

Diagnóstico del Riesgo y Medidas de Protección para Incendios en Turbinas Eólicas

MEMORIA

Autor: Rafael Torres Silva
Director: Ricard Bosch Tous
Convocatòria: Octubre 2016

Màster en Enginyeria de l'Energia



Màster en Enginyeria de l'Energia

Sol·licitud d'acceptació de presentació del Treball Final de Màster i sol·licitud de defensa pública.

Alumne: **RAFAEL TORRES SILVA**

DNI: **Y1467126-Q**

Títol: **Diagnóstico del Riesgo y Medidas de Protección para Incendios
en Turbinas Eólicas**

Director: **RICARD BOSCH TOUS**

Acceptació de la presentació del Treball:

Confirmo l'acceptació de la presentació del Treball Final de Màster.

Per a que consti,

Cognoms, nom (director del Treball)

Sol·licito:

La defensa pública del meu Treball Final de Màster.

Per a que consti,

Cognoms, nom (Alumne)

Barcelona, de de



Resumen de la Memoria

Los incendios en aerogeneradores son una realidad en parques eólicos de todo el mundo. Es un tema poco discutido pero donde están involucrados mil millones de euros en siniestros al año. Específicamente en el sector eólico las normativas son poco estrictas y, por lo tanto, las guías de buenas prácticas se destacan como fuente de información para prevenir accidentes. Este trabajo se centrará en los posibles riesgos de incendio en los aerogeneradores, bien como su prevención. Además se abordarán las últimas tecnologías de detección y extinción de incendios para este sector. Por último, se exemplificarán y se comentarán estos riesgos en una análisis casuística.



Índice

Resumen de la Memoria.....	3
Introducción.....	6
1. Nociones básicas de incendios	8
1.1 La combustión	8
1.2 Materiales combustibles en turbinas eólicas.....	9
2. Directrices y certificados internacionales de protección contra incendios..	10
2.2 Directiva 2006/42 / CE.....	10
2.3 Certificado internacional DNV GL SE0077	11
3. Buenas prácticas de prevención y extinción.....	11
3.1 NFPA 850	11
3.2 NTP 1022 1023 y 1024	13
4. Riesgos.....	14
4.1 Caída de rayos.....	14
4.2 Fallos mecánicos e hidráulicos.....	16
4.3 Fallo en las instalaciones eléctricas.....	17
5. Sistemas pasivos de protección contra incendios	18
5.1 Protecciones contra rayos.....	18
5.2 Minimizar los riesgos en los sistemas eléctricos.....	23
5.3 Recubrimientos de protección contra Incendios	24
5.4 Mantenimiento	25
5.5 Formación	26
5.6 Seguros	26
6. Sistemas activos de protección contra incendios	27
6.1 Detección	27
6.1.1 Detector de llama por infrarrojos	28
6.1.2 Detectores de humos lineales	28
6.1.3 Detector de Humo por Aspiración	29
6.1.4 Detector de llamas multi-sensores	29
6.2 Extinción	30
6.2.1 Extinción con gases	30
6.2.1 Extinción con agua	30
6.2.1 Extinción con polvo y aerosoles.....	31
6.2.1 Extinción con tubos termosensibles y fluido a presión	31



6.3.	Monitoreo de instalación.....	36
6.4.	La desactivación de las instalaciones	36
7.	Análisis de Casos.....	37
7.1	Caso 1 -rayo	37
7.1.1	Descripción de la investigación.....	37
7.1.2	Origen.....	37
7.1.3	Causa del siniestro	37
7.1.4	Conclusiones.....	37
7.2	Caso 2 – Fallo mecánico	38
7.2.1	Descripción de la investigación.....	38
7.2.2	Origen.....	38
7.2.3	Causas del siniestro	38
7.2.4	Conclusiones.....	38
7.3	Caso 3 - Mantenimiento	39
7.3.1	Descripción de la investigación.....	39
7.3.2	Origen.....	39
7.3.3	Causas del siniestro	39
7.3.4	Conclusiones.....	39
7.4	Caso 4 – Fallo eléctrico	40
7.4.1	Localización del siniestro	40
7.4.2	Descripción de la investigación.....	40
7.4.3	Origen.....	41
7.4.4	Causas del siniestro	41
7.4.5	Conclusiones.....	41
	Conclusiones.....	42
	Referencias	43



Introducción

El sector de la energía eólica es uno de los que más crece entre las fuentes de energía renovables. Como se puede apreciar en la Figura 1, el año de 2015 ya contabiliza cerca de 432 GW de potencia instalada en todo el mundo. [1]

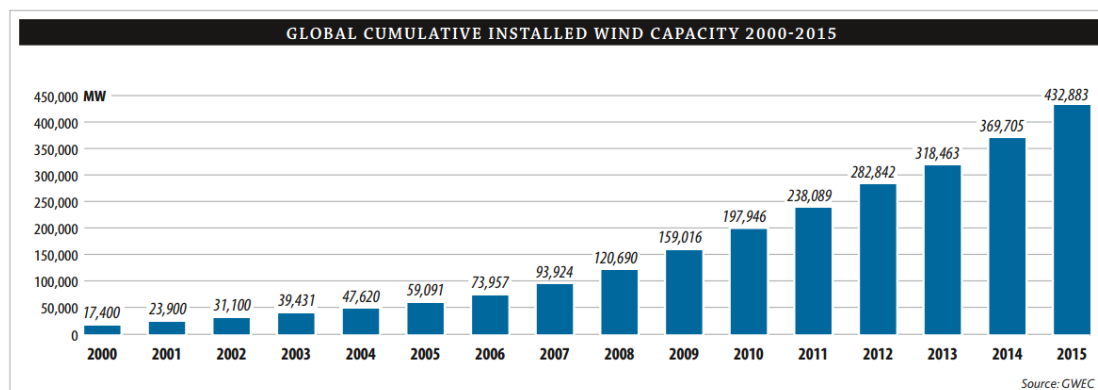


Figura 1: Capacidad instalada del sector eólico en el mundo, en GW (Fuente GWEC).

Con este crecimiento tan expresivo, el sector eólico ya representa una de las fuentes de energía entre las más importantes para la mayoría de los países desarrollados. Por jugar un papel tan importante en el sector energético, la seguridad del suministro para el sector eólico, se convierte en aún más importante para satisfacer la demanda eléctrica, también creciente.

Los incendios en aerogeneradores son una realidad en parques eólicos en todo el mundo, y representan daños muy importantes para el sector. Según el informe de la aseguradora GCube del Noviembre de 2015 [2], al año cerca de 50 aerogeneradores prenden fuego con pérdidas totales. En la Tabla 1 se pueden apreciar los números de incendios registrados por la Caithness Windfarm Information Forum, CWIF. [3]

Tabla 1: Número de incendios en turbinas eólicas en el mundo (Fuente: CWIF).

By year:																			
Year	70's + 80s	90s	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	*16
No.		6	3	2	24	17	16	14	12	21	17	17	13	20	19	23	19	18	12
* to 30 June 2016 only																			

* to 30 June 2016 only

Como se puede ver, los números antes del año 2000, son bastante bajos, por falta de datos. Uno de los grandes problemas de contabilizar el número de incendios es la falta de una organización internacional donde sea obligatorio reportar todo y



cualquier caso de incendio producido. En EEUU existe la National Fire Protection Association, NFPA, que se encarga de entre muchas otras cosas de la parte estadísticas de incendios en territorio americano, pero no a nivel global.

La realidad es que muchos de los incendios no son reportados por la industria, y como están en locales aislados, a veces, no llega a los medios de comunicación. Además, algunos casos de incendio son controlados antes de que se quemase todo el aerogenerador, por lo que no se puede verlo por fuera, y muchas veces el caso es archivado, sin llegar a público.

Los aerogeneradores están normalmente ubicados en zonas aisladas, tanto en aplicaciones Onshore y Offshore, lo que hace con que el combate a los incendios sea más difícil debido al tiempo necesario para los bomberos desplazarse al local. Otro factor es la altura de los aerogeneradores que dificulta el trabajo de los bomberos además de las partes de la turbina que se pueden desprender mientras arden. Lo que ocurre mayoritariamente en incendios en aerogeneradores, es simplemente aislar el entorno de la turbina y observarla arder, sin mucho que hacer. [3]

Con el creciente mercado eólico y el tamaño de los aerogeneradores, las pérdidas económicas en caso de incendios no son despreciables. Las pérdidas son representadas no solo por la compra de un nuevo aerogenerador, que pueden llegar a los 2 millones de euros por MW, pero también por la electricidad que sería producida, estimada en 4,000 MWh anuales, en el periodo necesario para el recambio, que suele ser de 9 a 12 meses. En un caso más común de incendio de una turbina de 2MW, las pérdidas pueden llegar a los 4-5 millones de euros. [4]

Según la National Fire Protection Agency, NFPA, los casos de incendios en parques eólicos son mayoritariamente causados por caída de rayos. Los aerogeneradores están dotados de sistemas de protección, pero resulta que a veces estos son ineficientes. Otras causas de incendio en turbinas son debidas a fallos mecánicos en situaciones de mucho viento, por ejemplo, cortocircuitos en dispositivos eléctricos y electrónicos o bien trabajos de mantenimiento dentro de la góndola donde implique riesgo de fuego. [5]

Además de la parte económica, los incendios en parques eólicos representan una publicidad muy negativa para las energías renovables, aunque se ha comprobado por muchos expertos, que la energía eólica es una de las fuentes de energía con bajo grado en casos de incendios comparado a otras fuentes de energía renovables o no.



1. Nociones básicas de incendios

1.1 La combustión

La combustión es una reacción química de oxidación donde siempre hay desprendimiento de energía. En este tipo de reacción es necesario un agente oxidante y un reductor, donde el oxidante es el que ganará electrones y el reductor los cederá. El agente oxidante es normalmente llamado de comburente, la mayoría de los casos será el oxígeno, y el agente reductor el combustible. Sin embargo, para que la reacción de combustión ocurra es necesario, además del combustible y comburente, una energía de activación, que en la mayoría de los casos viene representado por una fuente externa de energía, una chispa por ejemplo. [6]

Una representación bien aceptada para las reacciones de combustión puede ser vista en la Figura 2, es el tetraedro de fuego.

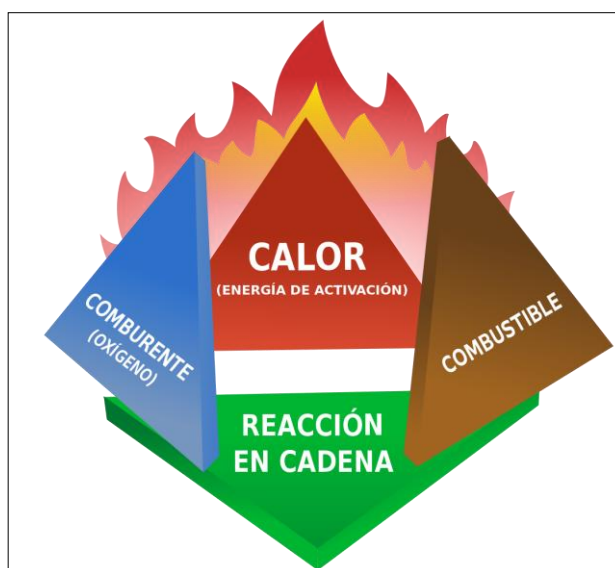


Figura 2: Tetraedro del fuego

Como se puede apreciar, además de los factores mencionados, incluye un cuarto que son las reacciones en cadena. Estas reacciones pueden servir de ignición y para dar continuidad al proceso de combustión. En caso de uno de los factores desaparezca, el tetraedro se queda incompleto representando el fin de la combustión.



1.2 Materiales combustibles en turbinas eólicas

Los incendios pueden causar daños en la góndola, torre, subestación eléctrica o bien en cualquier otro elemento del parque eólico. Los riesgos de incendio en la góndola vienen aumentados por la incorporación, en nuevas turbinas, de elementos como switchgears, capacitores, inversores, cabinas de control y el transformador. Estos componentes pueden ocasionar incendios debido a rotura, malfuncionamiento o sobrecarga del circuito eléctrico.

El riesgo de incendio en los aerogeneradores es aumentado por la cantidad de fluidos combustibles que son necesarios para su funcionamiento, en un espacio confinado. Los sistemas de transmisión (Gearbox), de orientación (Yaw system), de control de paso (Pitch control) y el generador están dotados de centenas de litros de lubricantes que son inflamables, y pueden propiciar la propagación del incendio o generarlo. [7] En la Figura 3 se pueden apreciar los puntos donde más se concentran los fluidos inflamables.

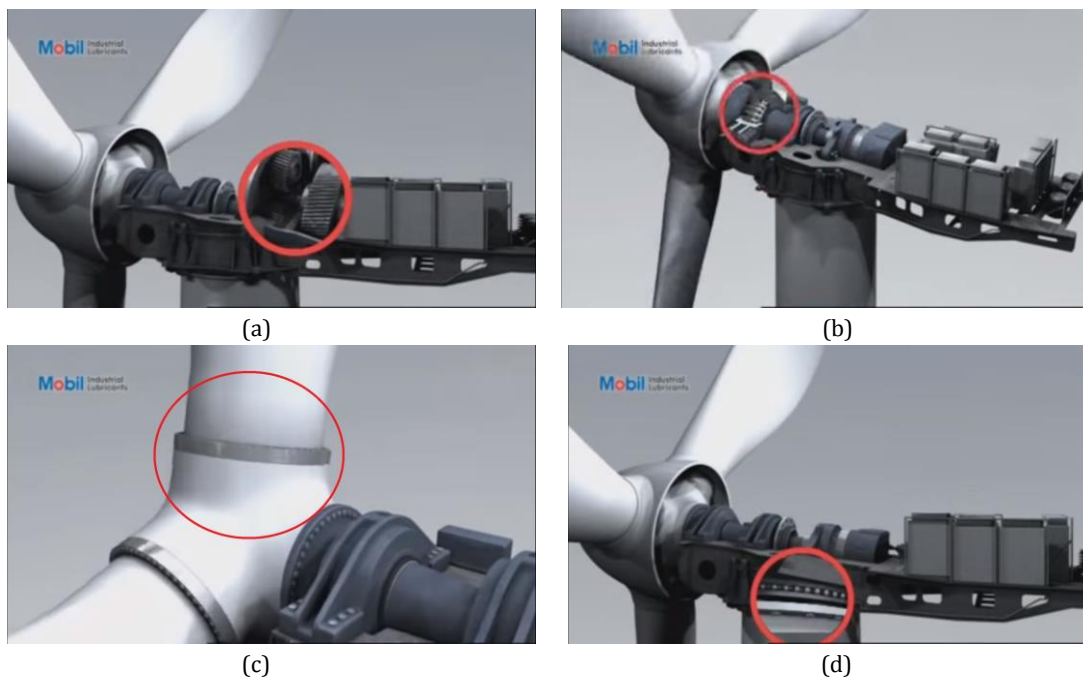


Figura 3: Puntos donde se concentran fluidos inflamables. (a) Gearbox y generador (b) Eje del rotor (c) Control de paso (d) Control de orientación.

Además de estos puntos, donde se concentran más los aceites, las tuberías que llevan este aceite también representan riesgo. Un sobrecalentamiento del aceite puede aumentar la presión hidráulica de las tuberías y hacer con que el aceite escape finamente nebulizado, lo que puede causar la propagación del fuego.



En 2003, 85% del mercado de aerogeneradores utilizaba el sistema de transmisión y los 15% restantes utilizaba la tecnología direct-drive. Aunque en este último, la retirada de la gearbox reduzca la cantidad de lubricantes en la góndola, este requiere generadores más voluminosos que contienen grandes cantidades de resinas inflamables. [8]

Además de los fluidos lubricantes, las turbinas en sí están hechas de materiales como fibras de vidrio y carbono, bien como resinas que son inflamables. El uso de estos materiales es justificado por que son muy resistentes y minimizan su peso a cambio del aumento de la vulnerabilidad por ejemplo en caída de rayos. Algunas empresas como Enercon en su modelo E-112 ya no utiliza el carbono como materia prima para los aerogeneradores. El fabricante danés Vestas, para su modelo V90, ya tiene en consideración las propiedades conductivas del carbono para su sistema de pararrayos. [9]

2. Directrices y certificados internacionales de protección contra incendios

Actualmente no existe una directiva a nivel europeo donde se marquen las medidas para la prevención de incendios específicamente para aerogeneradores. Lo que se encuentra disponible son, o bien, guías de buenas prácticas, elaborados por institutos y asociaciones independientes o empresas privadas, o directivas donde hablan de los parámetros para maquinas en general, como la Directiva 2006/42/CE.

2.2 Directiva 2006/42 / CE

El Parlamento Europeo juntamente con Consejo de la Unión Europea, han elaborado la Directiva 2006/42/CE en lo que se definen los estándares que las máquinas en general deben cumplir y aunque que no sea directamente direccionada a los aerogeneradores, ellos también están incluidos.

La directiva dice en lo que se refiere a protección contra incendios *“La máquina se debe diseñar y fabricar de manera que se evite cualquier riesgo de incendio o de sobrecalentamiento provocado por la máquina en sí o por los gases, líquidos, polvos, vapores y demás sustancias producidas o utilizadas por la máquina.”*. [10] En este fragmento, aunque la directiva destaca que durante el diseño y fabricación de las maquinas se debe evitar riesgos de incendio, en ningún momento aclara específicamente cómo debe ser ese diseño, y las medidas adecuadas para su protección.



Además, la directiva especifica que en las maquinas que produzcan desplazamientos, se debe permitir la instalación de extintores fácilmente accesibles o bien ir provista de sistemas de extinción ya integrados en la máquina. Por la dificultad que hay en acceder a los aerogeneradores en caso de un incendio (por su localización, altura, etc.) los extintores convencionales, aunque tengan fácil acceso, son prácticamente inviables. Sin embargo, los sistemas de extinción son la opción más adecuada, aunque la directiva tampoco especifica cómo debe ser estos sistemas.

Los fabricantes de aerogeneradores tienen la opción de instalar sistemas de detección y extinción propios o bien, contratar empresas expertas en ello. Según Jamie Scurlock del grupo RES, la evaluación de riesgos es una de las tareas más importantes para un buen diseño anti-incendio. ^[11]

2.3 Certificado internacional DNV GL SE0077

Otra forma de asegurar que el sistema anti-incendio sea robusto y eficaz, es por medio de Certificados de calidad. Empresas como la noruega DNV GL, en su documento SE0077 establece el proceso y los requerimientos necesarios para recibir dicho certificado, como por ejemplo, que los componentes del sistema de detección y extinción tengan que superar diferentes pruebas realizadas por laboratorios de un miembro de la European Fire Security Group (EFSG). ^[12]

3. Buenas prácticas de prevención y extinción

3.1 NFPA 850

La National Fire Protection Association, NFPA, es una organización estadounidense de ámbito global y sin fines lucrativos, que se dedica a eliminar casos de muerte, lesiones y pérdidas económicas debido a incendios, fallos eléctricos y riesgos relacionados. La organización es responsable por la publicación de centenas de códigos y normativas bien como promover la educación en el ámbito de seguridad.

La normativa NFPA 850 ^[5] trae recomendaciones de buenas prácticas para la protección contra incendios en plantas de generación de electricidad. En lo que se refiere a energía eólica, la normativa señala aspectos de seguridad importantes para los aerogeneradores que hay que tenerse en cuenta a la hora de evitar incendios. Además, por ser una guía, es posible que se tenga que adaptar las



recomendaciones para cada caso, una vez que algunos de los peligros pueden que no estén presentes (transformador en la góndola, por ejemplo). La NFPA 850 hace recomendaciones de seguridad para la construcción de nuevos parques, pero este trabajo se centrará en parques ya existentes.

En aspectos generales, en caso de un problema o accidente, se recomienda que los aerogeneradores estén dotados de sistemas automáticos de desconexión, parada total de los sistemas mecánicos y aislamiento eléctrico de la torre. También se recomienda que haya diferentes métodos para la parada y que deban operar de manera independiente.

La directiva sugiere una lista de parámetros que deben estar monitoreados remotamente, a fin de que sea posible iniciar un proceso de parada en caso de funcionamiento anormal de cualquier de estos parámetros:

- (1) Perturbaciones en la red
- (2) Errores en el sistema de control de orientación o límites
- (3) Problemas con los frenos
- (4) Vibraciones anormales
- (5) Exceso de velocidad (incluyendo las condiciones del viento)
- (6) Temperaturas
- (7) Condiciones de aceite (caja de cambios / lubricación e sistema hidráulico)
- (8) La protección del motor
- (9) Pérdida de la comunicación entre los módulos o con el centro de control
- (10) Ángulos de las palas y estado de la batería
- (11) La activación de humo y/o detectores de calor dentro de la góndola

Además de estos parámetros, existen recomendaciones para los aceites lubricantes y de los sistemas hidráulicos. Deben ser considerados aceites y fluidos que sean resistentes al fuego y, en el caso de que sea posible, reducir su cantidad en la turbina. Sus tuberías deben estar bien mantenidas y señalizadas evitando cualquier posibilidad de fuga.

Los transformadores por representaren un riesgo a la instalación también deben seguir algunas recomendaciones. Estos pueden estar ubicados dentro de la góndola, en la torre o bien cerca de la base de la torre. Hay que vigilar si son de tipo seco o si llevan algún aceite y, en este caso, si hay un sistema de contención de este aceite en caso de fuga, además de utilizar aceites resistentes al fuego.



Lo que se refiere a sistemas de protección contra incendios, algunos son recomendables para aerogeneradores, aunque cada caso específico deben seguir recomendaciones todavía más específicas de seguridad. La lista de los sistemas mencionados en la NFPA 850 incluye; sistemas de gases, agua nebulizada, espumas de aire comprimido y aerosoles. En el caso del sistema de gases, debe existir un sistema automático de cierre del sistema de ventilación y puertas, bien como apagar los ventiladores, durante el incendio, y un cuidado especial a la hora de liberar los gases que pueden contener sub productos tóxicos de la reacción de combustión.

Los sistemas con agua deben ser dimensionados para cada caso, ya que el espacio es limitado. Debido a la remotidad de la mayoría los aerogeneradores y la falta de abundantes suministros de agua en estas zonas, los sistemas de extinción con agua no son habituales. En aplicaciones costa afuera, los sistemas de bombeo y distribución de agua de incendio pueden ser muy costosos y también no se suelen utilizar.

Para los armarios de control y sistemas eléctricos, presentes dentro de la góndola, se recomienda la instalación de detectores de humo que puedan proporcionar un alerta rápido en el caso de un incendio dentro de estos armarios.

3.2 NTP 1022 1023 y 1024

A nivel Español, el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, INSHT, ha elaborado las Normas Técnicas de Prevención, NTP, que sirven como guía de buenas prácticas. Específicamente para los aerogeneradores, se elaboró una serie de tres normas (NTP 1022, 1023 y 1024) donde se describen las principales medidas de prevención y protección durante el mantenimiento de aerogeneradores. Los documentos están direccionados para la prevención de riesgos laborales y operaciones de mantenimiento, y, además, contemplan prevención de incendios ya que el mantenimiento puede ser una de las fuentes de ignición.

Las normas recomiendan la utilización de materiales ignífugos en las zonas de la maquina con alto riesgo de incendio. En el caso que sea necesario realizar trabajos dentro del aerogenerador que puedan conllevar riesgos, se recomienda utilizar herramientas que no generen chispas, mantas ignífugas en operaciones, por ejemplo, de soldadura además de nunca almacenar materiales inflamables o fumar dentro del aerogenerador. [13] [14] [15]



4. Riesgos

Los riesgos de incendios pueden venir tanto de factores externos como el clima, por ejemplo, o bien de fallos de maquinaria o fallos humanos. Los servicios de mantenimientos juegan un papel crucial para evitar incendios ya que se ven que muchos de los casos de incendio tienen como causa el fallo de dispositivos viejos o débiles que deberían ser cambiados, o arreglos no tan bien hechos.

El envejecimiento de las turbinas es otro factor que aumenta el riesgo de incendios. Según la revista *Renewable Energy World* ^[9] existen millares de turbinas de potencia entre 80-150kW instaladas hace décadas en EEUU y que no llevan ningún o muy vulnerable sistema de pararrayos. Con el grande número de aerogeneradores instalados a partir de los años 2000, el número de incendios en las próximas décadas puede ser un problema más grave de lo que es ahora mismo. En los siguientes apartados se presentarán los diferentes posibles riesgos reportados por la industria como los más comunes en casos de incendios.

4.1 Caída de rayos

Los rayos son fenómenos naturales normalmente generados en regiones eléctricamente cargadas de las nubes y alcanzan la Tierra en forma de descargas eléctricas. Las nuevas turbinas pueden llegar a los 220m y su altura les hace todavía más propicias a atraer los rayos. Aunque las turbinas estén dotadas de sistemas de pararrayos, según la NFPA, la caída de rayos es la fuente más común de incendios en aerogeneradores. ^[5]

La atracción de rayos dependerá de la diferencia de potencial eléctrico que hay entre las nubes eléctricamente cargadas y el aerogenerador, por ejemplo, ya que sus piezas metálicas pueden cargarse fácilmente lo que hace que en estos puntos sean más propensos a ser alcanzados. La dielectricidad también se considera un fenómeno importante a la hora de atraer rayos. ^[16] Como se puede apreciar en la Figura 4, el estudio de la aerodinámica de las palas en un aerogenerador demuestra que cuando una turbina está en marcha, el paso del viento crea dos zonas de alta y baja presión, debido al principio de Bernoulli.



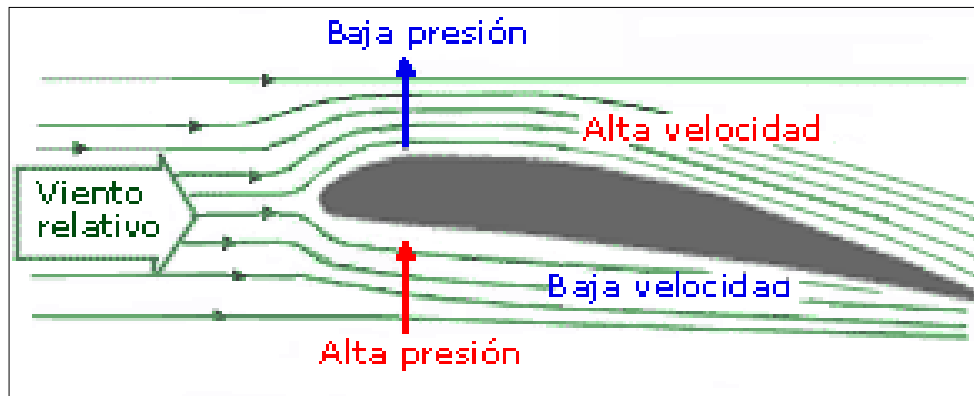


Figura 4: Zonas de alta y baja presión creadas por el paso del viento.

Según la Ley de Paschen, el aire en regiones de alta presión se vuelve más dieléctrico dificultando la conducción de corriente eléctrica. Sin embargo, para regiones de baja presión, el aire se vuelve más conductor hasta alcanzar la tensión de ruptura. ^[17] La Figura 5 representa la curva de Paschen para el aire en función de la presión.

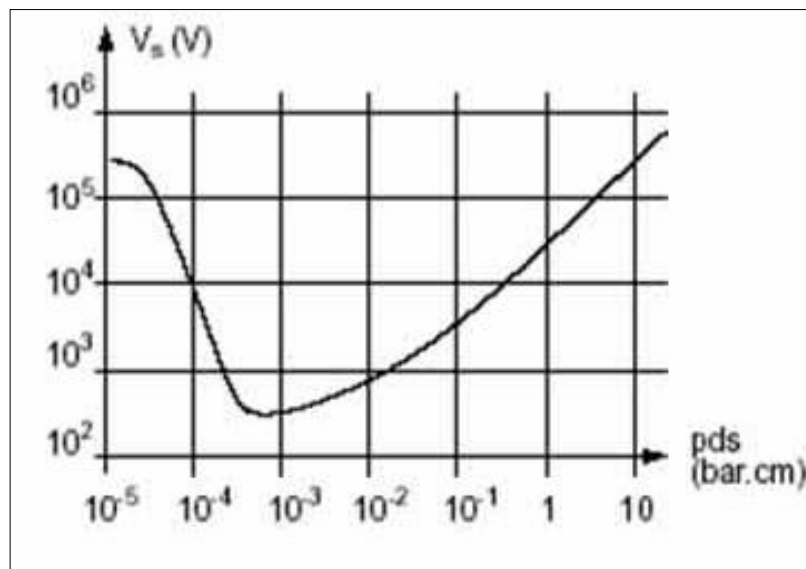


Figura 5: Rigidez dieléctrica del aire en función de la presión.

El punto más bajo de la curva se llama tensión de ruptura, que es donde el aire está en estado más conductor. Este fenómeno explica porque, en un aerogenerador cuando este está girando, a veces los rayos alcanzan la pala de abajo, que justamente está pasando cerca de la torre, donde el aire en este espacio tiene menos presión y por lo tanto es menos dieléctrico.



Existe el mercado dispositivos que pueden proporcionar información meteorológica y avisar si hay riesgo de rayos en tiempo real. ^[18] En la Figura 6, es posible apreciar un de estos dispositivos desarrollado por la empresa INGESCO.



Figura 6: (a) Dispositivo avisador de rayos (b) Servicio de localización

Estos dispositivos son útiles a la hora de evitar que se realicen mantenimientos, en horas donde el riesgo de rayos sea alto, o incluso, parar la generación si es el caso.

4.2 Fallos mecánicos e hidráulicos

Según las aseguradoras, el fallo mecánico o rotura de maquinaria es otro factor responsable por causar incendios en turbinas eólicas. Los fallos pueden ocurrir en diversas partes de la turbina y por diferentes razones. El desgaste o daños en engranajes, sobrecalentamiento de cojinetes, fatiga, uso de aceites incorrectos o temperatura de aceite incorrecta, vibraciones y sobrecarga son algunas de las causas más comunes de incendios. Los cojinetes por ejemplo, deben siempre estar lubricados y si por alguna razón estos empiezan a funcionar secos, la fricción provocará el sobrecalentamiento y producir chispas que sean suficientes para empezar un incendio. ^[19]

Otra posible fuente de incendios es debido a los frenados mecánicos del rotor. Los nuevos aerogeneradores están dotados de sistema de control para frenados aerodinámicos, pero en el caso de este no funcione correctamente o no sea suficiente, un frenado mecánico es necesario. Debido a la alta inercia del rotor, estos frenos pueden alcanzar temperaturas muy elevadas, suficientes para la ignición de fluidos combustibles. En el caso de frenado de emergencia, este estrés mecánico puede ser todavía más grande y con producción de chispas. ^[4]



4.3 Fallo en las instalaciones eléctricas

Fallos en componentes eléctricos en aerogeneradores figura entre las causas más comunes. Factores externos o defectos pueden causar sobrecargas que posteriormente pueden someter estos dispositivos a un sobrecalentamiento y un inicio de incendio. Otros factores causadores de incendio en sistemas eléctricos y electrónicos son fallo en la tierra, cortocircuitos y arcos eléctricos. Entre los componentes que más presentan riesgo en la góndola está los disyuntores, inversores, capacitores, filtro de armónicos, sistemas de control, baterías y transformadores.

Las baterías en aerogeneradores están presentes en algunos sistemas auxiliares, como el de control de paso. Ellas deben estar bien mantenidas y operar con suficiente ventilación, sobre todo las baterías de plomo ácido. Este tipo de batería puede liberar hidrógeno durante la carga y, además un sobrecalentamiento con hidrógeno representa un riesgo de incendio o explosión. Elevados valores de temperatura ambiente contribuyen para la reducción de la vida útil de las baterías. En 2003, un aerogenerador Alemán Vensys 62 de 1.2MW se quemó completamente por un cortocircuito en las baterías del sistema de control de paso. [9]

Los sistemas resonantes, formados por elementos capacitivos (capacitores, control de potencia reactiva, etc.) e inductivos (generador, motores, etc.) pueden causar daños a la instalación eléctrica. El fenómeno de resonancia puede resultar de armónicos que por su vez puede generar altos valores de corriente, lo que puede dañar, por ejemplo, los capacitores. Estos una vez dañificados, pueden prender fuego y así empezar un incendio. [4] En la Figura 7 se puede ver un filtro de armónicos destruido por el fenómeno de resonancia.



Figura 7: Filtro armónico destruido por el fenómeno de la resonancia (Fuente Allianz).



Los disyuntores son dispositivos donde pueden ocurrir sobrecalentamientos debidos a sobrecargas. Una entre las diversas razones que pueden originar estas sobrecargas esta, por ejemplo, las conexiones atornilladas. En los aerogeneradores, es muy común que haya vibraciones debido a la fuerza del viento que pueden aflojar algunos tornillos del sistema eléctrico y mecánico. En el sistema eléctrico, un tornillo flojo puede aumentar la resistencia eléctrica y con eso causar un sobrecalentamiento y consecuentemente un posible incendio. Como se puede ver en la Figura 8, en una cámara de infrarrojos, la conexión del cable superior se ha calentado debido a un tornillo que se aflojó.



Figura 8: Sobrecalentamiento en conexión (Fuente: Infrared Electrical Inspection)

Los transformadores representan un riesgo de incendio, especialmente si estos están localizados dentro de la góndola y si son de tipo que llevan aceite. Además del riesgo de fuga del aceite, difundiendo material combustible dentro de la góndola, estos aceites deben pasar por una revisión de un experto, al menos a cada cinco años. Si por alguna razón ocurre algún defecto en un componente de un transformador de aceite, una sobrecorriente puede llevar a una explosión. Los transformadores tipo seco, presentan menos riesgo, pero igualmente deben recibir mantenimientos periódicos. [4]

5. Sistemas pasivos de protección contra incendios

5.1. Protecciones contra rayos

La mayoría de los nuevos aerogeneradores ya vienen equipados con sistemas de protección para rayos. Estos sistemas están centrados en conducir la descarga eléctrica, o rayo, hasta la tierra, evitando daños en los componentes. En las Tabla



2 y Tabla 3 se pueden apreciar algunos de los parámetros y niveles de probabilidad para rayos de nubes cargadas positivamente y negativamente hasta el suelo.

Tabla 2: Parámetros y niveles de probabilidad de rayos originados por nubes cargadas negativamente (IEA)

Parameters		Probability Level		
		95%	50%	5%
Peak Current	kA	14	30	90
Long Duration Charge Transfer	C	1.5	7	40
Specific Energy	J/Ω	6×10^3	6×10^4	6×10^5
Maximum di/dt*	kA/μs	4	20	100

Tabla 3: Parámetros y niveles de probabilidad de rayos originados por nubes cargadas positivamente (IEA)

Parameters		Probability Level		
		95%	50%	5%
Peak Current	kA	5	35	250
Long Duration Charge Transfer	C	20	80	350
Specific Energy	J/Ω		8×10^5	13×10^6
Maximum di/dt	kA/μs		3	32

Según la International Energy Agency, IEA, las descargas positivas representan un 10% y las negativas un 90% del total de descargas, pero pueden variar con la zona geográfica. El rango de pico de corriente que puede tener un rayo puede variar considerablemente y, como se puede ver en las Tabla 2 y Tabla 3, estos valores pueden variar de 5 hasta 250 kA pero, en la gran mayoría de los casos, cuando se hablan de descargas por rayos, los valores suelen estar entre 5 y 14 kA. Sin embargo, los sistemas de protección deben estar preparados para cubrir un rango elevado de corriente de descarga, aunque eso viene reflejado en el precio del dispositivo. ^[20]

Los aerogeneradores son divididos en clases de I a IV, dependiendo de los límites máximos y mínimos de corriente que pueda soportar, de acuerdo con la IEC 62305. ^[21] En la Tabla 4, es posible apreciar estos límites y como se dividen en las clases.



Tabla 4: Parámetros de descargas eléctricas y niveles de protección (IEA)

Lightning Parameter		Protection Level		
		I (98%)	II (95%)	III-IV (90%)
Current Peak Value	kA	200	150	100
Total Charge	Q_{total} (C)	300	225	150
Impulse Charge	$Q_{impulse}$ (C)	100	75	50
Specific Energy	W/R(kJ/Ω)	10,000	5,600	2,500
Average Steepness	di/dt30/90% kA/μs	200	150	100

Los sistemas calificados como clases I y II son las que más ofrecen protección a los aerogeneradores. En este trabajo, fue optado por estudiar en detalle un modelo de sistema de protección de la empresa Vestas, aplicado al modelo su aerogenerador V90 de 3MW, que es de clase I [22]. En la Figura 9 es posible apreciar los sistemas de protección instalados en las palas del aerogenerador.

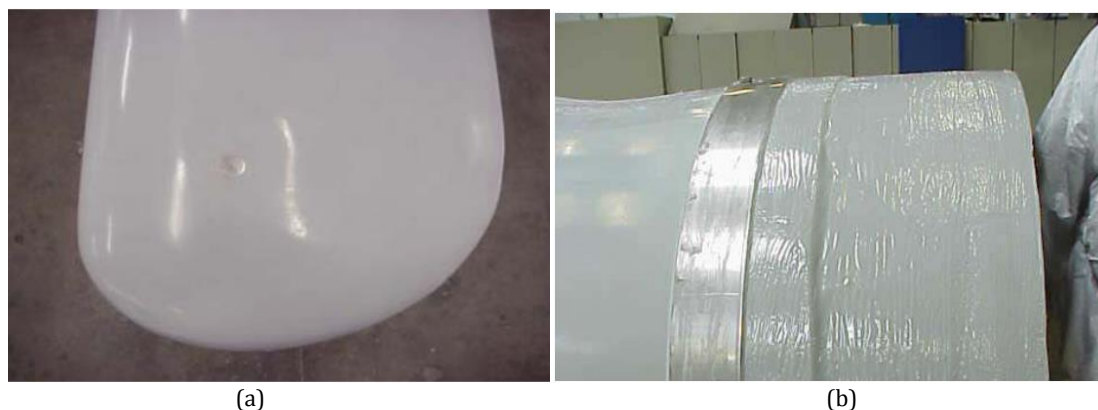


Figura 9: Sistemas de protección de las palas. (a) Receptores (b) Banda de acero en la base de la pala

Los receptores para los rayos están localizados en las palas como se puede ver en la Figura 9a. En total son 7 receptores individuales localizados a R44.7 m (cerca de la punta), R42m, R39m, R35m, R30m, R25m, and R20m medidos desde centro del eje del rotor. Dentro de la pala, pasa un conductor de cobre de 50 mm² que conecta los receptores a la banda de acero, localizada en la base de la pala, como se puede ver en la figura 9b. La corriente del rayo será conducida de la banda de acero al chasis de la góndola por medio de una Unidad de Transferencia de Corriente proveniente de Rayos, (UTCR). Este dispositivo evita que estos picos de corriente penetren en el eje del rotor y en el sistema de transmisión (gearbox). Del chasis de la góndola el pico de corriente pasa a la estructura de la torre por conductores de corriente hechos de latón, que también tienen como función proteger el sistema de orientación. En la Figura 10 se puede apreciar el UTCR y los conductores instalados en la torre.



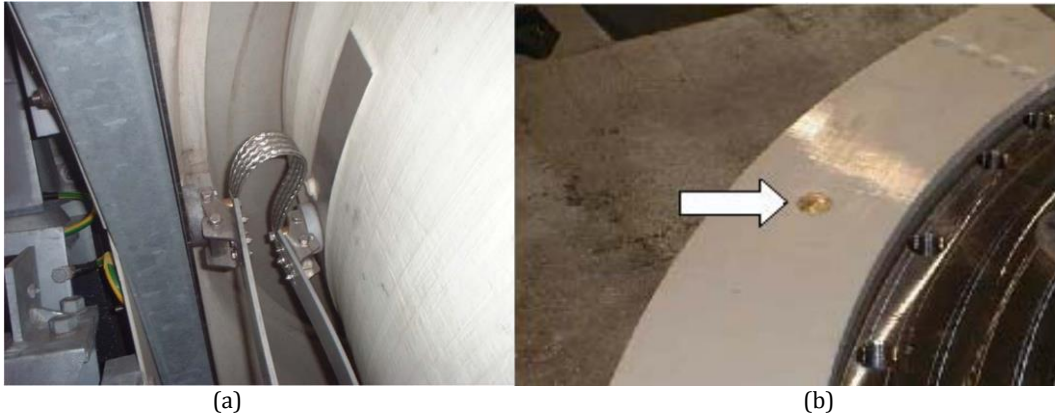


Figura 10: (a) Unidad de Transferencia de Corriente proveniente de Rayos (b) Conductores de latón instalados en el cuerpo de la torre

Además de las palas del aerogenerador, otro punto propicio a ser alcanzado por descargas eléctricas es la parte posterior de la góndola donde normalmente están instalados los anemómetros y luces de aviación, como se puede ver en la Figura 11.

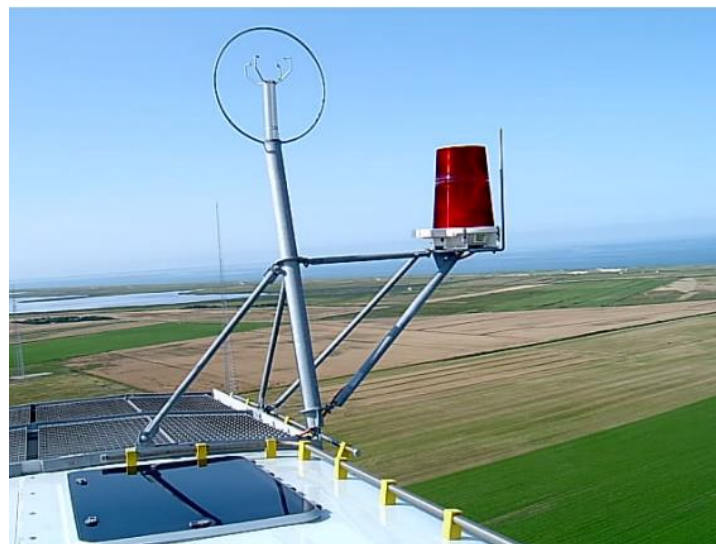


Figura 11: Anemómetros ultrasónicos y luces para aviación

Para la protección de los anemómetros, está instalado un anillo de acero que está conectado al chasis de la góndola, bien como la rejilla que está arriba del sistema de refrigeración. Para proteger la lámpara de aviación está instalado un pararrayo, también conectada al chasis de la góndola.

Los sistemas de conexión a tierra en un aerogenerador, tiene como la fundación de la torre como su referencia de tierra. Esta referencia es también utilizada para todo el sistema eléctrico, de control y de protecciones contra sobretensiones. En el modelo V90, como se puede ver en la Figura 12, dos cables paralelos de $1 \times 50 \text{ mm}^2$ de la tierra conectan la base de la torre al topo, con el fin de hacer la



igualación de los potenciales. La tierra de la torre también está conectada al sistema externo de tierra del parque, como se puede ver en la Figura 12b.



Figura 12:(a) Conductor de la tierra que conecta el topo con la base de la torre (b) Conexión entre la tierra de la torre con el sistema de tierra externo del parque

Aunque se instalen los dispositivos de seguridad, no es tan insólito que los rayos acaban alcanzando las palas fuera de la zona de los receptores. En la Figura , se puede ver una pala de un aerogenerador que fue alcanzada por un rayo fuera del punto receptor.



Figura 13: Pala de alcanzada por una descarga eléctrica fuera del punto receptor

Cuando la descarga alcanza la pala fuera del receptor, esta penetra la pala y se crea un arco dentro. La presión y la temperatura en este punto son bastante elevadas lo que resultan en daños considerables, y costes elevados para el recambio de la pala. [23]



5.2 Minimizar los riesgos en los sistemas eléctricos

Equipos de protección para los sistemas eléctricos, tales como fusibles y disyuntores, deben ser capaces de detectar selectivamente una parte defectuosa del circuito, o bien un equipo como el generador, transformador o cables y desconectarlos. Al desconectar la parte o equipo defectuoso, el sistema automáticamente debe comunicar al operador del parque para que sea enviado un grupo de mantenimiento al local. Además, estos deben también ser capaces de apagar la turbina y desconectarla de la red de distribución. [4]

Para aumentar los niveles de seguridad la implementación de nuevos dispositivos, puede ser una medida coste-efectiva. Los disyuntores compactos pueden ser una opción a la hora de proteger sistemas auxiliares de sobrecargas que pueden llevar a un sobrecalentamiento, y también estar integrado a los alarmes en caso de falla. Los fusibles de protección de semiconductores pueden proteger fuegos originados debido a fallos en equipos como un transistor bipolar de puerta aislada (*en inglés*, IGBT), bien como piezas sofisticadas como los tiristores de un convertidor o arrancadores para motores.

Los dispositivos de vigilancia de corriente diferencial pueden detectar fallos en el sistema de la tierra detectando corrientes diferenciales. Una vez detectadas estas corrientes diferenciales, el dispositivo debe enviar una señal de alerta para que un equipo de mantenimiento sea enviado al local para repararlo antes que se produzca un incendio. Dispositivos de monitorización de la potencia generada, son capaces de medir la calidad de la potencia inyectada a la red y los parámetros del circuito eléctrico, permitiendo la detección precoz de sobrecargas y fallos en la instalación.

Defectos de aislamiento pueden representar un peligro no solo de incendio, pero también para el personal de mantenimiento que pueden recibir una fuerte descarga eléctrica. Los dispositivos de medida de corriente residuales deben ser instalados de manera a desconectar el circuito afectado y también prevenir incendios. Otra medida de protección para aerogeneradores es la substitución de cables por barras colectoras. Diferente de los cables aislados con PVC, el embarrado tiene un potencial de incendio considerado bajo. Además, los embarrados pueden llevar un recubrimiento epoxi que les hace más resistentes al envejecimiento y pueden aumentar la protección para los conductores. También las barras colectoras ofrecen una resistencia más grande a efectos térmicos provocados por rayos, que los cables convencionales.



Los transformadores, como se ha comentado en la Sección 4.3, representan un riesgo importante para el aerogenerador. Conceptos de protección graduales para los transformadores pueden lograr la mejor protección contra incendios posible. Por ejemplo, en el caso de se produzca un arco en un interruptor en lado de alta tensión del transformador y resulte en un fallo en el disyuntor, un sistema específico de detección de arcos debe detectar el fallo y abrir el disyuntor del lado de alta tensión del transformador desconectando de esta manera la parte defectuosa del sistema. [4]

Para los transformadores de aceite, los Relés de Buchholz pueden detectar varios tipos de fallos. En el caso de una sobrecarga en el transformador, una descomposición química del aceite puede resultar en la producción de pequeñas cantidades de gases que se acumularán en la parte superior del relé y provoca un descenso del nivel del aceite. Cuando el nivel del aceite llega un nivel muy bajo, un interruptor activa una alarma. En el caso de que se produzca un arco en el transformador, una cantidad de gas puede ser generada de manera repentina, que activa un interruptor en el camino del depósito de expansión. Este interruptor es responsable por desconectar el transformador antes que otros daños sean producidos. [24]

5.3 Recubrimientos de protección contra Incendios

Los recubrimientos contra incendio, o resinas retardantes al fuego, ampliamente utilizados en el sector de construcción civil, pueden tener un gran potencial como medida de protección en el sector eólico. Gran parte de la estructura de los aerogeneradores es compuesta de fibra de vidrio y fibra de carbono, que son materiales relativamente inflamables y su fuego es difícil de apagar debido a las resinas epoxis utilizadas para fundir la fibra de vidrio. [25] Los recubrimientos disponibles en el mercado pueden llegar hasta los 120 minutos de resistencia al fuego, este tiempo puede ser el factor clave para evitar un daño más grande, ya que, durante este tiempo, es posible que lleguen los bomberos, o bien que el fuego acabe por falta de material combustible, por ejemplo. [26]

Lo más habitual es que los aerogeneradores lleven recubrimientos anti erosión ya que con las velocidades de viento a las que están sometidos, hasta las pequeñas partículas de polvo pueden causar daños estructurales, sobre todo en las palas. Como no está regulado, los aerogeneradores no están obligados a aplicar ningún recubrimiento resistente al fuego, aunque algunas empresas como la holandesa AkzoNobel dispone de soluciones específicas para aerogeneradores.



5.4 Mantenimiento

El mantenimiento de los aerogeneradores debe ser realizado de manera periódica con un cierto nivel de calidad. Muchos incendios reportados son debidos a servicios de mantenimiento realizados de manera incorrecta. Como mínimo el mantenimiento de partes cruciales como el sistema de transmisión, devanados del generador, transformador, sistemas hidráulicos y cojinetes debe ser realizado frecuentemente, aunque se ha visto en este trabajo que muchos otros dispositivos pueden ser responsables por causar incendios y deberían ser también revisados. [4]

El mantenimiento de las palas del aerogenerador puede ser una tarea complicada por las condiciones en que debe someterse el técnico responsable que debe tener conocimientos de barranquismo. Una nueva alternativa para este tipo de mantenimiento, por ejemplo, de los receptores de rayos, es la utilización de vehículos aéreos no tripulados equipados con cámaras de alta resolución [27], ver Figura 14. Estos pueden realizar fotos de manera mucho más rápida y eficiente con el riesgo para el personal bastante reducido.



Figura 14: Vehículo aéreo no tripulado utilizado para mantenimiento de aerogeneradores

Son buenas prácticas tener registrado todas las modificaciones específicas que se haya realizado en el aerogenerador bien como todos los diagramas de cada componente y sus especificaciones. Además que todos los sistemas de seguridad y contra incendios sean inspeccionados y si alguna parte está defectuosa, su respectivo recambio. [27]

La British Standards, BSi, también describe en EN50308:2004 una serie de medidas de protección, requerimientos para operación y mantenimiento de aerogeneradores. Lo que se refiere a mantenimiento, entre muchas de las recomendaciones, algunas son señaladas en este trabajo. [28]



5.5 Formación

La formación del personal es una medida muy importante, ya que el error humano es todavía una de las principales causas de los accidentes con incendios. Aunque el aerogenerador esté equipado con equipos de protección que le dé un nivel aceptable de seguridad, un fallo humano puede ser suficiente para que se empiece un incendio, principalmente si esto pone su vida y de otros en riesgo.

La formación debe orientar al personal acerca del peligro que puede implicar la realización de trabajos de mantenimiento dentro de la turbina. Sobre todos los reparos realizados que puedan generar chispas, arcos u otra fuente de ignición. En el caso de que sea imposible evitar que se realice el trabajo, medidas de seguridad deben ser tomadas antes, durante y después de la operación para que se evite las fuentes de ignición o que se pueda detectar un estado inicial del incendio y combatirlo de manera efectiva. ^[4]

Además la formación debe aclarar a todos los entren en la turbina cómo funcionan los sistemas de extinción, y como se debe proceder en el caso de incendio. Rotas de salida, y como se comportar en caso de emergencia son pasos críticos que pueden salvar más de una vida. Los funcionarios deben realizar entrenamientos regulares de evacuación de la góndola y, si posible, realizar entrenamientos con el cuerpo de bomberos local.

Es importante siempre evitar llevar posible fuentes de ignición o material combustible para dentro de la góndola. Piezas de ropa sucias de aceite o solventes, comunes en personal de mantenimiento, pueden representar un peligro de ignición espontanea. También, en todas las zonas de la turbina deben estar señalizados y ser respetado los avisos de no fumar.

5.6 Seguros

Como se ha comentados en secciones anteriores, las pérdidas económicas debido a accidentes pueden llegar a sumar millones de euros y, por esta razón, los propietarios de parques eólicos normalmente buscan aseguradoras que puedan cubrir estos gastos a cambio de primas mensuales. Se ha visto que para el sector eólico existen dos modalidades de seguros: el seguro de la propiedad y el seguro de garantía, aunque eso solo no garantiza una protección completa y dependerá de las condiciones del contrato en cada caso. ^[18]

Entre las muchas modalidades de seguro de propiedad centraremos en este trabajo en la modalidad todo riesgo en que el asegurado está cubierto en caso de



rotura de maquinaria, cortocircuitos, tempestades e incendios. En caso de un incendio las aseguradoras normalmente cubren todos los costes necesarios para el reemplazo de una turbina destruida por un incendio. Sin embargo, aunque el aerogenerador tenga una garantía, dada normalmente por 5 años por el fabricante, aunque se compruebe por la aseguradora o bien por el operador del parque que el incendio fue provocado por un fallo de una pieza en concreto, la garantía de esta normalmente solo cubriría los costes de la pieza defectuosa y no de toda la turbina, por lo que se recomienda siempre tener un seguro contra incendio. ^[18]

Existe un estímulo activo de las aseguradoras para que sus clientes utilicen métodos de reducción de riesgo y que los pongan en marcha para reducir las posibilidades de incendios. Aseguradoras del sector de renovables como WindPro, tienen cerca de del 20% de sus reclamaciones accidentes con fuego y gastan cerca de €4 millones anualmente con estos siniestros. Muchas aseguradoras alientan sus clientes a instalar sistemas de prevención y extinción de incendios ofreciendo descuentos en las primas, en el caso de que estos sean instalados. Expertos aseguran que la inversión puede recuperarse en un plazo de 5 a 7 años, y teniendo en cuenta que la vida útil de una turbina es de 20 años valdría la pena. ^[9]

6. Sistemas activos de protección contra incendios

Una gran parte de los casos de incendios pueden ser evitados si estén presentes en los aerogeneradores dispositivos de detección precoz del fuego. Además, estos detectores deben estar conectados a sistemas de monitorización remota para informar al administrador del parque, y que sean accionados los bomberos. Debido a la remotidad de donde normalmente están estos parques eólicos, aunque los bomberos sean activados al momento, a veces pueden tardar horas en llegar, y entonces poco se podría hacer para evitar la pérdida del aerogenerador. Por eso, sistemas automáticos de extinción deberían estar instalados dentro de la góndola y controlar el fuego en un estado inicial.

6.1 Detección

Para la detección de incendios, varios tipos de sensores están disponibles en el mercado y cada uno actúa de una manera diferente.



6.1.1 Detector de llama por infrarrojos



Figura 15: Detector de llama por infrarrojos (Siemens)

Los detectores de llama por infrarrojos entre los tipos de detectores son de los más sencillos, aunque tienen buena respuesta. Normalmente está dotado de 3 sensores y su funcionamiento se basa en detectar el CO₂ producido por la reacción de combustión a través de longitudes de onda específicas, y una vez procesada la información, activa la alarma si es el caso. ^[29] Según la Vertrauen Durch Sicherheit, VdS, estos detectores no son muy habituales para aplicaciones en aerogeneradores, como se puede ver en la Tabla 1 en los Anexos.

6.1.2 Detectores de humos lineales



Figura 16: Detectores de humos lineales (Siemens)

Los detectores de humos lineales tienen su funcionamiento basado en el principio de la reflexión. Rayos infrarrojos son enviados hacia un receptor que os envía de vuelta. Este está dotado de algoritmos para evitar que se salten falsas alarmas y puede monitorizar una distancia de 5-100m. Como se puede ver por su amplio rango de operación estos detectores son más indicados para almacenes y lugares



donde el techo sea muy alto donde los sensores de infrarrojos normales no son fiables. [30]

6.1.3 Detector de Humo por Aspiración



Figura 17: Detector de Humo por Aspiración (Siemens)

Este tipo de detectores trabajan con un sistema de aspiración que trabaja de manera continua, aspirando el aire ambiente y evaluando la presencia de humos. Pueden trabajar en dos longitudes de onda diferentes; el infrarrojo y el azul, y de esta manera puede detectar partículas en el aire generadas por fases iniciales de un incendio. Tienen la capacidad de diferenciar partículas de humo, polvo y vapor, garantizando una buena fiabilidad y evitando falsas alarmas y paradas innecesarias de la generación. [31]

6.1.4 Detector de llamas multi-sensores



Figura 18: Detector de llamas multi-sensores. (1) Emisores IR (2) Cámara de muestreo (3) Receptor IR (4) Laberinto (5) Detector de temperatura (6) Detector de monóxido de carbono. (Siemens)



Los detectores multi-sensores son soluciones más avanzadas para lugares donde se justifique la inversión un poco más elevada. Están dotados de sensores infrarrojos que serán procesados y además cuenta con un sistema dinámico que se ajusta los algoritmos a las condiciones de cada ambiente, convirtiéndose en más eficiente. Además cuentan con un detector de temperatura y de monóxido de carbono, CO, producido en combustiones parciales. El detector de CO, puede evitar que fuegos lentos pasen desapercibidos por largos períodos de tiempo. ^[32]

6.2. Extinción

Los sistemas de extinción son obligatorios en aerogeneradores aunque en este trabajo se está intentando demostrar que en el mercado existen diversos tipos diferentes de sistemas de extinción costes efectivos pero no todos son adecuados a aplicación en aerogeneradores. Entre los tipos más comunes están los de sistemas de gas, agua y otros químicos como polvos o aerosoles.

6.2.1 Extinción con gases

Los sistemas extinción por uso de gases normalmente se utilizan gases como dióxido de carbono, CO₂, argón o nitrógeno que son apropiados para manejar incendios en sistemas eléctricos. Estos son sistemas fiables y actúan desplazando el oxígeno en el aire dentro de la góndola y de esta manera desapareciendo uno de los elementos del tetraedro del fuego, mencionado en la sección 1.1, interrumpiendo la combustión. Según VdS, para sistemas de extinción en góndolas deben contener al menos 6 kg CO₂. ^[4]

6.2.1 Extinción con agua

Para fuegos originados en partes mecánicas o hidráulicas, sistemas de agua también son adecuados. El agua puede ser utilizada en forma de regadera, pulverizada, nebulizada o combinada para formar espumas. Estos sistemas pueden enfriar el local del incendio y controlar las llamas. Dependiendo de la zona donde esté ubicado el parque, debe tenerse en cuenta el efecto de la congelación del agua. Para sistemas en góndolas, se recomienda al menos 9 litros de espuma extintora.



6.2.1 Extinció con polvo y aerosoles

Otros sistemas de extinció con polvos y aerosoles, también son utilizados en incendios. Según VdS estos elementos no son adecuados en sistemas de incendios para aerogeneradores como se puede ver en la Tabla 2 en los Anexos.

Los sistemas de extinció deben mantenerse bien mantenidos en un régimen regular, al menos cada 2 años. En el caso de las condiciones ambientales les ponga sobre estrés, los mantenimientos deben ser realizados en períodos más frecuentemente.

6.2.1 Extinció con tubos termosensibles y fluido a presión

Los sistemas tradicionales de extinció mencionados anteriormente a pesar de ser bastante utilizados en esta industria, poseen muchos inconvenientes. Los sistemas tradicionales de supresión, por ejemplo, son perjudicados por las múltiples aberturas para permitir la circulación del aire que tienen las góndolas. Además, la fiabilidad de la detección en estos entornos es bastante comprometida debida a la acumulación de polvo y suciedad, pudiendo resultar en alarmas falsas, supresiones falsas o bien, inhabilitación del sistema. Las vibraciones también puede ser un inconveniente grave para los estos sistemas debido al riesgo de aflojamiento de conexiones e inutilización del sistema.

Una nueva solución en extinció que empieza a tener fuerza en este sector es el sistema de extinció por medios de tubos a presión con fluido. Diferente de los sistemas anteriormente mencionados, este es un sistema bastante simple, que no depende de electricidad para la detección, es bastante robusto, necesita muy poco o ningún tipo de mantenimiento, y no se ve afectado por la variación de la temperatura, vibraciones u otros contaminantes. Otra ventaja de este sistema es que puede actuar desde pequeños espacios como armarios de control, o bien en los frenos del aerogenerador o en el transformador.

El sistema consiste de un cilindro donde se almacena un fluido especial, y a este están conectados tubos termosensibles que son instalados por todas las zonas de riesgo del aerogenerador. Dentro de estos tubos el fluido especial mezclado con nitrógeno, se mantiene a presión de 195 PSI hasta que surja un incendio. Las paredes del tubo son especialmente diseñadas para romperse a la temperatura de 350°C, que es cuando, seguramente, algo está prendiendo fuego. El fuego abre un agujero en el tubo presurizado y el fluido liberado inmediatamente actúa desplazando el calor y apagando el fuego. ^[33]





(a)



(b)



(c)

Figura 19 : (a) Firetrace's Detecting Tube, FDT. (b) Sistema en funcionamiento (c) Agujero creado por la llama por donde se libera el fluido extintor.

El fluido en cuestión es el 3M Novec 1230, que está incluido en la NFPA-2001, fue evaluado y aprobado para uso en zonas ocupadas como agente de inundación total. Se trata de un fluido líquido incoloro de olor bajo, de baja toxicidad, eléctricamente no conductor, no deja residuos y es un agente de extinción de incendios extremadamente eficaz. Además, no afecta los sistemas electrónicos y tampoco es peligroso para la capa de ozono con su potencial de agotamiento del ozono de 0,00, y vida atmosférica de 5 días (otros halocarbonos tienen vida atmosférica de 33 años).^[33]

A pesar de la temperatura de ruptura de las paredes del tubo sea de 350°C, el fabricante recomienda que no se coloquen en lugares donde la temperatura ambiente supere los 80°C para no comprometer su funcionamiento. Además, para temperaturas muy bajas, sobre los -40°C, el fabricante recomienda que se desconecte el sistema, simplemente cerrando el cilindro, debido a los cambios de presión causados por estas temperaturas extremas.



El sistema tiene dos modos de actuación; estos modos de actuación pueden ser de manera directa o indirecta. En el caso de la actuación directa, el tubo que lleva el fluido es responsable por la detección y también como agente extintor. Este tipo de actuación es recomendable en aerogeneradores para las zonas de panel de control, gabinete de condensadores, transformadores, frenos u otros ambientes cerrados del aerogenerador.



Figura 20: Actuación directa, el tubo detector detecta y extingue el foco del incendio.

En el sistema indirecto el tubo solo tiene función de mecanismo de detección. El fluido extintor, en este caso, se libera a través de boquillas ubicadas estratégicamente. Este tipo de actuación es recomendada para zonas como la central hidráulica u otras áreas expuestas del aerogenerador. [33]

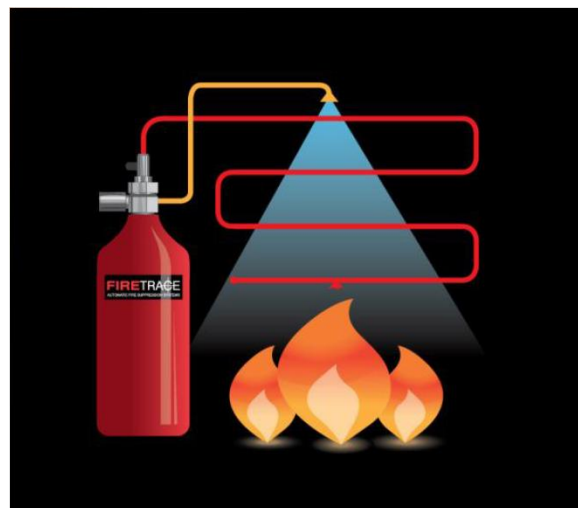


Figura 21: Actuación indirecta, el tubo detector activa un sistema externo de extinción.

Otra pieza clave en este sistema es el Pressure Switch Module, o Interruptor de presión. Este aparato está presente en todos os sistemas, directo o indirecto, y en



caso de un incendio, es el responsable de enviar una señal al sistema de control para que se desactive el aerogenerador.

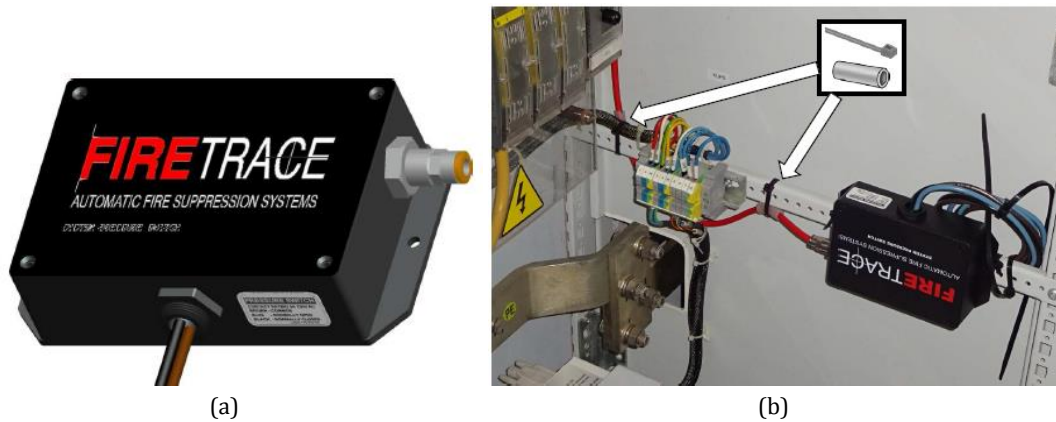
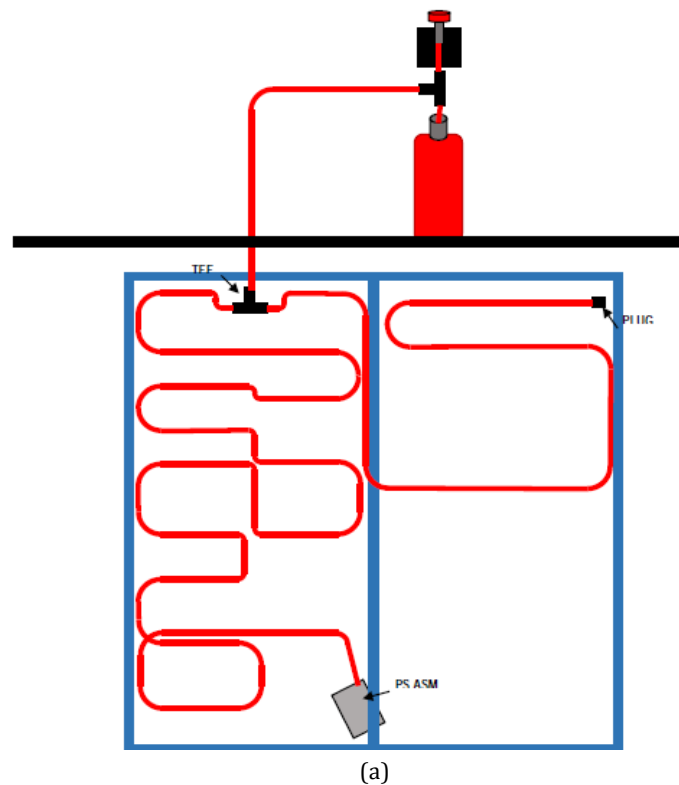
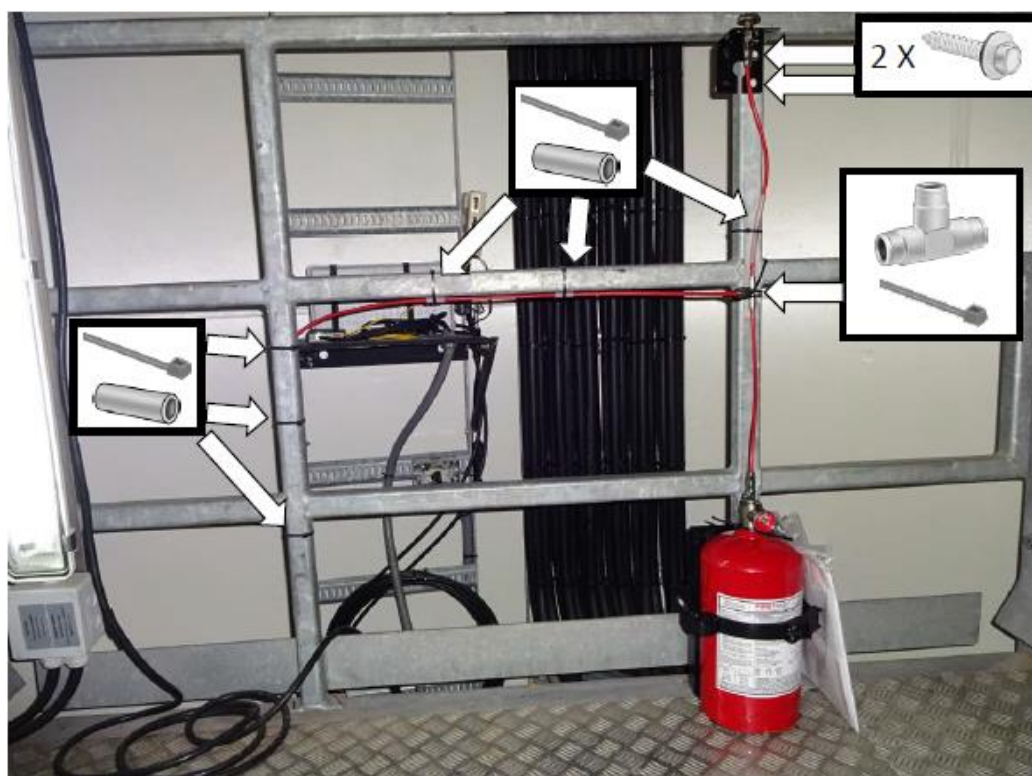


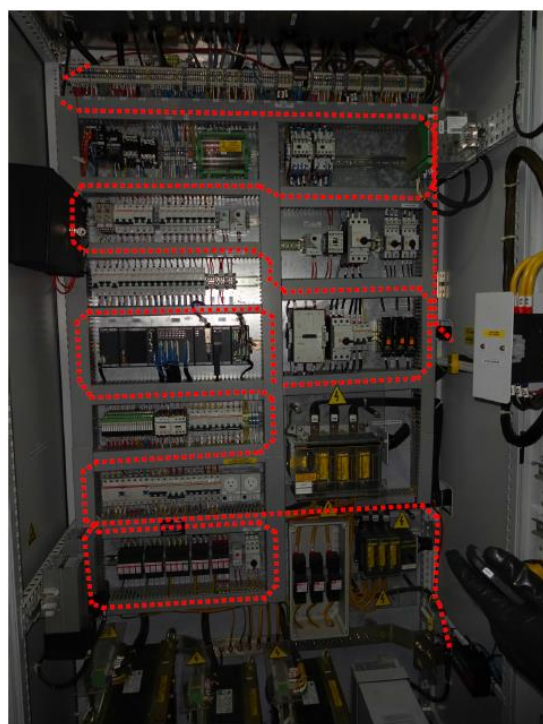
Figura 22: (a) Pressure Module Switch, PMS (b) Disposición de un PMS instalado en un aerogenerador real

El éxito de este sistema está en su layout de instalación. Los tubos son suficientemente finos lo que les permite ser colocados en pequeños espacios, como armarios de control, sin comprometer su normal funcionamiento. En la extremidad del tubo, se coloca el detector de presión, PSM, o bien un tapón, para cerrar el circuito. En el caso que se necesite expandir el sistema para otras áreas, o bien a la hora de instalar el manómetro, para monitorizar la presión, se instalan válvulas de 3 vías (indicado como *TEE*), ver Figura 23. [34]

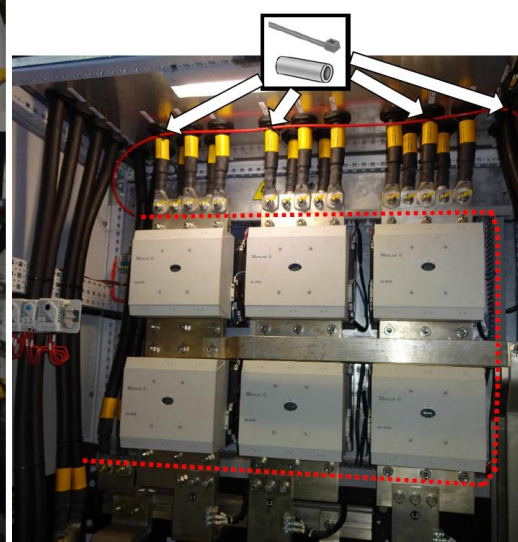




(b)



(c)



(d)

Figura 23:(a) Layout para la protección de una cabina de control. (b) Localización del cilindro (c) Layout real del sistema (d) Continuación de la instalación.



6.3. Monitoreo de instalación

Los sistemas de detección deben estar conectados a un sistema de monitorización que sea controlado de manera remota. En el caso que se detecte un incendio, es importante activar, de manera automática, la parada completa del aerogenerador y la desconexión de los sistemas eléctricos, además de contactar con los bomberos.

Empresas líderes como Siemens, disponen de sistemas completos anti incendios que pueden ser instalados en aerogeneradores de terceros. Estos sistemas de monitorización pueden comunicarse a través de una conexión de internet VPN, y el operador del parque puede saber desde la estación de control la causa del incendio y así poder direccionar los siguientes pasos. Normalmente se instalan sistemas de comunicación en la góndola y en el pie de la torre que están conectados pero funcionan de manera autónoma, aumentando la seguridad. ^[35]

Otra opción de monitorización es a través de sistema SCADA de control. Este está conectado con la estación de control a través de cables Ethernet o fibra óptica, o bien por medio de ondas de radio.

6.4. La desactivación de las instalaciones

En el caso de un incendio, el aerogenerador todos los sistemas mecánicos eléctrico e hidráulico deben ser apagados y el aerogenerador desconectado de la red de distribución automáticamente. Con excepción de los sistemas de información de emergencia y las luces de emergencia que deben tener una fuente autónoma de alimentación en el caso que haya personas dentro de la turbina, puedan encontrar el camino de la salida.

Un sistema adicional que asegure que el componente eléctrico, mecánico o hidráulico esté completamente aislado puede ser considerado. Los interruptores deben estar dotados de un seguro, que pueda prevenir que la turbina sea reconectada antes que se acaben los trabajos de mantenimiento, por ejemplo. Además estos interruptores no deben depender de una lógica de control, que puede, por alguna razón reconectar el sistema. ^[4]



7. Análisis de Casos

7.1 Caso 1 -rayo

7.1.1 Descripción de la investigación

Un caso real de incendio por caída de rayo ocurrió en 2004. [4] Una de las palas de una turbina de 2 MW fue alcanzada por un rayo y esta empezó a arder poco a poco hasta que pedazos en llamas cayeron en la góndola provocando un incendio secundario y que ha llevado a pérdida total del aerogenerador. En la Figura 24, se pueden ver fotos reales del accidente



Figura 24: Pérdida total de una turbina de 2 MW en un incendio provocado por rayo. (a) Vista cercana (b) Vista del parque.

7.1.2 Origen

El incendio empezó en este caso por una conexión atornillada del sistema de protección contra rayos. El arco formado entre el cable del pararrayos y el punto de conexión resultó en la ignición del terminal del cable y produjo una ignición debido a residuos de aceite hidráulico en las palas del rotor.

7.1.3 Causa del siniestro

Se detectó que la causa del accidente vino de un mantenimiento deficiente ya que la conexión atornillada del sistema de protección contra rayos no había sido arreglada correctamente.

7.1.4 Conclusiones

A causa del incendio, las operaciones tuvieron que ser interrumpidas por 150 días lo que resultó en una pérdida aproximada de 2 millones de euros. En este



accidente, por haber empezado en el exterior, un sistema de extinción no llegaría a cubrir la necesidad. Por otro lado, un sistema pasivo de protección, como recubrimientos anti incendio o barreras como el FRP, en la parte superior de la góndola, podría haber evitado el segundo incendio.

7.2 Caso 2 – Fallo mecánico

7.2.1 Descripción de la investigación

Un incendio ocasionado por fallo mecánico en el generador de un aerogenerador de 1,5MW que se quedó completamente quemado. ^[4] En la Figura 25, se puede ver una foto real del accidente.



Figura 25: Aerogenerador incendiado después de un fallo mecánico.

7.2.2 Origen

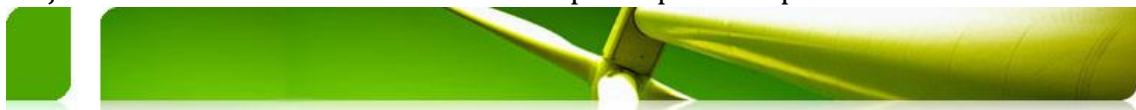
Las chispas producidas por el impulsor prendieron fuego a la almohadilla del filtro del ventilador que luego empezó a incendiar el aislante del capó del generador y así se propagó para toda la turbina.

7.2.3 Causas del siniestro

La causa del accidente puede haber sido accidental, en este caso debido a un fallo mecánico del anillo colector del ventilador del generador.

7.2.4 Conclusiones

El generador es uno de los componentes en lo que hay un riesgo elevado a incendio por producir chispas, trabajar a elevadas temperaturas y poseer circuitos eléctricos. En este incendio, sistemas activos de extinción podrían haber sido la mejor solución. Los detectores de humo por aspiración permitirían la detección



del incendio en una fase inicial y un sistema de extinción por gases o agua sería adecuado. Además sería también adecuado el sistema de extinción con tubos termosensibles y Novec 1230. El siniestro terminó con unas pérdidas estimadas de 800,000 euros.

7.3 Caso 3 - Mantenimiento

7.3.1 Descripción de la investigación

Un disyuntor que se situaba dentro de la góndola de un aerogenerador se incendió debido a un sobrecalentamiento en una conexión atornillada, que no estaba bien apretada. ^[4] El siniestro resultó en la pérdida completa del disyuntor como se puede apreciar en la Figura 26.



Figura 26: Disyuntor destruido por sobrecalentamiento

7.3.2 Origen

El origen del incendio se identificó como el propio disyuntor.

7.3.3 Causas del siniestro

Estos tornillos podrían haber estado flojos debido a una mala instalación, mal mantenimiento o por vibraciones.

7.3.4 Conclusiones

El fallo de los circuitos eléctricos, tal como fue comentado en la sección 4.3, representan una de las fuentes más comunes de incendio. De los sistemas tradicionales de detección adecuados, en este caso, serían los de detección de humos y extinción con CO₂ o gases inertes a presión. El sistema de detección y extinción por tubos termosensibles sería lo más adecuado ya que los tubos pueden



llegar a estas pequeñas zonas sin problemas con buena eficiencia. En este caso real el fuego no se propagó por toda la góndola, pero aun así generó pérdidas de sobre los 500,00€.

7.4 Caso 4 – Fallo eléctrico

7.4.1 Localización del siniestro

El siniestro ocurrió en 22 de Enero de 2006 en el parque eólico conocido como Canunda, localizado en el Sur de Australia, construido por Infigen Energy, un proyecto que tiene un total de 112 turbinas y una capacidad instalada de 278.5 MW [36]

7.4.2 Descripción de la investigación

Durante una ola de calor, muy característica del verano australiano, con temperaturas superiores a los 40°C, los sistemas de seguridad automáticos de los aerogeneradores del parque tuvieron que desactivarlos. El incendio empezó mientras un equipo de mantenimiento trabajaba en uno de los aerogeneradores desactivados. Como consecuencia todo el parque eólico tuvo que ser desactivado. [37]

Los bomberos llegaron al local del siniestro, pero poco se pudo hacer, por la altura de este aerogenerador, 67metros. El aerogenerador se quedó completamente destruido como se puede ver en la Figura 27. [38]



Figura 27: Aerogenerador incendiado después de un fallo eléctrico.



7.4.3 Origen

Se comprobó que el incendio tuvo inicio dentro de la góndola del aerogenerador.

7.4.4 Causas del siniestro

La investigación concluyó que la causa del incendio fue debida a un fallo eléctrico dentro de la góndola, aunque no se hizo público que parte específicamente. ^[39]

7.4.5 Conclusiones

Dado que el incendio empezó mientras trabajaba el equipo de mantenimiento, es posible que una falta de una buena formación anti incendio hizo que no se evitara el incendio, aunque es complicado saber exactamente las circunstancias ya que no se hicieron público estos detalles. Las pérdidas causadas por este incendio fueron de alta magnitud, debido al coste del aerogenerador Vestas, sobre los 2.2 millones de euros, y también por el tiempo que decenas de aerogeneradores del parque tuvieron que estar desactivados y sin generar.



Conclusiones

Muchos factores deben tenerse en cuenta para poder lograrse un nivel alto de protección contra incendio en aerogeneradores. En este trabajo, se han diagnosticado las causas más comunes de incendio y las medidas de prevención, activas y pasivas, que se pueden implementar para reducir los riesgos. Además, se ha señalado la importancia de los trabajos de mantenimiento y la del personal conocer los riesgos y sistemas de protección.

Como se comentó en la sección de análisis de casos, los accidentes por incendio son en gran parte muy costosos y peligrosos para la vida humana aunque para la cantidad de aerogeneradores que existen actualmente el número de turbinas incendiadas es relativamente bajo. Sin embargo, el número de incendios pueden aumentar debido al envejecimiento de turbinas de grande porte, que son el tipo que más atraen rayos, por ejemplo. Con la tendencia de parques eólicos mar afuera, las pérdidas son aún más significativas y el acceso y la llegada de la brigada de incendio puede ser limitado y a veces tardar lo suficiente para que no se pueda combatir el incendio.

Los sistemas de extinción están presentes en muchos nuevos modelos de turbinas y, aunque es obligatorio tenerlos instalados, no está definido qué tipos de sistemas o tecnología utilizada y, específicamente, como debe ser el diseño de su instalación. La instalación de estos sistemas podría ser de interés del propietario del parque, que ha invertido el dinero, pero también a las aseguradoras. Estas empresas deben arcar con los costes, aunque eso dependerá de las condiciones del tipo de seguro firmado, se podría plantear de reducir las primas que pagan los propietarios, en el caso de una mejora en sus sistemas de protección.



Referencias

- [1] GWEC, Global Wind Report, Annual Market Update, 2015.
http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-Report_2016.pdf
- [2] GCube, Towering Inferno, Noviembre de 2015. <http://www.gcube-insurance.com/en/press/gcube-tackles-turbine-fires/>
- [3] Caithness Windfarm Information Forum 2015, Accident statistics, 2015.
- [4] Wind Turbines Fire Protection Guidelines, VdS Verlag 2008.
- [5] NFPA 850, Chapter 10 Identification and Protection of Hazards for Wind Turbine Generating Facilities, 2015.
- [6] La investigació d'incendis i Explosions, Generalitat de Catalunya, 2010.
- [7] Mobil Lubricants and Greases for wind turbines, 2007.
- [8] CHATTOPADHYAY, Green Tribology, Green Surface Engineering, and Global Warming, 2014.
- [9] Wind and fire, Reducing the risk of fire damage in wind turbines, Renewable Energy World, 2004.
- [10] Directiva 2006/42/CE, <https://boe.es/doue/2006/157/L00024-00086.pdf>
- [11] Wind Power Monthly, Minimizing fire risk in wind turbines, 2015.
<http://www.windpowermonthly.com/article/1361476/minimising-fire-risk-wind-turbines>
- [12] DNVGL SE0077,
<https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/SE/2015-03/DNVGL-SE-0077.pdf>
- [13] INSHT, NTP 1022, Año 2014,
<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/NTP/NTP/Ficheros/1008a1019/ntp-1022w.pdf>
- [14] INSHT, NTP 1023, Año 2014,
<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/NTP/NTP/Ficheros/1008a1019/ntp-1023w.pdf>



- [15] INSHT, NTP 1024, Año 2014,
<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/NTP/NTP/Ficheros/1008a1019/ntp-1024w.pdf>
- [16] EDWARD RUPKE, Lightning Direct Effects, AGATE, 2002.
- [17] C.L. WADHWA, High Voltage Engineering, 2007.
- [18] INGESCO, http://www.ingesco.com/images/stories/products/FT_PREVISTORM_NET_LW_esp.pdf
- [19] How to Use Insurance To Lessen Wind Farm Risk, Alba Alessandro, NA Windpower, 2013.
- [20] International Energy Agency, Lightning Protection for Wind Turbines Installations, 1997.
- [21] International Electro Comiss, IEC62305-1 Protection against lightning, 2010.
- [22] Vestas Lightning Protection System, V90 – 3.0MW, 2005.
- [23] PEESAPATI, Lightning Protection of Wind Turbines, EWEC 2010.
- [24] P&B Weir Electrical, Mk10 Buchholz Relays for the protection of oil filled transformers,
<http://www.pbsigroup.com/userfiles/file/datasheets/weir/BuchholzCat.pdf>
- [25] SOLOMON UADIALE, Overview of Problems and Solutions in Fire Protection Engineering of Wind Turbines, University of Edinburgh, 2014.
- [26] International-PC, Hydrocarbon Fire Protection Coatings
<http://www.international-pc.com/products/fire-protection/hydrocarbon-fire-protection.aspx>
- [27] TOR A. JOHANSEN, Autonomous visual navigation of unmanned aerial vehicle for wind turbine inspection, NTNU,
<http://folk.ntnu.no/torarnj/inspec.pdf>
- [28] Wind Turbine protective measures EN50308:2004 British Standards, 2004.
- [29] Detector de llamas Infrarrojo SIEMENS, DF1101-Ex,
<https://www.downloads.siemens.com/download-center/d/Detector-de->



llamas-infrarrojo_A6V10254882_hq-
en.pdf?mandator=ic_bt&segment=HQ&fct=downloadasset&pos=downloa
d&id1=A6V10254882

[30] Detector lineal de humo ASA, SIEMENS, FDL241-9,
[https://www.downloads.siemens.com/download-center/d/Detector-
lineal-de-humo-ASA_A6V10254921_hq-
en.pdf?mandator=ic_bt&segment=HQ&fct=downloadasset&pos=downloa
d&id1=A6V10254921](https://www.downloads.siemens.com/download-center/d/Detector-lineal-de-humo-ASA_A6V10254921_hq-en.pdf?mandator=ic_bt&segment=HQ&fct=downloadasset&pos=downloa&id1=A6V10254921)

[31] Detector de Humo por Aspiración, SIEMENS, FDA241 / FDA221,
[https://www.downloads.siemens.com/download-center/d/Siemens-
ASD_A6V10418236_hq-
en.pdf?mandator=ic_bt&segment=HQ&fct=downloadasset&pos=downloa
d&id1=A6V10418236](https://www.downloads.siemens.com/download-center/d/Siemens-ASD_A6V10418236_hq-en.pdf?mandator=ic_bt&segment=HQ&fct=downloadasset&pos=downloa&id1=A6V10418236)

[32] Detector de llamas multi-sensores, SIEMENS,
[https://www.downloads.siemens.com/download-center/d/Multi-sensor-
fire-detector_A6V10444387_hq-
en.pdf?mandator=ic_bt&segment=HQ&fct=downloadasset&pos=downloa
d&id1=A6V10444387](https://www.downloads.siemens.com/download-center/d/Multi-sensor-fire-detector_A6V10444387_hq-en.pdf?mandator=ic_bt&segment=HQ&fct=downloadasset&pos=downloa&id1=A6V10444387)

[33] FIRETRACE, Fire Protection for Wind Turbines, Micro
Environment” Protection, 2013.

[34] FIRETRACE, Design, Installation, Operation and Maintenance
Manual, Automatic Fire Suppression Systems, 2014. CONFIDENTIAL.

[35] SIEMENS, Efficient fire safety for wind turbines, 2014.

[36] Wind Power and Wind Farms in Australia,
<http://ramblingsdc.net/Australia/WindPower.html>

[37] Wind Action, 2006. <http://www.windaction.org/news/1607>

[38] National Wind Watch, Scorched out: turbine fire at South Australia
wind farm, [https://www.wind-watch.org/news/2006/02/12/scorched-
out-turbine-fire-at-south-australia-wind-farm/](https://www.wind-watch.org/news/2006/02/12/scorched-out-turbine-fire-at-south-australia-wind-farm/)

[39] ABC news, 2006. [http://www.abc.net.au/news/2006-01-
23/experts-try-to-determine-wind-farm-blaze-cause/783782](http://www.abc.net.au/news/2006-01-23/experts-try-to-determine-wind-farm-blaze-cause/783782)



Màster Interuniversitari UB-UPC d'Enginyeria en Energia

Acta d'Avaluació de Projecte

Curs:
Codi UPC: **33563**

Data defensa:

Qualificació:

<input type="text"/>	<input type="text"/>
----------------------	----------------------

Alumne: **RAFAEL TORRES SILVA**

DNI: **Y1467126-Q**

Títol: **Diagnóstico del Riesgo y Medidas de Protección para Incendios en Turbinas Eólicas**

Director: **RICARD BOSCH TOUS**

Ponent:

Tribunal

President:

Vocals:

Suplents:

Observacions

Signatura

Convocatòria Ordinària,	Convocatòria Extraordinària,
Cognoms, nom (President)	Cognoms, nom (President)
Cognoms, nom (Vocal)	Cognoms, nom (Vocal)
Cognoms, nom (Vocal)	Cognoms, nom (Vocal)