

Desarrollo de álabes para aerogeneradores Savonius, empleando materiales compuestos

Development of Savonius wind turbine blades, using composite materials

Presentación: 29/09/2023

Sara Oris Montenegro

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.
Universidad Nacional de Tres de Febrero, Mosconi 2736, Sáenz Peña, Buenos Aires, Argentina.
saramontenegro@cnea.gov.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

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

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

Resumen

Argentina está comprometida con la implementación del Acuerdo de París y el cumplimiento colectivo del objetivo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), donde nuestro país no excederá la emisión neta de 359 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO_{2e}) en el año 2030, aplicable a todos los sectores de la economía. Para lo cual, en el año 2030, la generación de electricidad proveniente de fuentes renovables se habrá incrementado significativamente y se contará con mayor infraestructura para la generación distribuida. En este contexto, la generación de energía eléctrica a pequeña escala a través de energías renovables cumple un papel importante.

Los aerogeneradores de baja potencia se construyen con diversos materiales. Sin embargo, los materiales compuestos se han convertido en actores centrales principalmente como elemento aligerador de estructuras de los álabes.

El presente trabajo se organizó en torno al desarrollo de un material compuesto mediante la técnica de laminación manual, con la finalidad de fabricar los álabes semicirculares de un aerogenerador Savonius de baja potencia (menor a 1 kW). En este contexto, se realizaron simulaciones FEM con materiales en Ansys Composite PrepPost. A su vez, se realizó la selección y cálculo de materiales para la construcción de los álabes, la fabricación de los mismos, el diseño del ensamble para vincular los distintos componentes estructurales del dispositivo, y la caracterización térmica, química y mecánica del laminado y sus materiales constituyentes, incluyendo la observación mediante microscopía óptica.

Palabras clave: aerogeneradores de baja potencia, Savonius, FEM, álabes, materiales compuestos, técnicas de caracterización, laminación manual.

Abstract

Argentina is committed to the implementation of the Paris Agreement and to the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) collective goal, where our country will not exceed a net equivalent emission of 359 million tons of carbon dioxide equivalent (MtCO_{2e}) in 2030, applicable to all sectors of the economy. By 2030, electricity power generation from renewable sources will have increased significantly and more infrastructure for distributed generation will be in place. In this context, small-scale power generation from renewable energies therefore plays an important role.

Small wind turbines are constructed from a variety of materials. However, composite materials have become central players mainly as a lightening element of blade structures.

This work was organized around the development of a composite material using hand lay-up technique, with the goal of manufacturing the semicircular blades of a low powered (less than 1 kW) Savonius wind turbine. In this context, FEM simulations were performed with materials in Ansys Composite PrepPost. Also the selection and calculation of materials for the construction of the blades, their fabrication, the design of the assembly to link the different structural components of the device, and the thermal, chemical and mechanical characterization of the laminate and its constituent materials were performed, including the observation by optical microscopy.

Keywords: small wind turbines, Savonius, FEM, blades, composite materials, characterization techniques, hand lay-up.

Introducción

Respecto al sector energético para el año 2030, Argentina tiene previsto implementar políticas, acciones y medidas para impulsar una transición energética justa que garantice el abastecimiento asequible de energía, de bajas emisiones, confiable y sostenible, acompañando el crecimiento económico y poblacional e incorporando el uso responsable de la energía a través de la promoción de la eficiencia energética. La matriz energética al 2030 deberá ser más inclusiva, dinámica, estable, federal, soberana y sostenible, basada en el significativo potencial de la energía eólica, solar, hidroeléctrica y de las bioenergías, así como en el desarrollo de la energía nuclear, y de otros vectores energéticos tales como el hidrógeno, que tendrán un rol clave en la transición energética. Concretamente, Argentina está comprometida con la implementación del Acuerdo de París y el cumplimiento colectivo del objetivo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), donde nuestro país no excederá la emisión neta de 359 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO_{2e}) en el año 2030, aplicable a todos los sectores de la economía. Para lo cual, en el año 2030, la generación de electricidad proveniente de fuentes renovables se habrá incrementado significativamente y se contará con mayor infraestructura para la generación distribuida (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020). El Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable Integrada a la Red Eléctrica Pública, creado por Ley N° 27.424, establece el marco regulatorio para que todos los ciudadanos conectados a la red eléctrica puedan generar energía para su autoconsumo en hogares, PyMEs, grandes industrias, comercios, producción agrícola, entes públicos y organismos oficiales, entre otros. El excedente de energía generada podrá ser inyectado a la red, recibiendo una compensación por ello. Los Usuarios-Generadores podrán, asimismo, acceder a una serie de beneficios promocionales (ArgentinaGob, s.f.). En este contexto, la generación de energía eléctrica a pequeña escala a través de energías renovables cumple un papel importante.

Los aerogeneradores de baja potencia se construyen con diversos materiales. Sin embargo, los materiales compuestos se han convertido en actores centrales principalmente como elemento aligerador de estructuras de los álabes desde la década de 1990. Generalmente las resinas y refuerzos utilizados para álabes de grandes aerogeneradores también son aptos para pequeños (Brøndsted&Nijssen, 2013).

Los álabes además de los efectos de carga estructural, también pueden estar sometidos a rayos, impactos físicos y condiciones dañinas de erosión de la superficie (Mishnaevsky et al., 2017). Debido a ello, dentro de los materiales compuestos, se destaca el uso de polímeros reforzados con fibras para fabricarlos, ya que son materiales ligeros, rígidos y resistentes a la intemperie. Asimismo, los álabes de material compuesto mejoran el rendimiento aerodinámico del aerogenerador significativamente (Ghoneam et al., 2021). Por esta razón, el presente trabajo se organizó en torno al desarrollo de un material compuesto mediante la técnica de laminación manual, con la finalidad de fabricar los álabes semicirculares de un

aerogenerador Savonius de baja potencia (menor a 1 kW). Con este desarrollo se plantea adquirir experiencia en la fabricación de álabes de aerogeneradores, el desarrollo de la idoneidad y capacidades del Laboratorio Perfil Alar y la División de Materiales Avanzados, y la puesta a punto del equipamiento utilizado.

Desarrollo

El presente trabajo se organizó en torno al desarrollo de un material compuesto mediante la técnica de laminación manual, con la finalidad de fabricar los álabes semicirculares de un aerogenerador Savonius de baja potencia (menor a 1 kW). Se seleccionó esta geometría debido a su facilidad de construcción y como punto de partida para incorporar experiencia en la fabricación de álabes de aerogeneradores.

En este contexto, se realizaron simulaciones FEM con materiales compuestos en Ansys Composite PrepPost, se realizó la selección y cálculo de materiales para la construcción de los álabes, se fabricaron los álabes, se realizó el diseño y fabricación del ensamble para vincular los distintos componentes estructurales del dispositivo, y se realizó la caracterización térmica, química y mecánica del laminado y sus materiales constituyentes, incluyendo la observación mediante microscopía óptica.

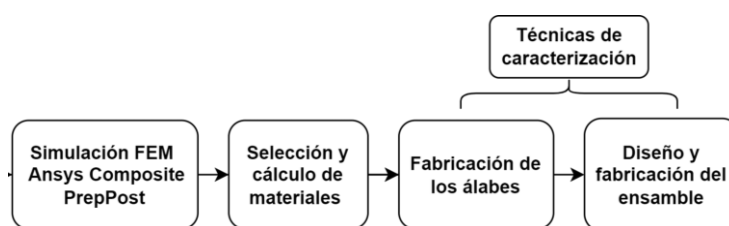


Figura 1: Etapas desarrolladas en la metodología.

Simulaciones de materiales

Las simulaciones FEM se realizaron en ANSYS Composite PrepPost para estimar las solicitaciones mecánicas a las que se verían sometidos los álabes, siguiendo el trabajo realizado por Spies & Tacca para la verificación estructural de un aerogenerador Savonius según el reglamento CIRSOC 102/2005. A partir del reglamento CIRSOC 102/2005, estos autores obtuvieron una fuerza transversal de 9806,6 N a la cual debe verificarse el aerogenerador y su estructura completa (Tacca&Spies, 2016).

El tamaño de los álabes a fabricar se determinó a partir de matriz de laminación disponible. Asimismo, el modelo FEM se realizó teniendo en cuenta un laminado con 4 capas de tejido biaxial de fibra de vidrio y resina epoxi para el modelado de los álabes, y tapas de aluminio. Este material compuesto se añadió a la librería de ANSYS® teniendo en cuenta valores típicos (Balcioğlu et al., 2018), ya que no se contaba con datos propios a excepción del límite de tensión longitudinal producto de los ensayos de tracción realizados. Las capas se estructuraron de forma monolítica para facilitar el tratamiento de los resultados.

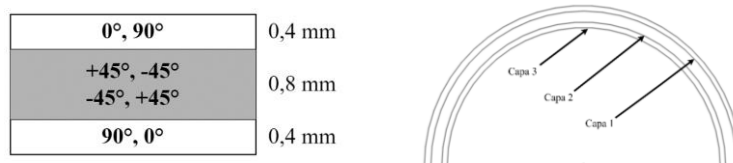


Figura 2: Secuencia de apilamiento y espesor de cada capa monolítica.

El procesamiento de los resultados se realizó a partir de criterios de falla. Existen una amplia variedad de criterios propuestos por diferentes autores. En este trabajo se utilizó el criterio propuesto por Tsai-Wu, por su simplicidad a la hora de implementarlo en programas FEM y debido a su uso con resultados positivos por parte de diversos autores (Ruiz, 2019; Montes, 2020). Asimismo, se utilizó el criterio de falla de máximas tensiones, para verificar las mismas en cada capa de los álabes (Albanesi, 2017).

Selección y cálculo de materiales

En este trabajo se utilizó resina epoxi, por ser la más utilizada en la fabricación de álabes de aerogeneradores, así como fibra de vidrio que no sólo representa el material más utilizado (Brøndsted&Nijssen, 2013), sino también uno de los menos costosos (Chawla, 2012). La resina epoxi seleccionada fué Epoxi YD 128 con su Endurecedor KH 816 de Nautica Escalada, y un tejido de fibra de vidrio tipo E biaxial con sus direcciones principales a $\pm 45^\circ$ y una densidad de 300 gr/m².

Se decidió colocar 4 capas de tejido biaxial de fibra de vidrio con una secuencia de apilamiento $[0^\circ, 90^\circ / +45^\circ, -45^\circ]_s$, ya que es el mínimo punto de partida para realizar un material compuesto balanceado y simétrico con un comportamiento cuasi isotrópico. Asimismo, para realizar las estimaciones teóricas de materiales necesarios para el proceso, se tuvieron en cuenta las medidas de la matriz de laminación y un 30% de descartes en el caso de la fibra de vidrio. Para los cálculos teóricos del sistema epoxi se contempló que el 55% en peso del material representa el peso del tejido.

Fabricación de los álabes

Cada álabes se laminó por separado, ya que la construcción del primero nos permitiría mejorar el proceso de construcción del segundo. Asimismo, todos los procesos de fabricación del presente trabajo se realizaron en el laboratorio del proyecto Antena Radar de Apertura Sintética (ARAS) del Centro Atómico Constituyentes, diseñado para la fabricación de componentes de uso aeroespacial.

Se realizó la laminación de los álabes, sometidos a vacío durante una hora y cuidándolos durante 7 días a temperatura ambiente, según los datos brindados por el fabricante del sistema epoxi. A ambos álabes se los cortó a medida y se les aplicó un top coat.



Figura 3: Laminación de un álabes.

Ensamble del aerogenerador

Con el objetivo de vincular los distintos componentes estructurales del dispositivo, se diseñó un ensamble para vincular los álabes fabricados con materiales compuestos y las tapas del aerogenerador. El Laboratorio Perfil Alar cuenta con amplia disponibilidad para la impresión 3D, y por ello, sumado a la versatilidad que proporciona esta técnica respecto a la adaptabilidad del modelo, se decidió realizar el ensamble mediante manufactura aditiva utilizando filamento PLA.

El diseño contempló la vinculación entre la tapa y el ensamble mediante tornillos, una geometría que permitiera insertar un eje en la zona central, orificios para el ingreso y egreso de adhesivo Loctite, y una cuña simétrica. Asimismo, se realizó una prueba de adhesión y se estableció el procedimiento de colocación del adhesivo, basándonos en la experiencia del laboratorio ARAS. Finalmente, se analizó el corte transversal de las pruebas de adhesión, luego de 7 días de curado del adhesivo a temperatura ambiente, para realizar una inspección visual del diseño.

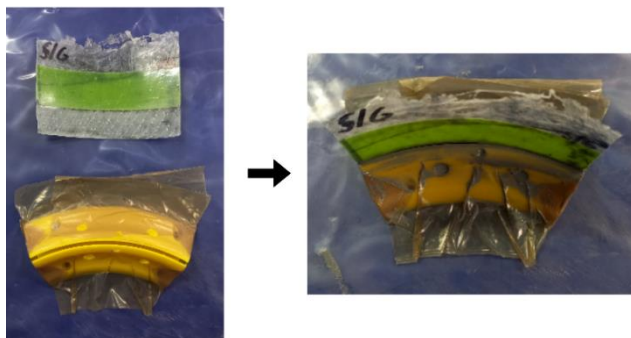


Figura 4: Pasos relevantes realizados en la prueba de adhesión.

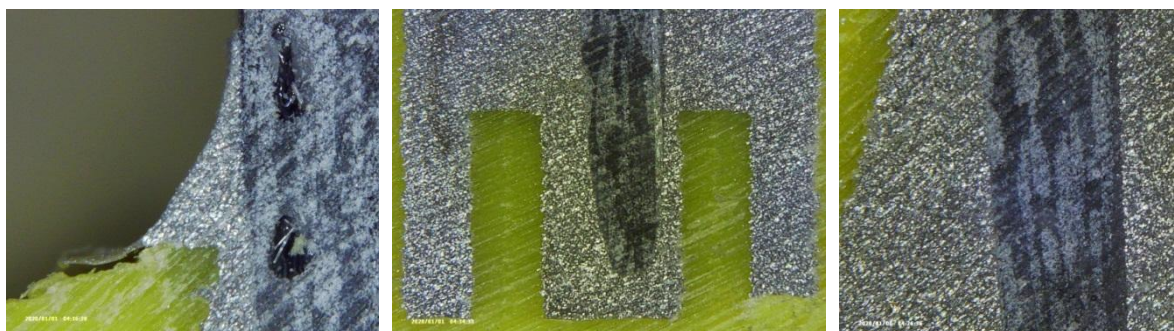


Figura 5: Corte transversal para inspección visual.

Técnicas experimentales

Con el objetivo de caracterizar el material compuesto laminado y sus constituyentes, se recurrió a técnicas térmicas, mecánicas y químicas de caracterización, incluyendo la observación mediante microscopía óptica. De todas las técnicas disponibles, se optó por realizar un ensayo de tracción, FT-IR y DSC.

Para evaluar la resistencia mecánica del material compuesto, se realizaron ensayos de tracción con probetas impregnadas y con falta de impregnación, utilizando la norma ASTM D3039/3039M-08 “*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*”. Estas probetas se fabricaron con procesos similares a los álabes, colocándoles tabs. La norma ASTM D3039/3039M-08 no establece la colocación de *tabs* en el tipo de probetas realizadas, sin embargo, se les colocó para mejorar el agarre según las medidas establecidas por Priya et.al. (Priya&Senthil, 2020), y con el objeto de limitar la zona específica de ensayo. Asimismo, se utilizó el material disponible para realizar probetas de tamaño reducido, las cuales se sometieron a un tratamiento térmico de post curado a 80°C durante 1,5 hs. Se ensayaron en total 21 probetas: 8 impregnadas, 6 con falta de impregnación, y 7 probetas de tamaño reducido, a una velocidad de ensayo de 2 mm/min hasta rotura a temperatura ambiente.

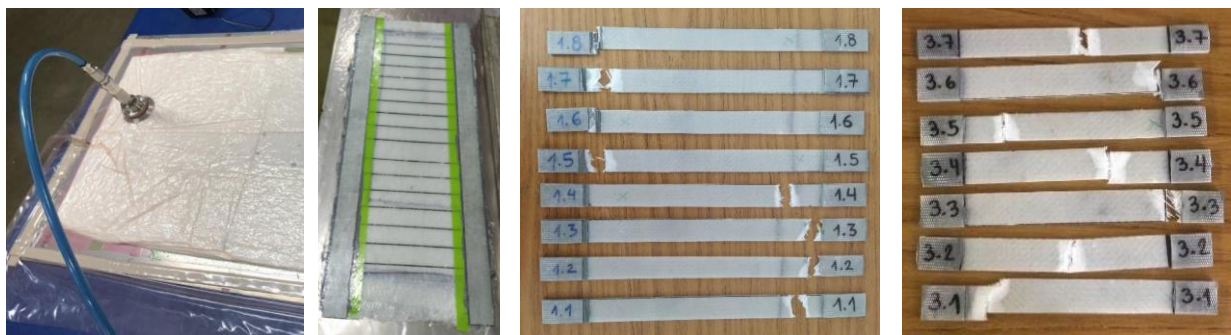


Figura 6: Fabricación de probetas.

Para estimar el contenido de fibra, resina y poros, se utilizó un microscopio óptico OLYMPUS BX60M, con el objetivo de obtener micrografías de inclusiones a las cuales se les preparó la superficie. Luego las micrografías se analizaron con el software ImageJ.

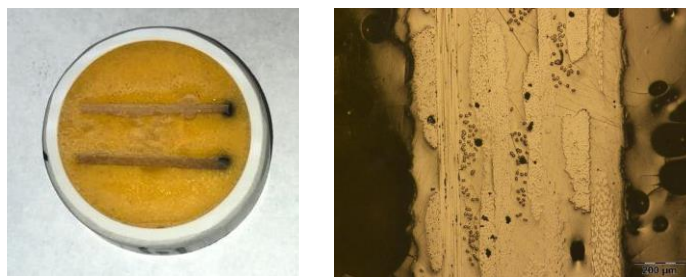


Figura 7: Inclusiones y micrografías.

Se realizaron corridas de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR por sus siglas en inglés) en muestras de resina epoxi y su endurecedor, sistema epoxi a tiempo cero y curado. Esta técnica, se realizó con el objeto de identificar enlaces químicos y determinar los compuestos presentes.

Por último, se empleó la técnica de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC por sus siglas en inglés) para obtener los valores de la temperatura de transición vítrea (T_g) del sistema epoxi curado bajo distintos tratamientos térmicos, y el valor de la T_g . También se analizó una muestra del sistema epoxi a tiempo cero, para determinar el porcentaje de curado de las muestras. Finalmente, se analizó el valor de la T_g bajo los estándares Germanischer Lloyd para la certificación de aerogeneradores. Los ensayos se realizaron con un flujo constante de 50 ml/min de N_2 y una rampa de temperatura de $10^\circ C/min$. Para obtener los termogramas, se realizó un primer barrido de las muestras, y en los casos en que la T_g se observaba enmascarada en un pico endotérmico, se realizó un segundo barrido borrando el historial térmico de la muestra (Morancho&Salla, 1999). Este segundo barrido se realizó hasta una temperatura de $20^\circ C$ por encima de la T_{endset} del pico endotérmico (ASTM. E1356 – 08, 2014), y luego se dejó enfriar hasta temperatura ambiente.

Para obtener los *porcentajes de curado* de las muestras, se utilizaron dos métodos diferentes teniendo en cuenta que la determinación de la línea de base afecta la cuantificación del $\square\square\square\square\square\square\square\square$ y $\square\square\square\square\square$. En el primero de ellos, se planteó el uso del software Origin® para determinar una línea de base. En el segundo método, se utilizó el modelo numérico planteado por Bandara (Bandara, 1986).

Los *valores de la T_g* se obtuvieron mediante el software STARE®, a partir de distintos criterios y estableciendo intervalos para la toma de datos. Se relevaron los valores de las temperaturas *mid point*, *onset* y la derivada primera relevando la T_g en el punto de inflexión.

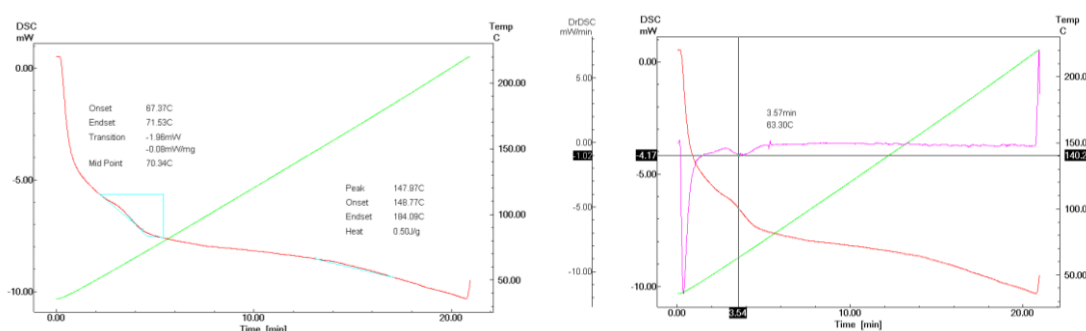


Figura 8: Valores de la T_g mid point, onset, y derivada primera.

Resultados y discusión

Simulaciones de materiales

En las simulaciones se observaron zonas rojas en el modelo donde las tensiones son máximas, y zonas azules donde las tensiones son mínimas.

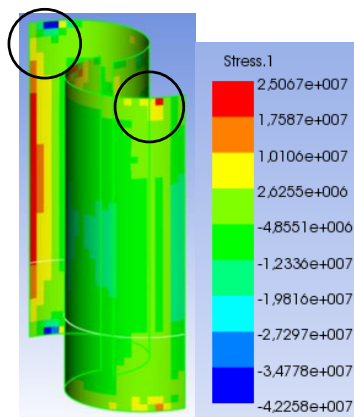


Figura 9: Resultados descartados del Savonius a fabricar.

Estas zonas aparecen por una inestabilidad de la malla en el área donde se aplicó una condición de empotramiento. Por ello, los resultados cercanos a dicha zona no son fiables. Estas condiciones de empotramiento se establecieron durante el mallado del modelo para agrupar los componentes y que el modelo sea interpretado como un todo, y con el objetivo de establecer la peor condición posible. Sin embargo, el aerogenerador una vez construido incorporará ensambles, tornillos y adhesivos para la unión entre las tapas y los álabes; y una estructura soporte y un eje para el montaje final. Por lo que esta zona estará fuertemente rigidizada y podría no verse sometida al estado tensional que se muestra en la simulación, razón por la cual las tensiones máximas y mínimas en estas zonas se descartaron (Ruiz, 2019).

En cuanto a los criterios de falla, por cuestiones de simplicidad, no se muestran los resultados gráficos capa por capa. Sin embargo, se exponen las tensiones máximas y mínimas principales y tensiones de corte de las 3 capas que componen el modelo, generadas por una fuerza de 9806,6 N. En ninguna de las capas se producirá falla por esfuerzos de tracción, compresión ó corte, ya que dichos valores se encuentran dentro de las tensiones límites admisibles.

Capa	σ_{1max} (MPa)	σ_{1min} (MPa)	σ_{2max} (MPa)	σ_{2min} (MPa)	t_{12} (MPa)	Falla por criterio de máx. tensiones
1	25,07	-12,34	89,51	-87,16	6,39	no
2	32,71	-34,64	40,76	-28,96	11,33	no
3	22,51	-23,10	79,23	-98,78	4,55	no

Tabla 1: Tensiones principales y de corte obtenidas sobre el modelo a fabricar, con una fuerza aplicada de 9806,6 N según reglamento CIRSOC.

Finalmente, analizando los resultados con el criterio de falla de Tsai-Wu, se observa que el material no falla, ya que $IRF < 1,0$.

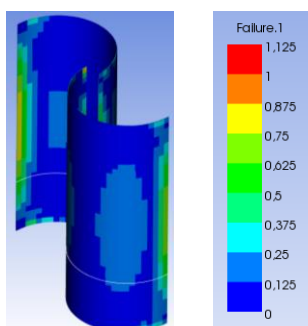


Figura 10: Criterio de falla de Tsai-Wu aplicado sobre las tres capas, para una fuerza aplicada de 9806,6 N según reglamento CIRSOC.

Finalmente, se debe tener en cuenta que estas simulaciones se realizaron con el objetivo de obtener un punto de partida para sentar las bases de un proceso de diseño que requiere de retroalimentación a través de la caracterización del material compuesto, y demanda conocer las condiciones de contorno del sitio de emplazamiento del dispositivo. Asimismo, dentro de las limitaciones de las simulaciones, se debe mencionar que no se añadieron las propiedades mínimas del material fabricado (en el caso de un tejido biaxial, se requiere caracterizar la tensión de rotura y el módulo de Young en la dirección 1 como mínimo. El resto de los datos necesarios pueden obtenerse de bibliografía), no se incorporaron los ensambles, adhesivos, tornillos, eje y estructura soporte, y no se contemplaron las cargas dinámicas a las que está sometido el aerogenerador durante su rotación. Por ello, estos resultados no son concluyentes respecto del comportamiento del material, y no se puede validar el diseño. Sin embargo, se destaca que a través de estas simulaciones se puede comprender la respuesta estructural del dispositivo y mejorar la vinculación entre componentes.

Fabricación de los álabes

Debido a la experiencia adquirida durante el proceso de laminación del álabe 1, se decidió una vez laminado el álabe, colocarle cinta para fijarlo a la matriz y girarlo 180° sobre el eje longitudinal durante el proceso de curado. Esto se realizó con el objetivo de obtener una mejor impregnación de la fibra, y para posicionar las arrugas provocadas por la bolsa de vacío en sectores a descartar del laminado. Al finalizar el proceso de curado, se observó que la superficie cóncava del álabe en contacto con la matriz, obtuvo una buena terminación superficial. Sin embargo, la superficie del álabe continuó exhibiendo imperfecciones. Ello determina la necesidad de modificar el proceso de laminación haciendo uso de un molde macho y hembra, con el objetivo de obtener una sección transversal constante.

Ensamble del aerogenerador

La elección del mejor diseño de ensamble, se basó en las observaciones durante las pruebas de adhesión, luego del curado del adhesivo, y en la inspección visual de los cortes transversales. El mejor diseño fue el que reunió las siguientes características:

- Los orificios con adhesivo funcionan como anclaje mecánico y químico de los álabes, pero se debe limitar su cantidad debido a la concentración de tensiones y su consecuente disminución de las prestaciones mecánicas del ensamble;
- La cuña simétrica maximiza la superficie de contacto con el adhesivo sobre ambas superficies del álabe;
- La guía permite mantener el álabe a 90° r
- respecto de la horizontal, durante el curado del adhesivo, y le otorga soporte estructural;
- La ranura de encastre adaptada al espesor del álabe, permite mantener el álabe a 90° respecto de la horizontal durante el curado del adhesivo, y le otorga soporte estructural.

Asimismo, en el procedimiento de aplicación del adhesivo se deben seguir los siguientes pasos. Luego de lijar, limpiar y enmascarar el álabe, se debe enmascarar el ensamble, así como también realizar diques con cinta para evitar la salida lateral de adhesivo. Asimismo, el ensamble se debe adherir a la superficie de trabajo para facilitar la inyección. Seguidamente, la inyección del adhesivo debe realizarse a través del orificio de ingreso hasta observar el egreso por la ranura superior. El adhesivo sobrante, puede colocarse sobre el álabe para evitar desperdicios. Una vez realizado esto, se acoplan las piezas. Finalmente, durante la limpieza final, se debe realizar un menisco entre componentes para generar una transición suave en la vinculación, y se deben tapar los orificios de inyección teniendo en cuenta los posibles rechupes generados durante el curado del adhesivo.

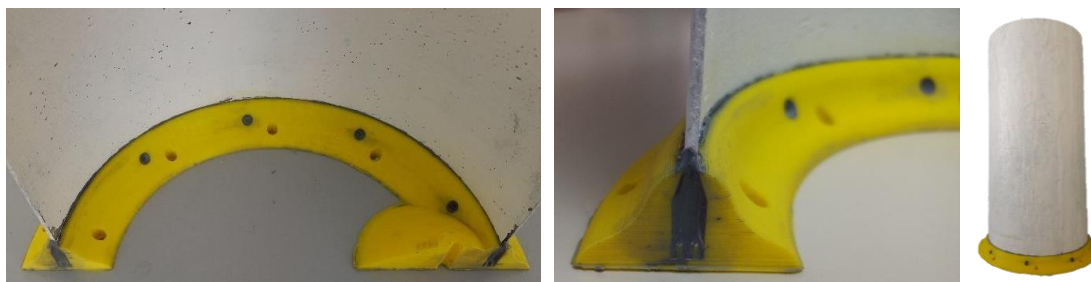


Figura 11: Vinculación final entre componentes.

Técnicas experimentales

Ensayo de tracción

Se descartaron algunos resultados del ensayo de tracción por varios motivos: inconvenientes de agarre durante el ensayo lo que se ve reflejado en la curva (donde se registró desplazamiento, pero no un aumento proporcional de carga), probetas que rompieron dentro del *tab* y cumplieron con el criterio de eliminación de datos mediante el método estadístico de Grubbs.

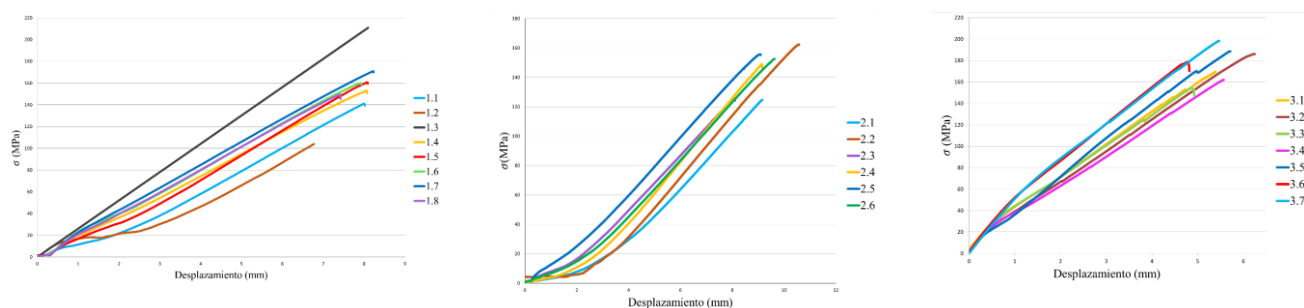


Figura 13: Curva tensión-desplazamiento de probetas impregnadas (izquierda), con falta de impregnación (centro), y con tratamiento térmico de post curado (derecha).

Probeta	Tensión de rotura (MPa)	Probeta	Tensión de rotura (MPa)	Probeta	Tensión de rotura (MPa)
1.1	140,98	2.1	124,77	3.1	169,62
1.4	153,06	2.3	125,66	3.2	186,12
1.5	160,74	2.4	148,96	3.5	188,47
1.6	159,95	2.5	155,65	3.6	178,68
1.7	170,90	2.6	152,54	3.7	198,28
1.8	149,44	-	-	-	-
Promedio	155,84	Promedio	141,52	Promedio	184,23
Desvío	10,36	Desvío	15,07	Desvío	10,76
Coefficiente de variación	6,65	Coefficiente de variación	10,65	Coefficiente de variación	5,84

Tabla 2: Resultados del ensayo de tracción para probetas impregnadas (izquierda), con falta de impregnación (centro), y con tratamiento térmico de post curado (derecha).

Las probetas impregnadas presentaron valores más homogéneos respecto a la tensión de rotura, con un valor promedio de 155,84 MPa y un coeficiente de variación de un 6,65%. En comparación con las probetas con falta de impregnación, esto

podría indicar que contienen menor cantidad de defectos (poros, exceso de resina, etc.) debido al bajo coeficiente de variación, hecho que además se podría relacionar con lo observado mediante microscopía óptica (se analiza a continuación). Asimismo, el valor promedio de tensión de rotura es más alto, por lo que se podría indicar que estas probetas presentan mejores prestaciones mecánicas.

Las probetas con falta de impregnación presentaron valores más heterogéneos respecto a la tensión de rotura, con un valor promedio de 141,52 MPa y un coeficiente de variación de un 10,65%, lo que podría implicar una menor uniformidad en el laminado y que el mismo se generó de manera incorrecta.

Finalmente, las probetas con tratamiento térmico de post curado presentaron valores más homogéneos respecto a la tensión de rotura, con un valor promedio de 184,23 MPa y un coeficiente de variación de un 5,84%. Respecto a las probetas impregnadas curadas a temperatura ambiente, se observó un aumento de 28 MPa aproximadamente respecto a los valores promedio, lo que podría indicar que estas probetas presentan mejores prestaciones mecánicas.

Observaciones mediante microscopía óptica

En las probetas con falta de impregnación, se estimó un contenido de poros de 14,18%, y en las probetas impregnadas 1,96%. Estos valores coinciden con los reportados por Mehdikhani et.al. y Abdelal et.al. Según estos autores, un alto contenido de poros disminuye las propiedades mecánicas (Mehdikhani et al., 2019; Abdelal&Donaldson, 2017), lo cual se podría asociar con los resultados obtenidos en el ensayo de tracción donde las probetas con falta de impregnación exhibieron un valor promedio de tensión de rotura menor en comparación con las probetas impregnadas. Por otra parte, en los retazos de los álabes, se estimó un bajo contenido de poros (3,16%).

EL-Wazerya et. al. estudiaron cómo variaban las propiedades mecánicas de un material compuesto en función del contenido de fibra, demostrando que a medida que aumenta mejoran las propiedades, y estableciendo que el contenido óptimo es del 60% (EL-Wazerya et al., 2017). En las probetas impregnadas, el contenido de fibra es más alto que en las probetas con falta de impregnación (52,02% y 46,20% respectivamente), lo que se podría asociar con los resultados obtenidos en el ensayo de tracción. En cambio, los retazos de los álabes presentan un contenido de resina alto (68,39%), lo que podría explicarse debido a la falta de utilización de film perforado durante la fabricación, el cual evita el exceso de resina.

Inclusión	% resina	% fibra	% poros
Probeta 1.1	47,98	52,02	1,96
Probeta 2.6	53,79	46,20	14,18
Retazos de los álabes	68,39	31,61	3,16

Tabla 3: Contenido estimado de fibra, resina y poros.

Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier

En la espectrometría de la muestra de la *resina epoxi*, se observan picos asociados al grupo oxirano, como el 915 cm^{-1} asignado al estiramiento asimétrico del enlace C-O del grupo funcional C-O-C del anillo oxirano, y el pico a 760 cm^{-1} que se asigna a la vibración rocking del enlace CH_2 (Pyun&Sung, 1991). También se asigna al anillo oxirano el pico de 863 cm^{-1} (Jaramillo et al., 2004; PerkinElmer, 2022).

Según la hoja de seguridad, el *endurecedor* está compuesto por isoforondiamina, entre otros. En la espectrometría de la muestra, se observan picos asociados a la amina primaria ($-\text{NH}_2$). Los picos 3172 cm^{-1} , 3283 cm^{-1} y 3345 cm^{-1} están asociados al estiramiento del enlace N-H (Karayannidou et al., 2006), y los picos entre 1570-1650 cm^{-1} asociados a la flexión del enlace N-H.

En la espectrometría de las muestras del sistema epoxi luego de 3 minutos y curado 7 días a T_{ambiente} , se observan picos asociados al *curado de las resinas epoxi*. Diversos investigadores utilizan el pico entre 910-916 cm^{-1} para hacer evaluaciones del curado de las resinas epoxi (Pyun&Sung, 1991; Jaramillo et al., 2004), y los picos entre 3055-3060 cm^{-1} (Nikolic et al., 2010; González et al., 2012).

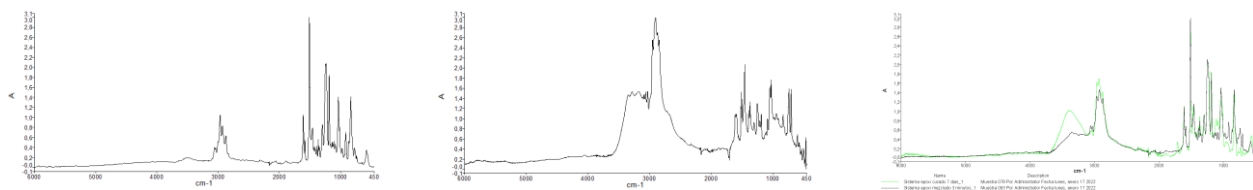


Figura 14: Espectro de la resina epoxi YD 128 (izquierda); endurecedor KH 816 (centro); sistema epoxi luego de 3 minutos, y luego de 7 días de curado a $T_{ambiente}$ (derecha).

Calorimetría Diferencial de Barrido

A excepción de las curvas DSC de las muestras curadas a $T_{ambiente}$ -7 días y a 60°C -1,5 hs, todas las curvas son resultado de un primer barrido. A partir de estas curvas, se hallaron los valores de T_g bajo distintos criterios.

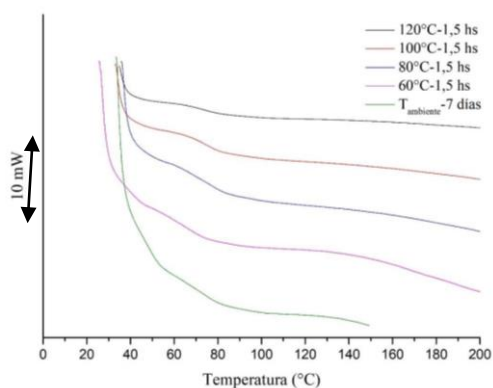


Figura 15: Curvas DSC obtenidas para las muestras curadas a $T_{ambiente}$ -7 días, 60°C -1,5 hs, 80°C -1,5 hs, 100°C -1,5 hs y 120°C -1,5 hs.

Tratamiento térmico	T_g onset ($^{\circ}\text{C}$)	T_g derivada primera ($^{\circ}\text{C}$)	T_g mid point ($^{\circ}\text{C}$)
120°C -1,5 hs	65,00	73,91	75,24
100°C -1,5 hs	69,51	76,16	76,62
80°C -1,5 hs	60,18	63,30	66,78
60°C -1,5 hs	41,92	44,76	46,41
T_{amb} -7 días	47,78	49,98	51,34

Tabla 4: Valores de T_g relevados bajo distintos criterios.

De estos criterios, se seleccionó la T_g onset tal como se describe en la guía para la certificación de aerogeneradores de Germanischer Lloyd, donde la T_g onset de la matriz y de los materiales de unión estructural debe ser superior a 65°C y también superior a la temperatura que se espera en el miembro estructural (GermanischerLloyd, 2010; Covestro, 2022). Comparando los valores de T_g onset para los tratamientos térmicos realizados durante 1,5 hs, se puede observar que a medida que aumenta la temperatura del tratamiento térmico aumenta el valor de la T_g , tal como lo observan los autores Morancho y Salla (Morancho&Salla, 1999). Asimismo, el valor de la T_g promedio (Tirado, 2012) fué de $67\pm 2^{\circ}\text{C}$, calculada a partir de los tratamientos térmicos realizados a 100°C -1,5 hs y 120°C -1,5 hs, en los cuales se alcanzaron porcentajes de curado total.

Tratamiento térmico	% Curado con línea de base Origin®	% Curado con método de Bandara
120°C-1,5 hs	≈100	≈100
100°C-1,5 hs	≈100	≈100
80°C-1,5 hs	92,92	94,78
60°C-1,5 hs	65,10	89,60
T _{amb} -7 días	84,34	-
Sist.epoxi 0 min	0	0

Tabla 5: Porcentajes de curado.

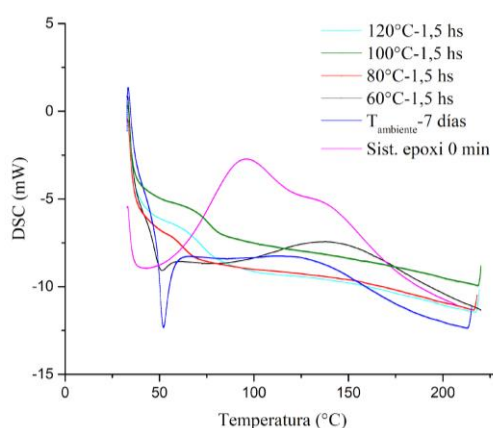


Figura 16: Curvas DSC obtenidas para las muestras curadas a T_{ambiente}-7 días, 60°C-1,5 hs, 80°C-1,5 hs, 100°C-1,5 hs y 120°C-1,5 hs; y muestra del sistema epoxi a tiempo 0.

Asimismo, los valores de T_{g onset} relevados para los tratamientos térmicos realizados durante 1,5 hs, son coherentes con los porcentajes de curado obtenidos, ya que a medida que aumenta el porcentaje de curado del material, mayor es el valor de la T_g (Ramis, 1994; Morancho&Salla, 1999; Camacho, 2016). Sin embargo, la muestra curada a 60°C exhibió porcentajes de curado diferentes. En este caso, se tomó como representativo el porcentaje obtenido mediante el método de Bandara, ya que el método de la línea de base en Origin® toma como línea de base una recta y esto hace que el AH_{residual} sea más grande subestimando así el porcentaje de curado. Finalmente, la muestra a T_{ambiente} no pudo ser procesada con el método de Bandara, ya que se produjeron inconvenientes técnicos durante el relevamiento de los resultados del ensayo DSC en el segundo barrido.

La muestra realizada según las recomendaciones de curado establecidas por el fabricante de la resina epoxi (T_{ambiente}-7 días), y los tratamientos realizados a 60°C-1,5 hs y 80°C-1,5 hs, no cumplen con el valor de T_g establecido por los estándares Germanischer Lloyd (T_{g onset} >65°C). En este caso se plantea la necesidad de realizar tratamientos de post curado por encima de la T_{g∞} (67±2°C) durante cierto tiempo ó extender los tiempos de los tratamientos térmicos para aumentar la T_g.

Conclusiones

A partir de este trabajo, se adquirió experiencia en la fabricación de álabes de aerogeneradores, se desarrollaron las capacidades del Laboratorio Perfil Alar y la División de Materiales Avanzados, y se realizó la puesta a punto del equipamiento utilizado.

En las simulaciones de materiales en Ansys Composite PrepPost, la observación de zonas de máximas y mínimas tensiones subraya la necesidad de mejorar la vinculación entre componentes. Asimismo, las simulaciones se realizaron con ciertas limitaciones, entre las cuales se destaca la falta de caracterización mecánica mínima del material fabricado; la falta de incorporación de piezas y otros, necesarios para la vinculación entre componentes del aerogenerador; y no se contemplaron las cargas dinámicas a las que está sometido el aerogenerador durante su rotación. Por ello, estos resultados no son

concluyentes respecto del comportamiento del material. No obstante, estas simulaciones demuestran ser una herramienta muy poderosa para comprender la respuesta estructural del dispositivo y mejorar la vinculación entre componentes.

Respecto a la fabricación de los álabes, los mejores resultados se obtuvieron con el procedimiento realizado en la laminación del álabe 2. Sin embargo, la superficie del álabe continuó exhibiendo imperfecciones. La recomendación principal es modificar el proceso de laminación utilizando un molde macho y hembra, para obtener una superficie más homogénea en el laminado. Asimismo, se vinculó de manera exitosa el álabe y el ensamble a partir del diseño y el procedimiento de aplicación del adhesivo propuesto.

Finalmente, en relación a los ensayos realizados se destaca que las probetas con tratamiento térmico de post curado presentaron el valor promedio de tensión de rotura más alto (184,23 MPa). Estas probetas exhibieron un aumento del 18% aproximadamente respecto al valor promedio de tensión de rotura registrado para las probetas impregnadas curadas a temperatura ambiente (155,84 MPa), lo que implica una mejora de las prestaciones mecánicas del material bajo el tratamiento térmico propuesto.

Mediante las observaciones por microscopía óptica, se estimó un alto contenido de poros en las probetas con falta de impregnación (14,18%) y un bajo contenido de fibra (46,20%), en relación a las probetas impregnadas (1,96% y 52,02%, respectivamente). Este hecho se relacionó con los valores promedio de tensión de rotura hallados en el ensayo de tracción. En los retazos de los álabes el contenido de poros fue bajo (3,16%), no así el contenido de resina (68,39%).

Por último, se empleó la técnica de DSC para obtener los valores de T_g del sistema epoxi sometido a diversos tratamientos térmicos y distintos criterios, de los cuales se seleccionó la T_g *onset* acorde con la guía para la certificación de aerogeneradores de Germanischer Lloyd. En la fabricación de los álabes, se siguieron las recomendaciones de curado provistas por el fabricante ($T_{\text{ambiente}}-7$ días). Sin embargo, este tratamiento en conjunto con los realizados a $60^{\circ}\text{C}-1,5$ hs y $80^{\circ}\text{C}-1,5$ hs, no cumplieron con los estándares, por lo que se plantea la necesidad de realizar tratamientos de post curado por encima de la T_g durante cierto tiempo ó extender los tiempos de los tratamientos térmicos para aumentar la T_g .

Referencias

- Abdelal, N., & Donaldson, S.L. (2017). Comparison of methods for the characterization of voids in glass fiber composites. *Journal of composite materials*, 1-15.
- Albanesi, A., et al. (2017). Application of the inverse finite element method to design wind turbine blades. *Composite Structures*, 161, 160-172.
- ArgentinaGob. (2020). Generación Distribuida de Energías Renovables. <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/generacion-distribuida>
- ASTM. (2014). E1356 – 08 Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperatures by Differential Scanning Calorimetry-10. Procedure.
- Balcioğlu, H.E., Sakin, R., & Gun, H. (2018). Development of fixed end type flexural fatigue test machine and static and dynamic behaviour of glass/epoxy laminated composite. En IV. International Ege Composite Materials Symposium - KOMPEGE 2018.
- Bandara, U. (1986). A systematic solution to the problem of sample background correction in DSC curves. *Journal of Thermal Analysis*, 1063-1071.
- Brøndsted, P., & Nijssen, R.P.L. (2013). *Advances in wind turbine blade design and materials*. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 47.
- Camacho, J.R.S. (2016). Estudio del efecto de la temperatura de curado en las propiedades mecánicas de un material compuesto fibroso. Proyecto Fin de Carrera Ingeniería Industrial, Universidad de Sevilla.
- Chawla, K. K. (2012). *Composite Materials. Science and Engineering*. Third Edition. Springer.
- Covestro. (2022). Covestro polyurethane resin composites: an easy choice for wind turbine blades. <https://solutions.covestro.com/en/highlights/articles/stories/2020/covestro-polyurethane-solutions-easy-choice-wind-turbine-rotor-blades>.

El-Wazerya, M.S., EL-Elamy, M. I., & Zoalfakar, S.H. (2017). Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 14(3), 121-131.

Germanischer Lloyd. (2010). *Guideline for the Certification of Wind Turbines*. Hamburg: Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH.

Ghoneam, S.M., Hamada, A.A., & Sherif, T.S. (2021). Dynamic Analysis of the Optimized Savonius Vertical Axis Wind Turbine Composite Blades. *J. Sol. Energy Eng.*, 143(5).

González, María González, Cabanelas, Juan Carlos, & Baselga, Juan. (2012). Applications of FTIR on Epoxy Resins - Identification, Monitoring the Curing Process, Phase Separation and Water Uptake. In Theophile Theophanides (Ed.), *Infrared Spectroscopy - Materials Science, Engineering and Technology* (pp. 261-284).

Jaramillo, Isaac, et al. (2004). ESTUDIO DEL CURADO DE RESINAS EPÓXICAS EMPLEANDO ESPECTROSCOPIA INFRARROJA. *Dyna*, 67-80.

Karayannidou, G., Evrikleia, S., AchiliasIrini, Dimitris, & D. Sideridou. (2006). Cure kinetics of epoxy-amine resins used in the restoration of works of art from glass or ceramic. *European Polymer Journal*, 42(12), 3311-3323.

Mehdikhani, M., et al. (2019). Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance. *Journal of Composite Materials*, 1579-1669.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). *MAYDS. Segunda Contribución Determinada a Nivel Nacional de la República Argentina*. Argentina.

Mishnaevsky, L.J., et al. (2017). Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. *Materials*, 10(1285), 1-24.

Montes, L.M.R. (2020). Valoración de criterios de fallo de una lámina de material compuesto en base a los resultados del World Wide Failure Exercise. *Universidad de Sevilla*.

Morancho, J.M., & Salla, J.M. (1999). Relaxation in partially cured samples of an epoxy resin and of the same resin modified with a carboxyl-terminated rubber Polymer. *Elsevier*, 40, 2821-2828.

Nikolic, Goran, et al. (2010). Fast Fourier Transform IR Characterization of Epoxy GY Systems Crosslinked with Aliphatic and Cycloaliphatic EH Polyamine Adducts. *Sensors*, 684-696.

PerkinElmer. (2022). Spectrum Two FT-IR Spectrometer. <https://www.perkinelmer.com/es/product/spectrum-two-ft-ir-sp10-software-l160000a>.

Priya, I.M., & Senthil, R. (2020). Mechanical behavior of biaxial non-crimp glass fiber reinforced polymer composite. *Manufacturing and Mechanical Engineering for Sustainable Developments*.

Pyun, E., & Sung, C. S. P. (1991). Network structure in diamine-cured tetrafunctional epoxy by UV-visible and fluorescence spectroscopy. *Macromolecules*, 24(4), 855-861.

Ramis, J. X. (1994). Estudio de la eficiencia de sistemas químicos del curado de resinas de poliéster insaturado. *Universidad Politecnica de Cataluña*.

Ruiz, D.G. (2019). Estudio mediante elementos finitos del sistema de suspensión de un autobús fabricado con material compuesto. *Universidad Pública de Navarra*.

Tacca, E.A., & Spies, L.D. (2016). Diseño y Fabricación de una Turbina Eólica de Eje Vertical Impulsada por Drag. *RTyC*, 32.

Tirado, Marta Sánchez-Cabezudo. (2012). Influencia de la adición de poliacetato de vinilo y nanopartículas de Silicato en el comportamiento de un termoestable epoxídico. Tesis doctoral, *Universidad Politecnica de Madrid*.