

# PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ÁLABES DE AEROGENERADORES DE RESINA EPÓXICA Y NANOCELULOSA

Fecha enviada: 2 julio 2022

Fecha corregida: 15 agosto 2022

MSC. Ing. Jorge Cifuentes<sup>1</sup>, Ing. Gabriela Álvarez<sup>2</sup>

## RESUMEN

Este estudio experimental propone la mejora de las propiedades mecánicas de los álabes de aerogeneradores de pequeña y mediana potencia con nanocelulosa y resina epóxica, es un tema propuesto con la utilización de diferentes materiales compuestos. Determinar las diferentes propiedades mecánicas de las aspas elaborados con resina epóxica y diferentes porcentajes de nanocelulosa. Por medio de ensayos destructivos se realizaron análisis para comparar las propiedades mecánicas que aportan los nanobiocompuestos y la resina epóxica. Obteniendo como resultado, la incidencia positiva en la fabricación de las aspas de aerogeneradores fabricadas con nanocelulosa y resina epóxica.

Se determina que la mezcla óptima para la fabricación de aspas de aerogeneradores es de 0.25% de nanocelulosa en peso con respecto a la resina epóxica.

**Palabras clave:** Álabes, Nanobiocompuestos, Nanocelulosa, Resina epóxica, Propiedades mecánicas.

## INTRODUCCIÓN

Se realizó esta investigación para mejorar las propiedades mecánicas de los álabes para aprovechar de mejor manera la velocidad cinética del viento y aumentar la vida útil de los mismos. Por medio del estudio de álabes fabricados con nanobiocompuestos de nanocelulosa y resina epóxica se pretende mejorar en un porcentaje significativo las propiedades mecánicas tales como la resistencia, la dureza, el módulo de elasticidad y

This experimental study proposes to improve the mechanical properties of small and medium power wind turbine blades with nanocellulose and epoxy resin is a proposed topic with the use of different composite materials. Determine the different mechanical properties of the blades made with epoxy resin and different percentages of nanocellulose. Through destructive tests, analyzes were performed to compare the mechanical properties of nanobiocomposites and epoxy resin. Obtaining as a result the positive incidence in the manufacture of the wind turbine blades made with nanocellulose and epoxy resin.

It is determined that the optimal mixture for the manufacture of wind turbine blades is 0.25% nano cellulose by weight to the epoxy resin.

**Keywords:** Blades, Nanobiocomposites, Nanocellulose, Epoxy resin, Mechanical properties

otras; esto se debe a que la resina epóxica en combinación con nanobiocompuestos de

nanocelulosa poseen propiedades específicas mejoradas, además de la manipulación de las mismas por medio de la nanotecnología. Utilizar un material orgánico como es la nanocelulosa de desechos de paja como aditivo.

---

<sup>1</sup> Ingeniero Mecánico, Ingeniera Gabriela Álvarez, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de San Carlos de Guatemala. [jjcifuentes@ing.usac.edu.gt](mailto:jjcifuentes@ing.usac.edu.gt)

<sup>2</sup> Ingeniera Mecánica de Unidad de Investigación, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Fecha enviada: 2 julio 2022

Fecha corregida: 15 agosto 2022

Se determinó que un porcentaje de 0.25 % de nanocelulosa en peso con epóxico mejora las propiedades mecánicas del biocompuesto y mejorara así las palas de los aerogeneradores fabricados con esta composición.

### METODOLOGÍA

Se realiza una investigación bibliográfica para desarrollar inicialmente la sección teórica del estudio para identificar conceptos y categorías importantes.

Seguidamente se utilizó el método experimental, para realizar la extracción de nanocelulosa por medio del procedimiento descrito por Camacho Elizondo y José Vega en su artículo científico "Uso de nanomateriales en polímeros para la obtención de bio-empaques en aplicaciones alimentarias".

### MARCO CONCEPTUAL

#### Nanobiocompuestos

Un compuesto es la mezcla o la unión entre diferentes elementos químicamente enlazados en proporciones definidas, estos elementos se encuentran representados en la tabla periódica. Los nanocompuestos son desarrollados con nanotecnología para poder mejorar sus propiedades mecánicas y térmicas. Suelen caracterizarse porque una de las dimensiones de las partículas se encuentra en rango de nanómetros. Los nano compuestos pueden definirse de la siguiente forma: "Es un material híbrido que consiste en una matriz biopolimérica reforzado con una fibra, una plaqueta o partícula que tiene una dimensión en la escala nanométrica. Debido a las partículas de tamaño nanométrico y dispersas en la matriz biopolimérica, estos nanobiocompuestos exhiben una notable mejora en las propiedades mecánicas, térmicas, ópticas y fisicoquímicas en comparación con el polímero puro o los convencionales (microscópico). Esas mejoras incluyen, por ejemplo, el aumento de módulos de elasticidad, fuerza y resistencia al calor, y la disminución de la permeabilidad a los gases y a

la inflamabilidad" (Camacho Elizondo, Vega Baudrit, & Campos Gallo, Uso de nanomateriales en polímeros para la obtención de bioempaques en aplicaciones alimentarias., 2011).

#### Nanocelulosa

La celulosa es un material que la naturaleza sintetiza, es el biopolímero más abundante en la naturaleza. Es parte de la estructura de las plantas, algas y algunos animales marinos. Algunas bacterias son capaces de sintetizarla. La celulosa contiene partes amorfas, mediante un proceso de síntesis y posterior polimerización se separan las partes amorfas de las cristalinas. Las partes ordenadas de forma cristalina aisladas se conocen como nanocelulosa. Tiene forma de prisma rectangular, con longitudes desde 10 nm hasta 200 nm y de ancho de 3 nm a 50 nm. Entre sus propiedades se puede destacar su alto grado de polimerización, creando interacciones fuertes y regulares entre cadenas y fibras. Es un material que interactúa con los tejidos vivos de forma segura, pues la naturaleza lo sintetiza a gran escala, es biodegradable y puede ser reciclado (Castro Guerrero & Delgado Arroyo, 2016).

La celulosa es un componente de fibras vegetales, que contienen células vegetales, representando a la celulosa. La nanocelulosa es la derivación de procesos químicos a los que se somete la celulosa; tiene diversas aplicaciones, entre ellas se encuentra el uso como refuerzo y/o barrera de distintos polímeros, nanopapel, nanofiltros, implantes médicos; aplicaciones con especificaciones como: alta transparencia, baja expansión térmica y alta resistencia, entre otras. La nanocelulosa presenta muchas ventajas debido a que, los materiales que están fabricados a base de nanocelulosa pueden ser más fuertes que el acero, ligeros, conductores, no tóxicos, altamente absorbentes, versátil con aplicaciones en cosméticos y productos

# PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ÁLABES DE AEROGENERADORES DE RESINA EPÓXICA Y NANOCELULOSA

Fecha enviada: 2 julio 2022

farmacéuticos, películas y recubrimientos de barrera, tratamiento de aguas, electrónicos y más.

## Propiedades

- Alto grado de polimerización, interacciones fuertes y regulares entre cadenas y organización de las fibras.
- Es un material que interactúa con los tejidos vivos de forma segura.
- Biodegradable.
- Reciclable

## Resina epóxica

Las resinas epóxicas datan del año de 1909, son prepolímeros de bajo peso molecular que contienen un grupo funcional epóxido u oxirano. Son termofraguables que se endurecen bajo la acción de agentes de curado por lo que no se funden. Se combinan con compuestos con grupos amino, hidroxilo, carboxilo y ácidos inorgánicos para obtener polímeros termoestables con alta resistencia química. Las resinas curadas cuentan con propiedades como: resistencia química, adherencia a diversos sustratos, alta resistencia a tracción, compresión y flexión, baja contracción en el proceso de curado, excelentes propiedades de aislamiento eléctrico y retención de propiedades durante el envejecimiento o exposición a ambientes difíciles, resistencia a la corrosión, alto grado de resistencia al desgaste físico, capacidad para ser curadas en amplio rango de temperaturas y tenacidad (Romero Zúñiga, 2019).

Las resinas epóxicas son el producto de reacciones químicas del petróleo, presentadas en forma de sólidos o líquidos con un grado de viscosidad elevado. Generalmente las resinas epóxicas son usadas como matrices para materiales compuestos, por sí solas las resinas epóxicas son solubles y fusibles; capaces de reaccionar con endurecedores o agentes de curado para originar estructuras muy reticuladas, insolubles, infusibles, con excelente resistencia a ácidos, bases y disolventes y con altísimas prestaciones mecánicas. Las aplicaciones

Fecha corregida: 15 agosto 2022

de las resinas se dan en diferentes sectores: transporte, industria química, campo eléctrico, aeronáutica, aeroespacial, materiales, tecnología.

Entre las principales propiedades se encuentran las siguientes: Alto índice resistencia mecánica, resistencia química y térmica, aislamiento eléctrico, resistencia a la abrasión, humedad y fluidos corrosivos. Existen diversas áreas de la industria en las que se involucra la resina epóxica, entre ellas se puede mencionar: fabricación de pinturas, materiales compuestos, materiales náuticos, adhesivos, materiales para sistemas eléctricos y electrónicos, entre otras.

## Aerogenerador

Los aerogeneradores son también conocidos como turbinas eólicas. Las turbinas eólicas son dispositivos que aprovechan la energía cinética generada por el viento y la convierten en energía mecánica. Por medio del movimiento de un eje, acoplado a la hélice, se conecta un generador produciendo energía eléctrica. En el caso de la generación de hasta 10 kilovoltios se utilizan imanes permanentes de neodimio diseñados para ser acoplados a turbinas eólicas y conexión directa entre el rotor y generador, los cuales mejoran la eficiencia de la conversión de energía mecánica en energía eléctrica.

### Turbina eólica de uso residencial

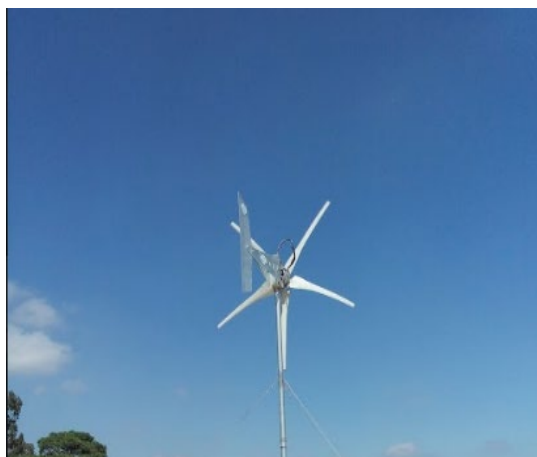


Imagen 1. (Turbina eólica 1700W, Mixco, Guatemala)

Fecha enviada: 2 julio 2022

Fecha corregida: 15 agosto 2022

### Álabes de aerogenerador

Los álabes o palas se diseñan siguiendo el mismo perfil aerodinámico del ala de un avión, al incidir el viento perpendicularmente a su posición de diseño, se genera una fuerza de sustentación que provoca el movimiento. Esta energía entonces se traslada al buje para mover el generador.

Un aerogenerador tiene como función principal, transformar la energía cinética de la velocidad del viento en energía eléctrica, sin utilizar otros recursos más que el viento; esta producción de energía se realiza por medio de la energía mecánica de la rotación de los álabes. El viento circula en ambas caras de los álabes con diferentes perfiles geométricos, genera un área de depresión en la cara superior con respecto a la presión.

Seguido de esta presión se genera fuerza de resistencia que se opone al movimiento, generando fuerza en el rotor por medio de la energía cinética. Los álabes de las turbinas son elementales para la generación de energía eléctrica, debido a que son los encargados en recibir la energía del viento por medio de la velocidad.

### Función de álabes:

Su función es resistir cargas elevadas; reciben la energía del viento, la capturan y realizan la conversión de rotación en el buje de la turbina, emplean el principio de fuerza de empuje actuando debajo del álabe, el aire produce una sobrepresión en la parte inferior y un vacío en la parte superior. Esta provoca una fuerza de empuje que hace que el rotor rote convirtiendo así la energía cinética del viento a energía eléctrica.

### Materiales de álabes actuales:

La fabricación de los álabes es muy importante. Dependiendo de los materiales utilizados, así será la vida útil y la eficiencia. En la antigüedad se utilizaban materiales como madera, acero y aluminio.

Actualmente se fabrican con los materiales compuestos: aleaciones de acero, nylon 6, poliéster o resina epóxica reforzados con fibra de vidrio o fibra de carbón, deben ser de bajo peso y tener un comportamiento mecánico adecuado.

### Propiedades mecánicas

Son atributos correspondientes a los materiales; las propiedades mecánicas suelen presentarse en los materiales cuando son sometidos a la aplicación de fuerza exterior. Las propiedades mecánicas hacen énfasis a la capacidad de estos a resistir cargas momentáneas, cargas cíclicas, choques, dureza, fluencia.

Los álabes de los aerogeneradores son sometidos a diferentes cargas: cargas variables, cíclicas, momentáneas, entre otras; por ello deben presentar propiedades específicas para poder realizar la generación de energía eléctrica de forma eficiente. Entre estas propiedades se presentan por la dureza y resistencia.

**Dureza:** La dureza es una propiedad mecánica en la que un cuerpo tiene resistencia superficial a la deformación. Esta propiedad no se encuentra entre la clasificación fundamental de los materiales sin embargo a partir de ella, se puede obtener información útil como resistencia al desgaste, composición, dificultad de mecanizado, influencia de tratamientos térmicos o mecánicos, entre otras.

El procedimiento ensayos de dureza son diversos, sencillos y rápidos. Estos procedimientos miden la dureza siendo el signo de dureza la letra H. Aunque dependiendo del estudio se agregará la letra inicial del ensayo de dureza realizado, por ejemplo: Dureza de Vickers (HV), Dureza de Brinell (HB), Dureza de Rockwell.

**Resistencia:** La resistencia es la propiedad que poseen los cuerpos de realizar un esfuerzo de oponerse a la acción de fuerzas externas. Los tres esfuerzos básicos en los que se involucra la resistencia son: compresión, tensión y cortante.

# PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ÁLABES DE AEROGENERADORES DE RESINA EPÓXICA Y NANOCELULOSA

Fecha enviada: 2 julio 2022

**Esfuerzo a tracción:** Cuando un cuerpo está sometido a una o varias fuerzas externas, se dice que el cuerpo está bajo un esfuerzo.

El esfuerzo de tracción es el producto de someter un cuerpo, una estructura o una probeta; a dos fuerzas o cargas en sentidos opuestos partiendo desde un eje en común, generando así una deformación por alargamiento en dicho cuerpo.

**Esfuerzo a compresión:** El esfuerzo a compresión se genera cuando un cuerpo está sometido a dos fuerzas o cargas en sentido opuesto que tiende a deformar su estructura en forma de compresión o aplastamiento.

**Esfuerzo flexor:** El esfuerzo flexor es producto de aplicar a un cuerpo cargas que lo deformaran en forma curva y definitivamente. Este esfuerzo tiende a presentar deformaciones permanentes en los cuerpos experimentales.

**Esfuerzo Torsor:** El esfuerzo torsor es producto de aplicar a un cuerpo un momento sobre su eje longitudinal, produciendo una rotación sobre el mismo que lo deformaran en forma de torcedura.

## MÉTODO EXPERIMENTAL

Se realiza la extracción de nanocelulosa por medio del método descrito por Camacho Elizondo y José Vega en su artículo científico "Uso de nanomateriales en polímeros para la obtención de bioempaques en aplicaciones alimentarias".

### Pasos para obtención de nanocelulosa

Fecha corregida: 15 agosto 2022

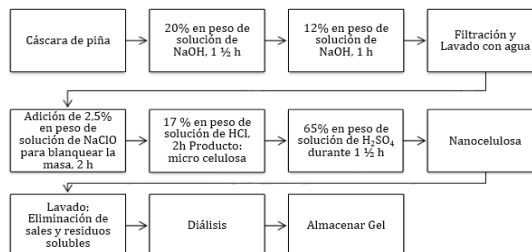


Figura 1 (Camacho Elizondo, y otros, 2017)

Utilizando como biomasa la cascara de piña, siguiendo la metodología descrita por el artículo mencionado con anterioridad; se procede a mezclar la resina epóxica con nanocelulosa con porcentajes experimentales seleccionados los cuales fueron de 0 %, 0.25%, 0.5%, 1%, 2.5%, 5% y 10%. Agregando por último el catalizador de la resina epóxica.

### Proceso de mezcla en el laboratorio y llenado de moldes



Imagen 2. Fuente: CeNAT. Laboratorio Nacional de nanotecnología. Lanotec.

Se realizan los ensayos en el Laboratorio Nacional de Nanotecnología de Costa Rica en un reómetro marca

Discovery HR, posteriormente se realizan pruebas en el Centro de investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Con el objetivo de demostrar la mejora de las propiedades mecánicas de aspas de

Fecha enviada: 2 julio 2022

Fecha corregida: 15 agosto 2022

aerogeneradores. Posteriormente se realiza un análisis objetivo de la incidencia que tiene el mejoramiento de las propiedades mecánicas de aspas de aerogeneradores fabricados con nanobiocompuestos de nanocelulosa y resina epóxica.

### RESULTADOS

Los siguientes gráficos muestran las mediciones obtenidas en cada propiedad con respecto al porcentaje de nanocelulosa presente en la composición:

#### Resultados de tensión con respecto al % de nanocelulosa



Gráfico 1. Fuente: Elaboración propia.

#### Resultados de compresión con respecto al % de nanocelulosa

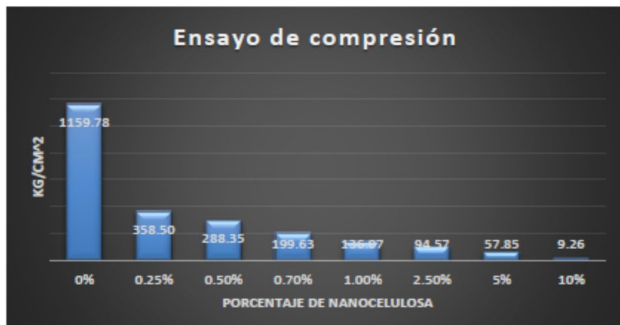


Gráfico 2. Fuente: Elaboración propia.

#### Resultados de dureza con respecto al % de nanocelulosa



Gráfico 3. Fuente: Elaboración propia.

#### Resultados de flexión con respecto al % de nanocelulosa



Gráfico 4. Fuente: Elaboración propia.

#### Resultados de torsión con respecto al % de nanocelulosa



Gráfico 5. Fuente: Elaboración propia.

# PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ÁLABES DE AEROGENERADORES DE RESINA EPÓXICA Y NANOCELULOSA

Fecha enviada: 2 julio 2022

Fecha corregida: 15 agosto 2022

## CONCLUSIONES

Se puede observar en gráficas de resultados la incidencia positiva de adición de nanocelulosa a resina epóxica. Se concluye que los resultados fueron satisfactorios; aunque se debe mencionar que el índice de mejora inicia desde la adición de 0.25% hasta un 1% de nanocelulosa; cuando el porcentaje de nanocelulosa se aumenta se observa que las propiedades mecánicas disminuyen hasta llegar al punto de fragilidad del material.

El uso de nanocompuestos es importante; en este estudio se demuestra que la adición de nanocelulosa como material de refuerzo a matrices poliméricas muestra un resultado positivo, haciendo las aspas de aerogeneradores más aptas para la ejecución de generación energética.

Las mejores propiedades mecánicas como son resistencia a la tensión, dureza y flexión para fabricar aspas de turbinas eólicas se obtienen con un 0.25 % de nanocelulosa a la resina epóxica.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento parcial del estudio a la Dirección General de Investigación (DIGI), Universidad de San Carlos de Guatemala. Se agradece la colaboración, ayuda y a poyo al Laboratorio Nacional de nanotecnología, LANOTEC, Costa Rica y a la Unidad de Investigación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

## REFERENCIAS

- Acevedo, J., Cortez, D., Sáenz Rodríguez, J., de Paz, N., Melgar, W., Peralta, G., & Cifuentes, J. (s.f.). *Tribología, Nanotribología y AFM (Microscopio de Fuerzas Atómicas)*.  
Obtenido de [www.academia.edu](http://www.academia.edu):  
[https://www.academia.edu/34822551/MIM\\_ARTICULO\\_REVISTA\\_2\\_Tribolog%C3%ADa\\_y\\_AFM\\_Microscopio\\_de\\_Fuerzas\\_At%C3%B3micas](https://www.academia.edu/34822551/MIM_ARTICULO_REVISTA_2_Tribolog%C3%ADa_y_AFM_Microscopio_de_Fuerzas_At%C3%B3micas)
- Brøndsted, P., Lilholt, H., & Lystrup, A. (2005). Composite Materials For Wind Power Turbine Blades. *Annual Review or Materials Research*, 505-538.
- Camacho Elizondo, M., Corrales Ureña, Y. R., Lopretti Correa, M., Bustamante Carballo, L., Moreno, G., Alfaro, B., & Vega Braudrit, J. (2017). Synthesis and Characterization of Nanocrystalline Cellulose Derived from Pineapple Peel Residues. *Journal of Renewable Materials*.
- Camacho Elizondo, M., Vega Baudrit, J., & Campos Gallo, A. (2011). Uso de nanomateriales en polímeros para la obtención de bioempaques en aplicaciones alimentarias. *Revista de la Sociedad Química del Perú*.
- Castro Guerrero, C., & Delgado Arroyo, F. (Febrero de 2016). *La nanocelulos: propiedades y aplicaciones*. Obtenido de Ineel.mx: <https://www.ineel.mx/boletin022016/divulga.pdf>
- Cervera Ruiz, M., & Blanco Díaz, E. (2015). *Resistencia de Materiales*. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería.

Fecha enviada: 2 julio 2022

Fecha corregida: 15 agosto 2022

Iberdrola. (s.f.). *Iberdrola.com*. Obtenido de Palas de aerogeneradores:

<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/palas-aerogeneradores>

Romero Zúñiga, G. Y. (Agosto de 2019).

*ciqa.repositorioinstitucional.mx*. Obtenido de Preparación de nanocompuestos a base de resina epóxica y óxido de grafeno modificado, y estudio de sus propiedades mecánicas y de memoria de forma:

<https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/604/1/Tesis%20MTP%20Gabriela%20Yolotzin%20Romero%2019%20sep%202019.pdf>

(s.f.). *Turbina eólica 1700W, Mixco, Guatemala*. Engineering, Kavic, Mixco, Guatemala.

Cifuentes Castillo, J. I., Lobo, R., Morales Garcia, H. J., Chuquiej García, B. W., & Granados, W.

A. (2016). *Revista de Ingeniería Mecánica* No. 1.

Cifuentes, J. I. FRICTION REDUCTION AND WEAR RESISTANCE ENHANCEMENT OF ALUMINUM/EPOXY COMPOSITES.

Fernández Guerrero, I. (2015). Estudio del comportamiento en rotura de un material metálico dúctil: aspectos experimentales y numéricos. Tesis Doctoral

Kim, H. J., Jung, D. H., Jung, I. H., Cifuentes, J. I., Rhee, K. Y., & Hui, D. (2012). Enhancement of mechanical

properties of aluminium/epoxy composites with silane functionalization of aluminium powder. *Composites Part B: Engineering*, 43(4), 1743-1748.

Mejias Sánchez, Y., Cabrera Cruz, N., Toledo Fernández, A. M., & Duany Machado, O. J. (2009). La

nanotecnología y sus posibilidades de aplicación en el campo científico-tecnológico. *Revista Cubana de Salud Pública*, 35.

Nilsson, K. F., Blagoeva, D., & Moretto, P. (2006). An experimental and numerical analysis to correlate variation

in ductility to defects and microstructure in ductile cast iron components. *Engineering fracture mechanics*, 73(9), 1133-1157.

Payán, J. V. (2016). Revolución de bionanomateriales: nanocelulosa a la vista. *Tecnoacademia: Revista de divulgación juvenil*, 1(1), 54-57.

Storti, B., Peralta, I., Carengo, S., & Albanesi, A. (2013). Aerodinámica de turbinas eólicas de baja potencia. In

XXXII Congreso de Métodos Numéricos y sus Aplicaciones ENIEF.