

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTÍN  
COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA  
INSTITUTO DE TECNOLOGÍA  
“Prof. Jorge A. Sabato”**

**Desarrollo de álabes en aerogeneradores de eje  
horizontal de baja potencia, empleando materiales  
compuestos (\*)**

**Por Ing. María Julieta Ganiele**

**Directores**

**Dr. Lucio Ponzoni  
Mag. Manuel Moreno.**

**(\*) Tesis para optar por el título de Magíster en Ciencia y Tecnología de Materiales**

**República Argentina**

**2022**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis directores, Dr. Lucio Ponzoni y Mg. Manuel Moreno, y al Mg. Nicolás Daverio, por haber puesto todo su conocimiento y experiencia en guiarme en la realización de este trabajo tan amplio e interdisciplinario.

Al personal del laboratorio del proyecto Antena Radar de Apertura Sintética (ARAS) del Centro Atómico Constituyentes, en especial a Sebastián Otero, que nos recibió con las puertas abiertas, buena predisposición, nos acompañó con gran entusiasmo y entendimiento de todos los procesos realizados.

A la División de Materiales Avanzados en general, que siempre nos abrió las puertas para trabajar en lo que necesitábamos y a agradecerles enormemente a sus integrantes que nos brindaron todos sus conocimientos.

Al Ing. Daniel Arcone de la División de Materiales Avanzados, no sólo por su colaboración con los cálculos del ensayo DSC, sino también por sus consejos y ponerse a disposición siempre que lo necesitamos.

A Esp. Ricardo Montero del área de microscopía, agradecerle por su paciencia, su tiempo y buena predisposición.

Al Mg. Augusto Toro, por ayudarnos con la preparación de las muestras para microscopía.

Al Ing. Matías Szarko del Centro Atómico Ezeiza, por abrirnos las puertas para realizar los ensayos de DSC, brindarnos su tiempo y por su buena predisposición.

Al Ing. Esteban Maita y el Mg. Sebastián Percossi, por su colaboración en los tratamientos térmicos de muestras para el ensayo DSC.

A la Comisión Nacional de Energía Atómica, la Universidad Nacional de General San Martín y al Instituto de Tecnología “Profesor Jorge A. Sabato” por haberme otorgado la beca que me permitió continuar mi formación académica.

A mis compañeros y compañeras de maestría por todos los gratos momentos compartidos durante todo este tiempo, en especial a mi querida amiga la Ing. Sara Montenegro por su acompañamiento en el proceso de realización de este trabajo.

A mi familia y amigos, en especial a Noemí, Miguel, Soledad, Nieves, Pablo y Joaquín, por su apoyo incondicional durante estos 3 años, los cuales me motivaron continuamente a seguir y cumplir el objetivo.

## 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 claves: *Energía eólica, aerodinámica, aerogeneradores de eje horizontal, álabes, materiales compuestos, laminación manual.*

## ABSTRAC

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.

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

## **PRESENTACIONES EN CONGRESOS**

III JORNADAS INTERNACIONALES Y V NACIONALES DE AMBIENTE 2021- Buenos Aires:

- “Estudio de perfiles alares para aerogeneradores horizontales de baja potencia”. Autores: María J. Ganiele, Paula Nicoletti, Andrea F. Villanueva, Sara O. Montenegro, Sergio D. Lingeri, Daniel C. Anello, Luciana Quinteros, Lucio M. E. Ponzoni.

15° ENCUENTRO DEL CENTRO INTERNACIONAL DE CIENCIAS DE LA TIERRA 2020- Buenos Aires:

- “Estudio de perfiles alares para micro-aerogeneradores HAWT a bajo número de Reynolds”. Autores: María Julieta Ganiele; Lucio M. E. Ponzoni; Sara O. Montenegro; Paula Nicoletti; Andrea Villanueva; Sergio Lingeri; Daniel Anello.

## **PUBLICACIONES**

Revista Ciencia y Tecnología N°21 – Revista Argentina de la Facultad de Ingeniería de Palermo

(Online ISSN 2344-9217). Año 2021.

- Perfiles de microaerogeneradores HAWT a bajo número de Reynolds  
Autores: M. Julieta Ganiele, Paula Nicoletti; Andrea F. Villanueva; Sara O. Montenegro; Sergio D. Lingeri; Daniel C. Anello; Lucio M. E. Ponzoni.

Revista INNOVA séptima edición – Revista Argentina de Ciencia y Tecnología de la Facultad Nacional de Tres de Febrero. (ISSN 2618-1894). Año 2021.

- Diseño y Simulación de Perfiles de Aerogeneradores Horizontales a Bajo Número de Reynolds  
Autores: M. Julieta Ganiele; Paula Nicoletti; Andrea F. Villanueva; Sara O. Montenegro; Sergio D. Lingeri; Daniel C. Anello; Lucio M. E. Ponzoni; Melanie Melo.

## ÍNDICE

|         |                                                                            |    |
|---------|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 1       | INTRODUCCIÓN .....                                                         | 1  |
| 2       | FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....                                                 | 2  |
| 2.1     | Conceptos elementales dinámica de fluidos.....                             | 2  |
| 2.1.1   | Número de Mach .....                                                       | 2  |
| 2.1.2   | Viscosidad .....                                                           | 2  |
| 2.1.3   | Número de Reynolds .....                                                   | 3  |
| 2.1.4   | Fuerzas aerodinámicas.....                                                 | 3  |
| 2.1.5   | Entrada en pérdida.....                                                    | 4  |
| 2.2     | Introducción al funcionamiento de un aerogenerador de eje horizontal ..... | 4  |
| 2.2.1   | Aerogenerador .....                                                        | 5  |
| 2.2.2   | Funcionamiento aerogenerador .....                                         | 6  |
| 2.2.3   | Parámetros de la energía eólica.....                                       | 6  |
| 2.3     | Álabes en aerogeneradores de eje horizontal de baja potencia .....         | 7  |
| 2.3.1   | Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra .....      | 8  |
| 2.3.1.1 | Refuerzos fibras.....                                                      | 8  |
| 2.3.1.2 | Matriz polimérica .....                                                    | 9  |
| 2.3.2   | Técnicas de fabricación a pequeña escala .....                             | 11 |
| 2.3.2.1 | Laminación manual .....                                                    | 12 |
| 2.3.2.2 | Laminación Manual con compactación por vacío .....                         | 12 |
| 3       | METODOLOGÍA.....                                                           | 13 |
| 3.1     | Diseño alabe aerogenerador eje horizontal.....                             | 13 |
| 3.1.1   | Estudios previos .....                                                     | 13 |
| 3.1.1.1 | Selección de perfiles alares de aerogeneradores de baja potencia.....      | 13 |
| 3.1.1.2 | Análisis coeficientes aerodinámicos con QBlade® y SolidWorks® .....        | 14 |
| 3.1.1.3 | Elección del perfil .....                                                  | 16 |
| 3.1.2   | Diseño aerodinámico del álabe en QBlade® .....                             | 16 |
| 3.1.2.1 | Dimensionamiento del álabe .....                                           | 16 |
| 3.1.2.2 | Análisis aerodinámico .....                                                | 18 |
| 3.1.2.3 | Análisis estructural .....                                                 | 19 |
| 3.2     | Selección Material .....                                                   | 20 |
| 3.3     | Fabricación del álabe.....                                                 | 23 |
| 3.3.1   | Fabricación del contramolde.....                                           | 23 |
| 3.3.2   | Fabricación molde .....                                                    | 24 |
| 3.3.2.1 | Tipo de laminado.....                                                      | 24 |
| 3.3.2.2 | Laminado del molde.....                                                    | 24 |
| 3.3.2.3 | Desmolde molde .....                                                       | 25 |

|         |                                                                                |    |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.2.4 | Terminado superficial molde .....                                              | 25 |
| 3.3.3   | Fabricación álabes.....                                                        | 26 |
| 3.3.3.1 | Laminado del álabes .....                                                      | 26 |
| 3.3.3.2 | Desmolde álabes.....                                                           | 28 |
| 3.3.3.3 | Terminado superficial y ensamble álabes.....                                   | 28 |
| 3.4     | Caracterización del compuesto .....                                            | 29 |
| 3.4.1   | Viscosidad.....                                                                | 29 |
| 3.4.2   | Caracterización mecánica.....                                                  | 29 |
| 3.4.2.1 | Ensayo de tracción .....                                                       | 29 |
| 3.4.3   | Técnicas microscópicas .....                                                   | 32 |
| 3.4.3.1 | Microscopía óptica (MO).....                                                   | 32 |
| 3.4.4   | Técnicas espectroscópicas / caracterización química .....                      | 33 |
| 3.4.4.1 | Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR).....          | 34 |
| 3.4.5   | Caracterización térmica.....                                                   | 34 |
| 3.4.5.1 | Calorimetría diferencial de barrido (DSC) .....                                | 34 |
| 4       | RESULTADOS .....                                                               | 38 |
| 4.1     | Diseño alabe aerogenerador eje horizontal.....                                 | 38 |
| 4.1.1   | Análisis aerodinámico con QBlade® y Flow Simulation .....                      | 38 |
| 4.1.2   | Comparación de los perfiles mediante QBlade® y SolidWorks® Flow Simulation ... | 41 |
| 4.1.3   | Elección del perfil .....                                                      | 41 |
| 4.1.4   | Diseño aerodinámico alabe.....                                                 | 42 |
| 4.1.4.1 | Dimensionamiento álabes .....                                                  | 42 |
| 4.1.4.2 | Análisis aerodinámico .....                                                    | 43 |
| 4.1.4.3 | Análisis estructural .....                                                     | 45 |
| 4.2     | Fabricación del álabes.....                                                    | 46 |
| 4.2.1   | Contramolde.....                                                               | 46 |
| 4.2.2   | Molde .....                                                                    | 47 |
| 4.2.3   | Álabes.....                                                                    | 48 |
| 4.3     | Caracterización del compuesto .....                                            | 49 |
| 4.3.1   | Viscosidad.....                                                                | 49 |
| 4.3.2   | Ensayo de tracción .....                                                       | 49 |
| 4.3.3   | Microscopía óptica (MO).....                                                   | 51 |
| 4.3.4   | Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR).....           | 52 |
| 4.3.4.1 | Resina Epoxi - YD 128 (DGEBA) .....                                            | 52 |
| 4.3.4.2 | Endurecedor KH 816.....                                                        | 53 |
| 4.3.4.3 | Sistema resina epoxi curado - 3 min mezcla .....                               | 53 |
| 4.3.4.4 | Resina poliéster insaturada .....                                              | 53 |

|         |                                                                      |    |
|---------|----------------------------------------------------------------------|----|
| 4.3.4.5 | Gel coat ortoftálico.....                                            | 54 |
| 4.3.4.6 | Endurecedor (MEKP) .....                                             | 54 |
| 4.3.5   | Calorimetría diferencial de barrido (DSC) .....                      | 54 |
| 5       | DISCUSIÓN.....                                                       | 56 |
| 5.1     | Diseño alabe aerogenerador eje horizontal.....                       | 56 |
| 5.1.1   | Estudios previos .....                                               | 56 |
| 5.1.1.1 | Análisis aerodinámico con QBlade® y Flow Simulation .....            | 56 |
| 5.1.1.2 | Comparación de los perfiles mediante QBlade® y Flow Simulation ..... | 57 |
| 5.1.1.3 | Elección perfil .....                                                | 58 |
| 5.1.2   | Diseño aerodinámico alabe.....                                       | 59 |
| 5.1.2.1 | Análisis aerodinámico .....                                          | 59 |
| 5.1.2.2 | Análisis estructural .....                                           | 60 |
| 5.2     | Fabricación del álabe.....                                           | 61 |
| 5.3     | Caracterización del compuesto .....                                  | 61 |
| 5.3.1   | Viscosidad.....                                                      | 61 |
| 5.3.2   | Ensayo de tracción .....                                             | 62 |
| 5.3.3   | Microscopía óptica (MO).....                                         | 63 |
| 5.3.4   | Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)..... | 63 |
| 5.3.4.1 | Resina Epoxi - YD 128 (DGEBA) .....                                  | 63 |
| 5.3.4.2 | Endurecedor KH 816.....                                              | 64 |
| 5.3.4.3 | Sistema resina epoxi curado - 3 min mezcla .....                     | 65 |
| 5.3.4.4 | Resina poliéster insaturada.....                                     | 66 |
| 5.3.4.5 | Gel coat ortoftálico.....                                            | 67 |
| 5.3.4.6 | Catalizador (MEKP).....                                              | 67 |
| 5.3.5   | Calorimetría diferencial de barrido (DSC) .....                      | 68 |
| 6       | CONCLUSIONES .....                                                   | 70 |
| 6.1     | Diseño alabe aerogenerador eje horizontal.....                       | 70 |
| 6.2     | Fabricación del álabe.....                                           | 70 |
| 6.3     | Caracterización del compuesto.....                                   | 71 |
| 7       | TRABAJOS A FUTURO .....                                              | 71 |
| 8       | REFERENCIAS.....                                                     | 73 |
| 9       | ANEXOS .....                                                         | 79 |

## 1 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 (1).

Sin embargo, en la actualidad Argentina cuenta con una matriz energética extremadamente desbalanceada e hidrocarburo-dependiente, como se observa en la Figura 1.1 (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.

La potencia instalada para generación eléctrica en el Sistema Argentino de Interconexión (SADI), al fin del primer trimestre 2022 fue de 42.870 [MW], donde un 65,2% corresponde a fuentes de origen térmico (abastecidas mayormente con gas natural y otros combustibles fósiles), mientras que el 13,9 % de origen hidráulico (excluyendo pequeños aprovechamientos menores a 50 MW de potencia), 7,3 % nuclear y el 13,6 % corresponde a energías renovables, de acuerdo con la clasificación establecida en la Ley N° 27.191 (2015) (2).

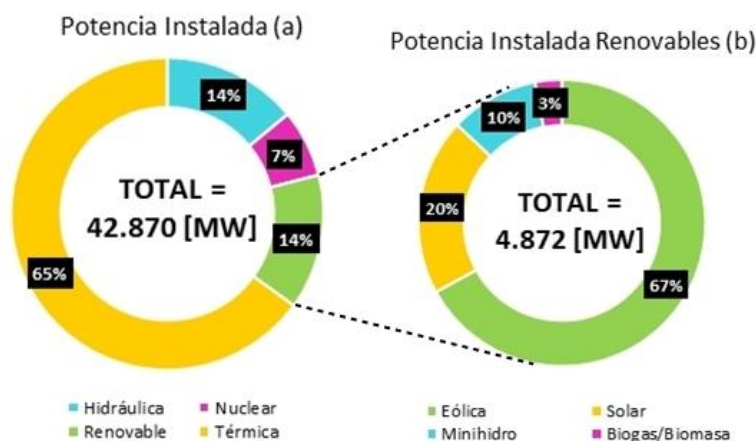


Figura 1.1 - Potencia instalada (a) con subgráfico renovables (b), fin primer trimestre 2022 (2).

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 1.1 (b), representa el 67% de la potencia instalada de fuentes renovables en Argentina (2).

Actualmente, China es la mayor potencia a nivel mundial en lo que respecta a energía eólica. En 2021, el país asiático ya contaba con una potencia instalada acumulada de más de 325 GW (3). Ahora bien, cabe destacar que el territorio nacional cuenta con un potencial eólico de los mayores en el mundo, siendo el potencial teórico de instalación de 2.000 GW, según el Centro Regional de Energía Eólica (CREE). Sin embargo, en la actualidad Argentina tiene 57 parques eólicos que suman 3.29 GW de potencia instalada, menos del 1% del potencial teórico (4).

La energía eólica de pequeña y mediana escala ofrece una alternativa frente a los aerogeneradores de gran potencia, su utilización está aumentando en el mercado debido a que son adecuados para producir energía no solo a nivel doméstico, sino incluso de hasta pequeñas comunidades aisladas que no tienen acceso a la red de distribución de energía eléctrica (conexión *off-grid*). Asimismo, los aerogeneradores de baja potencia son más sencillos de instalar, no hace falta casi 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 (5).

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

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 (6).

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 (7).

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 ( $\approx 1$  kW), mediante la técnica de laminación manual.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 Conceptos elementales dinámica de fluidos

En la primera parte de este trabajo se van a realizar simulaciones fluido dinámicas de diversos perfiles aerodinámicos mediante el uso de dos software de simulación de dinámica de fluidos. Concretamente, se pretende simular las fuerzas de sustentación y arrastre que aparecen sobre perfiles.

Por ello, resulta de vital importancia entender y conocer las bases de la mecánica de fluidos para poder comprender completamente el contenido de este trabajo. A continuación, se explican algunos conceptos básicos de la aerodinámica.

#### 2.1.1 Número de Mach (8)

El número de Mach es un número que se utiliza como referencia de la velocidad. Sirve para evaluar si los fenómenos debidos al cambio de densidad del aire (compresibilidad), son relevantes, o, por lo contrario, resultan despreciables.

Se define el número de Mach como el cociente entre la velocidad de un objeto ( $v$ ) y la velocidad del sonido ( $v_{so}$ ) en el medio en que se mueve dicho objeto. Así pues, la fórmula que lo define es la siguiente:

$$Ma = \frac{v}{v_{so}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

#### 2.1.2 Viscosidad (8)

La viscosidad es la propiedad que describe la oposición de un fluido a sufrir deformaciones tangenciales, es debida a las fuerzas de cohesión moleculares. Un fluido que no tiene viscosidad se le llama fluido ideal.

La viscosidad sólo se manifiesta en fluidos en movimiento y se define como la relación existente entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad. Esta viscosidad recibe el nombre de viscosidad absoluta o viscosidad dinámica. Generalmente se representa por la letra griega  $\mu$ .

Se conoce también otra viscosidad, denominada viscosidad cinemática, y se representa por  $\nu$ . Para calcular la viscosidad cinemática basta con dividir la viscosidad dinámica por la densidad del fluido.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Siendo  $\mu$  la viscosidad dinámica y  $\rho$  la densidad del fluido.

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1.3 Número de Reynolds (8)

El número de Reynolds es un parámetro adimensional que depende de la distancia característica, de la densidad, de la viscosidad (tipo de fluido) y de la velocidad del fluido que actúa. Se define como:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde  $v$  es la velocidad,  $D$  la longitud característica del objeto de estudio,  $\rho$  la densidad del fluido y  $\mu$  la viscosidad dinámica del mismo.

Para números de Reynolds pequeños la capa límite es laminar y en consecuencia para valores grandes de Reynolds la capa límite resulta ser turbulenta. Todo ello, se entiende fácilmente si se observa la fórmula de Reynolds, ya que se aprecia que a mayor distancia mayor es el valor del número de Reynolds y viceversa.

En el caso de este trabajo para calcular el número de Reynolds local se aplicará la ecuación para placa plana:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot x}{\mu} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Siendo  $x$  la distancia al borde de ataque.

### 2.1.4 Fuerzas aerodinámicas (9)

Un flujo de aire sobre un perfil aerodinámico produce una distribución de fuerzas sobre la superficie del perfil. La velocidad del flujo a través de los perfiles aerodinámicos aumenta sobre la superficie convexa resultando en una presión media más baja en el lado de "succión" de la superficie aerodinámica en comparación con el lado cóncavo o de "presión" del perfil aerodinámico. Mientras que, la fricción viscosa entre el aire y la superficie del perfil aerodinámico retarda, en cierta medida, el flujo de aire próximo a la superficie. A esta región próxima a la superficie donde predominan los efectos viscosos se conoce como capa límite.

Como se muestra en la Figura 2.1, la resultante de todas estas fuerzas de presión y fricción es resuelta en dos fuerzas: Sustentación (Lift) y Arrastre (Drag).

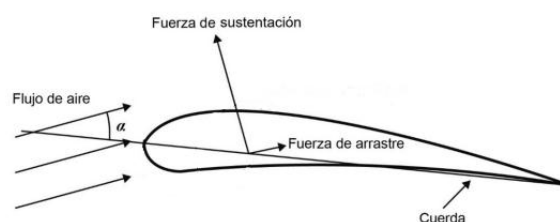


Figura 2.1- Diagrama de las fuerzas aerodinámicas sobre un perfil aerodinámico. Adaptado de (9).

La fuerza de sustentación ( $L$ ) es el componente que resulta perpendicular a la corriente libre de fluido. Se formula mediante la siguiente ecuación:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot C_L \quad (\text{Ecuación 5})$$

Dónde,  $\rho$  es la densidad en  $\text{kg/m}^3$ ,  $v$  es la velocidad en  $\text{m/s}$ ,  $A$  es la sección en  $\text{m}^2$  y  $C_L$  es el coeficiente de sustentación.

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El  $C_L$  (coeficiente de sustentación) es un parámetro adimensional que relaciona la fuerza de sustentación con la densidad y la velocidad característica del fluido que pasa por una determinada sección. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde,  $L$  es fuerza de sustentación,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $v$  es la velocidad del fluido y  $A$  es la sección,  $A = b \cdot c$ , dónde  $b$  es la envergadura del perfil alar y  $c$  es la longitud de la cuerda.

La fuerza de arrastre, es la componente que resulta paralelo a la dirección del fluido. Se formula mediante la siguiente ecuación:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot C_D \quad (\text{Ecuación 7})$$

Dónde,  $\rho$  es la densidad en  $\text{kg/m}^3$ ,  $v$  es la velocidad en  $\text{m/s}$ ,  $A$  es la sección en  $\text{m}^2$  y  $C_D$  es el coeficiente de arrastre.

El  $C_D$  (coeficiente de arrastre) es un parámetro adimensional que relaciona la fuerza de arrastre, con la densidad y la velocidad característica del fluido que pasa por una determinada sección. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde,  $D$  es fuerza de arrastre,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $v$  es la velocidad del fluido y  $A$  es la sección,  $A = b \cdot c$ , dónde  $b$  es la envergadura del perfil alar y  $c$  es la longitud de la cuerda.

### 2.1.5 Entrada en pérdida

La entrada en pérdida es el fenómeno en el que un perfil aerodinámico llega al máximo punto de su funcionalidad. Incrementando el ángulo de ataque, se llega a un punto en el que el perfil ofrece su máxima sustentación y se llega al coeficiente de sustentación máximo  $C_{L \text{ máx}}$ . A partir de ese momento, si se sigue incrementando el ángulo de ataque, la sustentación se desploma instantáneamente y aumenta de forma repentina el arrastre en el perfil. Ese ángulo de ataque límite depende de la velocidad y de la forma del perfil.

En la entrada en pérdida, la separación de la capa límite es total, tal y como se aprecia en la Figura 2.2, separándose en la mayor parte del perfil, muy cerca del borde de ataque.



Figura 2.2 - Entrada en pérdida de un perfil aerodinámico.

## 2.2 Introducción al funcionamiento de un aerogenerador de eje horizontal

En esta sección comentaremos las bases teóricas que fundamentan el principio de funcionamiento de los aerogeneradores, junto con las características más importantes de los aerogeneradores de eje horizontal.

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.2.1 Aerogenerador (10)

Un aerogenerador es una máquina hidráulica empleada para transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica. La fuerza del viento mueve las aspas del aerogenerador, la energía cinética del viento se convierte en energía mecánica del eje y este movimiento se transmite a un generador que produce la energía eléctrica.

En la actualidad el modelo de aerogenerador más extendido, es el tripala de eje horizontal, estudios aerodinámicos revelaron que estos aerogeneradores presentan el compromiso adecuado en cuanto a precio y estabilidad en la rotación del rotor (11).

Un aerogenerador de eje horizontal es aquel en que el eje de rotación es paralelo a la dirección del viento. El mismo se encuentra conformado por las siguientes partes, tal como se indica en la Figura 2.3.

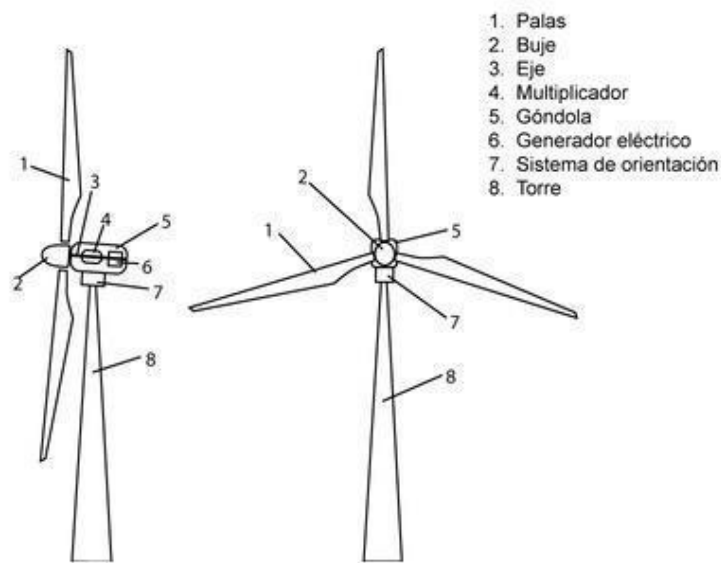


Figura 2.3- Partes de un aerogenerador de eje horizontal (12).

1. Palas/Álabes: capturan el viento y transmiten su potencia hacia el buje.
2. Buje: está acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador, y en conjunto con los álabes forman el rotor.
3. Eje: conecta el buje del rotor al multiplicador, lo que permite que gire aproximadamente a 1.500 revoluciones por minuto (rpm) y de funcionamiento al generador eléctrico.
4. Multiplicador: Puede estar presente o no dependiendo del modelo. Transforman la baja velocidad del eje del rotor en alta velocidad de rotación en el eje del generador eléctrico.
5. Góndola: se trata de un cubículo que se podría decir que es la sala de máquinas del aerogenerador. En la góndola se encuentra la caja de cambios, el eje principal, los sistemas de control, el generador, los frenos y los mecanismos de giro.
6. Generador eléctrico: aparato que se utiliza para convertir la energía mecánica en eléctrica.
7. Sistema de orientación: permite a la góndola girar en torno a la torre para colocar la turbina mirando en dirección al viento.
8. Torre: ubica al generador a una mayor altura donde los vientos son de mayor intensidad y transmite las cargas del equipo al suelo.

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.2.2 Funcionamiento aerogenerador

El elemento encargado de convertir la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación es el rotor, formado por varios álabes que se insertan en una pieza común denominada buje.

Los aerogeneradores extraen la energía del viento transfiriendo la fuerza de empuje del aire que pasa a través de la turbina a los álabes del aerogenerador. Los álabes actúan de manera similar a las alas de un avión, utilizando el denominado principio de sustentación.

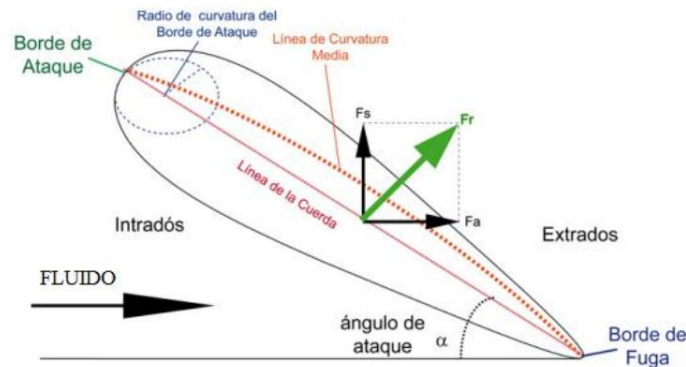


Figura 2.4 - Fuerzas Aerodinámicas Sobre un Perfil (13).

Así pues, cuando tenemos un fluido que pasa a través de un alabe, las partículas de fluido se ven obligadas a estrecharse en la parte superior del perfil (extradós), mientras que las partículas que viajan por la parte inferior del perfil (intradós) tienden a ensancharse. Esto conlleva a que en el extradós la velocidad aumente y la presión disminuya. Por el contrario, en el intradós, la velocidad disminuye y la presión aumenta. Esas dos presiones que aparecen sobre el álabe crean una fuerza en el sentido positivo ya que las partículas que pasan por debajo empujan hacia arriba el álabe, y las partículas que pasan por encima succionan el álabe también hacia arriba.

Como resultado, la fuerza resultante que actúa a una distancia de la raíz del alabe genera un par mecánico que es el responsable de la rotación del eje de la turbina. La potencia al eje se puede aprovechar de diferentes maneras, en el caso de un aerogenerador el eje está conectado con generador eléctrico para la producción de energía eléctrica.

### 2.2.3 Parámetros de la energía eólica (14)

La energía que lleva el viento es energía cinética, causada por la masa de aire en movimiento. Su expresión es:

$$E = \frac{1}{2} mv^2 \quad (\text{Ecuación 9})$$

donde  $m$  es la masa de aire y  $v$  es la velocidad del viento.

La potencia extraíble del viento, se puede determinar con la siguiente expresión:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (\text{Ecuación 10})$$

En donde,  $\rho$  es la densidad del aire,  $A$  es la superficie del volumen de control considerado y  $v$  es la velocidad del viento.

Es importante observar que la potencia depende del cubo de la velocidad, lo cual implica que ligeros aumentos en la velocidad del viento provocan grandes aumentos en la potencia eólica.

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Sin embargo, sólo una fracción de la potencia del viento es aprovechable, determinada por la siguiente expresión:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (\text{Ecuación 11})$$

El coeficiente  $C_p$  se define como el coeficiente de potencia de un aerogenerador, y relaciona la potencia eólica aprovechable y la potencia eólica disponible. Es una medida de la eficiencia de la máquina.

$$C_p = \frac{P}{P_d} \quad (\text{Ecuación 12})$$

El máximo valor teórico que puede alcanzar el  $C_p$  fue determinado por Betz, a partir de la aplicación de la ecuación de cantidad de movimiento. La ley de Betz dice que sólo puede convertirse menos de 16/27 ( $\approx 59\%$ ) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador.

La relación de velocidad específica o TSR (*Tip-Speed-Ratio*), es un término que sustituye al número de revoluciones por minuto  $n$  del rotor. El TSR indica que la punta del álabes circula a una velocidad TSR veces mayor que la velocidad del viento  $v$  y está determinada por la relación entre la velocidad de punta de la pala ( $R\omega$ ), y la velocidad  $v$  del viento, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{R\omega}{v} \quad (\text{Ecuación 13})$$

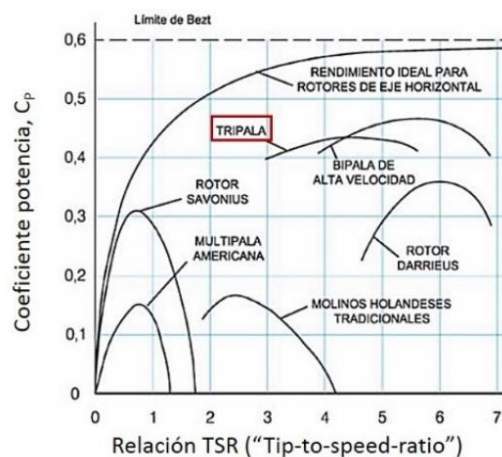


Figura 2.5 – Límite de Betz (12).

### 2.3 Álabes en aerogeneradores de eje horizontal de baja potencia

Los álabes de un aerogenerador de baja potencia pueden ser de madera o de compuestos de madera, aleaciones de aluminio u otros metales ligeros, pero al igual que los álabes diseñados para aerogeneradores de alta potencia los materiales más comunes son los compuestos. El material compuesto que mejor se adapta a las características físicas como mecánicas que exigen los álabes es la fibra de vidrio con resina epoxi o poliéster (5).

Se puede utilizar una amplia gama de materiales de núcleo en una pieza de compuesto. La mayoría de los núcleos se utilizan para añadir rigidez y fuerza, como también para reducir el peso dentro de la lámina. Los tipos de núcleo consisten en madera balsa, espumas de diferentes densidades, tal como PVC y poliuretano, materiales de fibra hilada y madera contrachapada de calidad naval (15). A partir de aquí existen muchas variantes de acuerdo al tamaño del

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

aerogenerador, pero podemos destacar estos tres tipos de secciones transversales para álabes de aerogeneradores;

fig.2.5. a) estructura de laminado con refuerzo

fig.2.5. b) estructura de laminado con núcleo de espuma (PU)

fig.2.5. c) estructura totalmente rellena (sin laminado)

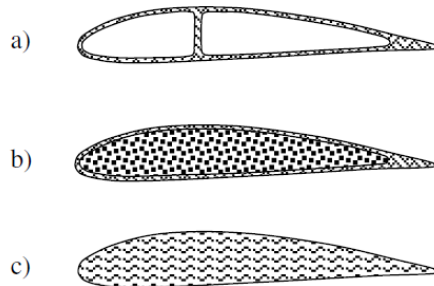


Figura 2.6 - Tipos principales de sección transversal de álabes (16).

Se puede destacar que para los álabes de aerogeneradores grandes y medianos se recomienda utilizar la sección tipo a), del tipo b) para medianos y pequeños, mientras que del tipo c) es adecuada para los álabes de pequeños y micro aerogeneradores.

El álabes con estructura interna a) va a tener un mejor comportamiento, pero costes de producción más elevados que álabes del tipo b) y c). Los álabes rellenos son más sencillos y baratos, pero presentan un comportamiento ligeramente inferior. Por lo tanto, los álabes conformados y rellenos de espuma b) y de compuestos poliméricos c) son adecuados para la producción en serie de pequeños y micro aerogeneradores (16).

### 2.3.1 Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra (17)

Un material compuesto presenta dos elementos principales: fibra y matriz. La combinación adecuada de estos componentes origina unos materiales con mejores propiedades que las partes que los componen por separado. Además de fibra y matriz existen otros tipos de componentes como cargas y aditivos que dotan a los materiales compuestos de características peculiares para cada tipo de fabricación y aplicación.

Los más empleados, por su ligereza y sus excelentes propiedades mecánicas, son los materiales compuestos de matriz polimérica con refuerzos en forma de fibras.

En el presente trabajo solo se mencionará como refuerzo la fibra de vidrio con matriz polimérica de poliéster o epoxi, debido a su importancia en la industria eólica.

#### 2.3.1.1 Refuerzos fibras

La fibra es el componente de refuerzo del material compuesto. Aporta resistencia mecánica, rigidez y dureza y va a ser determinante para obtener las principales propiedades mecánicas. Las características más sobresalientes de las fibras de los materiales compuestos son su resistencia a la tracción específica y su elevado módulo específico.

Independientemente del tipo de material en que estén hechas, las fibras pueden presentarse en forma de tejido, roving, mat, o hilos.

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.3.1.1.1 Fibras de vidrio

Es el refuerzo más utilizado actualmente en la fabricación de materiales compuestos, sobre todo en aplicaciones industriales. Esto se debe a su gran disponibilidad, sus buenas características mecánicas y su bajo coste.

La fibra de vidrio está formada fundamentalmente por sílice, que se asocia a diversos óxidos (alúmina, alcalinos y alcalinotérreos), y se obtiene por fusión de la mezcla de estas materias, pasando por la hilera y sometiéndose a una operación de estirado.

En la práctica, los tipos de fibra de vidrio más utilizadas son del tipo Vidrio E (Eléctrico); representa casi la totalidad del vidrio textil utilizado en materiales compuestos, más del 90% de los refuerzos de uso general, tiene buenas propiedades eléctricas y absorbe poca humedad. La primera gran aplicación industrial de fibra de vidrio E fue el aislamiento de conductores eléctricos sometidos a altas temperaturas, también se utiliza en la industria automotriz para fabricar algunas piezas de los vehículos, en la construcción de objetos deportivos como esquís y canoas, así como en la industria eólica.

Las principales características de la fibra de vidrio son:

- Alta adherencia fibra-matriz, gracias a recubrimientos apropiados para la mayoría de las matrices orgánicas.
- Resistencia mecánica, siendo su resistencia específica (tracción/densidad) superior a la del acero.
- Características eléctricas. Es aislante eléctrico incluso en espesores reducidos. Tiene buena permeabilidad dieléctrica. Permeable a las ondas electromagnéticas.
- Incombustibilidad, materia mineral, la fibra de vidrio es incombustible por naturaleza. No propaga la llama ni origina con el calor humos ni toxicidad.
- Estabilidad dimensional, poco sensible a las variaciones de temperatura e higrometría, tiene un bajo coeficiente de dilatación.
- Compatibilidad con las materias orgánicas. Su aptitud de recibir diferentes ensimajes creando un puente de unión entre el vidrio y la matriz le confieren la posibilidad de asociarse a numerosas resinas sintéticas, así como a ciertas matrices minerales, tales como el yeso o el cemento.
- Imputrescibilidad, (no sufre ninguna alteración). Es insensible a la acción de los roedores y de los insectos.
- Débil conductividad térmica. La utilización de los materiales compuestos en la industria de la construcción permite suprimir los puentes térmicos, dando lugar a un considerable ahorro de calefacción.
- Excesiva flexibilidad
- Bajo coste

### 2.3.1.2 Matriz polimérica

Una de las principales matrices utilizadas para la formación de los materiales compuestos son matrices orgánicas termoestables.

Los polímeros termoestables se fabrican normalmente a partir de precursores líquidos o semi-sólidos que endurecen irreversiblemente; esta reacción química es conocida como polimerización o curado. Esto se puede llevar a cabo por medios químicos a temperatura ambiente, mediante calentamiento a elevada temperatura, o mediante diferentes tipos de radiación como las radiaciones ultravioletas, haz de electrones, rayos gamma y microondas. Una vez curada, las termoestables contienen una red molecular de enlaces altamente cruzados. Éstas no pueden

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

volverse a fundir, pero si la temperatura se incrementa lo suficiente, el polímero termoestable comienza a descomponerse y a degradarse. Además, generalmente, son insolubles. Sin embargo, pueden ser atacadas por solventes y algunos agentes químicos (incluso el agua), especialmente a alta temperatura, que les puede provocar un ablandamiento, ensanchamiento y reducción de la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ).

Uno de los factores críticos en las prestaciones de todas las matrices resinosas es la máxima temperatura a la que pueden ser utilizadas en condiciones de servicio. Este valor normalmente viene caracterizado por la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ).

Las matrices termoeestables de tipo poliéster se suelen utilizar para aplicaciones de baja temperatura y bajo coste, mientras que las de tipo epoxi para aplicaciones de temperaturas medias y una alta *performance*.

### 2.3.1.2.1 Resinas de poliéster insaturado

Las resinas de poliéster insaturadas constituyen la familia más importante de las resinas termoeestables utilizadas en los materiales compuestos. Se utilizan en más del 90% de los laminados comerciales. El sistema está basado en ésteres formados entre ácidos orgánicos bifuncionales, una proporción de los cuales debe ser insaturado, y alcoholes y dioles bifuncionales. Un sistema típico podría estar basado en ácido fumárico insaturado, ácido isoftálico insaturado y glicol propileno. Existen cientos de diferentes formulaciones de poliéster comercialmente, esto permite a los diseñadores y fabricantes seleccionar la resina adecuada al producto que se va a fabricar.

El curado de una resina de poliéster insaturada está afectado por el uso de iniciadores químicos y aceleradores y por la aplicación de calor o exposición a la radiación. En el curado simple a temperatura ambiente de un sistema, el acelerador es un pequeño porcentaje de una sal de cobalto orgánica, la cual es añadida a la resina (normalmente por el suministrador, por ejemplo, la resina pre-acelerada). Cuando la resina se prepara para ser utilizada en el proceso, se mezcla uniformemente entre un 1 y un 5% del catalizador con la resina pre-acelerada. Normalmente un peróxido orgánico (por ejemplo, peróxido de metil etil cetona MEK). Su función es reaccionar con el acelerador, lo que ocasiona una reacción de polimerización adicional mediante radicales libres, lo que evita que haya productos condensados.

Los principales tipos de resina de poliéster son: -La *ortoftálica* que es una resina de utilización general, -La *isoftálica* que tiene propiedades de resistencia superiores al desgaste y a los agentes químicos -y el tipo de *ácido caliente* que se utiliza como retardador de llama. Las resinas de poliéster isoftálicas presentan propiedades superiores desde el punto de vista de comportamiento ante ataques químicos y medioambientales.

La familia de las resinas de poliéster insaturadas es por tanto el sistema más versátil que puede ser adaptado a muchos procesos y a especificaciones de prestaciones finales. Los materiales que curan a temperatura ambiente tienen unos valores de  $T_g$  relativamente bajos y pueden ser susceptibles de ser atacados por algunos solventes. Estos materiales también son hidrolizados bajo largas exposiciones al agua (especialmente agua caliente). Sin embargo, han demostrado ser completamente satisfactorios en ambiente marino a lo largo de muchos años.

### 2.3.1.2.2 Resinas epoxi

La química de las resinas epoxi está basada en la capacidad del radical epóxido, para reaccionar con un amplio rango de otros radicales orgánicos y efectuar enlaces cruzados sin la aparición de un producto condensado. Las resinas son disfuncionales o polifuncionales, en términos del grupo epóxido, y pueden estar basadas en estructuras alifáticas o estructuras aromáticas en forma de

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

columna vertebral. De hecho, la mayoría de las resinas utilizadas para procesos de laminación son aromáticas pero algunas veces mezcladas con material alifático. Las resinas basadas en material alifático son frecuentemente la base de los adhesivos o los sistemas de recubrimiento, donde su flexibilidad mejorada es ventajosa. En general las resinas aromáticas dan superiores prestaciones en los materiales compuestos. La resina se cura por reacción con un agente de curado y la reacción a menudo se controla mediante el uso de catalizadores y aceleradores. Los sistemas de resinas comerciales son a menudo una mezcla compleja de resinas, agentes de curado, catalizadores/aceleradores, modificadores termoplásticos, y otros aditivos. De este modo estas resinas pueden ser adaptadas para reunir los requerimientos, a menudo conflictivos, de altas prestaciones y facilidad de procesado.

Las fórmulas estructurales de dos de las más comunes resinas base se muestran en la Figura 2.7. Estas resinas son todas altamente aromáticas con diferentes grados de funcionalidad del epoxi. Los agentes de curado son normalmente anhídridos disfuncionales o aminas (alifáticas, cicloalifáticas y aromáticas), un ejemplo de los cuales se muestra también en la Figura 2.7.

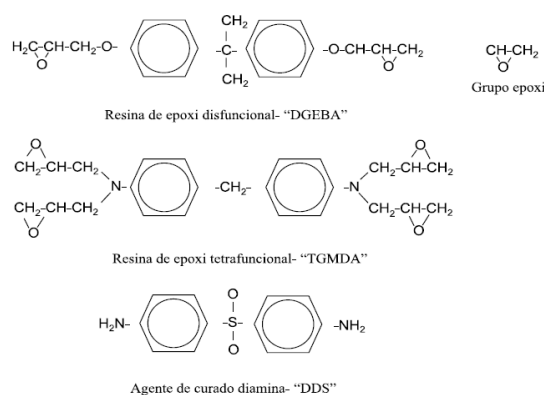


Figura 2.7- Resinas de epoxi difuncionales y tetrafuncionales y un agente de curado diamina.

La principal diferencia entre las moléculas es que la DGEBA (diglicidil eter de bisfenol A) cura a menor densidad de entrecruzamiento que la TGMDA (dianilina tetraglicidil metileno), esto implica que el módulo de Young y la Tg de la resina bifuncional (Bisfenol A) son más bajos. Además, las propiedades mecánicas también se ven reducidas. Sin embargo, el curado de la resina epoxi Bisfenol A tiene una mayor deformación a rotura y también menor absorción de agua. La resina epoxi basada en Bisfenol A, es la resina más utilizada actualmente.

La dureza de los epoxis es superior a la de las resinas de poliéster y, por ello, pueden operar a temperaturas más altas. Tiene buena adherencia a muchos sustratos, baja contracción durante la polimerización y son especialmente resistentes a los ataques de álcali. Esto permite moldeos de alta calidad, con buena tolerancia dimensional, para ser fabricado.

Las resinas epoxi se caracterizan por tener una baja retracción, un buen comportamiento a temperatura elevada, hasta 180°C, y una buena resistencia a los agentes químicos.

### 2.3.2 Técnicas de fabricación a pequeña escala (18)

Los álabes pequeños, de baja potencia, pueden fabricarse manualmente, por ejemplo, mediante laminación manual (*hand lay-up*). Los procesos manuales poseen un bajo costo en moldes y equipos de apoyo, pero el control de calidad es cuestionable. La variabilidad del contenido de fibra puede ser un problema grave en el laminado manual, el uso de pre-impregnados ayuda a evitar este problema, pero requieren calor y presión, lo que aumenta el coste. Una mejora al proceso de laminación manual tradicional es la laminación con compactación con vacío (*wet hand lay-up with vacuum consolidation*). Los álabes de mayor tamaño pueden fabricarse mediante el

## FUNDAMENTOS TEÓRICOS

bobinado de filamentos (*filament winding*) o infusión por vacío (*vacuum infusion*), estos métodos requieren una alta inversión en equipos de apoyo.

### 2.3.2.1 Laminación manual (19)

Esta técnica es, sin duda, la más antigua de todas las técnicas conocidas en la fabricación de piezas con materiales compuestos. A pesar de ser una técnica sencilla y manual, con mucha dependencia de la habilidad del operario, continúa siendo, a lo largo de los años, la más difundida, tanto por su bajo coste como por su adecuación a piezas de diferentes tamaños y geometrías sin excesivos inconvenientes.

El proceso de laminado manual consiste en la aplicación de sucesivas capas de material impregnadas con una resina, y consolidadas mediante la acción de un rodillo o brocha. La acción de pasar el rodillo sobre la superficie tiene dos razones fundamentales: la primera es ayudar a la impregnación del refuerzo, y la segunda, intentar evitar que queden burbujas de aire atrapadas entre sucesivas capas del estratificado. La presión de compactación no será otra, entonces, que la que ejerce la mano sobre el rodillo.

La laminación manual se realiza en moldes abiertos, por lo que los álabes fabricados mediante procesos manuales se suelen hacer en dos piezas, se curan, se coloca un núcleo y luego se unen mediante adhesivos.

En condiciones normales de trabajo, los laminados manuales permiten obtener relaciones de refuerzo/matriz aproximados de entre 30/70% hasta un 45/55%.

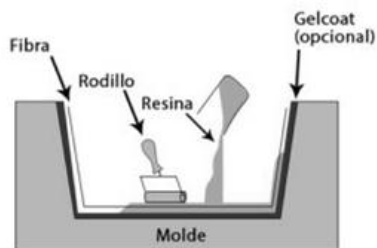


Figura 2.8 - Esquema del método laminado manual (19).

### 2.3.2.2 Laminación Manual con compactación por vacío (20)

En la compactación con bolsa de vacío de laminados manuales, el refuerzo se satura de resina como en un proceso de laminado manual tradicional. Posteriormente, la bolsa de vacío se coloca adecuadamente en el molde y se usa para compactar el laminado y eliminar el posible aire atrapado.

La compactación con vacío permite que el laminado se adapte mejor a geometrías complejas y mejora las propiedades mecánicas de los laminados fabricados en proceso de molde abierto (laminado manual). Este proceso puede producir laminados con un grado uniforme de consolidación y mayor contenido en refuerzo, mientras que al mismo tiempo elimina el aire atrapado.

Las estructuras fabricadas con técnicas tradicionales de laminado manual pueden ser demasiado ricas en resina, y la compactación con bolsa de vacío puede eliminar este problema. Al reducir la presión dentro de la bolsa de vacío, la presión atmosférica externa ejerce fuerza sobre la bolsa. La presión sobre el laminado elimina el aire atrapado, el exceso de resina y compacta el laminado, lo que resulta en un mayor porcentaje de refuerzo de fibra.

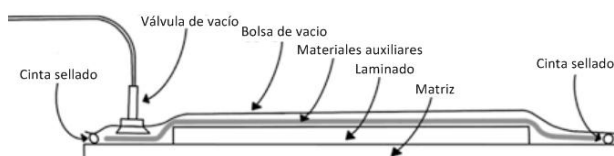


Figura 2.9 – Esquema método laminación manual con compactación por vacío. Adaptado (20)

### 3 METODOLOGÍA

#### 3.1 Diseño alabe aerogenerador eje horizontal

En la Figura 3.1 se muestra el esquema de las distintas etapas a realizar para obtener el modelo de un álabe de un aerogenerador de eje horizontal de baja potencia ( $\approx 1$  kW).

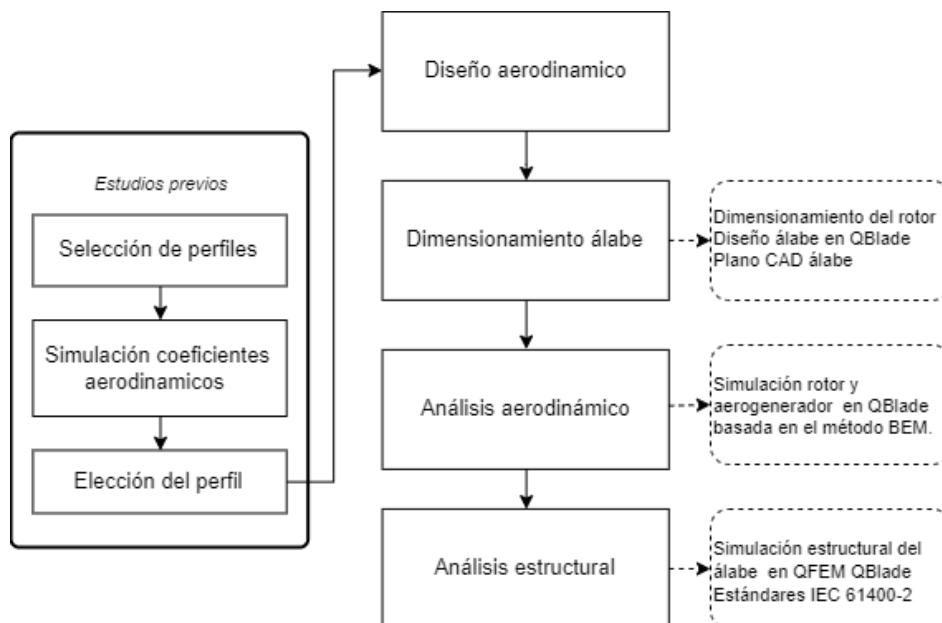


Figura 3.1– Esquema etapas propuestas para el diseño álabe de aerogenerador de eje horizontal.

De acuerdo a lo establecido en la Figura 3.1, 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.

##### 3.1.1 Estudios previos

La Norma IEC 61400-2 (21) define como aerogenerador de baja potencia a aquel que tiene un área de barrido del rotor de menos de  $200 \text{ m}^2$  ( $D < 16 \text{ m}$ ), lo que corresponde aproximadamente a una potencia  $P < 100 \text{ kW}$ . Por lo que, podemos comprobar, que nuestro caso se encuentra incluido en la categoría de aerogeneradores de baja potencia.

##### 3.1.1.1 Selección de perfiles alares de aerogeneradores de baja potencia

En este trabajo se estudian 8 perfiles aerodinámicos: NACA 0012, NACA 4412, NREL S822, NREL S823, NREL S833, CLARK Y, SD7080 (9.2%), Wortmann FX 63-137; los cuales se seleccionaron debido a su buen comportamiento para números de Reynolds por debajo de 500.000 y la utilización con anterioridad en estudios o trabajos relacionados con aerogeneradores de baja potencia.

## METODOLOGÍA

Algunos de los perfiles están diseñados en familias y son recomendados para distintas secciones en el álabe para su mejor aprovechamiento. Es el caso de los perfiles NREL S823 y S822 diseñados como una familia de perfiles para aerogeneradores de eje horizontal para bajos valores de Reynolds (22). También está el perfil aerodinámico Clark Y que ha logrado gran difusión por sus bondades aerodinámicas, tales como su gran sustentación a bajas velocidades y su vientre plano, el cual facilita la construcción ya que sirve como plano de referencia (23).

Otros perfiles que también han sido utilizados en aerogeneradores son SD7080 (9.2%) y Wortmann FX 63-137, este último utilizado con mucho éxito en Argentina, en la hélice de la Turbina Eólica Argentina de 10 kW y en el aerogenerador INDAER de 1 kW. Sus características aerodinámicas son excelentes, aunque su construcción es laboriosa debido a la forma cóncava-convexa del perfil (24).

Por último, están los perfiles NACA que provienen de la industria aeronáutica, pero han sido utilizados con éxito en diversos aerogeneradores, específicamente en este caso analizaremos el NACA 0012 y NACA 4412.

En la Figura 3.2 se muestran los perfiles seleccionados, los cuales serán el punto de partida para seleccionar el perfil con mejor desempeño aerodinámico que se utilizará para el diseño del álabe. Para llevar a cabo esta selección se evaluó el comportamiento de los perfiles, mediante el uso de dos software QBlade® y SolidWorks® Flow Simulation.

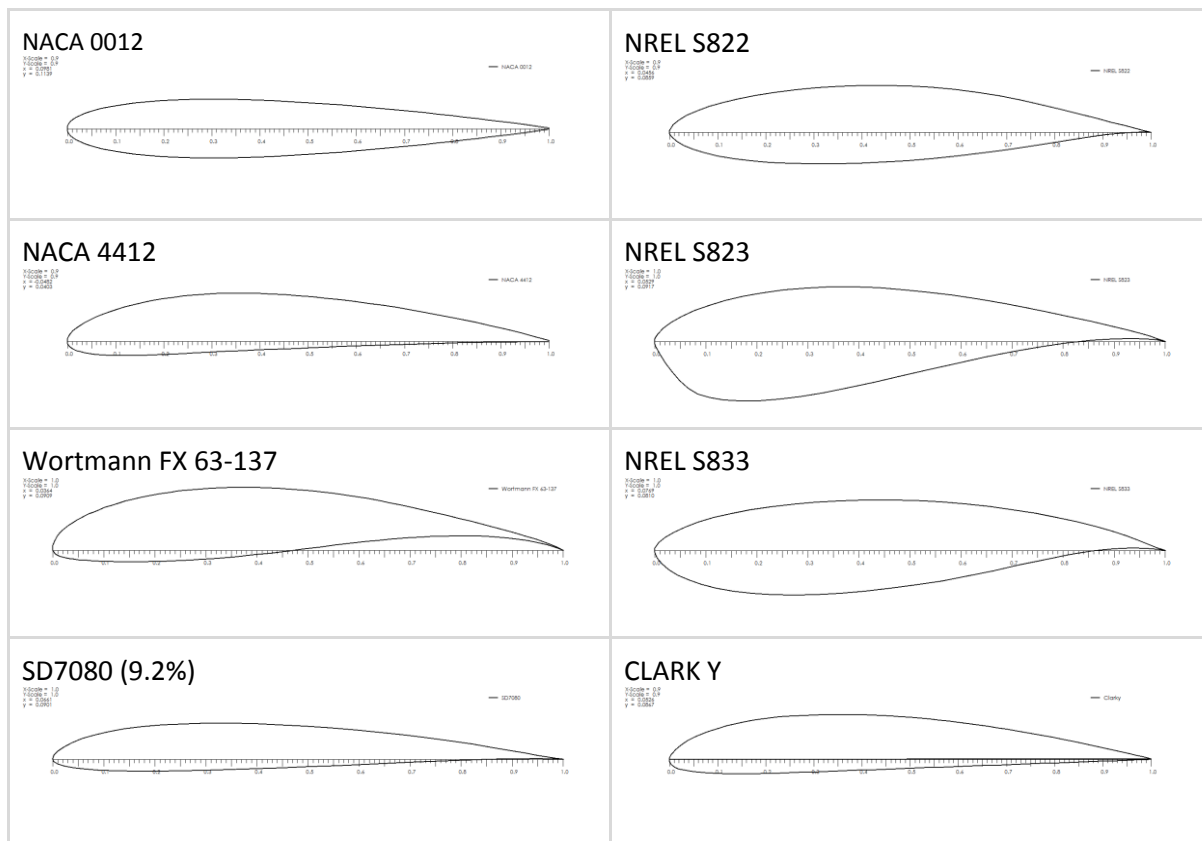


Figura 3.2 - Perfiles aerodinámicos seleccionados.

### 3.1.1.2 Análisis coeficientes aerodinámicos con QBlade® y SolidWorks®

QBlade® es un software libre desarrollado por Hermann Föttinger Institute of TU Berlín, que permite realizar los cálculos necesarios para el desarrollo de un aerogenerador. Utiliza el método BEM para la simulación de aerogeneradores y se integra en XFOIL, una herramienta de análisis y diseño de perfiles aerodinámicos. La integración de la funcionalidad XFOIL/XFLR5 permite al usuario diseñar rápidamente perfiles aerodinámicos personalizados, calcular sus curvas de

## METODOLOGÍA

rendimiento, e integrarlos directamente en el diseño y simulación del rotor de un aerogenerador (25).

El software QBlade® fue usado para testear los perfiles seleccionados para un número de Reynolds de 109.007 y un rango de ángulos de ataque ( $\alpha$ ) de 0° a 20° con pasos de 2°. Los perfiles seleccionados se compararon entre ellos en función del coeficiente de sustentación, el coeficiente de arrastre y del cociente sustentación-arrastre.

El número de Reynolds se calculó utilizando la ecuación 14 y considerando:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot c}{\mu} \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$\rho \text{ (aire a 300K): } 1,1774 \text{ kg/m}^3 \quad v_n: 12 \text{ m/s} \quad c: 0,145 \text{ m} \quad \mu \text{ (aire a 300K): } 1,8794 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$$

Con el objetivo de contrastar los resultados obtenidos mediante QBlade® se realizó la simulación en SolidWorks® Flow Simulation de cada uno de los perfiles seleccionados, considerando el mismo rango de ángulos de ataque.

SolidWorks® Flow Simulation, licencia académica SOLIDWORKS® 2019 SP 3.0 del Departamento de computación de alta precisión, es una solución de dinámica de fluidos computacional (CFD, del inglés "Computational Fluid Dynamics") que permite simular flujos de fluidos alrededor de un perfil aerodinámico para conocer su comportamiento y capacidades. Es decir, permite recrear un túnel de viento virtual que opera más rápido y a menor costo que un túnel real, permitiendo predecir con algunas limitaciones el comportamiento aerodinámico del perfil.

Al momento de realizar las simulaciones se tomó como referencia el trabajo "Investigation of SolidWorks Flow Simulation as a valid tool for analyzing airfoil performance characteristics in low reynolds number flows" de Joseph Scott Wallace (26) para determinar las condiciones iniciales, opciones de control de cálculo y selección de objetivos.

Cabe aclarar que las metas seleccionadas nos permitieron obtener las fuerzas en las direcciones  $\langle x \rangle$  e  $\langle y \rangle$ , sin embargo, para obtener los coeficientes de sustentación y arrastre interesados en calcular, es necesario realizar una corrección en las fuerzas respecto al ángulo de ataque. Esto se logra con las siguientes ecuaciones.

$$L = F_y \cos \alpha - F_x \sin \alpha \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$D = F_x \cos \alpha + F_y \sin \alpha \quad (\text{Ecuación 16})$$

Sin esta corrección, las fuerzas de sustentación y arrastre no serían respectivamente perpendiculares y paralelas a la cuerda del perfil como indican sus definiciones.

$$C_L = \frac{F_y \cos \alpha - F_x \sin \alpha}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$C_D = \frac{F_x \cos \alpha + F_y \sin \alpha}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Para cada simulación, los datos obtenidos fueron contrastados con los resultados del QBlade®, analizando cualitativamente las características del flujo, a fin de realizar o no ajustes en las opciones de cálculo de las próximas simulaciones.

## METODOLOGÍA

### 3.1.1.3 Elección del perfil

Esta etapa de diseño del álabe es la más importante, puesto que es necesario establecer un buen criterio de selección del perfil ya que repercutirá en muchos factores como el rendimiento, forma, dimensiones y facilidad de modelaje del álabe.

El comportamiento aerodinámico de los perfiles se evaluó mediante el uso de QBlade® y SolidWorks® Flow Simulation a través del registro de sus coeficientes de sustentación y arrastre, para varios ángulos de ataque. Los resultados de estas simulaciones nos permitieron identificar el desempeño de los perfiles para condiciones determinadas de flujo al cual son sometidos.

Los criterios y consideraciones que se utilizaron para la selección de un perfil fueron los siguientes:

- 1) Facilidad constructiva, se busca forma sencilla con baja curvatura para evitar complejidades tanto de cálculos, diseño y fabricación.
- 2) Alto valor en la relación entre el coeficiente de sustentación y arrastre ( $C_l/C_d$ ). Para el diseño, se toma el valor máximo de esta relación.
- 3) Ángulo de ataque estable ( $\alpha$ ), amplio intervalo de valores de para los cuales la relación ( $C_l/C_d$ ) máx. se mantenga pseudo constante.

### 3.1.2 Diseño aerodinámico del álabe en QBlade®

#### 3.1.2.1 Dimensionamiento del álabe

La Tabla 3.1 muestra las variables de entrada para el dimensionamiento del álabe. A continuación, se argumentan cada una de ellas.

| Variables de entrada                              |           | Valor                 |
|---------------------------------------------------|-----------|-----------------------|
| Potencia requerida (W)                            | $P_r$     | 1000                  |
| Velocidad específica TSR                          | $\lambda$ | 8                     |
| Coeficiente de potencia                           | $C_p$     | 0,40                  |
| Numero de álabes                                  | -         | 3                     |
| Velocidad de diseño (m/s)                         | $v$       | 12                    |
| Densidad aire ( $\text{kg/m}^3$ )                 | $\rho$    | 1,1774                |
| Viscosidad aire ( $\text{N} \cdot \text{s/m}^2$ ) | $\mu$     | $1,88 \times 10^{-5}$ |
| Perfil aerodinámico                               | -         | NACA 0012             |

Tabla 3.1 – Variables entrada dimensionamiento álabe.

De acuerdo a lo establecido en el objetivo del presente trabajo se plantea una potencia requerida de 1 kW.

El mejor rendimiento del mercado ( $C_p$ ) para aerogeneradores de eje horizontal de tres alabes está entre 0,35 y 0,45 (27) por lo que se toma 0,4 como valor medio.

En relación con la velocidad específica TSR ( $\lambda$ ), cada de aerogenerador tienen un punto de funcionamiento óptimo a un valor de TSR específico para cada tipología, para el cual el rendimiento del aerogenerador es máximo ( $C_{p \text{ máx.}}$ ).

A valores bajos de TSR se tiene una reducción de la sustentación y un aumento de la resistencia hasta llegar a la condición de pérdida, donde se ve afectado el funcionamiento del aerogenerador. En el caso opuesto, donde los valores de TSR se incrementan a valores muy elevados, ambas fuerzas (sustentación y resistencia) se reducen. A este último punto de trabajo se denomina “condición de fuga”, donde se generan diversas pérdidas debidas a que el rotor gira tan rápido que se convierte en un obstáculo para el viento, afectando el funcionamiento del aerogenerador. Por lo que, para poder gestionar un funcionamiento eficiente del aerogenerador, debería

## METODOLOGÍA

funcionar para todas las velocidades del viento con una relación de TSR cercana a la que da el coeficiente de potencia máximo.

El valor óptimo de TSR depende del número  $n$  de álabes y cuanto menor sea este, más rápidamente deben girar para extraer la máxima potencia del viento. Los aerogeneradores de eje horizontal con rotor de tres álabes funcionan de manera óptima en una velocidad específica de punta ( $\lambda$ ) de diseño entre 7 y 8, como se puede observar en la Figura 3.3.

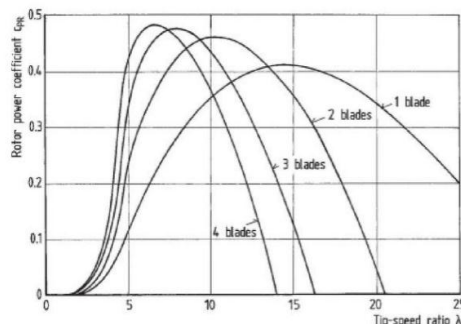


Figura 3.3 – Influencia número álabes en el coeficiente de potencia y TSR óptimo (27).

Asimismo, Figura 3.3, muestra la influencia del número de álabes en el coeficiente de potencia del rotor. En la teoría, el coeficiente de potencia aumenta con el número de álabes. Sin embargo, se observa que mientras que el aumento de potencia de uno a dos álabes es considerable  $\approx 10\%$ , la diferencia de dos o tres álabes es de sólo  $\approx 3-4\%$ , y el cuarto álabes sólo produce un aumento de potencia de  $\approx 1-2\%$ . Por lo que el aumento en el coeficiente de potencia se vuelve despreciable (28; 27).

Con relación a la velocidad nominal de diseño se considera que en los aerogeneradores comerciales de baja potencia oscila entre los 10 y 15 m/s, siendo 12 m/s un valor de velocidad nominal estandarizado (29) (30). La densidad y la viscosidad del aire, se establecen a la presión atmosférica y una temperatura de 300 K.

Finalmente, el perfil seleccionado es el NACA 0012 en relación a lo establecido en los estudios previos.

### 3.1.2.1.1 Dimensionamiento rotor

El objetivo principal de los cálculos de dimensionamiento es determinar el área del rotor y el radio del álabes, el cual equivale a la longitud de un álabes del rotor (31). Para lo que se utilizó el modelo estático para modelar el aerogenerador, este método posee tres parámetros de diseño que son; la densidad del aire, el área de barrido y el coeficiente de potencia  $C_p(\lambda)$ . De estos, el más importante es el último ya que define la capacidad de transformación de energía del aerogenerador (32). A continuación, en la Tabla 3.2, se enlistan las ecuaciones que intervienen en este proceso.

|                                       |                                             |
|---------------------------------------|---------------------------------------------|
| Modelo estático de aerogenerador (32) | $P_t = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda)$ |
| Área de barrido del rotor ( $m^2$ )   | $A = \frac{2 P_t}{\rho v^3 C_p}$            |
| Radio del álabes (m)                  | $R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$                  |
| Velocidad angular del rotor (rad/s)   | $\Omega = \frac{\lambda v}{R}$              |

Tabla 3.2 – Ecuaciones que intervienen en el dimensionamiento del rotor.

## METODOLOGÍA

### 3.1.2.1.2 Diseño álabes con QBlade®

Considerando las variables presentes en la Tabla 3.1, se definió la geometría del álabes mediante el módulo *HAWT Rotorblade Design*, aplicando la teoría BEM. Se basa en un proceso de iteraciones que distribuye la longitud de cuerda y el ángulo de torsión (*twist*) a través del radio total.

El álabes se dividió en 12 secciones que van en orden desde el centro de giro del rotor, hasta la sección 12 ubicada en la sección más alejada del eje de rotación.

Priorizando la facilidad constructiva no se aplicó giro (*twist*) en los perfiles; pero se optimizó la geometría para  $\lambda=8$  mediante variaciones de cuerda (*c*) a lo largo del álabes implementando la ecuación 19 de cuerda óptima de Betz en función del radio del álabes (*r*) (33).

$$c(r) = \frac{16}{9} \frac{\pi R}{B C_L \lambda_0} \frac{1}{\sqrt{\left(\lambda_0 \frac{r}{R}\right)^2 + \frac{4}{9}}} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Para cada una de las secciones del álabes fue calculado el valor para la cuerda.

### 3.1.2.2 Análisis aerodinámico

Cabe aclarar que tanto el diseño del rotor y del aerogenerador completo se encuentran fuera de los límites del presente trabajo, las simulaciones a continuación se realizan con el fin de definir de la manera más completa posible el comportamiento del álabes diseñado.

QBlade® permite la simulación del rotor y la simulación del aerogenerador completo. En el primer caso, se trata de un cálculo adimensional para un rango de velocidad específico TSR, en el segundo caso, requiere la definición de los parámetros del aerogenerador como la velocidad de rotación (rpm), la elección del ángulo de ataque  $\alpha$  y su ejecución para varios rangos de velocidad del viento.

#### 3.1.2.2.1 Simulación rotor

Para determinar los parámetros de desempeño del rotor con el álabes diseñado se utilizó el módulo *Rotor BEM Simulation*, el cual permite llevar a cabo un análisis analítico mediante la teoría BEM. A partir de la simulación se obtiene la curva  $C_p - \lambda$  del rotor con el álabes diseñado, que permite determinar el valor máximo del coeficiente de potencia ( $C_{p \text{ máx.}}$ ) que da lugar al valor óptimo de la velocidad específica ( $\lambda_{\text{op.}}$ ). Asimismo, la simulación permite conocer la variación de los distintos parámetros, tales como potencia, torque, empuje, y determinar su valor en el punto de máximo rendimiento del rotor.

La simulación se llevó a cabo para un rango de velocidades específicas (TSR) entre 1–15, con un incremento de 0,5 y velocidad de viento igual a 12 m/s. En la Tabla 3.3 se definen los parámetros de simulación.

|                                               |                       |
|-----------------------------------------------|-----------------------|
| Discretiza el aspa entre N elementos          | 40                    |
| Máx. épsilon para convergencia ( $\epsilon$ ) | 0,001                 |
| Máx. número de iteraciones                    | 1000                  |
| Relax. factor                                 | 0,35                  |
| Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )                  | 1,1774                |
| Viscosidad ( $\text{N. s/m}^2$ )              | $1,88 \times 10^{-5}$ |

Tabla 3.3 - Parámetros simulación BEM

#### 3.1.2.2.2 Simulación aerogenerador

El módulo *Turbine BEM Simulation* permite desarrollar un aerogenerador a partir del rotor con el álabes diseñado. Para esto es necesario especificar el mecanismo de regulación de potencia (por cambio del ángulo de paso (*pitch*) o por pérdida aerodinámica (*stall*), el mecanismo de

## METODOLOGÍA

transmisión (simple, dos pasos, variable), y algunos parámetros adicionales como la velocidad de conexión y desconexión, y la eficiencia del generador<sup>1</sup>.

En la regulación por *pitch* es necesario especificar una potencia nominal de salida. Cuando se alcanza la velocidad del viento que produce la potencia nominal de salida, el mecanismo de cambio del ángulo de paso, hace girar las palas del rotor ligeramente fuera del viento. Mientras que en la regulación por *stall*, no posee un mecanismo de cambio de paso y la potencia de salida se encuentra limitada únicamente por la entrada en pérdida en el rotor (34).

Los mecanismos de transmisión son: simple, de dos pasos o variable. Para una transmisión simple, se debe definir solo una velocidad de rotación, en la que el aerogenerador operara en todo el rango de velocidades del viento. Para una de dos pasos se deben definir dos velocidades de rotación y una velocidad de cambio. Mientras que para una transmisión variable se debe definir un valor mínimo y un máximo para la velocidad de rotación (34).

Como se trata de un aerogenerador de baja potencia se seleccionó como mecanismo de control de potencia la regulación por pérdida (*stall*), y de transmisión simple, ya que ambos son mecanismos de baja complejidad, y más económicos en comparación con los otros.

La velocidad de rotación (rpm) se definió a partir de la velocidad angular ( $\Omega$ ) del rotor a partir de la ecuación 20.

$$rpm = \Omega \frac{60}{2\pi} \quad (\text{Ecuación 20})$$

En la Tabla 3.4 se encuentran resumidos los parámetros de configuración del aerogenerador.

|                               |                                                      |
|-------------------------------|------------------------------------------------------|
| Mecanismo control de potencia | Regulación por pérdida aerodinámica ( <i>stall</i> ) |
| Mecanismo de transmisión      | Simple                                               |
| Velocidad de rotación (rpm)   | 916                                                  |
| Ángulo de ataque (°)          | 5,2                                                  |
| Velocidad conexión (m/s)      | 3                                                    |
| Velocidad desconexión (m/s)   | 30                                                   |

Tabla 3.4 - Parámetros aerogenerador.

La simulación se llevó a cabo para un rango de velocidades de viento entre 1 – 30 m/s, con un incremento de 0,5. Los parámetros de simulación BEM son los mismos que en la simulación del rotor, definidos en la Tabla 3.3.

### 3.1.2.3 Análisis estructural

El análisis estructural se basa en el estudio de los esfuerzos que se producen a lo largo del álabe, generados principalmente por las cargas aerodinámicas producidas por el viento. El diseño y la simulación estructural se realizaron mediante el módulo *QFEM-Structural Blade Design/ Static Loading*, donde las cargas tangenciales y normales que actúan sobre el álabe se exportaron de las simulaciones del aerogenerador y mediante el método de elementos finitos (FEM) se obtuvieron las tensiones equivalentes de Von Mises a la que estará sometido y sus deflexiones.

Antes de continuar es necesario realizar algunas consideraciones. A pesar que debido a las muy diferentes propiedades mecánicas de los constituyentes de un FRP, los materiales compuestos no tienen una naturaleza isotrópica. QBlade®, a modo de simplificación y como una buena primera aproximación, define y simula a los materiales compuestos como isotrópicos. Por lo que considera el laminado como un todo, y no analiza las láminas en forma individual (25).

<sup>1</sup> Relacionada a pérdidas fijas y variables causadas por la eficiencia mecánica del generador y la caja de cambios. En este caso no consideraron.

## METODOLOGÍA

### 3.1.2.3.1 Diseño estructural

El diseño estructural se realizó en el módulo *QFEM - Structural Blade Design*, el cual permite definir un modelo estructural simple para un material isotrópico. Comprende la selección de los materiales a utilizar y la determinación de la sección transversal estructural.

De acuerdo a lo mencionado en la sección 2.3, al tratarse de álabes para un aerogenerador de baja potencia se planteó una estructura de laminado con núcleo de espuma. En la Tabla 3.5 se presentan los materiales seleccionados y otras especificaciones requeridas por el módulo de diseño.

| Propiedades                                         | Material laminado externo                             | Material núcleo            |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------|
|                                                     | Fibra de vidrio biaxial E glass<br>(double bias) (25) | Espuma de poliuretano (35) |
| Densidad (kg/m <sup>3</sup> )                       | 1750                                                  | 31,9                       |
| Módulo de elasticidad (MPa)                         | 12000                                                 | 2,1                        |
| Velocidad de rotación en el punto de diseño (1/min) | 917                                                   |                            |
| Espesor laminado (mm)                               | 1,6                                                   |                            |

Tabla 3.5 - Propiedades materiales requeridas por QBlade®

### 3.1.2.3.2 Simulación de cargas (36) (37)

Luego de definir el modelo estructural de álabes, se configuró el análisis de cargas estáticas mediante el módulo *QFEM- Static Loading*. El análisis estático es el cálculo más estandarizado y conocido para conocer la resistencia de materiales en general. Básicamente, este análisis realiza una comprobación que consiste en analizar las máximas tensiones que puede alcanzar el componente ante determinadas condiciones. En este caso se plantearon dos condiciones;

- 1) Condición nominal o condición de diseño, velocidad de viento 12 m/s.
- 2) Condición extrema, velocidad de viento 30 m/s.

La tensión más empleada para la comprobación en el análisis estático es la denominada tensión de Von-Mises. Este parámetro, cuantifica el estado tensional de un determinado punto, a partir de la combinación de las cargas normales y tangenciales existentes. Para determinar las cargas que actúan sobre el álabes, se importaron las mismas del módulo *Turbine BEM Simulation*, que permite realizar la simulación del aerogenerador completo y predecir las cargas tangenciales y normales que experimentarían los álabes a una velocidad específica del viento.

## 3.2 Selección Material

Los polímeros reforzados con fibras (FRP) son usados para la fabricación de alabes de aerogeneradores, sea de baja o de alta potencia, debido a alta resistencia mecánica y tenacidad, facilidad para la conformación de piezas complejas, alta resistencia a la corrosión, todo acompañado con baja densidad. Precisamente el material compuesto que mejor se adapta a las características físicas como mecánicas que exigen los alabes del aerogenerador es la fibra de vidrio con resina epoxi o poliéster (5). La fibra de vidrio presenta una muy buena resistencia a la rotura por tracción, mayor que la mayoría de los metales. Es un gran aislante, con un coeficiente de expansión térmica muy bajo, es resistente a la corrosión y a la intemperie, además la fibra de vidrio es mucho más económica que la de carbono (38).

Al momento de decidir que resina utilizar se realizó un análisis comparativo entre las resinas epoxi y poliéster teniendo en cuenta distintas variables, tal como se indican en la Tabla 3.6.

## METODOLOGÍA

| Resina                   | Epoxi                     | Poliéster insaturada   |
|--------------------------|---------------------------|------------------------|
| Tiempo de gel            | Minutos - horas           | Minutos                |
| Tiempo de curado         | Horas- días               | Minutos - horas        |
| Tg <sup>2</sup>          | 40 - 300 ° C              | 40-110 ° C             |
| Poder de adherencia      | Alto 2.000 psi (13,8 MPa) | Bajo 100 psi (0,7 MPa) |
| Contracción              | Muy baja                  | Entre un 6 y 10%       |
| Resistencia a la humedad | Alta                      | Baja                   |
| Resistencia mecánica     | Excelente                 | Muy buena              |
| Toxicidad                | Media                     | Alta                   |
| Endurecedor/catalizador  | Aminas                    | Peróxidos orgánicos    |
| Costo                    | Alto                      | Bajo                   |

Tabla 3.6- Comparación entre resina epoxi y poliéster (5).

Finalmente se optó por utilizar una resina epoxi para el laminado del alabe debido a que presenta mejores prestaciones en general, destacando un mayor tiempo de gel, una muy baja contracción y una excelente resistencia mecánica. Mientras que para el laminado del molde se optó por una resina poliéster debido a que no se requieren mayores solicitaciones mecánicas del mismo y posee un bajo costo frente al epoxi.

Se realizó una búsqueda de resinas comerciales ofrecidas por proveedores locales que permitieran realizar el proceso de laminado manual a temperatura ambiente. En la Tabla 3.7, se muestran las opciones de resinas analizadas, los datos fueron provistos por los proveedores.

| Resina               |                           | Proveedor        | Tiempo gel (min) | Tiempo curado a T amb | Viscosidad (25°C, cps) | Relación de mezcla | Costo (x 1Kg, \$) |
|----------------------|---------------------------|------------------|------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|-------------------|
| EPOXI                | DIPREG® 76 A/B            | Novarchem S.A.   | 45-60            | No suministrada       | 800—850                | 100:30             | 4722,00           |
|                      | DIPREG® 75 A/B            | Novarchem S.A.   | 25 - 35          | 5 días                | 1200-1400              | 100:45             | 5148,00           |
|                      | EPOKUKDO YD-128/ KH - 816 | Náutica Escalada | 50               | 7 días                | 2350                   | 100:60             | 2925,00           |
|                      | RPL/EPL2                  | Noviplast        | 45 -70           | 5 días                | Baja                   | 100:20             | 5420,00           |
| POLIÉSTER INSATURADA | POLIXTAL 15               | Novarchem S.A.   | 5 - 7            | 12 h                  | 200 - 350              | 2% catalizador     | 1920,00           |
|                      | Poliéster Náutica         | Servifibras      | 10 - 15          | 24 h                  | Baja                   | 1,5% catalizador   | 874,12            |

Tabla 3.7 – Opciones de resinas analizadas

Los factores que más han contribuido al momento de seleccionar las resinas fueron; el tiempo de gel, buscando que este sea lo más extenso posible para facilitar el proceso de laminado manual del alabe, y el económico, debido a que se busca fabricar un componente de bajo costo y alta replicabilidad, que garantice estabilidad dimensional. En compromiso con estos dos factores las resinas seleccionadas fueron el sistema epoxi EPOKUKDO YD-128/ KH -816 y la resina Poliéster Náutica con su catalizador.

<sup>2</sup> Temperatura de transición vítrea (Tg) es la temperatura a la que un material pasa de un estado rígido y cristalino a un estado vítreo y amorfo.

### EPOKUKDO YD-128/ KH -816 (39; 40)

EPOKUKDO YD-128 es una resina epoxi estándar de tipo líquido derivada de Bisfenol-A. Tiene una excelente adhesión, resistencia química, resistencia al calor. Debido a sus propiedades, se usa generalmente en muchos campos como en construcción civil y edificios, pinturas, adhesivos y en la industria eólica. YD-128 es la resina líquida más estándar para uso general. Esta resina se cura conjuntamente con DOCURE KH-816, una amina cicloalifática modificada.

Composición YD-128: 100% Éter diglicidílico de Bisfenol- A (DGEBA).

Composición KH-816: 10-30 % isoforondiamina, 40-70 % alcohol bencílico, solventes y aditivos CSP 100%.

### Poliéster Náutica

Es una resina poliéster pre acelerada, no saturada disuelta en monómero de estireno. Sus principales características son: Filtro UV (resistencia a la exposición solar), larga durabilidad, buena resistencia a impactos, contracción: 10% y buena impregnación en fibras de vidrio y tejidos roving. Esta resina se cataliza con metil etil cetona peróxido (MEKP) con un diluyente del tipo ftalato.

Al momento de adquirir la fibra de vidrio, se realizó una búsqueda de tejidos de fibra de vidrio tipo E, por su gran resistencia a la humedad y uso en la industria eólica. Asimismo, para facilitar la adquisición de los materiales, se consideraron únicamente los proveedores de las resinas ya seleccionadas, tal como se muestra en la Tabla 3.8.

| Proveedor        | Tejidos E-glass | Densidad (gr/m <sup>2</sup> ) | Compatible con resinas                    | Presentación | Costo (\$) |
|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------------------|--------------|------------|
| Náutica Escalada | Biaxial cosido  | 300                           | Poliéster, vinil éster, epoxi y fenólica. | x kg         | 1193,00    |
|                  |                 | 400                           |                                           |              | 1056,00    |
|                  |                 | 600                           |                                           |              | 987,00     |
|                  | Roving          | 800                           | Poliéster, vinil éster, epoxi y fenólica. | x 50 kg      | 22983,00   |
| Servifibras      | Roving          | 600                           | Epoxi, poliéster y vinil éster.           | x 30 kg      | 20563,22   |
|                  |                 | 800                           |                                           | x 15 kg      | 8123,03    |

Tabla 3.8 – Opciones de fibra de vidrio analizadas.

Resulta importante tener en cuenta el método de fabricación y la geometría de la pieza final a la hora de seleccionar la fibra de vidrio a utilizar como refuerzo. En nuestro caso, al tratarse de un proceso de laminación manual y al ser tanto el molde como el alabe final piezas con cierta complejidad geométrica se priorizo la selección de un tejido de baja densidad con buena impregnación a las diversas resinas, tal como es el tejido *Vidrio E-glass biaxial cosido DB300+-45 x kg* adquirido en Náutica Escalada, de acuerdo a la información brindada por el proveedor es adecuado para las resinas de poliéster, vinil éster, epoxi y fenólica. Esta tela se utiliza principalmente en la energía eólica, los deportes, la construcción de barcos, la industria automotriz y ferroviaria (41).

### 3.3 Fabricación del álab

En la Figura 3.4 se muestra el esquema del proceso de fabricación propuesto para la obtención del álab, utilizando técnicas de impresión 3D para la obtención del contramolde y laminación manual para la obtención del molde y el álab.

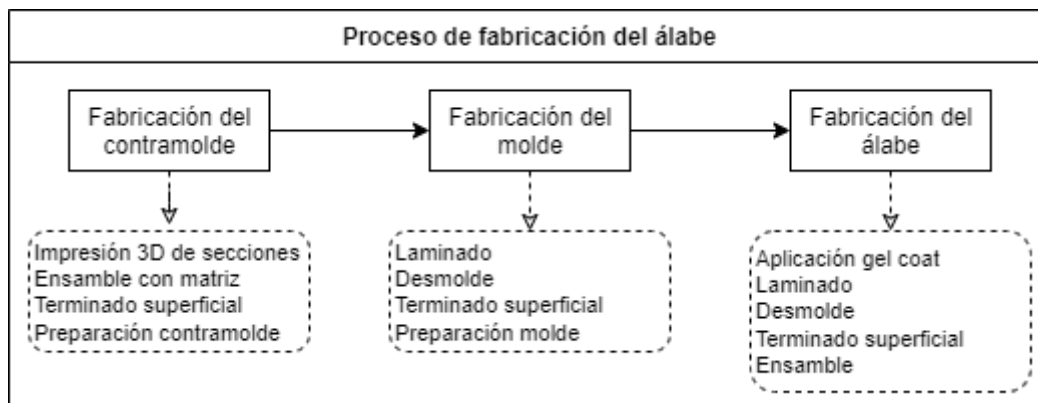


Figura 3.4 – Esquema del proceso de fabricación del álab.

#### 3.3.1 Fabricación del 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. Específicamente mediante fabricación con filamento fundido (FFF Fused Filament Fabrication); esta tecnología fabrica piezas fuertes, duraderas y dimensionalmente estables con una precisión alta (42).

A partir del diseño CAD del álab, se imprimieron las 12 secciones aerodinámicas mediante impresión 3D en una impresora MAKER PARTS 2 30<sup>3</sup> V2019, perteneciente al grupo AeroMat - Laboratorio Perfil Alar de la Gerencia de Materiales. Las secciones fueron cortadas por la mitad para fabricar el contramolde, realizando la impresión en PLA de la parte superior e inferior del álab, con un soporte interno para darle mayor resistencia, Figura 3.5.

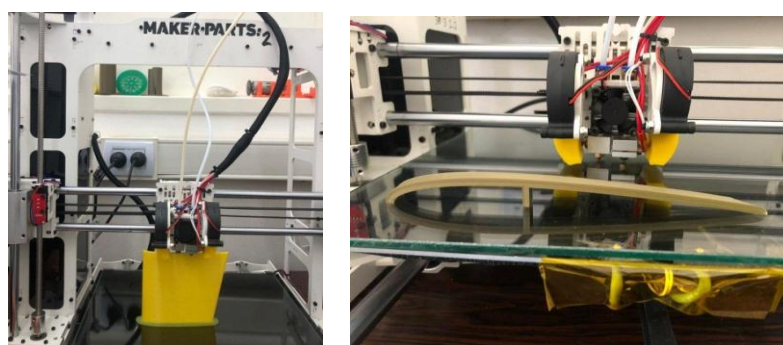


Figura 3.5 – Impresión 3D secciones contramolde.

Obtenidas todas las secciones, se montó sobre una matriz plana de madera MDF ambas mitades del álab. Uniendo las mismas a la matriz plana mediante el uso de cinta de sujeción de calidad espacial. Posteriormente, en los casos necesarios, se procedió a rellenar con resina las uniones de las secciones y finalmente se realizó un lijado progresivo, que pasó de granos más gruesos a granos más finos (100, 150, 240, 400, 600), para obtener una terminación final homogénea a lo largo de todo el álab.

Finalmente realizó una limpieza de la superficie para quitar cualquier resto de polvo provocado por el lijado, y se procedió a colocar 3 capas del agente desmoldante líquido, RELEASE ALL® SAFELEASE 30, espaciadas en unos 3 minutos de secado intermedio aproximado, para facilitar el desmolde y evitar que la resina se introduzca en los poros de la matriz plana y del PLA.

## METODOLOGÍA

### 3.3.2 Fabricación 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/m<sup>2</sup> en una matriz de resina poliéster insaturada.

#### 3.3.2.1 Tipo de laminado

Para la fabricación del molde se decidió hacer un laminado cuasi-isotrópico, para disponer de materiales con propiedades similares en cualquiera de las direcciones consideradas, aspecto de gran relevancia desde el punto de vista del diseño en ingeniería, ya que se trata de laminados simétricos (que evitan el alabeo o “warping”) y equilibrados (43).

En la Figura 3.6 se muestra la secuencia de apilamiento del laminado biaxial simétrico [0°,90°,±45°]<sub>s</sub>, se pueden apreciar las fibras orientadas en los diferentes ángulos para intentar alcanzar un comportamiento lo más cercano a la isotropía.

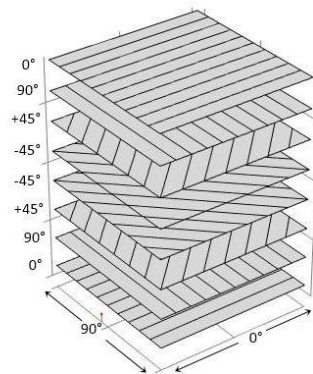


Figura 3.6- Secuencia apilamiento laminado

#### 3.3.2.2 Laminado del molde

A partir del diseño CAD y el contramolde se realizó, teniendo en cuenta el área y la densidad de la tela, los cálculos para definir la cantidad necesaria de fibra de vidrio y resina poliéster para construir el molde, los resultados obtenidos se muestran en Anexo 2.

La resina poliéster se mezcla con el catalizador en una relación del 1,5 %, es decir, cada 100 g de resina aplicamos 1,5 ml del catalizador. Posee un tiempo de gelificado 10- 15 minutos, y un curado total en 24 horas según la información dada por el proveedor.

Al realizar la mezcla de la resina con el catalizador, es muy importante darle el tiempo necesario a la resina para eliminar las burbujas producidas durante la mezcla de la misma con el catalizador. De lo contrario el aire atrapado en la resina entra en el refuerzo y debilita la pieza.

La estructura final del laminado compactado por vacío se puede apreciar en la Figura 3.7.

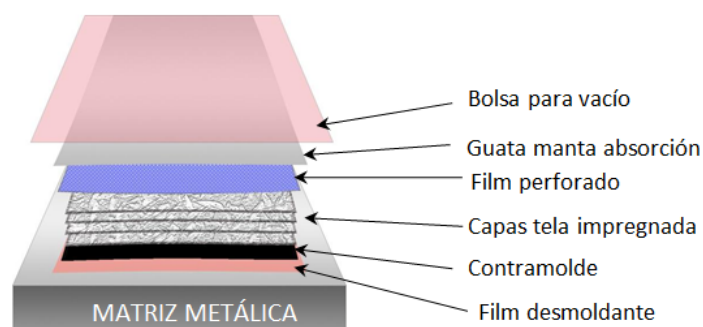


Figura 3.7- Estructura laminado molde

## METODOLOGÍA

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 3.6. Colocadas ambas capas, (0/90) (+45/-45), se impregnaron con resina adaptándolas a la forma del contramolde con la ayuda de espátulas y rodillos, tal como se observa en la Figura 3.8. Esto, a su vez, nos permitió eliminar las burbujas de aire presentes en el laminado llevándolas hacia los extremos del mismo.



Figura 3.8 - Proceso laminado molde.

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 3.7 y se procedió a conectarlo a la bomba de vacío verificando que no haya pérdidas, como se observa en la Figura 3.9, durante aproximadamente una hora. Pasada la hora, se apagó el vacío y se dejó curar a temperatura ambiente durante 7 días.

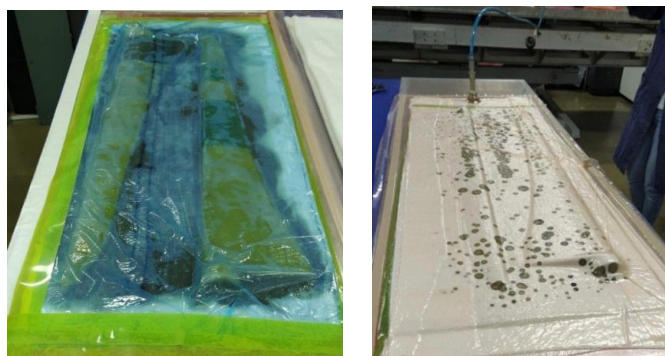


Figura 3.9 - Laminación cubierta film perforado (imagen izquierda), laminación sellada con vacío (imagen derecha).

### 3.3.2.3 Desmolde molde

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

### 3.3.2.4 Terminado superficial molde

La terminación superficial del molde consistió en pulir los defectos de mayor tamaño y enmasillar las imperfecciones generadas durante el desmolde. Del mismo modo se taparon con masilla las cabezas de los tornillos. Para finalizar se realizó un lijado progresivo (100, 150, 400 y 600) de toda la superficie hasta obtener una superficie lo más uniforme posible.

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, de acuerdo a las siguientes pautas;

## METODOLOGÍA

- Aplicar cera con un paño algodón por toda la superficie del molde, cuidando de no hacer aplicaciones muy espesas.
- Retirar el exceso de cera con otro paño limpio.
- Pulir la superficie hasta disminuir notoriamente la resistencia a la fricción.
- Esperar 20 minutos y repetir el procedimiento 11 veces más.

Finalmente se colocó cinta de teflón sobre los bordes del mismo para facilitar el desmolde de la pieza final.

### 3.3.3 Fabricación 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/m<sup>2</sup> en una matriz del sistema epoxi EPOKUKDO YD-128/KH-816.

#### 3.3.3.1 Laminado del álabes

Para el laminado del álabes se utilizó la misma secuencia de apilamiento que para el laminado del molde, presente en la Figura 3.6.

La resina epoxi adquirida tiene una relación de mezcla YD-128/KH-816=100/60 en peso, es decir, cada 100 g de resina aplicamos 60 g de endurecedor. Posee un tiempo de gel de 50 minutos, y un curado de 7 días a temperatura ambiente (20°C) según la información dada por el proveedor. El cálculo de las proporciones de fibra de vidrio y resina epoxi para construir el álabes se muestran en el Anexo 2.

La estructura final del laminado compactado por vacío se puede apreciar en la Figura 3.10.

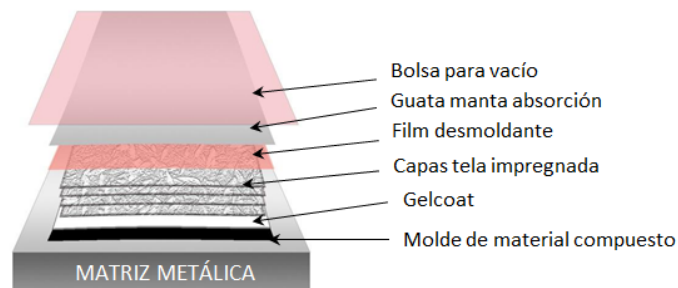


Figura 3.10- Estructura laminado pieza final

La parte posterior del molde se selló con guata y cinta, para brindarle un soporte al molde y evitar que al conectar el vacío la presión genere el colapso del mismo, tal como se observa en la Figura 3.11.

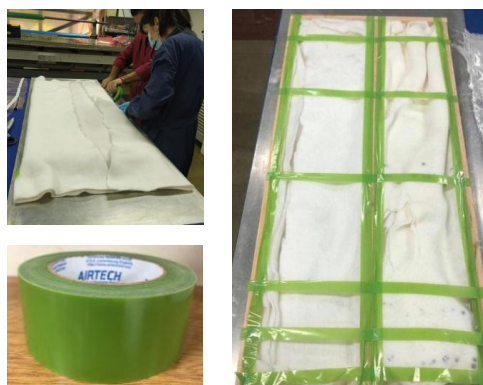


Figura 3.11- Sellado parte posterior del molde.

## METODOLOGÍA

Previo a iniciar el proceso de laminación del álabe se colocó sobre el molde, específicamente sobre ambas mitades del álabe, una fina capa de gel coat que dejamos curar unos minutos hasta que quede viscoso, tal como se observa en la Figura 3.12. De este modo el álabe 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.

El gel coat ortoftálico blanco, es una resina de poliéster pigmentada, se mezcla con el catalizador en una relación del 1,5 %. Presenta un rendimiento de 5 m<sup>2</sup>/kg según la información dada por el proveedor.



Figura 3.12 – Colocación del gel coat

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 3.6. Se impregnó una a una las capas de refuerzo adaptándolas al molde, como se ve en la Figura 3.13, 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.



Figura 3.13– Proceso laminado álabe

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.



Figura 3.14 – Laminado del álabe conectado al vacío (izquierda), desconectado al vacío luego de 30 min (derecho).

## METODOLOGÍA

### 3.3.3.2 Desmolde álabe

Pasados los 7 días de curado a temperatura ambiente se procedió a desmoldar la pieza aplicando presión con la ayuda de cuñas alrededor del perímetro del molde con mucho cuidado de no dañar la pieza. Una vez que la pieza se separó del molde se realizó una limpieza de la misma, para eliminar restos de masilla y agentes desmoldantes.

### 3.3.3.3 Terminado superficial y ensamble álabe

Con el fin de ajustar la pieza a su forma final, se procedió a rellenar los poros de mayor tamaño con resina epoxi y se realizó un lijado progresivo en toda la superficie (400,600 ,1000). Asimismo, antes del ensamble se cortaron ambos lados del álabe por separado dejando un borde de aproximadamente 2 cm alrededor de cada alabe para facilitar la posterior sujeción y adhesión de ambos.

Como se observa en la Figura 3.15, al momento de ensamblar el álabe se presentó la pieza final acoplando ambos lados del álabe mediante el uso de sargentos, y se realizaron los ajustes necesarios para que el acople entre ambos sea óptimo.



Figura 3.15 – Presentación acople pieza final

Para acoplar de forma definitiva el álabe se decidió realizar una unión mediante adhesivo, como se observa en la Figura 3.16. Posteriormente se procedió a inyectar mediante el uso de una manguera de PVC espuma de poliuretano a lo largo de todo el álabe (previamente humedecido) como núcleo del mismo.



Figura 3.16 – Colocación de adhesivo e inyección núcleo de espuma PU.

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

## METODOLOGÍA

cortado de bordes de sujeción y retiro de excesos de espuma de poliuretano, para luego aplicar por aspersión otra capa de gel coat. Tal como se observa en la Figura 3.17.



Figura 3.17- Terminado superficial álabe.

### 3.4 Caracterización del compuesto

A partir de las técnicas experimentales aplicadas, se logró la caracterización de los materiales compuestos empleados.

#### 3.4.1 Viscosidad

La viscosidad es uno de los parámetros que más interesa conocer en una resina, porque al momento de trabajar con laminados, afecta de una manera directa a la impregnación del refuerzo.

Los datos de viscosidad se obtuvieron mediante el uso de un viscosímetro rotacional MYR VR 3000 modelo V1 L, perteneciente a la División de Materiales Avanzados, CAC-CNEA. Estos viscosímetros permiten una rápida determinación de la viscosidad según ISO 2555 y normas ASTM. Los resultados obtenidos son compatibles con el método Brookfield (44). Asimismo, durante las mediciones se tomó la temperatura mediante una termocupla que forma parte del equipo.

#### 3.4.2 Caracterización mecánica

Determinación de la capacidad que tiene un material con defectos para resistir las fuerzas que se le aplican sin fracturarse, mediante la medida de la energía que el material puede absorber antes de fracturarse (45).

Esta técnica engloba experimentos de resiliencia, dureza, fatiga, torsión, tracción, compresión y flexión. Se trata de pruebas en las que se aplican fuerzas mecánicas de distinto tipo para comprobar las propiedades de durabilidad y resistencia de las sustancias (46).

##### 3.4.2.1 Ensayo de tracción

Este ensayo permite determinar la máxima resistencia a la tracción y la deformación a rotura del material cuando es sometido a un esfuerzo de tracción. A partir de la carga y el alargamiento de la probeta se realiza el diagrama de esfuerzo vs deformación, mediante el cual podemos analizar y comparar el comportamiento práctico con el teórico de las probetas.

El ensayo consiste en tomar una probeta normalizada del material entre las mordazas de una máquina de ensayos universal y estirarlo a velocidad constante, mientras se mide la carga y el desplazamiento, hasta que se produce la rotura.

Los ensayos de tracción se realizaron en una máquina de ensayos universal AG-100 kN Autograph Shimadzu, perteneciente al laboratorio SUR 100 de la División Materiales Avanzados de la Gerencia de Materiales del CAC-CNEA.

## METODOLOGÍA

### 3.4.2.1.1 Condiciones de ensayo

Estos ensayos se realizaron de acuerdo a la norma ASTM D3039/D3039M – 08 “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials” de la American Society for Testing and Materials con una velocidad estándar de desplazamiento del cabezal de 2 mm/min (47).

La misma establece el método de prueba para un ensayo de tracción dirigido a materiales compuestos laminados de matriz polimérica reforzada por fibras largas continuas o bien a un laminado equilibrado de fibra corta simétrico con respecto a la dirección del ensayo.

### 3.4.2.1.2 Preparación de probetas

Para el laminado de las probetas, se llevó a cabo el corte de 4 capas de fibra de vidrio E- glass biaxial cosida DB300, con una secuencia de apilamiento de acuerdo Figura 3.6, el cual es un laminado simétrico balanceado cuasi-isotrópico. La fibra se impregnó con 180 gr de resina epoxi y 108 g de endurecedor, utilizando la relación de mezcla 100:60 (48), se aplicó el método de laminación manual con compactación por vacío, como se muestra en la Figura 3.18.

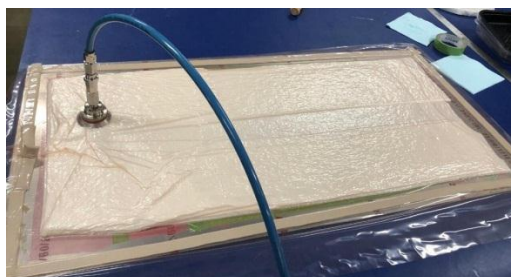


Figura 3.18– Laminado para obtener probetas del ensayo de tracción

Una vez pasados los 7 días de curado a temperatura ambiente, la placa obtenida mostró una variación de impregnación a lo largo de la superficie. Por lo que bajo las especificaciones de la norma ASTM D3039 se decidió realizar 8 probetas de material compuesto con alta impregnación (serie 1) y 6 probetas del material con bajo impregnado (serie 2). Cabe aclarar que la norma exige como mínimo cinco probetas de un mismo laminado, pero se decidió adicionar más a modo de reserva ante alguna falla en los ensayos de tracción por posibles deslizamientos de la mordaza.

En la Tabla 3.9 se muestran las medidas especificadas por ASTM D3039 para probetas de material compuesto con una orientación de fibra simétrica y balanceada.

| Orientación de la fibra | Ancho     | Longitud    | Espesor      |
|-------------------------|-----------|-------------|--------------|
|                         | mm [ in]  | mm [ in]    | mm [ in]     |
| Simétrica y balanceada  | 25 [ 1,0] | 250 [ 10,0] | 2,5 [ 0,100] |

Tabla 3.9- Geometría de probetas recomendada por ASTM D3039 para pruebas de tensión (47).

En base a la disponibilidad de material se decidió realizar 7 probetas reducidas, extraídas del material luego de someter al mismo a un post curado a 80 ° C durante 1,5 h (serie 3).

En la Figura 3.19, se pueden observar las tres series de probetas que serán sometidas a tracción para evaluar como varía el comportamiento mecánico en estas tres condiciones (alta impregnación, baja impregnación y post curado).

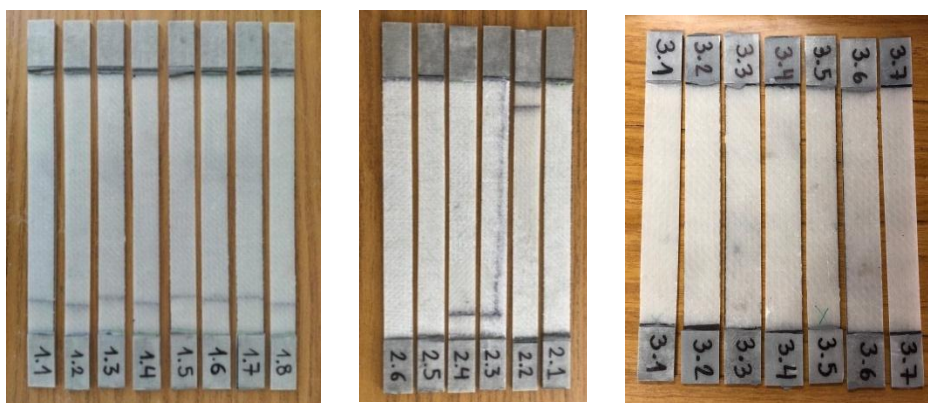


Figura 3.19- Probetas regidas bajo ASTM D3039. A la izquierda con alta impregnación (serie 1), en el centro con baja impregnación (serie 2) y a la derecha con post curado (serie 3).

A pesar de que la norma no establece el uso de tabs como obligatorios, se decidió colocarlos para mejorar el agarre probeta–mordaza y limitar la rotura a la zona de estudio.

Los tabs se adhirieron a la placa, antes de cortar la misma, mediante el uso del LOCTITE EA 9394 AERO, el cual es un adhesivo estructural en pasta de dos componentes, que cura a temperatura ambiente y posee una excelente resistencia hasta un poco más de 177°C (49).

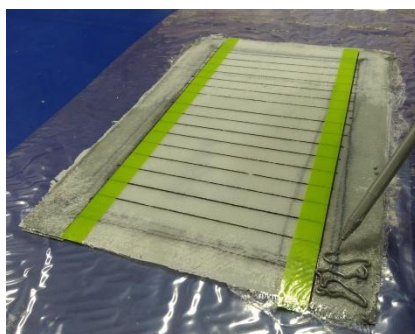


Figura 3.20- Aplicación de adhesivo y pegado tabs.

#### 3.4.2.1.3 Criterios de validación

Para la validación de los resultados obtenidos mediante el ensayo de tracción se consideraron dos criterios, el establecido por la norma ASTM D3039 y el método estadístico “Grubbs test for Outlying Observations”.

La norma ASTM D3039 estipula que es necesario contar con cinco ensayos efectivos para validar los resultados. Excluyendo aquellos donde la rotura se produzca dentro del tab o debido a la presencia de un algún defecto evidente, a menos que dicho defecto constituya una variable de estudio (47).

El método estadístico “Grubbs test for Outlying Observations”, es una prueba estadística que se puede utilizar para identificar la presencia de un valor atípico en un conjunto de datos descartando el valor T más alto de los datos analizados. Éste se calculó por medio de la ecuación 22 (50).

$$T = \frac{|\bar{X}_n - X_i|}{\sigma_n} \quad (\text{Ecuación 21})$$

T: error implicado en la eliminación

$\sigma_n$ : Desviación estándar de las muestras

$\bar{X}_n$ : Valor medio de las muestras

$X_i$ : Valor de la muestra i

## METODOLOGÍA

### 3.4.3 Técnicas microscópicas

Las técnicas de microscopía son el conjunto de procedimientos de investigación que utilizan un microscopio para obtener imágenes de determinadas estructuras, las cuales, por ser demasiado pequeñas, resultan inapreciables a simple vista para el ojo humano.

#### 3.4.3.1 Microscopía óptica (MO)

La microscopía óptica nos permite conocer la microestructura de los materiales compuestos mediante la interacción con un haz de luz (fotones). Los aumentos en MO vienen dados por el producto de la magnificación de los oculares con la de las lentes-objetivos (51).

Las micrografías se obtuvieron mediante el uso un microscopio óptico, modelo Olympus BX60: transmisión-reflexión, campo claro-campo oscuro y con luz polarizada en modo de transmisión y un sistema de adquisición de imágenes digital, perteneciente a la Gerencia de Materiales CAC-CNEA.

##### 3.4.3.1.1 Preparación de muestras

Con el fin de preparar las muestras a ser analizadas se procedió a la inclusión de las probetas en un acrílico auto curable (mezcla polímero/monómero), y se añadió colorante en pasta amarillo para generar mayor contraste.

Asimismo, la preparación superficial para la microscopía óptica requiere del lijado y pulido de las muestras. En primera instancia, se realizó un desbaste progresivo con abrasivos de granulometría cada vez más fina (220, 400,600), como lubricante se utilizó agua. La calidad de acabado superficial apropiada para una observación microscópica se alcanzó a través de pulido con paños de pasta de diamante (6  $\mu\text{m}$ , 1 $\mu\text{m}$ ).

Las dos muestras incluidas se observan en la Figura 3.21.

- La muestra 1.8 pertenece a las probetas con alta impregnación generadas para el ensayo de tracción.
- La muestra 2.1 pertenece a las probetas con baja impregnación generadas para el ensayo de tracción.

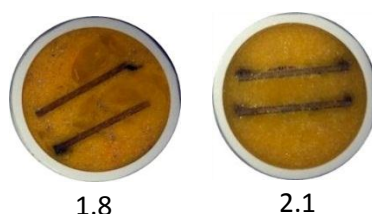


Figura 3.21 - Muestras incluidas y pulidas para la observación en microscopio óptico.

##### 3.4.3.1.2 Análisis de imágenes digitales con ImageJ

A partir de las imágenes digitales obtenidas con MO, como la que se muestra en la Figura 3.22, se pueden detectar las diferentes fases presentes. Por lo que se realizó un análisis estructural de los laminados incluidos mediante el cual se identificó el contenido en fibra, en resina y en poros del material compuesto.

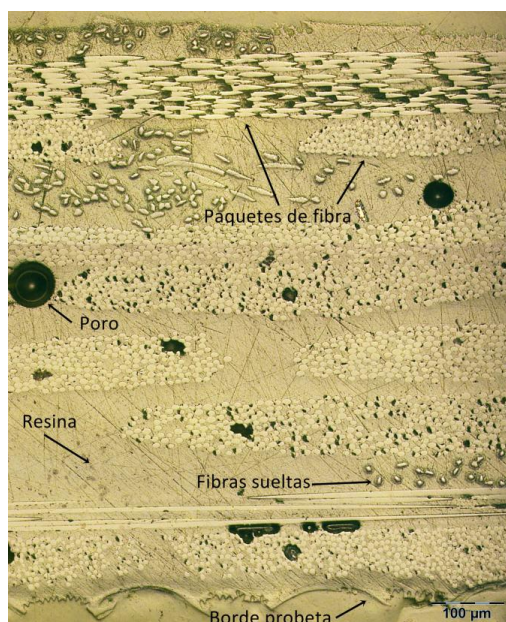


Figura 3.22 – Imagen digital de microscopio óptico.

Para identificar las fases presentes en el material se utilizó el software de análisis de imagen ImageJ. Este programa ha sido desarrollado por Wayne Rasban del National Institutes of Health (NIH) (52), bajo licencia libre.

El procesado de las imágenes se inició con una transformación de color a escala de grises de 8 bits (52). El siguiente paso implicó una corrección de la imagen mediante un ajuste de brillos y contraste. Una vez obtenido el contraste buscado, se aplicó la herramienta *Threshold*, que nos permitió marcar cada fase en un color específico correspondiente a un rango de grises determinado.

Esta diferenciación por colores se encuentra correlacionada con las distintas fases presentes en el material compuesto, y nos permitió estimar gráficamente la relación refuerzo-matriz y el contenido de poros presentes en el laminado.

A la hora de identificar los poros, se tuvo en cuenta el fenómeno óptico denominado disco de Airy. Este consiste en que la luz, debido a su carácter ondulatorio, tras atravesar una apertura circular se difracta produciendo un patrón de interferencia en el cual se reconoce en el centro un punto brillante y concéntrico a él discos iluminados.

### 3.4.3.1.3 Microestructura

De acuerdo a los autores consultados (53; 54; 55) los refuerzos, en nuestro caso la fibra de vidrio, se encuentran normalmente en concentraciones entre el 40 y 70 %. Existiendo un límite práctico de alrededor del 70% de fibra, ya que a porcentajes más altos hay muy poca matriz para soportar eficazmente las fibras. Siendo la proporción óptima de fibra y resina de un 60% de fibra y un 40% de resina.

Al evaluar la porosidad, se busca concentraciones menores al 10%. La aparición de poros está asociada a las burbujas de aire generadas durante la mezcla resina-endurecedor y al atrapamiento de burbujas entre las láminas. Es importante destacar que los poros actúan como intensificadores de tensión y tienen un gran impacto en las propiedades mecánicas del material. A su vez, un laminado con alto contenido de poros tendrá una propagación de grietas más fácil, así como una unión más débil entre la fibra y la matriz. Lo que provocará una reducción de las propiedades mecánicas del material (56; 53).

### 3.4.4 Técnicas espectroscópicas / caracterización química

El fundamento de estas técnicas experimentales es el estudio de los espectros de la radiación electromagnética que emiten o absorben las sustancias al ser irradiados con una onda.

## METODOLOGÍA

### 3.4.4.1 Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR)

La técnica de FT-IR consiste en hacer incidir un haz IR a través de la muestra y, por medio de un detector, analizar en qué frecuencias se produce absorción de energía.

Las bandas de absorción observadas en un espectro infrarrojo de un compuesto corresponden a las frecuencias de vibración de los enlaces entre los átomos de la molécula. Como cada molécula es una combinación única de átomos y enlaces, el espectro infrarrojo es una identificación de cada compuesto (57). Por lo que esta técnica, en conjunto con la viscosidad, se utilizó para autenticar la información brindada por el proveedor sobre la composición de las resinas.

Los espectros FT-IR fueron obtenidos con un equipo Spectrum Two de Perkin Elmer, perteneciente a la División Materiales Avanzados de la Gerencia de Materiales del CAC-CNEA, en el modo de Reflectancia Total Atenuada (ATR) con ventana de cristal de diamante y reflexión simple.

#### 3.4.4.1.1 Preparación de muestras

Antes de medir el espectro de las muestras se registró un espectro con el muestreador ATR sin muestra, para obtener el espectro de fondo. Esto nos permitió eliminar las interferencias de H<sub>2</sub>O y el CO<sub>2</sub> atmosférico, de las muestras tomadas a continuación;

##### Muestras líquidas

- Resina epoxi Y- 128 sin curar
- Endurecedor KH-816
- Resina epoxi y endurecedor a tiempo inicial de mezcla (t=3 min) relación 100:60.
- Resina poliéster sin curar
- Gel coat sin curar
- Endurecedor genérico (mismo para poliéster y gel coat)

##### Muestras sólidas

- Mezcla curada de resina epoxi Y-128 /endurecedor KH-816, relación 100:60.
- Mezcla curada gel coat / endurecedor genérico, relación 1,5% masa en volumen.

#### 3.4.4.1.2 Análisis de espectros

Una vez obtenidos los espectros se les aplicó la corrección de la línea base, la cual asegura un punto de referencia antes de iniciar cualquier colección de datos (58). Asimismo, se aplicó un tratamiento de normalización a los espectros; cabe recordar que normalizar un espectro significa dividir la absorbancia a cada longitud de onda por un número elegido arbitrariamente de acuerdo a la conveniencia de cada caso. En este trabajo, los espectros fueron normalizados dividiendo por la absorbancia de uno de sus máximos de absorbancia (59).

Posteriormente, se procedió a identificar los grupos funcionales presentes mediante el análisis de los espectros infrarrojos y su comparación con la biblioteca de espectros IR KnowItAll® y referencias de picos en bibliografía y/o publicaciones científicas.

### 3.4.5 Caracterización térmica

El análisis térmico se basa en la medida de las propiedades químicas o físicas de un material en función de la temperatura.

#### 3.4.5.1 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

La calorimetría de barrido diferencial mide las diferencias entre la cantidad de calor absorbido o desprendido entre una sustancia y una referencia en función de la temperatura cuando ambas son sometidas a un calentamiento generalmente a velocidad constante.

## METODOLOGÍA

Para el caso de resinas termorígidas, esta técnica de análisis se emplea para determinar la entalpía de reacción de curado, el grado de curado (% de reacción química de entrecruzado o reticulación), la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) y la temperatura de degradación. Para otros materiales también resulta útil para determinar parámetros tales como la temperatura de cristalización o de fusión del polímero.

Los análisis de DSC se realizaron en un equipo marca Shimadzu modelo DSC-60A perteneciente al Laboratorio de Materiales Fabricación de aleaciones Especiales del Dto. de Tecnología del Circonio de CAE-CNEA. El mismo que fue calibrado con indio, que funde a  $156^\circ\text{C}$ . El equipo nos permitió extraer los resultados de las corridas como tablas con datos numéricos de la variación de entalpía en función de la temperatura.

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 3.10.

|                            |                               |
|----------------------------|-------------------------------|
| Flujo Nitrógeno            | 50 ml/mm                      |
| Velocidad de calentamiento | $10^\circ\text{C}/\text{min}$ |
| Intervalo temperatura      | T amb - $250^\circ\text{C}$   |

Tabla 3.10 - Condiciones corrida ensayo DSC.

### 3.4.5.1.1 Preparación de muestras

Con el fin de preparar las muestras a ser analizadas se procedió a realizar la mezcla resina y endurecedor según la relación 100:60, brindada por el proveedor. Luego se colocó la mezcla en 14 crisoles de aluminio, como los que se muestran en la Figura 3.23.

Para cada condición establecida se realizaron dos crisoles con el fin de poder respaldar los resultados en caso de ser necesario. Se pesaron los crisoles antes y después de colocar la mezcla para obtener el peso real de la muestra y especificarlo en cada corrida del equipo.



Figura 3.23 – Crisoles específicos para DSC.

### 3.4.5.1.2 Estudios de curado mediante 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 3.11, se resumen los tiempos y temperaturas correspondientes a cada condición ordenadas en orden creciente de grado de curado.

| Curado | Tiempo    | Temperatura                                |
|--------|-----------|--------------------------------------------|
| 1      | 7 días    | $20^\circ\text{C} \approx \text{ambiente}$ |
| 2      | 1,5 horas | $60^\circ\text{C}$                         |
| 3      | 1,5 horas | $80^\circ\text{C}$                         |
| 4      | 1,5 horas | $100^\circ\text{C}$                        |
| 5      | 1,5 horas | $120^\circ\text{C}$                        |

Tabla 3.11 – Tiempos y temperaturas de curado resina epoxi.

Con el fin de evitar procesos de envejecimiento físico, se almacenaron las muestras bajo condiciones controladas, de acuerdo a la norma ASTM E1356 – 08 (Reapproved 2014) “Standard

## METODOLOGÍA

Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperatures by Differential Scanning Calorimetry” (60).

Asimismo, se estudió un caso en estado líquido al mezclarse la resina epoxi Y- 128 y el endurecedor KH-816, a tiempo inicial de mezcla. Como se indica en la Tabla 3.12.

| Sin curar | Tiempo | Temperatura      |
|-----------|--------|------------------|
| 1         | 2 min  | 20 °C ≈ ambiente |

Tabla 3.12 – Tiempos resina epoxi sin curar

### 3.4.5.1.3 Análisis de resultados

Los datos extraídos se procesaron mediante el uso de Origin®, un software de análisis de datos y generación de gráficos. Este nos permitió realizar gráficos para comparar las temperaturas de transición vítrea (Tg) obtenidas a las distintas temperaturas de curado, la aparición de picos endotérmicos y el grado de curado de las muestras.

#### 3.4.5.1.3.1 Grado de curado

El grado de curado,  $\alpha$ , es la cantidad de calor convertido dividido por la entalpía de reacción. En las muestras ya curadas (parcialmente) se puede determinar mediante la entalpía residual ( $\Delta H_R$ ), mientras que la entalpía de reacción total ( $\Delta H_T$ ) se calcula en base a la generada por la muestra sin curar (61). Entonces, el grado de curado se puede calcular como:

$$\alpha = \frac{(\Delta H_T - \Delta H_R)}{\Delta H_T} \quad (\text{Ecuación 22})$$

#### 3.4.5.1.3.2 Obtención línea base

Para determinar  $\Delta H$  es necesario establecer una línea de base que se ajuste a cada curva DSC y nos permita determinar el área bajo la curva. En el presente trabajo se analizaron dos métodos para obtenerla.

El primero fue mediante el analizador de picos de Origin®, que es capaz de crear y sustraer líneas de base. El método que se seleccionó para determinar la línea base fue el de la 1<sup>era</sup> y la 2<sup>da</sup> derivada, el cual a partir de puntos mínimos de anclaje que se establecen de forma automática o manual y que luego se conectan a través de una interpolación traza la línea de base (62), como se observa en la Figura 3.24.

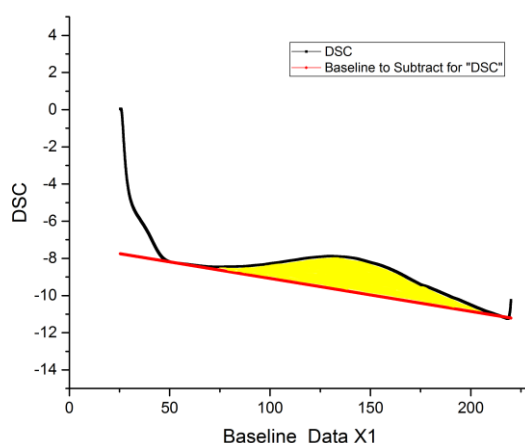


Figura 3.24 – Interpolación línea base (curva roja) con curva DSC sistema epoxi (curva negra).

El segundo método se basa en lo que plantea U. Bandara en *“A SYSTEMATIC SOLUTION TO THE PROBLEM OF SAMPLE BACKGROUND CORRECTION IN DSC CURVES”*, implementado mediante un método iterativo en Excel por Daniel Arcone de la División Materiales Avanzados de la Gerencia de Materiales del CAC-CNEA.

## METODOLOGÍA

Este método asegura que al plantear la línea base como una línea recta, esta puede no representar necesariamente el área real de la muestra, porque el calor específico del sistema durante la transición térmica depende tanto del grado de conversión actual como de la temperatura (63). Por lo que plantea un análisis iterativo a partir de la (Ecuación 23, donde se obtienen diferentes soluciones  $F_{(1, 2, \dots, n)}$ , hasta llegar a una solución final que no cambie significativamente en las próximas iteraciones, como observa en la Figura 3.25.

$$F(t) = \frac{\int_0^t \{G(t) - F(t)\} dt}{\int_0^{t_p} \{G(t) - F(t)\} dt} \{P_2(t) - P_1(t)\} + P_1(t) \quad (\text{Ecuación 23})$$

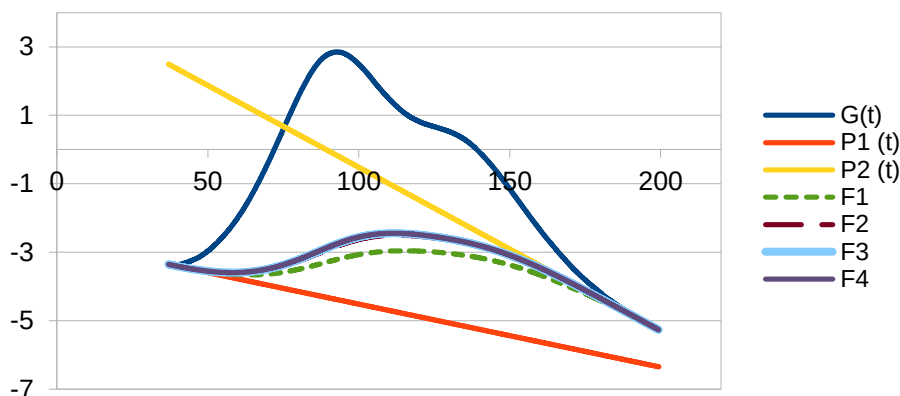


Figura 3.25 – Aplicación método Bandera para curva DSC sin curar.

### 3.4.5.1.3.3 Temperatura de Transición vítrea ( $T_g$ ) (64)

La  $T_g$  se determinó mediante los siguientes criterios:

- 1) Temperatura umbral ( $T_f$ ) (*onset*); Consiste en extrapolar la línea base antes de la transición y la línea base durante el primer salto (tangente a la curva), el corte de ambas rectas es la  $T_g$ .
- 2) Temperatura mitad de la  $\Delta C_p$  ( $T_m$ ) (*midpoint*); Consiste en extrapolar la línea base antes, durante y después del salto. La bisectriz de la línea que une los dos puntos obtenidos es la  $T_g$ .
- 3) Temperatura en el punto de inflexión de la curva ( $T_i$ ); Consiste en derivar la curva y determinar el punto de inflexión de la misma, que es la  $T_g$ .

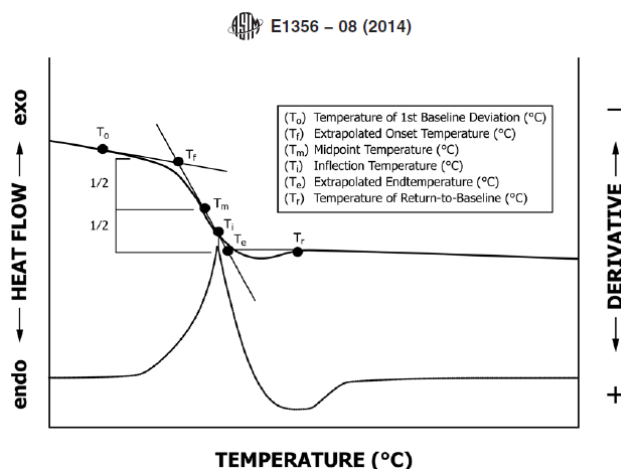


Figura 3.26 – Criterios para tomar valor  $T_g$  (60).

## RESULTADOS

### 3.4.5.1.3.4 Curado y post curado

Cuando el grado de curado  $\alpha = 1$ , podemos decir que la  $T_g = T_{g\infty}$ . Considerando que la  $T_{g\infty}$  se puede definir como la  $T_g$  del material completamente curado o como la temperatura máxima a la cual el material vitrifica (61). La  $T_{g\infty}$  viene determinada por varios factores: la estructura química de la resina epoxi, el tipo de endurecedor y el grado de curado (65).

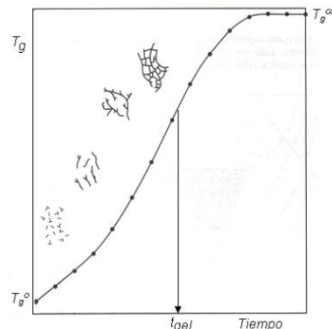


Figura 3.27 - Transformaciones físicas y evolución de la  $T_g$  durante la reticulación a una temperatura de curado próxima a  $T_{g\infty}$  (65).

En la Figura 3.27 se muestra la evolución de la  $T_g$  del sistema con el avance de la reacción, así como la transformación que experimenta el sistema durante el curado a una temperatura de curado próxima a  $T_{g\infty}$  (66).

Si después de un tratamiento de curado  $\alpha \neq 1$ , podemos decir que el material está parcialmente curado y para alcanzar la  $T_{g\infty}$  requeriría de un post curado. El objetivo del post curado es aumentar la  $T_g$  del sistema epoxi por medio de la reticulación completa, esto se consigue sometiendo al material durante un cierto tiempo, a una temperatura superior a su  $T_{g\infty}$ . No obstante, es importante señalar que no es conveniente mantener al sistema a una temperatura igual o superior a su  $T_{g\infty}$  ya que no se puede sobrepasar su máxima reticulación, definida por su estructura química, y en todo caso se producirá degradación térmica, disminuyendo las propiedades del producto final (66).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Diseño alabe aerogenerador eje horizontal

#### 4.1.1 Análisis aerodinámico con QBlade® y Flow Simulation

En función de los datos obtenidos se construyen las gráficas correspondientes al comportamiento de los perfiles seleccionados.

Los resultados obtenidos mediante QBlade® se muestran a continuación;

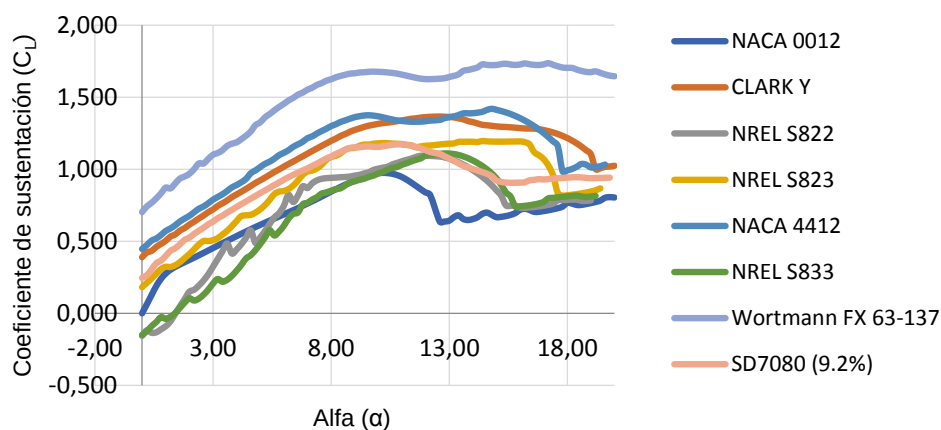


Gráfico 4.1 - Coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque "Alpha" para  $Re=109.007$

## RESULTADOS

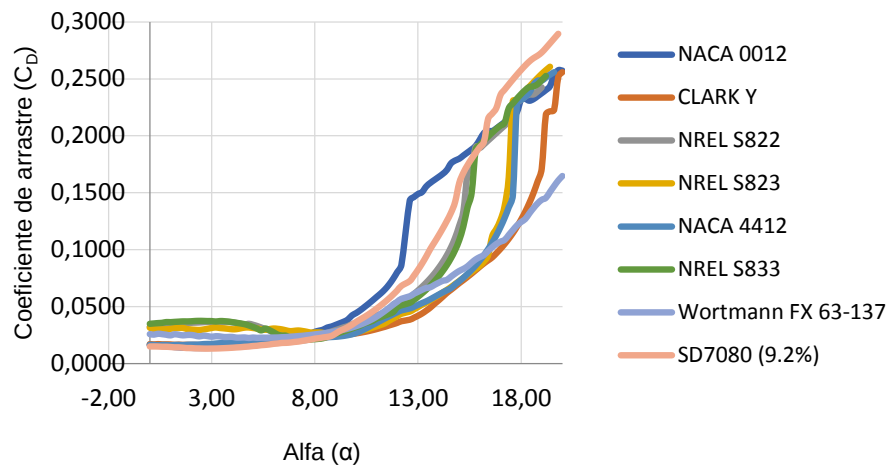


Gráfico 4.2 - Coeficiente de arrastre en función del ángulo de ataque "Alpha" para  $Re=109.007$ .

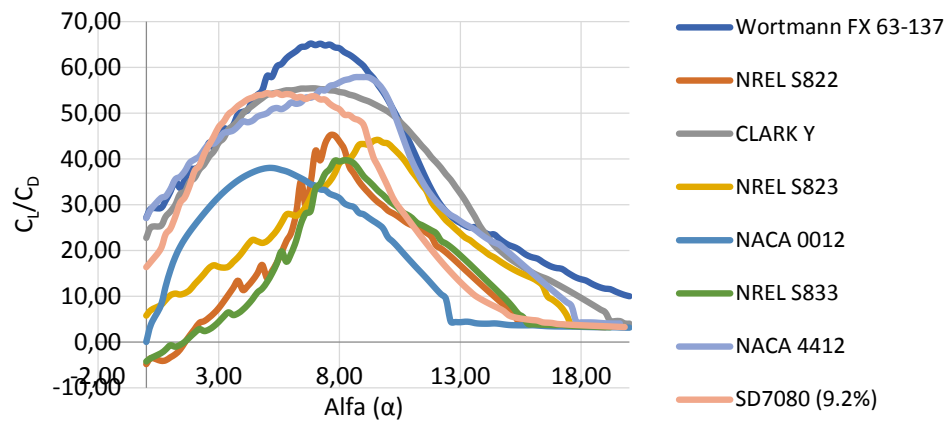


Gráfico 4.3- Relación  $C_L/C_D$  en función del ángulo de ataque "Alpha" para  $Re=109.007$ .

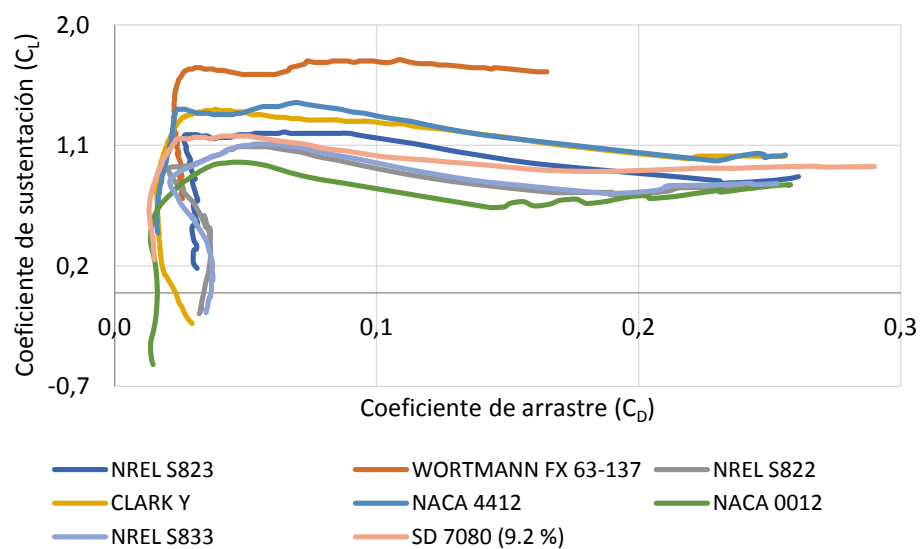


Gráfico 4.4 - Curvas polares a  $Re=109.007$ .

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos mediante Flow Simulation SolidWorks® se muestran a continuación;

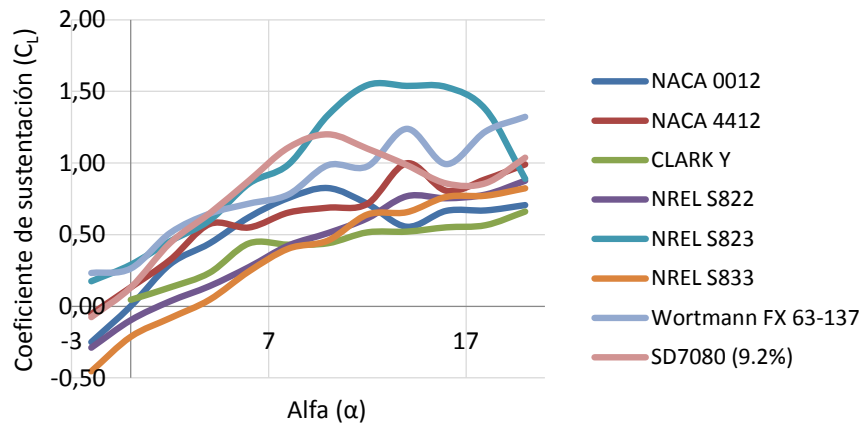


Gráfico 4.5 - Coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque "Alpha" para  $Re=109.007$ .

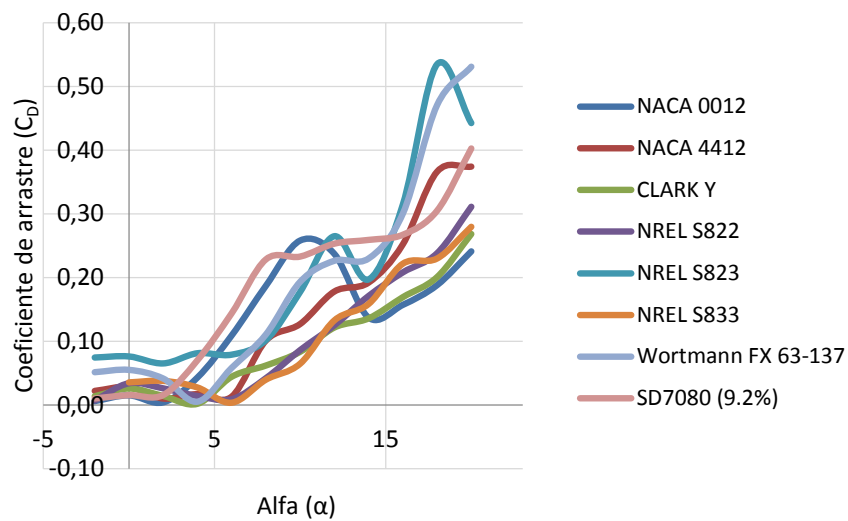


Gráfico 4.6- Coeficiente de arrastre en función del ángulo de ataque "Alpha" para  $Re=109.007$ .

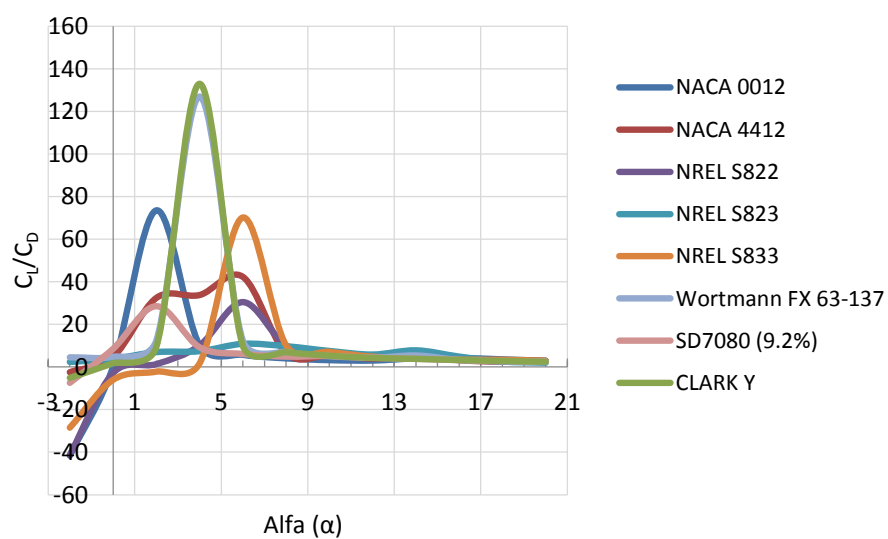


Gráfico 4.7- Relación  $C_L/C_D$  en función del ángulo de ataque "Alpha" para  $Re=109.007$ .

## RESULTADOS

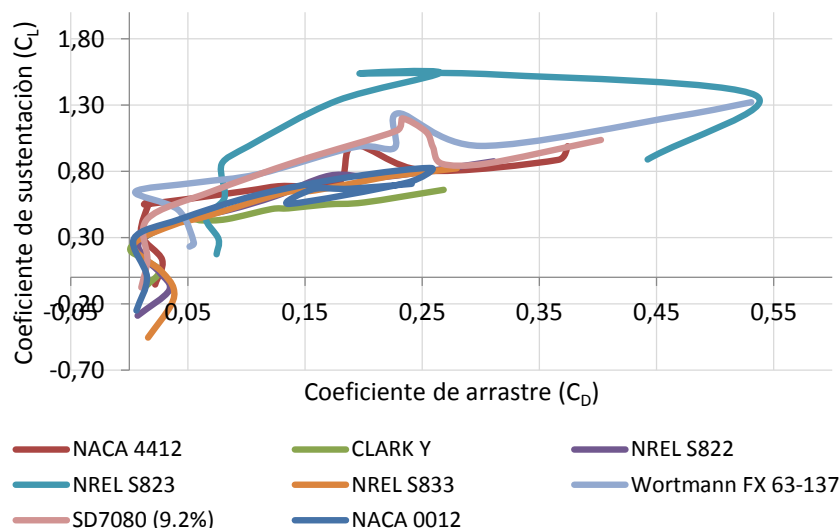


Gráfico 4.8 - Curvas polares a  $Re=109.007$ .

### 4.1.2 Comparación de los perfiles mediante QBlade® y SolidWorks® Flow Simulation

En la Tabla 4.1 se encuentran los valores de los coeficientes de sustentación y arrastre, obtenidos mediante QBlade® y SolidWorks® Flow Simulation, de los perfiles seleccionados considerando el ángulo de ataque óptimo ( $\alpha_{OP}$ ) para cada caso. El ángulo de ataque óptimo para cada perfil, es aquel que hace máximo el cociente  $C_L/C_D$  y con el que se consigue una mejor relación entre sustentación y empuje, es decir una mejor eficiencia aerodinámica (67).

| Perfiles           | QBlade® |       |                    |                          | SolidWorks® FS |       |                    |                          |
|--------------------|---------|-------|--------------------|--------------------------|----------------|-------|--------------------|--------------------------|
|                    | $C_L$   | $C_D$ | $(C_L/C_D)_{máx.}$ | $\alpha_{OP} (^{\circ})$ | $C_L$          | $C_D$ | $(C_L/C_D)_{máx.}$ | $\alpha_{OP} (^{\circ})$ |
| NACA 0012          | 0,629   | 0,017 | 38,0               | 5,2                      | 0,531          | 0,076 | 73,5               | 2                        |
| NACA 4412          | 1,351   | 0,023 | 57,9               | 8,8                      | 0,654          | 0,101 | 42,3               | 6                        |
| NREL S822          | 0,934   | 0,021 | 45,1               | 7,6                      | 0,424          | 0,042 | 30,4               | 6                        |
| NREL S823          | 1,171   | 0,027 | 44,2               | 9,6                      | 1,334          | 0,177 | 10,9               | 6                        |
| NREL S833          | 0,862   | 0,022 | 39,7               | 8,2                      | 0,402          | 0,040 | 70,2               | 6                        |
| CLARK Y            | 1,090   | 0,020 | 55,4               | 6,8                      | 0,439          | 0,044 | 139,9              | 4                        |
| SD7080 (9.2%)      | 0,872   | 0,016 | 54,4               | 5,4                      | 0,877          | 0,080 | 28,5               | 2                        |
| Wortmann FX 63-137 | 1,532   | 0,024 | 65,2               | 6,8                      | 0,780          | 0,058 | 126,9              | 4                        |

Tabla 4.1- Resultados obtenidos mediante QBlade® y SolidWorks® Flow Simulation.

En el Anexo 3 se encuentran los gráficos comparativos entre ambas simulaciones, donde se observa el comportamiento de los coeficientes de sustentación y arrastre con respecto al ángulo de ataque, y la curva polar de cada perfil. Permitiendo el contraste de los valores obtenidos mediante ambos software.

### 4.1.3 Elección del perfil<sup>3</sup>

Una vez analizadas las relaciones entre  $C_L$ ,  $C_d$  y  $C_L/C_d$  para diferentes ángulos de ataque  $\alpha$  es posible hacer un resumen de las características más resaltantes de los 8 perfiles tal y como se muestra en la Tabla 4.2, a fin de poder seleccionar el más indicado según los criterios antes mencionados.

<sup>3</sup> Para la elección del perfil se analizaron los gráficos obtenidos mediante QBlade®, debido a las limitaciones de cálculo presentadas por SolidWorks®.

## RESULTADOS

| Tipo de Perfil     | Características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NACA 0012          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Buen rango de valores de <math>\alpha</math> comprendido entre <math>8^\circ &lt; \alpha &lt; 12^\circ</math> en donde se mantiene la sustentación.</li> <li>Valor de <math>C_d</math> bajo de 0,017.</li> <li>El valor de la relación <math>C_l/C_d</math> es de 38,1 con un <math>\alpha = 4 - 8^\circ</math>.</li> <li>Perfil simétrico, de bajo costo debido a su fácil construcción.</li> </ul> |
| NACA 4412          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Rango de valores del ángulo de ataque para obtener valores altos de <math>C_l</math> buenos, comprendido entre <math>8^\circ</math> y <math>12^\circ</math>.</li> <li>Valor de <math>C_d</math> bajo de 0,023.</li> <li>El valor de la relación <math>C_l/C_d</math> es de 57,9 con <math>\alpha</math> entre <math>8.5 - 9^\circ</math>.</li> <li>Perfil asimétrico.</li> </ul>                     |
| NREL S822          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Rango reducido de valores de ángulo de ataque <math>12^\circ &lt; \alpha &lt; 14^\circ</math>.</li> <li>Valor de <math>C_d</math> mínimo de 0,021.</li> <li>El valor de la relación <math>C_l/C_d</math> es de 45,1 con un <math>\alpha = 7,6^\circ</math>.</li> <li>Familia de perfiles con S823</li> </ul>                                                                                         |
| NREL S823          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Amplio rango de valores de ángulo de ataque, <math>9^\circ &lt; \alpha &lt; 16^\circ</math> en donde se mantiene la sustentación.</li> <li>Valor <math>C_d</math> mínimo de 0,027.</li> <li>El valor de la relación <math>C_l/C_d</math> máx. es de 44,2 con un <math>\alpha = 9,6^\circ</math>.</li> <li>Familia de perfiles con S822.</li> </ul>                                                   |
| NREL S833          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Rango reducido de valores de ángulo de ataque <math>12^\circ &lt; \alpha &lt; 14^\circ</math>.</li> <li>Valor <math>C_d</math> mínimo de 0,022.</li> <li>El valor de la relación <math>C_l/C_d</math> es de 39,7 con un <math>\alpha = 8,2^\circ</math>.</li> <li>Construcción compleja debido a la forma cóncava-convexa del vientre del perfil.</li> </ul>                                         |
| CLARK Y            | <ul style="list-style-type: none"> <li>Amplio rango de valores de ángulo de ataque, <math>10^\circ &lt; \alpha &lt; 16^\circ</math> en donde se mantiene la sustentación.</li> <li>Valor <math>C_d</math> mínimo de 0,020.</li> <li>El valor de la relación <math>C_l/C_d</math> es de 55,4 con <math>\alpha</math> entre <math>5 - 8^\circ</math>.</li> <li>Ventre plano, el cual facilita la construcción.</li> </ul>                     |
| SD7080 (9,2%)      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Buen rango de valores de <math>\alpha</math> para <math>Re = 100.000</math>, comprendido entre <math>8^\circ &lt; \alpha &lt; 12^\circ</math> en donde se mantiene la sustentación.</li> <li>Posee el <math>C_d</math> más pequeño de los 8 perfiles, con un valor de 0,016.</li> <li>El valor de la relación <math>C_l/C_d</math> máx. es de 54,5.</li> </ul>                                       |
| Wortmann FX 63-137 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Posee el rango de ángulos de ataque más amplio de los 8 perfiles estudiados, <math>8^\circ &lt; \alpha &lt; 20^\circ</math>.</li> <li>El <math>C_d</math> mínimo es de 0,024.</li> <li>Presenta la relación <math>C_l/C_d</math> más alta con un valor de 65,2.</li> <li>Construcción compleja debido a la forma cóncava-convexa del vientre del perfil.</li> </ul>                                  |

Tabla 4.2 - Comparación final entre perfiles.

### 4.1.4 Diseño aerodinámico alabe

#### 4.1.4.1 Dimensionamiento álabe

La Tabla 4.3, la Figura 4.1 y el Gráfico 4.9, describen la geometría y demás parámetros de diseño del álabe.

|                         |                 |
|-------------------------|-----------------|
| Área rotor ( $m^2$ )    | 2,70            |
| Radio alabe (m)         | 1               |
| Cantidad alabes         | 3               |
| Perfil aerodinámico     | NACA 0012       |
| Distribución cuerda (m) | ver Gráfico 4.9 |

Tabla 4.3 – Parámetros dimensionamiento del álabe y rotor.

## RESULTADOS

El álabe se dividió en 12 secciones aerodinámicas, contando la sección circular de la base, tal como se observa en la Figura 4.1.

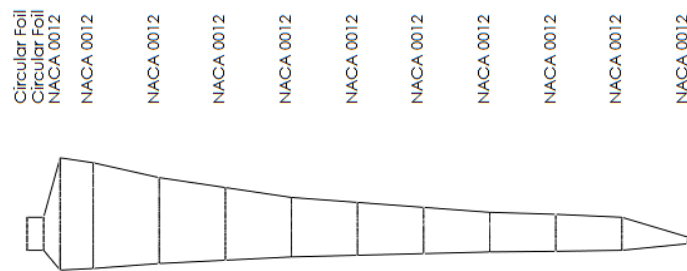


Figura 4.1- Secciones álabe.

En el Gráfico 4.9 se observa la distribución de la cuerda a lo largo del álabe.

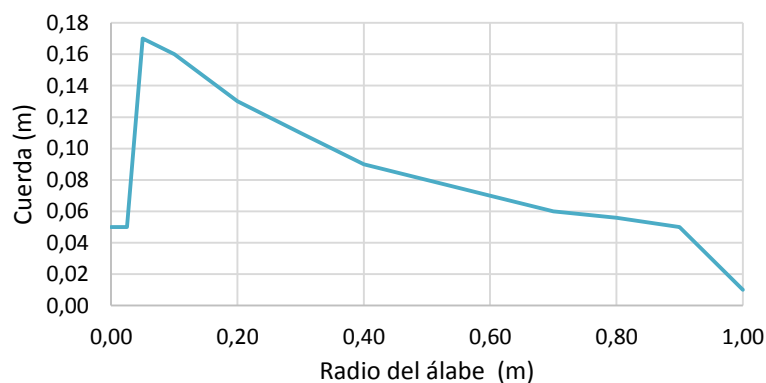


Gráfico 4.9 - Distribución de la cuerda a lo largo del álabe.

En el Anexo 1 se encuentra el plano con las dimensiones generales del álabe graficado en SolidWorks® 3D CAD.

### 4.1.4.2 Análisis aerodinámico

En los Gráfico 4.10, Gráfico 4.11, Gráfico 4.12 y Gráfico 4.13, se establece el comportamiento del rotor en operación, y en la Tabla 5.1 se pueden observar los parámetros de desempeño alcanzados para la velocidad nominal 12 m/s.

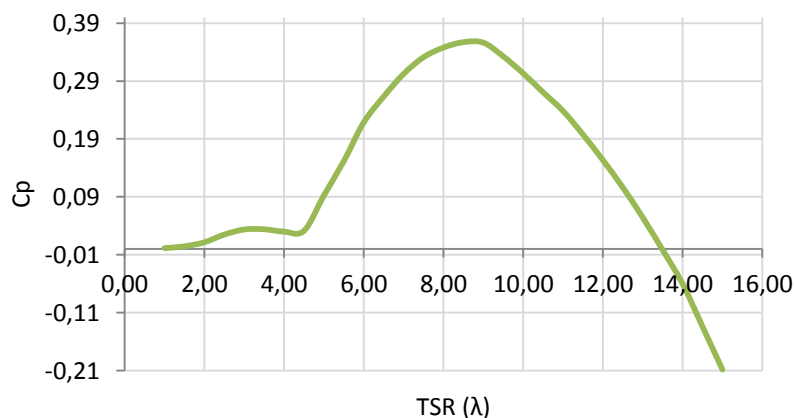


Gráfico 4.10 -Coeficiente de potencia ( $C_p$ ) en función de velocidad específica TSR ( $\lambda$ ).

## RESULTADOS

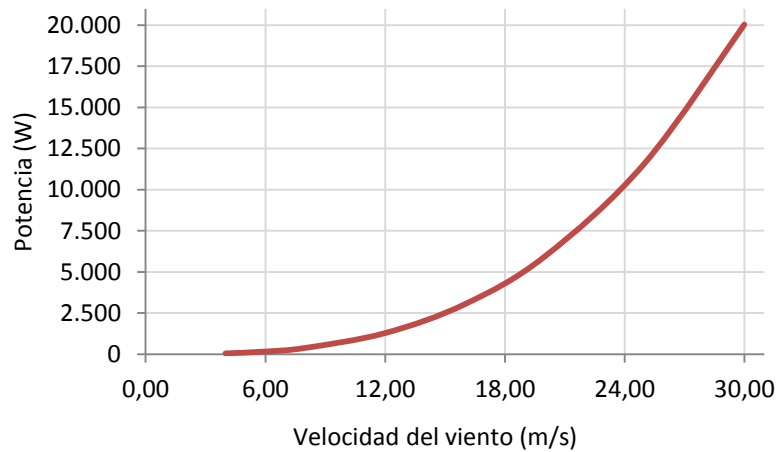


Gráfico 4.11 - Potencia generada por el rotor en función de la variación de la velocidad del viento.

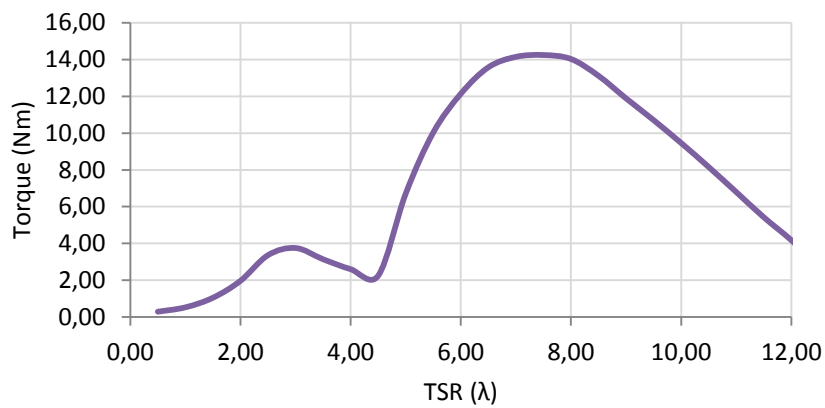


Gráfico 4.12 -Torque en función de velocidad específica TSR ( $\lambda$ ).

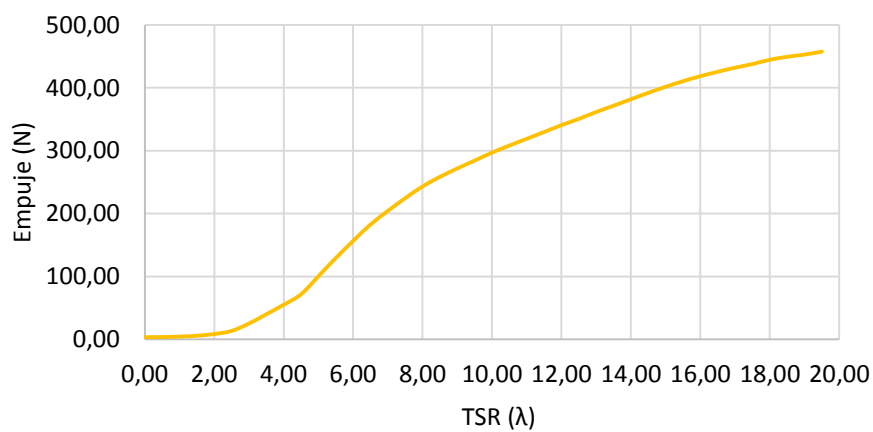


Gráfico 4.13 -Empuje en función de velocidad específica TSR ( $\lambda$ ).

En el Gráfico 4.14 se observa la curva de potencia del aerogenerador para un rango de velocidades de viento y una velocidad de rotación de 917 rpm.

## RESULTADOS

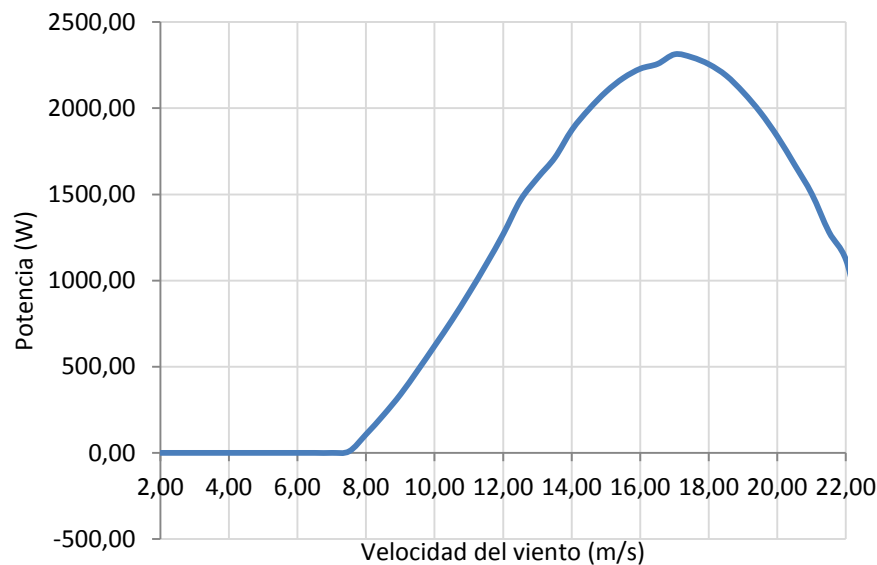


Gráfico 4.14 – Curva potencia aerogenerador

En la Figura 4.2, se observa la distribución de carga normal y tangencial por unidad de longitud a lo largo del álabe resultante de la simulación aerodinámica del aerogenerador para la velocidad nominal de viento 12 m/s y una velocidad extrema de 30 m/s.

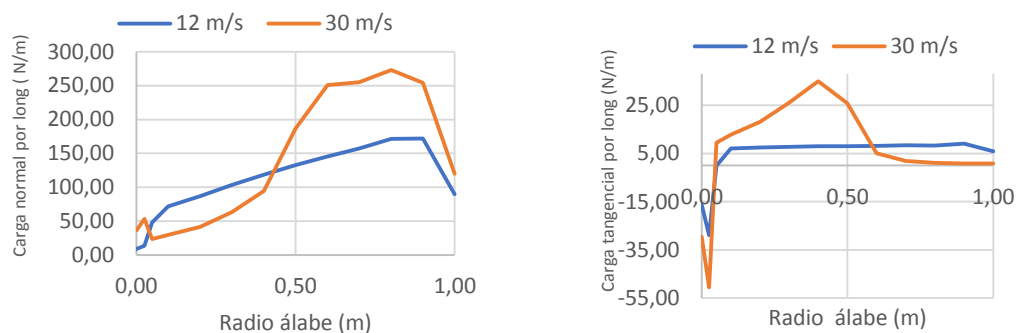


Figura 4.2 - Distribución de carga normal y tangencial por unidad de longitud a lo largo del álabe.

### 4.1.4.3 Análisis estructural

En la Figura 4.3, se observa la distribución de tensiones de Von Mises obtenida a partir de la carga aerodinámica normal y tangencial en el punto de diseño, con una velocidad nominal del viento de 12 m/s.

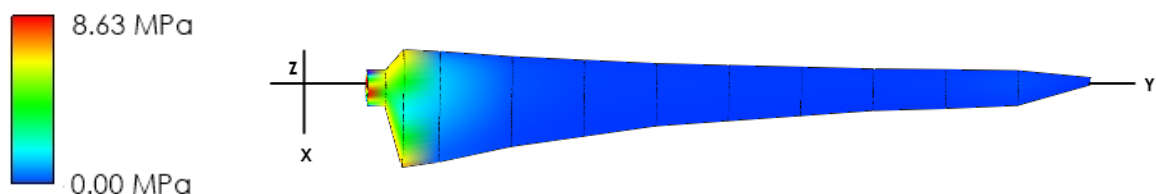


Figura 4.3 -Tensión de Von Mises condición nominal 12 m/s, 916 rpm.

Mientras que en la Figura 4.4, se observa la distribución de tensiones de Von Mises obtenida en una condición extrema, con una velocidad de viento de 30 m/s.

## RESULTADOS

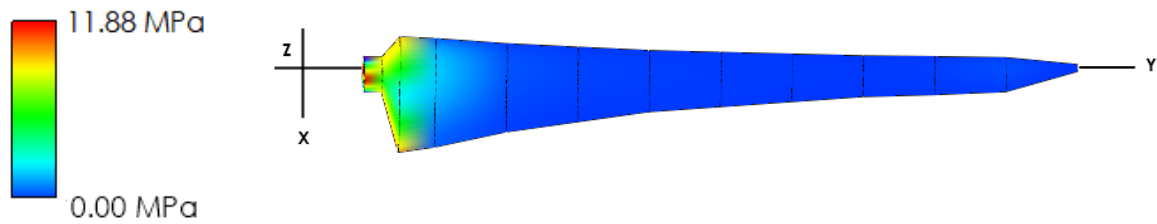


Figura 4.4 -Tensión de Von Mises condición extrema 30 m/s, 916 rpm.

En el Gráfico 4.15, se observa la distribución de tensiones de Von Mises a lo largo del álabe para ambas condiciones.

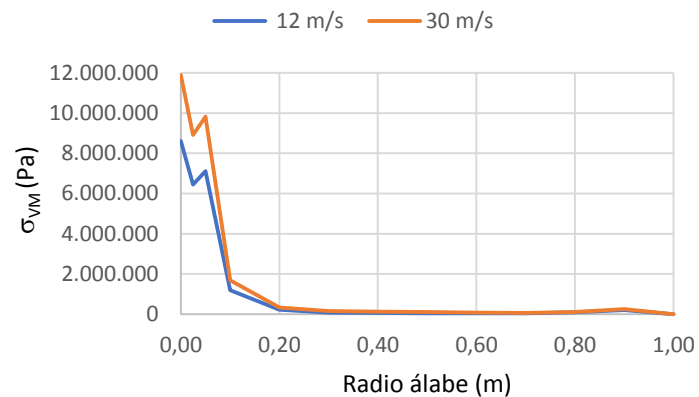


Gráfico 4.15 - Distribución tensiones Von Mises a lo largo del álabe.

En la Tabla 4.4 se puede observar la tensión máxima de Von Mises y los valores de deflexión de punta obtenidos para ambas condiciones.

|                                 |                            | Nominal (12 m/s) | Extrema (30 m/s) |
|---------------------------------|----------------------------|------------------|------------------|
| Tensión máxima Von Mises (MPa)  | $\sigma_{VM} \text{ máx.}$ | 8, 62            | 11,88            |
| Deflexión punta en el eje x (m) |                            | 3,6825e-5        | 2,45283e-5       |
| Deflexión punta en el eje z (m) |                            | 2,31912e-3       | 3,34787e-3       |

Tabla 4.4 – Resultados simulación de cargas estáticas.

### 4.2 Fabricación del álabe

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante el proceso de fabricación;

#### 4.2.1 Contramolde

En la Figura 4.5 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 4.5 - Contramolde

## RESULTADOS

### 4.2.2 Molde

Pasado los 7 días de curado del molde a temperatura ambiente se procedió a desmoldar el mismo. En este momento se presentaron algunos inconvenientes; los perfiles del contramolde quedaron adheridos al molde, tal como se observa en la Figura 4.6, debido a la infiltración y solidificación de la resina entre la madera base y los perfiles. Para lograr la separación se usó acetona para ablandar los perfiles impresos en PLA.



Figura 4.6- Inconvenientes desmolde molde

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 4.7.



Figura 4.7- Parte posterior molde con soporte (imagen izquierda), refuerzos aplicados (imagen derecha).

En la Figura 4.8 y Figura 4.9 se observa la terminación final y molde obtenido tras el pulido.



Figura 4.8- Pulido y enmasillado de imperfecciones molde.

## RESULTADOS

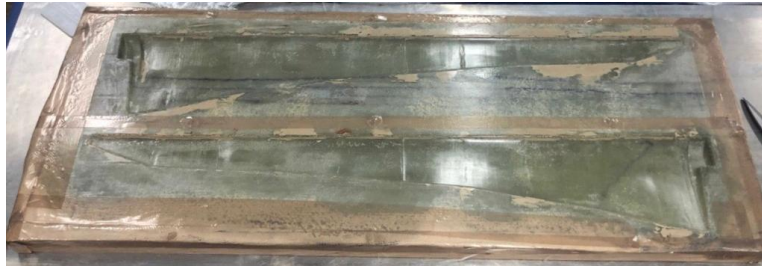


Figura 4.9 – Molde

### 4.2.3 Álabe



Figura 4.10– Pieza final desmoldada

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.

Asimismo, en la Figura 4.10, se puede observar que el gel coat está presente como una delgada capa sobre la superficie de la pieza, aunque su coloración no es uniforme debido, probablemente, a que gel coat se aplicó manualmente con pincel.

En la Figura 4.11 se observa la pieza final presentada luego del recorte de ambos lados del álabe.



Figura 4.11- Presentación preliminar de pieza final obtenida del laminado.

## RESULTADOS

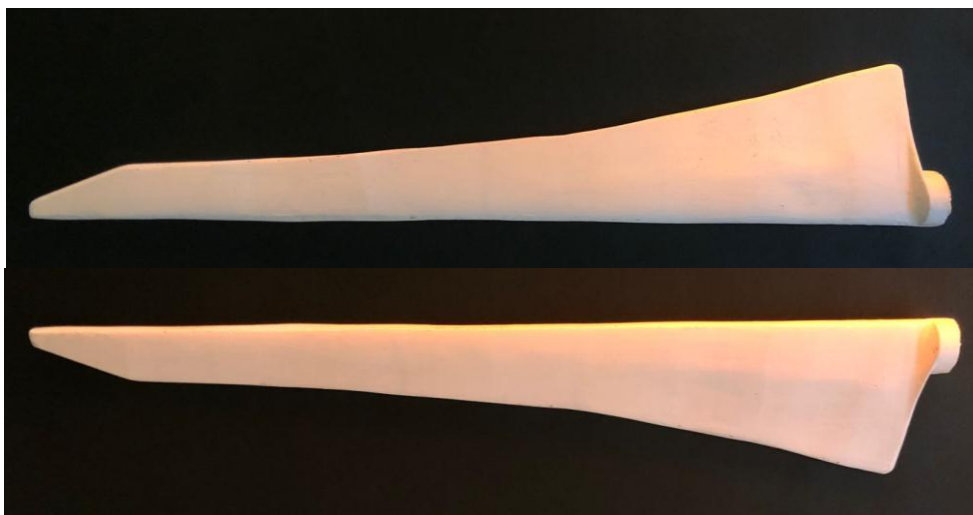


Figura 4.12 – Álabes obtenidos.

### 4.3 Caracterización del compuesto

#### 4.3.1 Viscosidad

Los resultados de la medición de viscosidad de la resina epoxi YD 128 en función de la temperatura, se observan en la Tabla 4.5. La medición de viscosidad de las resinas epoxi es muy usada como ensayo de aceptación en la industria y son indicativas de si se ha producido envejecimiento.

| Temperatura | Resultados |
|-------------|------------|
| ° C         | mPas       |
| 26,8        | 9189       |
| 26,8        | 9277       |
| 26,9        | 8868       |
| 26,9        | 9016       |
| 26,9        | 8830       |
| 26,9        | 8350       |

Tabla 4.5 – Viscosidad resina epoxi YD 12

Sin embargo, debido a limitaciones en las cantidades disponibles de resina poliéster insaturada, endurecedor KH 816, catalizador PMEK, y a los volúmenes necesarios para la medición en el viscosímetro no se pudieron realizar mediciones de viscosidad en estos casos.

#### 4.3.2 Ensayo de tracción

A continuación, se observan los resultados obtenidos en el ensayo de tracción.

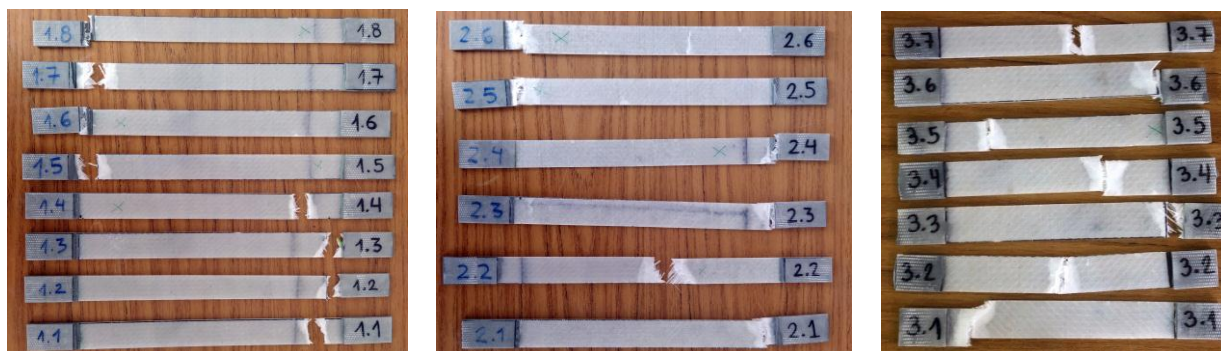


Figura 4.13 - Probetas con alta (serie 1 izquierda), baja impregnación (serie 2 centro) luego de la rotura y post curadas (serie 3 derecha).

RESULTADOS

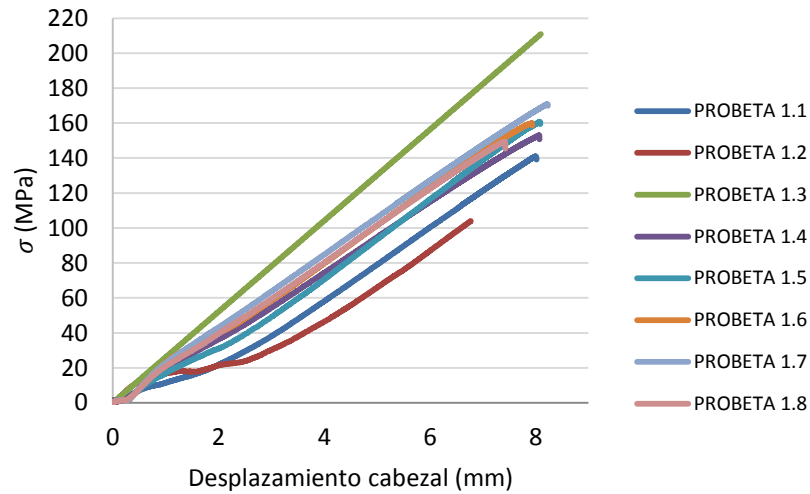


Gráfico 4.16 -Curva tensión-desplazamiento de probetas con alta impregnación (serie 1).

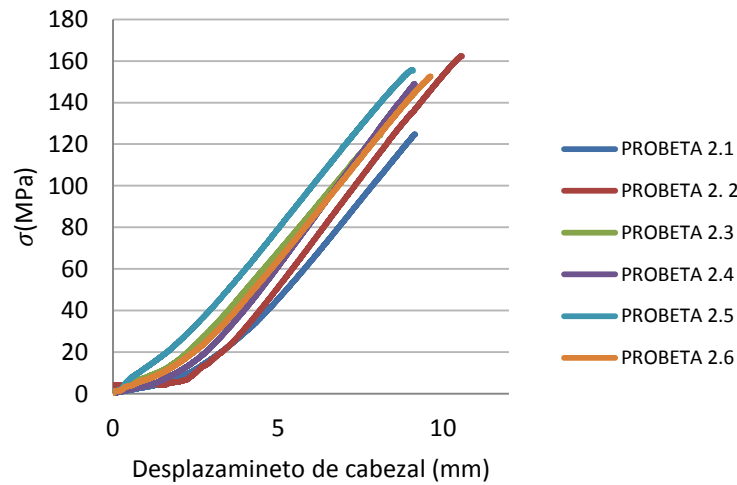


Gráfico 4.17 – Curva tensión-desplazamiento de probetas con baja impregnación (serie 2).

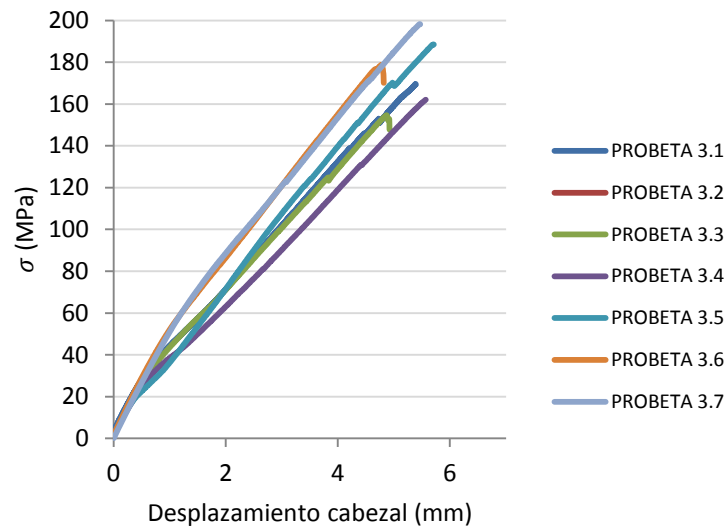


Gráfico 4.18 - Curva tensión-desplazamiento de probetas post-curado (serie 3).

## RESULTADOS

|                            | Probeta        | Tensión de rotura (MPa) | Promedio | Desvío estándar | Coefficiente variación |
|----------------------------|----------------|-------------------------|----------|-----------------|------------------------|
| Serie 1: alta impregnación | 1.1            | 140,98                  | 155,84   | 10,36           | 6,65                   |
|                            | <del>1.2</del> | <del>103,97</del>       |          |                 |                        |
|                            | <del>1.3</del> | <del>210,88</del>       |          |                 |                        |
|                            | 1.4            | 153,06                  |          |                 |                        |
|                            | 1.5            | 160,74                  |          |                 |                        |
|                            | 1.6            | 159,95                  |          |                 |                        |
|                            | 1.7            | 170,90                  |          |                 |                        |
|                            | 1.8            | 149,44                  |          |                 |                        |
| Serie 2: baja impregnación | 2.1            | 124,77                  | 141,52   | 15,07           | 10,65                  |
|                            | <del>2.2</del> | <del>162,41</del>       |          |                 |                        |
|                            | 2.3            | 125,66                  |          |                 |                        |
|                            | 2.4            | 148,96                  |          |                 |                        |
|                            | 2.5            | 155,65                  |          |                 |                        |
|                            | 2.6            | 152,54                  |          |                 |                        |
| Serie 3: post curado       | 3.1            | 169,62                  | 184,23   | 10,76           | 5,84                   |
|                            | 3.2            | 186,12                  |          |                 |                        |
|                            | <del>3.3</del> | <del>154,66</del>       |          |                 |                        |
|                            | <del>3.4</del> | <del>162,05</del>       |          |                 |                        |
|                            | 3.5            | 188,47                  |          |                 |                        |
|                            | 3.6            | 178,68                  |          |                 |                        |
|                            | 3.7            | 198,28                  |          |                 |                        |

Tabla 4.6 - Datos extraídos de ensayo de tracción.

Las probetas 1.2 y 2.2 resbalaron de la mordaza durante el ensayo, esto se ve reflejado en sus respectivas curvas donde se registró desplazamiento, pero no un aumento proporcional de carga. Asimismo, en las probetas 1.2 y 1.3 la rotura se produjo dentro del tab. Además, las probetas 1.2, 1.3, 3.3 y 3.4 se identificaron como valores atípicos de sus respectivas series. Por tales motivos aplicando los criterios de validación de la norma ASTM D3039 y el método estadístico “Grubbs test for Outlying Observations” las cinco probetas fueron descartadas y no se tuvieron en cuenta para los cálculos presentes en la Tabla 4.6.

### 4.3.3 Microscopía óptica (MO)

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

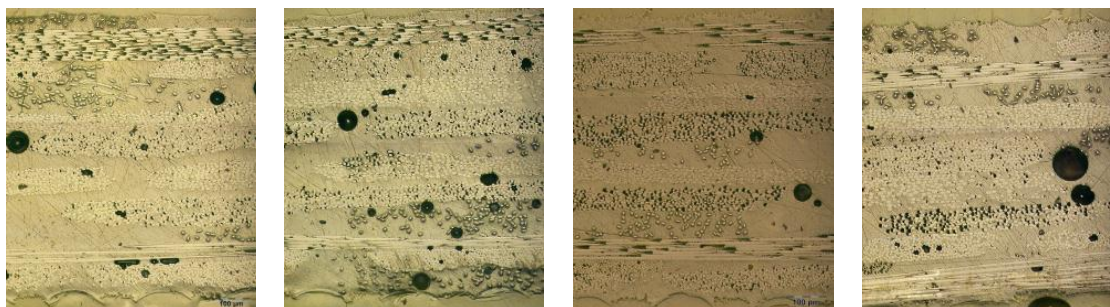


Figura 4.14 – Micrografías probeta 1.8 con aumento 10x.

## RESULTADOS

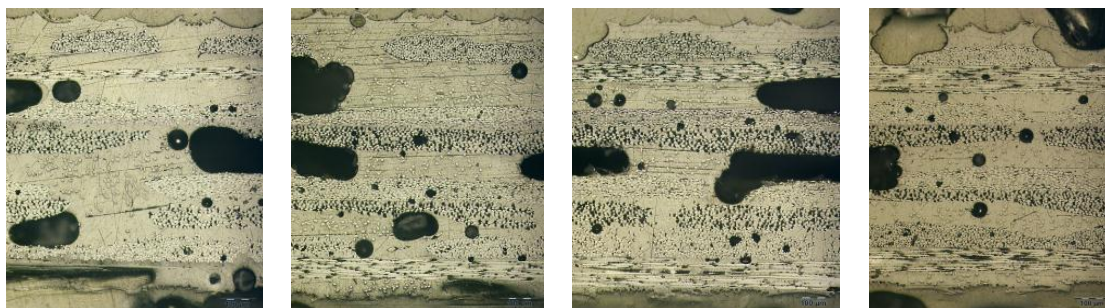


Figura 4.15 - Micrografías probeta 2.1 con aumento 10x.

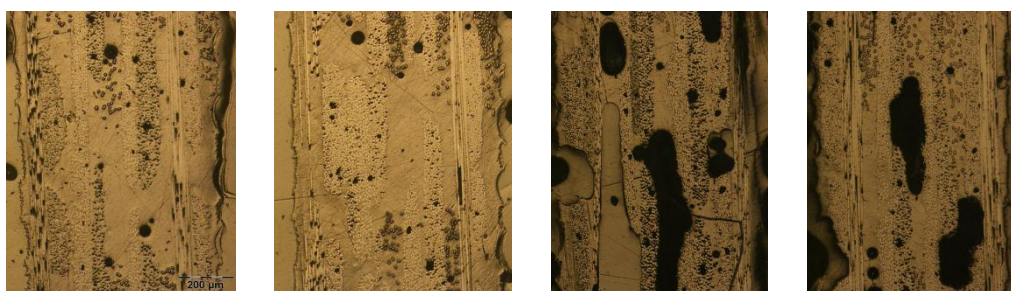


Figura 4.16 – Micrografías probeta 1.8 (izquierda) y 2.1 (derecha) con aumento 5x para observar % poros.

La Tabla 4.7 resume los resultados obtenidos mediante la técnica de microscopía óptica para cada una de las probetas.

| Muestras incluidas | % Resina | % Fibra | % Poros |
|--------------------|----------|---------|---------|
| Probeta 1.8        | 43,91    | 56,09   | 2,06    |
| Probeta 2.1        | 62,99    | 37,01   | 16,31   |

Tabla 4.7- Porcentajes de resina, fibra y poros

### 4.3.4 Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)

A continuación, se exponen los espectros obtenidos para las muestras de la resina epoxi YD 128 y su endurecedor KH 816, de la resina poliéster insaturada, el gel coat ortoftálico y el endurecedor MEKP. Además de la comparación de los espectros del sistema epoxi curado (7 días, T amb) y a 3 minutos de mezcla.

#### 4.3.4.1 Resina Epoxi - YD 128 (DGEBA)

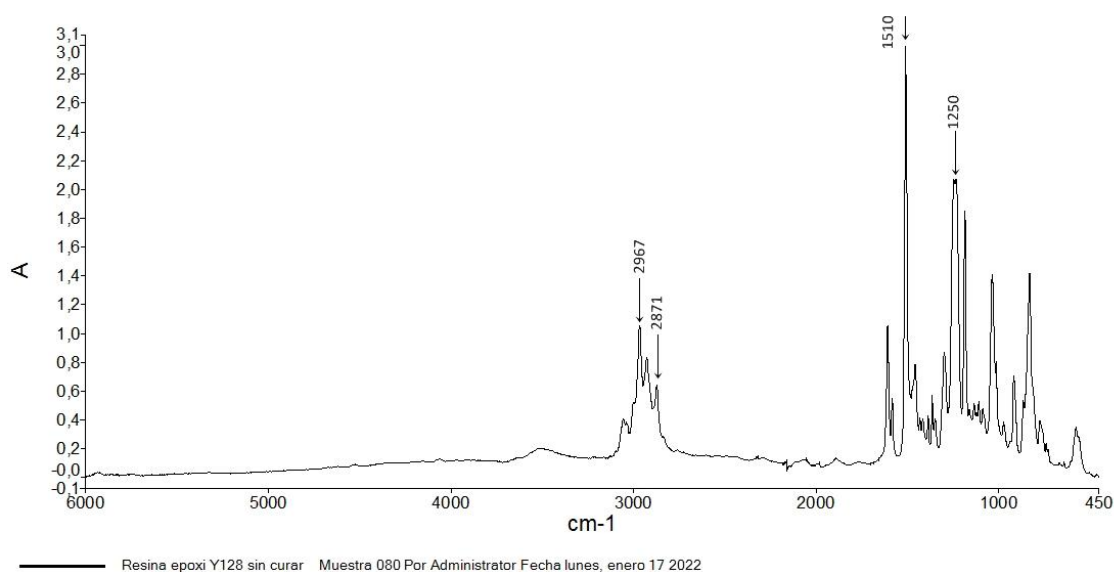


Gráfico 4.19- Espectro de la resina epoxi YD 128

## RESULTADOS

### 4.3.4.2 Endurecedor KH 816

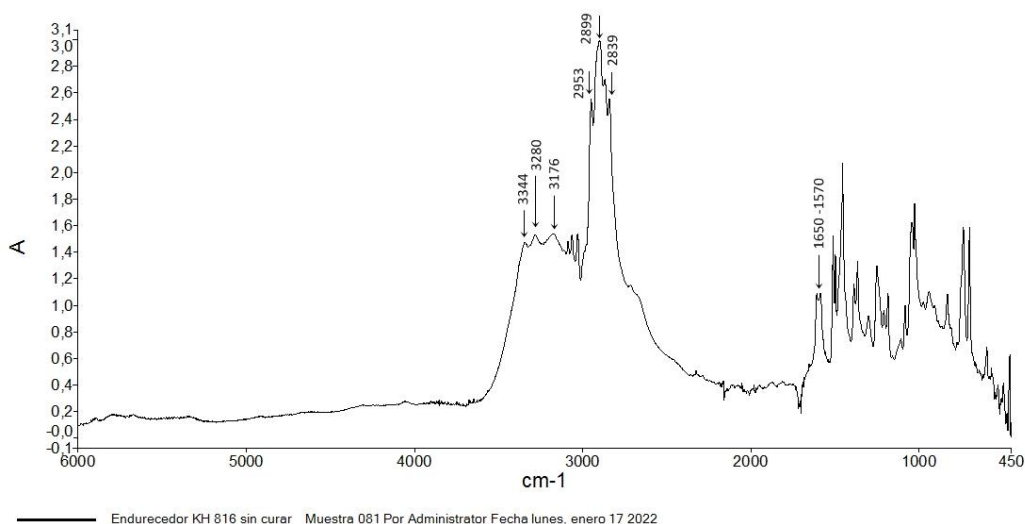


Gráfico 4.20 -Espectro del endurecedor KH 816

### 4.3.4.3 Sistema resina epoxi curado - 3 min mezcla

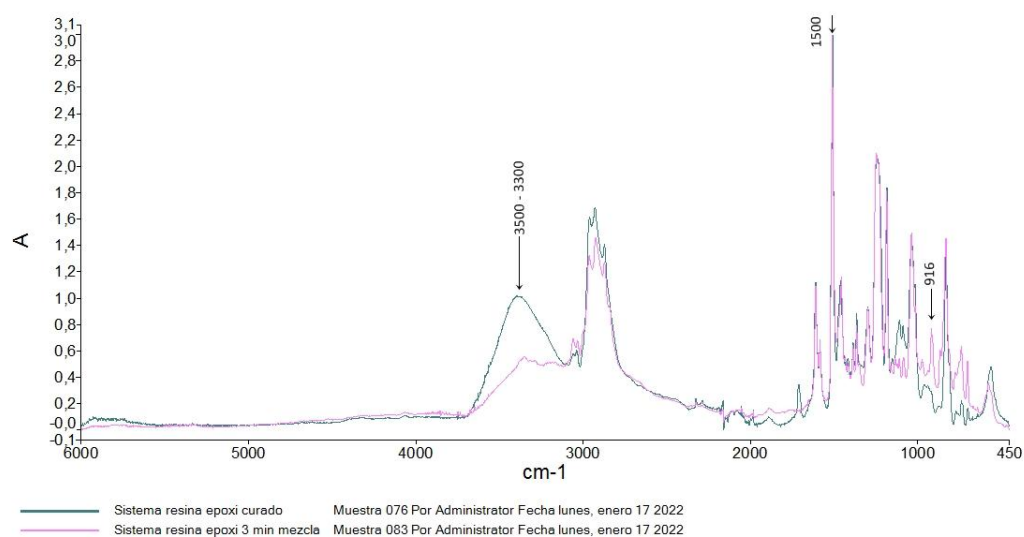


Gráfico 4.21 – Comparación espectros sistema resina epoxi curado con sistema resina epoxi 3 min mezcla.

### 4.3.4.4 Resina poliéster insaturada

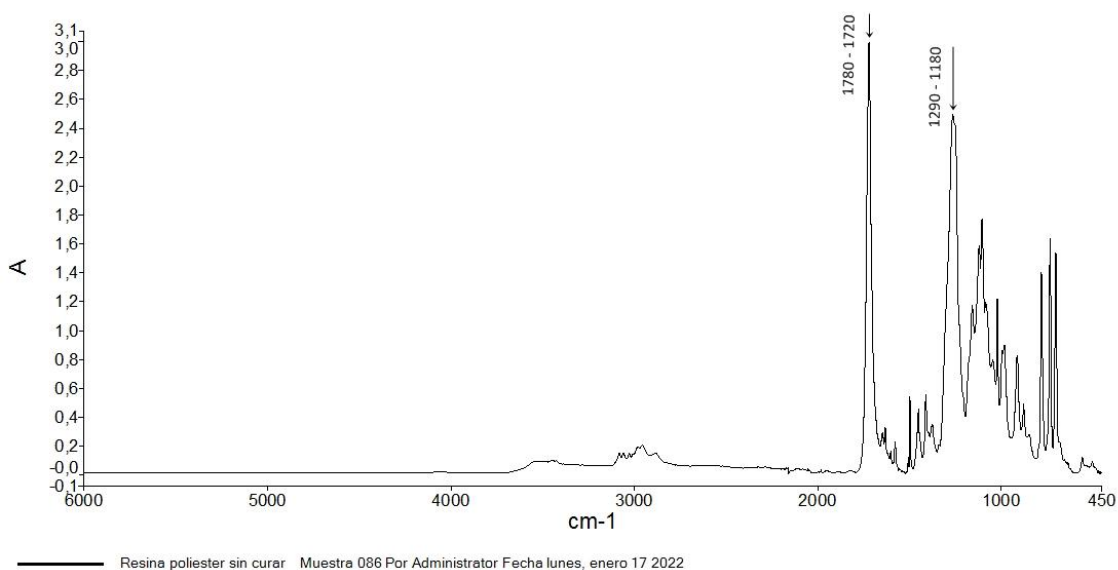


Gráfico 4.22 - Espectro de la resina poliéster insaturada

## RESULTADOS

### 4.3.4.5 Gel coat ortoftálico

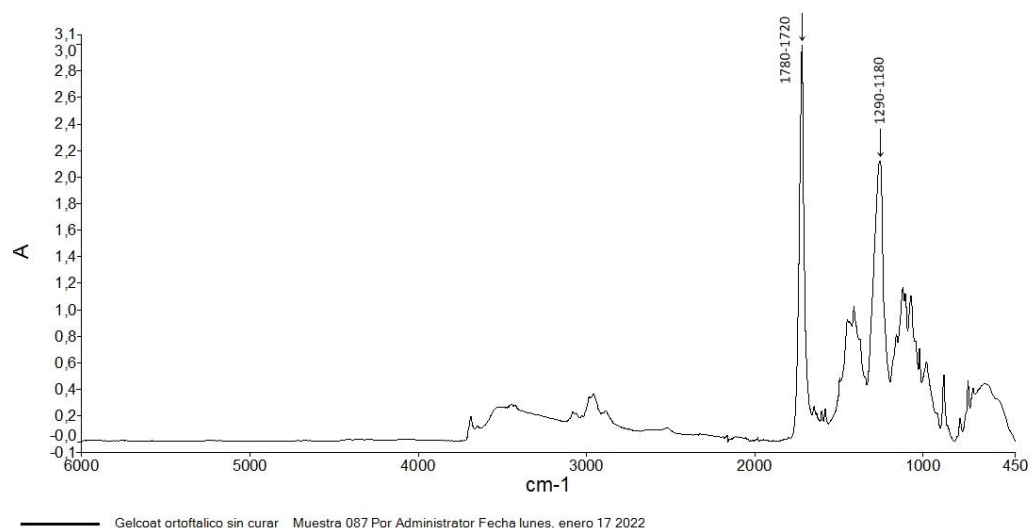


Gráfico 4.23- Espectro del gel coat ortoftálico.

### 4.3.4.6 Endurecedor (MEKP)

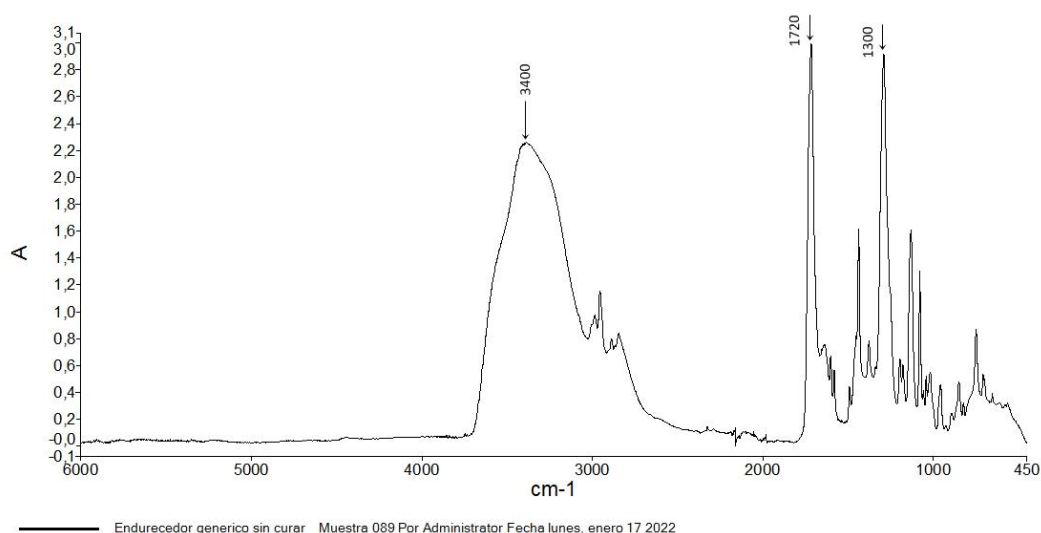


Gráfico 4.24 - Espectro del endurecedor genérico.

### 4.3.5 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

A continuación, se observan los resultados de los barridos dinámicos obtenidos mediante DSC.

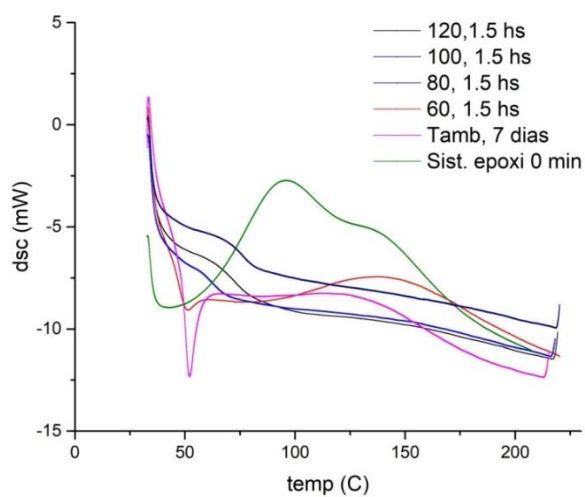


Gráfico 4.25 - Corridas DSC dinámicas a 10°/min después de que el sistema epoxi fuera curado en las condiciones indicadas.

## RESULTADOS

En el Gráfico 4.26, se observan las curvas DSC para las muestras curadas a T amb y 60°C, donde se destaca la presencia de picos endotérmicos. En la Tabla 4.8 se observan los valores de entalpía de relajación de estos picos.

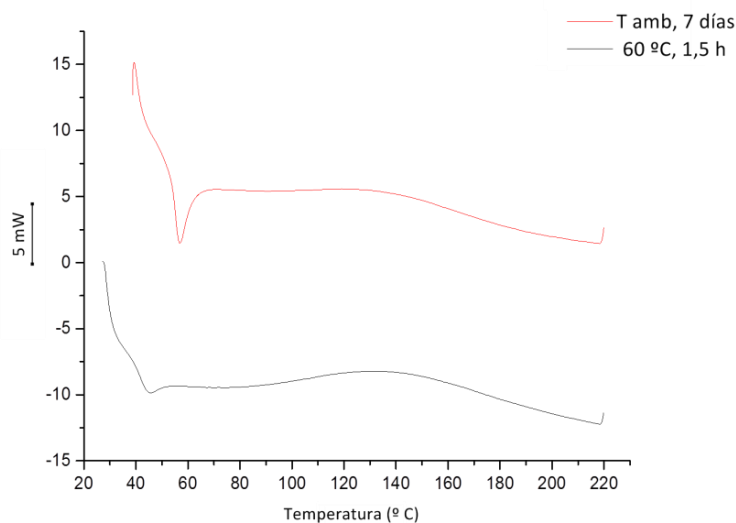


Gráfico 4.26 – Corridas DSC dinámicas a 10°/min sistema epoxi curado a las temperaturas indicadas donde se evidencias los picos endotérmicos.

| Condición curado muestra |       | Entalpía de relajación (J/g) | T <sub>pico</sub> (°C) |
|--------------------------|-------|------------------------------|------------------------|
| 60°C                     | 1,5 h | - 3,27                       | 45,70                  |
| T amb                    | 7 d   | -5,91                        | 56,90                  |

Tabla 4.8 – Entalpías de relajación.

En el Gráfico 4.27 se observan las curvas DSC obtenidas para las muestras curadas a las temperaturas indicadas donde se evidencian las T<sub>g</sub>. Todas las curvas obtenidas son resultado de una primera corrida, menos las curadas a T amb y 60°C. Los valores de T<sub>g</sub> obtenidos mediante los distintos criterios se encuentran en la Tabla 4.9.

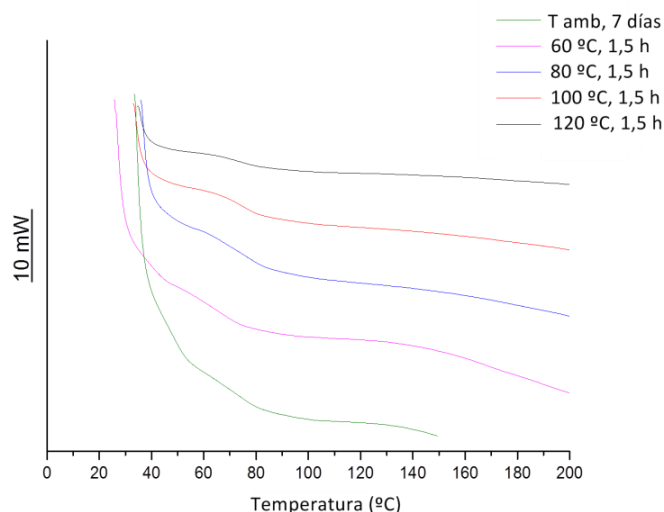


Gráfico 4.27 - Corridas DSC dinámicas a 10°/min después de que el sistema epoxi fuera curado las temperaturas indicadas donde se evidencian las T<sub>g</sub>.

## DISCUSIÓN

| Condición curado muestra |                 | Tg umbral ( $T_f$ ) | Tg media ( $T_m$ ) | Tg inflexión ( $T_i$ ) |
|--------------------------|-----------------|---------------------|--------------------|------------------------|
| Tiempo                   | Temperatura(°C) | (°C)                | (°C)               | (°C)                   |
| 7 d                      | ambiente        | 47,78               | 51,34              | 49,98                  |
| 1,5 h                    | 60              | 41,92               | 46,41              | 44,76                  |
| 1,5 h                    | 80              | 60,18               | 66,78              | 63,30                  |
| 1,5 h                    | 100             | 69,51               | 76,62              | 76,16                  |
| 1,5 h                    | 120             | 65,00               | 75,24              | 73,91                  |

Tabla 4.9 – Obtención de la Tg por los distintos criterios.

En la Tabla 4.10 se observan los grado de curado obtenidos mediante dos metodos distintos: Origin® y Bandara; bajo los distintos tratamientos térmicos.

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

Tabla 4.10 - Grado de curado.

## 5 DISCUSIÓN

### 5.1 Diseño alabe aerogenerador eje horizontal

#### 5.1.1 Estudios previos

##### 5.1.1.1 Análisis aerodinámico con QBlade® y Flow Simulation

En el Gráfico 4.1 y Gráfico 4.5 , se muestra la variación del coeficiente de sustentación ( $C_L$ ) respecto a los distintos ángulos de ataque ( $\alpha$ ) para los perfiles seleccionados. Podemos observar la gran influencia del ángulo de ataque sobre el coeficiente de sustentación e identificar donde aparece el punto de mayor sustentación ( $C_{L \text{ máx.}}$ ) inherente al ángulo de ataque crítico ( $\alpha_c$ ) para cada uno de los perfiles.

En el Gráfico 4.2 y Gráfico 4.6, se muestra la variación del arrastre debido al cambio en el ángulo de ataque ( $\alpha$ ) del perfil aerodinámico. Podemos observar que a bajos alfa los coeficientes de arrastre ( $C_D$ ) se mantienen mayormente constantes, mientras que a altos alfa se produce un incremento exponencial. Este comportamiento del  $C_D$  está relacionado con la entrada en pérdida del perfil, al llegar al ángulo crítico ( $\alpha_c$ ), la capa límite se desprende completamente y el perfil deja de generar sustentación.

El Gráfico 4.3 y Gráfico 4.7 muestra la variación del cociente sustentación-arrastre ( $C_L/C_D$ ) para los diferentes perfiles. Podemos observar que los valores de  $C_L/C_D$  varían respecto a los distintos ángulos de ataque ( $\alpha$ ), e identificar los ( $C_L/C_D$ ) máx. para cada uno de los perfiles, ya que cuanto mayor sea la relación  $C_L/C_D$ , mayor será la eficiencia aerodinámica del perfil.

## DISCUSIÓN

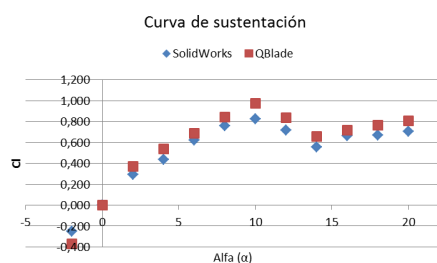
En el Gráfico 4.4 y Gráfico 4.8 se pueden observar las curvas polares que expresan la variación del coeficiente de sustentación ( $C_L$ ) en función del coeficiente de arrastre ( $C_D$ ). En las gráficas polares obtenidas se puede observar un ascenso casi lineal del  $C_L$  donde se observa que hay una buena relación entre la sustentación y el arrastre. También las curvas muestran el valor del coeficiente de arrastre mínimo ( $C_{D \text{ min.}}$ ) y la sustentación máxima ( $C_{L \text{ máx.}}$ ), que coincide con el ángulo  $\alpha_c$  donde el perfil comienza a perder sustentación y aumenta el  $C_D$ .

### 5.1.1.2 Comparación de los perfiles mediante QBlade® y Flow Simulation

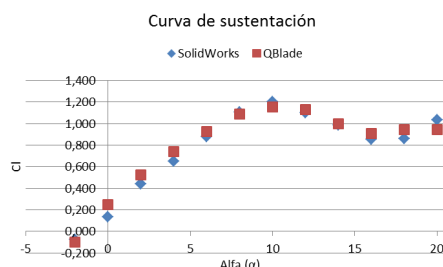
Al momento de analizar los resultados obtenidos, por ambos métodos, se observa que los valores obtenidos para los coeficientes de sustentación ( $C_L$ ) no coinciden con exactitud de forma cuantitativa, pero presentan una misma tendencia cualitativa que simula los fenómenos de estudio. Cabe destacar que la coincidencia es mayor en los perfiles con geometría simple como es el caso del NACA 0012 y SD7080 (9,2%), Figura 5.1 (a) y (b), mientras que en los perfiles con superficies más cóncavas-convexas la coincidencia es menor, como es el caso de los perfiles NREL S833 y Wortmann FX 63-137, Figura 5.1 (c) y (d).

#### Perfiles geometría simple

NACA 0012 (a)

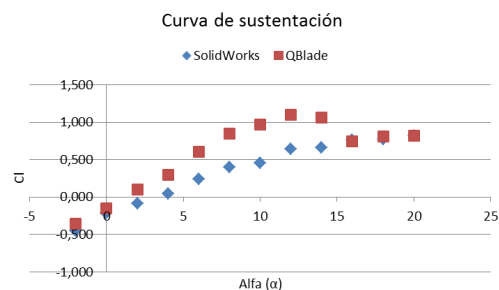


SD7080 (9,2 %) (b)



#### Perfiles geometría cóncava-convexa

NREL S833 (c)



Wortmann FX 63-137 (d)

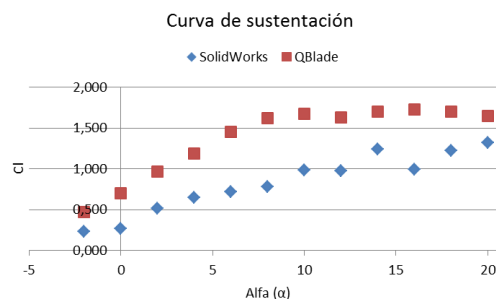


Figura 5.1 – Comparación coeficientes sustentación ( $C_L$ ) obtenidos mediante ambos métodos.

Sin embargo, al comparar los resultados obtenidos por ambos métodos para los coeficientes de arrastre ( $C_D$ ) se observa que presentan una menor precisión. Como se observa en la Figura 5.2, los resultados coinciden solamente a bajos alfas, zona donde el aporte de la fuerza de arrastre es despreciable frente a la fuerza de sustentación. A mayores alfas, cuando la fuerza de arrastre comienza a crecer exponencialmente, los resultados obtenidos por ambos métodos divergen. Cabe destacar que la curva obtenida mediante SolidWorks® entra en pérdida a menores alfa y de forma más abrupta que la curva obtenida mediante QBlade®, la cual muestra una tendencia exponencial más suave. Esto hace evidente la dificultad que poseen las simulaciones de SolidWorks® de evaluar en forma precisa el fenómeno de separación de la capa límite con la capacidad de cálculo disponible en el desarrollo del presente trabajo.

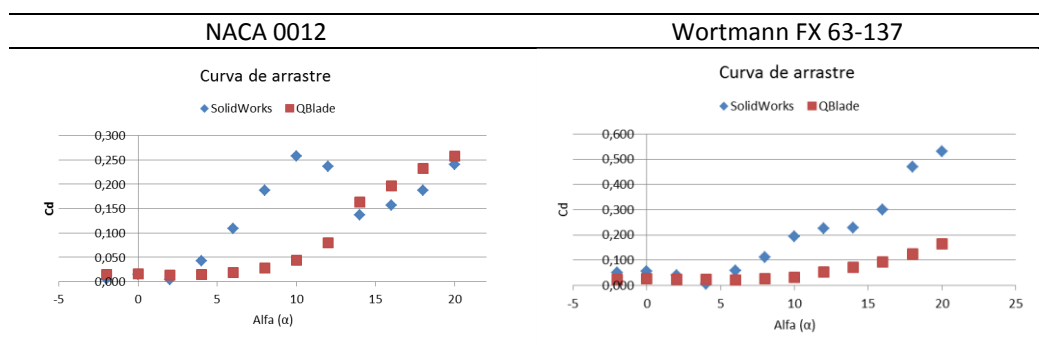


Figura 5.2 - Comparación coeficientes arrastre ( $C_d$ ) obtenidos mediante ambos métodos.

En la Figura 5.3 se observan dos grupos de curvas polares, las rojas obtenidas mediante QBlade® y las azules obtenidas mediante SolidWorks®. Esta comparación evidencia que las desviaciones de los  $C_D$  obtenidos mediante SolidWorks® afecta al comportamiento aerodinámico de los perfiles, generando curvas polares con cambios de pendientes abruptos, aumentos de sustentación por arriba del  $\alpha_c$  e incluso un ascenso de  $C_L$  no lineal que implica una mala relación entre la sustentación y el arrastre.

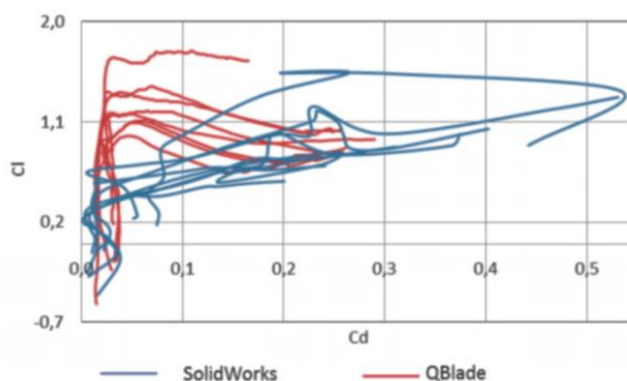


Figura 5.3 – Comparación curvas polares obtenidas mediante ambos métodos.

En definitiva, a lo largo de las simulaciones, se demostró que los resultados obtenidos para el coeficiente de arrastre fueron menos precisos que para el de sustentación. Esto fue sorprendente en algunos casos, ya que la sustentación se mantuvo relativamente comparable incluso cuando el arrastre era drásticamente diferente entre ambos métodos. La principal causa de esta desviación se asocia a separaciones del flujo en la capa límite.

Finalmente, se determinó que QBlade® es el método más adecuado para evaluar el comportamiento aerodinámico de los perfiles. Mientras que SolidWorks® se desempeña de forma aceptable como una herramienta suplementaria, pero se requiere una mayor *expertise* antes de que se pueda aplicar con seguridad como herramienta de simulación aerodinámica.

#### 5.1.1.3 Elección del perfil

Considerando las características más resaltantes de los perfiles, expuestas en la Tabla 4.2, y teniendo como norma para la selección los criterios antes mencionados, se elige el perfil NACA 0012 como el idóneo para nuestro álabe.

Cabe destacar que se trata de un perfil simétrico que tiene bajo costo y es de fácil construcción a diferencia de uno asimétrico, el cual se mantendrá a lo largo de todo el álabe para facilitar la construcción.

Desde el punto aerodinámico posee un buen rango de valores de  $\alpha$  comprendido entre  $8^\circ < \alpha < 12^\circ$  en donde se mantiene la sustentación y posee uno de los  $C_{d\ min.}$  más chico de los 8 perfiles, con un valor de 0,017. A su vez presenta un amplio rango de estabilidad del coeficiente ( $C_L/C_D$ )  $_{máx.}$  alrededor de 38,1 entre los ángulos  $\alpha$ :  $4 - 8^\circ$ , a pesar de que presenta la relación  $C_L/C_d$  más

## DISCUSIÓN

baja. Por lo que en cierto punto se podría decir que en esta etapa se resignó eficiencia aerodinámica a cambio de obtener facilidad constructiva.

### 5.1.2 Diseño aerodinámico alabe

#### 5.1.2.1 Análisis aerodinámico

Los resultados obtenidos mediante la simulación BEM del rotor se discuten a continuación;

En el Gráfico 4.10 se encuentra la curva  $C_p - \lambda$ , la cual nos permite determinar el desempeño del rotor con el álabe diseñado. El punto de funcionamiento óptimo, que se corresponde con un coeficiente de potencia máximo igual a  $C_{p \text{ máx.}} \approx 0,36$  se alcanza para un TSR igual a  $\lambda = 8,5$ . Esto significa que, si se consigue mantener la TSR en 8,5 el rotor puede extraer el 36 % de la potencia aerodinámica del viento.

Cabe destacar que el  $C_{p \text{ máx.}}$  obtenido se encuentra dentro del rango de rendimiento de los aerogeneradores comerciales ( $0,35 < C_{p \text{ máx.}} < 0,45$ ), y que a su vez la velocidad específica de punta obtenida se encuentra cercana a los valores de funcionamiento óptimo de los aerogeneradores horizontales con rotor de 3 álabes ( $\lambda = 8,5 \approx 8$ ) (27).

En el Gráfico 4.11 se observa la curva de potencia del rotor en función de la velocidad del viento, a partir de la misma es posible determinar la cantidad de energía que el rotor puede extraer del viento a diferentes velocidades. Sin embargo, no es la curva de potencia del aerogenerador, sino que solamente refleja el rendimiento del rotor. Así, con el rotor en el punto de óptimo funcionamiento, se podría extraer  $1282 \text{ W} \approx 1,3 \text{ kW}$  de potencia a la velocidad de diseño  $12 \text{ m/s}$ .

Otros parámetros que nos permiten determinar el desempeño del rotor, son el empuje y el torque. En el Gráfico 4.12 se observa el torque generado por el rotor en función de TSR, obteniendo un torque de  $13,11 \text{ Nm}$  a  $\lambda_{\text{óp.}} = 8,5$ . Mientras que en el Gráfico 4.13 se observa el empuje experimentado en el rotor en función de TSR, se puede notar que cuanto mayor es la velocidad de rotación mayor es el empuje, obteniendo un empuje de  $258,36 \text{ N}$  a  $\lambda_{\text{óp.}} = 8,5$ .

En la Tabla 5.1 se encuentran agrupados los parámetros de desempeño del rotor en el punto de óptimo funcionamiento y sus respectivos valores.

|                           |                        |        |
|---------------------------|------------------------|--------|
| Coeficiente potencia máx. | $C_{p \text{ máx.}}$   | 0,36   |
| Velocidad específica TSR  | $\lambda_{\text{óp.}}$ | 8,5    |
| Potencia (kW)             | $P_n$                  | 1,3    |
| Torque (Nm)               | $Q$                    | 13,11  |
| Empuje (N)                | $F_x$                  | 258,36 |

Tabla 5.1 - Parámetros de desempeño del rotor.

Los resultados obtenidos mediante la simulación BEM del aerogenerador se discuten a continuación;

En el Gráfico 4.14 se observa la curva de potencia del aerogenerador en función de la velocidad del viento, de donde resulta interesante distinguir cuatro etapas de funcionamiento como se observa en la Figura 5.4. 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 5.2 se encuentran las condiciones bajo las que ocurren estas etapas.

## DISCUSIÓN

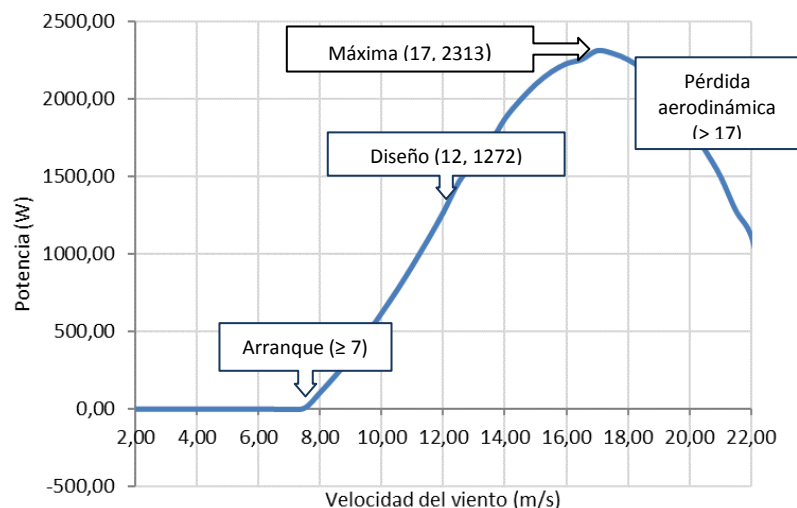


Figura 5.4 – Curva de potencia aerogenerador y etapas de funcionamiento.

| Arranque |       | Diseño  |       | Máxima  |       | Perdida |       |
|----------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| V (m/s)  | P (W) | V (m/s) | P (W) | V (m/s) | P (W) | V (m/s) | P (W) |
| $\geq 7$ | -     | 12      | 1272  | 17      | 2313  | $>17$   | -     |

Tabla 5.2 – 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  $\approx 1000$  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.

### 5.1.2.2 Análisis estructural

La distribución de tensiones de Von Mises en la superficie del álabe se observa en la Figura 4.3, para la condición de diseño (12 m/s) y en la Figura 4.4 para la condición extrema (30 m/s). Podemos notar las distintas tensiones producidas a lo largo del álabe de acuerdo a la variación de colores, como se indica en la referencia, las zonas de mayor esfuerzo se encuentran en rojo y las zonas de menor esfuerzo en azul.

En el Gráfico 4.15, se muestra la distribución de tensiones a lo largo del radio del álabe para cada condición, lo que permite comparar y distinguir la zona crítica, es decir, la zona con mayores esfuerzos. En ambos casos, la zona crítica se encuentra cercana a la raíz del álabe. Alcanzando un valor máximo de  $\sigma_{MV \text{ máx.}} = 8,63$  MPa para la condición de diseño y un valor de  $\sigma_{MV \text{ máx.}} = 11,88$  MPa para la condición extrema.

Sin embargo, como ya se ha mencionado se debe tener en cuenta que las simulaciones realizadas en la presente sección 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, tales como:

- Se asumió al material compuesto como isotrópico, solo se define sus propiedades mediante el módulo de elasticidad (E) y la densidad ( $\rho$ ).
- Las propiedades utilizadas durante la simulación para el laminado de fibra de vidrio-epoxi y la espuma de PU, son valores estandarizados sacados de bibliografía.
- No se aplicó la teoría de lámina.

## DISCUSIÓN

### 5.2 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 contramolde presento una gran practicidad, ya que las secciones impresas en 3D brindaron alta precisión a la hora de trasladar el modelo del álabe CAD a la realidad.

La necesidad de adhesión de las secciones impresas del contramolde con la matriz plana, la facilidad de desmolde y una buena terminación superficial son prestaciones cuyas implementaciones son difíciles de compatibilizar. Para evitar fijaciones difíciles de quitar entre las secciones impresas y la matriz se optó por el pegado a través de una cinta de altas prestaciones de uso espacial.

Al momento de desmoldar, se observó que en el centro del molde las secciones impresas no se encontraban pegadas al molde, por lo que el desmoldante de teflón cumplió su función, y el principal inconveniente, que no permitió un desmolde correcto, fue la infiltración y solidificación de la resina entre las secciones del álabe impreso y el molde. Estas complicaciones al desmoldar, generaron defectos superficiales en el molde que lograron resolverse sin mayores inconvenientes mediante la aplicación de masilla, lijado y pulido.

El soporte de madera y los refuerzos en los sectores del rotor y punta lograron brindarle rigidez al molde. Sin embargo, el sellado con guata y cinta en la parte interior, no presento el soporte esperado, ya que durante la laminación del álabe se debió disminuir el vacío a los 30 minutos de conectado para evitar el colapso del molde. Por lo que habría que considerar otro sellado más resistente, quizás como la espuma de PU expandida.

Finalmente, la laminación manual del álabe se llevó a cabo sin ningún otro inconveniente. Se obtuvieron ambas piezas del álabe, las cuales se acoplaron por medio de adhesivo y se inyectó la espuma de poliuretano en todo el interior el álabe como núcleo del mismo.

La cobertura final obtenida por la aplicación del gel coat durante el proceso de laminación no fue óptima, ya que se puede observar una coloración no uniforme generada por variaciones de espesor. Sin embargo, cabe destacar que el gel coat no luce cuarteado, defecto que ocurre cuando la aplicación es demasiado gruesa, ya que los gels coat se hacen menos flexibles a medida que aumenta el espesor de la película (68). Por lo que se cree que con la aplicación de otra capa de gel coat aplicada idealmente mediante aspersión con el uso de un soplete se lograría obtener una cobertura final adecuada.

### 5.3 Caracterización del compuesto

#### 5.3.1 Viscosidad

En la Figura 5.5, 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 resulto de 26,86 °C, se observó que la viscosidad media obtenida en el ensayo ( $\approx 8922$ ) 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.

## DISCUSIÓN

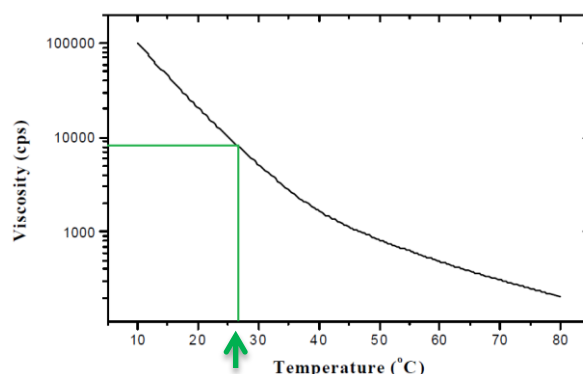


Figura 5.5 – Viscosidad resina epoxi YD 128 en función de la temperatura brindada por el proveedor (48).

### 5.3.2 Ensayo de tracción

Las curvas “tensión- desplazamiento”, mostradas en Gráfico 4.16, Gráfico 4.17 y Gráfico 4.18, 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 (69).

Los valores de tensión de rotura obtenidos, presentes en la Tabla 4.6 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 (7).

Las probetas a las que se les aplicó un tratamiento de post curado (serie 3) presentan la mayor tensión promedio de rotura ( $\bar{\sigma}$ : 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  $\bar{\sigma}$ : 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  $\bar{\sigma}$ : 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.

En el Gráfico 5.1, se observa la comparación de las tres series dejando en evidencia lo mencionado con anterioridad.

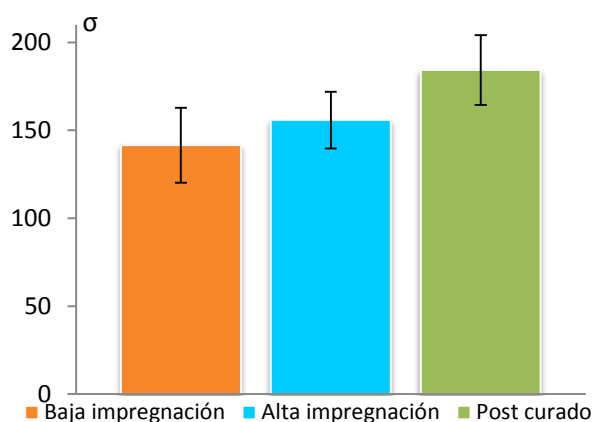


Gráfico 5.1 - Comparación entre tensiones promedio de ruptura de las series con su desvío estándar.

## DISCUSIÓN

### 5.3.3 Microscopía óptica (MO)

En la Figura 4.14 y Figura 4.15 se pueden observar algunas de las micrografías tomadas para determinar las composiciones de las muestras. En estas se distinguen los paquetes de fibras a las distintas orientaciones  $[0^\circ, 90^\circ, \pm 45^\circ]$ , de acuerdo a la secuencia de apilamiento del laminado (Figura 3.6), y la distancia entre ellos. A su vez, en la Figura 4.16 se pueden observar cuatro de las micrografías tomadas para determinar el porcentaje de poros presente en el material.

A partir del análisis de las micrografías obtenidas se obtuvo la composición de las muestras, presente en la Tabla 4.7. Al comparar las composiciones obtenidas se puede observar que la probeta 1.8, 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 2.1, 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 encuentre 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.

### 5.3.4 Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR)

#### 5.3.4.1 Resina Epoxi - YD 128 (DGEBA)

En la espectrometría de la muestra de resina epoxi sin curar, Gráfico 4.19, se observan los picos asociados al grupo oxirano;  $912\text{ cm}^{-1}$  asignado al estiramiento asimétrico del enlace C-O del grupo funcional C-O-C del anillo oxirano,  $968\text{ cm}^{-1}$  asignado al estiramiento del enlace C-O del grupo funcional C-O-C del éter, y el pico  $760\text{ cm}^{-1}$  que se asigna a la vibración “rocking” del enlace  $\text{CH}_2$  (70). También se asigna al anillo oxirano el pico de  $863\text{ cm}^{-1}$  (61; 71)

Los grupos éter en la molécula DGEBA están caracterizado por el pico de  $1033\text{ cm}^{-1}$  ( $-\text{O}-\text{CH}_2$ ). También aparece un pico de absorción a  $1250$  y otro a  $1298\text{ cm}^{-1}$  asociados al grupo (aromático- $\text{O}-\text{CH}_2$ ) y al enlace C-O, respectivamente, del DGEBA (61).

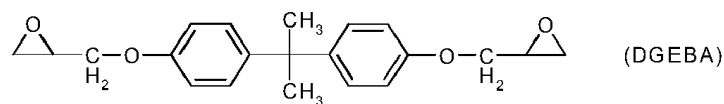


Figura 5.6- DGEBA

La banda a  $1510\text{ cm}^{-1}$  y  $833\text{ cm}^{-1}$  puede ser asignada a los grupos p-fenilos (72), mientras que el pico a  $1608$  y  $1582\text{ cm}^{-1}$  se asigna al estiramiento del enlace C=C del anillo aromático del DGEBA (61; 73; 71).

El pico a  $1132\text{ cm}^{-1}$  es asignado al estiramiento del enlace C-O-C del éter. El pico a  $1184\text{ cm}^{-1}$  se asigna al enlace C-O del anillo aromático en el DGEBA (61; 72). Esto se puede apreciar en la Figura 5.7.

## DISCUSIÓN

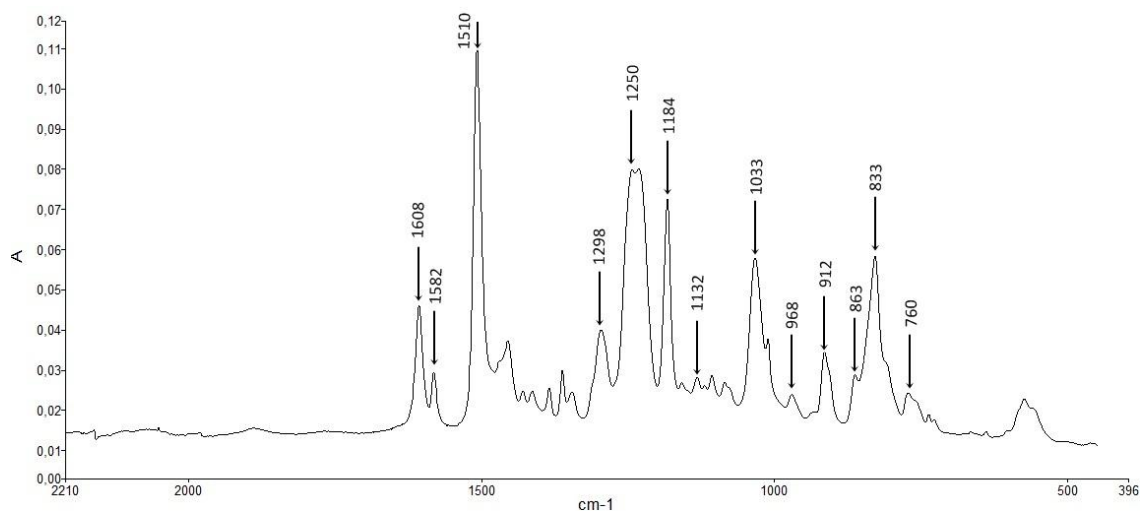


Figura 5.7 - Ampliación resina epoxi 2210 - 500 cm<sup>-1</sup>

Los picos entre 2871 y 2967 cm<sup>-1</sup> se asignan al estiramiento C-H del CH<sub>2</sub> y C-H aromático y alifático. El pico a 3060 cm<sup>-1</sup> se puede asignar al estiramiento del enlace C-H del anillo oxirano (74; 72).

El ancho pico a 3500 cm<sup>-1</sup> es asignado a grupos OH presentes en las resinas DGEBA comerciales, no como parte constitutiva de la molécula, sino como residuo del proceso productivo (61). Esto se puede apreciar en la Figura 5.8.

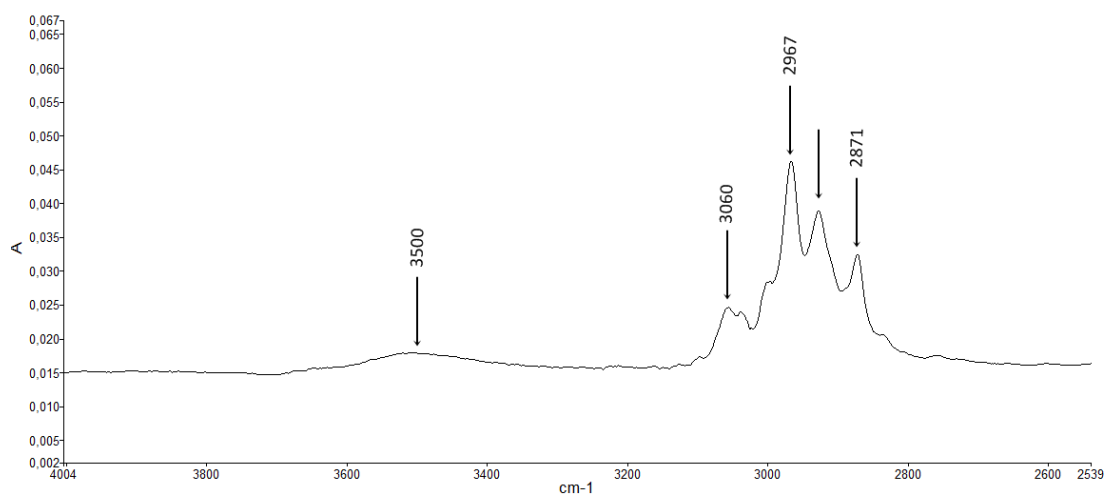


Figura 5.8 - Ampliación resina epoxi 4004-2539 cm<sup>-1</sup>

### 5.3.4.2 Endurecedor KH 816

En la espectrometría de la muestra del endurecedor KH 816 sin curar, Gráfico 4.20, se observan los picos 3176, 3280 y 3344 cm<sup>-1</sup> asociados al estiramiento del enlace N-H del grupo amina primaria (-NH<sub>2</sub>) (73), mientras que los picos presentes en el rango 1570-1650 cm<sup>-1</sup> se asocian a la flexión del enlace N-H del mismo grupo.

## DISCUSIÓN

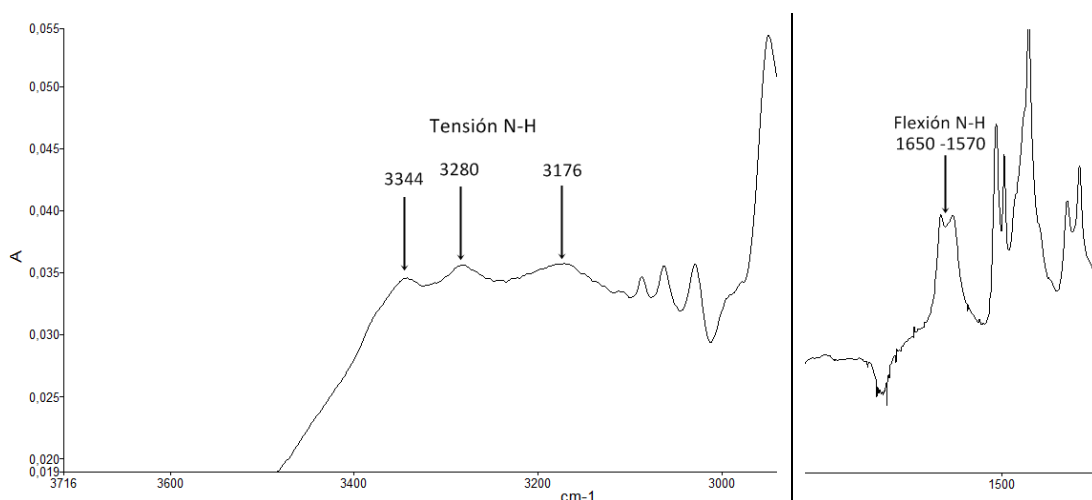


Figura 5.9 – Ampliación grupo aminas primarias endurecedor KH 816.

Los picos a 2839, 2899 y 2953  $\text{cm}^{-1}$  se pueden asociar al enlace C-H de los grupos alifáticos, metilo, metileno de la isofocondiamina (39).

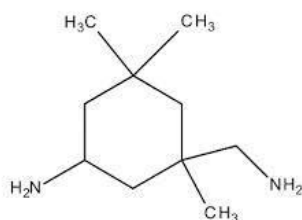


Figura 5.10 - Isofocondiamina.

La señal entre 1460-1477  $\text{cm}^{-1}$  y 1367-1382  $\text{cm}^{-1}$  se pueden asociar a los grupos  $\text{CH}_3\text{-C}$  (alifáticos).

### 5.3.4.3 Sistema resina epoxi curado - 3 min mezcla

Durante el curado del sistema epoxi se presentan una serie de reacciones, de las cuales las más importantes corresponden a las asociadas con la adición de las aminas con los grupos epóxicos, en la Figura 5.11 se puede ver el mecanismo de la reacción epoxi-amina. También se pueden presentar reacciones de eterificación entre grupos epóxicos e hidróxilos obtenidos por la apertura del anillo (75).

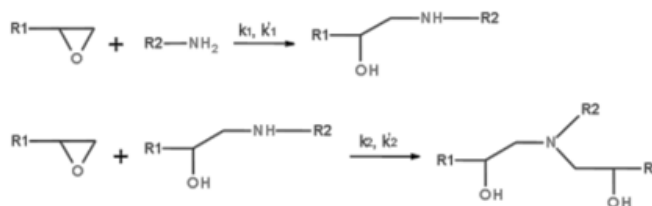


Figura 5.11 – Mecanismo de la reacción epoxi-amina.  $k_1$  y  $k_2$  corresponden a las constantes cinéticas no catalizadas para la adición de aminas primarias y secundarias respectivamente.  $k'_1$  y  $k'_2$  corresponden a los procesos catalizados (75).

Los cambios en la concentración de grupos epoxi pueden observarse en las bandas cercanas a 970, 916 y 863  $\text{cm}^{-1}$ , así como otras de menor nivel de definición ubicadas en la región entre 3050 y 3000  $\text{cm}^{-1}$ , asociadas con las vibraciones C-H presentes en los anillos aromáticos (75; 74; 72).

En el caso del endurecedor, los grupos amina tiene su principal vibración cercana a la banda 3300  $\text{cm}^{-1}$ , asociada con una amina primaria. Conforme avanza el curado, tal como se observa en la Figura 5.12, dichas bandas se van atenuando, en tanto que se aprecia el crecimiento de otras ubicadas en la región entre 3500 y 3300  $\text{cm}^{-1}$  relacionadas con los grupos hidróxilos formados como resultado de la apertura del anillo oxirano durante el proceso de curado (74; 72). Esto se observa en la Figura 5.12.

## DISCUSIÓN

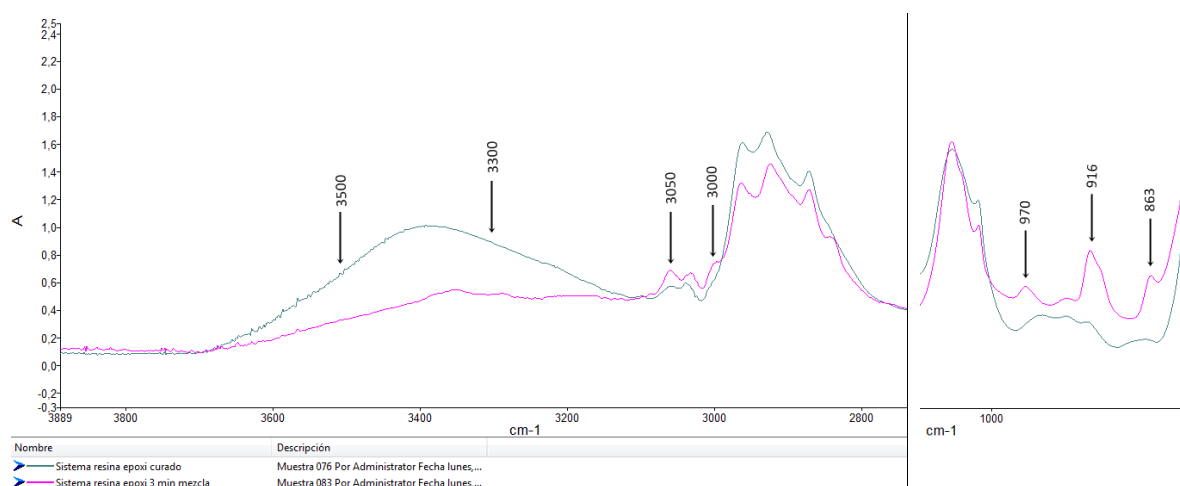


Figura 5.12 – Ampliación cambios concentración grupos epoxi y aminas durante el curado.

### 5.3.4.4 Resina poliéster insaturada

En la espectrometría de la muestra de resina poliéster sin curar, Gráfico 4.22, se observan en el rango  $3550\text{--}3250\text{ cm}^{-1}$  los picos relacionados con las vibraciones de estiramiento de los enlaces O-H, los picos entre  $2980\text{ y }2850\text{ cm}^{-1}$  corresponden a las vibraciones de estiramiento de los grupos C-H como  $\text{CH}_2$  y  $\text{CH}_3$  (76).

Los picos a  $3027$ ,  $3060$  y  $3082\text{ cm}^{-1}$  están asociados a los enlaces C-H del anillo aromático (77). Esto se puede apreciar en la Figura 5.13.

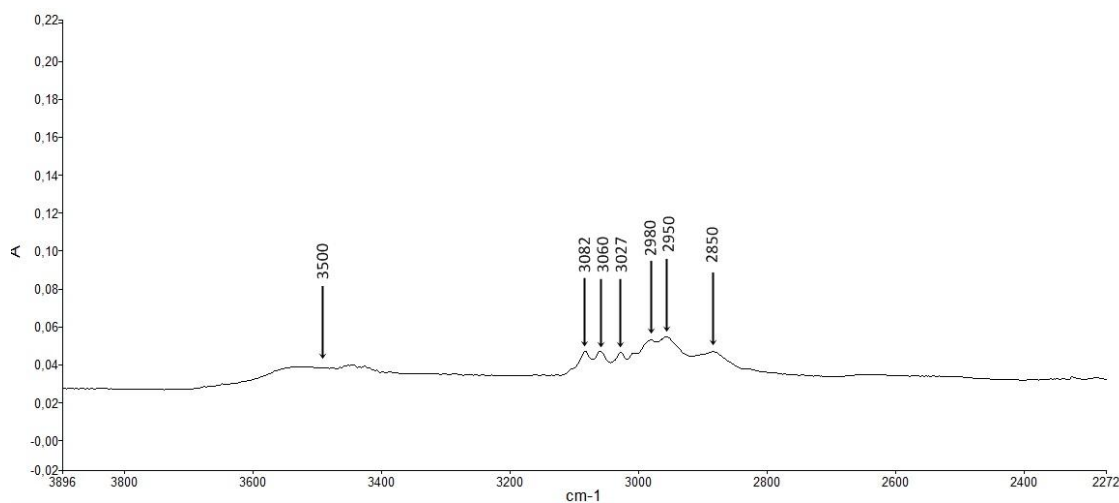


Figura 5.13 - Ampliación espectro resina poliéster  $3800\text{--}2270\text{ cm}^{-1}$

En  $1493\text{ cm}^{-1}$  hay un pico asociado al enlace C-H aromático, en  $1453\text{ cm}^{-1}$  un pico asociado a la vibración de tijera de  $\text{CH}_2$ . Además, en el rango  $1780\text{--}1720\text{ cm}^{-1}$  se observa un pico intenso asociado a las vibraciones de estiramiento del doble enlace C=O (éster) (78; 76).

La señal entre  $1290\text{--}1180\text{ cm}^{-1}$  se asigna a la vibración de estiramiento simétrica y asimétrica C-O-C (éster aromático), asimismo, entre  $1160\text{--}1072\text{ cm}^{-1}$  los picos están asociados a las vibraciones de estiramiento asimétricas y simétricas C-O-C (éster alifático) (79).

En  $979\text{ cm}^{-1}$ , pico asociado al doble enlace C=C. Los picos entre  $784\text{ cm}^{-1}$  y  $697\text{ cm}^{-1}$  se asignan a vibraciones de flexión C-H fuera del plano del anillo aromático (76). Esto se puede observar en la Figura 5.14.

## DISCUSIÓN

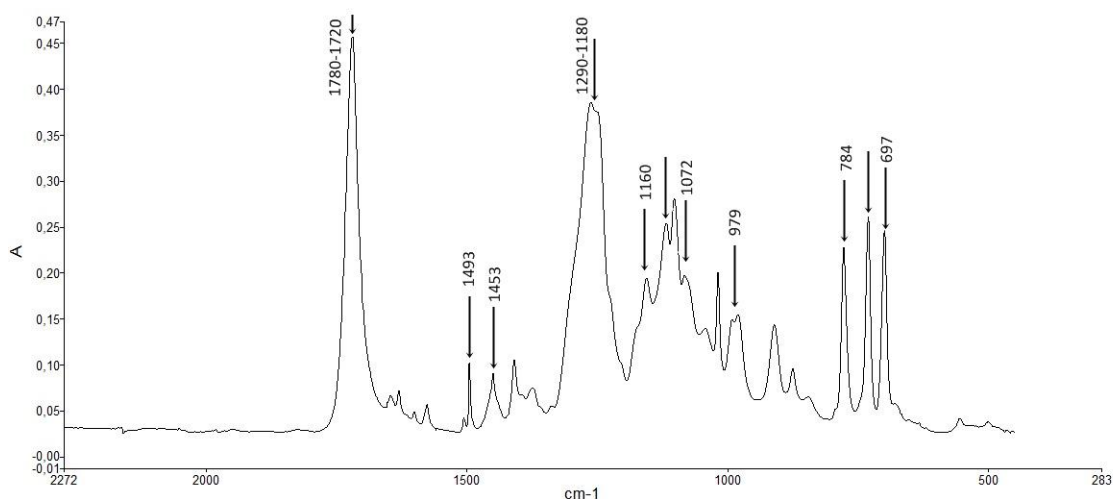


Figura 5.14 – Ampliación espectro resina poliéster 2200-500  $\text{cm}^{-1}$ .

### 5.3.4.5 Gel coat ortoftálico

La espectroscopia de la muestra del gel coat ortoftálico sin curar, Gráfico 4.23; al tratarse de una pintura especial blanca a base de resina de poliéster insaturado; es muy similar a la de resina poliéster, tal como se observa en la Figura 5.15.

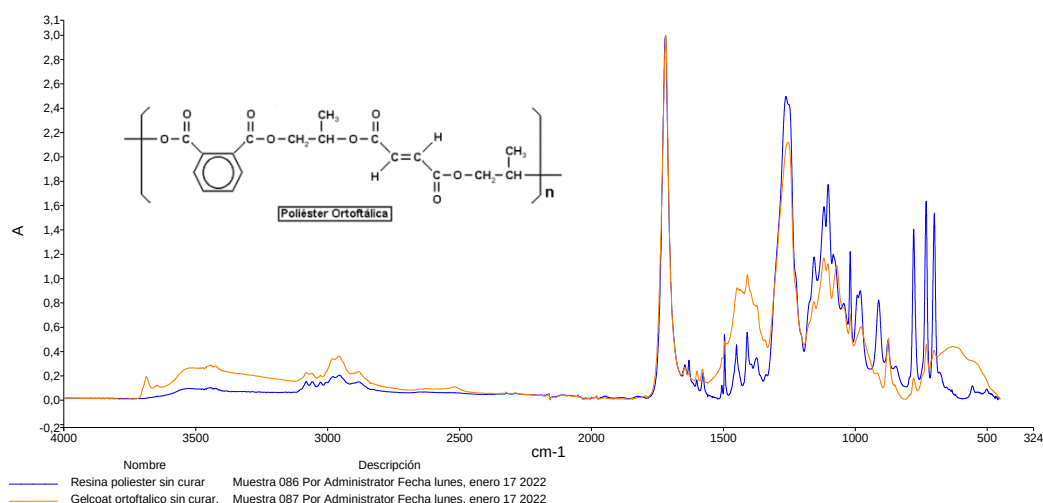


Figura 5.15 - Comparación resina poliéster con gel coat ortoftálico.

En ambos espectros, en el rango  $1780\text{-}1720\text{ cm}^{-1}$  se observa un pico intenso asociado a las vibraciones de estiramiento del doble enlace  $\text{C}=\text{O}$  (éster) (78; 76). Los picos entre  $2980$  y  $2850\text{ cm}^{-1}$  corresponden a las vibraciones de estiramiento de los grupos  $\text{C-H}$  como  $\text{CH}_2$  y  $\text{CH}_3$ . (76).

La señal entre  $1290\text{-}1180\text{ cm}^{-1}$  se asigna a la vibración de estiramiento simétrica y asimétrica  $\text{C-O-C}$  (éster aromático), asimismo, entre  $1160\text{-}1072\text{ cm}^{-1}$  los picos están asociados a las vibraciones de estiramiento asimétricas y simétricas  $\text{C-O-C}$  (éster alifático) (79).

En el rango  $3550\text{-}3250\text{ cm}^{-1}$  se observa una banda ancha asociada a las vibraciones de estiramiento de los enlaces  $\text{O-H}$  en ambos espectros.

### 5.3.4.6 Catalizador (MEKP)

En la espectrometría del catalizador (MEKP), Gráfico 4.24, perteneciente al grupo peróxido se observa entre  $1300\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$  un pico asociado con las vibraciones de estiramiento de los enlaces  $\text{C-O}$ . Asimismo una banda en  $900\text{-}800\text{ cm}^{-1}$  asociada a las vibraciones de estiramiento del enlace  $\text{O-O}$  (80).

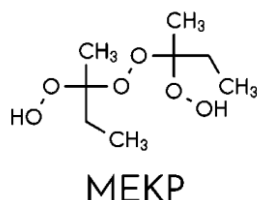
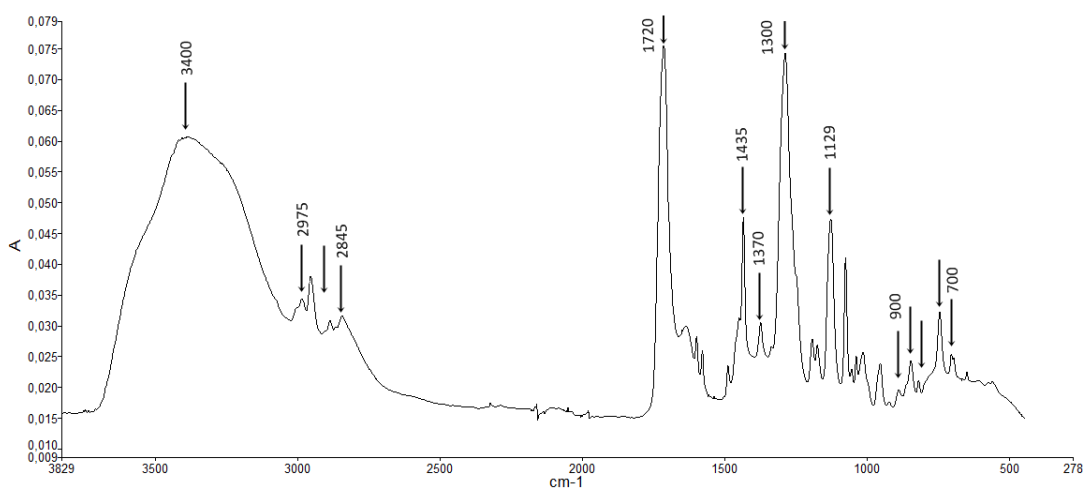


Figura 5.16- Metil etil cetona peróxido (MEKP)

En  $1720\text{ cm}^{-1}$ , hay un pico que se podría asociar al doble enlace  $\text{C}=\text{O}$  de compuestos del tipo dimetil ftalatos ya que es práctica habitual que el PMEK venga disuelto en plastificantes como los ftalatos (81). Entre  $2995 - 2845\text{ cm}^{-1}$  los picos están asociados a las vibraciones de estiramiento simétricas y asimétricas del enlace  $\text{C-H}$ , asimismo, los picos entre  $1470$  y  $1435\text{ cm}^{-1}$  están asociados con las vibraciones de flexión del enlace  $\text{C-H}$  presentes en los grupos  $\text{CH}_2$  y  $\text{CH}_3$  (80).

En el rango  $1200\text{-}1185\text{ cm}^{-1}$  se observa la señal perteneciente a la vibración “*rocking*” del enlace  $\text{CH}_3$ , y entre  $1400\text{-}1360\text{ cm}^{-1}$  una señal asociada a la vibración “*wagging*” del enlace  $\text{CH}_2$  (80).

Asociado al pico  $3400\text{ cm}^{-1}$  se observa una banda ancha asociada a las vibraciones de estiramiento de los enlaces  $\text{O-H}$  (80). Esto se puede apreciar en la Figura 5.17.

Figura 5.17 – Ampliación espectro endurecedor (MEKP)  $3800\text{-}500\text{ cm}^{-1}$ .

### 5.3.5 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

En el Gráfico 4.25 se muestran las curvas DSC obtenidas tras un barrido dinámico desde temperatura ambiente a  $240^\circ\text{C}$ , donde se puede observar la aparición de dos picos endotérmicos tanto en las curvas correspondientes a curado a temperatura ambiente ( $T_{\text{amb}}$ ) y curado a  $60^\circ\text{C}$ , esto es debido a que ambas curaron por debajo de la  $T_g$ . Es decir, las curvas muestran un pico endotérmico que enmascara la  $T_g$  como resultado del proceso de relajación estructural que experimenta el material.

A su vez, en este gráfico, podemos observar en las curvas del sistema epoxi sin curar a tiempo cero, que la curva es bimodal con dos picos exotérmicos. Estos picos podrían estar asociados a la convolución de dos procesos o reacciones diferentes, en nuestro caso podría indicar la existencia de dos procesos de polimerización y, por tanto, posiblemente de dos posibles mecanismos de iniciación (83; 84; 85). Por el intervalo de temperaturas en que aparecen los dos picos exotérmicos, algunos autores los han asignado a dos procesos de iniciación-polimerización distintos. El primer pico, a menores temperaturas podría corresponder a la polimerización inducida por la descomposición térmica del iniciador/acelerador. El segundo pico aparece a mayores temperaturas, por lo que según estos mismos autores podría corresponder a la polimerización por iniciación térmica pura de la resina. (86). En los datos brindados por el proveedor, en la ficha técnica y hojas de seguridad, no se menciona la presencia de ningún acelerador en la resina. Por lo que solo podríamos identificar el segundo pico presente a  $130^\circ\text{C}$

## DISCUSIÓN

como el correspondiente al curado térmico de la resina, y suponer que el primer pico presente a 95° C se corresponde con la presencia de algún aditivo desconocido.

Tras una segunda corrida controlada, para eliminar los picos endotérmicos en los casos en que se enmascara la  $T_g$ , se obtuvieron las curvas DSC presentes en el Gráfico 4.27. A partir de las curvas obtenidas en la segunda corrida se aplicaron los criterios establecidos (sección 3.4.5.1.3.3) para encontrar los valores de la  $T_g$ , cuyos resultados se observan en la Tabla 4.9. Asimismo, podemos observar en todas las muestras curadas durante 1,5 h que para el mismo tiempo de curado el valor de  $T_g$  aumenta con el de la temperatura.

Diversos autores (61; 87; 88) establecen como  $T_g$  la obtenida mediante el criterio del punto medio ( $T_m$ ). Sin embargo, en este trabajo, se tomó como  $T_g$  del material el valor de temperatura umbral ( $T_f$ ), debido a que es donde el polímero pasa del estado rígido al estado gomoso y sufre una importante pérdida de propiedades mecánicas (65; 89).

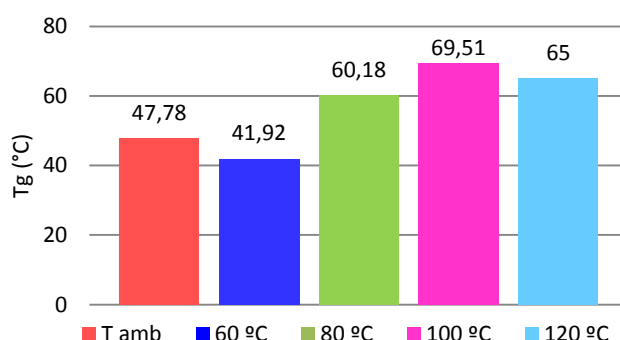


Gráfico 5.2 - Comparación de las  $T_g$  obtenidas en el DSC a las distintas temperaturas de curado.

A partir de los datos experimentales se obtuvo el grado de curado de cada muestra, como se muestra en la Tabla 4.10. 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. Esto podemos observarlo al ver que las muestras curadas durante 1,5 h a 120 y 100 °C presentan un curado completo ( $\alpha \approx 1$ ), mientras que a 80 °C ( $\alpha \approx 0,95$ ) y 60 °C ( $\alpha \approx 0,89$ ) el curado fue parcial, de acuerdo al método Bandara. En este punto, podemos observar que una mayor temperatura de curado reduce el tiempo necesario para alcanzar un valor de  $T_g$  más alto, garantizando al mismo tiempo un alto grado de reticulación (65; 66). Es decir, el valor de  $T_g$  aumenta con el grado de curado hasta llegar al valor máximo  $T_{g\infty}$ , en el cual el material está completamente curado, a partir del cual se mantendrá constante independientemente del tiempo y la temperatura de curado.

Sin embargo, para la corrida a T amb, no se pudo aplicar el método de Bandara por problemas técnicos, por lo que se tomara el valor obtenido con el método de Origin®. Considerando sin embargo que el grado de curado, de la muestra a T amb, que obtendríamos por el método Bandara sería mayor que  $\alpha \approx 0,89$  obtenido a 60°C. Esto es debido a que la muestra curada a 60° C presenta una  $T_g \approx 42$  °C, mientras que la muestra a T amb posee una  $T_g \approx 48$ °C.

El valor de  $T_{g\infty}$  del material, obtenido como el valor medio de todas las medidas completamente curadas, es de  $67 \pm 2$ °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  $T_g$  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  $T_g$ , nos garantiza que el material mantenga sus propiedades a la temperatura de

## CONCLUSIONES

servicio ( $T_g$ ) (65; 89). 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  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $+50^{\circ}\text{C}$  con un valor medio  $+15^{\circ}\text{C}$ . (90). 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  $T_g$  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  $65^{\circ}\text{C}$  (91).

Considerando que el álabe fabricado curó a temperatura ambiente, durante el mismo tiempo que la muestra analizada a  $T_{\text{amb}}$ , podemos considerar que presenta el mismo comportamiento térmico. Es decir que tendrá una  $T_g$   $47,8^{\circ}\text{C}$  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  $T_g$  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  $120^{\circ}\text{C}$  se obtuvo una  $T_{g\infty} = 67 \pm 2^{\circ}\text{C} > T_{g_s} = 65^{\circ}\text{C}$ , lo que nos asegura un curado completo y cumple con las condiciones de servicio. Mientras que a  $60$  y  $80^{\circ}\text{C}$ , los valores de  $T_g$  que se obtuvieron se encuentran por debajo de la  $T_{\infty}$  y de la  $T_{g_s}$ , 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  $T_{\text{amb}}$ ,  $60$  y  $80^{\circ}\text{C}$  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.

## 6 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 ( $\approx 1$  kW), mediante la técnica de laminación manual. A partir del trabajo expuesto y discutido se pueden extraer las siguientes conclusiones;

### 6.1 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  $C_{p \text{ máx.}}$  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.

### 6.2 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

## TRABAJOS A FUTURO

resultado 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.

### 6.3 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 microscopia 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 presento 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 determino 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 ( $T_g > 65^\circ C$ ), 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.

## 7 TRABAJOS A FUTURO

Como trabajos a futuros se propone;

Mejorar el diseño del álabe realizado, mediante la variación de los perfiles utilizados a lo largo del álabe y/o la optimización de la geometría del mismo para el ángulo de ataque (twist).

Mejorar la capacidad de cálculo de los estudios realizados mediante la dinámica de fluidos computacional (CFD), con la posibilidad contrastar con resultados experimentales obtenidos mediante un túnel de viento.

Realizar ensayos de caracterización del comportamiento mecánico del material compuesto (FEM), considerando la teoría de lámina y calculando el margen de seguridad con algún criterio de falla (Tsai-Wu, Hoffman, Christensen, Hashin y Puck).

## TRABAJOS A FUTURO

Evaluar la posibilidad de diseñar refuerzos en la zona de la raíz, que fue la zona que presentó mayores esfuerzos.

Establecer nuevas condiciones de curado y/o post curado para aumentar la Tg del álabe y lograr curado completo. Evaluar la necesidad de usar otros sistemas epoxis.

Someter al álabe construido a diferentes ensayos en un banco de pruebas, para analizar los efectos del viento en la estructura del álabe. La Norma IEC 61400-23 establece procedimientos para ensayos estructurales de álabes a escala real. (92).

## 8 REFERENCIAS

1. ODS Argentina. Argentina.gob.ar. [En línea] 2020. <https://www.argentina.gob.ar/politicassociales/ods/institucional/17objetivos#:~:text=Los%20Objetivos%20de%20Desarrollo%20Sostenible,realidad%20econ%C3%B3mica%2C%20social%20y%20ambiental..>
2. Secretaria de Energía de la Nación. *Informe Trimestral de Coyuntura Energética: Primer Trimestre de 2022*. Dirección de Información Energética, Subsecretaría de Planeamiento Energético. 2022.
3. Statista © . Potencia eólica instalada acumulada a nivel mundial en 2021, por país (en gigavattios)\*. [En línea] 2022. <https://es.statista.com/>.
4. CEA. Cámara Eólica Argentina. [En línea] 2022. <https://camaraeolicaargentina.com.ar/>.
5. Moraga Ramón, D. Giovanni. *Estudio técnico-económico de diseño y desarrollo de una pala de mini aerogenerador fabricada con material compuesto*. s.l. : Universidad Politécnica de Valencia, 2016.
6. Abreu Cetina, Rubén J. *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. 2019.
7. *Comparativa de propiedades de tracción, compresión, cortadura en el plano de materiales compuestos con fibras naturales*. Pozo, A., Fernandez-Lopez, A. and Guemes, A. 3, 2020, AEMAC: Asociación Española de Materiales Compuestos, Vol. 4, pp. 70-76.
8. White, F. *Mecánica de Fluidos*. s.l. : McGrawHil, 2008.
9. Manwell, J.F., McGowan, J.G. and Rogers, A.L. *Airfoils and General Concepts of Aerodynamics. Wind Energy Explained: theory, design, and application*. Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2009, pp. 107-115.
10. González, Carta, et al., et al. *Centrales de Energías Renovables*. s.l. : Pearson, 2009.
11. San Román, Álvaro Lucas. *Diseño de un aerogenerador para uso particular*. Universidad Carlos III de Madrid. 2013.
12. REVE . Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico. [En línea] 2018. <https://www.evwind.com/2018/07/06/las-bases-cientificas-de-la-energia-eolica/>.
13. Vitorino, Mauro Ezequiel, Labriola, Carlos Víctor Manuel and Moyano, Hugo Alberto. *Sistemas Conversores Fluido - Dinámicos de energía renovable para la Patagonia Argentina*. Universidad Nacional de la Patagonia Austral - Unidad Académica Caleta Olivia. 2017.
14. Mur Amada, J. *Curso de energía eólica*. Departamento de Ingeniería Eléctrica , Universidad de Zaragoza. Zaragoza : s.n., 2001.
15. INEOS. *Guía de laminación*. 2019.
16. *A non-destructive wind turbine blade analysis based on the Thermal Stress*. Krstulović-Opara, Lovre, Klarin, Branko and Domazet, Željko. Split, Croacia : s.n., 2009. Proceedings of the International Symposium on Coupled Methods in Numerical Dynamics. pp. 255-265.
17. Miravete, Antonio, y otros, y otros. *Materiales compuesto: Tomo 1*. s.l. : Reverté S.A., 2007. ISBN: 978-84-921349-8-4.

## REFERENCIAS

18. Chawla, Krishan K. *Composite Materials 3rd ed.* s.l. : Springer, 2012.
19. Besednjak, Alejandro. *Materiales compuestos. Procesos de fabricación de embarcaciones.* s.l. : Ediciones UPC, 2005.
20. Hickey, Christopher Michael David. *The Influence of Variation in Process Parameters on the Manufacturing of Advanced Fibre Composites.* Department of Mechanical Engineering, The University of Auckland New Zealand. 2014.
21. IEC. IEC 61400-2:2013/COR1:2019 : Corrigendum 1 - Wind turbines - Part 2: Small wind turbines. 2019.
22. National Renewable Energy Laboratory . *The S822 and S823 Airfoils.* Pennsylvania : NREL, 2005.
23. The UIUC Airfoil Data Site. Airfoil Tools. [En línea] 2020. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=clarky-il>.
24. Bastianon, R. A. *Cálculo y diseño de la hélice óptima para turbinas eólicas.* 2008.
25. Marten, David. *QBlade v0.9 : Guidelines.* TU Berlin. 2015.
26. Wallace, J. S. *Investigation Of Solidworks Flow Simulation As A Valid Tool For Analyzing Airfoil Performance Characteristics In Low Reynolds Number Flows .* Oklahoma State University . Stillwater, Oklahoma , Estados Unidos : s.n., 2019.
27. Hau, Erich. *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics. Third, translated edition.* s.l. : Springer, 2013. ISBN 978-3-642-27150-2.
28. López Garza, Victor. *DISEÑO Y MANUFACTURA DE ÁLABES DE TURBINAS DE VIENTO DE EJE HORIZONTAL DE BAJA CAPACIDAD PARA BAJAS VELOCIDADES DE VIENTO.* 2020.
29. *A Review on Design of Low Wind Speed Wind Turbines.* Sudhakar, C. J, Joshi, Dr. D R and Chitragar, Nikhil R. 12, 2019, International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering, Vol. 7. DOI 10.17148/IJIREEICE.2019.71203 .
30. Gitano-Briggs, Horizon. *Low Speed Wind Turbine Design. Advances in Wind Power.* 2012. DOI: 10.5772/53141.
31. Pavón, G. V. *Modelación de respuesta aerodinámica para aspas con stall pasivo.* Universidad del Istmo. Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca : s.n., 2018. Tesis de Maestría.
32. *Modelado y Estimación de Parámetros de un Sistema de Generación Eólico de Baja Potencia.* Ramírez-Gómez, Carlos A., Saavedra-Montes, Andrés J. y Ramos-Paja, Carlos A. Medellín : s.n., Octubre de 2013, Tecno Lógicas, págs. 209-221. ISSN 0123-7799.
33. Marten, David y Wendler, Juliane. *QBlade v0.6: Guidelines.* 2013. david.marten(at)tu-berlin.de.
34. Marten, David. *QBlade Short Manual v0.8.* 2015.
35. *Numerical analysis on flexural behaviour of GFRP sandwich roof panel with multilayer core material.* Manjusha, M y Althaf, M. 2020. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 491.
36. Ruiz, D.G. *ESTUDIO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN DE UN AUTOBÚS FABRICADO CON MATERIAL COMPUESTO.* s.l. : Universidad Pública de Navarra, 2019.

## REFERENCIAS

37. Martínez, José Luis Colín. *Desarrollo de un rotor para un aerogenerador de 50 kW clase II, diseño y simulación preliminar del cubo mecánico y aerodinámico*. Querétaro, Qro. : s.n., 2021.
38. Fividrio. Soluciones en PRFV. [En línea] 2022. <https://fividrio.es/fibra-de-vidrio-vs-fibra-de-carbono-cual-es-mejor/>.
39. Kukdo Chemical Co., Ltd. *Material Safety Data Sheet KH-816*.
40. —. *Material Safety Data Sheet: YD-128*.
41. NauticaEscalada. TEJIDOS VIDRIO E-GLASS. [En línea] 2022. <https://nauticaescalada.com.ar/eshop/categoria/composites/tejido-vidrio-e-glass/>.
42. 3dprint. [En línea] 2022. <https://3dprint.pe/introduccion-a-la-tecnologia-fff-y-sus-parametros-mas-importantes/>.
43. Balart Gimeno, Rafael Antonio. *Estimación del punto “quasi isotrópico” de laminados de material compuesto a través de gráficos “carpet plot” con eLamX*. Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales (DIMM), Escuela Politécnica Superior de Alcoy (EPSA) y Universitat Politècnica de València (UPV). 2015.
44. Viscotech. Myr viscosímetro rotacional. [En línea] Abril de 2022. <http://www.icientifica.com/Files/Productos/155.pdf>.
45. CINN. Centro de Investigación en Nanomateriales y Nanotecnología. [En línea] 2022. <https://cinn.es/caracterizacion-mecanica/>.
46. Infinitia Industrial Consulting. [En línea] 17 de Septiembre de 2020. [https://www.infinitiaresearch.com/noticias/caracterizacion-de-materiales-tecnicas/#ensayos\\_mecanicos](https://www.infinitiaresearch.com/noticias/caracterizacion-de-materiales-tecnicas/#ensayos_mecanicos).
47. ASTM. D3039/D3039M – 08 “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. 2008.
48. Kukdo Chemical Co., Ltd. Material Data Sheet: YD-128. [Online] <https://5.imimg.com/data5/HR/FD/MY-117280/standard-liquid-epoxy-resin-yd-128.pdf>.
49. Henkel Corporation. Henkel adhesives. [En línea] 2022. [https://www.henkel-adhesives.com/us/en/product/industrial-adhesives/loctite\\_ea\\_9394.html](https://www.henkel-adhesives.com/us/en/product/industrial-adhesives/loctite_ea_9394.html).
50. QUINTERO GIRALDO, LEIDY JOHANA. *DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO ELABORADO A PARTIR DE POLIPROPILENO Y FIBRAS CORTAS DE BAMBÚ MEDIANTE LA TÉCNICA DE MOLDEO POR COMPRESIÓN EN CALIENTE*. 2018.
51. Hierro, Ferran. Universitat de les Illes Balears. [En línea] 2022. <https://sct.uib.es/Instruments-i-equipos-dels-Serveis-Cientificotecnics/Area-de-microscopia-optica-i-electronica/Microscopia%20optica.cid108042#:~:text=T%C3%A9cnica,la%20de%20las%20lentes%20dobjetivos..>
52. Pertusa, Grau José. *Técnicas de análisis de imagen. Aplicaciones en Biología*. s.l. : Universitat de Valencia., 2003.
53. Callister, William. Chapter 16: Composites. *Introduction, Materials Science and Engineering: An Introduction*. 7. s.l. : Wiley, 2005, págs. 577 - 671.
54. Campbell, F.C. Chapter 1: Introduction to Composite Materials. *Structural Composite Materials*. s.l. : ASM International®, 2010.

## REFERENCIAS

55. TotalBoat. TotalBoat. [En línea] 2022. <https://www.totalboat.com/wet-layup-2/>.
56. *Void Content Determination of Carbon Fiber Reinforced Polymers: A Comparison between Destructive and Non-Destructive Methods*. Elkolali, M., et al., et al. 2022, Polymers, Vol. 14.
57. Faraldos, Marisol y Goberna, Consuelo. *TECNICAS DE ANALISIS Y CARACTERIZACION DE MATERIALES*. 2003.
58. Ean universidad. Editorial universidad ean. [En línea] 2022.  
<https://editorial.universidadean.edu.co/acceso-abierto/aplicaciones-y-generalidades-de-un-espectrofotometro-uv-vis-uv-1800-ean.pdf>.
59. Castaño Espinal, Diana Carolina. *Reacciones de fotodegradación de tirosina, histidina, metionina y hormona estimulante de los melanocitos inducidas por pterina. Capítulo 7: Análisis de soluciones irradiadas (página 110-122)*. 2016.
60. ASTM. *E1356 – 14 Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperatures by Differential Scanning Calorimetry*. 2014.
61. Moranco Llena, José María. *ESTUDIO DEL CURADO DE MATERIALES COMPUESTOS POR UN SISTEMA EPOXI Y PARTÍCULAS ELASTOMÉRICAS*. 1996.
62. © OriginLab Corporation. Origin Lab. [En línea]  
<https://www.originlab.com/doc/Tutorials/Create-Subtract-Baseline>.
63. *A SYSTEMATIC SOLUTION TO THE PROBLEM OF SAMPLE BACKGROUND CORRECTION IN DSC CURVES*. Bandara, U. 1986, Journal of Thermal Analysis, Vol. 31, pp. 1063-1071.
64. Laza, J.M., Pérez, L. and L.Ruiz. Proyecto OpenCourseWare (OCW) de la UPV/EHU. [Online] 2014. [Cited: 04 6, 2022.]
65. *EFFECT OF CURING TEMPERATURE CONDITIONS ON GLASS TRANSITION TEMPERATURE VALUES OF EPOXY POLYMER USED FOR WET LAY-UP APPLICATIONS*. Michel, M. and Ferrier, E. 2020, Construction and Buildings Materials, Vol. 231.
66. Sánchez Cabezudo Tirado, Marta. *INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE POLIACETATO DE VINILO Y NANOPARTÍCULAS DE SILICATO EN EL COMPORTAMIENTO DE UN TERMOESTABLE EPOXÍDICO*. 2012.
67. Heras Jiménez, S. *Mecánica de fluidos en Ingeniería*. Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya. s.l. : Iniciativa Digital Politècnica., 2012.
68. Delta Glass. *Boletín Técnico N° 9: Gel coats*.
69. Lopez Molina, Javier. *Refuerzo a flexión de vigas de hormigón mediante polímeros reforzados con fibra de carbono*. 2012.
70. *Curing kinetics of the epoxy system diglycidyl ether of bisphenol A/isophoronediamine by Fourier transform infrared spectroscopy*. Fraga, Francisco, et al., et al. 2008, Polymers for advanced technologies, Vol. 19, pp. 1623-1628.
71. KnowItAll®. s.l. : Wiley, 2022. Vols. Windows 7, 8, 10 or Vista.
72. *Quantitative analysis of curing mechanisms of epoxy resin by mid- and near- fourier transform infra red spectroscopy*. Cholake, Sagar T, et al., et al. 3, 2014, Defence Science Journal, Vol. 64.

## REFERENCIAS

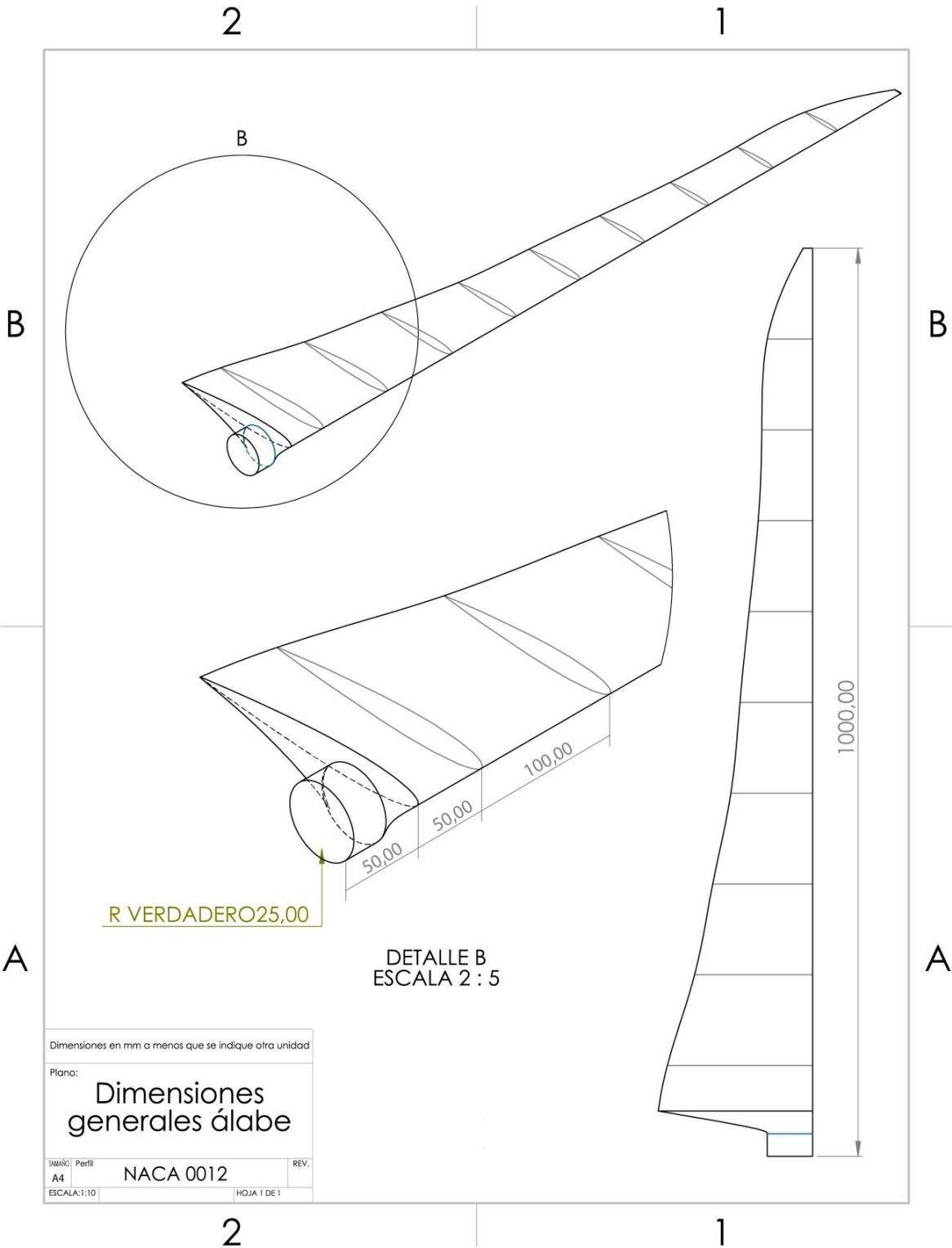
73. *Cure kinetics of epoxy-amine resins used in the restoration of works of art from glass or ceramic*. Karayannidou, Evrikleia, Achilias, Dimitris and Sideridou, Irini. 2006, European Polymer Journal, Vol. 42, pp. 3311-3323.
74. González, María González, Cabanelas, Juan Carlos and Baselga, Juan. Applications of FTIR on Epoxy Resins - Identification, Monitoring the Curing Process, Phase Separation and Water Uptake. [book auth.] Theophanides Theophile. *Infrared Spectroscopy - Materials Science, Engineering and Technology*. s.l. : InTech, 2012, 14.
75. *ESTUDIO DEL CURADO DE RESINAS EPÓXICAS*. Jaramillo, Isaac, et al., et al. 143, 2004, Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal, Vol. 71, pp. 67 - 80.
76. *Effect of Rice Husk Ash Filler of Resistance Against of High-Speed Projectile*. Koto, N y Soegijono, B. 2019. Journal of Physics: Conference Series.
77. *ESTUDIO DE LA REACCIÓN DE RETICULACIÓN DE UN POLÍMERO TERMOESTABLE DOSIFICADO CON FIBRA DE BANANO*. Amaya, Jorge B. 1, 2018, Revista Iberoamericana de Polímeros y Materiales, Vol. 19, págs. 29-44.
78. *Effects of Snail Shell as Filler on the Mechanical Properties of Terephthalic Unsaturated*. Chukwu, M.N., Madueke, C.I. and Ekebafé, L.O. 2019, Nigerian Research Journal of Chemical Sciences.
79. Zhijun, Jia, Xiaogang, Li y Quanlin, Zhao. *Effect of artificial weathering on surface properties of unsaturated polyester (UP) resin*. s.l. : Elsevier B.V., 2010.
80. Socrates, G. *Infrared and Raman characteristic group frequencies: tables and charts*. s.l. : John Wiley & Sons Ltd, 2004.
81. NJ Health. Hoja informativa sobre Sustancias Peligrosas: MEKP. 2011.
82. *Influence of Epoxy Resin Curing Kinetics on the Mechanical Properties of Carbon Fiber Composites*. Cruz-Cruz, I., et al., et al. 2022, Polymers, Vol. 14, p. 1100.
83. *Towards understanding the effects of heat and humidity on ageing of a NASA standard pyrotechnic igniter*. Oh, Juyoung, Jang, Seung-gyo and Yoh, Jack J. 2019. Scientific Reports.
84. Gracia-Fernández, Carlos A., et al., et al. *New approach to the double melting peak of poly(l-lactic acid) observed by DSC*. 2012.
85. Ramis, Juan X. *Estudio de la eficiencia de sistemas químicos del curado de resinas. Capítulo 4: Iniciación térmica. Iniciación química*. s.l. : Tesi doctoral, UPC, Departament de Màquines i Motors Tèrmics., 1994.
86. *Modelling of chemical shrinkage evolution with curing degree of a filled epoxy adhesive*. Holst, T., Sayer, F. and Antoniou, A. 2020. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
87. Vidal, Juan Alberto González. *Efecto del Contenido de Fibra de Vidrio sobre las Propiedades Mecánicas en Probetas de PBT Reforzado*. 2013.
88. Mei y Li. *TEMPERATURE AND MOISTURE EFFECTS ON COMPOSITE MATERIALS FOR WIND TURBINE BLADES*. 2000.
89. DNV GL standards. *DNVGL-ST-0437: Loads and site conditions for wind turbines*. 2016.

## REFERENCIAS

90. Germanischer Lloyd coop. Wind Energy Committee. *Guideline for the Certification of Wind Turbines*. Germanischer Lloyd in cooperation with the Wind Energy Committee. Hamburg : Germanischer Lloyd, 2010.
91. International Electrotechnical Commission. *IEC 61400-23 Wind turbines- Part 23: Full-scale structural testing of rotor*. Switzerland : s.n., 2014.
92. *Effect on superhydrophobic surfaces on electrical porcelain insulator, improved technique at polluted areas*. Ramalla, Isaac, Gupta, Rajeev K and Bansal, Kamal. 2015, International Journal of Engineering & Technology, pp. 509-519.
93. *ENVEJECIMIENTO FÍSICO DEL SISTEMA BADGE N = O/M-XDA MODIFICADO CON NANOPARTÍCULAS DE ORO Y NANOARCILLA*. Fraga, F., et al., et al. 5, 2016, Revista Iberoamericana de Polímeros, Vol. 17.
94. *Tensile behavior of glass/epoxy laminates at varying strain rates and temperatures*. Reis, J.M.L., Coelho, J.L.V. y Monteiro, H.S. da Costa Mattos. s.l. : Elsevier, 2012, Composites: Part B, Vol. 43, págs. 2041–2046.
95. Lozzi, J. P. *Fabricación de palas de turbinas eólicas para aerogeneradores de 4 m de diámetro*. Mar del Plata : Universidad Nacional de Mar del Plata, 2011. Proyecto Final.
96. ABB. Cuaderno de aplicaciones técnicas n.º 12: Plantas eólicas. 2012.

9 ANEXOS

ANEXO 1 – Plano álabo



## ANEXOS

### ANEXO 2 – Cálculos tela, resinas y gel coat

#### Molde

Cabe aclarar, que al momento de la construcción se pesó la de tela seccionada para el molde y el peso real de la misma varía en referencia al cálculo teórico, por lo que se realizó un ajuste en los cálculos.

| TELA MOLDE                      |                                   |                             |                                 |
|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Área por capa (m <sup>2</sup> ) | Densidad tela (g/m <sup>2</sup> ) | Cálculo teórico 4 capas (g) | Tela real utilizada 4 capas (g) |
| 0.2627                          | 300                               | 777,16                      | 853,25                          |

Tabla 9.1- Cálculos tela para el molde.

(\*) Dato obtenido de la experiencia del grupo

| Proporción (*)  | RESINA POLIESTER           |                                         |                                       |                                        |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|
|                 | Cálculo teórico resina (g) | Calculo cantidad de resina a usar (g)** | Cantidad real de resina utilizada (g) | Cantidad de catalizador utilizado (ml) |
| 55% peso tela   | 777.16                     | 853.25                                  | 853.25                                | -                                      |
| 45% peso resina | 636.21                     | 858.88                                  | 990.00                                | 14.85                                  |

Tabla 9.2- Cálculos resina poliéster para el molde.

(\*\*) Estimamos un 35% más que la teórica

#### Álabe

Considerando los cálculos realizados para el laminado del molde, se realizaron los recortes de fibra de vidrio necesarios para el álabe, se pesaron, y en base a esto se calculó la resina necesaria, considerando un 45% de resina epoxi en peso.

| Proporción (*)  |                     |        |
|-----------------|---------------------|--------|
| 55% peso tela   | Fibra de vidrio (g) | 830,55 |
| 45% peso resina | Resina epoxi (g)    | 679,54 |

Tabla 9.3- Calculo resina epoxi para el alabe.

(\*) Dato obtenido de la experiencia del grupo

#### Gel coat

En base a la superficie de la pieza y a las especificaciones del proveedor se calculó la cantidad de gel coat que requerida.

| Superficie álabe (m2) | Gel coat (g) | Catalizador (ml) |
|-----------------------|--------------|------------------|
| 0,2092369             | 41,85        | 0,63             |

Tabla 9.4- Calculo de gel coat

Por una cuestión de practicidad el lote de gel coat que se preparó fue de 50 g de resina y 0,75 ml de catalizador.

### ANEXO 3 – Gráficos comparación de los perfiles mediante QBlade® y SolidWorks® Flow Simulation

En los gráficos a continuación se puede observar el comportamiento de los coeficientes de sustentación y arrastre con respecto al ángulo de ataque, y la curva polar de cada perfil.

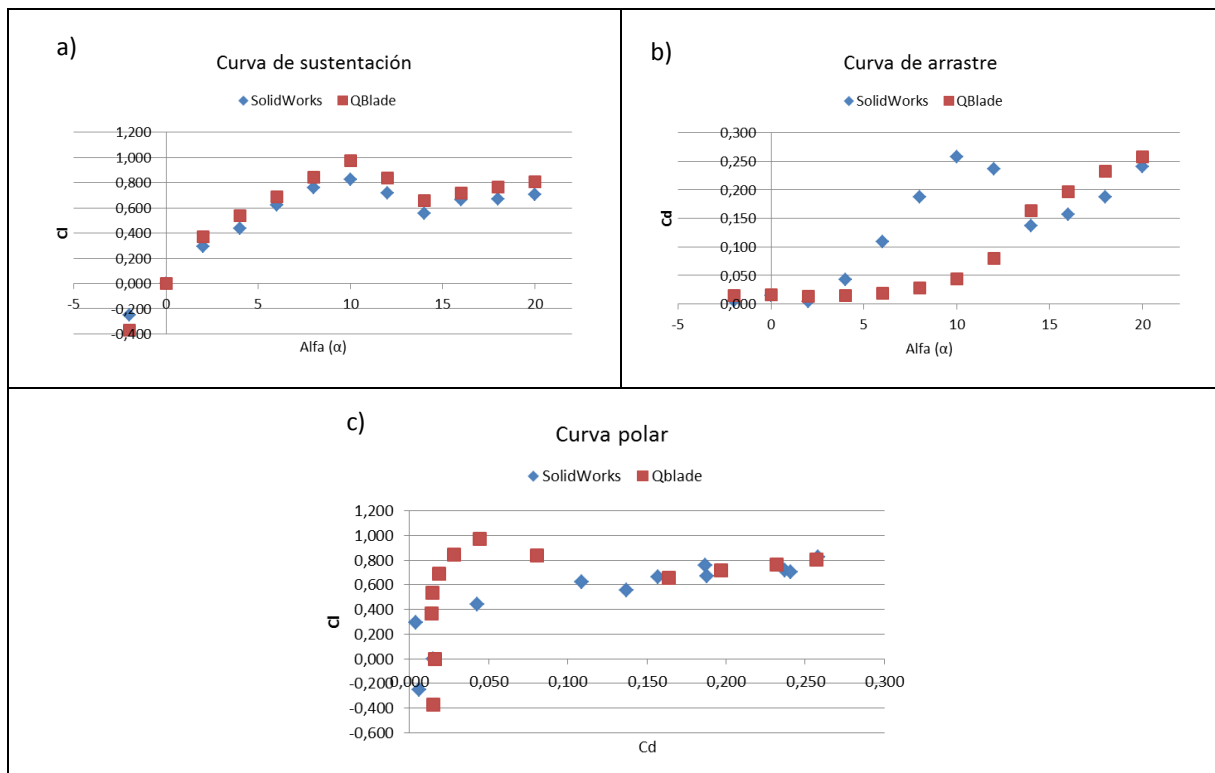


Figura 9.1 – Resultados perfil NACA 0012  $Re=109.007$ ; a) curva sustentación, b) curva de arrastre y c) curva polar.

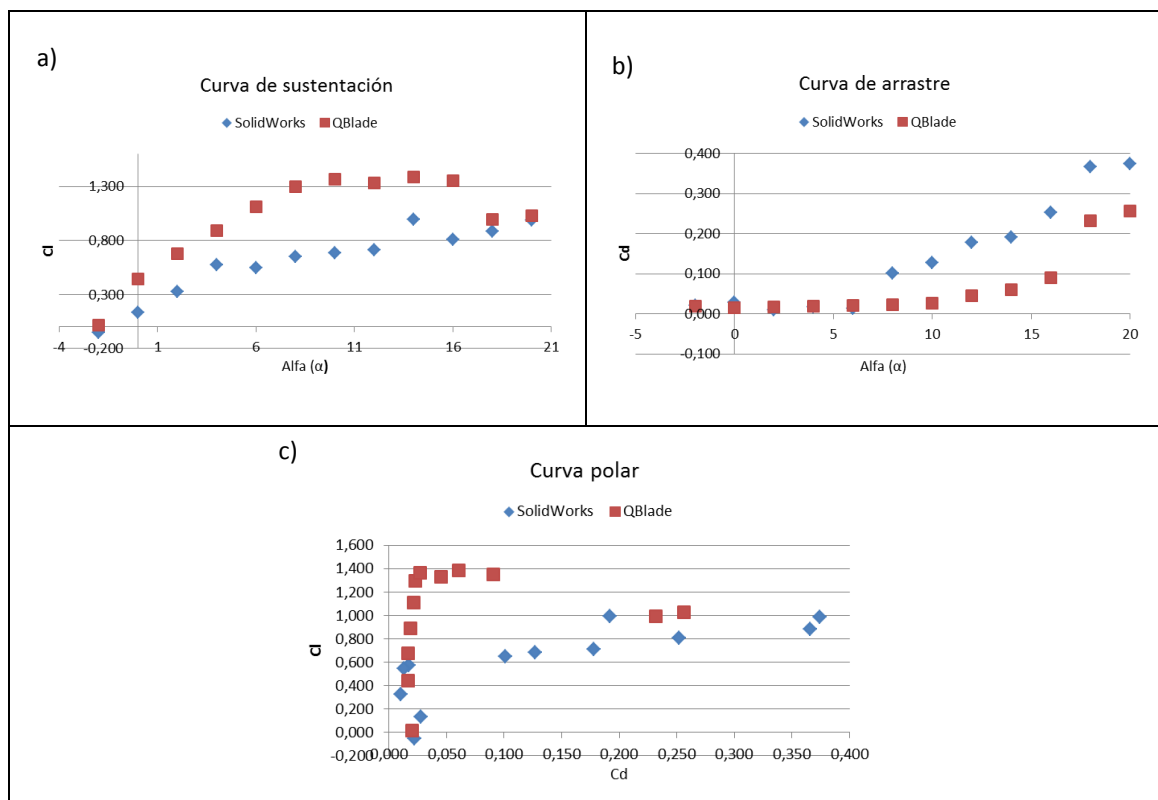


Figura 9.2 – Resultados perfil NACA 4412  $Re=109.007$ ; a) curva sustentación, b) curva de arrastre y c) curva polar.

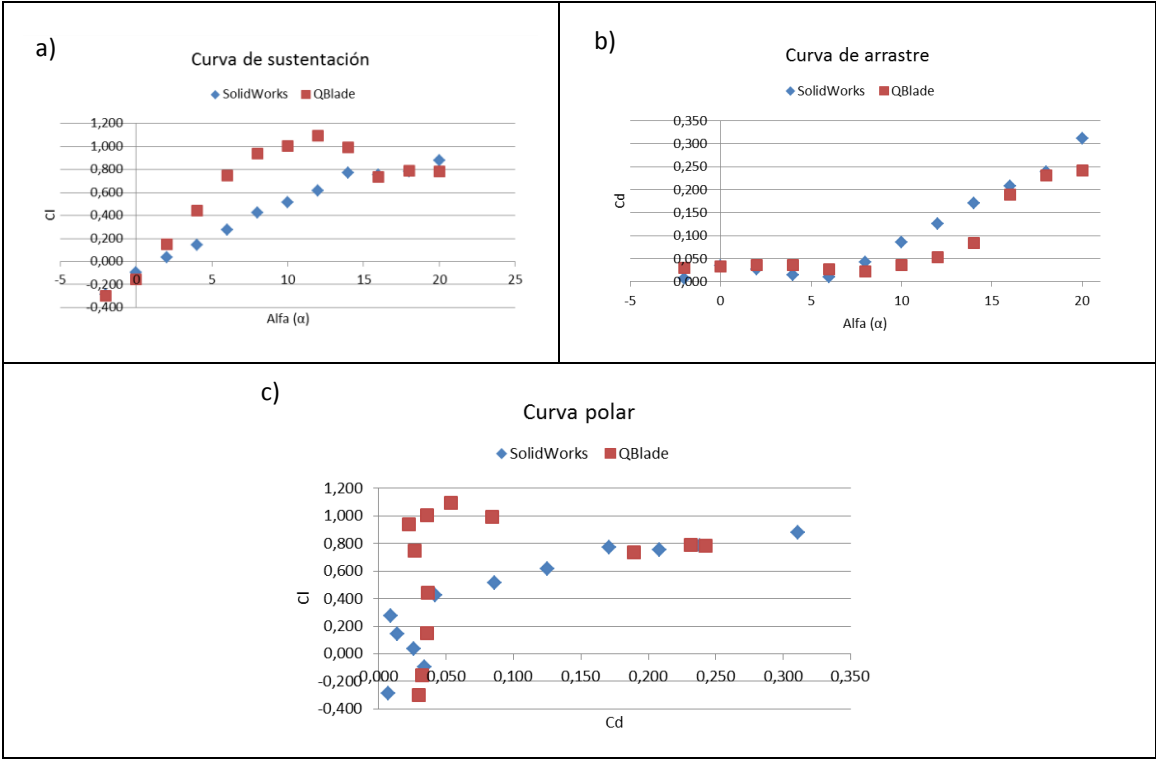


Figura 9.3 – Resultados perfil NREL S822 Re=109.007; a) curva sustentación, b) curva de arrastre y c) curva polar.

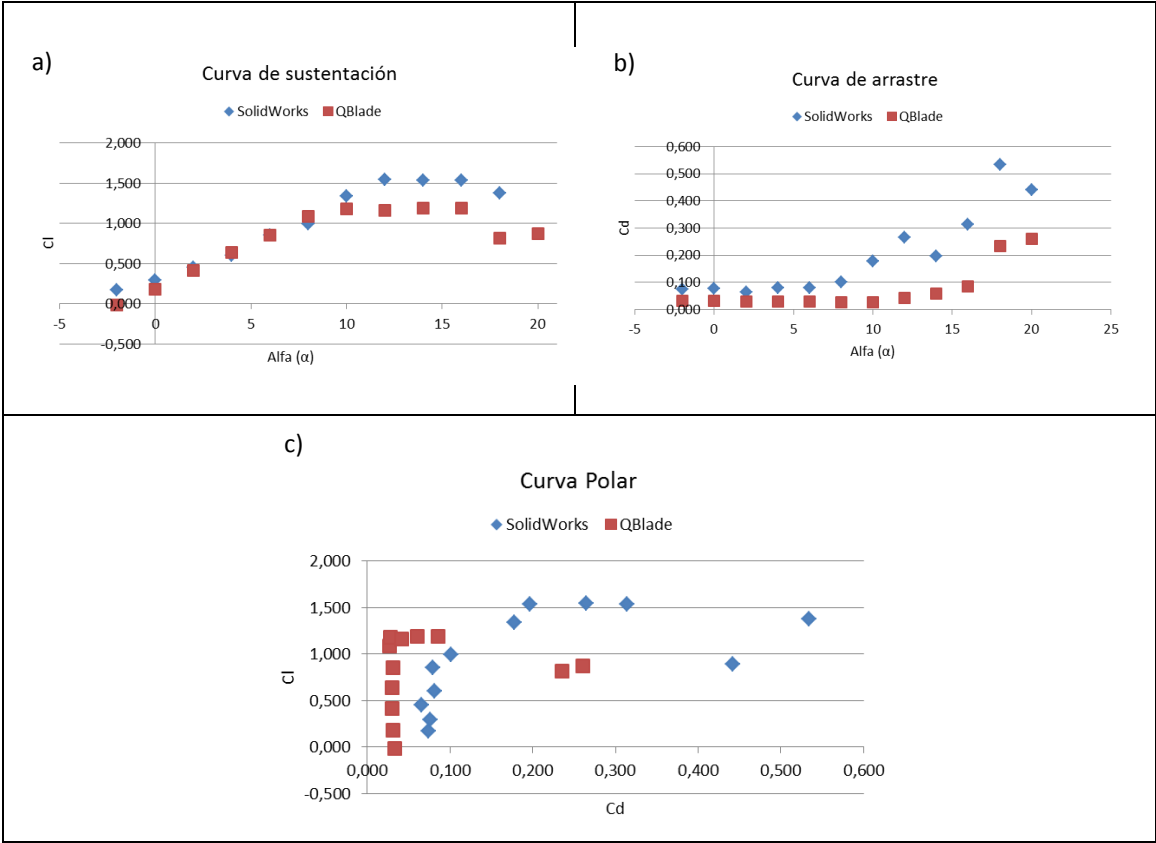


Figura 9.4- Resultados perfil NREL S823 Re=109.007; a) curva sustentación, b) curva de arrastre y c) curva polar.

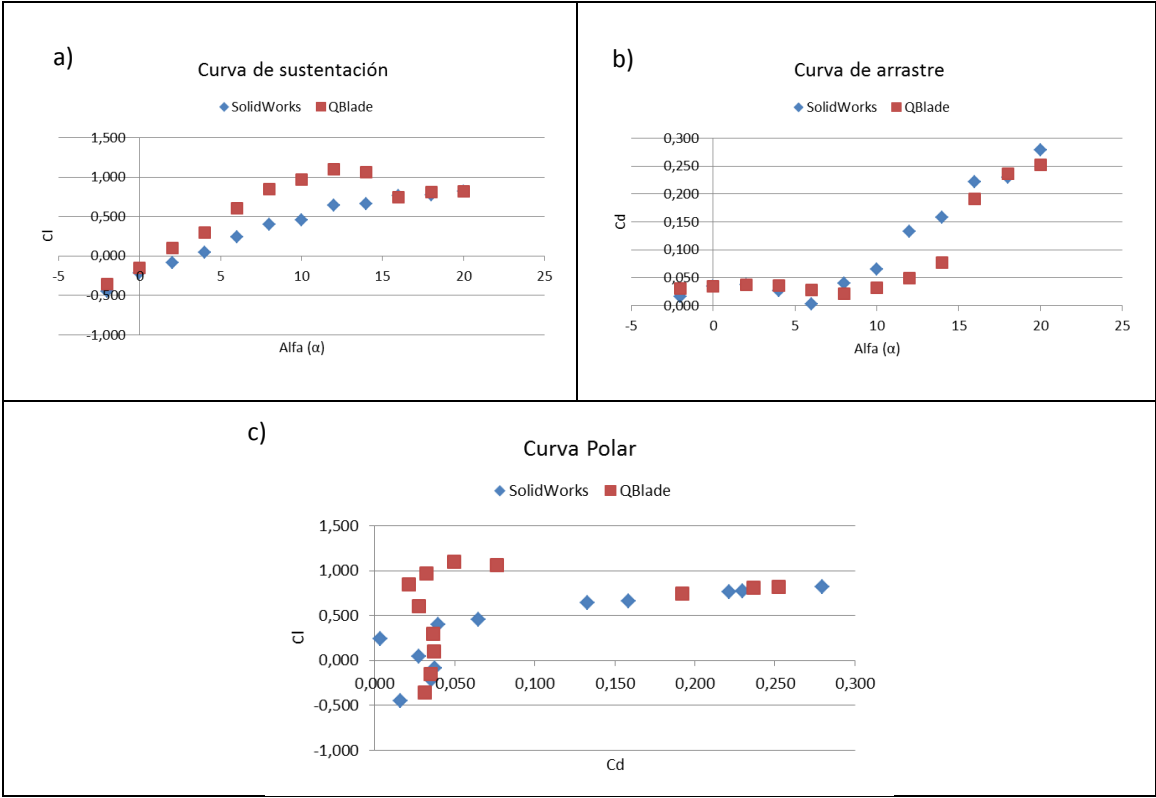


Figura 9.5 – Resultados perfil NREL S833 Re=109.007; a) curva sustentación, b) curva de arrastre y c) curva polar.

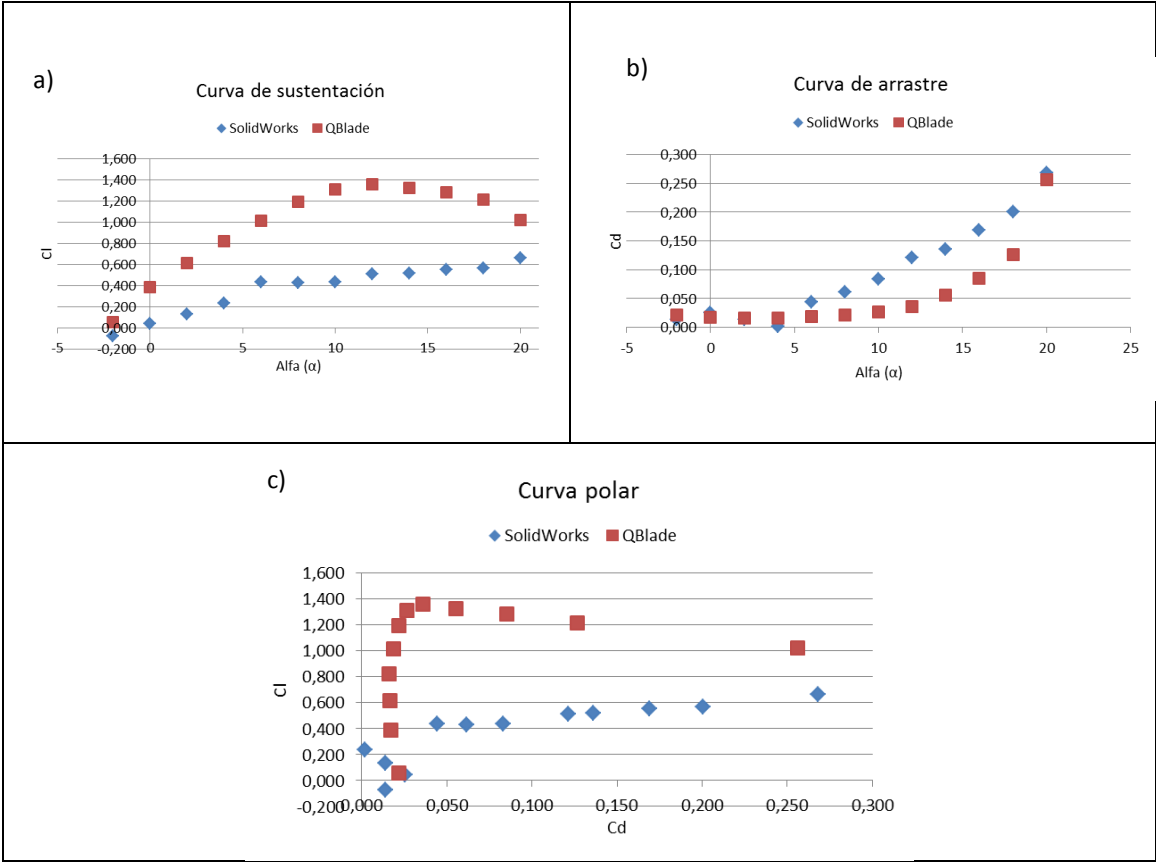


Figura 9.6 – Resultados perfil CLARK Y Re=109.007; a) curva sustentación, b) curva de arrastre y c) curva polar.

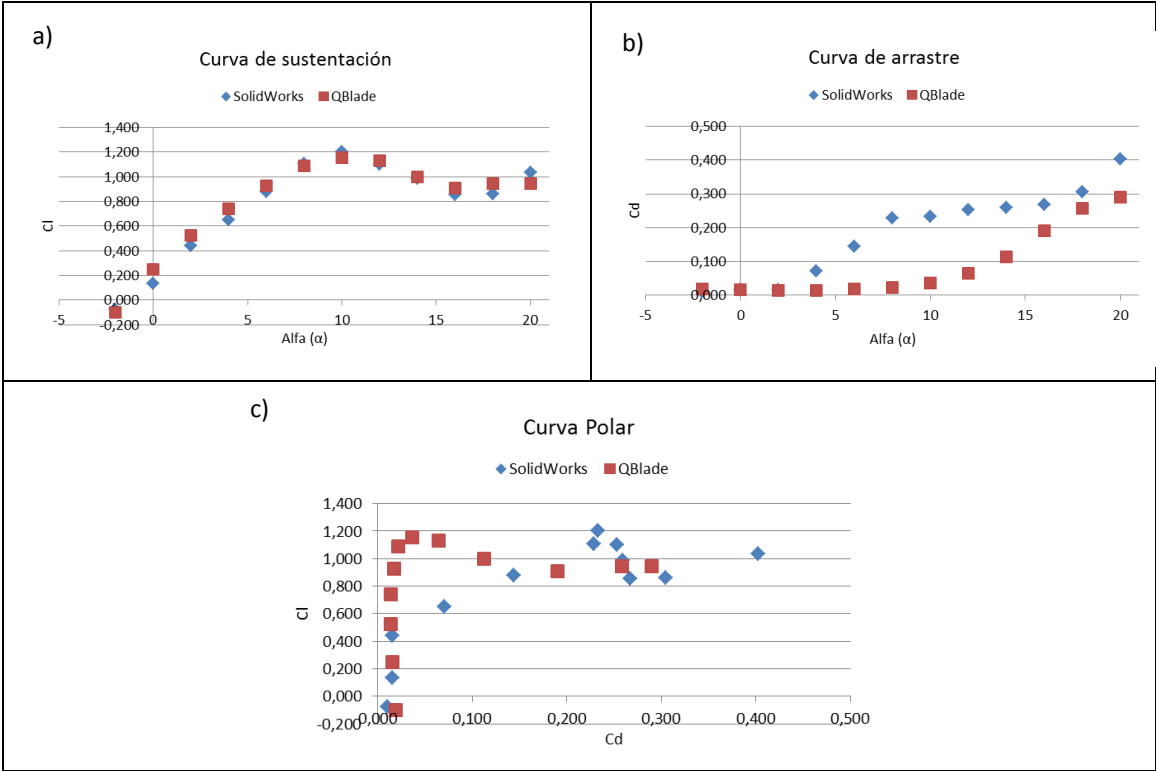


Figura 9.7– Resultados perfil SD7080 (9.2%) Re=109.007; a) curva sustentación, b) curva de arrastre y c) curva polar.

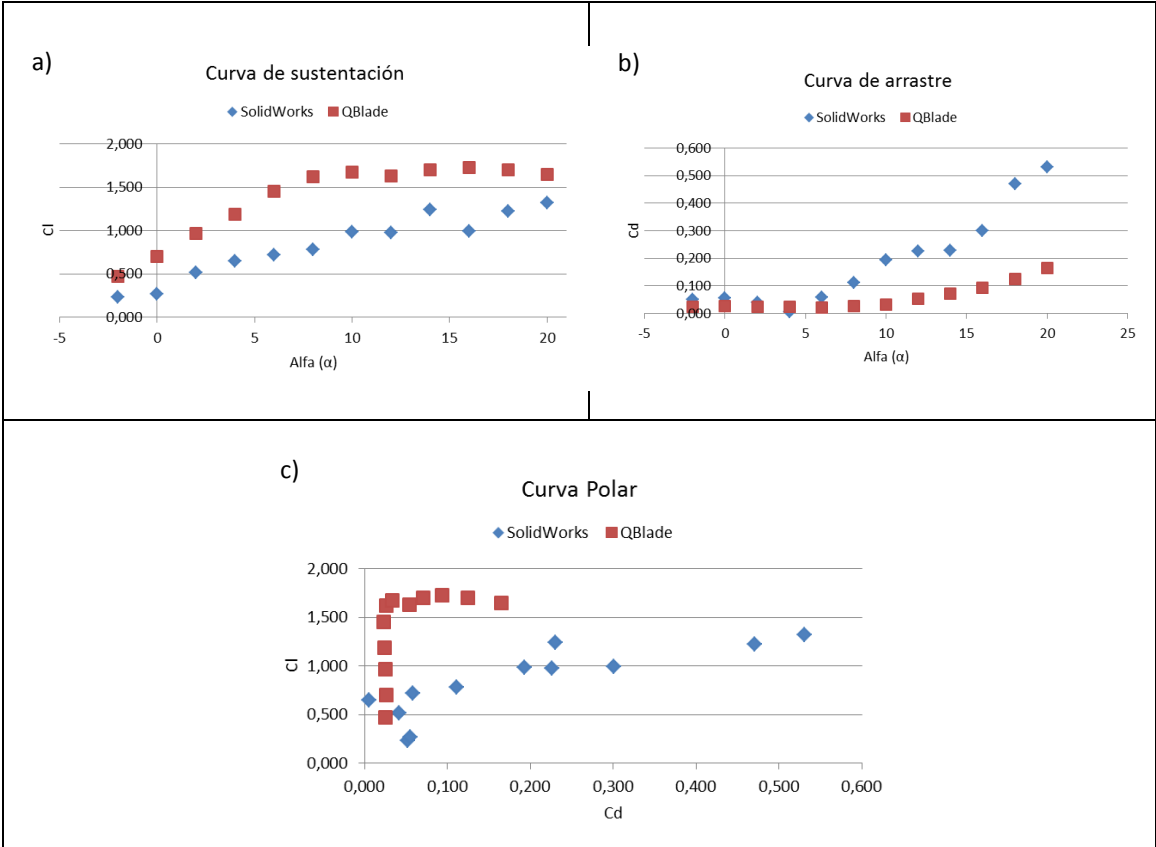


Figura 9.8 – Resultados perfil Wortmann FX 63-137 Re=109.007; a) curva sustentación, b) curva de arrastre y c) curva polar.