

DEWI / MADE Load Measurements in Spain

DEWI / MADE Medidas de carga en España

Seifert, Henry; DEWI

González Vives, Federico N.; MADE Tecnologías Renovables, S.A., Spain

1. Introduction

"Spain may be the leading market in Europe for the coming five years" said BTM in their latest World Market Update, published in March 1999. This amazing and fast wind energy development in Spain is highly related to the huge effort done by the Spanish manufacturers. One of them, MADE, released its 660 kW three bladed horizontal axis wind turbine MADE AE-46/I during the year 1998, designed as an IEC Class I turbine.



1. General

"España debe ser el líder del mercado europeo en los próximos 5 años" decía BTM en su World Market Update, publicado el pasado mes de Marzo, 1999. Este sorprendente y vertiginoso desarrollo de la energía eólica en España en parte es debido al enorme esfuerzo realizado por los fabricantes españoles. Uno de ellos, MADE, lanzó al mercado en 1998 el AE-46/I, una máquina tripala de eje horizontal y 660 kW de potencia nominal, diseñada como clase I según la normativa de la IEC

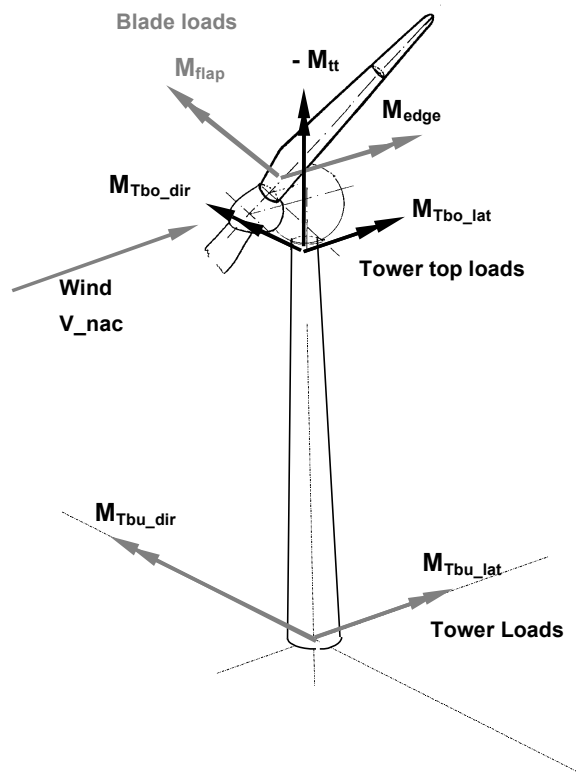


Fig. 1: The MADE AE – 46/I at the site (left) and the load quantities measured at the turbine (right).
Fig. 1: El MADE AE-46/I en el emplazamiento (izq.) y las cargas medidas en la máquina (dcha.)

Load measurements are becoming each day more and more essential for the testing and certification process of prototype wind turbines. On the one hand, the manufacturers' development departments want to verify their design codes and their load assumptions used. The load measurements are the only reliable way of doing so. On the other hand, the dynamic behaviour can be checked against resonances during the commissioning and optimisation period of the turbine. Another "check point" is the determination of operational loads du-

Las medidas de cargas son cada vez más importantes para los ensayos en campo y los procesos de certificación de prototipos. Por un lado, los departamentos de desarrollo de los fabricantes necesitan comprobar la bondad de los códigos utilizados y las hipótesis hechas para las cargas. Las medidas en campo son la única alternativa fiable para ello. Y por otro lado, el comportamiento dinámico puede ser analizado, tratando de localizar resonancias durante el período de puesta a punto de la

ring transient events such as starts, switching between modes, or normal and emergency stops. Finally, the fatigue loads can be determined for the main components of the turbine under different external and operational conditions and extrapolated to the design life time of the turbine for various site dependent wind speed distributions and turbulence intensities.

2. Setting-up the Measurements



Fig. 2: Calibration of the blade root bending moment in flapwise direction.

Fig. 2: Calibración del momento flector en la raíz de pala según la dirección de flap

However, load measurements have the touch to be rather expensive and time consuming. IEC TC88 has launched a working group to work out a technical guideline for standardised load measurements which will end up in the document IEC-61400-13 aiming at the specification of methods and techniques for the experimental determination of mechanical loads on wind turbines [1,2]. At the MADE prototype AE – 46/I at Barbanza in NW - Spain, DEWI performed a load measurement at the main components like rotor blade root, main shaft, tower top and bottom, taking this new IEC document into account as far as possible. Fig. 1 shows the turbine and the load quantities monitored. In addition to this – aiming at achieving a

máquina. Otro punto crucial es la determinación de las cargas que aparecen durante los transitorios de arranque y parada (normal o de emergencia) o en las conmutaciones entre modos de operación. Finalmente, las cargas de fatiga se pueden determinar para los principales componentes para diferentes condiciones externas y de operación, y extrapolarlas a la vida útil de diseño, para varias velocidades medias de viento y distintas intensidades de turbulencia (dependientes del emplazamiento)

2. Configuración de las medidas

La medida de cargas tiene la rara virtud de ser una actividad cara y que necesita mucho tiempo. Dentro del TC88 de IEC se ha organizado un grupo de trabajo encargado de redactar unas recomendaciones técnicas para armonizar la medida de cargas, y que en un futuro se plasmarán en el documento IEC-61400-13, haciendo hincapié en la especificación de métodos y técnicas para la medida de cargas en aerogeneradores [1,2]

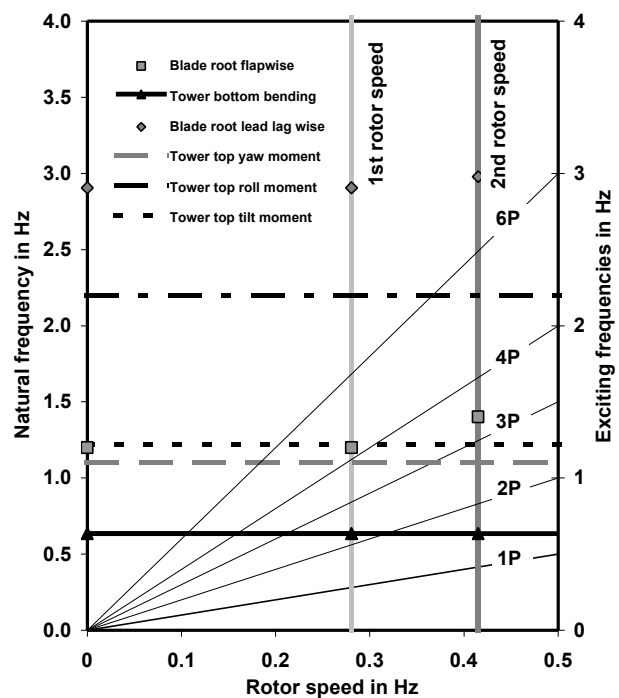


Fig. 3: Campbell diagram of the turbine
Fig. 3: Diagrama Campbell del aerogenerador.

En el prototipo MADE AE-46/I instalado en el parque de Barbanza, en el noroeste de España, DEWI llevó a cabo una campaña de medida de cargas en los principales componentes, tales como raíz de pala, eje principal, parte superior y base de la torre en los que se tomaba como referencia, dentro de lo posible, el borrador de este nuevo documento IEC. En la Fig. 1 se muestran tanto la máquina como la cargas

complete test of the machine, power curve, noise emission and power quality have been measured according to existing Standards, guidelines and recommendations such as IEC 61400-11, -12, MEASNET procedures and FGW Technical Guidelines. Due to the very complex terrain at Barbanza, a site calibration turned out to be necessary in order to determine the flow distortion factors between the windspeed measured at the metmast and the one at the hub height.

For DEWI this campaign was the first load measurement performance in Spain, which caused a lot of additional, not expected practical problems during transportation, installation, commissioning and maintenance of the data acquisition system which were, however, finally solved. As the large amount of collected data could not be transferred economically and safely via telephone modem only averages and test data were transferred and regularly checked during the measurement campaign. In order to keep the number of 10-minute time series as limited as possible a so called capture matrix was used to automatically monitor and store all relevant and representative time series for the chosen wind speed and turbulence intensity intervals.

3. No Resonance in the Signals

After the installation of the load sensors - strain gauge bridges at the blade root, the main shaft, at tower top and bottom - calibration procedures were applied and documented. Fig. 2 shows exemplary the calibration of the blade root flap wise bending moment by pulling the blade tip towards its access door in the tower whilst using a load cell for measuring the applied load. Most of the measured 10 minute time series were recorded within one month after the final installation of the sensors and calibration and verification of the signals. The load measurement campaign was then interrupted by the site calibration campaign with parked turbine in order to verify the power curve measurement.

Power spectra were calculated for typical or representative time series such as standstill, idling, operation near cut in, at rated wind speed and at high wind speed in order to identify structural resonances and narrow banded excitation using the FFT method. The results were combined in a Campbell or Resonance diagram for this turbine shown in Fig. 3. The tower head motion was identified by combining the load signals from the blade (lead - lag and flap wise direction), from the two perpendicular directions at the main shaft and the tower top bending and torsion. For all the situations and data investigated no resonance state could be detected for the observed components.

monitorizadas. Además, y con vistas a tener un conocimiento completo de la máquina, la curva de potencia, la emisión de ruido y la calidad de la energía producida fueron también medidas conforme a las normativas y recomendaciones existentes, tales como IEC-61400-11, -12, procedimientos MEAS- NET y especificaciones técnicas de la FGW. Debido a que el parque de Barbanza es un emplazamiento muy complejo, fue necesario llevar a cabo un "site calibration", para así poder determinar los factores de corrección del flujo entre la velocidad medida en el mástil meteorológico y la que se tiene a la altura del buje.

Para DEWI esta era la primera campaña de cargas llevada a cabo en España, lo que inicialmente introdujo varios problemas imprevistos durante el transporte, instalación, puesta a punto y mantenimiento en operación del sistema de adquisición de datos, que fueron sin embargo solucionados. Dado que la enorme cantidad de datos recogidos hacia inviable económicamente su envío por modem, tan sólo los valores medios eran enviados, siendo regularmente comprobados durante la campaña de medida. Para limitar al máximo el número de series diezminutales recogidas, se utilizó la llamada "matriz de captura", que monitoriza y guarda de forma automática todas las series temporales significativas para los intervalos elegidos de velocidad de viento e intensidad de turbulencia.

3. Ausencia de resonancias

Después de la instalación de los sensores de cargas - puentes extensométricos en la raíz de pala, eje principal y parte superior y base de la torre - se llevaron a cabo (y se documentaron) los procedimientos de calibración para los mismos. Como ejemplo, en la Fig. 2 se muestra la calibración del momento flector en la raíz de pala en la dirección de flap, tirando de la punta de la misma desde la ventana de inspección de aerofrenos mientras que se medía la fuerza aplicada con una célula de carga. La gran mayoría de las series diezminutales fueron grabadas en menos de un mes desde la calibración de los sensores. En ese momento se interrumpió temporalmente la campaña de medida para realizar, con la máquina parada, el "site calibration" necesario para la corrección de la curva de potencia.

Los espectros de carga se calcularon para los modos de operación más representativos, como son la parada, el idling, operación con bajo viento, en condiciones nominales y para alto viento, de manera que fuera posible identificar resonancias estructurales y excitaciones a

4. Time Histories and its Evaluation

Fig. 4 shows typical time series of the meteorological, operational, and load quantities at different wind speeds. Special attention has been drawn on the so called edgewise vibrations which may occur at stall controlled rotor blades in the post stall region. Only very small excited edgewise vibrations were detected, far away from causing unexpected fatigue loads. Representative time series of all main components were selected and "Rainflow counted". These data were combined with a

frecuencias concretas, para lo que se realizó una FFT de las señales muestreadas. Los resultados se muestran de forma resumida en la Fig. 3, diagrama Campbell o de resonancia de la máquina. El movimiento de la góndola se obtuvo por combinación de las dos señales de las palas (flap y lag), de las dos direcciones perpendiculares en el eje lento y los dos momentos flectores y la torsión en la parte superior de la torre. No se observó resonancia en ninguna de las situaciones investigadas para ninguno de los componentes.

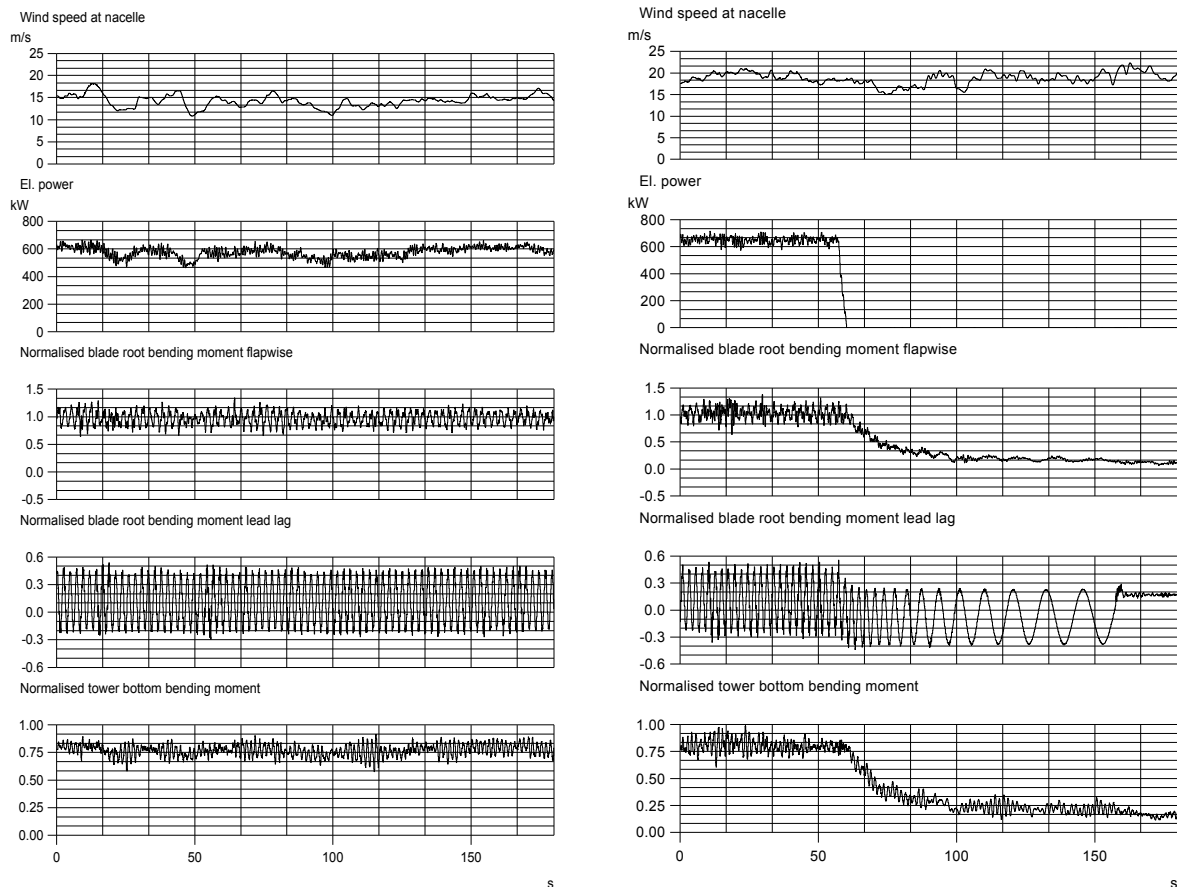


Fig. 4: Example for time series (here three minutes) for selected quantities. Left side shows normal operation at wind speed of 15 m/s. Right side shows a normal shut down at about 20 m/s.

Fig. 4: Ejemplos de series temporales (en este caso, tres minutos) de algunas de las magnitudes. A la izquierda se muestran valores de funcionamiento normal a una velocidad de 15 m/s; a la derecha se muestra una parada normal a unos 20 m/s.

Rayleigh distribution of 10 m/s annual wind speed representing the IEC turbine Class I. Only turbulence intensities of around 12 per cent in average were selected. Finally, the so derived load spectrum was extrapolated to 20 years of operation for all load quantities.

5. Consuming Lifetime

The result for the blade root lead lag and flapwise bending and the tower top and bottom bending is

4. Evaluación de las series temporales

En la Fig. 4 se muestra una serie temporal típica, con las magnitudes meteorológicas, operacionales y de cargas medidas para diferentes velocidades de viento. Especial atención merece el hecho de que tan solo se pudo detectar un mínimo nivel de vibraciones en el plano del rotor (las llamadas vibraciones de lead-lag, típicas de las máquinas controladas por pérdida, durante su funcionamiento en la zona de post-stall), que

depicted in Fig. 5 and 6. For the lead lag bending moment Fig. 6 shows additionally a one hour load spectrum for low wind speed and high wind speed at the same turbulence intensity level.

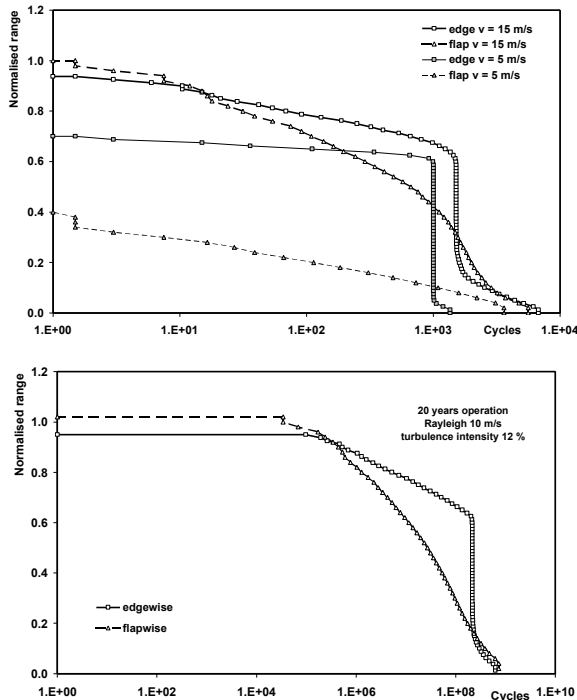


Fig. 5: Determined range spectra of two 10-min time series at 11% turbulence intensity at low wind speed and higher wind speed for the edgewise and flapwise blade root bending moment (upper picture). Load spectra for the blade root edgewise and flapwise for 20 years operation at annual average wind speed of 10 m/s Rayleigh distributed with 12% turbulence intensity (lower picture).

Fig. 5: Espectro de rangos de cargas, calculado para dos series de 10 minutos, con una intensidad de turbulencia del 11% y para vientos bajo y alto, de los momentos flectores de flap y lag en la raíz de pala (arriba). Espectro de cargas para los mismos momentos extrapolados a 20 años de operación, con una velocidad anual media de 10 m/s, considerando una distribución de Rayleigh y una intensidad de turbulencia del 12 % (abajo).

For the low rotor speed the typical shape of a "constant amplitude test" can be seen for the lead lag bending. Even the number of rotor revolutions can be exactly derived from this diagramme. At the higher wind speed, the stochastic variations in the wind and some small edgewise vibrations can be found left and right from the typical rectangular spectrum. The fatigue load spectra were calculated from selected measured time series according

está muy lejos de poder producir un incremento en el daño a fatiga sufrido por la máquina. Series temporales representativas de todos los componentes estudiados fueron seleccionados y se aplicó el "Rainflow counting". Estos datos fueron combinados con una distribución de Rayleigh de 10 m/s de velocidad media anual (como se exige para aerogeneradores clase I según IEC).

Tan sólo se utilizaron aquellas series con intensidades de turbulencia próxima al 12%. Finalmente, los datos obtenidos se extrapolaron en todas las cargas para una vida operativa de 20 años.

5. Vida operativa

Las Fig. 5 y 6 muestran los resultados obtenidos para los momentos flectores de flap y lag en raíz de pala, así como en la parte superior y en la base de la torre. En la figura 6 se muestra asimismo una comparación de los espectros de carga durante una hora de operación a baja y alta velocidad de viento con el mismo nivel de intensidad de turbulencia

En funcionamiento a velocidad lenta del rotor, puede apreciarse claramente para el momento de lag la forma de un ensayo a carga constante (incluso puede deducirse la velocidad de giro del rotor). A velocidad alta (para mayores velocidades de viento), las variaciones estocásticas en el viento junto con las mínimas vibraciones de lead-lag pueden observarse a izquierda y derecha del típico espectro rectangular. Las cargas a fatiga fueron calculadas aplicando el algoritmo "Rainflow counting" a las series temporales seleccionadas.

Una vez examinada en detalle toda la base de datos, 28 archivos (que representan 280 minutos de operación) con una intensidad de turbulencia media del 12% fueron seleccionados, y con ellos los espectros de carga fueron determinados para una distribución de Rayleigh con velocidad media anual de 10 m/s a la altura del buje, conforme a IEC clase I y a clase 1 de Germanischer Lloyd respectivamente [3,4].

Los espectros de rangos resultantes se extrapolaron para un período de operación de 20 años en los que no se consideraron los tiempos con máquina parada.

to the Rainflow counting methodology.

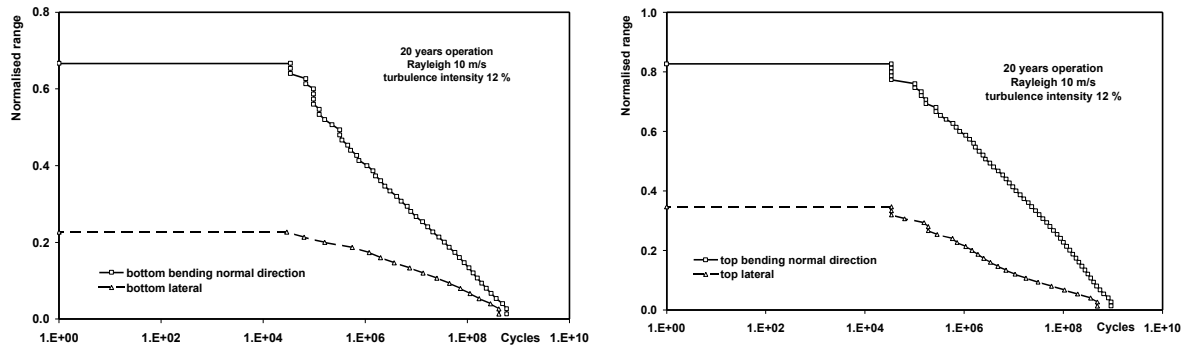


Fig. 6: Normalised load spectra for the tower bottom (left) and tower top loads (right). 20 years operation at annual average wind speed of 10 m/s Rayleigh distributed with 12% turbulence intensity.

Fig. 6.: Espectros normalizados de carga para la base de la torre (izq.) y su parte superior (dcha) extrapoladas a 20 años de operación con una distribución de Rayleigh de media 10 m/s y para una intensidad de turbulencia del 12 %.

The load spectra have been determined for a Rayleigh distribution of the wind speed with an annual average wind speed at hub height of 10 m/s according to Germanischer Lloyd Class 1 or IEC Class I, respectively [3,4]. From the verified data base 28 files representing 280 minutes of operation have been selected with an average turbulence intensity of 12 per cent. The time series were Rainflow counted and the resulting range spectra were extrapolated to a life time of 20 years without taking standstill times into account.

6. Successful Certification of the AE – 46/I

The results of the load measurements (and of the other measurements) are used for the certification process of the turbine and for the verification of the load assumptions. As can be seen from the derived results, no unexpected resonances have been detected and the theoretical results are quite closely matched by the measurements as can be seen for example in the Fig. 7 where the calculated blade root bending moments are compared against the measured averages.

Performing load measurements in Spain at a complex terrain site was a real challenge for DEWI's load measurement team. During the measurement campaigns, there was a very good collaboration between engineers and technicians of DEWI and MADE, a guarantee for a successful work, which is hopefully to be continued in the future.

In June 1999 MADE got its Class I type certification document from Germanischer Lloyd for the AE - 46/I, being at this moment the only machine designed, developed and manufactured in Spain to achieve this recognition.

6. Certificación obtenida para el AE-46/I

Los resultados de la medida de cargas (y del resto de ensayos) fueron usados para el proceso de certificación de la máquina y para la verificación de las cargas de diseño.

Como puede verse de los resultados obtenidos, no se detectaron resonancias en la máquina, y los valores teóricos resultaron muy próximos a las mediciones, como puede observarse por ejemplo en la Fig. 7, donde se comparan valores medidos y teóricos para los momentos flectores en raíz de pala.

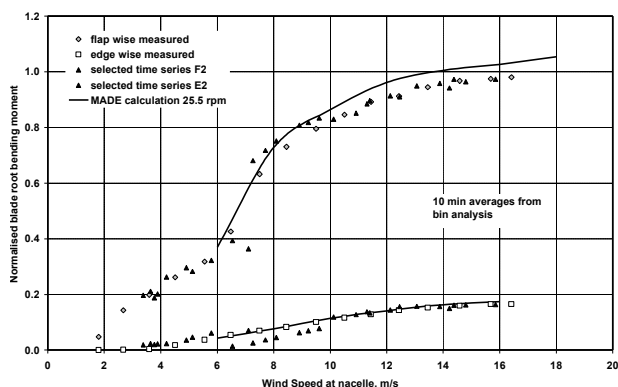


Fig. 7: Normalised blade root bending moments versus wind speed at the nacelle, evaluated from 10-min averages compared against the calculations. The time series selected for the fatigue load assessment are marked by triangles.

Fig. 7: Momentos adimensionalizados en la raíz de pala en función de la velocidad del viento en el anemómetro de góndola, evaluados a partir de los valores diezminutales y comparados con los cálculos. Las series temporales elegidas para los cálculos se marcan con triángulos.

7. Acknowledgement

The authors especially want to express their thanks to both DEWI's technician Robert Riedel (for his patience and endurance in finding and eliminating several unexpected electrical and electronic problems) and MADE's technician Bartolome Rubio (for doing cheerfully most of the "dark job" of the measuring campaign). Without their valuable co-operation success of the project would have been much more difficult. All the people involved in the project were missing the beautiful landscape of Barbanza by sitting in the turbine.

8. References

- [1] Hulle, Frans van; Development of an International Standard (IEC) for the Measurement of Mechanical Loads of Wind Turbines; paper presented at the European Wind Energy Conference 1999, Nice, France 1999.
- [2] Draft Technical Report IEC 61400-13: Wind Turbine Generator Systems, Part 13: Measurement of Mechanical Loads; ECN-DE Memo-98-086, Committee Draft of Technical Report IEC 61400-13.
- [3] Germanischer Lloyd, Rules and Regulations, IV – Non – Marine Technology, Part 1 – Wind Energy, Regulation for the Certification of Wind Energy Conversion Systems, 1993; Published by Germanischer Lloyd, Hamburg, 1993
- [4] IEC 88/82/CDV:1997-08: Wind Turbine Generator Systems, Part 1: Safety Requirements.

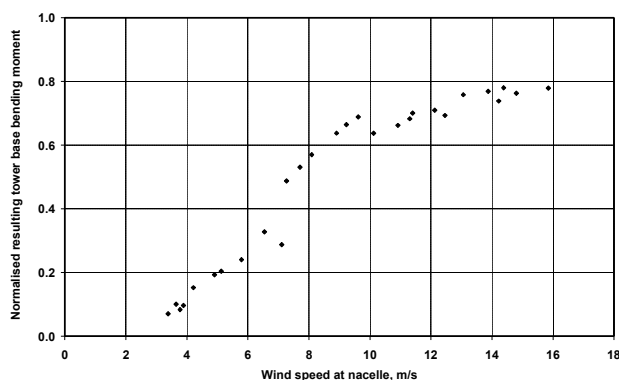


Fig. 8: Normalised tower bottom bending moments versus wind speed at the nacelle, evaluated from 10-min averages.

Fig. 8: Momentos adimensionalizados en la base de la torre en función de la velocidad del viento en el anemómetro de góndola, a partir de los valores diezminutales.

Llevar a cabo esta campaña de medidas de carga en España en terreno complejo fue un reto para el equipo de medida de cargas de DEWI. Durante la campaña de medidas, hubo una muy buena colaboración y entendimiento entre los técnicos e ingenieros de DEWI y MADE, garantía de éxito en este proyecto y para muchos otros en el futuro.

En Junio de 1999, MADE obtuvo el certificado tipo clase I por Germanischer Lloyd para el AE-46/I, siendo en la actualidad la única máquina diseñada, desarrollada y construida en España que tiene este reconocimiento.

7. Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a los técnicos Robert Riedel de DEWI (por su paciencia y persistencia en la localización y solución de imprevistos eléctricos y electrónicos) y Bartolomé Rubio de MADE (por hacer con una sonrisa la mayoría del trabajo oscuro de una campaña de medida). Sin su valiosísima colaboración llevar el proyecto a buen puerto hubiera sido mucho más complicado. Todos los que estuvimos colaborando en el proyecto echamos de menos el precioso paisaje de la sierra de Barbanza que puede observarse desde el molino...