

Tema A2a Manufactura y Materiales: Energías Renovables

Criterios para el diseño de un banco de pruebas estructurales de aspas de turbinas eólicas de pequeña y mediana potencia

Cesar Estrada González, Isaac Hernández Arriaga, José Guadalupe Rico Espino

CIATEQ A.C., Parque Industrial Bernardo Quintana, Av. Manantiales 23-A, El Marques, CP 76246, Querétaro, México. Tel (442)1961500.
cestrada@ciateq.mx, isaac.hernandez@ciateq.mx, jose.rico@ciateq.mx

RESUMEN

En este trabajo se presentan los criterios de diseño que se tomaron en cuenta para el diseño de un banco de pruebas estructurales de las aspas de aerogeneradores de pequeña y mediana potencia. El cual incluye el diseño mecánico de los elementos estructurales, diseño del sistema de control, especificación y selección de la instrumentación. Para el diseño del banco de pruebas, se han considerado las pruebas en aspas según la norma IEC-61400-2 y 23. Para determinar la capacidad del banco con respecto a la longitud máxima del aspa y al par máximo en la raíz del aspa, se utilizó una turbina para clase de viento I con una potencia nominal de 250kW. Para validar el diseño mecánico del banco propuesto, se hizo un análisis por elemento finito mediante un software especializado. El banco se encuentra en su fase de construcción en las instalaciones de CIATEQ A.C. en la Ciudad de Querétaro. El desarrollo de este banco de pruebas se lleva a cabo dentro del marco del Fondo Sectorial CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) - Secretaría de Energía - Sustentabilidad Energética – Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica (CEMIE Eólico). Con el desarrollo de este banco se podrá retroalimentar a los diseñadores de aspas para confirmar su diseño y/o realizar mejoras de tal manera que se diseñen aspas más seguras y confiables.

Palabras Clave: Turbinas eólicas, aspa, pruebas flapwise, pruebas edgewise.

ABSTRACT

In this paper, the design criteria that were taken into account for the design of a structural testing bench for small and medium power wind turbine blades is presented; including mechanical design of the structural elements, design of the control system and specification and selection of instrumentation. For the design of the testing bench, the tests are in according to IEC-61400-2 and 23. To determine the capacity of the bench with respect to the maximum test length and the maximum torque in the blade root was used a wind turbine class I with a nominal capacity of 250kW. A finite element analysis was used by means of a specialized Software in order to validate the mechanical design. The test rig is in its construction phase at the CIATEQ facilities in the City of Querétaro, México. The development of this structural testing bench is carried out within the found of CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) - Secretaría de Energía - Sustentabilidad Energética – Mexican Center for Innovation in Wind Energy (CEMIE-Eólico) and is in. With the development of this testing bench, designers can be feedbacked to confirm their design and / or make improvements in order to design safer and more reliable blades.

Keywords: Wind Turbine, blade, flapwise test, edgewise test.

1. Introducción

Las turbinas eólicas convierten la velocidad del aire en energía eléctrica mediante el movimiento de las aspas [1]. El paso del aire sobre la superficie del aspa genera fuerzas y momentos que deben ser soportados por su estructura. El diseño estructural de las aspas considera valores de velocidad de viento de acuerdo al lugar donde se va a instalar la turbina. Cuando se hace el diseño nuevo de un aspa o se hacen cambios significativos en su diseño, se deben realizar pruebas estructurales para verificar que soporta las fuerzas con que se diseñó [2]. La intención de realizar pruebas estructurales es corroborar la resistencia real de las aspas, debido a que el proceso de manufactura del aspa no es automático y puede haber variaciones en la resistencia dentro de la misma aspa, considerándose un proceso artesanal.

La clasificación de las turbinas en función de su tamaño lo establece la norma IEC-61400-2, la cual menciona que una turbina es pequeña cuando el área de barrido de las aspas es $\leq 200 \text{ m}^2$ [3]. Al obtener la longitud máxima de un aspa para considerarla pequeña, se obtiene que es de $7.97 \text{ m} \cong 8 \text{ m}$.

La norma no establece el rango en que se considera mediana potencia, solo establece la división para pequeña potencia. Sin embargo, se considera mediana potencia aquellas turbinas cuya capacidad oscila entre 0.1 y 1 MW [4]. Se realizó una búsqueda de las capacidades de turbinas eólicas comerciales a nivel mundial de mediana potencia, encontrando que un gran número de estas turbinas se encuentran en el rango de 100 kW a 275 kW. Los diámetros de los rotores van de los 20 a 28 metros, esto implica aspas de 14 metros. Por lo tanto, se ha seleccionado esta longitud como la longitud máxima para el banco de pruebas.

1.1. Tipos de pruebas estructurales en un aspa

La norma IEC-61400-23 [2] menciona los tipos de pruebas que se hacen a las aspas:

- Estáticas.
- Dinámicas.
- Propiedades geométricas

En las pruebas estáticas se aplica la carga máxima con la que se diseñó el aspa para verificar su resistencia. Consisten en la aplicación de carga en una dirección tangencial al aspa, se mantiene la carga durante un periodo de tiempo y se retira la carga. Las pruebas dinámicas se usan para identificar defectos estructurales debidas al diseño o al proceso de manufactura. El propósito es demostrar la confiabilidad durante la vida útil del aspa. El aspa se somete a cargas cíclicas, las cuales tienen una duración de 1 millón a 5 millones de ciclos.

Las pruebas de propiedades geométricas determinan algunas características del aspa que se tomaron en cuenta durante su diseño y la intención es corroborar dichos datos, las pruebas son:

- Peso.
- Centro de gravedad.
- Frecuencias naturales.

Para turbina pequeñas la norma IEC-61400-2 [3] menciona que para la prueba estática se debe aplicar la peor combinación del momento en el sentido flapwise y la fuerza centrífuga. El banco de pruebas que se presenta tiene la capacidad de hacer todos los tipos de pruebas mencionadas anteriormente. A nivel mundial existen algunos bancos de pruebas para aspas grandes:

Tabla 1 – Bancos de pruebas en diferentes países

Laboratorio	País
NREL	Estados Unidos
MassCEC	Estados Unidos
NaREC	Reino Unido
RISO	Dinamarca
LM Gasfiber	Dinamarca
WMC	Holanda
Fraunhofer	Alemania
CRES	Grecia

Aunque cada laboratorio tiene sus procedimientos y formas de hacer pruebas en aspas, al comparar los resultados entre sí, son semejantes [5]

En el caso de aspas pequeñas se tienen bancos de pruebas en:

- Clarkson University, Estados Unidos [6]
- Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat), España.

Para los laboratorios de aspas grandes existen

2. Antecedentes

El desarrollo de este banco de pruebas se lleva a cabo dentro del marco del Fondo Sectorial CONACYT– Secretaría de Energía - Sustentabilidad Energética – Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica (CEMIE Eólico), FSE-2013-03-206842 y surge por la identificación de las siguientes áreas de oportunidad:

- El mercado de las energías renovables, y en particular el de la energía eólica, crece cada vez más en nuestro país.
- Las turbinas eólicas más grandes que se producen en nuestro país son de 10 kW; fabricadas por las empresas

Aeroluz y Potencia Industrial. Ambas diseñan y fabrican la mayoría de los componentes de sus aerogeneradores.

- Una de las partes esenciales de los sistemas de conversión de la energía del viento son las aspas del rotor. En el caso de Aeroluz, ellos diseñan y fabrican sus aspas.
- Las técnicas utilizadas para el diseño y manufactura de las aspas de aerogeneradores pueden mejorar significativamente si existiera en México un banco de pruebas estructurales de aspas para predecir con mayor certeza el comportamiento y la vida útil de estos componentes, los cuales deben operar por un periodo de al menos 20 años.

Bajo este contexto, existe la necesidad de contar con un banco de pruebas estructurales para garantizar la seguridad y la confiabilidad de estas componentes; tanto de las turbinas eólicas que actualmente están en el mercado como de los nuevos diseños de turbinas que serán fabricados en nuestro país. A futuro se podrá ofrecer el soporte técnico-científico para atender las necesidades de esta rama de la emergente industria eólica en México y en Latinoamérica.

3. Diseño Mecánico del Banco

3.1. Partes del banco de pruebas

El banco de pruebas consta de los siguientes componentes, que se muestran en la figura 1:

1. Aspa.
2. Bloque de reacción.
3. Sistema de tiro.

El bloque de reacción es la estructura metálica donde se monta el aspa. El sistema de tiro se usa para tirar el aspa y deformarla, con un actuador y un tornillo de potencia se ejerce la fuerza necesaria y mediante una cuerda se jala el aspa con la ayuda del clamp, el cual sujeta el aspa en toda su periferia.

La nomenclatura que tiene el aspa para designar la dirección de la fuerza a aplicar durante las pruebas se muestra en la figura 2:

- El sentido Flapwise es perpendicular a la parte más ancha del aspa.
- El sentido edgewise es perpendicular a la parte más angosta del aspa.

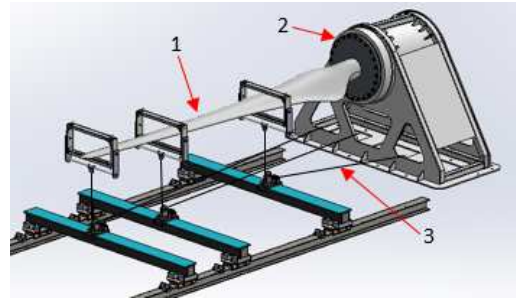


Figura 1 Partes del banco de pruebas.

Para las pruebas estática y dinámica se debe realizar la prueba en cada sentido del aspa.

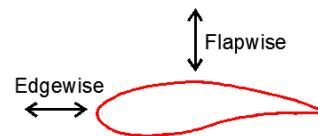


Figura 2. Direcciones de tiro del aspa.

3.2. Fuerzas en el banco de pruebas

Para definir la capacidad máxima del banco de pruebas, se tienen dos variables a tener en cuenta:

- Tamaño del aspa.
- Momento máximo que se requiere aplicar.

No son variables interrelacionadas debido a la categoría con que se diseñó el aspa. La clase de la turbina está en función de la velocidad del viento donde se instalará la turbina [3].

El diseño de todo el banco de pruebas depende de las fuerzas que se aplicarán al aspa, las cargas generan un torque que se transmite hacia el bloque de reacción donde está soportada el aspa. Estas cargas a su vez se transmiten a la cimentación. Para determinar las fuerzas máximas de diseño del banco de pruebas, se realizó una búsqueda de la capacidad de turbinas eólicas comerciales a nivel mundial de mediana potencia. Se encontró que un gran número de turbinas se encuentran en el rango de 100 kW a 275 kW [2], con base en esta información se determinó una turbina con las siguientes consideraciones para obtener los momentos de todos los casos de carga:

- Potencia: 250 kW
- Clase: 1
- Longitud del aspa: 14 m.

Mediante el método simplificado (explicado en [3]): se determinaron los momentos de todos los casos de carga, dando por resultado los mostrados en la tabla 2.

Tabla 2 – Casos de carga para un aspa de 14 m de longitud, clase I

Caso de carga A: cargas de fatiga	
Momento de flexión en sentido lead-lag (N*m)	131,360
Momento de flexión en sentido flapwise (N*m)	160,751
Caso de carga B: Orientación	
Momento de flexión en sentido flapwise (N*m)	90,589
Caso de carga C: Error de orientación	
Momento de flexión en sentido flapwise (N*m)	106,738
Caso de carga F: Corto en la conexión	
Momento de flexión en sentido lead-lag (N*m)	123,244
Caso de carga G: Apagado	
Momento de flexión en sentido lead-lag (N*m)	141,611
Caso de carga H: Viento extremo	
Momento de flexión en sentido flapwise (N*m)	218,600

Los valores máximos de momento para cada sentido del aspa son:

- Flapwise: 218,600 N*m.
- Edgewise: 141,611 N*m

La fuerza que se aplica al aspa durante las pruebas tiene factores que hacen que se incremente, debido a las diferencias de manufactura que existen entre diferentes aspas. En general los bancos de pruebas de aspas usan un factor de 1.125 [7]

El momento máximo se presenta en sentido flapwise. Dicho momento lo tiene que resistir la raíz del aspa, que es donde se soporta la turbina. En el banco de pruebas el aspa se soporta en el bloque de reacción y para ejercer dicho momento se ajustan las variables de la posición de los clamps y sus respectivas fuerzas, tal como se muestra en la figura 3.

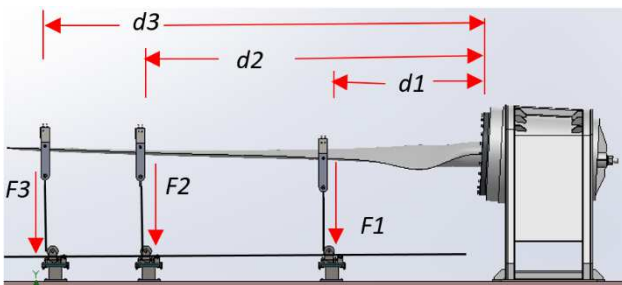


Figura 3. Fuerzas de tiro del aspa.

Un punto importante a tomar en cuenta es que las fuerzas a aplicar en el aspa durante la prueba estática, no deben exceder la fuerza cortante con que se diseñó, debido a que se podría romper (falla tipo cizalla) en lugar de ejercer un momento.

La posición de los clamps proporciona los momentos que se ejercerán sobre el aspa, para ejercer un momento total en el

aspa similar a la obtenida durante el diseño. La posición de los clamps se obtiene usando información que proporciona el diseño del aspa, también se puede obtener mediante softwares especializados, tal es el caso de Blade FS que desarrollo NREL, el cual es gratuito.

Para conocer la posición donde se instalarán los clamps, debido a que cada aspa difiere en su diseño, se propusieron tres posiciones de los clamps como las más críticas,

- d1. Es el punto más cercano al bloque de reacción y es donde inicia el perfil aerodinámico, después de la zona de transición.
- d3. Se ubica el clamp a una distancia del 75% de la longitud del aspa. Los bancos de pruebas de aspas manejan esta distancia como la máxima donde se puede aplicar fuerza al aspa.
- d2. Es el punto medio entre d1 y d2.

Se considera que la distribución del momento es igual en los tres puntos de tiro (33%) del momento total, sustituyendo datos nos da los valores de los momentos:

- M1 = 103,816 N*m.
- M2 = 93,434 N*m.
- M3 = 77,862 N*m.

Con los valores de los momentos y las distancias se obtiene el valor de las fuerzas a ejercer:

- F1 = 26,539 N = 2.7 Ton
- F2 = 2,121 N = 216 kg
- F3 = 1,497 N = 152 kg

Los valores de las tres fuerzas calculadas tienen mucha diferencia entre sí, debido a la distancia en que se aplica la fuerza. Para el diseño del bloque de reacción se considera la fuerza máxima obtenida (2.7 Ton) y que se aplicará la misma fuerza en las tres distancias mencionadas anteriormente, dando como resultado un momento de 460,000 N*m. El considerar una carga para los tres puntos de tiro del aspa es una práctica común en el diseño de los bancos de pruebas, de acuerdo a pláticas que se tuvieron con personal del Ciemat durante una revisión técnica del banco de pruebas del presente banco.

3.3. Diseño de los elementos mecánicos del banco de pruebas

Para fines de investigación en el comportamiento del aspa, se incrementó la versatilidad del banco de pruebas de tal manera que se tenga la capacidad de realizar pruebas tirando del aspa no solo en sentido vertical, sino en un rango de 40° hacia ambos lados de la vertical.

Para el bloque de reacción (ver figura 1), se propuso una estructura metálica base tronco piramidal compuesta de placas y perfiles tubulares unidos por soldadura, en la parte

superior se tiene un par de tambores concéntricos donde uno es fijo y otro móvil, el tambor móvil se encuentra inscrito en el tambor fijo, en un extremo del eje axial del tambor móvil se cuenta con un tornillo que a su vez es apretado contra un extremo del tambor fijo, con este tornillo se fija un tambor con respecto al otro, mediante unos anillos cónicos en ambos extremos de los tambores se da la auto-alineación. Este sistema permite una vez montada la pala, girarla sin su desmontaje para las diferentes orientaciones de pruebas (edgewise y flapwise). El arreglo de los tambores tiene un ángulo de inclinación de 3° con respecto al eje vertical de la estructura metálica, esto para permitir mayor deflexión del aspa al momento de la prueba de aspas grandes.

Las fuerzas que actúan en el bloque de reacción son el peso del aspa y las fuerzas aplicadas al aspa. Existen dos casos en que se puede aplicar la fuerza extrema en el banco de pruebas:

- Carga vertical máxima: se consideran las tres fuerzas de tiro en sentido vertical idénticas de 2.7 Ton a una distancia de la raíz del aspa, sustituyendo valores se obtiene un momento resultante en sentido vertical de 460 kN*m.
- Carga horizontal máxima: se consideran las tres fuerzas de tiro de 2.7 Ton con una inclinación de 40° con respecto a la línea vertical, tal como es muestra en la figura 4

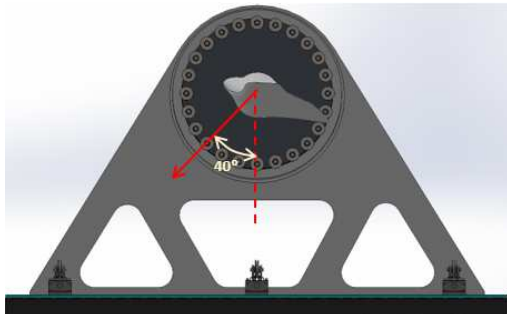


Figura 4. Carga máxima horizontal.

La suma de fuerzas para esta condición de carga máxima es de:

- Sentido x = 49,184 N.
- Sentido y = 58,616 N.

Para el caso de la suma de momentos es de:

- Sentido x = 295,108 N.
- Sentido y = 351,670 N.

Para determinar los esfuerzos mecánicos del cubo de reacción, se utilizó el método de elementos finitos con el Software ANSYS ® Benchmark mediante un análisis

estructural estático. La estructura se dividió en dos partes para su análisis a fin de que no requiriera tanta capacidad computacional. Esto debido al número de nodos y al tipo de análisis al considerar elementos de contacto.

La figura 5 muestra el barril interior conformado por una placa rolada, unida a una brida cónica en un extremo y un eje en el otro extremo. El barril se apoya en la estructura principal en ambos extremos: eje y brida cónica.

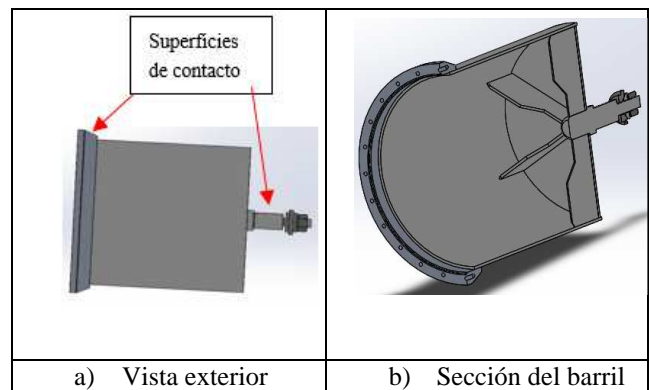
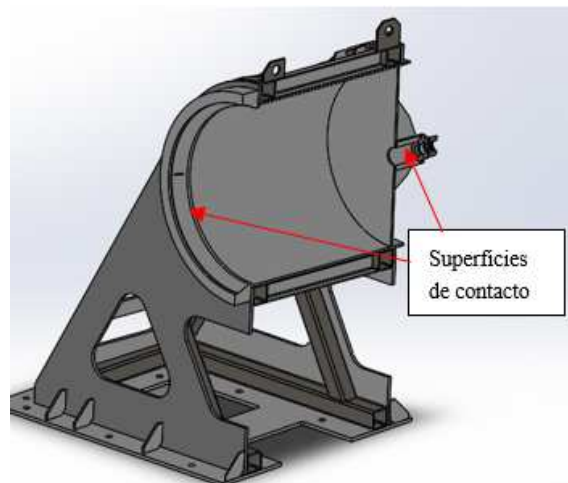


Figura 5. Barril interno.

La estructura principal está formada por PTR, un barril exterior y placa metálica. El barril exterior tiene una brida cónica en un extremo y un buje en el otro extremo, que es donde descansa el barril interior.

Figura 6. Estructura principal.



Para el análisis de elemento finito se usaron elementos de contacto en las superficies de ambas bridas cónicas, así como el eje y el buje.

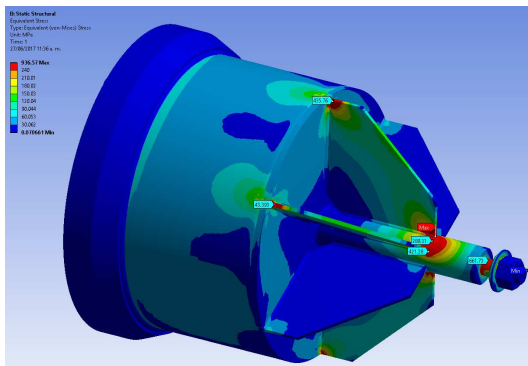
Las condiciones de frontera que se usaron fueron:

- Máxima carga horizontal. 460 kN*m en sentido “x” positivo de los ejes en Ansys
- Peso de la estructura metálica = 3,580 kg.
- Peso del aspa = 1,000 kg.
- Se restringió la placa horizontal inferior en todos los sentidos.
- Se usaron elementos de contacto entre las superficies de contacto
- Máxima carga vertical. 460kN*m en sentido “x” positivo de los ejes en Ansys, pero girado 45° con respecto a la línea vertical.

El uso del software ANSYS ® Benchmark define automáticamente el tipo de elemento, a diferencia del ANSYS clásico. El tamaño de la malla en los modelos fue medio para tener una buena aproximación sin necesidad de requerir demasiada memoria disponible en la computadora para el análisis.

La figura 7 muestra los esfuerzos máximos del barril interno para la condición de máxima carga vertical. Los resultados de este análisis se pusieron como condiciones de frontera para el análisis de la estructura principal. Los resultados de la estructura principal se muestran en la figura 8.

La teoría de falla que se consideró para determinar la resistencia de todas las piezas, fue la teoría de falla de Von Mises.



Esfuerzos en el barril interno.

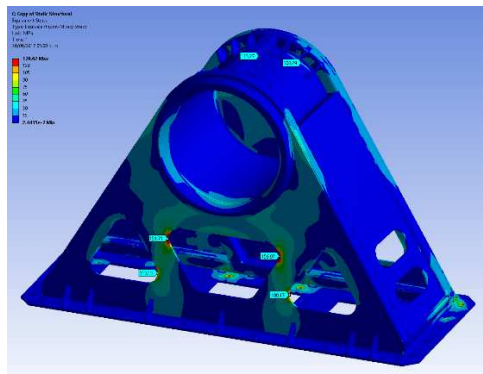


Figura 8. Esfuerzos en la estructura interna.

Con los esfuerzos máximos obtenidos del bloque de reacción, se tiene que el factor de seguridad es de 2. El material considerado para las piezas es acero ASTM A-36 en todas las piezas, a excepción del eje que fue acero 1045.

Los esfuerzos máximos se presentan en los radios de la placa frontal y trasera donde está un hueco para eliminar material, pero el material seleccionado soporta dichos esfuerzos.

3.4. Sistema de tiro

Otro sistema importante del banco de pruebas, es el sistema de tiro, el cual consta de los siguientes componentes:

1. Clamp: hace la sujeción del aspa para poder tirar y deformarla, es semejante a una abrazadera.
2. Cuerda: une el tornillo de potencia con el clamp para ejercer la fuerza de tiro.
3. Polea: proporciona la orientación de la cuerda entre el tornillo de potencia y el clamp y está montada sobre las vigas transversales.
4. Vigas transversales: permiten posicionar el tiro a cualquier ángulo con respecto de la vertical del aspa.
5. Vigas longitudinales: permiten posicionar el tiro a cualquier longitud del aspa
6. Tornillo de potencia: ejerce la fuerza de tiro del aspa mediante un servomotor y un reductor de velocidad.

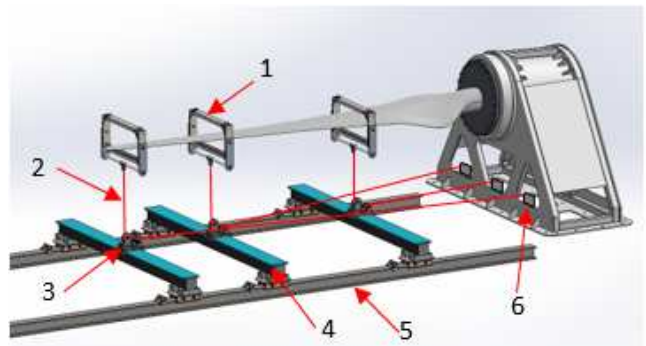


Figura 9. Elementos del sistema de tiro

El diseño de los elementos del sistema de tiro se basó en la fuerza máxima que se debe ejercer para tirar del aspa de mayor longitud, siendo un valor de 2.7 Ton, sin embargo, se incrementó a un valor comercial de un servomotor de 3,000 kg.

Para las vigas del sistema de tiro se usaron los siguientes componentes metálicos:

- Vigas longitudinales: vigas en I.
- Vigas transversales: HSS.

La condición de esfuerzo máximo en la viga HSS se presenta cuando la polea está en la parte media y los esfuerzos se muestran en la figura 10.

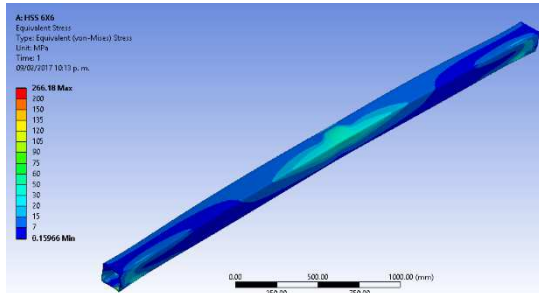


Figura 10. Esfuerzos en la viga transversal (HSS).

Para la viga longitudinal I la fuerza máxima se tiene en la posición intermedia entre los tornillos que se fija a la cimentación, los esfuerzos se muestran en la figura 11.

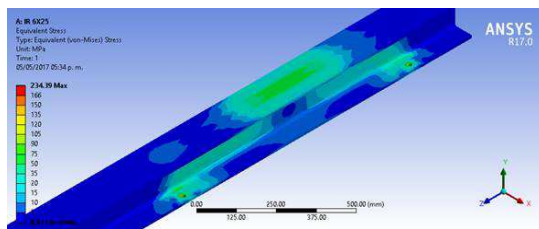


Figura 11. Esfuerzos en la viga longitudinal (viga I).

La cuerda se une en un extremo al clamp y por el otro extremo a un mecanismo fijo al tornillo sin-fin. Para la selección de la cuerda la principal característica es que tenga la menor elongación posible cuando se aplica la carga. Comparando las cuerdas con los cables, tienen un bajo peso comparado y tienen una mejor facilidad de maniobrar. Debido a la fuerza que se va a aplicar se recurre a cuerdas de alta capacidad de carga. Para la selección de cuerdas se recomienda usar un factor de seguridad de 5[8].

La cuerda seleccionada es Dynemma de 1/2" de diámetro.

4. Diseño del sistema de control de movimiento

Las pruebas a las aspas, pueden ser realizadas de forma manual o automatizada por diferentes medios, se ha considerado para este caso, el diseño de un sistema de control automático, que permite realizar de forma paralela, tanto la prueba estática como la adquisición de variables físicas en el aspa.

De esta forma, se puede considerar el sistema mostrado en la figura 12, en la cual se muestra un esquema general del sistema de control, en el que se puede visualizar los dos

sistemas que son la base del banco de pruebas de aspas: el sistema de control de movimiento e instrumentación.

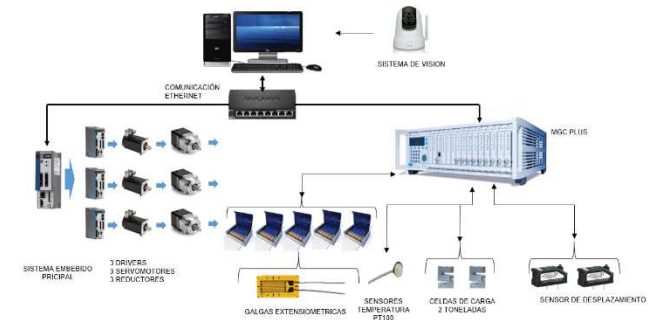


Figura 12. Diagrama general del Sistema de control de movimiento e instrumentación, del banco de pruebas de aspas.

De forma general, el sistema de control de movimiento permite realizar de una forma controlada el “tiro” en 3 puntos del aspa, realizando la simulación de las fuerzas que ejerce el viento en el aspa durante su operación normal. Para realizar este control de movimiento, se ha realizado una aplicación ó HMI (Human Machine Interface, por sus siglas en inglés) que permite introducir los parámetros necesarios para configurar el perfil de movimiento deseado, en este caso, se han considerado hasta 15 pasos de prueba, que permitirán conocer el comportamiento del aspa, tanto en el ciclo de tiro como de liberación, realizando así una prueba estática, de acuerdo a lo mencionado en la norma IEC61400-2 y 23. Estas secuencias de control de movimiento, son enviadas a un sistema de control embebido de la marca Kollmorgen, a fin de realizar de forma sincronizada el movimiento de los 3 puntos de tiro.

Durante esta prueba controlada, se realiza la adquisición de diferentes señales; deformación, fuerza y temperatura, como principales parámetros, ya que también se monitorean las condiciones ambientales durante la prueba, y de igual forma se realiza una captura de video, que permite comparar algún punto particular que se requiera analizar posterior la prueba.

5. Especificación y Selección de la instrumentación

La adquisición de datos, referente a la instrumentación, permite el almacenamiento de los datos de las señales provenientes de diferentes sensores, por ejemplo; galgas extensométricas, RTD's, celdas de carga e hilos potenciométricos, conectados todos mediante una pequeña red Ethernet, para su almacenamiento y procesamiento en una computadora, mediante una aplicación específica de la marca HBM, la cual es posible comunicar con la aplicación

Una vez realizada la prueba, se genera un archivo que incluye los datos de deformación, temperatura, fuerza y desplazamiento obtenido de la prueba estática, con el cual, se genera un reporte que permite visualizar el comportamiento general del aspa, que sirve como base de datos para futuras comparaciones entre prueba o análisis de los datos posterior a la prueba.

5.1. Capacidades del banco de pruebas

Durante las pruebas el aspa se puede tirar con cierto ángulo con respecto a la vertical y también se puede posicionar en cualquier orientación que se desee, la tabla 3 muestra las capacidades finales con que se diseñó el banco.

Tabla 3– Capacidades del banco de pruebas

Longitud máxima de aspa	14 m
Diámetro máximo de la raíz del aspa	1 m
Peso máximo del aspa	1,000 kg
Fuerza máxima a aplicar	3,000 kg
Momento máximo	460,000 Nm
Ángulo de posicionamiento del aspa en el bloque de reacción	360°
Ángulo de posicionamiento de sistema de tiro hacia la cimentación con respecto a la vertical	40°

4. Conclusiones

En el banco se pueden realizar todas las pruebas que pide la norma [2] y muchas variaciones más, teniendo mayor versatilidad. Mediante el desarrollo de este banco de pruebas se podrá conocer el comportamiento estructural de un aspa, antes de ser probada en campo y/o liberada para su comercialización. De esta forma es posible retroalimentar al diseñador del aspa para confirmar su diseño y/o mejoras con el objetivo de contar con aspas más confiables y seguras.

Agradecimientos

Este trabajo es parte de las actividades del proyecto “P09 Desarrollo de aspas para pequeños aerogeneradores” que se desarrolla en el contexto del Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica (CEMIE-Eólico) bajo los auspicios del Fondo CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética.

REFERENCIAS

- [1] Energías renovables 2016: reporte de la situación mundial, Renewable energy poliny network for the 21st Century (2016).
- [2] IEC 61400-23 Wind turbines- Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades; International Electrotechnical Commission. Switzerland (2014).
- [3] IEC 61400-2 Wind turbines- Part 2: Small wind turbines; International Electrotechnical Commission. Switzerland (2013).

- [4] I. Cruz, La energía eólica de mediana potencia: conceptos generales y ejemplos de aplicaciones. (2011).
- [5] B. H. Bulder; J.J. Dam; European wind turbine testing procedure development, blade testing methods, subtask 2 (2000)
- [6] D. Valyou; T. Arsenault; K. Janoyan; P. MAzorca; Development and commissioning of a small/mid-size wind turbine test facility; Wind Energy Symposium, Kissimmee Florida, (2015)
- [7] S. Larwood; W. Musial; NedWind 25 Blade testing at NREL for the European standards measurement and testing program; Technical report (2001).
- [8] Rope user’s manual: guide to rope inspection, handling, inspection and retirement; samsonrope.com.