

Desarrollo de álabes para aerogeneradores de eje horizontal de baja potencia, empleando materiales compuestos

Development of blades for horizontal axis wind turbines using composite materials

Presentación: 10/10/2023

Maria Julieta Ganiele

Instituto Jorge A. Sabato, Comisión Nacional de Energía Atómica-Universidad Nacional de General San Martín, Av. Gral. Paz 1499, Centro Atómico Constituyentes, San Martín, Buenos Aires, Argentina.

Gerencia de materiales, División de Hidrógeno en Materiales, Grupo AeroMat, Av. Gral. Paz 1499, Centro Atómico Constituyentes, San Martín, Buenos Aires, Argentina.

mariajulietaganiele@cnea.gob.ar

Lucio Ponzoni

Gerencia de materiales, División de Hidrógeno en Materiales, Grupo AeroMat, Av. Gral. Paz 1499, Centro Atómico Constituyentes, San Martín, Buenos Aires, Argentina.

Universidad Nacional de Tres de Febrero, Mosconi 2736, Sáenz Peña, Buenos Aires, Argentina.

Universidad Nacional de San Martín, 25 de Mayo y Francia, San Martín, Buenos Aires, Argentina.

ponzoni@cnea.gov.ar

Manuel Moreno

Gerencia de materiales, División de Materiales Avanzados, Av. Gral. Paz 1499, Centro Atómico Constituyentes, San Martín, Buenos Aires, Argentina.

memoreno@cnea.gov.ar

Nicolás Daverio

Gerencia de materiales, División de Materiales Avanzados, Av. Gral. Paz 1499, Centro Atómico Constituyentes, San Martín, Buenos Aires, Argentina.

nicolasdaverio@cnea.gov.ar

Resumen

La energía eólica es una fuente de energía renovable, no contaminante, es inagotable, y reduce el uso de combustibles fósiles, origen de las emisiones de efecto invernadero que causan el calentamiento global. Generalmente está asociada con numerosos y grandes aerogeneradores que se encuentran formando parques eólicos. Sin embargo, actualmente la energía eólica de pequeña y mediana escala ofrece una alternativa frente a los aerogeneradores de gran potencia, desarrollando un papel importante para suplir consumos en forma local.

En este contexto, el objetivo de este trabajo ha sido establecer una sistematización acerca del diseño y construcción de un álabe de material compuesto para un aerogenerador de eje horizontal de baja potencia. Para ello se seleccionó un perfil aerodinámico, se diseñó el álabe y optimizó su geometría, se evaluó el desempeño del rotor y del aerogenerador establecido por el álabe mediante el uso de la teoría BEM y una primera aproximación al análisis estructural.

A su vez, se ha realizado la fabricación del álabe con materiales compuestos (GFRP), utilizando técnicas de impresión 3D para la obtención del contramolde y laminación manual con compactación por vacío para la obtención del molde y el álabe, y se caracterizó mecánica y térmicamente el laminado empleado para la fabricación.

Palabras clave: Energía eólica, aerodinámica, aerogeneradores de eje horizontal, álabes, materiales compuestos, laminación manual.

Abstract

Wind energy is a renewable, non-polluting source of energy, it is inexhaustible, and it reduces the use of fossil fuels, the source of greenhouse gas emissions that cause global warming. It is generally associated with numerous large wind turbines that are forming wind farms. However, small- and medium-scale wind power currently offers an alternative to high-power wind turbines, playing an important role in supplying consumption at the local level.

In this context, the objective of this work was to establish a system for the design and construction of a composite material blade for a low-power horizontal-axis wind turbine. To develop this work, an aerodynamic profile was selected, the blade was designed and its geometry was optimized, the performance of the rotor and wind turbine established by the blade was evaluated using BEM theory and the first approach to structural analysis was made.

At the same time, the manufacture of the blade with composite materials (GFRP) has been carried out, using 3D printing techniques to obtain the counter-mold and manual lamination with vacuum compaction to obtain the mold and the blade. Finally, different experimental techniques were applied to characterize the laminate used to manufacture the blade.

Keywords: Wind energy, Aerodynamic, Horizontal Axis Wind Turbine, Blades, Composite materials, Hand lay-up.

Introducción

El sector energético a nivel mundial ha iniciado un proceso de transición, el cual plantea cambios estructurales que modificarán sustancialmente la forma en la cual se produce, transporta, distribuye y consume la energía en el mediano y largo plazo. Este proceso global busca lograr un crecimiento sostenible y, al mismo tiempo, contribuir al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 y del Acuerdo de París frente al cambio climático, a los que Argentina suscribió en 2015 (ODS Argentina, 2020).

Sin embargo, en la actualidad Argentina cuenta con una matriz energética extremadamente desbalanceada e hidrocarburo-dependiente, como se observa en la Figura 1 (a) por lo que reformular el sector energético a partir de fuentes de energías renovables es uno de los principales desafíos que debemos afrontar como país.

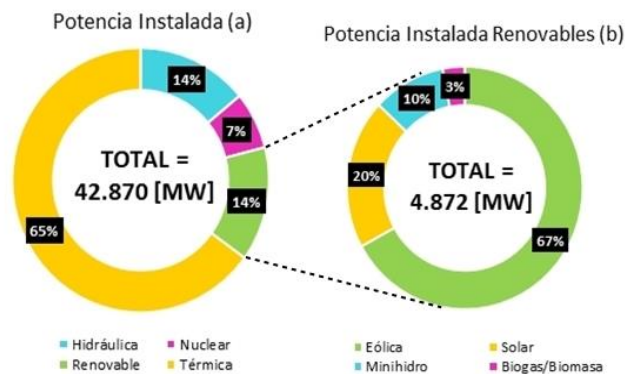


Figura 1- Potencia instalada (a) con subgráfico renovables (b), fin primer trimestre 2022.

La energía eólica es una de las tecnologías con mayor desarrollo y avances de las fuentes de energías renovables a pequeña y gran escala, como se observa en la Figura 1 (b), representa el 67% de la potencia instalada de fuentes renovables en Argentina (Secretaría de Energía de la Nación., 2022).

La energía eólica de pequeña y mediana escala ofrece una alternativa frente a los aerogeneradores de gran potencia, para suplir consumos en forma local. Asimismo, los aerogeneradores de baja potencia son más sencillos de instalar, requieren menos mantenimiento y sus componentes están fabricados para que presenten una gran durabilidad y por ello los álabes deben de tener una ingeniería tanto de diseño, como de materiales para proporcionar la máxima captación de energía del viento junto con una resistencia adecuada del material a las diferentes cargas y esfuerzos que pueda estar sometida (Moraga Ramón, 2016).

La principal razón para utilizar materiales compuestos en los álabes de aerogeneradores es la disminución en peso que puede lograrse, debido a su alta relación resistencia – peso, y rigidez – peso, comparada con materiales convencionales utilizados con anterioridad, como son de aluminio y las aleaciones de acero (Abreu Cetina, 2019).

Además, los materiales compuestos no se corroen tan fácilmente como otros tipos de estructuras, no se quiebran debido a la fatiga del metal y se mantienen bien en entornos de flexión estructural. Los diseños compuestos también poseen una mayor vida útil, lo que significa menos costos de mantenimiento y reparación. Siendo estos factores muy importantes si consideramos que los álabes están expuestos constantemente a la intemperie (Pozo y otros, 2020).

En este trabajo, en conjunto con el Laboratorio Perfil Alar y la división de Materiales Avanzados del CAC- CNEA, se presenta una primera aproximación al diseño y construcción de un álabe de material compuesto para un aerogenerador de eje horizontal de baja potencia (≈ 1 kW), mediante la técnica de laminación manual.

Desarrollo

La presente investigación ha tenido como objetivo establecer una sistematización acerca del diseño y construcción de un álabe de material compuesto para un aerogenerador de eje horizontal de baja potencia (≈ 1 kW), mediante la técnica de laminación manual. El desarrollo de la misma comprendió tres etapas claves: el diseño del álabe, la fabricación del álabe correspondiente a este diseño y por último la caracterización del compuesto utilizado en la elaboración del álabe.

1. Diseño álabe aerogenerador eje horizontal

En la Figura 2 se muestra el esquema de las distintas etapas que se realizaron para obtener el modelo de un álabe de un aerogenerador de eje horizontal de baja potencia (≈ 1 kW).

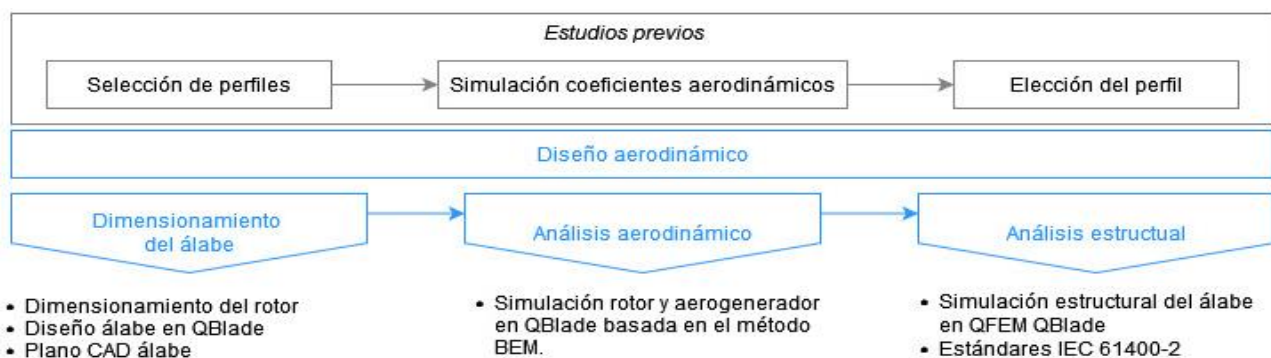


Figura 2 - Esquema etapas propuestas para el diseño álabe de aerogenerador de eje horizontal.

De acuerdo a lo establecido en la Figura 2, este proceso comienza con la recopilación de la información pertinente sobre los perfiles aerodinámicos que se pueden usar en un aerogenerador de baja potencia. Empleando QBlade® y SolidWorks®, se analiza el comportamiento de los perfiles en función del coeficiente de sustentación, el coeficiente de arrastre y del cociente sustentación-arrastre para finalmente elegir, en base a criterios y consideraciones establecidas, el perfil con mejor comportamiento.

Habiendo seleccionado el perfil más adecuado, se procede a calcular la geometría a lo largo del álabe. La metodología que se empleó para el diseño del álabe, está basada en el método de interacciones y convergencia llamado Elemento de Pala (BEM, del inglés “Blade Element Momentum”), módulo integrado en QBlade®, el cual también se utilizó para simular el comportamiento aerodinámico del elemento. Asimismo, para simular la parte estructural y determinar los efectos de las cargas del viento sobre el álabe, se utilizó el módulo estructural QFEM, con base en la teoría de vigas Euler-Bernoulli. Es importante aclarar que el diseño hecho en este trabajo es un primer acercamiento al análisis computacional de interacción fluido-estructura, solo se presenta como una primera aproximación a la problemática.

2. Fabricación del álabe

En la Figura 3 se muestra el esquema del proceso de fabricación propuesto para la obtención del álabe, utilizando técnicas de impresión 3D para la obtención del contramolde y laminación manual para la obtención del molde y el álabe.

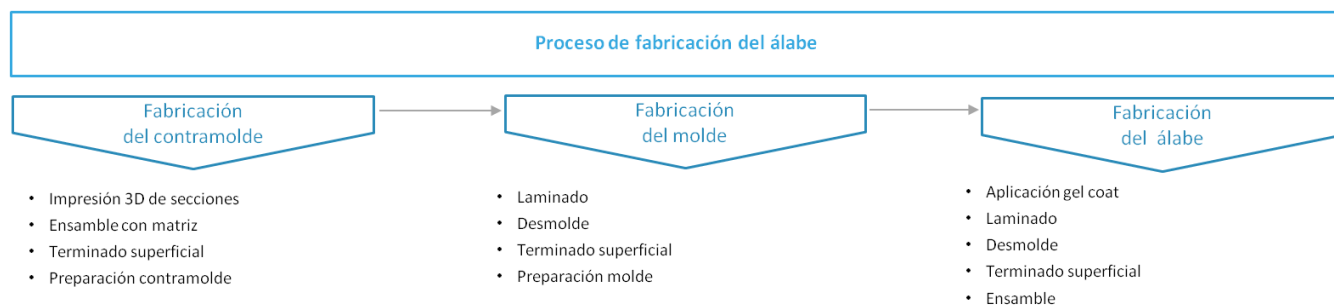


Figura 3 – Proceso de fabricación del álabe

2.1. Contramolde

El contramolde es una pieza clave mediante la cual se obtendrá el molde, que permitirá en una etapa posterior la reproducción seriada de álabes. Por lo que resulta fundamental que el contramolde reproduzca con gran precisión el diseño CAD, razón por la cual se decidió obtener los perfiles mediante impresión 3D. Obtenidas todas las secciones de los perfiles, se montaron sobre una matriz plana de madera MDF ambas mitades del álabe.

2.2. Molde

El proceso de fabricación del molde se realizó mediante laminado manual en bolsa de vacío, utilizando el contramolde como estructura de soporte del laminado. Como refuerzo se utilizó una fibra de vidrio bidireccional de 300 g/m² en una matriz de resina poliéster insaturada.

En la Figura 4 se muestra la secuencia de apilamiento del laminado biaxial simétrico [0°,90°, ±45°]s, se pueden apreciar las fibras orientadas en los diferentes ángulos para intentar alcanzar un comportamiento lo más cercano a la isotropía. A su vez, en la Figura 5 se puede apreciar la estructura final del laminado compactado por vacío.

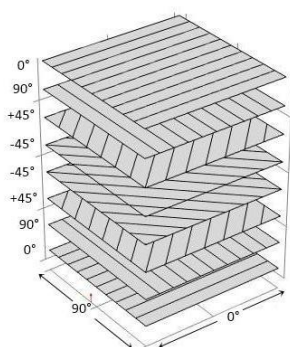


Figura 4 - Secuencia apilamiento laminado

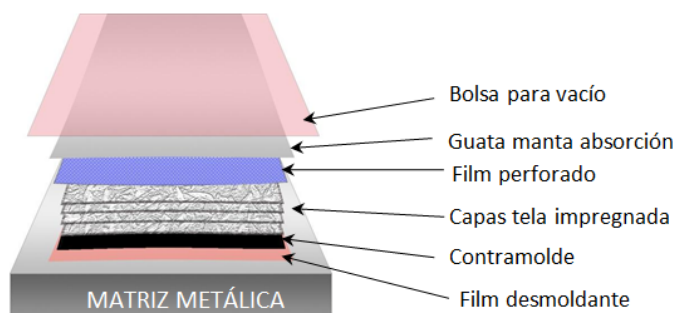


Figura 5 - Estructura laminado molde

Al momento de la fabricación, debido al bajo tiempo de gel que posee la resina poliéster se decidió colocar de a dos capas de fibra de vidrio a la vez respetando la secuencia de apilamiento de la Figura 4. Colocadas ambas capas, (0/90) (+45/-45), se impregnaron con resina adaptándolas a la forma del contramolde con la ayuda de espátulas y rodillos. Esto, a su vez, nos permitió eliminar las burbujas de aire presentes en el laminado llevándolas hacia los extremos del mismo.

De la misma forma se procedió a laminar las dos capas restantes, (+45/-45) (0/90).

Finalmente se cerró la estructura del laminado, de acuerdo a lo establecido en la Figura 5 y se procedió a conectarlo a la bomba de vacío, verificando que no haya pérdidas, durante aproximadamente una hora. Pasada la hora, se apagó el vacío y se dejó curar a temperatura ambiente durante 7 días.

Pasados los 7 días de curado a temperatura ambiente en bolsa de vacío se procedió a retirar la bolsa y desmoldar el mismo.

Para preparar el molde se procedió a colocar 4 capas de agente desmoldante líquido espaciadas en unos 3 minutos de secado aproximado, para que penetre en los poros que hayan quedado en la superficie y bordes más angulosos. De forma complementaria se aplicaron 12 capas de cera desmoldante.

2.3. Álabes

El proceso de fabricación del álabes se realizó mediante laminado manual en bolsa de vacío, utilizando el molde obtenido como estructura del laminado. Como refuerzo se utilizó una fibra de vidrio bidireccional de 300 g/m² en una matriz del sistema epoxi EPOKUKDO YD-128/KH-816.

Para el laminado del álabes se utilizó la misma secuencia de apilamiento que para el laminado del molde, presente en la Figura 4. La estructura final del laminado compactado por vacío se puede apreciar en la Figura 6.

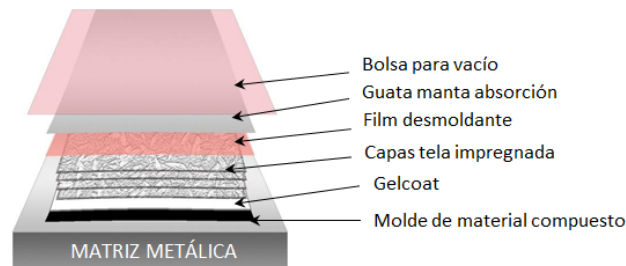


Figura 6 - Estructura laminado pieza final

Previo a iniciar el proceso de laminación del álabes se colocó sobre el molde, específicamente sobre ambas mitades del álabes, una fina capa de gel coat que dejamos curar unos minutos hasta que quede viscoso. De este modo el álabes una vez curado y retirado del molde, se espera, presentará en la superficie la capa de gel coat, la cual le conferirá un acabado de alta calidad en la superficie visible.

A diferencia del laminado anterior, en este caso se utilizó una resina epoxi con un tiempo de gel de 50 minutos por lo que se procedió a laminar de una capa de fibra de vidrio a la vez, respetando siempre la secuencia de apilamiento de la Figura 4. Se impregnó una a una las capas de refuerzo adaptándolas al molde, entre capa y capa se utilizó el rodillo y la espátula para obtener una buena impregnación de la fibra en todo el espesor del laminado y eliminar el aire atrapado.

Una vez impregnadas todas las capas de refuerzo se colocó el film desmoldante y selló la bolsa de vacío a la matriz metálica, verificando que no haya pérdidas. Se conectó al vacío, pero pasados 30 minutos se escuchó un ruido asociado a la flexión del molde, por lo que se decidió por precaución no seguir incrementando el vacío, y se dejó curar en estas condiciones a temperatura ambiente durante 7 días.

Pasados los 7 días de curado a temperatura ambiente se procedió a desmoldar la pieza. Con el fin de ajustar la pieza a su forma final, se realizó un lijado progresivo en toda la superficie (400,600,1000). Asimismo, antes del ensamble se cortaron ambos lados del álabes por separado dejando un borde de aproximadamente 2 cm alrededor de cada álabes para facilitar la posterior sujeción y adhesión de ambos.

Para acoplar de forma definitiva el álabes se decidió realizar una unión mediante adhesivo. Posteriormente se procedió a inyectar mediante el uso de una manguera de PVC espuma de poliuretano a lo largo de todo el álabes (previamente humedecido) como núcleo del mismo.

Pasados los 7 días de curado de la resina a temperatura ambiente para asegurar la unión de las partes y evitar desplazamientos, se inició el proceso de terminado final. El mismo consistió en el cortado de bordes de sujeción y retiro de excesos de espuma de poliuretano, para luego aplicar por aspersión otra capa de gel coat.

3. Caracterización del compuesto

En la Figura 7 se muestra el esquema de las distintas técnicas experimentales aplicadas para la caracterización mecánica y térmica del laminado empleado para la fabricación.

Mediante la aplicación de las distintas técnicas, se caracterizó el sistema epoxi-fibra de vidrio empleado para la fabricación del álabes. Como también, en menor medida, el sistema poliéster- fibra de vidrio empleado para la fabricación del molde.

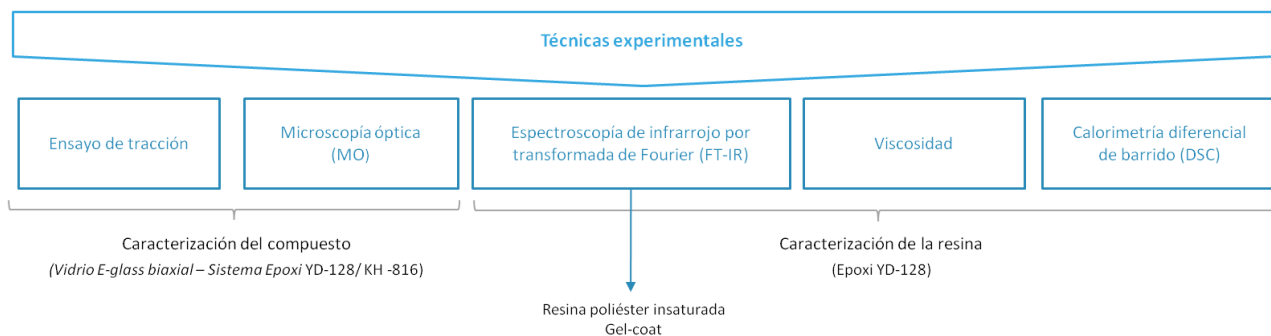


Figura 7- Esquema técnicas experimentales aplicadas.

El ensayo de tracción (*realizado de acuerdo a la norma ASTM D3039/D3039M*) y la microscopía óptica, se utilizaron para determinar las propiedades mecánicas y la composición del sistema epoxi-fibra. Mientras que la espectroscopia FT-IR, el ensayo de viscosidad y el análisis de DSC se utilizaron para caracterizar la resina epoxi.

Resultados

1. Diseño alabe aerogenerador eje horizontal

La Tabla 1, la Figura 8 y el Gráfico 9, describen la geometría y demás parámetros de diseño del álabe.

Área rotor (m ²)	2,70
Radio álabe (m)	1
Cantidad álabes	3
Perfil aerodinámico	NACA 0012
Distribución cuerda (m)	Figura 9

Tabla 1 – Parámetros dimensionamiento del álabe y rotor.

El álabe se dividió en 12 secciones aerodinámicas, contando la sección circular de la base, tal como se observa en la Figura 8.

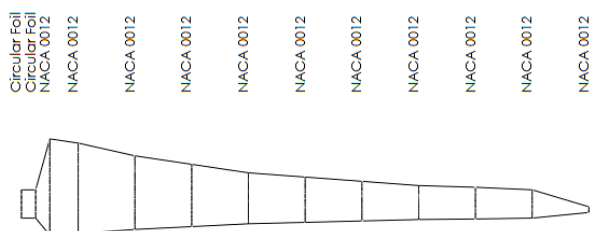


Figura 8- Secciones del álabe.

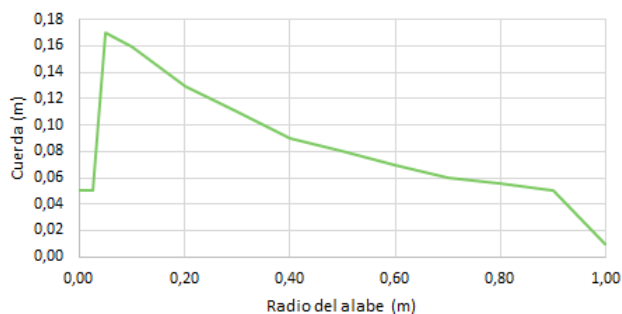


Figura 9 - Distribución de la cuerda a lo largo del álabe

En la Figura 10, se establece el comportamiento del rotor en operación, y se pueden observar los parámetros de desempeño alcanzados para la velocidad nominal 12 m/s.

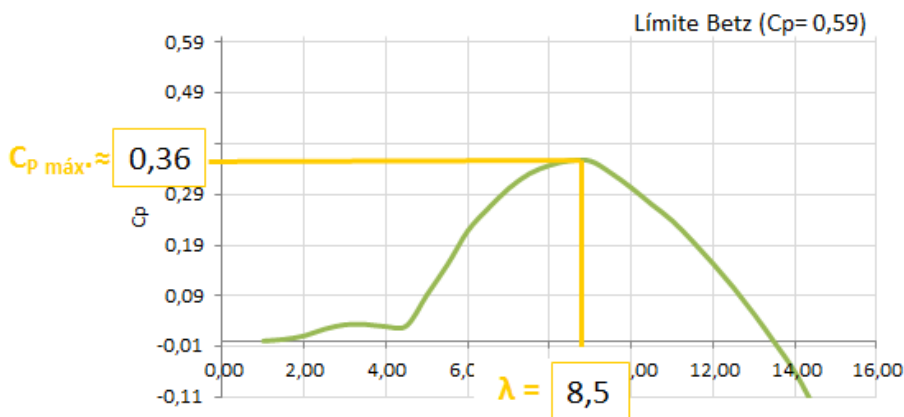


Figura 10 -Coeficiente de potencia (CP) en función de velocidad específica TSR (λ).

En la Figura 11, se observa la curva de potencia del aerogenerador en función de la velocidad del viento, de donde resulta interesante distinguir cuatro etapas de funcionamiento. La condición de arranque que es donde el aerogenerador comienza a generar potencia, la de diseño del presente trabajo, la de máxima potencia alcanzada por el aerogenerador y la de entrada en pérdida aerodinámica (stall). En la Tabla 2 se encuentran las condiciones bajo las que ocurren estas etapas.

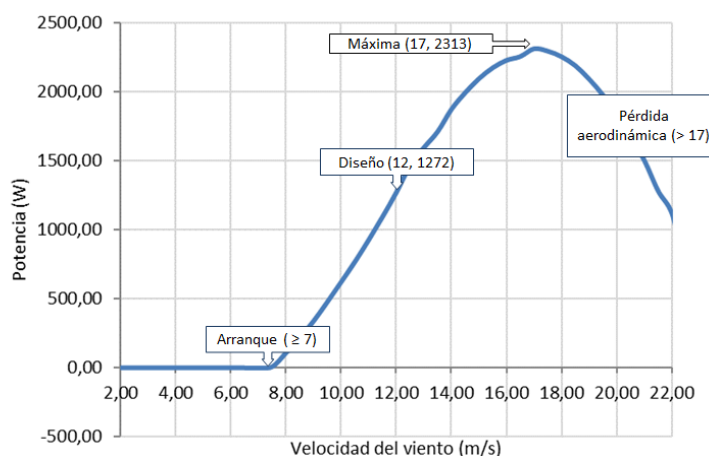


Figura 11 - Curva de potencia del aerogenerador

Arranque		Diseño		Máxima		Pérdida	
V (m/s)	P (W)	V (m/s)	P (W)	V (m/s)	P (W)	V (m/s)	P (W)
≥ 7	-	12	1272	17	2313	>17	-

Tabla 2 – Condiciones etapas de funcionamiento aerogenerador.

Por lo que podemos definir el rango de funcionamiento del aerogenerador entre 7- 20 m/s.

Los resultados del análisis aerodinámico del rotor arrojan una potencia de 1282 W. Mientras que, los resultados del análisis aerodinámico del aerogenerador, corresponde a una potencia de 1272 W. Estos resultados son aceptables, ya que se acercan a la potencia nominal, deseada de ≈ 1000 W, con una variación del 27,2 % y del 28,2 % respectivamente. Esta variación se encuentra asociada, a que el método BEM, utilizado para la simulación aerodinámica del rotor y aerogenerador, no toma en cuenta el efecto de la turbulencia, por lo que las potencias obtenidas tienden a ser mayores.

2. Fabricación del álabe

En la Figura 12 se observa el contramolde obtenido, cabe destacar la precisión de la impresión 3D FFF que nos permitió recrear el modelo CAD del álabe sin inconvenientes.



Figura 12 - Contramolde

Para brindarle mayor rigidez y evitar la flexión del molde durante el laminado de la pieza final, se realizó un soporte de madera rectangular (110 x 48 cm) con un tirante intermedio que se vinculó al molde por medio de tornillos. A su vez, se reforzaron algunos sectores específicos, tales como los rotores y puntas, ya que se consideró que eran las zonas más vulnerables y se quiso evitar posibles roturas durante el proceso de terminación superficial. Tal como se observa en la Figura 13.



Figura 13 - Molde

Al inspeccionar la superficie de la pieza obtenida, se nota que en general el refuerzo y la resina reprodujeron de forma acertada la superficie del molde. Sin embargo, en las partes más angulosas del molde, tales como el rotor y punta del álabe, la impregnación no fue óptima.

En la Figura 14 se observa la pieza final presentada.



Figura 14 - Álabe

3. Caracterización del compuesto

3.1. Viscosidad

En la Figura 15, presente en la ficha técnica de la resina, se puede ver el comportamiento de la viscosidad de la resina YD 128 en función de la temperatura. Teniendo en cuenta que la temperatura promedio de nuestro ensayo resultó de 26,86

°C, se observó que la viscosidad media obtenida en el ensayo (≈ 8922) se encuentra dentro de los valores esperados para esa temperatura. Cabe destacar, que esta viscosidad nos permitió llevar a cabo el proceso de laminado manual de forma adecuada.

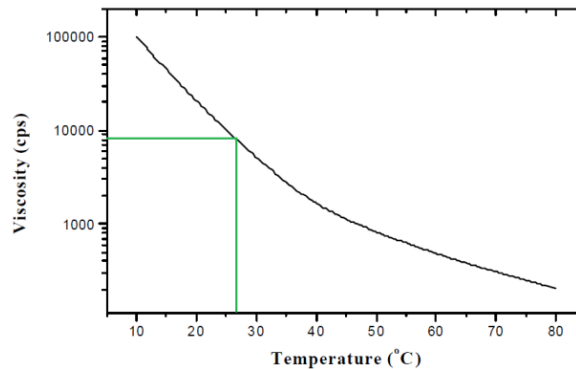


Figura 15 - Viscosidad resina epoxi YD 128 en función de la temperatura brindada por el proveedor (48).

3.2. Ensayo de tracción

Las curvas “tensión- desplazamiento”, Figura 16, indican que todas las probetas rompen de manera frágil a tracción sin ninguna deformación plástica o fluencia, mostrando un comportamiento elástico-lineal, lo que se corresponde con el comportamiento esperado de este material.

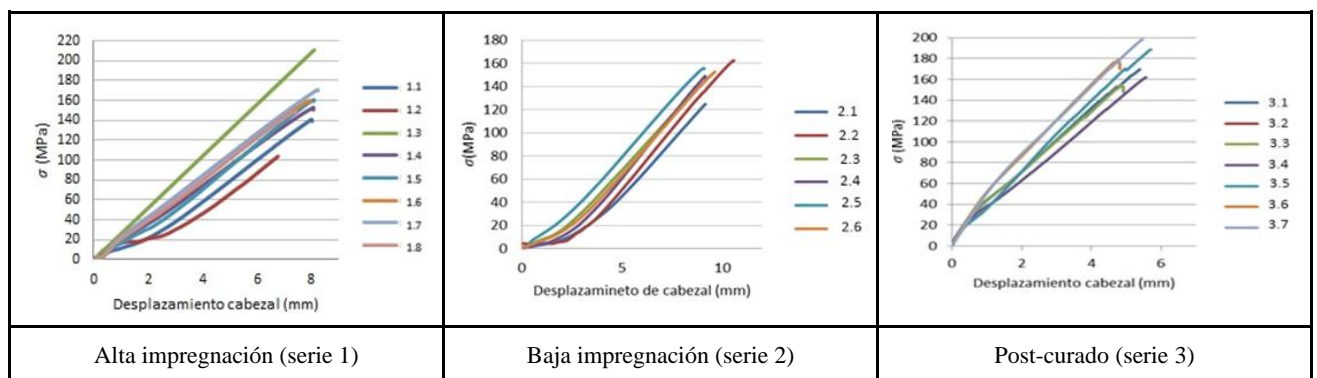


Figura 16 - Curvas tensión-desplazamiento de probetas.

Los resultados obtenidos se validaron considerando dos criterios, el establecido por la norma ASTM D3039 y el método estadístico “Grubbs test for Outlying Observations”. A su vez, los valores de tensión de rotura obtenidos, coinciden en orden de magnitud con la tensión de referencia de un laminado E-vidrio/epoxi obtenido a partir de una base de datos basada en la norma ASTM D 3039, a temperatura ambiente y humedad relativa y sin condiciones de envejecimiento (Pozo y otros, 2020).

Las probetas a las que se les aplicó un tratamiento de post curado (serie 3) presentan la mayor tensión promedio de rotura (σ :184,23) y una homogeneidad de tensiones mayor (CV: 5,84) que las de alta impregnación (serie 1), cuya tensión promedio de rotura es de σ : 155,48 con un coeficiente de variación de CV: 6,65, a su vez estas últimas presentan una mayor homogeneidad de tensiones obtenidas que las de baja impregnación (serie 2), cuya tensión promedio de rotura es de σ :141,52 con un coeficiente de variación de CV: 10,65. Asimismo, las probetas con alta impregnación presentan tensiones de roturas más uniforme debido a que poseen un menor porcentaje de poros ($\approx 2\%$), esto se evidencia al observar las micrografías obtenidas por microscopía óptica. Mientras que las probetas con baja impregnación presentaron valores de tensión más dispersos, relacionado con fallas durante el laminado que se reflejan en el alto porcentaje de poros ($\approx 16\%$) y el tamaño de los mismos.

3.3. Microscopía óptica (MO)

A continuación, se observan algunas imágenes representativas de las micrografías obtenidas.

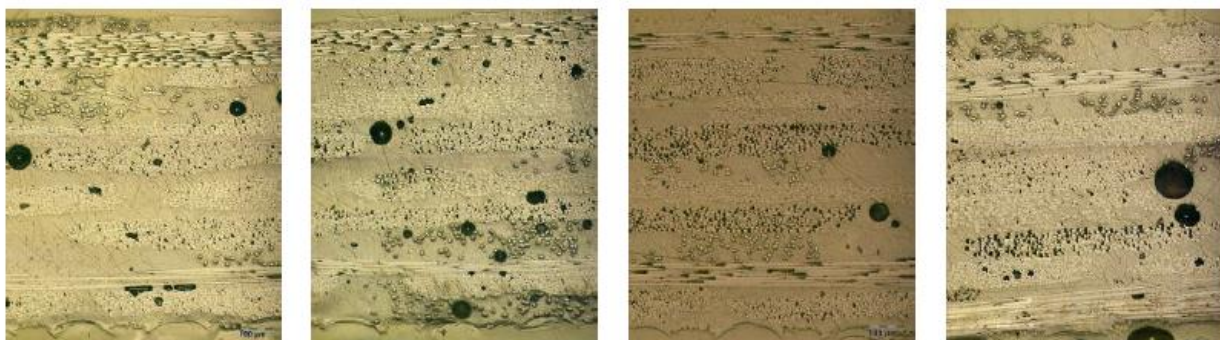


Figura 17 - Micrografías probeta serie 1 con aumento 10x.

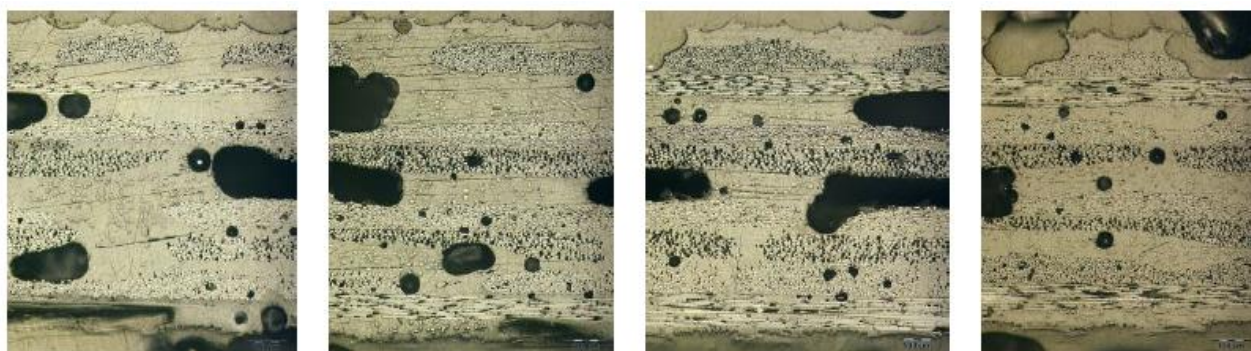


Figura 18 - Micrografías probeta serie 2 con aumento 10x.

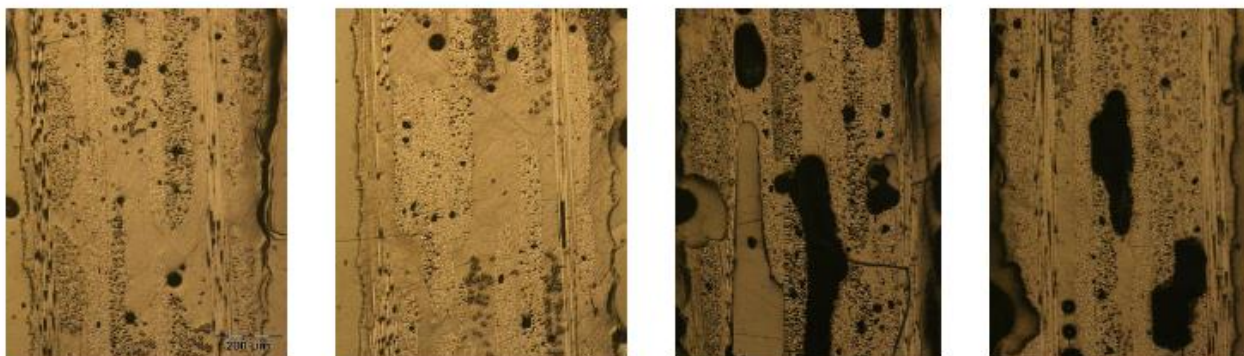


Figura 19 – Micrografías probeta serie 1 (izquierda) y 2 (derecha) con aumento 5x para observar % poros.

Muestras incluidas	% Resina	% Fibra	% Poros
Alta impregnación	43,91	56,09	2,06
Baja impregnación	62,99	37,01	16,31

Tabla 3 - Porcentajes de resina, fibra y poros

A partir del análisis de las micrografías obtenidas se obtuvo la composición de las muestras, presente en la Tabla 3. Al comparar las composiciones obtenidas se puede observar que la probeta extraída del laminado con alta impregnación, presentó un porcentaje del $\approx 56\%$ de fibra de vidrio y un $\approx 44\%$ de resina epoxi, con un $\approx 2\%$ de porosidad. Mientras que la probeta extraída del laminado con baja impregnación, presentó un $\approx 37\%$ de fibra y un $\approx 63\%$ de resina, con un $\approx 16\%$ de porosidad.

La proporción obtenida de fibra/resina en la probeta 1.8 coincide con los valores recomendados por la bibliografía (40:60) y se refleja en una distribución más homogénea de los paquetes de fibra, mientras que la obtenida por la probeta 2.1,

presenta un alto porcentaje de resina y un porcentaje de fibra por debajo de lo recomendado, presentando empaquetamientos aislados de fibra. Asimismo, la probeta 2.1 se encuentra más afectada por la presencia de poros, tanto por tener un mayor porcentaje como un mayor tamaño, en cambio en la probeta 1.8 se ven menos poros y están distribuidos dentro de los paquetes de fibra.

Por último, cabe destacar que este ensayo es solo indicativo, ya que se evaluó la composición de dos probetas, por lo que no representa un número que pueda dar un muestreo válido extrapolable a la composición de la totalidad del laminado.

3.4. Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)

Mediante esta técnica se caracterizaron 8 muestras en total, 6 muestras líquidas correspondientes a la resina epoxi Y-128, endurecedor KH-816, resina epoxi + endurecedor (t=3 min), resina poliéster insaturada, gel coat y al endurecedor genérico. Y dos muestras sólidas correspondientes a la resina epoxi + endurecedor, curado t= 7 d y al gel coat + endurecedor curado.

Lo que nos permitió identificar los grupos funcionales presentes mediante el análisis de los espectros IR y su comparación con biblioteca de espectros IR KnowItAll® (resina epoxi) y referencias bibliográficas y/o publicaciones científicas. Y realizar un ensayo de aceptación de todos los productos adquiridos.

En las Figuras 20 y 21, se puede ver algunos de los espectros obtenidos y sus picos característicos a modo de representación del análisis realizado para todas las muestras.

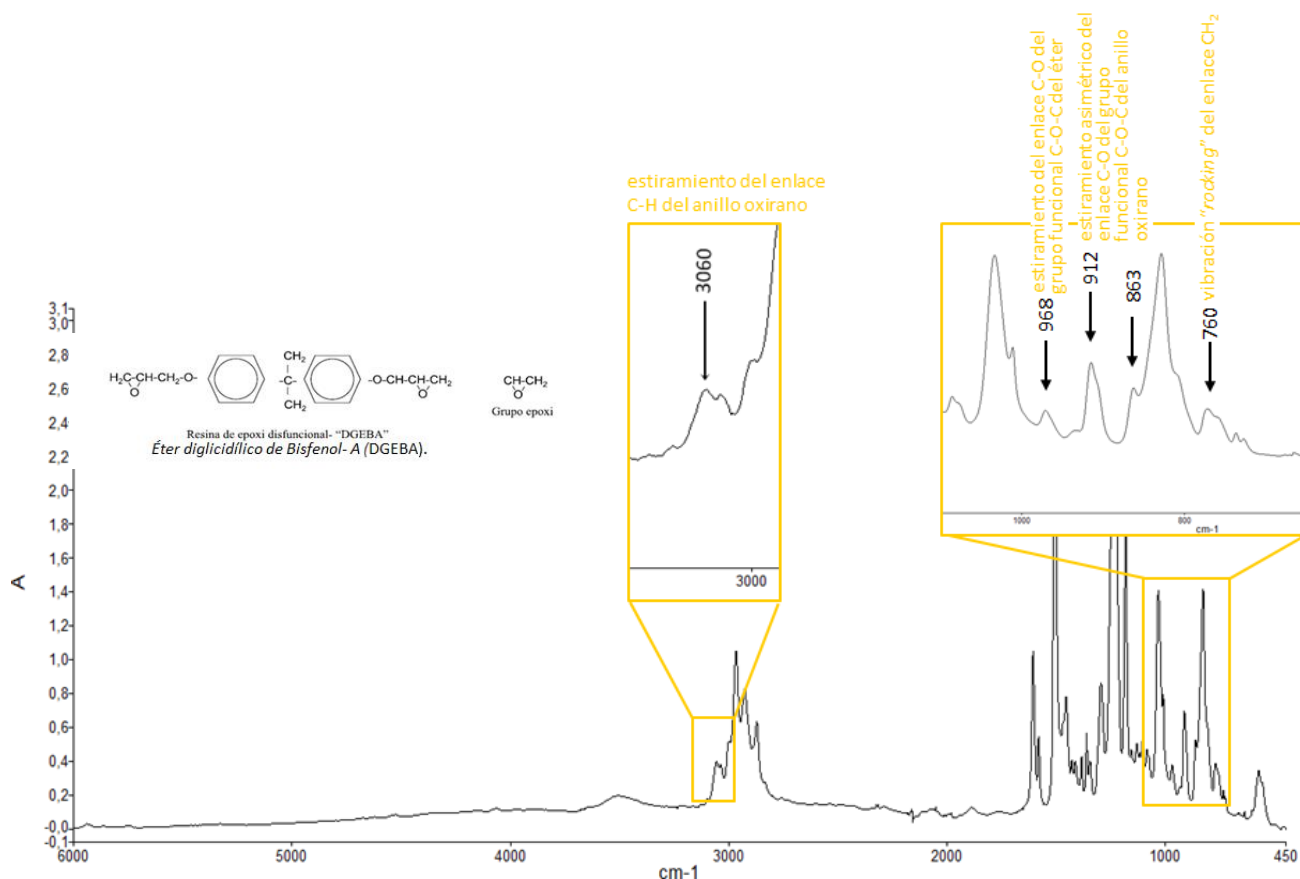


Figura 20 - Espectro de la resina epoxi YD 128

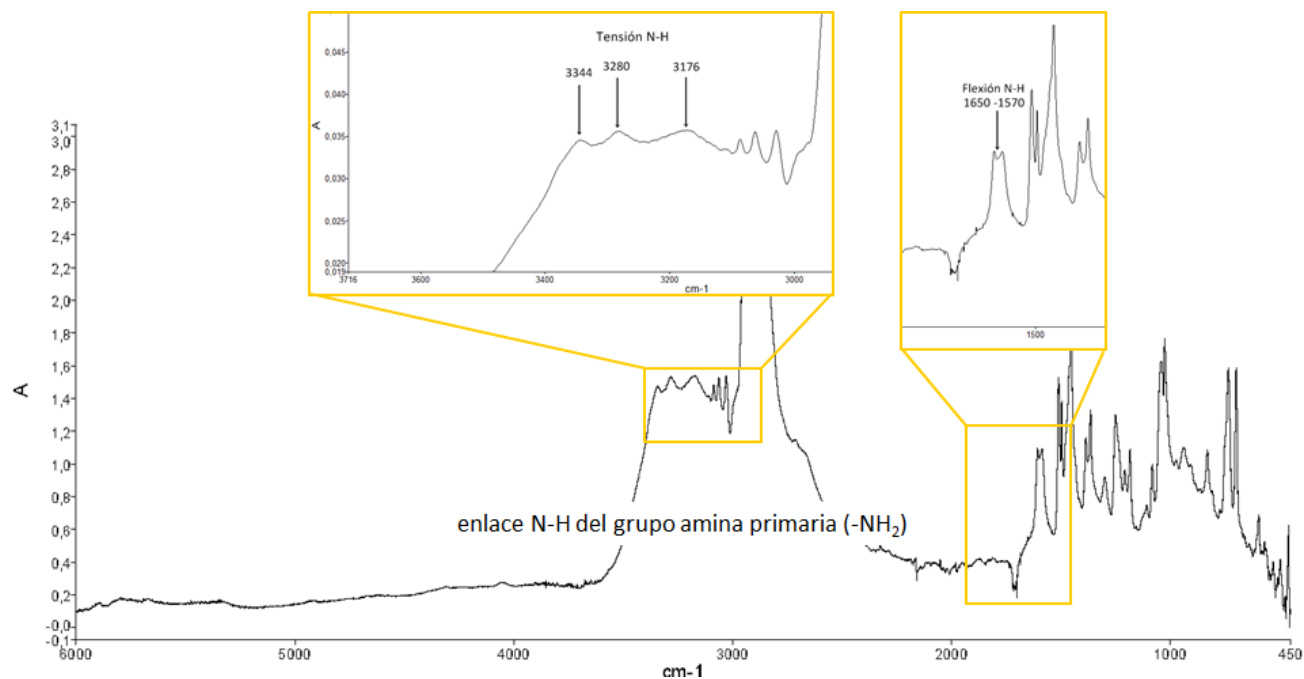


Figura 21 -Espectro del endurecedor KH 816

3.5. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Estos ensayos se realizaron de acuerdo al procedimiento de medición: FO-DMA-001-Setup, desarrollado por Manuel Moreno de la División Materiales Avanzados de la Gerencia de Materiales del CAC-CNEA, bajo las condiciones establecidas en la Tabla 4.

Flujo Nitrógeno	50 ml/mm
Velocidad de calentamiento	10°C/min
Intervalo temperatura	T amb - 250°C

Tabla 4 - Condiciones corrida ensayo DSC.

Por falta de información suministrada por el proveedor, se seleccionaron cinco condiciones de curados para el estudio de la cinética de curado del material. En la Tabla 5, se resumen los tiempos y temperaturas correspondientes a cada condición ordenadas en orden creciente de grado de curado.

Curado	Tiempo	Temperatura
1	7 días	20 °C ≈ ambiente
2	1,5 horas	60 °C
3	1,5 horas	80 °C
4	1,5 horas	100 °C
5	1,5 horas	120 °C

Tabla 5 – Tiempos y temperaturas de curado resina epoxi.

En el Figura 22 se observan las curvas DSC obtenidas para las muestras curadas a las temperaturas indicadas donde se evidencian las Tg. Todas las curvas obtenidas son resultado de una primera corrida, menos las curadas a T amb y 60°C. Los valores de Tg obtenidos se encuentran en la Figura 23, se tomó como Tg del material el valor de temperatura umbral (*onset*), debido a que es donde el polímero pasa estado rígido al estado gomoso y sufre una pérdida importante en sus propiedades mecánicas.

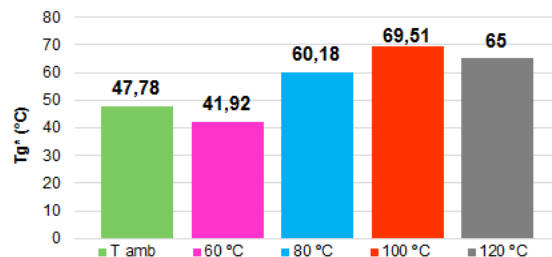
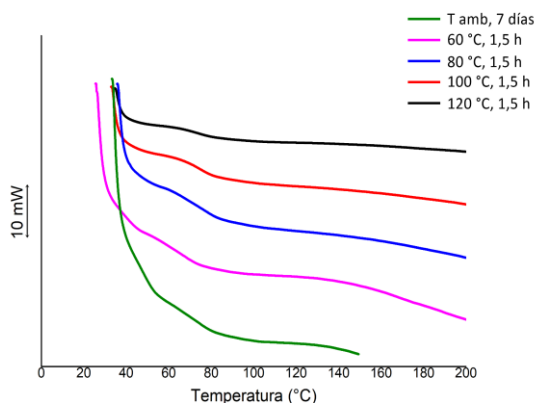


Figura 22 - Corridas DSC dinámicas a 10°/min después de que el sistema epoxi fuera curado las temperaturas indicadas donde se evidencian las Tg.

Figura 23 - Tg para distintas condiciones de curado

Podemos observar en todas las muestras curadas durante 1,5 h que para el mismo tiempo de curado el valor de Tg aumenta con el de la temperatura.

Diversos autores (Vidal, 2013; Morancho Llena, 1996; Li, 2000) establecen como Tg la obtenida mediante el criterio del punto medio (Tm). Sin embargo, en este trabajo, se tomó como Tg del material el valor de temperatura umbral (Tf), debido a que es donde el polímero pasa del estado rígido al estado gomoso y sufre una importante pérdida de propiedades mecánicas (DNV GL standards., 2016; Michel & Ferrier, 2020).

A partir de los datos experimentales se obtuvo el grado de curado de cada muestra, como se muestra en la Tabla 6. Cabe destacar que los grados de curado obtenidos utilizando el método Bandara de línea base, se asumen más precisos que los obtenidos por Origin® debido a la forma de definición de la línea base. Se observa que el grado de curado sigue una tendencia descendente clara, y que además es la esperada, ya que a menor temperatura la reacción de curado se vuelve más lenta y por tanto no se completa en el tiempo determinado, siendo el grado de curado inferior conforme se va bajando la temperatura de curado.

Condición de curado muestra		α	
		Método línea base	
Tiempo	Temperatura (°C)	Origin®	Bandara
1,5 h	120	≈ 1	1
1,5 h	100	≈ 1	1
1,5 h	80	0,93	0,95
1,5 h	60	0,65	0,89
7 d	ambiente	0,84	-

Tabla 6 - Grado de curado.

El valor de Tg∞ del material, obtenido como el valor medio de todas las medidas completamente curadas, es de 67 ± 2°C. Este es el valor máximo de temperatura de transición vítrea que vamos a obtener para nuestro sistema epoxi cuando esté completamente curado.

Desde un punto de vista práctico, la Tg está relacionada con la temperatura ambiente a la que se puede utilizar el material compuesto o temperatura de servicio. Este límite de temperatura, inferior a la Tg, nos garantiza que el material mantenga sus propiedades a la temperatura de servicio (TgS) (Michel & Ferrier, 2020). Para definir la temperatura de servicio para el álabe del aerogenerador, se consideraron los Estándares DNV GL, específicamente el estándar DNVGL-ST-0437, que determina las condiciones en el emplazamiento para aerogeneradores. En este se establece que los aerogeneradores deben ser diseñados para un rango de temperatura ambiente de -20°C a +50°C con un valor medio +15°C.

(Germanischer Lloyd coop. Wind Energy Committee, 2010). Asimismo, en la “Guía para la certificación de aerogeneradores” publicada por Germanischer Lloyd en cooperación con el Comité de Energía Eólica Aleman, antes de su fusión con DNV, se establece que la Tg umbral (temperatura de inicio extrapolada según la norma ASTM E1356-08(2014) de la matriz y de los materiales de unión estructurales deberá ser superior a 65 °C (International Electrotechnical Commission, 2014).

Considerando que el álabe fabricado curó a temperatura ambiente, durante el mismo tiempo que la muestra analizada a T amb, podemos considerar que presenta el mismo comportamiento térmico. Es decir que tendrá una Tg 47,8°C con un grado de curado de $\alpha \approx 0,85$, de acuerdo al método de Origin®.

En estas condiciones el alabe no cumple con las condiciones de servicio, por lo que sería necesario realizarle un post curado. Es decir, someter al material a un tratamiento isotérmico a una temperatura igual o ligeramente mayor a la $T_{g\infty} = 67 \pm 2^\circ\text{C}$ durante cierto tiempo, para aumentar el valor de la Tg obtenido a temperatura ambiente ($T_g(T_{\text{amb}}) \approx 47,8^\circ\text{C}$) por medio de la reticulación completa, es decir alcanzar el curado completo ($\alpha \approx 1$).

Otra alternativa es considerar las otras temperaturas de curado que analizamos y establecer nuevas condiciones de curado para el álabe. A 100 y 120° C se obtuvo una $T_{g\infty} = 67 \pm 2^\circ\text{C} > T_{gs} = 65^\circ\text{C}$, lo que nos asegura un curado completo y cumple con las condiciones de servicio. Mientras que a 60 y 80° C, los valores de Tg que se obtuvieron se encuentran por debajo de la T_{∞} y de la T_{gs} , por lo que en esas condiciones no cumplen con las condiciones de servicio.

De todas maneras, como trabajo a futuro, sería interesante variar las condiciones establecidas inicialmente, y evaluar diversos tiempos de curado para ver si las muestras a T amb, 60 y 80° C logran alcanzar la $T_{g\infty}$ y el curado completo. A su vez evaluar el comportamiento mecánico del material frente a todas las posibilidades de curado propuestas, y finalmente asumir que grado de compromiso se debería tomar entre la temperatura y tiempo de curado, en función de las propiedades.

Conclusiones

En esta tesis se ha realizado un estudio exploratorio acerca del diseño y construcción de un álabe de material compuesto para un aerogenerador de eje horizontal de baja potencia (≈ 1 kW), mediante la técnica de laminación manual. A partir del trabajo expuesto y discutido se pueden extraer las siguientes conclusiones;

1. Diseño alabe aerogenerador eje horizontal

Fue posible realizar el diseño aerodinámico de un álabe para un aerogenerador de eje horizontal de baja potencia, a partir del perfil aerodinámico NACA 0012. El álabe diseñado establece un rotor que nos permitió determinar un CP máx. de 0,36. Siendo la potencia extraída a la velocidad nominal de $\approx 1,3$ kW.

De acuerdo a los resultados obtenidos, durante el análisis estructural del álabe, la zona con mayores esfuerzos, es decir, la zona crítica se encuentra cercana a la raíz del álabe.

Sin embargo, como ya se ha mencionado se debe tener en cuenta que las simulaciones realizadas se presentan únicamente como indicadores de las zonas de la pieza donde las tensiones son más elevadas. Resulta necesario refinar el análisis de tensiones debido a las simplificaciones planteadas a lo largo del proceso.

2. Fabricación del álabe

En base a los resultados obtenidos durante las etapas del proceso de fabricación del álabe podemos afirmar que la metodología utilizada a la hora de desarrollar el primer modelo del álabe resultó satisfactoria. Considerando algunas de las limitaciones del método de laminación manual, como lo es el control de espesores y el aspecto superficial de la pieza.

La impresión en 3D de las secciones alares del contramolde nos brindó alta precisión a la hora de trasladar el modelo del álabe CAD a la realidad. Mientras que, la laminación manual del contramolde nos permitió obtener el molde sin exhibir contracción dimensional y reproduciendo de forma adecuada ambas mitades del álabe.

Finalmente, la laminación manual del álabe se llevó a cabo sin inconveniente, obteniendo ambas piezas del álabe. Las cuales se acoplaron por medio de adhesivo e inyectó espuma de poliuretano en el interior del álabe como núcleo del mismo.

3. Caracterización del compuesto

Mediante la aplicación de las distintas técnicas experimentales aplicadas a lo largo del presente trabajo, se caracterizó el sistema epoxi-fibra de vidrio empleado para la fabricación del álabe. Como también, en menor medida, el sistema poliéster-fibra de vidrio empleado para la fabricación del molde.

Mediante el ensayo de tracción, se determinaron las propiedades mecánicas del sistema epoxi-fibra. Las probetas con un tratamiento de post curado presentaron la mayor tensión promedio de rotura y una mayor homogeneidad de tensiones. Los resultados obtenidos en los ensayos de tracción se relacionaron con los de microscopía óptica.

Asimismo, la resina epoxi se caracterizó satisfactoriamente empleando las técnicas seleccionadas. La espectroscopia FT-IR permitió determinar la estructura química del sistema epoxi y de los otros sistemas, en ensayo de viscosidad nos permitió determinar que la resina epoxi presentó una viscosidad apta para laminación manual, y el análisis de DSC permitió determinar las condiciones óptimas de curado del sistema epoxi, el calor de reacción y la temperatura de transición vítrea.

El análisis de DSC del sistema epoxi determinó que el valor de $T_{g\infty}$ del material es de 69,5°C.

Considerando que el álabe fabricado curó a temperatura ambiente, durante el mismo tiempo que la muestra analizada a T amb, podemos considerar que presenta el mismo comportamiento térmico, es decir que tendrá una T_g 47,8°C. En estas condiciones el álabe no cumpliría con las condiciones de servicio ($T_{gs} > 65$ °C), pero estimamos que se solucionaría realizando un tratamiento de post curado a 100°C o considerando las otras temperaturas de curado analizadas, estableciendo nuevas condiciones de curado para el álabe.

Como conclusión general podemos establecer que el desarrollo del presente trabajo nos permitió incursionar en el área de los materiales compuestos para aplicaciones en aerogeneradores de baja potencia, combinado con el uso de nuevas tecnologías como lo es la impresión 3D.

Referencias

Abreu Cetina, R. J. (2019). *Desarrollo y caracterización de material compuesto matriz polimérica reforzado con fibra natural de yute en sustitución de la fibra de vidrio para la fabricación de palas y alabes de aerogeneradores*. . Universidad Tecnológica de Campeche.

DNV GL standards. (2016). *DNVGL-ST-0437: Loads and site conditions for wind turbines*.

Germanischer Lloyd coop. Wind Energy Committee. (2010). *Guideline for the Certification of Wind Turbines*. Hamburg : Germanischer Lloyd: Germanischer Lloyd in cooperation with the Wind Energy Committee.

International Electrotechnical Commission. (2014). *IEC 61400-23 Wind turbines- Part 23: Full-scale structural testing of rotor*. Switzerland.

Li, M. y. (2000). *Temperature and moisture effects on composite materials for wind turbine blades*.

Michel, M., & Ferrier, E. (2020). Effect of curing temperature conditions on glass transition temperature values of epoxy polymer used for wet lay-up applications. *Construction and Buildings Materials*, 231.

Moraga Ramón, D. G. (2016). *Estudio técnico-económico de diseño y desarrollo de una pala de mini aerogenerador fabricada con material compuesto*. Universidad Politécnica de Valencia.

Morancho Llena, J. M. (1996). *ESTUDIO DEL CURADO DE MATERIALES COMPUESTOS POR UN SISTEMA EPOXI Y PARTÍCULAS ELASTOMÉRICAS*.

ODS Argentina. (2020). *Argentina.gob.ar*.
<https://www.argentina.gob.ar/politicassociales/ods/institucional/17objetivos#:~:text=Los%20Objetivos%20de%20Desarrollo%20Sostenible,realidad%20econ%C3%B3mica%2C%20social%20y%20ambiental>.

Pozo, A., Fernandez-Lopez, A., & Guemes, A. (2020). Comparativa de propiedades de tracción, compresión, cortadura en el plano de materiales compuestos con fibras naturales. *AEMAC: Asociación Española de Materiales Compuestos*, 4, 70-76.

Secretaría de Energía de la Nación. (2022). *Informe Trimestral de Coyuntura Energética: Primer Trimestre de 2022*. Dirección de Información Energética, Subsecretaría de Planeamiento Energético.

Vidal, J. A. (2013). *Efecto del Contenido de Fibra de Vidrio sobre las Propiedades Mecánicas en Probetas de PBT Reforzado*.