

Analysis of the Thunderstorm Activity in Portugal for its Application in the Lightning Protection of Wind Turbines

R. B. Rodrigues, V. M. F. Mendes, J. P. S. Catalão, *Member, IEEE*, S. Correia, V. Prior, M. Aguado, *Member, IEEE*

Abstract— This paper presents a brief characterization of wind power in Portugal, considering the installed power capacity, the capacity under construction, and the location of wind farms. It also describes the Portuguese Lightning Location System, and presents the results of the occurrence of cloud-to-ground strikes both temporally and eographically distributed and the accumulative probability of the peak current. Based on these results, new ground flash density maps were drawn. Thus, this paper allows the characterization of discharges occurring in Portugal, helping to improve risk analysis and the protection systems adopted.

Keywords— lightning protection, risk analysis, wind energy.

I. INTRODUCCIÓN

EL creciente número de parques eólicos y en consecuencia la contribución de este tipo de energía al mix energético de los países hace que la fiabilidad de los mismos constituya un parámetro muy importante a tener en cuenta. En Portugal la primera turbina eólica se instaló en 1985, con 20 kW, pero en Septiembre de 2007 la potencia instalada y conectada a la red alcanzaba 2037 MW.

Una de las causas de daños más probables en los aerogeneradores son los rayos [1]. Los efectos directos e indirectos pueden producir daños en los sistemas eléctricos y electrónicos, pero también en los componentes mecánicos tales como palas y rodamientos [2]. Las estadísticas de daños en componentes de aerogeneradores se han analizado en la literatura [3], así como los métodos para el análisis de riesgo [4].

Desde un punto de vista eléctrico la superficie de la tierra se encuentra cargada negativamente y la parte alta de la atmósfera cargada positivamente. La mayor parte del tiempo la atmósfera se comporta como un buen aislante. Sin embargo y durante el proceso de formación de la descarga se produce una modificación en la distribución de las cargas siendo el rayo el encargado de restablecer el equilibrio inicial. Las descargas

nube-tierra (CG) son las más frecuentes y las que provocan la mayor parte de los daños en los aerogeneradores. [5]. En

Portugal se han registrado corrientes de hasta 400 kA (en rayos CG).

El punto de impacto de las descargas CG viene determinado por el origen del trazador ascendente que conectará con el más largo trazador descendente. Las turbinas, dadas sus características, se convierten en generadores de trazadores ascendentes. De acuerdo a la norma IEC 61400-24 [6] el sistema de control y las palas son los componentes que mas daños registran por impacto de rayo, junto con la propia instalación eléctrica.

Por todo lo indicado anteriormente, cabe señalar que: los aerogeneradores presentan un elevado riesgo de ser impactados; este riesgo está en aumento debido al mayor número de potencia instalada y al tamaño de las propias turbinas.

Aun así, no existe en la actualidad ninguna norma nacional o internacional específicamente desarrollada para la protección de aerogeneradores contra rayos. El documento más cercano es el IEC TR 61400-24, lo cual tiene un carácter informativo pero debe ser visto como un importante avance en el tema y el cual esta siendo revisado en la actualidad.

En Enero de 2006 surgió una nueva norma que establece los principios generales para la protección de estructuras contra los rayos [7]. Pero, la IEC 62305 no fue específicamente desarrollada para la protección de aerogeneradores y por lo tanto no se tienen en cuenta las particularidades de estas instalaciones. Las turbinas eólicas no solo son las estructuras más altas en zonas muy expuestas a tormentas, sino que tienen elementos conductores en movimiento, lo que requiere una atención especial desde un punto de vista de normalización.

El Sistema Automático de Localización de Rayos (SLR) de Portugal entró en funcionamiento en Junio de 2002, siendo operado por el Instituto de Meteorología (IM). En Diciembre del mismo año Portugal empezó a compartir datos con España. El sistema tiene ahora dieciocho detectores IMPACT, cuatro en Portugal y catorce en España, de los cuales Portugal comparte información con los cinco más cercanos. Más de medio millón de registros fueron analizados para encontrar el número de rayos CG sobre el territorio continental de Portugal. A partir de los datos registrados se pudieron elaborar los mapas de distribución de la densidad de impactos (Ng). La disponibilidad de los mismos va a permitir evaluar adecuadamente el riesgo al que se pueden ver sometidos los parques eólicos y por lo tanto puede contribuir a una mejor selección del emplazamiento de los mismos.

Este artículo presenta una breve caracterización de la

R. B. Rodrigues y V. M. F. Mendes son del Instituto Superior de Ingeniería de Lisboa, Lisboa, Portugal, rbrodrigues@deea.isel.ipl.pt; vfmendes@isel.pt.
J. P. S. Catalão es de la Universidad de Beira Interior, Covilhã, Portugal, catalao@ubi.pt.

S. Correia y V. Prior son del Instituto de Meteorología, Lisboa, Portugal, sandra.correia@meteo.pt; victor.prior@meteo.pt.

M. Aguado es de la Universidad Pública de Navarra, Pamplona, España, monica.aguado@unavarra.es.

energía eólica en Portugal, considerando la potencia instalada, la potencia en construcción, y la localización geográfica de los parques eólicos. Asimismo se describe el sistema de localización de descargas atmosféricas de Portugal, y se presentan los resultados de la ocurrencia de impactos nube-tierra tanto su distribución temporal como geográfica y la probabilidad acumulada del pico de corriente. Basados en estos resultados se dibujaron nuevos mapas de la densidad de rayos nube-tierra. Así, este artículo permite caracterizar las descargas atmosféricas acaecidas en Portugal y en consecuencia ayudará a mejorar los análisis de riesgos y los sistemas de protección adoptados.

II. CARACTERIZACIÓN

La primera turbina eólica en Portugal fue instalada en Lourel, en 1985. Esta turbina era un modelo 12/20 Aeroman con 20 kW, y durante trece años sólo se instalaron dos turbinas más. Pero desde 1998 la potencia instalada en turbinas eólicas creció considerablemente, como se puede ver en la Fig. 1 [8].

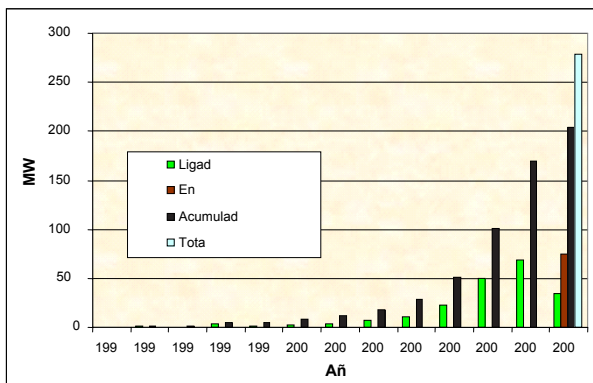


Figura 1. Energía eólica en Portugal, desde 1995 hasta 2007 [8].

La situación general de la energía eólica en Portugal continental se puede ver en la Tabla 1 y Fig. 2.

TABLA I
DATOS GENERALES DE LA ENERGÍA EÓLICA EN PORTUGAL [8]

Potencia sustentable estimada para energía eléctrica (MW)	4800
Potencia total en operación en Septiembre 2007 (MW)	2037
Potencia en construcción en Septiembre 2007 (MW)	746

Enseguida se muestra el valor del índice ceraunico Td (número de días al año que se escucha el trueno), Fig. 3.

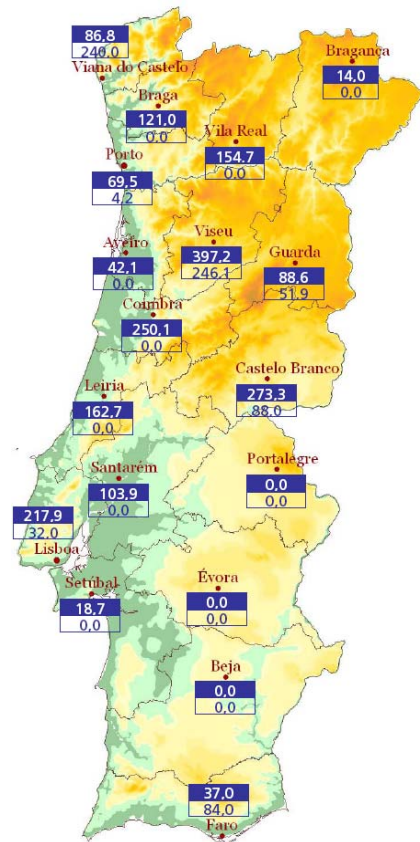


Figura 2. Potencia eólica en Portugal por provincia [8].

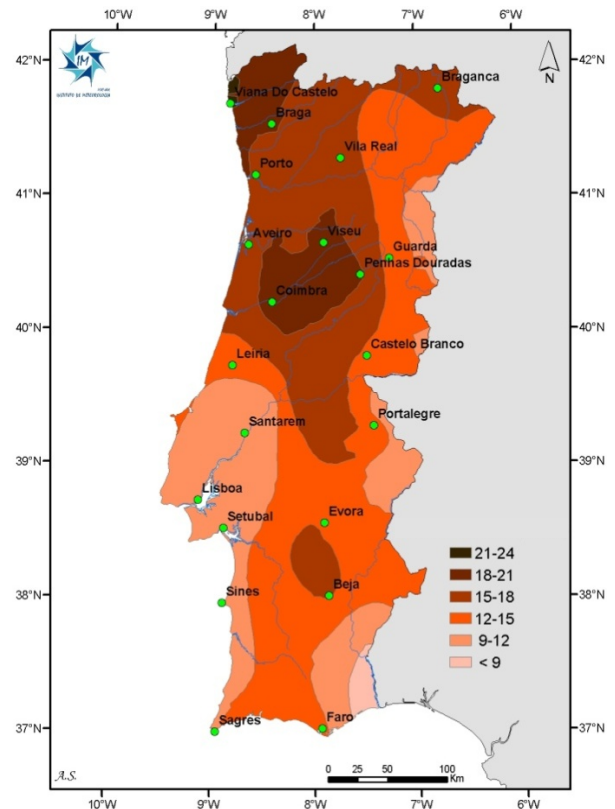


Figura 3. Mapa con el promedio de Td en Portugal, desde 1961 hasta 1990 [9].

Cuanto mayor es el número de aerogeneradores mayor es lógicamente el riesgo de ser impactadas. La caracterización espacial y temporal de la actividad tormentosa es un factor importante para el éxito de esta tecnología. El emplazamiento de los parques eólicos deberá tener en cuenta no solo el recurso eólico sino también la densidad de impactos de rayos del mismo. Portugal tiene una divulgación muy limitada en lo que respecta a mapas Ng. El mapa Td de la Fig. 3 es un mapa de divulgación general. Pero los mapas Td no tienen la precisión necesaria para el propósito que aquí se expone. En primera instancia, los datos se obtienen de forma manual por personas (observadores meteorológicos). En segunda instancia, se ha demostrado que la relación entre Td y Ng a nivel local no se cumple [10,11].

Por otro lado, el conocimiento de la probabilidad acumulada del pico de la corriente es de grande importancia, ya que permite caracterizar adecuadamente las descargas de la zona y en consecuencia elegir los dispositivos de protección contra sobretensiones a instalar.

Desde el punto de vista económico es necesario reseñar que los daños por impacto de rayo no solo afectan a las pérdidas por daños en los componentes sino que habrá que tener en cuenta el lucro cesante por parada del mismo. En definitiva el conocimiento del riesgo por impacto de rayo en estas instalaciones es necesario para una mejor operación y gestión del mismo.

III. METODOLOGÍA

El primer sistema automático de localización de rayos en Portugal empezó a funcionar en Junio de 2002, operado por el Instituto de Meteorología. En Diciembre del mismo año Portugal y España empiezan a cambiar datos recogidos por sus sistemas. El sistema ibérico tiene dieciocho detectores IMPACT: cuatro en Portugal y catorce en España, de los cuales comparte información con los cinco más cercanos (Fig. 4).

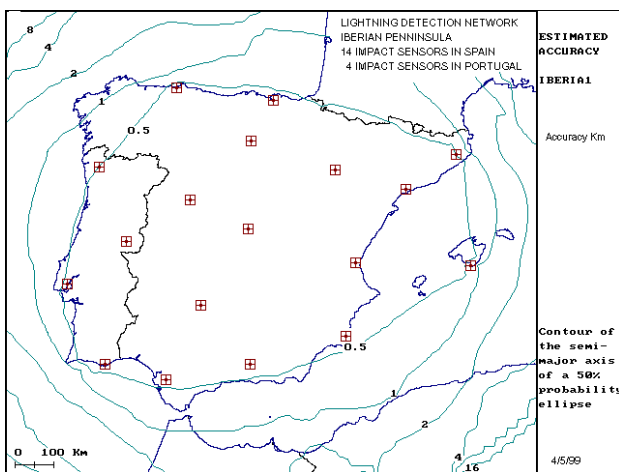


Figura 4. Localización de los detectores IMPACT y precisión del sistema [9].

Se utilizan tres métodos para localizar en latitud y longitud el impacto del rayo: dirección magnética, tiempo-de-llegada, y una combinación de los dos. El sistema además permite la medición del pico de corriente.

El fabricante del programa de ordenador estima un error en la localización espacial sobre el territorio Portugués menor que 500 m para el mayor semieje de la elipse con probabilidad 50 %. Además, se estima una eficiencia mayor que 90 % para rayos con picos de corriente mayores que 5 kA y sobre el mismo territorio (Fig. 5). En la Fig. 6 se muestra uno de los detectores IMPACT.

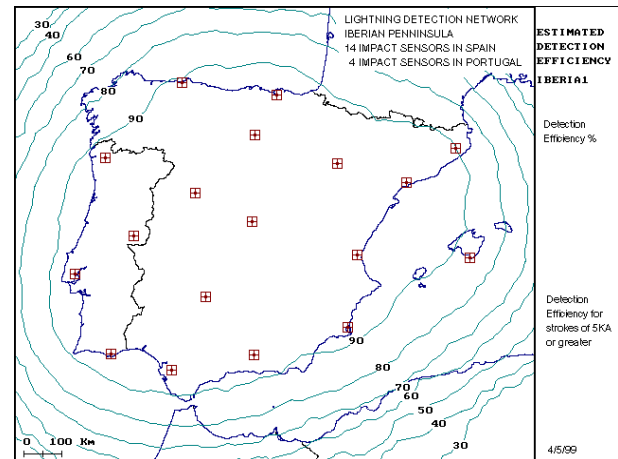


Figura 5. Eficiencia del sistema en Península Ibérica [9].



Figura 6. Detector IMPACT [9].

La información recogida es validada por el programa y guardada automáticamente en un fichero ASCII. Los datos son después analizados con un programa específico para bases de datos resultando en una caracterización probabilística. El sistema de detección recoge informaciones de zonas tan lejanas como Azores, Suiza, Inglaterra, y norte de África, y por eso se limitó el análisis a tres rectángulos iguales entre $36.9^{\circ} \leq \text{latitud} \leq 42.2^{\circ}$. El rectángulo A se sitúa sobre una área del Océano Atlántico ($-13.1^{\circ} \leq \text{longitud} \leq 9.6^{\circ}$); el rectángulo B cubre completamente el territorio continental de Portugal ($-9.6^{\circ} \leq \text{longitud} \leq -6.1^{\circ}$); y el rectángulo C cubre una parte de España cerca de Portugal ($-6.1^{\circ} \leq \text{longitud} \leq -2.6^{\circ}$). Estos rectángulos se reflejan en la Fig. 7. Esta se definió a partir de los datos del IGP – Instituto Geográfico Portugués. El objetivo fue caracterizar con precisión la frontera Portuguesa.

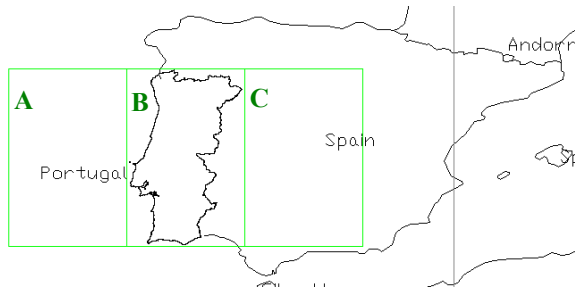


Figura 7. Áreas consideradas en este trabajo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados presentados abarcan desde Julio de 2002, cuando el sistema empezó a funcionar, hasta Junio de 2007. Los datos de 2002 se consideran preliminares ya que el sistema estaba todavía en fase de prueba.

La Fig. 8 muestra la distribución de rayos CG en cada una de las áreas. La incidencia en el área A es cercana al 25% de la observada en el área B. El área B presenta una mayor incidencia de descargas positivas frente a la C.

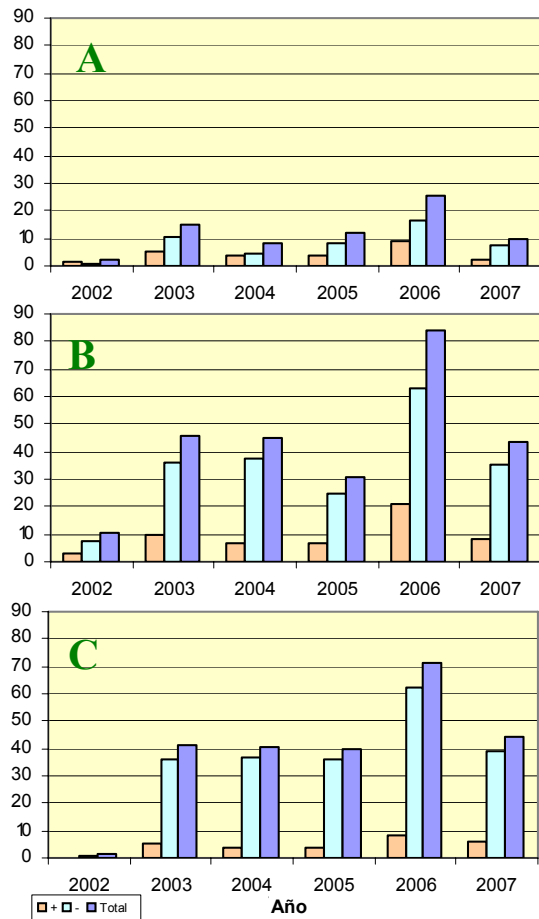


Figura 8. Numero de rayos CG ($\times 1000$) por área considerada. Polaridad positiva en naranja, polaridad negativa en azul claro y la suma en azul oscuro.

La Fig. 9 muestra la distribución relativa de la polaridad. Las descargas positivas en el área A son alrededor de 35%, en el área B cerca de 23%, y en el área C son 10%. Normas internacionales, tales como IEC 62305-1, consideran una proporción de 10% para polaridad positiva y 90% para la

negativa.

El gran porcentaje de rayos CG positivos observados en Portugal se debe, probablemente, a su condición de frontera entre el Océano Atlántico y el Continente Europeo.

Tal y como se indicaba en la introducción se considera necesaria no solo una caracterización temporal de las descargas sino una distribución espacial de las mismas. Los resultados obtenidos de dos años se muestran en las Figs. 10 y 11. Para los demás años los resultados son semejantes. En la Fig. 10 se observa una disminución en los rayos CG positivos con el crecimiento del valor de latitud. La Fig. 11 pone en evidencia lo descrito para la Fig. 9.

Se observa una gran variación a lo largo de los cinco años del estudio. Como ejemplo se presenta en la Fig. 12 la cantidad de rayos CG por mes en el año 2003 para Portugal. La Fig. 13 es otro ejemplo para el año 2004. Las Figs. 14 y 15 presentan la distribución relativa de polaridad por mes, para 2003 y 2004.

A pesar de la gran variación observada en la distribución con valores absolutos, se observa un comportamiento muy estable para distribuciones con valores relativos al largo de los años. En Portugal los rayos CG positivos son más frecuentes en los meses de invierno (Octubre a Marzo) alcanzando el 40% (Fig. 14 y 15), pero las negativas son más frecuentes en verano (Abril a Septiembre), alcanzando 90%.

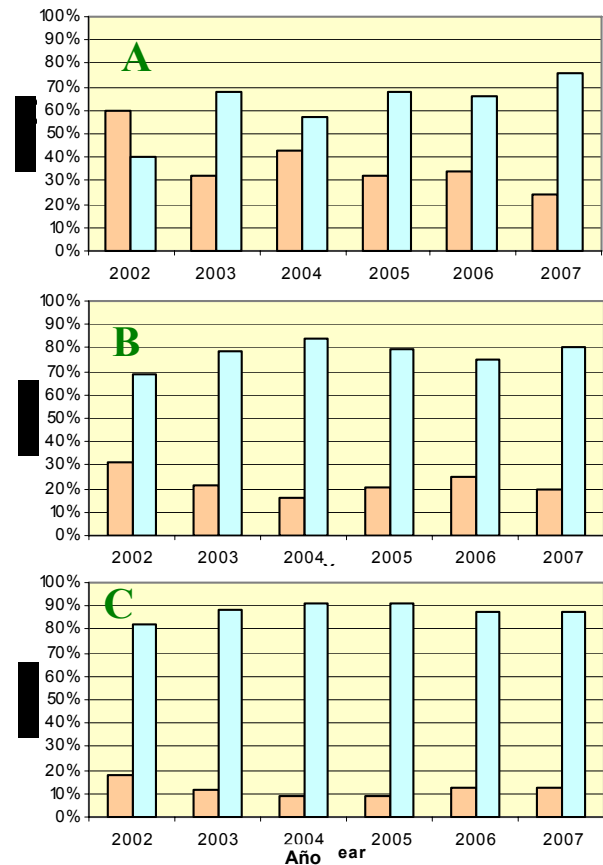


Figura 9. Distribución relativa de polaridad por área considerada.

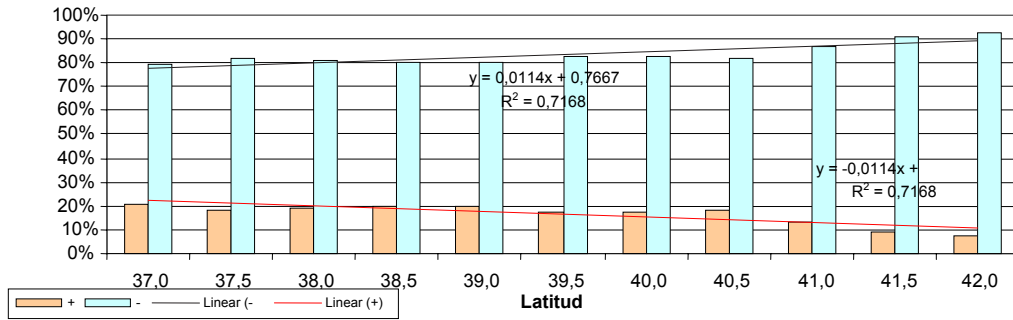


Figura 10. Distribución relativa de rayos CG por latitud en 2004.

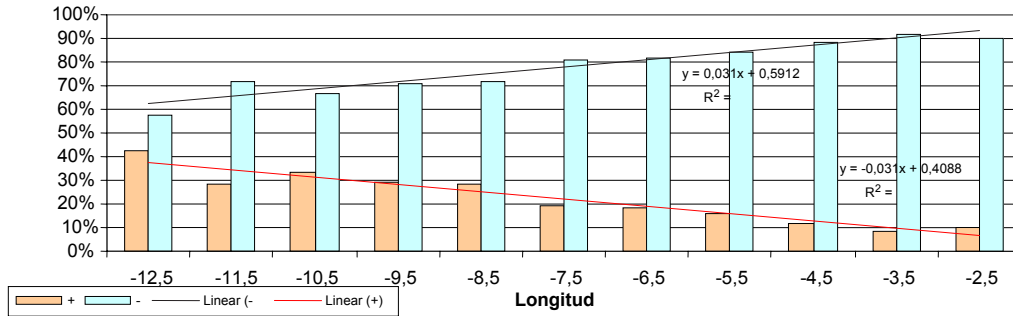


Figura 11. Distribución relativa de rayos CG por longitud en 2003.

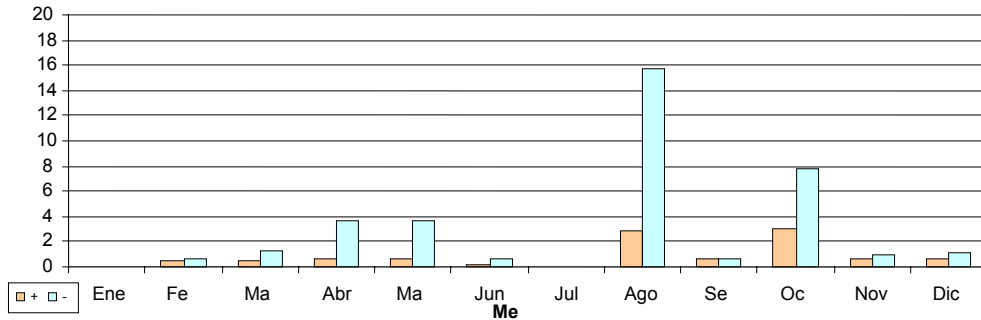


Figura 12. Rayos CG (x1000) por mes sobre área B en 2003.

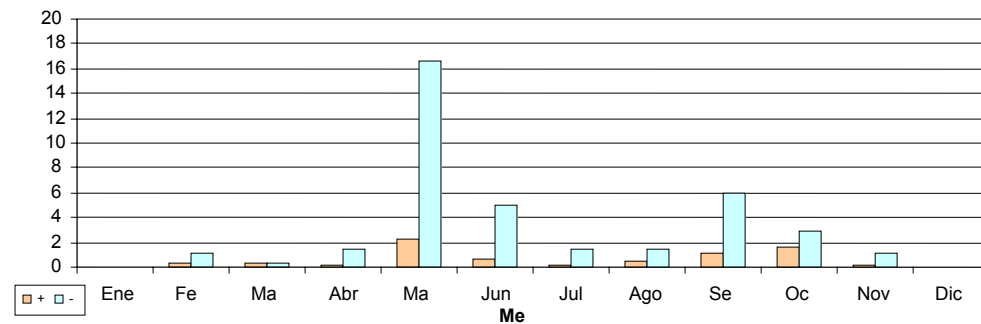


Figura 13. Rayos CG (x1000) por mes sobre área B en 2004.

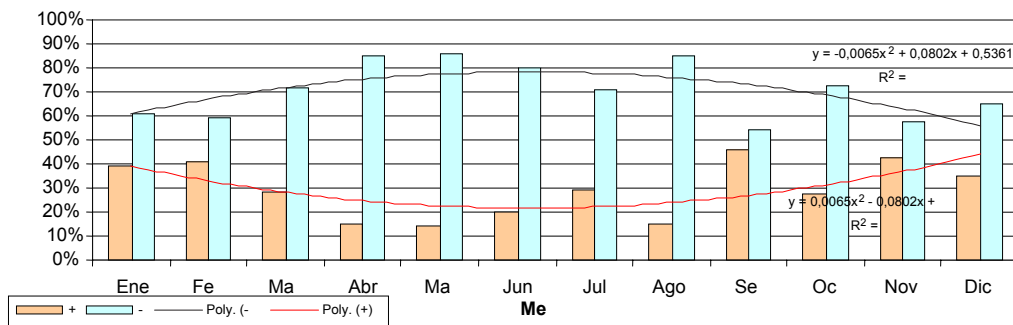


Figura 14. Distribución relativa de polaridad por mes sobre área B en 2003.

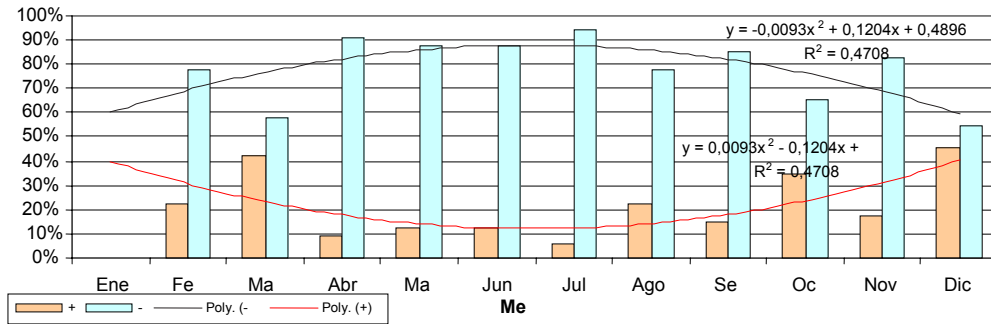


Figura 15. Distribución relativa de polaridad por mes sobre área B en 2004.

La probabilidad acumulada del pico de corriente se muestra en la Fig. 16 y se compara con la curva de la norma IEC en rojo [12].

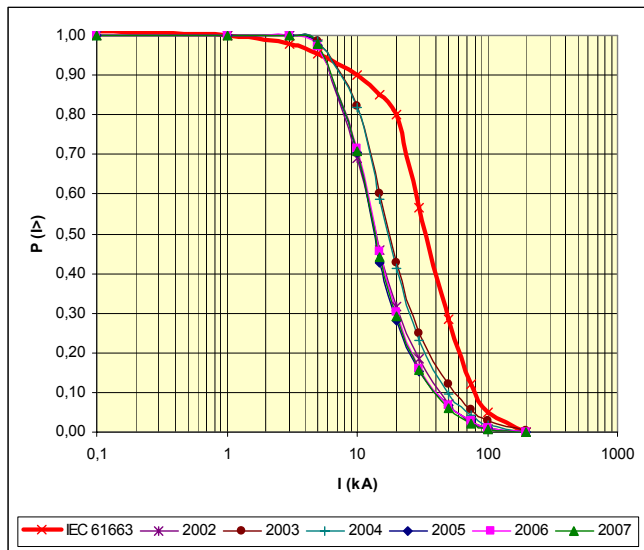


Figura 16. Probabilidad acumulada del pico de corriente.

Como se puede observar en la Fig. 16 la distribución de la probabilidad del pico de corriente es muy similar a lo largo de los cinco años del estudio. Sin embargo estas se alejan de la curva de IEC. De acuerdo con la curva de IEC, 80% de los rayos CG tienen un pico de corriente inferior a 20kA. Pero en Portugal el 80% tienen un pico de corriente inferior a 10kA.

En lo que respecta al cálculo de la densidad de impactos de rayos es necesario indicar que se han manejado más de medio millón de registros de impactos. Es importante además señalar que cerca de 2×10^5 han sido validados por el programa informático.

Los mapas Ng caracterizan la situación tormentosa de una región y nos permiten obtener un parámetro muy importante en la evaluación del riesgo de daños en sistemas eléctricos. Entre los diversos aspectos a considerar en la prevención de daños causados por los efectos directos e indirectos de los rayos se encuentra la importante decisión sobre el emplazamiento de un parque eólico.

Las Figs. 17 y 18 muestran los mapas Ng para Portugal con datos recogidos entre 2003 y 2006. El método utilizado para dibujar estos mapas se baso en las recomendaciones dadas por

CIGRÉ, tomando como divisiones mallas de 10 km y solo se han considerado los datos validados por el programa informático.

De la comparación entre los mapas Ng presentados en las Figs. 17 y 18 y el mapa Td de la Fig. 3 se observa que en esta ultima la región de Viana do Castelo, en el norte de Portugal, aparece como una de las zonas con mayor nivel ceraunico, y sin embargo de acuerdo al mapa de densidad de impactos de rayos Viana do Castelo aparece como una de las regiones con menor riesgo de impacto. En esta zona están implantados 5 parques eólicos con 39 turbinas y una potencia total de 86.8 MW.

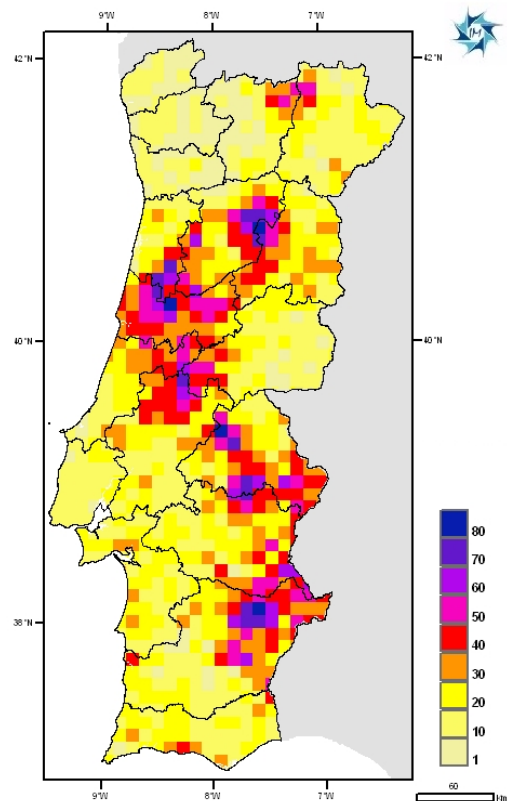


Figura 17. Número de rayos CG positivos entre 2003 y 2006.

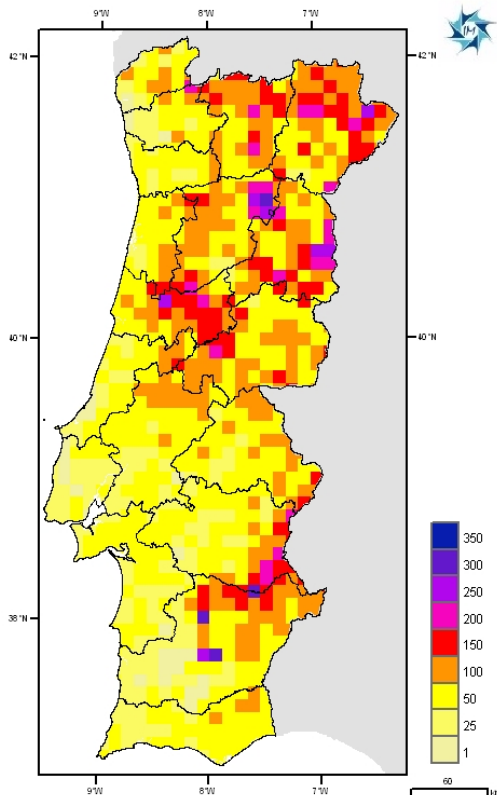


Figura 18. Número de rayos CG negativos entre 2003 y 2006.

Algunas expresiones empíricas establecen una relación entre los parámetros Ng y Td. Se toma como ejemplo la expresión adoptada por CIGRÉ:

$$Ng = 0.023 Td^{1.3} \quad (1)$$

De acuerdo a la Fig. 3 en la región de Viana do Castelo el valor del índice ceraunico varia entre 18 y 21. Utilizando (1) se obtiene los correspondientes valores para Ng, que varían entre 0.98 y 1.2. Si calculamos la densidad de impactos de rayos a partir de los datos del sistema de detección el valor de Ng es 0.2, 6 veces menor que el valor 1.2 calculado a partir de Td.

TABLA II
VALORES NG BASADOS EN FIG. 17 Y 18.

		cuadrados	n° CG	área (km ²)	Ng
+	CG < 10	13	130	1300	0.03
	10 < CG < 20	9	135	900	0.04
-	25 < CG < 50	8	304	800	0.09
	50 < CG < 100	9	675	900	0.19
	100 < CG < 150	5	625	500	0.31

De entre las tres áreas consideradas, el área B que cubre la totalidad del territorio continental de Portugal, es el área con mayor valor Ng. De una forma global el parámetro Ng varia entre $0.2 \leq Ng \leq 0.5$. Este valor a nivel global permite indicar que Portugal presenta un bajo nivel de impactos de rayos y por lo tanto como un país de bajo riesgo estando de acuerdo con

los daños causados por rayos en personas, servicios y bienes materiales [13]. No obstante y como continuación de las actuales investigaciones es necesario profundizar más sobre el modo de validación de los datos para un cálculo más preciso del parámetro Ng.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se han presentado nuevos resultados experimentales y analíticos en relación a la caracterización de las descargas atmosféricas en Portugal para aplicación futura en el cálculo del índice de riesgo de las instalaciones eléctricas y en particular de los parques eólicos. La comparación de la situación utilizando mapas Ng y mapas Td esta de acuerdo con resultados previos sobre la relación entre estos dos parámetros y la necesidad de utilizar siempre que se disponga de ello, el valor de Ng. Portugal tiene un porcentaje de rayos CG positivos por lo menos dos veces mayor que el valor indicado en la IEC. El cálculo de la probabilidad acumulada nos muestra que el pico de corriente para Portugal es dos veces menor que el valor indicado en las normativas IEC. Finalmente la distribución relativa de la polaridad por mes nos muestra que las descargas positivas son más frecuentes en los meses de invierno, y las negativas son más comunes en los meses de verano.

REFERENCIAS

- [1] M. Paolone, F. Napolitano, A. Borghetti, C. A. Nucci, M. Marzinotto, F. Fiamingo, C. Mazzetti, and H. Dellago, "Models of wind-turbine main shaft bearings for the development of specific lightning protection systems," presented at the IEEE Power Tech 2007 Conf., Lausanne, Switzerland, July 2007.
- [2] I. Cotton, N. Jenkins, and K. Pandiaraj, "Lightning protection for wind turbine blades and bearings," *Wind Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 23–37, Jan.–Mar. 2001.
- [3] T. Sorensen, F. V. Jensen, N. Raben, J. Lykkegaard, and J. Saxov, "Lightning protection for offshore wind turbines," presented at the 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Amsterdam, Netherlands, June 2001.
- [4] A. Kern and F. Krichel, "Considerations about the lightning protection system of mains independent renewable energy hybrid-systems—practical experiences," *J. Electrost.*, vol. 60, no. 2–4, pp. 257–263, Mar. 2004.
- [5] B. Glushakow, "Effective lightning protection for wind turbine generators," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 1, pp. 214–222, Mar. 2007.
- [6] IEC, "Wind turbine generator systems—Part 24: Lightning protection," TR 61400-24, 2002.
- [7] IEC, "Protection of structures against lightning—Part 1: General principles," 62305-1, 2006.
- [8] INEGI—Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial. <http://www.inegi.pt>
- [9] IM—Instituto de Meteorologia. <http://www.meteo.pt>
- [10] S. M. Chen, Y. Du, and L. M. Fan, "Lightning data observed with lightning location system in Guang-Dong province, China," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 3, pp. 1148–1153, July 2004.
- [11] M. Aguado, "Determinación de los parámetros del rayo en Navarra para su aplicación en los sistemas eléctricos de potencia y su correlación con las características del terreno," Tesis Doctoral, Universidad Pública de Navarra, Pamplona, España, 2000.
- [12] IEC, "Lightning protection—Telecommunication lines—Part 2: Lines using metallic conductors," 61663-2, 2001.
- [13] R. Rodrigues, C. Soares, and M. Aguado, "New data about lightning damages in Portugal and Navarra (Spain)," presented at the 28th Int. Conf. Lightning Protection, Kanazawa, Japan, Sept. 2006.

R. B. Rodrigues recibió el grado de M.Sc. por el Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, en 2005.

Actualmente es estudiante de Doctorado en la Universidad de Beira Interior, Covilhã, Portugal, en colaboración con el Instituto Superior de Ingeniería de Lisboa, Lisboa, Portugal. Sus áreas de interés incluyen la protección contra rayos, la calidad de energía, y los sistemas de energía eólica.

V. M. F. Mendes recibió los grados de M.Sc. y Ph.D. por el Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, en 1987 y 1994, respectivamente.

Actualmente es Coordinator Professor with Aggregation en el Instituto Superior de Ingeniería de Lisboa, Lisboa, Portugal. Sus áreas de interés incluyen la coordinación hidrotérmica, la teoría de la optimización y sus aplicaciones, y las energías renovables.

J. P. S. Catalão (M'04) recibió el grado de M.Sc. por el Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, en 2003 y el grado de Ph.D. por la Universidad de Beira Interior, Covilhã, Portugal, en 2007.

Actualmente es Assistant Professor en la Universidad de Beira Interior. Sus áreas de interés incluyen la programación hídrica, la programación térmica, el pronóstico de precios, los sistemas de energía eólica, y los mercados eléctricos.

Dr. Catalão es Editor Asociado del *International Journal of Power and Energy Systems*, y Miembro del Consejo Editorial de *Electric Power Components & Systems*. Es también revisor regular en IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, en *IET Generation, Transmission & Distribution*, y en *Electric Power Systems Research*.

S. Correia recibió el grado de Ciencias Geofísicas por la Universidad de Lisboa, Lisboa, Portugal, en 2003.

Actualmente es Asistente Técnica en el Instituto de Meteorología, Lisboa, Portugal. Sus áreas de interés incluyen las ciencias atmosféricas, especialmente la actividad tormentosa.

V. Prior recibió el grado de Ph.D. por la Universidad de Aveiro, Aveiro, Portugal, en 2006.

Actualmente es Coordinador del Centro de Procesamiento Numérico e Predicción del Instituto de Meteorología, Lisboa, Portugal. Sus áreas de interés incluyen las ciencias atmosféricas, especialmente la actividad tormentosa.

M. Aguado (M'04) recibió los grados de Ingeniería Eléctrica y Ph.D. por la Universidad Pública de Navarra, Pamplona, España, en 1994 y 2000, respectivamente.

Actualmente es Profesora Titular de Área de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Pública de Navarra, así como la directora del departamento de Integración en red de Energías Renovables del Centro Nacional de Energías Renovables (CENER). Sus áreas de interés incluyen las energías renovables, la protección contra rayos, y los transitorios en los sistemas eléctricos de potencia.