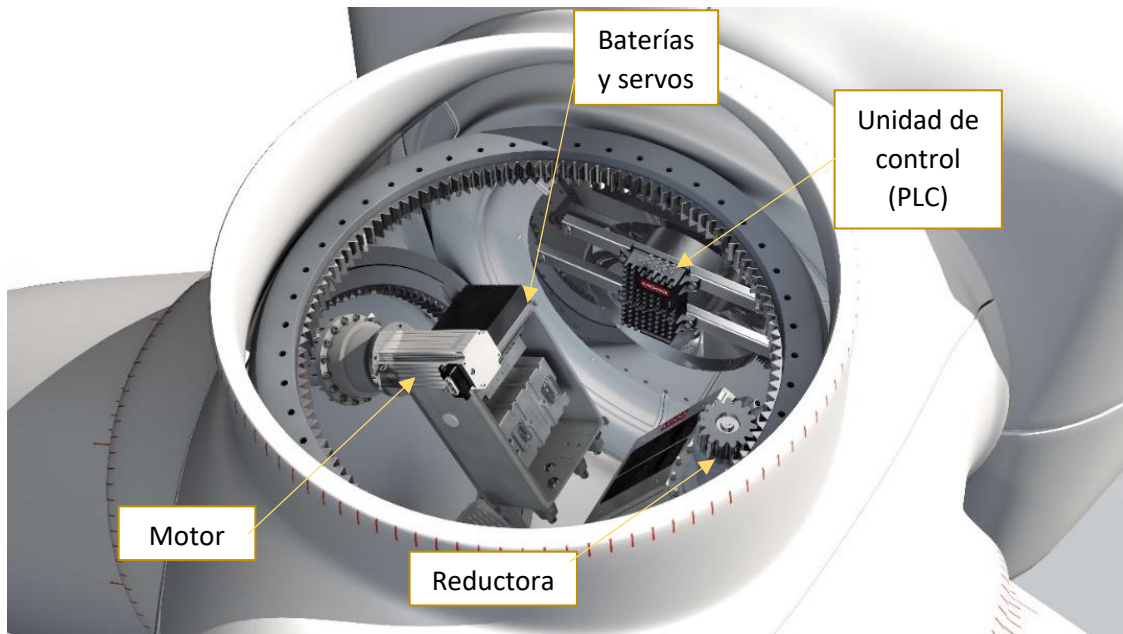


Figura 4. Mecanismo (en el interior del buje) del freno aerodinámico "Pitch System 3", de Moog.

II. El sistema de anclaje cuenta con los siguientes elementos:

- Anclaje del giro de cada una de las palas, según su propio eje. Se lleva a cabo a través de un sistema de enclavamiento manual de la rueda pequeña de cada una de las tres reductoras.
- Anclaje del giro del buje, según el eje que es perpendicular al plano que contiene las tres palas. Se realiza por medio de unos pernos de accionamiento manual que salen de la góndola y se enclavan en el buje.

El sistema de anclaje es redundante, pues bastaría uno solo de los dos enclavamientos descritos para garantizar que el sistema permanece parado. Por otra parte, para lo que sigue, se considerará que el fallo del conjunto se produce cuando éste es incapaz de permanecer inmóvil y garantizar la seguridad de un operario que se encuentre trabajando en otros equipos del aerogenerador.

El fallo del sistema completo podrá ser ocasionado por un fallo en alguno de los elementos en serie del subsistema de frenado o por el fallo simultáneo de todos los elementos en paralelo del subsistema de anclaje. Es de reseñar también que cuando no hay un operario dentro del aerogenerador, la seguridad de la estructura queda garantizada simplemente con el frenado del buje, sin necesidad de aplicar los anclajes; no obstante, para este trabajo se ha decidido considerar el sistema completo de freno más anclajes.

## 2.2 Conjunto de PLC, baterías y servos

Para este grupo de elementos, de cara al estudio de fiabilidad y mantenibilidad del sistema, se ha decidido englobarlos todos conjuntamente. Por tanto, el tipo de fallo que se espera para este grupo será de tipo aleatorio, es decir, no determinista. Se trata de elementos electrónicos, aislados de los elementos mecánicos, que no estarán expuestos a condiciones especialmente agresivas de temperatura o ambientales, más allá de la humedad existente en el aerogenerador. Se espera, por tanto, que los fallos aleatorios se produzcan como consecuencia del empleo, durante la instalación, de cableado dañado, malas conexiones entre elementos, baterías defectuosas, etc.

## 2.3 Motores de cada pala

Cada motor se considera como una caja negra, con una distribución estadística de fallos típica de los elementos que experimentan deterioro progresivo, es decir, fallo determinista. La razón por la que se modeliza de esta manera los motores es que la mayoría de sus elementos están sometidos a este fenómeno de deterioro: rodamientos, oxidación de metales, desalineaciones, desequilibrios, etc. Se considera, por otra parte, que los tres motores son iguales y que sufren un deterioro con el tiempo a un ritmo similar.

## 2.4 Reductor de cada pala

Al igual que los motores, se considera que las reductoras tienen también una distribución estadística de fallos de tipo determinista. Esto es así porque los engranajes sufren un deterioro progresivo por fatiga y el lubricante se va desgastando. No se consideran, para estos elementos, causas de fallo de tipo extrínseco, como podría ser una mala fabricación del dentado, pues está claro que, en este tipo de equipos de tan elevado valor, las inspecciones de calidad previas al montaje son muy exhaustivas. Como en el caso de los motores, se considera que las tres reductoras experimentan un deterioro equivalente.

## 2.5 Anclaje manual de cada pala

La empresa Moog indica que se puede realizar un anclaje manual del *pitch angle* de cada pala, pero no especifica de qué manera. Se decide, por tanto, realizar la suposición de que ese anclaje consiste en enclavar, de algún modo, los dientes de la rueda pequeña de cada reductora. Este enclavamiento será, por tanto, un elemento mecánico que estará sometido a desgaste, corrosión y fatiga, por lo que es razonable considerar que también para este elemento el fallo será de tipo determinista. Como para los dos elementos previos, se considera que los anclajes son también iguales para cada una de las tres palas y que, por tanto, cuando haya transcurrido un tiempo suficientemente alto, su grado de utilización será el aproximadamente igual.

## 2.6 Anclaje manual del buje mediante pernos

Este es un elemento único, a diferencia de los motores, reductoras y anclajes de cada pala, para los que se tienen tres de cada uno. No obstante, no se trata de un solo perno, sino de varios, accionados manualmente de modo que, también para ellos, se hace la suposición de que son todos iguales. Se trata, como se explicó más arriba, del anclaje del buje, cuyo giro podría darse si el de las palas no estuviera enclavado. Esto es así porque si el ángulo de alguna de las palas no es de 90º aparecería una fuerza de sustentación en los perfiles aerodinámicos que harían que todo el conjunto se moviera. Como en los anteriores elementos, el tipo de fallo que podría darse se considera de tipo intrínseco (determinista).

### 3. Fiabilidad

#### 3.1 Historial de fallos

La fiabilidad de cada uno de los elementos que se han descrito puede obtenerse a partir de una tabla de fallos. La Tabla 1 recoge información acerca de los fallos producidos en cada uno de los elementos, a partir de una muestra de 100 unidades para cada uno. Al cabo de un tiempo lo suficientemente alto, todos los elementos que sufren deterioro progresivo habrán fallado, mientras que el número de elementos que fallan de manera aleatoria (en este trabajo solo el conjunto de componentes electrónicos) será menor que el total de la muestra.

Duración, t(h)	Número de fallos, i					Frecuencia de fallos, f(t) = i/n				
	Conjunto de PLC, baterías y servos	Motor	Reductora	Anclaje pala	Anclaje buje	Conjunto de PLC, baterías y servos	Motor	Reductora	Anclaje pala	Anclaje buje
0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10000	2	0	1	1	0	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00
20000	1	0	0	1	0	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
30000	1	1	1	2	0	0,01	0,01	0,01	0,02	0,00
40000	0	1	2	3	1	0,00	0,01	0,02	0,03	0,01
50000	0	3	3	4	0	0,00	0,03	0,03	0,04	0,00
60000	1	5	3	6	0	0,01	0,05	0,03	0,06	0,00
70000	0	8	4	6	1	0,00	0,08	0,04	0,06	0,01
80000	1	10	6	7	2	0,01	0,10	0,06	0,07	0,02
90000	1	11	7	8	3	0,01	0,11	0,07	0,08	0,03
100000	0	12	8	9	5	0,00	0,12	0,08	0,09	0,05
110000	1	11	8	9	6	0,01	0,11	0,08	0,09	0,06
120000	2	10	9	8	7	0,02	0,10	0,09	0,08	0,07
130000	1	8	8	7	8	0,01	0,08	0,08	0,07	0,08
140000	2	6	9	6	8	0,02	0,06	0,09	0,06	0,08
150000	0	4	7	5	9	0,00	0,04	0,07	0,05	0,09
160000	1	3	7	4	9	0,01	0,03	0,07	0,04	0,09
170000	0	2	6	4	9	0,00	0,02	0,06	0,04	0,09
180000	2	1	4	3	8	0,02	0,01	0,04	0,03	0,08
190000	1	2	2	2	7	0,01	0,02	0,02	0,02	0,07
200000	0	0	1	1	6	0,00	0,00	0,01	0,01	0,06
210000	2	1	2	1	4	0,02	0,01	0,02	0,01	0,04
220000	1	0	1	1	3	0,01	0,00	0,01	0,01	0,03
230000	0	1	0	1	2	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02
240000	1	0	1	1	1	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
250000	1	0	0	0	0	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
260000	2	0	0	0	1	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01
270000	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
280000	1	0	0	0	0	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
290000	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
300000	1	0	0	0	0	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	26	100	100	100	100	0,26	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabla 1. Historial de fallos de los elementos

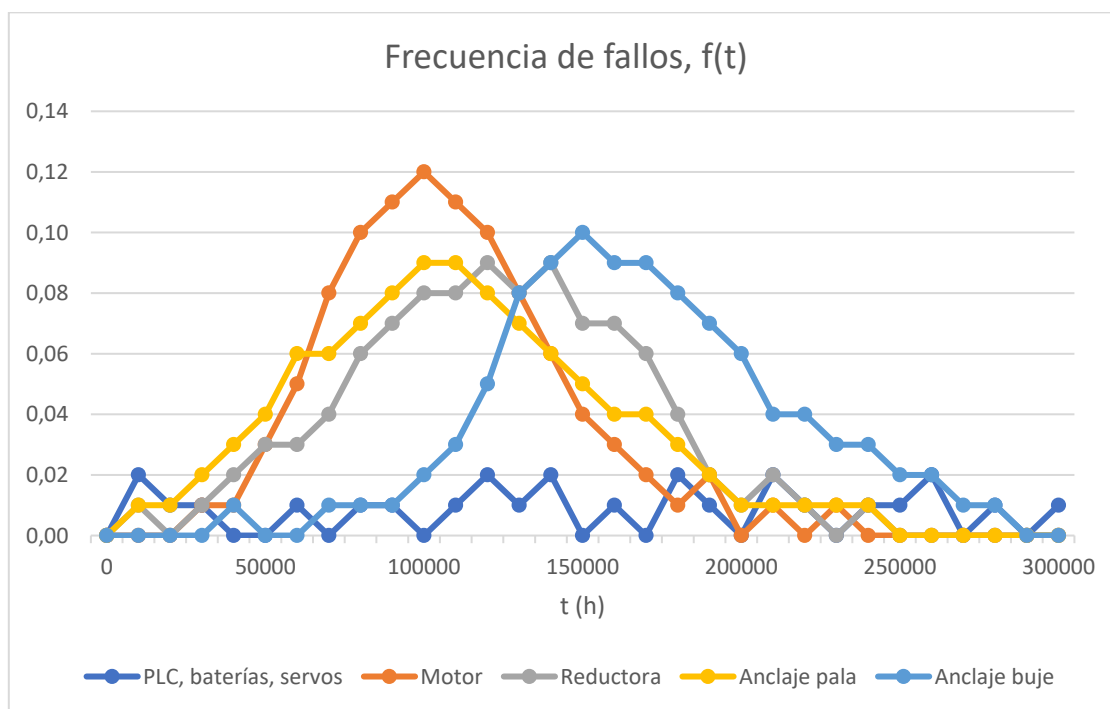


Figura 5. Frecuencia de fallos de los elementos.



En la Figura 5 se representan gráficamente los valores recogidos en el historial de la Tabla 1. Se obtienen como resultado las curvas de distribución de vida para cada componente. Estas distribuciones son similares a la de densidad de probabilidad de fallo, pero con la diferencia de que en ellas se representa la posibilidad de fallo en un intervalo de 10.000 horas en vez de un instante de tiempo.

### 3.2 Fiabilidad e in fiabilidad de los elementos

A partir de los datos se obtiene, a continuación, la fiabilidad para cada elemento. Y a partir de esto último es posible ajustar las distribuciones de valores en el tiempo a una distribución estadística conocida. La fiabilidad se define como uno menos la in fiabilidad, que a su vez puede calcularse realizando el acumulado de los valores de frecuencia de fallos, para cada instante temporal. La Tabla 2 muestra los resultados de estos cálculos.

Duración, t(h)	Infiabilidad, F(t)					Fiabilidad, R(t) = 1 - F(t)				
	Conjunto de PLC, baterías y servos	Motor	Reductora	Anclaje pala	Anclaje buje	Conjunto de PLC, baterías y servos	Motor	Reductora	Anclaje pala	Anclaje buje
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10000	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,98	1,00	0,99	0,99	1,00
20000	0,03	0,00	0,01	0,02	0,00	0,97	1,00	0,99	0,98	1,00
30000	0,04	0,01	0,02	0,04	0,00	0,96	0,99	0,98	0,96	1,00
40000	0,04	0,02	0,04	0,07	0,01	0,96	0,98	0,96	0,93	0,99
50000	0,04	0,05	0,07	0,11	0,01	0,96	0,95	0,93	0,89	0,99
60000	0,05	0,10	0,10	0,17	0,01	0,95	0,90	0,90	0,83	0,99
70000	0,05	0,18	0,14	0,23	0,02	0,95	0,82	0,86	0,77	0,98
80000	0,06	0,28	0,20	0,30	0,04	0,94	0,72	0,80	0,70	0,96
90000	0,07	0,39	0,27	0,38	0,07	0,93	0,61	0,73	0,62	0,93
100000	0,07	0,51	0,35	0,47	0,12	0,93	0,49	0,65	0,53	0,88
110000	0,08	0,62	0,43	0,56	0,18	0,92	0,38	0,57	0,44	0,82
120000	0,10	0,72	0,52	0,64	0,25	0,90	0,28	0,48	0,36	0,75
130000	0,11	0,80	0,60	0,71	0,33	0,89	0,20	0,40	0,29	0,67
140000	0,13	0,86	0,69	0,77	0,41	0,87	0,14	0,31	0,23	0,59
150000	0,13	0,90	0,76	0,82	0,50	0,87	0,10	0,24	0,18	0,50
160000	0,14	0,93	0,83	0,86	0,59	0,86	0,07	0,17	0,14	0,41
170000	0,14	0,95	0,89	0,90	0,68	0,86	0,05	0,11	0,10	0,32
180000	0,16	0,96	0,93	0,93	0,76	0,84	0,04	0,07	0,07	0,24
190000	0,17	0,98	0,95	0,95	0,83	0,83	0,02	0,05	0,05	0,17
200000	0,17	0,98	0,96	0,96	0,89	0,83	0,02	0,04	0,04	0,11
210000	0,19	0,99	0,98	0,97	0,93	0,81	0,01	0,02	0,03	0,07
220000	0,20	0,99	0,99	0,98	0,96	0,80	0,01	0,01	0,02	0,04
230000	0,20	1,00	0,99	0,99	0,98	0,80	0,00	0,01	0,01	0,02
240000	0,21	1,00	1,00	1,00	0,99	0,79	0,00	0,00	0,00	0,01
250000	0,22	1,00	1,00	1,00	0,99	0,78	0,00	0,00	0,00	0,01
260000	0,24	1,00	1,00	1,00	1,00	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00
270000	0,24	1,00	1,00	1,00	1,00	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00
280000	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00
290000	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00
300000	0,26	1,00	1,00	1,00	1,00	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 2. Fiabilidad e in fiabilidad de los elementos.

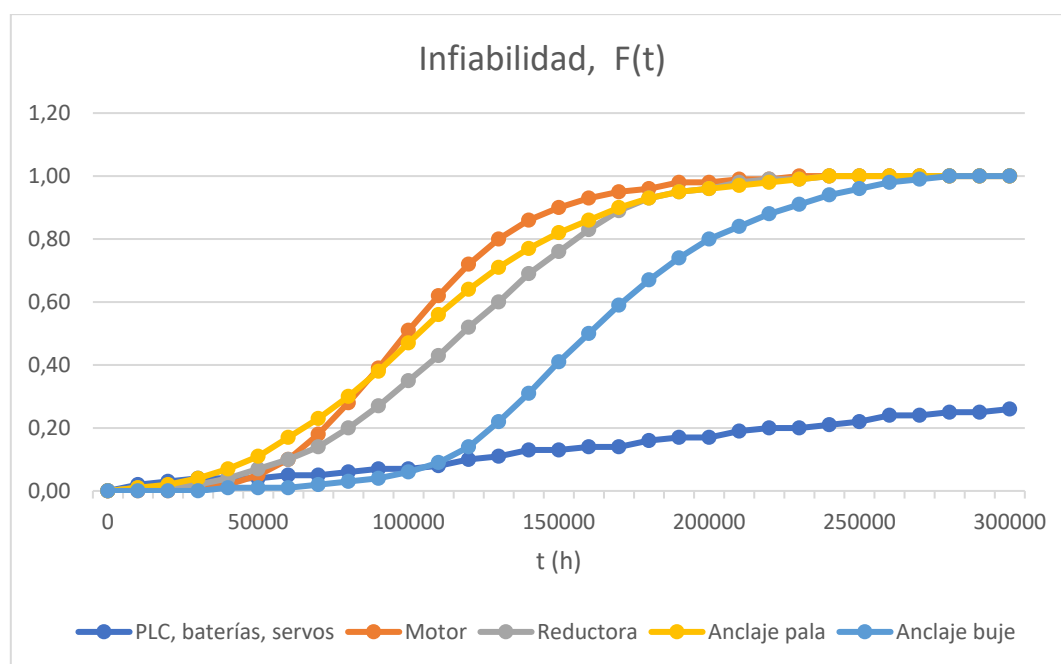


Figura 6. Gráfica de in fiabilidad de los elementos

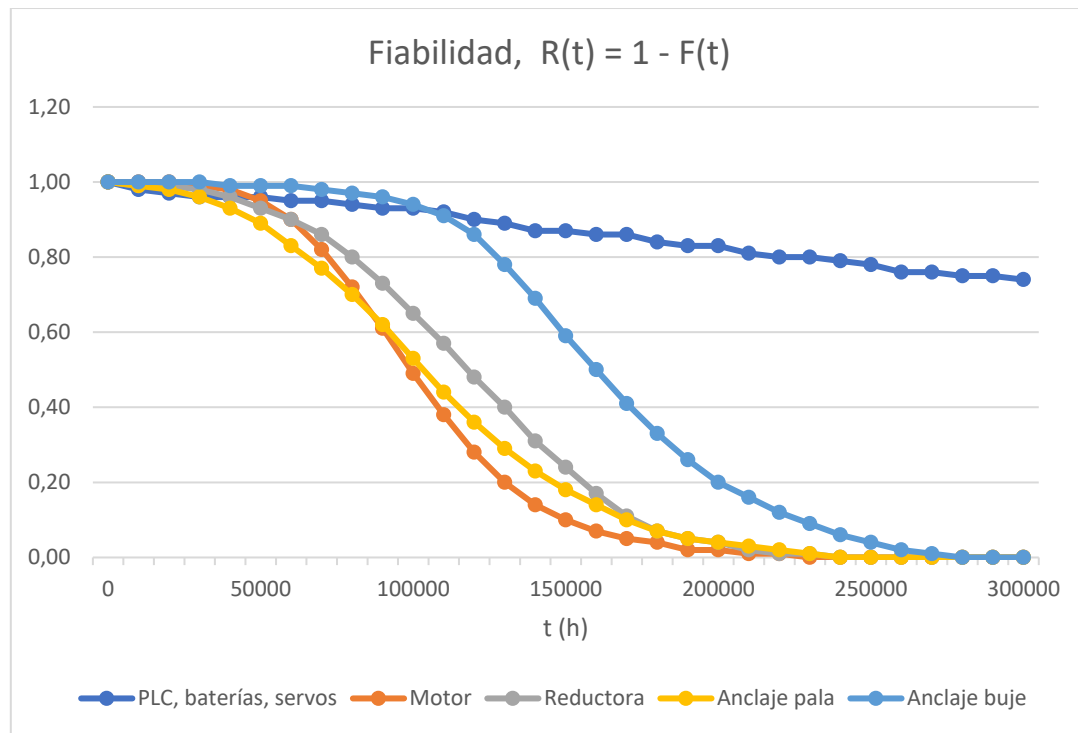


Figura 7. Gráfica de fiabilidad de los elementos

Las Figuras 6 y 7 son la representación de los resultados de in fiabilidad y fiabilidad de los componentes, respectivamente. Es de destacar cómo, aunque las gráficas de distribución de vida presentan una cierta dispersión, las de fiabilidad e in fiabilidad corrigen en cierta medida la componente aleatoria y permite obtener unas curvas mucho más suavizadas.

### 3.3 Ajuste a distribución de Weibull de los elementos

Con el objetivo de reflejar de manera matemática la tendencia de la distribución de fallos, para cada componente, se ha decidido ajustar las nubes de puntos de fiabilidad a una distribución de probabilidad de Weibull. Las expresiones que toman la fiabilidad y la in fiabilidad cuando se ajustan a este tipo de distribución continua son las siguientes:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

Las expresiones anteriores quedan simplificadas dado que el origen de tiempos se toma en  $t = 0$ . Por otra parte, para duración nula se ha considerado una fiabilidad del 100 % para todos los elementos. Por tanto,  $\gamma = 0$  y se tienen solo dos parámetros de ajuste.

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

Para llevar a cabo el ajuste se toman logaritmos dos veces a un lado y al otro de la anterior ecuación. De este modo, es posible ajustar por mínimos cuadrados la nube de puntos a una recta de pendiente  $\beta$  y ordenada en el origen igual a  $-\beta \cdot \ln(\eta)$ . La última expresión queda de la siguiente manera al aplicar dos veces los logaritmos:

$$\ln(-\ln(R(t))) = \beta \cdot (\ln(t) - \ln(\eta))$$

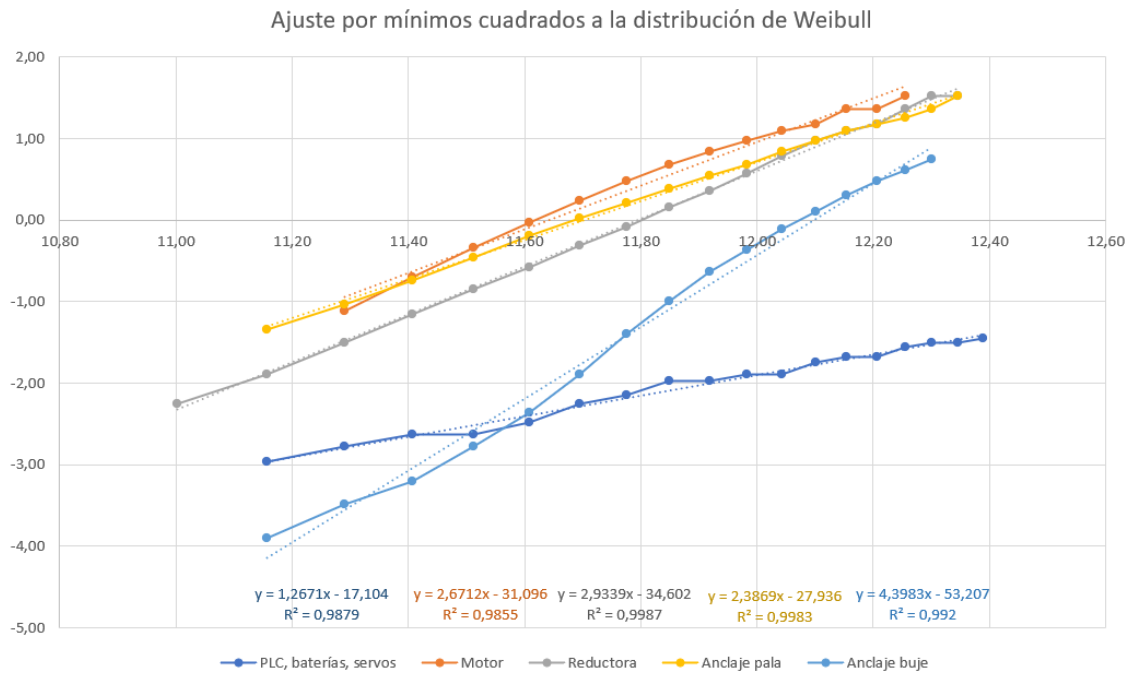


Figura 8. Ajuste por mínimos cuadrados según la distribución de probabilidad de Weibull

Para los ajustes se han eliminado aquellos valores que se alejan de la recta de regresión; esos datos se consideran anómalos. En la Figura 8 puede verse que las distribuciones de Weibull se ajustan adecuadamente a las nubes de puntos de fiabilidad. De hecho, todos los coeficientes de determinación  $R^2$  están comprendidos entre 0,98 y 0,99.

	$\beta$	$-\beta \cdot \ln(\eta)$	$\eta$
Conjunto de PLC, baterías y servos	<b>1,27</b>	-17,104	<b>728352</b>
Motor	<b>2,67</b>	-31,096	<b>113688</b>
Reductora	<b>2,93</b>	-34,602	<b>132436</b>
Anclaje pala	<b>2,39</b>	-27,936	<b>121041</b>
Anclaje buje	<b>4,40</b>	-53,207	<b>179364</b>

Tabla 3. Coeficientes del ajuste de las distribuciones de fiabilidad

Recordando que las fiabilidades siguen la distribución  $R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$ , según Weibull, y conocido el valor de los parámetros de la regresión para cada elemento, es posible representar las fidelidades de nuevo, pero ahora según esta distribución. Esto puede verse en la Figura 9.

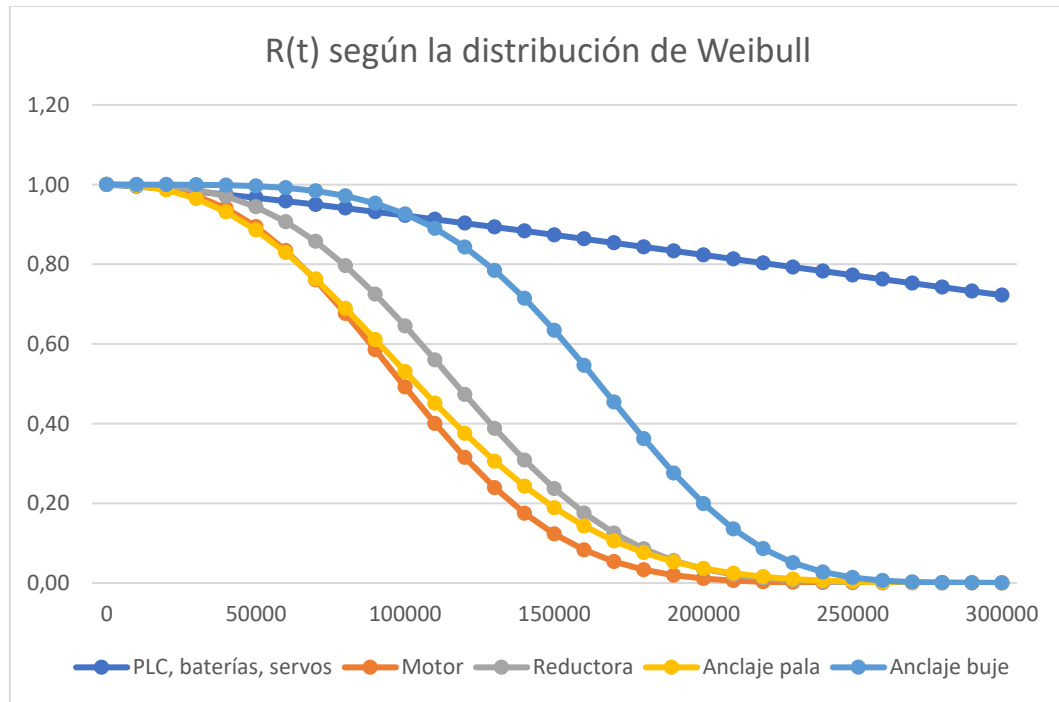


Figura 9. Fiabilidad de los elementos por ajuste según la distribución de Weibull.

### 3.4 Tasa de fallos de los elementos

La tasa de fallos se calcula dividiendo la densidad de probabilidad de fallo entre la fiabilidad del componente. El comportamiento de la tasa de fallos con el tiempo es revelador de la causa que provoca el fallo. Por otra parte, la tasa de fallos, una vez ajustados los modelos de fiabilidad a la distribución de Weibull, puede expresarse de la siguiente manera:

$$Z(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$$

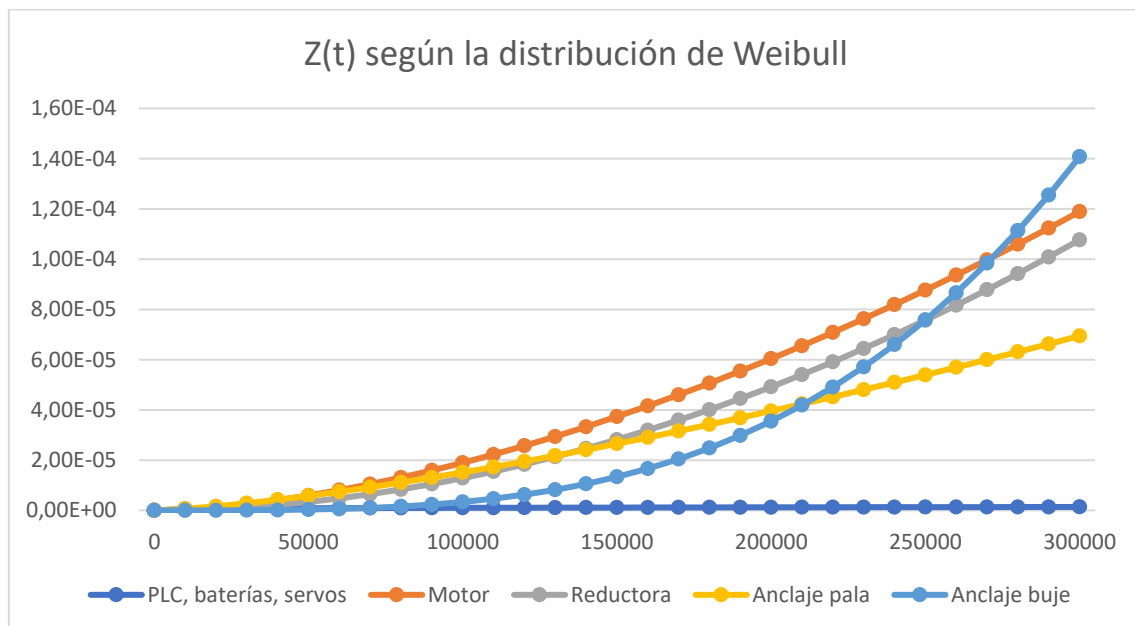


Figura 10. Tasa de fallos de los elementos por ajuste según la distribución de Weibull.

Por otra parte, también se ha calculado la densidad de fallos,  $f(t)$ , para cada elemento, según la distribución de Weibull. La gráfica que se mostró en la Figura 5 no era la densidad de fallos propiamente dicha, pues su valor en ordenadas era realmente la probabilidad de fallo dentro de un intervalo de 10.000 horas. Con la expresión de la distribución de Weibull para  $f(t)$  podemos representar gráficamente, ahora sí, la probabilidad de fallo del elemento, por unidad de tiempo, en cada instante  $t$ .

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}}$$

Dado que  $Z(t) := \frac{f(t)}{R(t)}$  también se puede calcular  $f(t)$  como el producto de  $Z(t)$  y  $R(t)$ .

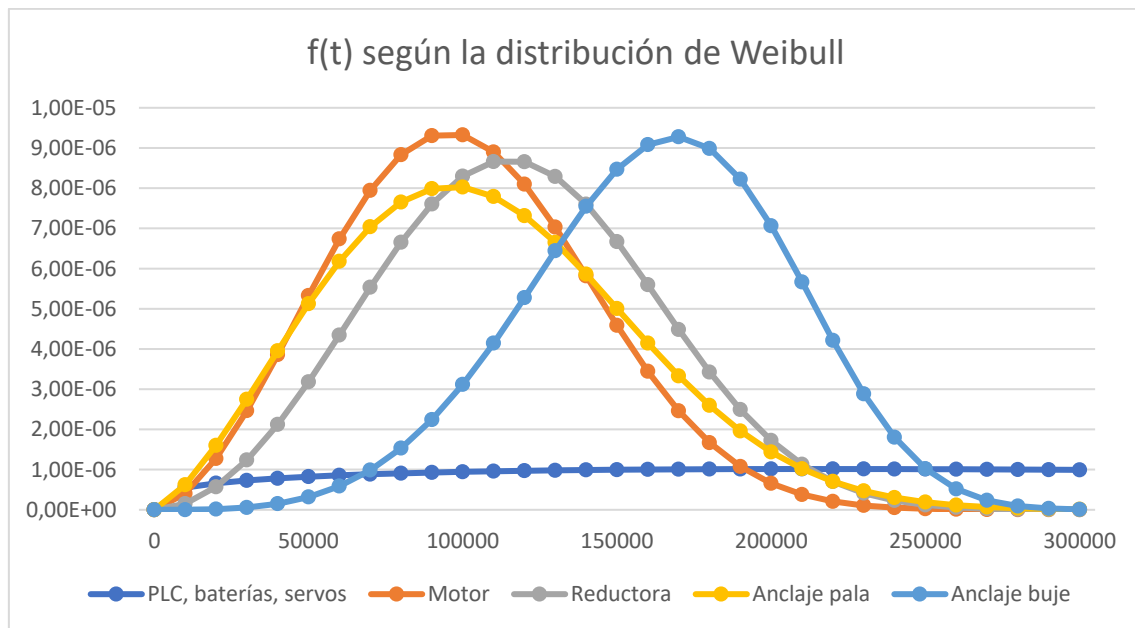


Figura 11. Densidad de fallos de los elementos por ajuste según la distribución de Weibull.

### 3.5 Vida media de los elementos

A partir de las expresiones matemáticas ajustadas de la fiabilidad de cada elemento es posible obtener su vida media. La vida media, también llamada tiempo medio entre fallos (MTBF por sus siglas en inglés), se define como el promedio del tiempo entre fallos de un sistema, supuesto que el sistema fallido se reparase inmediatamente. La expresión genérica para el cálculo de la vida media es la siguiente:

$$\theta = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

Para calcular numéricamente la integral asociada a los elementos que fallan de manera aleatoria, es necesario extender el eje de tiempos más allá de las 30.000 horas que se ha fijado desde el principio. El resultado de los MTBF es el que puede verse en la Tabla 4.

	Conjunto de PLC, baterías y servos	Motor	Reductora	Anclaje pala	Anclaje buje
MTBF (horas)	681323	106064	123149	112288	168466
MTBF (años)	77,8	12,1	14,1	12,8	19,2

Tabla 4. Vida media de los elementos.

### 3.6 Fiabilidad y vida media del sistema completo

En este apartado se obtiene la fiabilidad del sistema en su conjunto. Para ello es necesario componer las fiabilidades de los elementos individuales según la configuración serie-paralelo que se tenga. En este trabajo, el esquema lógico simplificado de la instalación completa, desde el punto de vista de la fiabilidad, es el mostrado en la Figura 12. Como ya se comentó, el fallo del sistema completo podrá ser ocasionado por un fallo en alguno de los elementos en serie del subsistema de frenado o por el fallo simultáneo de todos los elementos en paralelo del subsistema de anclaje.

Se recuerda que, en cuanto al subsistema de frenado, los motores de cada pala, así como sus respectivas reductoras, se consideran en serie, pues basta que no se haya podido girar 90º una de las palas para que el sistema comience a girar descontroladamente ante velocidades del viento excesivas. Por otra parte, el sistema de anclaje es redundante, debido a que solo uno de los dos tipos de enclavamientos que se describieron haría falta para garantizar que el sistema permanezca parado.

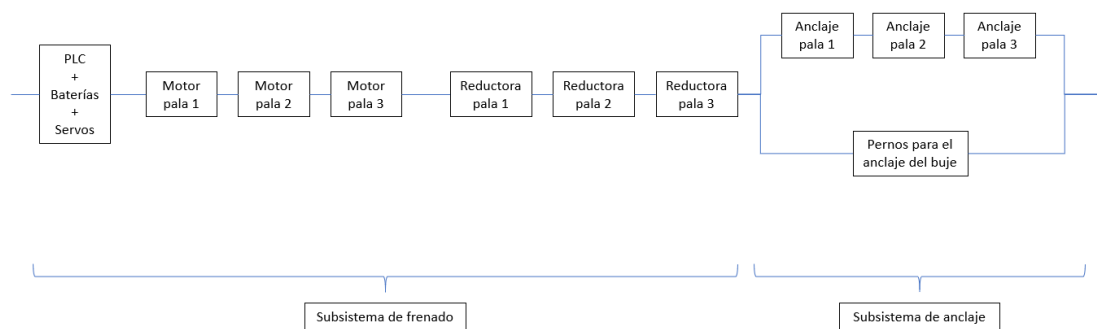


Figura 12. Esquema lógico serie-paralelo del sistema completo, desde el punto de vista de la fiabilidad.

Para lo que sigue, el subíndice E se referirá a los aparatos electrónicos; el subíndice M, al motor; el subíndice R, a la reductora, el subíndice AP, al anclaje de la pala, el subíndice AB, al anclaje del buje, y el subíndice S, al sistema global. Teniendo en cuenta que la in fiabilidad equivalente de un conjunto de elementos en paralelo es igual al producto de las in fiabilidades de los elementos por separado, y que la fiabilidad de un conjunto de elementos en serie es el producto de las fiabilidades individuales, la fiabilidad global del sistema analizado puede expresarse de la siguiente manera:

$$R_S = R_E \cdot R_M^3 \cdot R_R^3 \cdot (1 - (1 - R_{AP}^3) \cdot (1 - R_{AB}))$$

En la Figura 13 puede verse la representación de la fiabilidad del sistema completo, que resulta de aplicar la anterior expresión. Además, se ha calculado la vida media de todo el conjunto que puede verse también en la Tabla 5.

MTBF (horas)	60580
MTBF (años)	6,9

Tabla 5. Vida media del sistema completo.

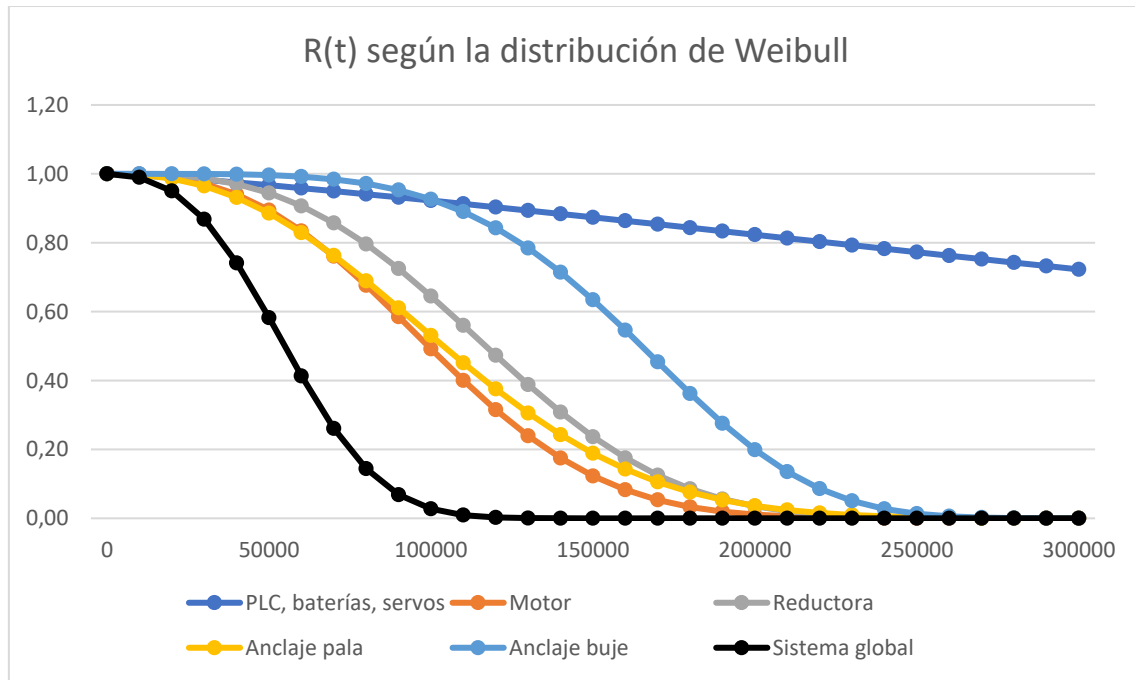


Figura 13. Fiabilidad del sistema global

La vida media del sistema completo es de aproximadamente 7 años, inferior a la de cualquiera de los componentes por separado, lo cual parece normal teniendo en cuenta que, en su mayor parte, el sistema está formado por elementos dispuestos en serie, desde el punto de vista del fallo del sistema.

El hecho de que varios de los elementos estén dispuestos en serie hace que la fiabilidad asociada al conjunto de esos elementos sea menor. Esto es lo que sucede con el subsistema del frenado y parece difícil de evitar. A este subsistema se le añade el de anclaje, también en serie, y, por tanto, la fiabilidad aún se decrementa un poco más. No obstante, la redundancia en el anclaje permite que la fiabilidad en este segundo subsistema sea alta y que no se reduzca de manera significativa la del conjunto por la adición de este segundo subsistema. Es claro que habría que aumentar la fiabilidad de los motores y la reductora para conseguir mejoras importantes en la fiabilidad del sistema, y con más razón si se tiene en cuenta que sus fiabilidades se encuentran elevadas al cubo en la expresión de la fiabilidad global.

### 3.7 Plan de mantenimiento

En este apartado se lleva a cabo el plan de mantenimiento del sistema del freno aerodinámico y su anclaje. Para abordarlo es necesario fijar primero una estrategia de mantenimiento según el tipo de fallo que sufre cada uno de los elementos. Para aquellos cuya tipología de fallo es de tipo determinista (senil) se aplica un plan de mantenimiento preventivo, es decir, programado. Este es el caso de los motores, las reductoras y los anclajes del buje y de cada pala. En cambio, para el conjunto de los sistemas electrónicos, que tienen una tipología de fallo aleatorio se aplica la estrategia de mantenimiento de tipo correctivo, es decir, se actúa solo cuando se produce el fallo, y no antes.

Duración, t(h)	R(t) según la distribución de Weibull					
	Conjunto de PLC, baterías y servos	Motor	Reductora	Anclaje pala	Anclaje buje	Sistema global
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10000	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99
20000	0,99	0,99	1,00	0,99	1,00	0,95
30000	0,98	0,97	0,99	0,96	1,00	0,87
40000	0,98	0,94	0,97	0,93	1,00	0,74
50000	0,97	0,89	0,94	0,89	1,00	0,58
60000	0,96	0,83	0,91	0,83	0,99	0,41
70000	0,95	0,76	0,86	0,76	0,98	0,26
80000	0,94	0,68	0,80	0,69	0,97	0,14
90000	0,93	0,59	0,72	0,61	0,95	0,07
100000	0,92	0,49	0,64	0,53	0,93	0,03
110000	0,91	0,40	0,56	0,45	0,89	0,01
120000	0,90	0,31	0,47	0,38	0,84	0,00
130000	0,89	0,24	0,39	0,31	0,78	0,00

Tabla 6. Tiempo para el cual la fiabilidad de los componentes que sufren fallo senil decae hasta el 90 %.

En la Tabla 6 se puede observar que, para que las fiabilidades del motor y de los anclajes de las palas caigan hasta el 90 %, han de pasar 50.000 horas. En el caso de la reductora ese tiempo es similar, cercano a las 60.000 horas; mientras que, para el anclaje del buje, resulta ser aproximadamente el doble que el de todos los anteriores: 110.000 horas. Este hecho permite elaborar un criterio para definir la frecuencia de actuación, que en cualquier caso consistiría en la sustitución del componente afectado por uno nuevo.

Se decide establecer este criterio atendiendo al concepto de mantenimiento de oportunidad. Se trata de agrupar las actuaciones de mantenimiento con el objetivo de mejorar la disponibilidad del sistema de freno. En concreto, se ha optado por sustituir los motores, la reductora y el anclaje de las palas cada 55.000 horas y el del buje, cada 110.000 horas. Los componentes electrónicos, por su parte, serán sustituidos cuando sufran un fallo. Hay que remarcar que, para establecer este criterio de actuación, no se ha tenido en cuenta la optimización de costes, que serán estudiados en un apartado más adelante. El plan de mantenimiento se resume de la siguiente manera:

❖ Mantenimiento correctivo:

- Componentes electrónicos (PLC, baterías y servos): Cuando se detecte el fallo.

*Hay que tener en cuenta que, en la realidad, posiblemente solo se sustituiría el elemento dañado, y no todos los demás. No obstante, para la elaboración de este trabajo, se ha considerado que estos elementos constituyen un único conjunto y que todos serían reemplazados si se detecta un fallo en la electrónica del sistema de freno.*

❖ Mantenimiento preventivo:

- Motor: actuación cada 60.000 horas.
- Reductora: actuación cada 60.000 horas.
- Anclaje pala: actuación cada 60.000 horas.
- Anclaje buje: actuación cada 120.000 horas.

En los cuadros recogidos en la Tabla 7 se muestra la evolución de la fiabilidad de cada elemento, que se ve alterada cuando se aplican las actuaciones programadas. Se han resaltado los cambios



en la fiabilidad, introducidos cuando se realiza la sustitución de los componentes. Para cada uno se obtiene, por tanto, una fiabilidad  $R'(t)$  modificada, fruto de estos cambios.

Fiabilidad del conjunto PLC, baterías y servos			Fiabilidad del motor				
t(h)	R(t)	R'(t) = R(t)	t(h)	R(t)	Modificaciones		R'(t)
0	1,00	1,00	0	1,00	1,00	1,00	1,00
10000	1,00	1,00	10000	1,00	1,00	1,00	1,00
20000	0,99	0,99	20000	0,99	0,99	0,99	0,99
30000	0,98	0,98	30000	0,97	0,97	0,97	0,97
40000	0,98	0,98	40000	0,94	0,94	0,94	0,94
50000	0,97	0,97	50000	0,89	0,89	0,89	0,89
60000	0,96	0,96	60000	0,83	1,00	1,00	1,00
70000	0,95	0,95	70000	0,76	1,00	1,00	1,00
80000	0,94	0,94	80000	0,68	0,99	0,99	0,99
90000	0,93	0,93	90000	0,59	0,97	0,97	0,97
100000	0,92	0,92	100000	0,49	0,94	0,94	0,94
110000	0,91	0,91	110000	0,40	0,89	0,89	0,89
120000	0,90	0,90	120000	0,31	0,83	1,00	1,00
130000	0,89	0,89	130000	0,24	0,76	1,00	1,00
140000	0,88	0,88	140000	0,17	0,68	0,99	0,99
150000	0,87	0,87	150000	0,12	0,59	0,97	0,97
160000	0,86	0,86	160000	0,08	0,49	0,94	0,94
170000	0,85	0,85	170000	0,05	0,40	0,89	0,89
180000	0,84	0,84	180000	0,03	0,31	0,83	1,00
190000	0,83	0,83	190000	0,02	0,24	0,76	1,00
200000	0,82	0,82	200000	0,01	0,17	0,68	0,99
210000	0,81	0,81	210000	0,01	0,12	0,59	0,97
220000	0,80	0,80	220000	0,00	0,08	0,49	0,94
230000	0,79	0,79	230000	0,00	0,05	0,40	0,89
240000	0,78	0,78	240000	0,00	0,03	0,31	0,83
250000	0,77	0,77	250000	0,00	0,02	0,24	0,76
260000	0,76	0,76	260000	0,00	0,01	0,17	0,68
270000	0,75	0,75	270000	0,00	0,01	0,12	0,59
280000	0,74	0,74	280000	0,00	0,00	0,08	0,49
290000	0,73	0,73	290000	0,00	0,00	0,05	0,40
300000	0,72	0,72	300000	0,00	0,00	0,03	0,31

Fiabilidad de la reductora				
t(h)	R(t)	Modificaciones		R'(t)
0	1,00	1,00	1,00	1,00
10000	1,00	1,00	1,00	1,00
20000	1,00	1,00	1,00	1,00
30000	0,99	0,99	0,99	0,99
40000	0,97	0,97	0,97	0,97
50000	0,94	0,94	0,94	0,94
60000	0,91	1,00	1,00	1,00
70000	0,86	1,00	1,00	1,00
80000	0,80	1,00	1,00	1,00
90000	0,72	0,99	0,99	0,99
100000	0,64	0,97	0,97	0,97
110000	0,56	0,94	0,94	0,94
120000	0,47	0,91	1,00	1,00
130000	0,39	0,86	1,00	1,00
140000	0,31	0,80	1,00	1,00
150000	0,24	0,72	0,99	0,99
160000	0,18	0,64	0,97	0,97
170000	0,12	0,56	0,94	0,94
180000	0,09	0,47	0,91	1,00
190000	0,06	0,39	0,86	1,00
200000	0,04	0,31	0,80	1,00
210000	0,02	0,24	0,72	0,99
220000	0,01	0,18	0,64	0,97
230000	0,01	0,12	0,56	0,94
240000	0,00	0,09	0,47	0,91
250000	0,00	0,06	0,39	0,86
260000	0,00	0,04	0,31	0,80
270000	0,00	0,02	0,24	0,72
280000	0,00	0,01	0,18	0,64
290000	0,00	0,01	0,12	0,56
300000	0,00	0,00	0,09	0,47

Fiabilidad del anclaje de la pala				
t(h)	R(t)	Modificaciones		R'(t)
0	1,00	1,00	1,00	1,00
10000	1,00	1,00	1,00	1,00
20000	0,99	0,99	0,99	0,99
30000	0,96	0,96	0,96	0,96
40000	0,93	0,93	0,93	0,93
50000	0,89	0,89	0,89	0,89
60000	0,83	1,00	1,00	1,00
70000	0,76	1,00	1,00	1,00
80000	0,69	0,99	0,99	0,99
90000	0,61	0,96	0,96	0,96
100000	0,53	0,93	0,93	0,93
110000	0,45	0,89	0,89	0,89
120000	0,38	0,83	1,00	1,00
130000	0,31	0,76	1,00	1,00
140000	0,24	0,69	0,99	0,99
150000	0,19	0,61	0,96	0,96
160000	0,14	0,53	0,93	0,93
170000	0,11	0,45	0,89	0,89
180000	0,08	0,38	0,83	1,00
190000	0,05	0,31	0,76	1,00
200000	0,04	0,24	0,69	0,99
210000	0,02	0,19	0,61	0,96
220000	0,02	0,14	0,53	0,93
230000	0,01	0,11	0,45	0,89
240000	0,01	0,08	0,38	0,83
250000	0,00	0,05	0,31	0,76
260000	0,00	0,04	0,24	0,69
270000	0,00	0,02	0,19	0,61
280000	0,00	0,02	0,14	0,53
290000	0,00	0,01	0,11	0,45
300000	0,00	0,01	0,08	0,38

Fiabilidad del anclaje del buje			
t(h)	R(t)	Modificaciones	R'(t)
0	1,00	1,00	1,00
10000	1,00	1,00	1,00
20000	1,00	1,00	1,00
30000	1,00	1,00	1,00
40000	1,00	1,00	1,00
50000	1,00	1,00	1,00
60000	0,99	0,99	0,99
70000	0,98	0,98	0,98
80000	0,97	0,97	0,97
90000	0,95	0,95	0,95
100000	0,93	0,93	0,93
110000	0,89	0,89	0,89
120000	0,84	1,00	1,00
130000	0,78	1,00	1,00
140000	0,71	1,00	1,00
150000	0,63	1,00	1,00
160000	0,55	1,00	1,00
170000	0,45	1,00	1,00
180000	0,36	0,99	0,99
190000	0,28	0,98	0,98
200000	0,20	0,97	0,97
210000	0,14	0,95	0,95
220000	0,09	0,93	0,93
230000	0,05	0,89	0,89
240000	0,03	0,84	1,00
250000	0,01	0,78	1,00
260000	0,01	0,71	1,00
270000	0,00	0,63	1,00
280000	0,00	0,55	1,00
290000	0,00	0,45	1,00
300000	0,00	0,36	0,99

Fiabilidad del sistema		
t(h)	R(t)	R'(t)
0	1,00	1,00
10000	0,99	0,99
20000	0,95	0,95
30000	0,87	0,87
40000	0,74	0,74
50000	0,58	0,58
60000	0,41	0,96
70000	0,26	0,94
80000	0,14	0,90
90000	0,07	0,82
100000	0,03	0,69
110000	0,01	0,53
120000	0,00	0,90
130000	0,00	0,89
140000	0,00	0,85
150000	0,00	0,77
160000	0,00	0,66
170000	0,00	0,51
180000	0,00	0,84
190000	0,00	0,83
200000	0,00	0,79
210000	0,00	0,71
220000	0,00	0,60
230000	0,00	0,46
240000	0,00	0,78
250000	0,00	0,77
260000	0,00	0,73
270000	0,00	0,66
280000	0,00	0,56
290000	0,00	0,44
300000	0,00	0,31

Tabla 7. Modificaciones en la fiabilidad del sistema y sus elementos cuando se aplica el plan de mantenimiento descrito.

La Figura 14 es una representación gráfica de los anteriores resultados. En ella se observa que, cuando se reponen simultáneamente todos los elementos que sufren deterioro progresivo, la fiabilidad del sistema completo resulta ser igual a la del conjunto PLC+baterías+servos. Eso tiene sentido dado que, en el esquema lógico, ese grupo está colocado en serie y, en ese instante, la fiabilidad del resto de elementos es del 100 %. Por otra parte, el carácter decreciente de la curva de fiabilidad del sistema se debe también a que la fiabilidad de esos elementos electrónicos está continuamente cayendo. Caerá hasta que se produzca en ellos el fallo y sea necesario realizar una intervención correctiva sobre ellos.

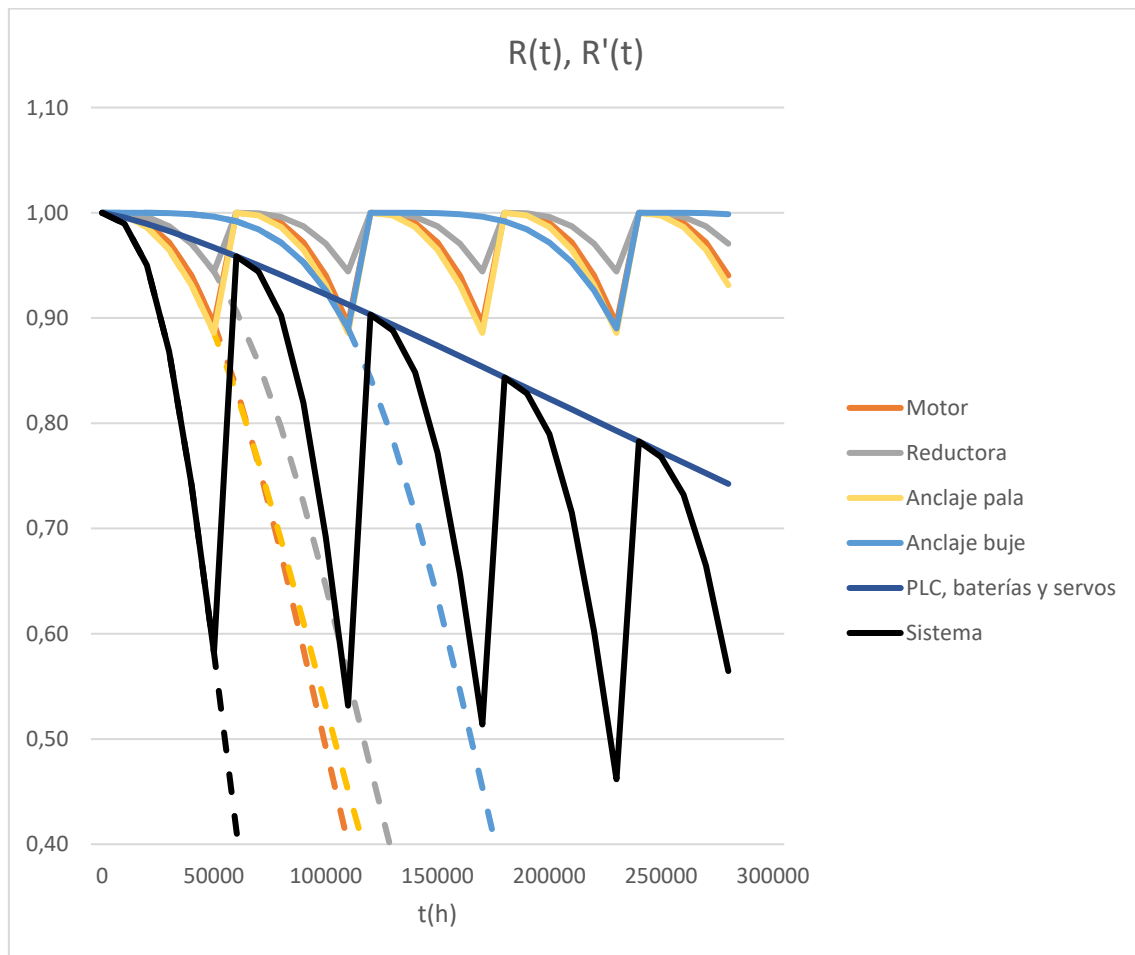


Figura 14. Evolución de la fiabilidad del sistema y de sus elementos, modificada con el plan de mantenimiento descrito.

Se considera adecuado el plan de mantenimiento propuesto en cuanto a que permite un aumento considerable de la fiabilidad a partir de las 60.000 horas. No obstante, hay que reseñar que es inaceptable que un operario que se dirige a realizar la sustitución de los componentes lo tenga que hacer en un instante en el que el sistema tiene una fiabilidad del 60 %. Ese valor de fiabilidad se debe al hecho de que se haya propuesto, en primera instancia, un plan de mantenimiento que consiste en sustituir algunos de los componentes cuando su fiabilidad decae hasta el 90 %. En ese caso la fiabilidad del sistema sería entorno al 60 % (tal y como podía comprobarse, desde antes de abordar el plan de mantenimiento, trazando una línea vertical en la Figura 13 a un tiempo en el que se consigue la fiabilidad del 90 % en motor, reductora y anclaje de palas, y ver el punto de corte con la curva de fiabilidad del sistema completo).

La conclusión que se extrae del párrafo anterior es que, al ser este un sistema complejo (con un total de 11 elementos, de los cuales la mayoría están en serie) se deberían sustituir los anteriores tres elementos citados, no cuando su fiabilidad caiga un 10 %, sino antes (cuando caiga un 5 %, por ejemplo, o menos) para que la disminución de la fiabilidad del sistema no sea tan acusada. Como se desconocen los límites de seguridad para esta clase de aparatos, se ha decidido continuar con el plan de mantenimiento propuesto, a pesar de que, seguramente, no se corresponda con un plan de mantenimiento real de frenos aerodinámicos de aerogenerador.

Naturalmente, el sistema de freno que se ha descrito, y para el cual se ha explicado el plan de mantenimiento, forma parte de un conjunto más grande: el aerogenerador completo. Este cuenta con otros sistemas, además del propio freno, como son el conjunto generador, el sistema para rotar la cabeza del aerogenerador, la estación meteorológica, etc. Para diseñar un plan de mantenimiento integral de todo el aerogenerador, sería necesario, por tanto, tener un historial de fallos de todos sus sistemas, además del historial del freno que se ha analizado.

No obstante, para realizar este trabajo, se ha considerado que el freno aerodinámico está suficientemente independizado del resto de sistemas, de modo que también parece lógico llevar a cabo un plan de mantenimiento particular para este conjunto. De hecho, el freno y su anclaje están directamente asociados con la empresa Moog, mientras que otros sistemas del aerogenerador podrían tener relación con otras empresas diferentes. Esto no hace sino confirmar que la estrategia de realizar un plan de mantenimiento particularizado a cada sistema del aerogenerador puede ser la idea más adecuada.

## 4. Mantenibilidad

### 4.1 Tiempos de reparación

La mantenibilidad de cada uno de los elementos puede obtenerse a partir de una tabla de tiempos de reparación. La Tabla 8 recoge información acerca de esos tiempos de reparación, en horas, asociados a los elementos, a partir de una muestra de 100 unidades para cada uno.

Duración, t(h)	Número de reparaciones, i					Frecuencia de reparaciones, g(t) = i/n				
	Conjunto de PLC, baterías y servos	Motor	Reductora	Anclaje pala	Anclaje buje	Conjunto de PLC, baterías y servos	Motor	Reductora	Anclaje pala	Anclaje buje
0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0	9	15	4	0	0,00	0,09	0,15	0,04	0,00
3	0	24	33	16	4	0,00	0,24	0,33	0,16	0,04
4	0	27	29	34	13	0,00	0,27	0,29	0,34	0,13
5	2	19	16	24	23	0,02	0,19	0,16	0,24	0,23
6	5	11	5	11	28	0,05	0,11	0,05	0,11	0,28
7	16	6	2	6	16	0,16	0,06	0,02	0,06	0,16
8	29	2	0	3	9	0,29	0,02	0,00	0,03	0,09
9	33	1	0	1	5	0,33	0,01	0,00	0,01	0,05
10	15	1	0	1	1	0,15	0,01	0,00	0,01	0,01
11	0	0	0	0	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
12	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	100	100	100	100	100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabla 8. Historial de tiempos de reparación de los elementos.

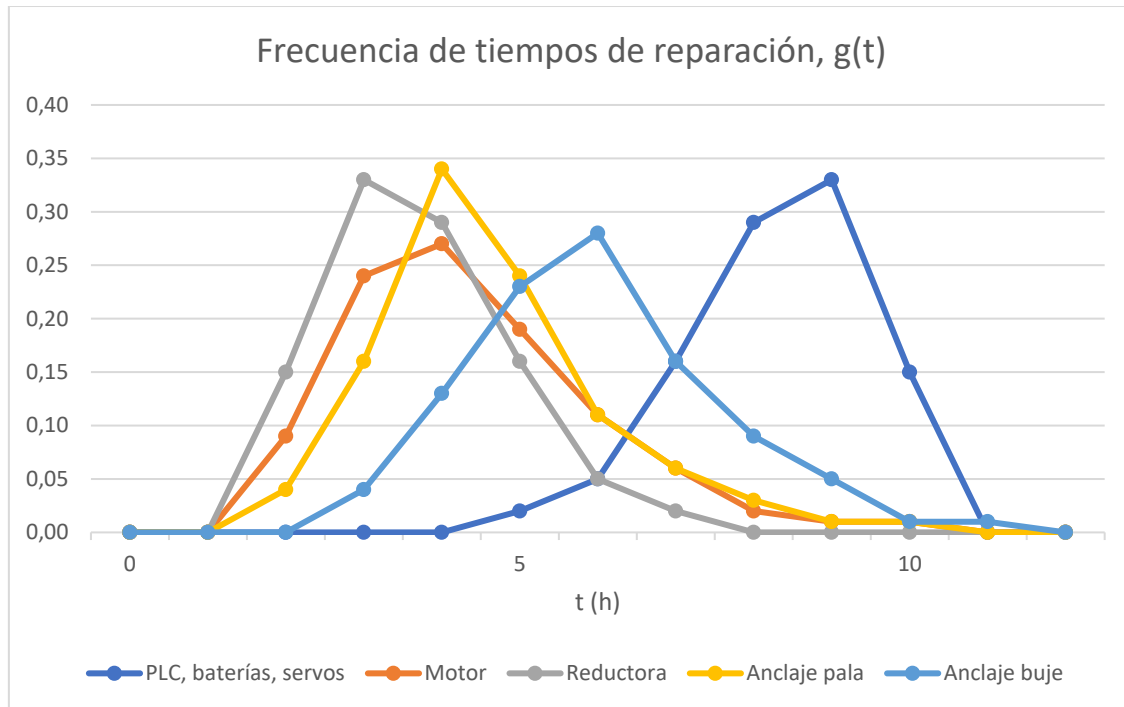


Figura 15. Frecuencia de tiempos de reparación de los elementos.

En la Figura 15 se representan gráficamente los valores recogidos en el historial de la Tabla 8. Se obtienen como resultado las curvas de frecuencia de tiempos de reparación para cada componente. Estas distribuciones son similares a la de densidad de probabilidad de fallo, pero con la diferencia de que en ellas se representa la posibilidad de fallo en un intervalo de 1 hora en vez de un instante de tiempo.

#### 4.2 Mantenibilidad de los elementos

A partir de los datos se obtiene, a continuación, la mantenibilidad para cada elemento. Y a partir de esto último es posible ajustar las distribuciones de valores en el tiempo a una distribución estadística conocida. La mantenibilidad puede calcularse realizando el acumulado de los valores de frecuencia de fallos, para cada instante temporal y desde el origen de tiempos. La Tabla 9 muestra los resultados de estos cálculos.

Duración, t(h)	Mantenibilidad, M(t)				
	Conjunto de PLC, baterías y servos	Motor	Reductora	Anclaje pala	Anclaje buje
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,09	0,15	0,04	0,00
3	0,00	0,33	0,48	0,20	0,04
4	0,00	0,60	0,77	0,54	0,17
5	0,02	0,79	0,93	0,78	0,40
6	0,07	0,90	0,98	0,89	0,68
7	0,23	0,96	1,00	0,95	0,84
8	0,52	0,98	1,00	0,98	0,93
9	0,85	0,99	1,00	0,99	0,98
10	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99
11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
12	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabla 9. Mantenibilidad de los elementos.

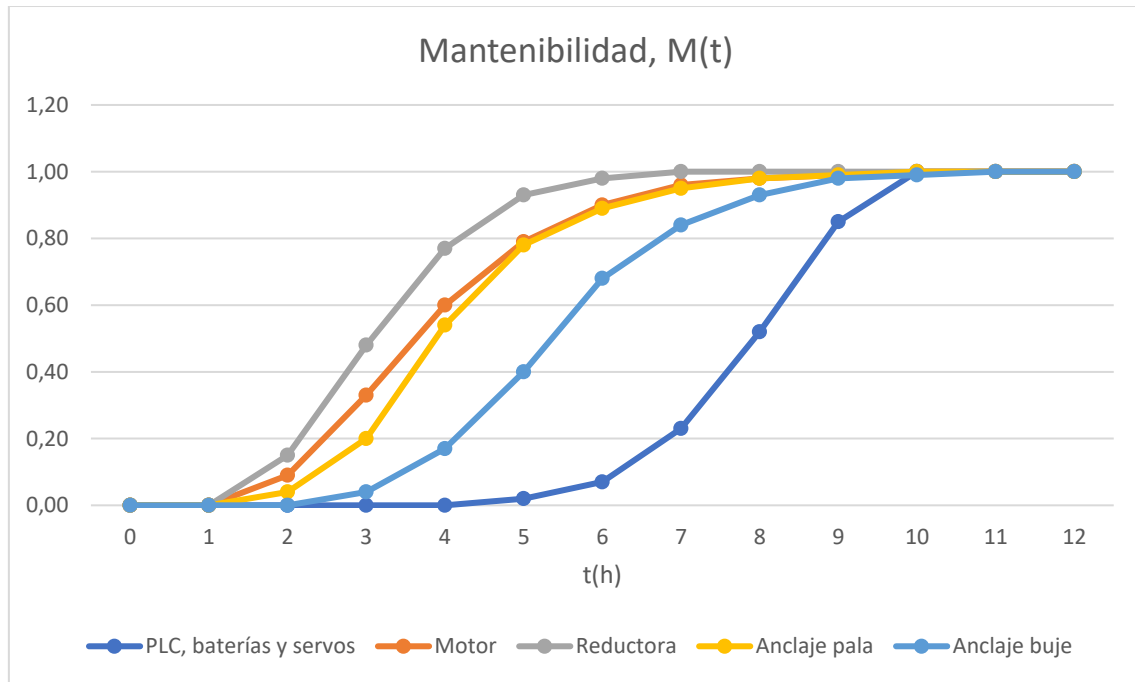


Ilustración 16. Representación gráfica de la mantenibilidad de los elementos.

La Figura 16 es la representación de los resultados de mantenibilidad de los componentes. De manera similar a lo que se comentó cuando se expusieron las gráficas de fiabilidad, la de mantenibilidad corrige en cierta medida la componente aleatoria y permite obtener una representación más suavizada que la que se ha mostrado en la Figura 15 (frecuencia de los tiempos de reparación).

#### 4.3 Ajuste a distribución de Weibull de los elementos

Con el objetivo de reflejar de manera matemática la tendencia de la distribución real de tiempos de reparación, para cada componente, se ha decidido ajustar las nubes de puntos a una distribución de probabilidad de Weibull. La expresión que toma la mantenibilidad cuando se ajusta a este tipo de distribución continua es:

$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

La ecuación anterior queda simplificada dado que el origen de tiempos se toma en  $t = 0$ . Por otra parte, para duración nula se ha considerado una fiabilidad del 100 % para todos los elementos. Por tanto,  $\gamma = 0$  y se tienen solo dos parámetros de ajuste.

$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}$$

Para llevar a cabo el ajuste se toman logaritmos dos veces a un lado y al otro de la anterior ecuación. De este modo, es posible ajustar por mínimos cuadrados la nube de puntos a una recta de pendiente  $\beta$  y ordenada en el origen igual a  $-\beta \cdot \ln(\eta)$ . La última expresión queda de la siguiente manera al aplicar dos veces los logaritmos:

$$\ln(-\ln(1 - M(t))) = \beta \cdot (\ln(t) - \ln(\eta))$$

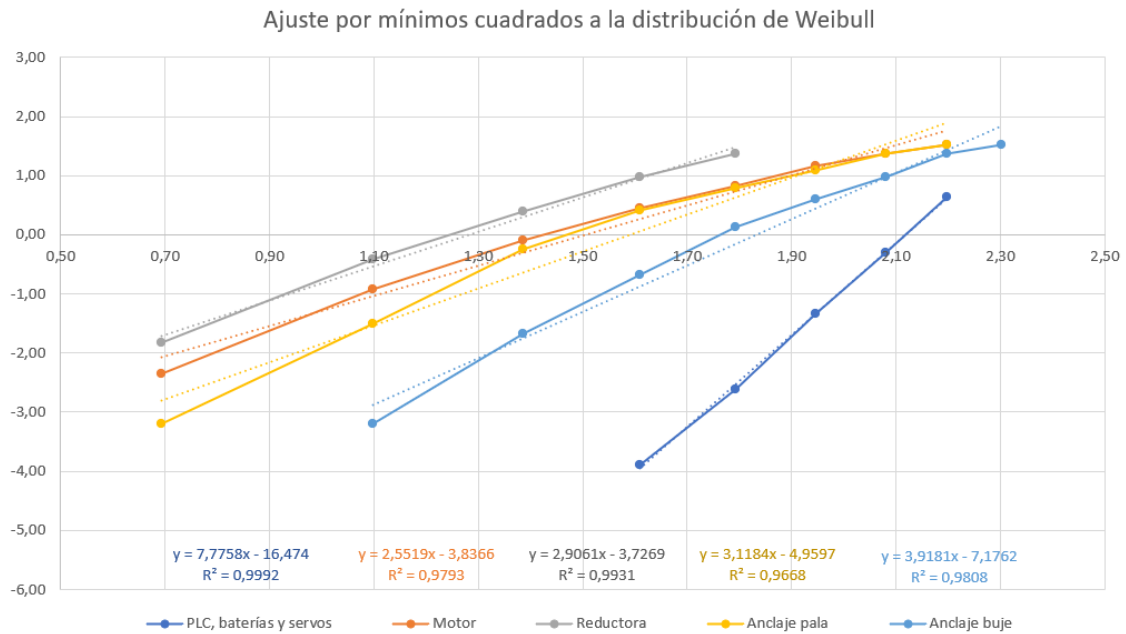


Figura 17. Ajuste por mínimos cuadrados según la distribución de probabilidad de Weibull

Para los ajustes, se han eliminado aquellos valores que se alejan de la recta de regresión; esos datos se consideran anómalos. En la Figura 17 puede verse que las distribuciones de Weibull se ajustan adecuadamente a las nubes de puntos de mantenibilidad. De hecho, los coeficientes de determinación  $R^2$  están comprendidos entre 0,96 y 0,99.

	$\beta$	$-\beta \cdot \ln(\eta)$	$\eta$
Conjunto de PLC, baterías y servos	7,78	-16,47	8,32
Motor	2,55	-3,84	4,50
Reductora	2,91	-3,73	3,61
Anclaje pala	3,12	-4,96	4,91
Anclaje buje	3,92	-7,18	6,24

Tabla 10. Coeficientes del ajuste de las distribuciones de mantenibilidad.

Conocido el valor de los parámetros de la regresión para cada elemento, es posible representar las mantenibilidades de nuevo, pero ahora según esta distribución. Esto puede verse en la Figura 18.

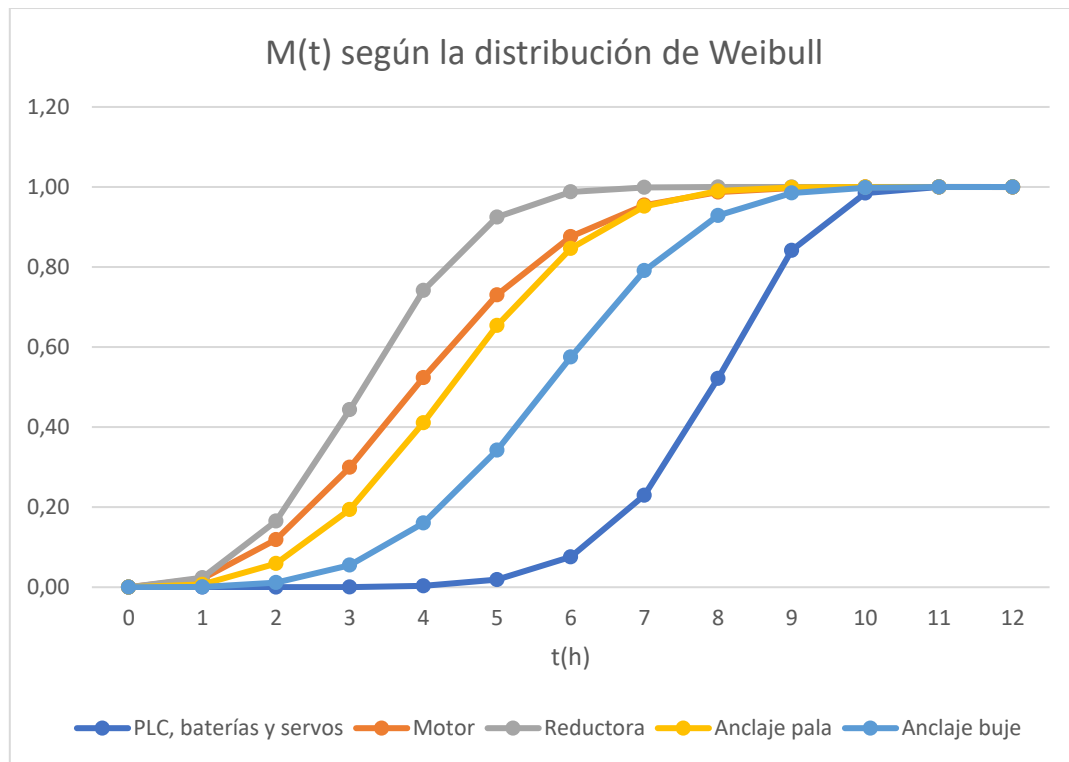


Ilustración 18. Mantenibilidad de los elementos por ajuste según la distribución de Weibull.

#### 4.4 Tiempos probables de reparación de los elementos

A partir de las expresiones matemáticas de mantenibilidad de cada elemento podemos obtener varios valores de cada distribución que aportan una información bastante representativa. Se trata de los tiempos probables para terminar un porcentaje de reparaciones; normalmente,  $TTR_{50}$ ,  $TTR_{90}$ ,  $TTR_{95}$ , etc. (en inglés, *Time To Repair*). Generalmente, el tiempo medio de reparación (MTTR, por sus siglas en inglés), es un valor asimilable al de la vida media cuando se habla de fiabilidad. Sin embargo, no coincide con el tiempo probable de reparación del 50% de los casos,  $TTR_{50}$ , lo cual puede parecer a primera vista antintuitivo.

$$M(TTR_{50}) = 1 - e^{-\left(\frac{TTR_{50}}{\eta}\right)^\beta} = 0,5$$

$$M(TTR_{90}) = 1 - e^{-\left(\frac{TTR_{90}}{\eta}\right)^\beta} = 0,9$$

$$M(TTR_{95}) = 1 - e^{-\left(\frac{TTR_{95}}{\eta}\right)^\beta} = 0,95$$

Resolviendo las anteriores tres ecuaciones para cada elemento se obtienen los siguientes tiempos probables de reparación:

	Conjunto de PLC, baterías y servos	Motor	Reductora	Anclaje pala	Anclaje buje
TTR50 (h)	7,94	3,90	3,18	4,36	5,69
TTR90 (h)	9,26	6,24	4,80	6,41	7,72
TTR95 (h)	9,58	6,91	5,26	6,97	8,26

Tabla 11. Tiempos probables para terminar un 50, 90 95 % de reparaciones, para cada uno de los elementos.

#### 4.5 Mantenibilidad del sistema completo

En este apartado se obtiene la mantenibilidad del sistema en su conjunto, de manera similar a como se calculó la fiabilidad. Para ello es necesario componer las fiabilidades de los elementos individuales según la configuración serie-paralelo que se tenga. Aquellos elementos que se asociaban en serie desde el punto de vista de la fiabilidad lo hacen en paralelo desde el punto de vista de la mantenibilidad, y viceversa.

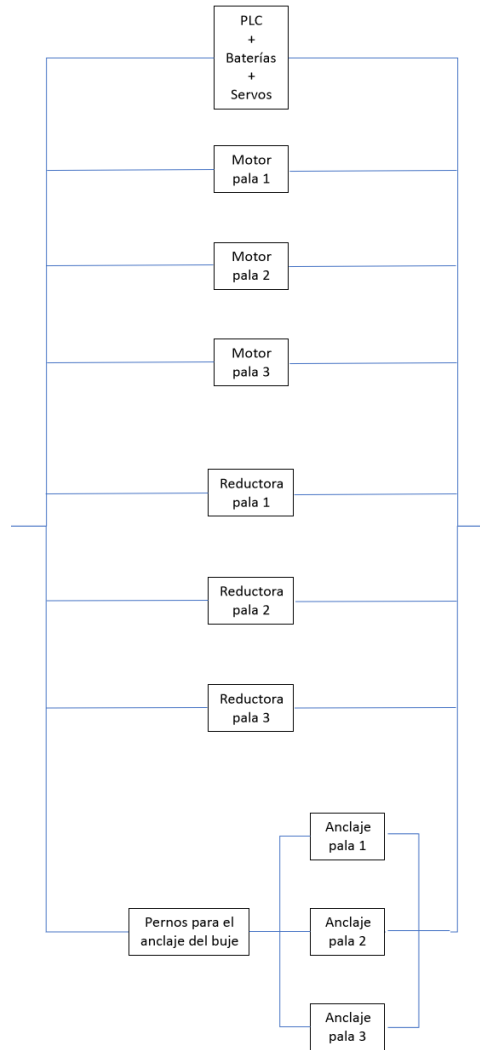


Figura 19. Esquema lógico del sistema desde el punto de vista de la mantenibilidad.

Se recuerda que el subíndice E se refiere a los aparatos electrónicos; el subíndice M, al motor; el subíndice R, a la reductora, el subíndice AP, al anclaje de la pala, el subíndice AB, al anclaje del buje, y el subíndice S, al sistema global. Teniendo en cuenta que la mantenibilidad equivalente de un conjunto de elementos en serie es igual al producto de las mantenibilidades de los elementos por separado, y que uno menos la mantenibilidad de un conjunto de elementos en paralelo es el producto de uno menos la individual de cada componente, la mantenibilidad global del sistema analizado puede expresarse de la siguiente manera:

$$1 - M_S = (1 - M_E) \cdot (1 - M_M)^3 \cdot (1 - M_R)^3 \cdot (1 - (M_{AB} \cdot (1 - (1 - M_{AP})^3)))$$

$$M_S = 1 - (1 - M_E) \cdot (1 - M_M)^3 \cdot (1 - M_R)^3 \cdot (1 - (M_{AB} \cdot (1 - (1 - M_{AP})^3)))$$



En la Figura 20 puede verse la representación de la mantenibilidad del sistema completo, que resulta de aplicar la última expresión. Se calculan además para el sistema completo los tiempos probables para reparar un 50, 90 y 95 % de los casos, y, en este sistema global, también el tiempo medio de reparación, que se usará para definir la disponibilidad del sistema. Los resultados finales pueden observarse en la Tabla 12.

Duración, t(h)	M(t) según la distribución de Weibull					Sistema global
	Conjunto de PLC, baterías y servos	Motor	Reductora	Anclaje pala	Anclaje buje	
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,00	0,02	0,02	0,01	0,00	0,13
2	0,00	0,12	0,17	0,06	0,01	0,60
3	0,00	0,30	0,44	0,19	0,06	0,94
4	0,00	0,52	0,74	0,41	0,16	1,00
5	0,02	0,73	0,92	0,65	0,34	1,00
6	0,08	0,88	0,99	0,85	0,57	1,00
7	0,23	0,95	1,00	0,95	0,79	1,00
8	0,52	0,99	1,00	0,99	0,93	1,00
9	0,84	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00
10	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
12	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

TTR50 (h)	7,94	3,90	3,18	4,36	5,69	<b>1,81</b>
TTR90 (h)	9,26	6,24	4,80	6,41	7,72	<b>2,77</b>
TTR95 (h)	9,58	6,91	5,26	6,97	8,26	<b>3,04</b>

MTTR (horas)	<b>1,89</b>
--------------	-------------

Tabla 12. Resultados finales de mantenibilidad. Tiempos probables para reparar un 50, 90 y 95 % de los casos y MTTR del sistema global

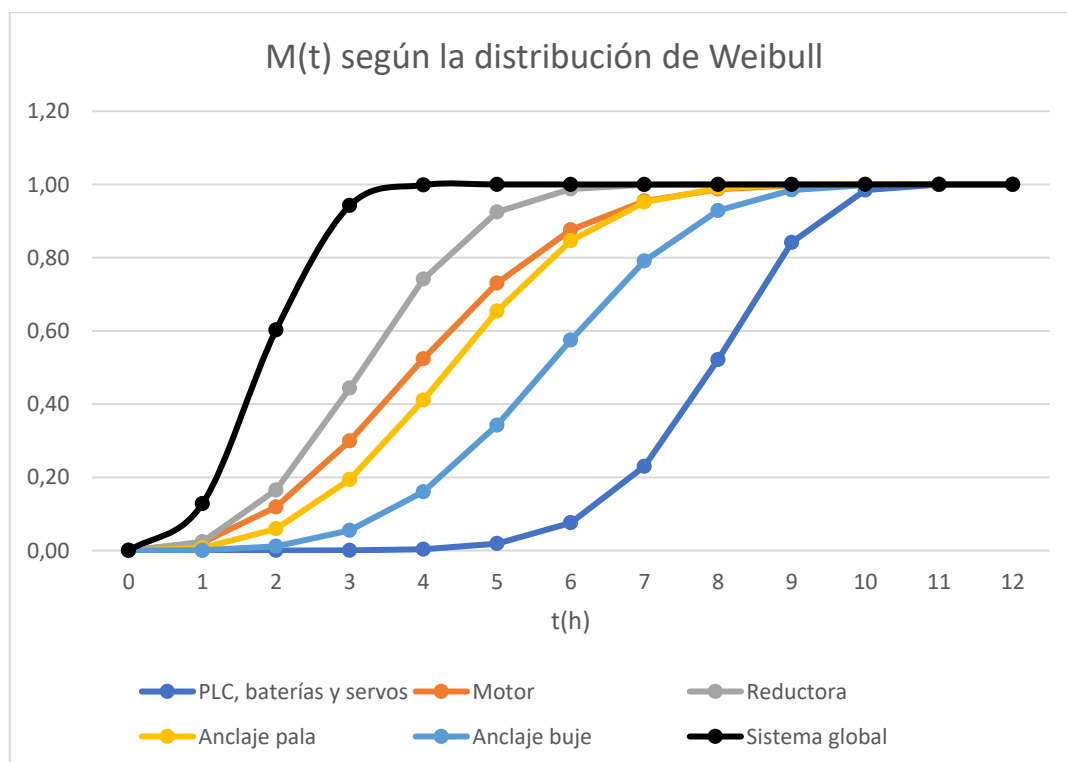


Figura 20. Mantenibilidad del sistema global

El tiempo medio de reparación del sistema global puede calcularse según la expresión que se presenta a continuación. Resolviendo la ecuación se obtiene que el MTTR del sistema es de 1,89 horas, ligeramente inferior al  $TTR_{50}$ .

$$MTTR = \int_0^{\infty} 1 - M(t) dt$$

## 5. Disponibilidad

En este apartado se introduce de manera somera el concepto de disponibilidad del sistema de freno aerodinámico. La disponibilidad instantánea daría información acerca de la probabilidad de que el sistema se encontrase disponible, es decir, con capacidad operativa de funcionamiento, en un instante de tiempo determinado. Teniendo en cuenta que la indisponibilidad puede suponer una pérdida muy importante dentro de los costes de mantenimiento y operación de los equipos, se trata de un parámetro fundamental y una herramienta de análisis crítica.

En la práctica resulta complejo evaluar la disponibilidad instantánea y conocer su evolución temporal, dado que depende de numerosos factores. No obstante, en muchas de ocasiones y a efectos prácticos, basta con conocer la disponibilidad media para predecir el comportamiento del sistema, como primera aproximación. Esta disponibilidad media se define por medio de la siguiente expresión:

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

A partir de los resultados que se han obtenido de tiempo medio entre fallos y tiempo medio de reparación del sistema se concluye que la disponibilidad media es de 0,999968; lo que quiere decir que, por término medio, el 99,9968% del tiempo el freno aerodinámico estaría funcionando.

MTBF (horas)	60580
MTTR (horas)	1,89
D	0,99996882 99,9968817 %

Tabla 13. Tiempo medio entre fallos, tiempo medio de reparación y disponibilidad del sistema.

## 6. Costes del plan de mantenimiento

Se han considerado dos tipos de costes a la hora de realizar apartado, los costes fijos y los variables. Los primeros engloban los costes de herramientas necesarias para llevar a cabo las tareas de mantenimiento, así como los de los propios elementos que deben ser sustituidos. Los costes variables, por su parte, se relacionan con los trabajadores que realizan el mantenimiento y con el coste de indisponibilidad, que cuantifica las pérdidas monetarias cuando se da una falta de operatividad del sistema. Para los elementos repetidos que sufren deterioro progresivo, es decir los motores, los anclajes de las palas y las reductoras, el cambio de todos componentes de cada tipo se hace de manera simultánea y por ello se ha decidido englobar el coste de repuestos de los tres motores, los tres anclajes de las palas y las tres reductoras tal y como puede verse en la Tabla 14.

El coste asociado a la mano de obra varía con el tipo de elemento de que se trate; en primer lugar, porque el número de operarios necesarios es diferente para cada uno y, en segundo, porque el coste horario de mantenimiento de los componentes electrónicos se eleva, al tratarse de un tipo de elemento cuyas acciones tienen que ser correctoras, por sufrir fallos de tipo aleatorio. Para este grupo de elementos el coste de indisponibilidad también será mayor.

	Costes	Conjunto de PLC, baterías y servos	Motor	Reductora	Anclaje pala	Anclaje buje
Fijos	Repuestos	10000,00	15000,00	25000,00	2000,00	8000,00
	Herramientas	40,00	70,00	800,00	30,00	50,00
Variables	TTR50 (h)	7,94	3,90	3,18	4,36	5,69
	Tiempo de acondicionamiento (h)	4,00	2,00	3,00	2,00	2,00
	Tiempo de inmovilizado (h)	18,00	7,00	7,00	8,00	9,00
	Indisponibilidad (€/h)	10000,00	4000,00	4000,00	1500,00	2000,00
	Mano de obra (€/h)	110,00	60,00	60,00	50,00	40,00
	Total	191353,03	43423,73	54170,69	14348,10	26357,44

Tabla 14. Costes por elementos del plan de mantenimiento.

En cuanto al coste horario, se ha decidido tomar como parámetro para realizar los cálculos el tiempo medio de reparación,  $TTR_{50}$ . Dado que un parque eólico consta de decenas de aerogeneradores resulta lógico considerar que el tiempo real de reparación será mayor en unos aerogeneradores y menor en otros, de modo que seleccionar el  $TTR_{50}$  parece sensato. No obstante, en el caso de que se contaran con pocos aerogeneradores, sería más conservador realizar los cálculos de costes con el  $TTR_{90}$ , aunque estos resultarían ser más elevados. Finalmente, es necesario incluir también un tiempo de acondicionamiento que, de nuevo, será mayor para el caso de los elementos cuya tipología de fallo es no determinista, pero también para el caso de las reductoras dado que, por sus dimensiones, sus tiempos asociados de acondicionamiento en general se dilatan más.

Costes totales		
Conjunto de PLC, baterías y servos	191.353,03 €	Cuando se produzca el fallo
Motor	43.423,73 €	Cada 60000 horas
Reductora	54.170,69 €	Cada 60000 horas
Anclaje pala	14.348,10 €	Cada 60000 horas
Anclaje buje	26.357,44 €	Cada 120000 horas
Total coste preventivo cada 120000 h	250.242,48 €	

Tabla 15. Costes totales del plan de mantenimiento.

Como se aprecia en la Tabla 15, es posible agrupar los costes del mantenimiento preventivo cada 120.000 horas, de acuerdo con los tiempos que se establecieron para sustituir los elementos que sufren deterioro progresivo. El coste por mantenimiento preventivo es, por tanto, 250.242 € cada 120.000 horas (13,7 años), mientras que el coste por mantenimiento correctivo es de 191.353 €. Este último solo se computaría en el caso de producirse un fallo.

## 7. Referencias

- [1] *Windmill destructed in storm*. Video de youtube. Sitio web: <https://www.youtube.com/watch?v=oAWMpxX60KM>
- [2] *Pitch Control*. Video de youtube. Sitio web: [https://www.youtube.com/watch?v=0ZU5AMlx\\_38&t=7s](https://www.youtube.com/watch?v=0ZU5AMlx_38&t=7s)
- [3] Ficha técnica en pdf del *Pitch Servo Drive* de Moog. <https://www.moog.it/content/dam/moog/literature/ICD/Moog-Wind-PitchServoDrive-Catalog-en.pdf>
- [4] Coronado González, Tomás (2019). Modelización por elementos finitos y simulación 3D de aerogeneradores HAWT. Trabajo Fin de Grado, E.T.S.I. Industriales (UPM).
- [5] *Así funciona el freno aerodinámico de un aerogenerador*. Video de youtube. Sitio web: <https://www.youtube.com/watch?v=06zOsrUNmsc>
- [6] *Moog's New Pitch Control System Improves Wind Turbine Reliability by up To Three Times over Existing Systems* (2016). Moog web: [https://www.moog.com/news/operating-group-news/2016/New\\_Pitch\\_Control\\_System.html](https://www.moog.com/news/operating-group-news/2016/New_Pitch_Control_System.html)