

Secuencia metodológica en la manufactura de aspas de 30 metros para aerogeneradores de 1.2 MW

Methodological sequence in the manufacture of 30-meter blades for 1.2 MW wind turbines

¹Alberto González Sánchez, ²Agustín Escamilla Martínez, ³Daniel Tress Fuentes

CIATEQ A.C., Parque Industrial Bernardo Quintana, Av. Manantiales 23-A, El Marques, CP 76246, Querétaro, México. Tel (442)1961500

¹alberto.gonzalez@ciateq.mx, ²aguesc@ciateq.mx, ³daniel.tress@ciateq.mx

Resumen

Se presenta la sucesión ordenada de los procesos requeridos para la manufactura de aspas de 30 metros, las cuales se emplean en los aerogeneradores con capacidad de 1.2 MW. El proceso tiene como etapas previas la definición de las especificaciones de diseño y selección de materiales concluidas; este artículo hace énfasis en las actividades donde las personas, procedimientos, materiales, equipos y herramientas se unen para transformar y añadir valor al fabricar el aspa, se analizan los aprendizajes adquiridos durante cada fase y finalmente se hace referencia a los resultados de las pruebas estáticas, las cuales validan la calidad de la manufactura de materiales compuestos.

Abstract

The orderly succession of the processes required for the manufacture of 30-meter blades, which are used in wind turbines with a capacity of 1.2 MW, is presented. The process has as previous stages the definition of design specifications and selection of materials concluded; this article emphasizes the activities where people, procedures, materials, equipment and tools come together to transform and add value to manufacture the blade, the lessons learned during each phase are analyzed and finally reference is made to the results of static tests, which validate the quality of the composite materials manufacturing.

Palabras clave:

Manufactura, Procesos, Aspa de 30 metros, Aerogenerador 1.2 MW

Keywords:

Manufacturing, Process, 30-meter Blade, 1.2 MW Wind Turbine

Introducción

La importancia de las energías renovables y su impacto en el desarrollo futuro de la humanidad ha sido ampliamente estudiada, dentro de esta categoría la energía eólica cumple un papel relevante. México tiene un potencial estimado mayor a 50,000 MW por este concepto [1]; el país cuenta con una capacidad instalada de 7731 MW [2], al corte de 2022, lo que representa el 15% de aprovechamiento para este tipo de recurso. Lo anterior pone de manifiesto que la asimilación de la tecnología se encuentra en una fase inicial con un crecimiento paulatino pero constante.

A nivel industrial el moldeo por transferencia de resina asistido por vacío (VARTM) es el método empleado, con mayor frecuencia, para la fabricación de diversos componentes del aspa eólica [3],[4],[5].

Los laminados utilizados están constituidos principalmente por resina y fibras de vidrio, fibras carbono e híbridos [6],[7]. También se han desarrollado métodos de producción con materiales porosos [8].

Los procesos de manufactura están en continua mejora, tanto en la manipulación de los materiales como en el desarrollo

de dispositivos de posicionamiento [9],[10]; así como en el desarrollo de reactivos y secuencias de fabricación [11]. Existen múltiples factores que influyen, entre las cuales se encuentran las propiedades de los materiales, herramientas, tolerancias, formación de arrugas durante el tendido de las fibras, entre otros [12],[13],[14]. La manufactura es una etapa importante por controlar porque determina la calidad del aspa fabricada.

CIATEQ comienza a desarrollar las capacidades de investigación y manufactura en el área de generación de energía eólica con mayor intensidad a partir del año 2017, abordando un amplio espectro de temáticas que van desde el diseño estructural y simulación de aspas [15], diseño aerodinámico de rotor [16], diseño de banco de pruebas estructurales de aspas de pequeña y mediana potencia [17], así como el desarrollo de un laboratorio para realizar la manufactura de componentes [18]. Todo lo anterior fue mediante la fabricación de prototipos de baja capacidad de eje horizontal, de 30 kW y con longitudes de aspa de 6 metros principalmente.

La relevancia del presente trabajo radica en la longitud de las aspas fabricadas, las cuales son de 30 metros. La potencia de

generación eólica depende del área sobre la cual incide la energía cinética del viento. A mayor área mayor potencia, el área a su vez es una función de la longitud del aspa, que de manera general representa el radio.

Pasar de la manufactura de un aspa de 6 metros a una de 30 metros no parece significativo, sin embargo, establece retos de logística, gestión de la cadena de suministro, eficiencia operativa, gestión del talento humano, adaptación a los cambios derivados de subprocesos de validación y verificación del conocimiento de etapas en desarrollo o sin definir, planificación y programación de las actividades en un marco de colaboración interdisciplinaria.

Las secuencias de manufactura presentadas son el resultado del trabajo y aprendizaje de todo el personal del Centro de Tecnología Avanzada A. C., marcan un hito en la espiral de desarrollo en esta área. Para efectos prácticos se clasifican en: Modelos maestros, Moldes y Aspas.

Secuencia metodológica en la manufactura del aspa

Modelos maestros

Los modelos maestros son los arquetipos originales y primarios del cual se deriva la fabricación de los moldes. Reflejan físicamente los estándares de diseño aerodinámico y de ingeniería aprobados. Se fabricaron 2 modelos maestros denominados: superficie lado presión y superficie lado succión. Cada modelo consta de 9 segmentos. Para cada modelo se realizaron las 3 actividades secuenciales descritas en la Fig. 1.

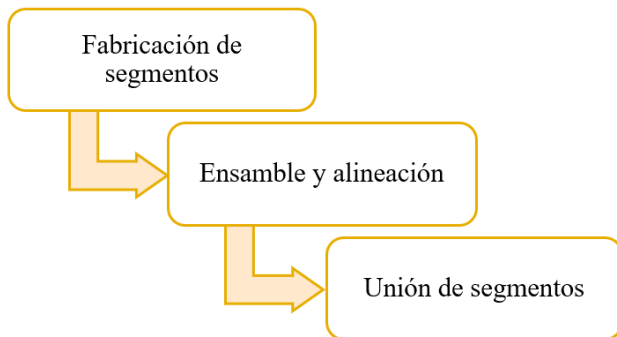


Figura 1 - Secuencia general de manufactura de los modelos maestros

Fabricación de segmentos

En la Fig. 2 se enumeran las etapas involucradas en la fabricación de los 9 segmentos que conforman cada modelo maestro. La razón principal de este proceder es debido a la necesidad de adecuarse a las capacidades instaladas en el centro, específicamente a las restricciones en dimensiones de las piezas que puede manejar la fresadora de pórtico. El inconveniente inicial generó ventajas posteriores debido a la facilidad de manipulación, transporte y almacenamiento de segmentos de menor tamaño.

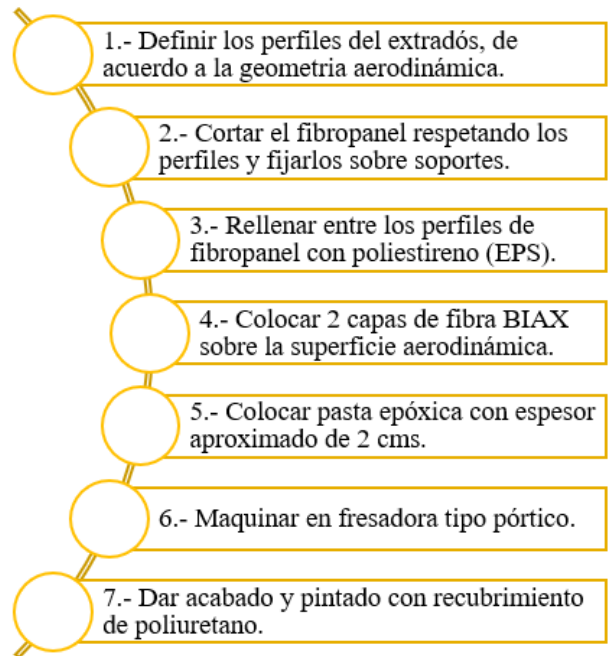


Figura 2 – Etapas de fabricación reproducidas en cada uno de los 9 segmentos (LP y LS).

Durante la colocación de la capa epóxica se empleó una estrategia para controlar el nivel de desbaste, la cual consistía en capas sucesivas de diversos colores, lo cual permitió identificar las zonas que presentaban espesores bajos con posibilidad de llegar a la fibra de vidrio y perforar el segmento. En la Fig. 3 se observa el maquinado de un segmento.



Figura 3 – Maquinado de segmento

Después del maquinado se procede a dar acabado a las piezas, los defectos principales que se solucionaban consistían en poros de diámetro y profundidad irregulares, debido a la reacción exotérmica de la pasta aplicada. La densidad promedio de poros era de 4 orificios por centímetro cuadrado. El proceso de acabado superficial consistía inicialmente en el sellado de macroporos con pasta epóxica y posteriormente capas sucesivas de plaste hasta que los microporos se rellenaran. Se procedió con lijado fino de grano 1000 para finalmente pintar la pieza con recubrimiento de poliuretano, como se puede apreciar en la Fig. 4.

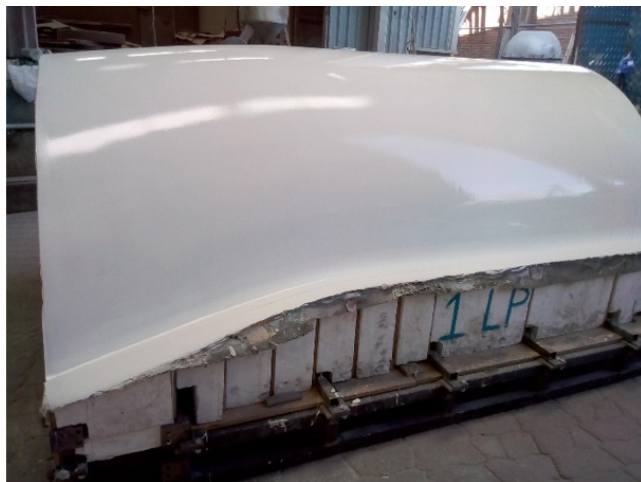


Figura 4 – Segmento 1 LP pintado de poliuretano

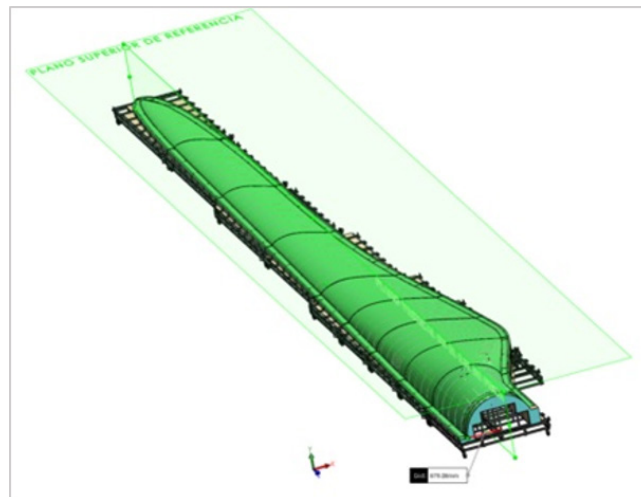


Figura 6 – Plano de referencia en CAD

Ensamble y alineación

La Fig. 5 describe la metodología empleada para el posicionamiento ordenado de los segmentos.

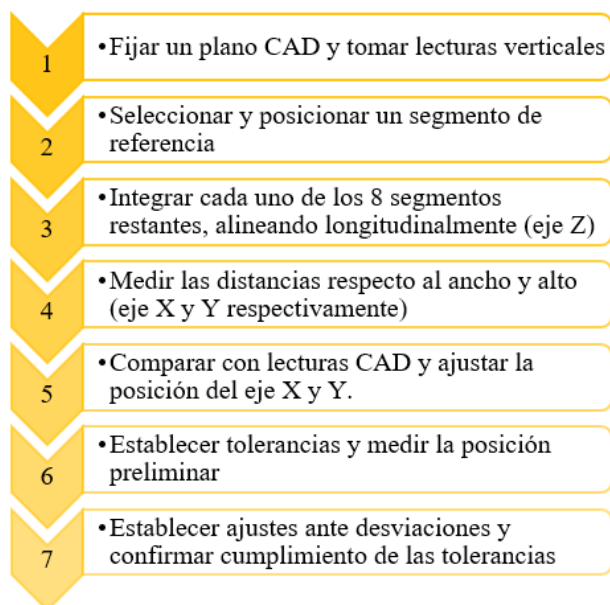


Figura 5 – Etapas del ensamble y la alineación

La etapa fundamental para la correcta ejecución de la actividad consiste en definir un plano de referencia, tanto en el plano CAD como físicamente en el área de trabajo. La Fig. 6 muestra el plano de referencia generado para el modelo maestro superficie lado presión.

El comparativo entre ambas lecturas verticales permite tomar acciones para el ajuste por movimiento de segmentos o de ser necesario reparaciones por adición o desbaste de material, para el cumplimiento de las tolerancias de diseño.

En la Fig. 7 se aprecia la verificación de lecturas verticales en el eje Y para posterior comparación con los valores obtenidos mediante CAD. Cuando los ajustes se realizan por desplazamientos se utilizan las rodajas, espaciadores y también se varía la altura mediante la cuerda del tornillo de ensamble. Las principales desviaciones se concentraron en los bordes de ataque y borde de salida debido a esfuerzos de contracción.



Figura 7 – Verificación de lecturas mediante láser

Unión de segmentos

Una vez que los 9 segmentos se encuentran perfectamente ubicados, se inician los trabajos para unir las secciones. La Fig. 8 contempla cada una de las acciones para el aseguramiento de la calidad en la unión.

Durante esta etapa es importante que las transiciones entre las geometrías aerodinámicas de los segmentos respeten la morfología del diseño original; el criterio de aceptación y finalización de los 2 modelos maestros consiste en pasar la prueba de estanqueidad. La prueba se realiza mediante la

succión del aire contenido en un contorno definido y con apoyo de una bolsa de vacío, como se observa en la Fig. 9. Una vez alcanzado el valor máximo se desconecta la bomba y se deja transcurrir 15 minutos, si la pérdida es menor al 10% del valor máximo, la prueba se considera satisfactoria y se procede a la liberación del modelo maestro.

1.- Perfilar los cantos entre los segmentos a 45°

2.- Rellenar con espuma de poliuretano a 2 cm de profundidad del perfil aerodinámico

3.- Rellenar con pasta epóxica

4.- Pintar con poliuretano blanco

5.- Verificar la estanqueidad de las uniones

Figura 8 – Serie de actividades para el pegado de los segmentos.



Figura 9 – Prueba de estanqueidad

El proceso de fabricación de los modelos concluye y se procede a la etapa de fabricación de los moldes correspondientes. En la Fig. 10 se aprecian los 2 modelos maestros, correspondiente a la superficie del lado presión (izq.) y la superficie del lado succión (der.).

Moldes

Los moldes son piezas que presentan cavidades copiadas fielmente de los modelos maestros, con el objetivo de realizar la producción en serie de piezas con la forma y el tamaño específico. Se fabricaron 2 moldes principales, denominados:

Molde LP y Molde LS. Los materiales empleados para su elaboración fueron resina epóxica y fibra de vidrio, mediante la técnica conocida como moldeo por transferencia de resina asistida por vacío. En la Fig. 11 se describe la secuencia.



Figura 10 – Modelos maestros concluidos

Fabricación de la pieza de material compuesto

Fabricación y colocación de estructura metálica de refuerzo

Verificación de geometrías aerodinámicas

Figura 11 - Secuencia general de manufactura de los moldes.

Fabricación de la pieza de material compuesto

En la Fig. 12 se especifican las actividades involucradas en la fabricación de la parte de material compuesto resina-fibra de vidrio que constituye a los moldes LP y LS.

En la fase inicial de las actividades es importante controlar el espesor del gelcoat tooling, el cual debe ser igual o mayor a 650 micrómetros. Espesores menores generan que la fibra de vidrio se observe y marque la superficie, generando problemas de estanqueidad en el molde. Espesores mayores originan agrietamiento de la superficie por esfuerzos de manipulación debido a que el gelcoat no es un elemento de alta resistencia mecánica. En la Fig. 13 se muestra la aspersión del gelcoat naranja.

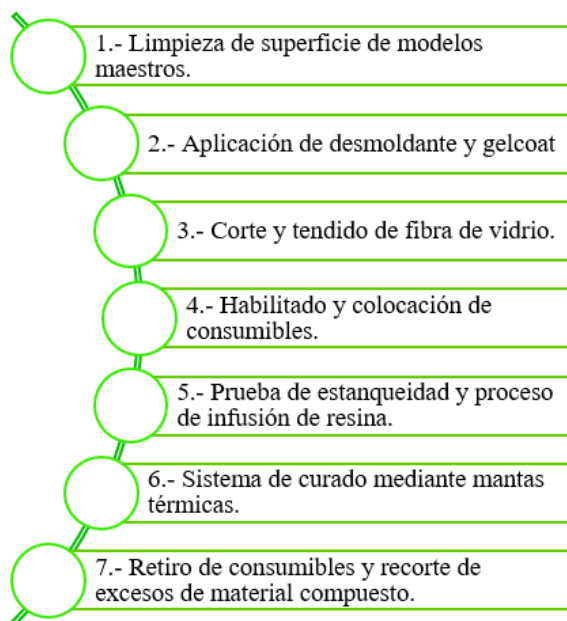


Figura 12 – Actividades de fabricación de material compuesto (LP y LS).



Figura 13 – Aplicación de gelcoat sobre modelo maestro.

Es fundamental la impregnación adecuada de la fibra de vidrio con la resina epóxica catalizada. El método de moldeo por transferencia de resina se conoce comúnmente como infusión y depende su correcta ejecución del control de múltiples variables dentro de las cuales se puede mencionar la presión de vacío, la temperatura, viscosidad, tiempo de reacción, orientación de fibras, cantidad de capas, así como su densidad. También depende de la permeabilidad de los múltiples materiales dentro de los cuales se pueden encontrar a los núcleos de PVC, las dimensiones de la pieza a fabricar y sobre todo las restricciones de permeabilidad cero debido a la presencia de componentes prefabricado y curados en su totalidad.

La calidad del laminado y sobre todo sus prestaciones mecánicas dependen significativamente de la infusión, del curado y postcurado de la resina epóxica. Durante la fabricación del material compuesto se emplearon mantas térmicas para asegurar el endurecimiento de la resina por encima de la temperatura de transición vítrea del material.

En la Fig. 14 se observan los frentes de resina marcados sobre la superficie de la bolsa de vacío a diferentes intervalos de tiempo; esta acción permite el control de la etapa. En el momento que no se presente el avance, se procede a revisar todo el sistema para detectar fugas o partes del sistema deficiente que requieran acción correctiva inmediata.



Figura 14 – Impregnación de fibras mediante el proceso de infusión.

Fabricación y colocación de estructura metálica

El objetivo principal de las estructuras metálicas a colocar sobre el material compuesto es la de reforzar el molde para evitar contorsiones, pandeos o deformaciones que afecten la geometría de diseño. Al rigidizar mecánicamente el material compuesto se logra asegurar la estabilidad y reproducibilidad de la pieza fabricada, además de resistir las maniobras para su manipulación y transporte. Se fabricaron estructuras metálicas de dos niveles, el primero describe la morfología de la pieza para realizar el pegado y la transición material compuesto-estructura metálica. El de segundo nivel es una estructura que permite nivelar el molde a una altura de trabajo adecuada y que transmite los esfuerzos del peso total del molde hacia el suelo, la cual se coloca encima de las de primer nivel. La Fig. 15 ejemplifica las estructuras mencionadas.

En la Fig. 16 se exhiben las estructuras de primer nivel colocadas y espaciadas. Para lograr la unión del material compuesto con la estructura se hace uso de placas metálicas con vástago, las cuales se atornillan al soporte metálico, posteriormente el extremo plano se fija mediante adhesivo epóxico a la superficie de la pieza.

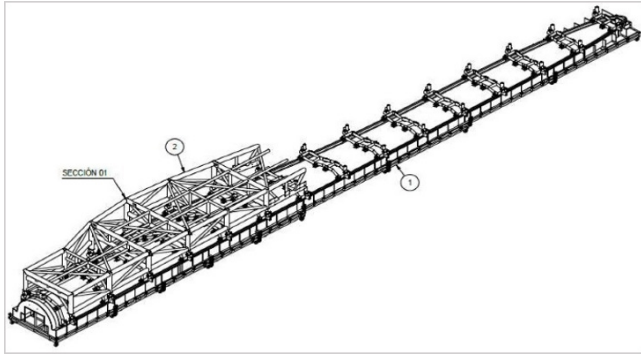


Figura 15 – Estructuras metálicas de 1er y 2do nivel.



Figura 16 – Estructuras de 1er nivel colocadas sobre la pieza de material compuesto.

Verificación de geometrías aerodinámicas

Cuando el proceso de colocación de las estructuras metálicas ha concluido se comienza con las actividades que involucran la separación entre el modelo maestro y el molde fabricado. La secuencia cronológica de las operaciones realizadas se describe en la Fig. 17.

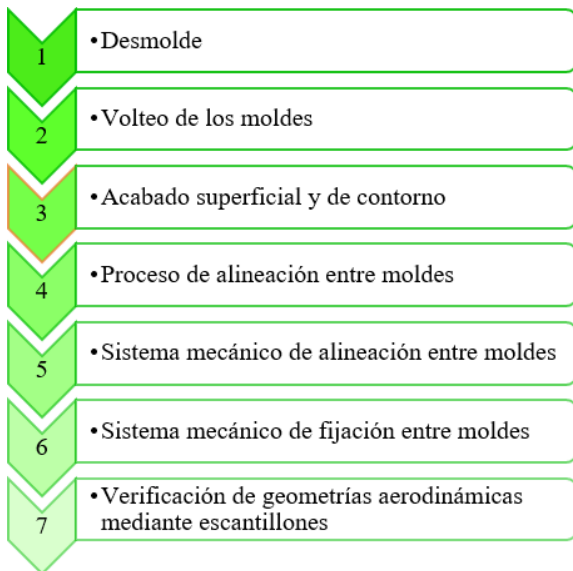


Figura 17 – Acciones previas requeridas para la verificación geométrica.

El volteo de los moldes en piezas de 6 metros es una operación trivial, que no requiere de equipos especializados, sin embargo, la misma actividad con una escala mayor como la del molde de longitud de 30 metros requiere al menos de 3 grúas para realizar la operación de manera paulatina y con las mayores condiciones de seguridad, tanto para el personal como para la pieza fabricada. En la Fig. 18 se observa el volteo del molde.



Figura 18 – Volteo del molde LP mediante grúas

El proceso de verificación de los moldes consistió en 2 etapas. La primera consiste en la alineación entre moldes para evitar el desfase en cualquiera de los 3 ejes, para lo cual se requirió simular el espesor del asa que contendría, básicamente porque al tener moldes alineados entre sí ayudará en el proceso de pegado de las 2 piezas durante la fabricación del asa de 30 metros. En la Fig. 19 se presenta el molde LS sobre el molde LP. Es durante esta fase que los sistemas mecánicos de alineación y fijación se ajustan de acuerdo con los resultados de alineación obtenidos.

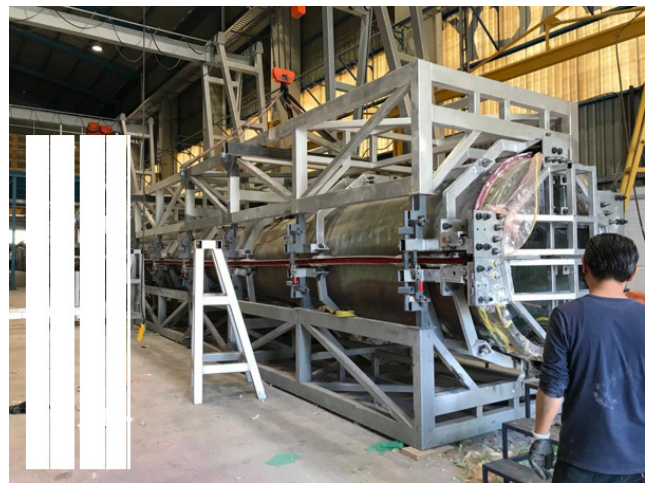


Figura 19 – Alineación entre molde LP y LS

La segunda etapa consiste en la verificación de las geometrías aerodinámicas mediante escantillones de aluminio cortadas con los perfiles del plano de CAD. Los resultados obtenidos muestran desviaciones dentro de tolerancia de ± 2 mm. En la Fig. 20 se puede notar la colocación de los escantillones y las pequeñas variaciones entre estas y la parte cóncava del molde.



Figura 20 – Cotejo de la geometría aerodinámica

El proceso de fabricación de los moldes concluye y se procede a la etapa de fabricación de las aspas. En la Fig. 21 se muestran los 2 moldes, molde LP (sup.) y molde LS (inf.).



Figura 21 – Moldes LP y LS finalizados

Aspas

Son uno de los componentes críticos más importantes de un aerogenerador eólico de eje horizontal, cuyo diseño aprovecha al máximo la energía cinética del viento y es además un elemento que estructuralmente debe resistir las cargas aerodinámicas y aerolásticas que se generan durante su operación en campo. Para su fabricación se requiere realizar múltiples trabajos consecutivos, como se describe en la Fig. 22.

Manufactura de componentes internos



Manufactura de Concha LP y LS



Pegado de todos los componentes



Prueba estática y resultados

Figura 22 – Tareas consecutivas para la fabricación de un aspa.

Manufactura de componentes internos

Los componentes internos se pueden clasificar con base en dos criterios, el primero corresponde a las piezas que se utilizarán como prefabricados a integrar en la manufactura de las conchas LP y LS, dentro de las cuales encontramos a la semiraiz y al sparcap. El segundo criterio corresponde a las piezas que se ubican dentro del aspa, por ejemplo, el larguero primario, larguero secundario y la plataforma de mantenimiento.

En la Fig. 23 se observa la etapa del laminado de fibras de vidrio para la manufactura de la semiraiz. Una vez concluida la fabricación de la pieza, se procede al maquinado de los contornos, así como las perforaciones para el posicionamiento de la tornillería de sujeción.



Figura 23 – Laminado de fibras en semiraiz

En la Fig. 24 se puede ver un larguero en proceso de elaboración, con los núcleos de color amarillo expuestos y un larguero concluido de color verde. Los dos largueros se posicionarán dentro del aspa para unir las conchas LP y LS,

generando un refuerzo estructural del sistema tipo viga en conjunto con los sparcap.



Figura 24 – Larguero primario y secundario

Manufactura de concha LP y LS

Todas las actividades en la manufactura del aspa son importantes, sin embargo, esta etapa es crítica; debido a lo heterogéneo de su composición, así como a los múltiples valores de permeabilidad a la resina. El uso de componentes internos como la semirraiz y el sparcap generan restricciones de permeabilidad cero, dificultando el flujo de resina en el proceso de infusión.

La Fig. 25 revela el proceso de infusión durante la manufactura de la concha LS, la cual se reproduce también para la manufactura de la concha LP. Las estrategias de infusión, posicionamiento de la alimentación y succión de resina, así como la secuencia de operación juegan un rol de notable relevancia para la ejecución exitosa en la fabricación de las dos conchas.

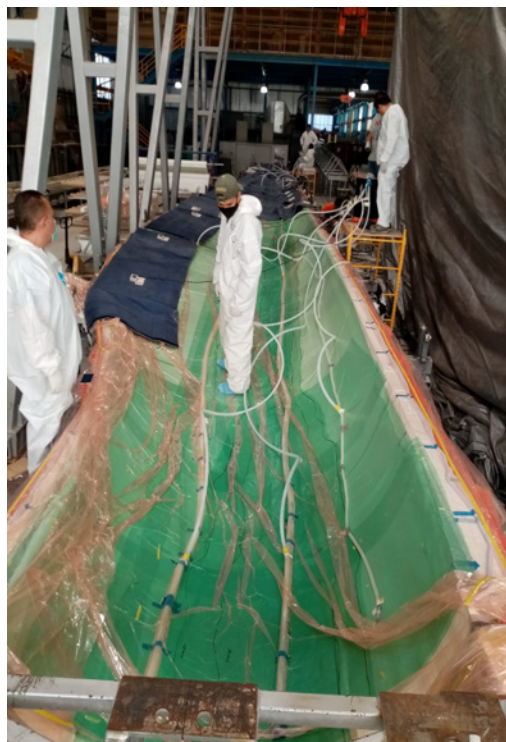


Figura 25 – Proceso de infusión en concha LS

Pegado de todos los componentes

Previo al pegado de los componentes, se requiere que cada una de las piezas cuente con la hoja de liberación por parte del departamento de calidad, la cual valida el cumplimiento de la inspección dimensional y de todos los parámetros de diseño.

El pegado se realiza mediante el uso de un adhesivo estructural epóxico, de color verde. El proceso se ejecuta en dos días, el primero consiste en posicionar y adherir los largueros primario y secundario sobre la concha LP. Se deje secar y al día siguiente se posiciona y pega la concha LS. Durante la actividad es requisito el uso de los moldes para la correcta ejecución, debido a que estos cuentan con los sistemas de posicionamiento, alineación y sujeción entre moldes; todo lo anterior evita problemas de desplazamientos, giros, desalineaciones y espesores de adhesivo no uniformes.

En la Fig. 26 se puede ver el adhesivo aplicado en el contorno de la concha LP así como en la parte superior de los dos largueros. También se puede notar el uso de los moldes para hacer el correcto pegado de las piezas.



Figura 26 – Uso de adhesivo estructural epóxico

Prueba estática y resultados

La prueba estática se definió con base a las normas GL-2010, IEC 61400 - Part 23 y DNVGL ST-0376. Con el objetivo de validar tanto el diseño como la manufactura del aspa. En la Fig. 27 se observa la flexión del aspa debido a la acción de cinco cargas puntuales, en posición flap positivo.

En resumen, se manufacturó un aspa de mayor peso al de diseño con un ligero desplazamiento del centro de gravedad y con una mayor rigidez mecánica al desplazarse la punta a un valor menor al determinado en la etapa de diseño. Respecto a los rangos permisibles de la norma GL-2010, el aspa manufacturada cumple con ser de valor menor al 10% para el peso y centro de gravedad. Respecto a la flexión en punta es mayor, sin embargo, al tener mejor rigidez mecánica el factor de seguridad en campo es mayor.



Figura 27 – Prueba estática del aspa

En la Tabla 1 se aprecian los resultados comparativos entre los valores de diseño y los obtenidos al finalizar la prueba.

Tabla 1 – Comparativo de resultados.

| Criterio | Valor de diseño | Resultado de prueba |
|------------------------|-----------------|---------------------|
| Peso (N) | 39048 | 42717 |
| Centro de gravedad (m) | 8.97 | 9.12 |
| Flexión de punta (m) | 3.02 | 2.66 |

Análisis y aprendizajes de las secuencias

En los modelos maestros se deben evitar las deformaciones, se sugiere reforzar las zonas perimetrales de los segmentos, también es importante el control de la reacción exotérmica tanto de la pasta como de la resina para evitar la presencia de cavidades internas, que por cambios de presión y temperatura alteren la morfología de la pieza. El 5% de las reparaciones en los segmentos se generaron por la manipulación y el traslado, para lo cual se deben implementar mejoras en los procedimientos y herramientas para dicho propósito.

Previo a la manufactura de los moldes, se debe realizar una prueba de presencia de cavidades en los modelos maestros para realizar su corrección. El molde LS presentó deformaciones en 2 zonas debido al hundimiento de cavidades, lo cual requirió una reparación del molde, comprometiendo su estanqueidad. Otro de los aprendizajes durante la manufactura de los moldes es dejar mayor área para los consumibles del proceso de infusión, por si se requiere la colocación de

una segunda bolsa de vacío. También es importante mejorar la protección de los sensores de temperatura contra los cortes continuos de las fibras de vidrio.

La mayor área de oportunidad durante la manufactura del aspa es lo referente al control de los espesores de adhesivo empleado para el pegado de los componentes. Espesores mayores implican un mayor peso, así como un mayor costo. En lo que respecta a las estrategias de infusión, se debe continuar con la adquisición de datos para su análisis y la mejora continua del proceso.

Conclusión

La presente secuencia metodológica permite una visualización y comprensión del proceso de fabricación del aspa de 30 metros, se aprecian las múltiples etapas e interacción de actividades. Lo cual permitió identificar ineficiencias y mejoras potenciales. Durante cada fase del proyecto se evaluaron los riesgos y su impacto, se implementaron medidas preventivas y correctivas.

El éxito del proyecto es resultado de la colaboración interdisciplinaria entre diferentes centros, tanto públicos como privados. El trabajo arduo en la ingeniería, planificación, programación de actividades, gestión de la cadena de suministro, gestión de inventarios, análisis de datos, análisis de costos, capacitación de los recursos humanos, etc. se reflejan en los resultados obtenidos; marcando un hito en el desarrollo de las capacidades nacionales en la manufactura de componentes para la industria eólica.

Agradecimientos

Este trabajo es parte de las actividades desarrolladas en CIATEQ, en el marco del proyecto PESM10020 “Implementación del proceso de fabricación del prototipo de aspas para el aerogenerador MEM de 1.2 MW”. Bajo el auspicio de INEEL, BID y CONAHCYT, con la colaboración de FMAM, CIDESI, CENER y NABRAWIND.

Referencias

- [1] Asociación mexicana de energía eólica – pwc (2015). *El potencial eólico mexicano: oportunidades y retos en el nuevo sector eléctrico* (pág. 7).
- [2] Secretaría de energía (2024, 3 de abril). *Prospectiva del sector eléctrico 2023-2037* (pág. 28).
- [3] Yang, L. (2016). *A kind of blade of wind-driven generator Making programme* (Patent Núm. CN:105216341:A). En Patent (CN:105216341:A).
- [4] Nielsen, L. (2023). *In-line one-way vartm valve and infusion method* (Patent Núm. 2023175170:A1). En World Patent (2023175170:A1).

- [5] Wu, W. (2024). *Large-scale in-situ carbon-glass hybrid composite wind power blade girder cap and manufacturing method* (Patent Núm. CN:117922047:A). En Patent (CN:117922047:A).
- [6] S. Sharma and J. E. Locke. (2006). “Hybrid composite laminate quality issues using VARTM fabrication for use in wind turbine blades,” American Society for Composites - 21st Technical Conference of the American Society for Composites 2006, vol. 3. pp. 1580–1591. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84867655212&partnerID=40&md5=2a3bab3e50bf1cffad7851f7642e2f1d>
- [7] S. Sharma and K. K. Wetzel. (2007). “Process development issues of glass-carbon hybrid reinforced polymer composite wind turbine blades,” American Society for Composites - 22nd Technical Conference of the American Society for Composites 2007 - Composites: Enabling a New Era in Civil Aviation, vol.2. pp.1135–1146. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84867823822&partnerID=40&md5=73f4f1160c3eedf03add1293c031c896>
- [8] Stecher, H. (2023). *Method of producing a wind turbine blade, a respectively produced wind turbine blade and a porous material suitable for use in the production* (Patent Núm. 2023099330:A1). En World Patent (2023099330:A1).
- [9] Hedges, A., & Rajasingam, D. (2014). *Improvements relating to the manufacture of wind turbines* (Patent Núm. 2014053142:A1). En World Patent (2014053142:A1).
- [10] Bech, A. (2023). *Wind turbine blade manufacture* (Patent Núm. 11840038). En US Patent (Núm. 11840038).
- [11] Smith J. (2023). *Improvements relating to the manufacture of wind turbine components* (Patent Núm. CN:117120248:A). En Patent (CN:117120248:A).
- [12] P. H. Broberg, E. Lindgaard, A. J. Thompson, J. P.-H. Belnoue, S. R. Hallett, and B. L. V. Bak. (2024) “Parametric study on the effect of material properties, tool geometry, and tolerances on pre-form quality in wind turbine blade manufacturing,” *Composite Structures.*, vol. 344, Article 118324. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118324>.
- [13] J. J. Bender, S. R. Hallett, and E. Lindgaard. (2019) “Investigation of the effect of wrinkle features on wind turbine blade sub-structure strength,” *Composite Structures*, vol. 218, pp. 39–49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.03.026>.
- [14] J. J. Bender, S. R. Hallett, and E. Lindgaard. (2019) “Parametric study of the effect of wrinkle features on the strength of a tapered wind turbine blade sub-structure,” *Composite Structures*, vol. 218, pp. 120–129. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.065>.
- [15] Díaz J.A., Hernández I., González A., Alvarado I. *Diseño, análisis y simulación estructural de un aspa para un aerogenerador de 30 kW*. Memorias del XXIII congreso internacional anual de la SOMIM 2017. Cuernavaca Morelos.
- [16] González A., Hernández I., Díaz J.A., Alvarado I. *Diseño aerodinámico de un rotor para una turbina eólica de 30 kW*. Memorias del XXIII congreso internacional anual de la SOMIM 2017. Cuernavaca Morelos.
- [17] Estrada C., Hernández I., Rico J.G. *Criterios para el diseño de un banco de pruebas estructurales de aspas de turbinas eólicas de pequeña y mediana potencia*. Memorias del XXIII congreso internacional anual de la SOMIM 2017. Cuernavaca Morelos.
- [18] Díaz J.A., González A., Hernández I., Escamilla A. *Desarrollo de un laboratorio para manufactura de aspas de turbinas eólicas*. Memorias del XXIII congreso internacional anual de la SOMIM 2017. Cuernavaca Morelos.