



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería

**“Análisis térmico transitorio para el proceso de curado
del molde para un aspa de 30 m de una turbina eólica de
1.2 MW”**

REPORTE DE APLICACIÓN DE CONOCIMIENTOS

**Que para obtener el título de
Ingeniera en Sistemas Energéticos Sustentables**

Presenta

Verónica Metzlin González Méndez

Asesora

Dra. Miriam Sánchez Pozos

Toluca, 2024

Resumen

En el centro de investigación de CIATEQ A.C. unidad Querétaro, se encuentra el Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica: CEMIE-Eólico, tiene como fin el desarrollo de nuevo conocimiento y tecnologías para la transformación de la energía proveniente del viento. En este laboratorio se han realizado varias manufacturas de aspas, la más grande que se había realizado hasta el momento fue una de 6 m de longitud, luego se recibió el pedido de hacer un aspa de 30 m de largo, lo cual era un reto ya que nunca se había trabajado con un aspa tan grande.

Debido a esto, se comenzaron a presentar propuestas para cada uno de los pasos necesarios en la elaboración de dicha aspa, este trabajo es una de ellas, la elaboración de las aspas anteriores se realizó mediante el modelo de inyección de resina asistida por vacío (VARTM), tanto en los moldes y conchas del aspa, el curado de los moldes se hacía al usar un encajonado al igual que el planteado en este trabajo, por lo que se analizará de manera análoga.

Al ser un aspa de mayor tamaño, se planteó hacer en partes el modelo maestro, para una manufactura más precisa y eficiente, al tener fabricadas todas las piezas del molde, se unirán para proceder con el acomodo de la fibra de vidrio y hacer el curado de la resina, y obtener el molde de la pieza final.

Teniendo esto en cuenta, la parte del proceso en la que se centra este trabajo es lograr una configuración que logre estar en las condiciones de temperatura adecuadas para el correcto curado de la resina, y mediante ello, obtener un modelo maestro con características óptimas para realizar las conchas del aspa final.

Por lo tanto, se tiene un análisis de flujo en una región controlada (molde del aspa), dónde las entradas y salidas de flujo se encuentran relacionadas con los calentadores y sopladores especificados en el Anexo I, se realizará una modificación del número de entradas y salidas necesario hasta obtener una temperatura homogénea dentro del molde.

ÍNDICE

PLANTEAMIENTO	XI
OBJETIVOS	XII
SÍMBOLOS Y UNIDADES.....	XIII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTO TEÓRICO	2
1.1 Energía Eólica.....	4
1.2 Obtención de la energía eólica.....	6
1.3 Partes que conforman una turbina de eje horizontal.....	10
1.4 Métodos de fabricación para turbinas de viento de eje horizontal	15
1.5 Moldes para aspas y su diseño.....	20
CAPITULO 2. MÉTODO DE ELABORACIÓN DE ASPA	23
2.1 Método de Transferencia Asistido por Vacío	23
2.2 Curado de resina.....	28
2.3 Temperatura de transición vítrea	31
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN DE FLUJO DE AIRE CALIENTE .	33
3.1 Programación del software	34
3.1.1 Volumen de control	36
3.1.2 Generación de malla	38
3.1.2.1 Tipos de métricas de malla de ANSYS (<i>mesh metrics</i>).....	39
3.1.3 Condiciones iniciales y de frontera.....	46
3.1.4 Configuración del solucionador (solver)	48
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	57
4.1 Gradientes de temperatura	57
4.2 Gradientes de velocidad del flujo de aire	59
Recomendaciones.....	70
Referencias:	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cambio en el consumo de petróleo y electricidad, 2000-2018. Copia 2022, International Energy Agency (IEA).	3
Figura 2. Cambio en consumo de petróleo y electricidad en escenario 2018-2040, Copia 2022, IEA.	3
Figura 3. Diagrama que ejemplifica el área de barrido.....	7
Figura 4. Eje de rotación, a) Turbina de eje vertical, b) Turbina de eje horizontal. 7	
Figura 5. Componentes de una turbina de eje horizontal (Lindy Energy, 2022). .	11
Figura 6. Aspa, punta-raíz, vista de estructura (CIATEQ A.C.).....	12
Figura 7. Prueba estructural estática, realizada en el Laboratorio de Innovación en Energía Eólica (CIATEQ A.C.).	13
Figura 8. Estructura interna de un aspa (CIATEQ A.C.)	14
Figura 9. Vista superior de bolsa de vacío colocada en el molde para llevar a cabo infusión de resina (CIATEQ A.C.).....	17
Figura 10. Aspa, estructura Interna.....	18
Figura 11. Submodelos maestros del lado succión del aspa (CIATEQ A.C.).....	19
Figura 12. Lado succión y presión de un aspa.....	19
Figura 13. Encajonado del modelo maestro, aspa de 30 metros (CIATEQ A.C.) ..	20
Figura 14. Diagrama del método de resina asistida por vacío.	24
Figura 15. Molde maestro lado succión (CIATEQ A.C.).....	24
Figura 16. Burbujas visibles en la superficie entre el molde y la fibra de vidrio (CIATEQ A.C.).....	25
Figura 17. Acomodo de fibra, molde lado succión (CIATEQ A.C.).....	26
Figura 18. Arreglo del sistema de vacío, Zamudio (2020).....	27
Figura 19. Arreglo de sistema de vacío, Zamudio (2020).	27
Figura 20. Frente de resina a los 5 y 15 minutos del inicio de la infusión, Zamudio (2020). 28	
Figura 21. Encajonado usado para aspa de 6m lado succión del molde, CIATEQ A.C. (2020) 30	
Figura 22. Gráfica de temperatura para el curado de la resina (CIATEQ A.C.).	32
Figura 23. Metodología de análisis térmico para el molde del aspa.	35

Figura 24.Región en azul: concha del lado succión del aspa, a partir de la cuál es creado el volumen de control (líneas gruesas en negro).....	36
Figura 25.Pantalla principal (Workbench) de ANSYS.	37
Figura 26.Malla generada por ANSYS de manera automática.	39
Figura 27.Deformación de los elementos de acuerdo con la calidad de Relación Aspecto. 40	
Figura 28.Acercamiento de la malla en entradas y salidas.	43
Figura 29.Resultado para Asimetría: métrica de malla, configuración final.....	44
Figura 30.Comparación de resultados para las tres mallas analizadas, de arriba abajo: malla de un millón de elementos, malla de medio millón, malla de doscientos mil elementos.	45
Figura 31.Primer configuración del aspa, entradas y salidas propuestas calentadores (2), sopladores (2).....	51
Figura 32.Propuesta de entradas y salidas para la segunda configuración (5 calentadores, 5 sopladores).	52
Figura 33.Configuración 3, entradas y salidas, calentadores (7) y sopladores (4).53	
Figura 34.Salidas de aire (4).....	54
Figura 35.Temperaturas alcanzadas con la primera configuración, conformada de dos calentadores y dos sopladores.	57
Figura 36.Temperaturas alcanzadas en la segunda configuración.	58
Figura 37.Temperaturas alcanzadas con la tercera configuración propuesta.	59
Figura 38.Gráfica de continuidad, velocidad en tres direcciones, energía y $k-\omega$. .	60
Figura 39.Velocidad promedio del molde.....	61
Figura 40.Flujos de velocidad dentro del molde(acercamiento).....	62
Figura 41.Campos de velocidad que muestran la turbulencia, imagen superior mayor área, inferior: parte más angosta del molde.	63
Figura 42.Temperatura total.....	64
Figura 43.Temperatura del molde.....	65
Figura 44.Temperatura total en las salidas.	66
Figura 45.Comparación de los resultados de temperatura para los tres escenarios propuestos.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de aerogeneradores, atendiendo a su seguridad por diseño (IEC 61400-1).....	5
Tabla 2. Calidad de los elementos de acuerdo con el valor de asimetría.	40
Tabla 3. Resultados obtenidos en tres mallas con variación de número de elementos y nodos.	44
Tabla 4. Variables de entrada.....	47
Tabla 5. Características de calentadores y sopladores, valores para condiciones de frontera.	47
Tabla 6. Escenarios propuestos, disposición de herramientas de inyección de flujo. 50	
Tabla 7. Balance de flujos de salida.	56
Tabla 8. Características del calentador, LEISTER.....	76
Tabla 9. Características principales del soplador, LEISTER.....	76

PLANTEAMIENTO

Dentro de la investigación llevada a cabo en el centro de energía eólica del Centro de Tecnología Avanzada A.C. (CIATEQ), se mantiene una constante mejora e inserción de nuevos métodos para la elaboración de aspas, con el paso de los años se han realizado proyectos de distintas potencias, en el año 2020 se inició un proyecto que involucraba un aspa de 1.2 MW.

Al no haberse realizado un proyecto de tal magnitud dentro de la construcción del molde fue necesario proponer un nuevo método de secado para las conchas del aspa.

Este trabajo presenta una opción para conseguir el correcto curado de la resina en los moldes para la elaboración de las conchas del aspa final, ya que la calidad final del aspa depende de éstas, para comprobar que la propuesta funciona, se optó por hacer una simulación computacional y evaluar el comportamiento del flujo de calor dentro del molde y así verificar el correcto secado de la resina mediante la distribución de calor dentro del molde.

Lo que se busca es llevar a cabo un análisis térmico a partir de una caracterización del proceso de curado debido a que no existe un estudio realizado para alcanzar de forma eficaz el valor recomendado por el proveedor de la resina.

La simulación presentada en el trabajo se ofrece como base para futuras aplicaciones dónde se requiera encontrar el campo de temperaturas requerido para un curado uniforme y obtener la calidad deseada del material.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Proponer tres escenarios de operación para los sopladores y calentadores mediante simulaciones, utilizando el software ANSYS para controlar el proceso del curado de la resina epóxica de los moldes para las aspas del aerogenerador de 1.2 MW.

Objetivos específicos

- Obtener una distribución de temperatura uniforme correspondiente a la requerida para el curado de la resina (80°C) mediante una configuración específica de los calentadores y sopladores.
- Visualizar con las simulaciones en el software ANSYS la manera en que se comporta el fluido dentro del volumen de control y la configuración de calentadores y sopladores para el correcto curado del molde.
- Reducir el gasto de material y energía que se le tiene que brindar al ciclo de curado mediante una correcta configuración de sopladores y calentadores.

SÍMBOLOS Y UNIDADES

$\dot{w}$	<i>potencia del viento</i>	$[kW]$
d	<i>diámetro del rotor</i>	$[m]$
m	<i>masa</i>	$[kg]$
V	<i>velocidad del viento</i>	$[m/s]$
ρ_{aire}	<i>densidad del aire</i>	$[kg/m^3]$
A	<i>área de barrido</i>	$[m^2]$
C_p	<i>coeficiente de potencia</i>	$[kW/m^2]$
∇	<i>vector divergencia</i>	
$\vec{V}$	<i>vector velocidad</i>	$[m/s]$
t	<i>tiempo</i>	$[s]$
ρ	<i>densidad</i>	$[kg/m^3]$
$\vec{F}_b$	<i>fuerza de presión</i>	$[N/m^2]$
p	<i>presión</i>	$[Pa]$
μ	<i>viscosidad dinámica</i>	$[kg/ms]$
e_t	<i>energía total</i>	$[W]$
k	<i>conductividad térmica</i>	$[W/mK]$
T	<i>temperatura</i>	$[K]$
$\dot{S}_g$	<i>fuerza de generación de energía externa</i>	$[W]$
$\bar{\tau}$	<i>tensor de esfuerzo cortante</i>	
sop_n	<i>sopladores indicados en volumen de control</i>	$[kg/s]$
cal_n	<i>calentadores indicados en volumen de control</i>	$[kg/s]$
sal_n	<i>salidas de flujo para el volumen de control</i>	$[kg/s]$

INTRODUCCIÓN

El uso de paquetes computacionales para la previsualización de una propuesta dentro del mundo de la ingeniería se hace con el fin de reducir costos, como en el caso que se presenta, antes de realizar la inversión en el método para el curado de la resina del molde del aspa, se hacen una serie de pruebas de manera virtual para comprobar la efectividad de este, y así asegurar un buen resultado al llevarlo a cabo de manera real.

Simular el comportamiento térmico que se tendrá dentro del molde ayuda a verificar y mejorar las propuestas de diseño que se consideran en este trabajo, además de brindar la oportunidad de generar tres escenarios para elegir el óptimo, que se adapte a las necesidades del problema.

El uso del software ANSYS es un paso primordial para este trabajo ya que nos ayuda a observar el comportamiento del flujo dentro del molde y predecir el correcto curado de la resina, que como se mostrará es uno de los pasos más importantes en la elaboración de aspas, ahorrando tiempo y materiales, convierte al uso de este tipo de herramientas computacionales en una excelente inversión.

De igual forma la modificación de los parámetros y características en Ansys brinda flexibilidad al momento de trabajar con propuestas de ingeniería al poder aumentar o disminuir herramientas, materiales, condiciones ambientales, etc.

Iniciando con una idea general del uso de la energía eólica para la sustitución de los combustibles fósiles y los diferentes tipos de turbinas que existen se avanza como se elaboran los aerogeneradores y que etapas de este proceso son de interés para el trabajo. Brindando información más detallada de dichas etapas y como se relacionan con los resultados obtenidos de la simulación realizada en ANSYS, para el cual se cuenta con un capítulo completo debido a que es donde se centra la meta principal de este trabajo, es decir, encontrar la mejor configuración de herramientas de inyección para el correcto curado de la resina. En cuanto a la configuración utilizada para realizar la simulación, se describen detalles específicos usados para obtener valores confiables con ayuda del software.

En los capítulos finales se tienen los resultados obtenidos y la discusión del porqué fue seleccionado ese escenario como propuesta final.

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTO TEÓRICO

La *International Energy Agency* (IEA, 2019), menciona que la necesidad de energía que tiene el mundo conlleva a que no existan soluciones únicas o simples. Las tecnologías que se utilizan para satisfacer las demandas energéticas, actualmente, están basadas en petróleo, gas y carbón. Esta situación resulta en que el planeta no es capaz de asimilar las altas concentraciones de gases de efecto invernadero que se generan para satisfacer nuestra necesidad energética. Por ello se ha buscado aminorar este daño ecológico mediante múltiples tecnologías y combustibles que proporcionen servicios de energía eficiente y rentable para todos. Una de las soluciones que se ha aplicado es la referente a las energías renovables, de las cuales destacamos a la eólica, solar e hidroeléctrica. El desarrollo de este tipo de tecnología ha sido lento, pues en un inicio el costo de éstas no era competitivo contra otras tecnologías existentes. Sin embargo, en los últimos años se han ido desarrollando e introduciendo en la sociedad, permitiendo una reducción en el costo de producción y adquisición.

La reducción de costos en energías renovables y los avances tecnológicos están abriendo grandes oportunidades para la transición de la energía. Se prevé que la energía eólica y la solar fotovoltaica produzcan más de la mitad de energía generada adicionalmente para el 2040 (IEA,2019). En la Figura 1 y Figura 2, se observa la producción en megatoneladas equivalentes de petróleo, existe un cambio en la tendencia de consumo, se observa que actualmente existe una diferencia entre el uso de combustibles fósiles y la energía eléctrica (el consumo es mayor para los combustibles). Sin embargo, para 2040 la tendencia cambia, esto se debe a la extinción de las fuentes de suministro (petróleo) y al cambio de tecnología como son los vehículos eléctricos, el almacenamiento de la energía y la red inteligente de electricidad.

En consecuencia, es importante incluir el uso de herramientas digitales para aumentar la eficiencia de las nuevas tecnologías y materiales acelerando el proceso de cambio de fuentes de energía y generar un beneficio al reducir las emisiones producidas por las fuentes de energía actuales.

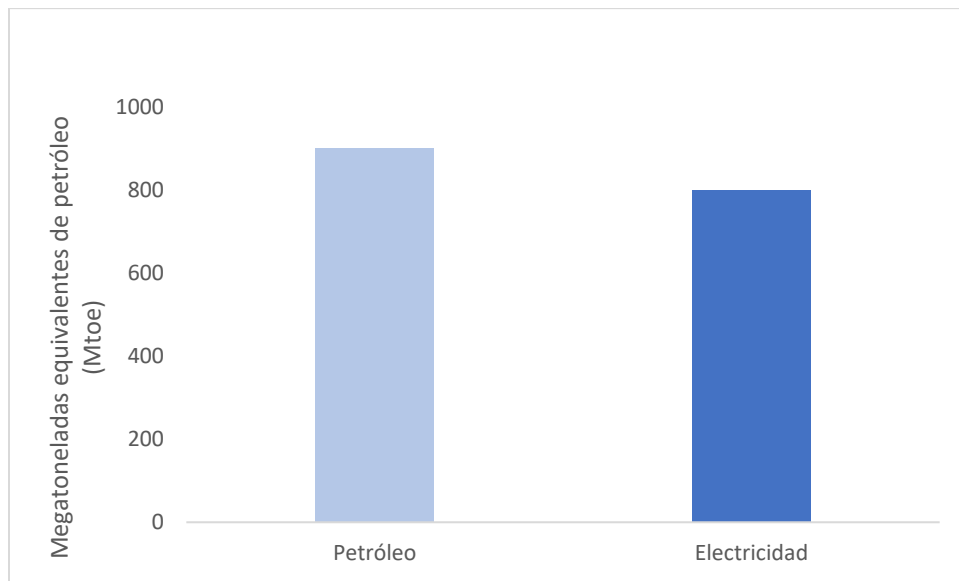


Figura 1. Cambio en el consumo de petróleo y electricidad, 2000-2018. Copia 2022, International Energy Agency (IEA).

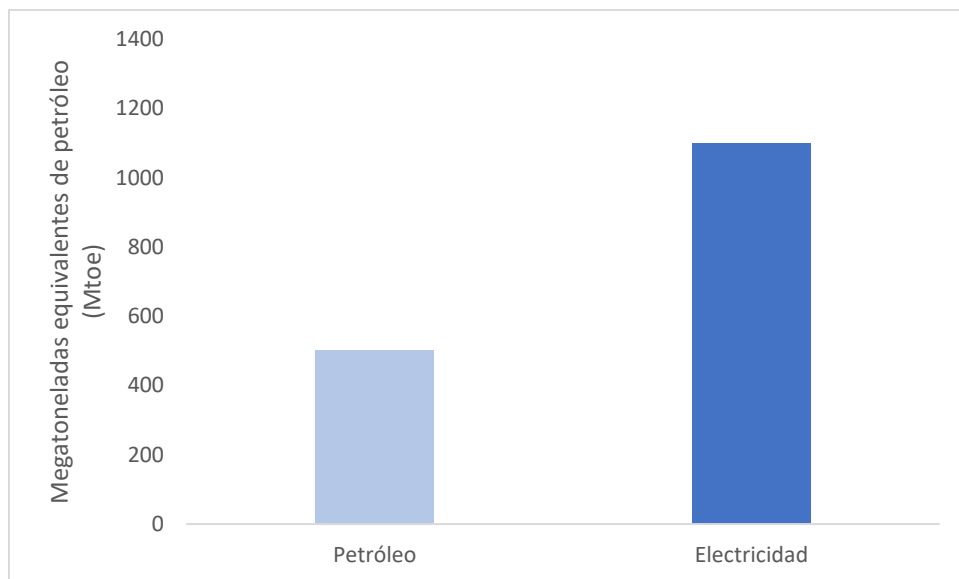


Figura 2. Cambio en consumo de petróleo y electricidad en escenario 2018-2040, Copia 2022, IEA.

Acorde con el World Energy Outlook (2015) el consumo de gas y carbón no se verá reducido para el año 2040, pero otras fuentes de energía como la eólica, la solar fotovoltaica y la hidroeléctrica crecerán para estar al mismo nivel de generación que estas fuentes de energía.

Debido al aumento de la demanda energética por el crecimiento poblacional, el escenario al que se enfrenta el mundo en el sector energético para llevar a cabo la sustitución de los combustibles fósiles se logra gracias a las energías renovables, que se han posicionado como pioneras para lograrlo, entre las principales se tiene a la energía eólica.

1.1 Energía Eólica

La energía eólica, de acuerdo con Tong (2010) ha sido usada en el pasado de distintas formas, como en la navegación y molinos de viento, donde la energía extraída sólo se usaba de forma mecánica, en la actualidad los aerogeneradores de gran escala transforman esta energía en electricidad mediante varios mecanismos y esta es llevada en redes de transmisión a los lugares dónde es requerida.

El Global Wind Energy Council [GWEC] (2018) menciona que el 2018 fue un buen año para la industria eólica ya que se contó con la instalación de 51.3 GW, existe un desarrollo gradual en mercados como África, el Medio Oriente, Latinoamérica y el sur este de Asia, donde se instalaron 4.8 GW durante ese año, lo que representa un 10% de las nuevas instalaciones. De acuerdo con el costo nivelado de la energía eléctrica (LCOE por sus siglas en inglés) la energía eólica ha probado ser una de las fuentes de energía más baratas. Acorde a esto, en 2018 México tuvo un récord al instalar 929 MW de capacidad lo cual lo coloca cerca de contar con casi 5GW instalados.

Juárez y León (2014) afirman que “México se encuentra en un grupo de países con locaciones idóneas para la explotación eólica en gran escala” (p.3). La mayoría de las turbinas que se encuentran en la categoría de gran escala son los aerogeneradores de eje horizontal (*HAWT*, por sus siglas en inglés) que son los más utilizados para generación de energía en comparación con los aerogeneradores de eje vertical (*VAWT*, por sus siglas en inglés) los *HAWT* tienden a ser más eficientes en cuanto a la extracción de energía.

Las estadísticas muestran que de la energía eléctrica que se necesita mundialmente, de acuerdo con REN21 (2019) el 26.2% se produce mediante

fuentes renovables, como la energía hidráulica, eólica, solar, bio-energía y geotérmica (p. 41).

De acuerdo con el Instituto de Investigaciones Eléctricas (Borja, 2009), la clasificación de los aerogeneradores atendiendo a su seguridad por diseño en la norma IEC 61400-1, se considera la Tabla 1:

Tabla 1. Clasificación de aerogeneradores, atendiendo a su seguridad por diseño (IEC 61400-1)

Clases	I	II	III	IV	S
V_{ref} (m/s)	50	42.5	37.5	30	Valores que deben ser especificados por el diseñador.
V_{pro} (m/s)	10	8.5	7.5	6	
A I_{15} (-)	0.18	0.18	0.18	0.18	
a (-)	2	2	2	2	
B I_{15} (-)	0.16	0.16	0.16	0.16	
a (-)	3	3	3	3	

Borja, 2009.

V_{ref} : Velocidad máxima en 10 minutos con periodo de retorno de 50 años (C. Rotor)

V_{pro} : Velocidad promedio anual a la altura del centro del rotor

A y B: Categoría para características de turbulencia alta y baja

I_{15} : Valor característico de la intensidad de turbulencia a 15 m/s

a: Parámetro usado para el cálculo de desviación estándar del modelo normal de turbulencia.

Clases I, II, III, IV, S, estas se refieren a los tipos diferentes de turbinas que se ajustan a diferentes condiciones de viento en el sitio, designados por números crecientes que corresponden a reducciones en la velocidad del viento.

Es importante considerar los parámetros vistos en la Tabla 1 para evitar un mal funcionamiento de las turbinas al momento de colocarlas en sitio, y considerar las condiciones de velocidad que deben cumplir los vientos presentados en el lugar en el que se planean instalar.

La instalación de las *HAWTs* como mencionan Juárez y León (2014) comenzó en la primera central Eolo eléctrica en México, por parte de la compañía Vestas en 1994

conocida como La Venta I, se realizó debido a que los vientos presentados en la zona eran estables y la velocidad media anual excede los 10 m/s, por lo que el potencial eólico se considera excelente en esa zona.

1.2 Obtención de la energía eólica

La energía del viento es energía cinética del flujo de aire y su disponibilidad depende de dos factores, masa (m) y velocidad del aire (V), en lugar de medir la masa del aire es más práctico medir su densidad, de esta manera se puede obtener la potencia del viento como se observa en la (Ecuación 1).

$$\dot{w}_{disponible} = \frac{d(mV^2/2)}{dt} = \frac{\rho_{aire}AV^3}{2}$$

$\dot{w}$: potencia del viento (kW)

d : diámetro del rotor (m)

m : masa (kg)

V : velocidad del viento (m/s)

ρ : densidad del aire (kg/m^3)

A : área de barrido (m^2)

Ecuación 1. Potencial eólico

En la Figura 3, A se define como el área de barrido al viento que llega de manera normal a la superficie del aspa.

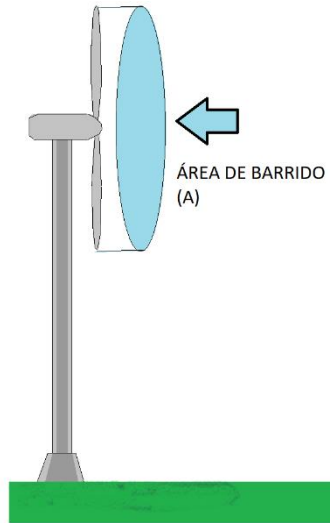


Figura 3. Diagrama que ejemplifica el área de barrido.

Una de las clasificaciones de los aerogeneradores más común es por su eje de rotación, se puede identificar fácilmente la orientación que puede ser normal o perpendicular a la dirección del viento (Figura 4) y así se establecen las turbinas de eje vertical (VAWTs) y eje horizontal (HAWTs), éstos últimos son los más comunes por su eficiencia para el aprovechamiento de la energía (Hemami, 2012).

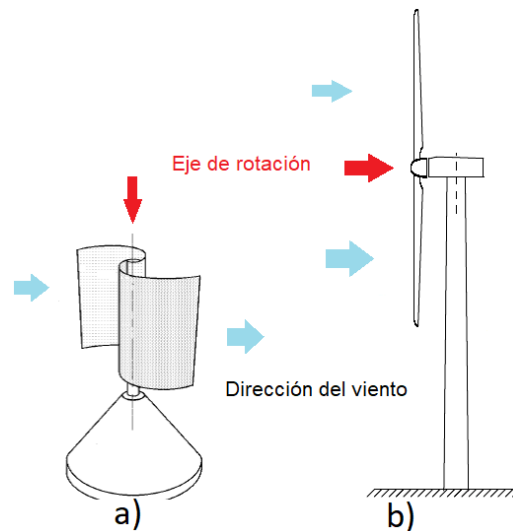


Figura 4. Eje de rotación, a) Turbina de eje vertical, b) Turbina de eje horizontal.

La investigación se centró en una parte del procedimiento para la elaboración de los HAWT. Los proyectos relacionados con esta tecnología deben considerar parámetros como: la intensidad de turbulencia en la atmósfera, el terreno,

obstáculos como árboles y edificios, el impacto ambiental que conllevará la implementación de la tecnología, entre otros.

La eficiencia aerodinámica de las turbinas de eje horizontal está asociada al siguiente concepto denominado coeficiente de potencia (Ecuación 2):

$$C_p = \frac{\dot{W}_{\text{salida del eje del rotor}}}{\dot{W}_{\text{disponible}}} = \frac{\dot{W}_{\text{salida del eje del rotor}}}{\rho A V^3 / 2}$$

V : velocidad del aire (m/s)

ρ : densidad del aire (kg/m^3)

A : área de barrido (m^2)

$\dot{W}$: Potencia del viento (kW)

Ecuación 2. Coeficiente de Potencia

El concepto está asociado a la fracción de potencia que puede ser extraída del viento disponible mediante las aspas.

Las ventajas relacionadas con los *HAWTs* son:

- Las aplicaciones comerciales y el diseño son más estables.
- Produce energía de una velocidad relativamente baja de viento e involucra un alto poder de conversión para una mejor eficiencia.
- Tienen una mejor eficiencia bajo fluctuaciones de velocidad de viento, debido a un mejor ángulo de ataque.

Aunque también se pueden encontrar desventajas:

- Requiere un sistema de dirección (*yaw system*): *cambio del ángulo de ataque* para que la turbina cambie de dirección conforme lo haga el viento.
- Se necesita una mejor estructura acorde al peso que tendrá por el generador y la caja de velocidades.
- Los costos de mantenimiento son más altos debido al peso que debe soportar la torre.

Las turbinas de eje vertical actualmente son vistas con futuras aplicaciones en los ambientes urbanos, esto es por la facilidad con la que se adaptan a los vientos turbulentos, en comparación con las de eje horizontal, algunas de sus ventajas son:

- No son sensibles a los cambios de dirección del viento, por lo que no necesitan sistema de dirección (*yaw system*).
- Los requerimientos estructurales para su construcción son menos exigentes que en comparación con una *HAWT*.
- Fácil acceso para mantenimiento.

En las desventajas encontramos que:

- Estas turbinas no son capaces de arrancar por sí solas, por lo que necesitan otro motor para lograrlo.
- Como el sistema se encuentra cerca del suelo, no se pueden alcanzar altas velocidades de viento.
- La eficiencia está limitada por la geometría de la turbina, que ocasiona que existan zonas “muertas”, las cuales no aprovechan la aerodinámica de las aspas (Zhao, 2019).

Las características de ambos tipos de turbina se deben examinar de acuerdo con la aplicación, el lugar, la potencia requerida y mediante ello analizar si es viable colocarlas (Mathew, 2006), para las *HAWT* las aplicaciones van orientadas a su uso para la generación de energía a gran escala, como en los parques eólicos que se componen por una serie de aerogeneradores y la energía es dirigida a la red eléctrica para su posterior distribución, en el caso de las *VAWT* llegan a ser colocadas de manera singular en campos abiertos y también existe la posibilidad de colocarlas en serie con menor extracción de potencia en edificios y zonas urbanas. Una de las características de esta tecnología según Zhao (2019) es que: “la energía eólica produce electricidad sólo cuando el viento sopla, por lo que la potencia de salida no es constante, también las turbinas necesitan estar ubicadas donde ocurre este fenómeno lo cual usualmente se encuentra lejos de la red eléctrica, requiriendo nuevas líneas de transmisión”, esta es una de las desventajas más debatidas de las energías limpias, el hecho de que la energía que brindan sea intermitente obliga a buscar soluciones como sistemas de almacenamiento y sistemas híbridos, ya que la demanda de electricidad en los sectores industrial, comercial y doméstico no son intermitentes.

La producción de electricidad con aerogeneradores tiene relación con su diámetro, entre más grande sea el área de barrido, más energía se podrá extraer de la turbina. Por lo que la tendencia hacia aspas eólicas más grandes indica la posible eliminación gradual de las pequeñas, ya que las primeras cuentan con mayor impacto en la eficiencia energética y la reducción del costo nivelado de la energía (LCOE, por sus siglas en inglés) en todas las regiones del mundo (TPI Composites, 2017).

1.3 Partes que conforman una turbina de eje horizontal

Las partes que conforman a una *HAWT* son de acuerdo con Manwell (2002) ver Figura 5:

- I. Rotor: incluye las aspas, la conexión entre el buje y estas además de las superficies aerodinámicas de control.
- II. Tren de potencia: contiene la caja de cambios, si es que se cuenta con una, generador, freno mecánico y los ejes y acoplamientos que unen estas partes.
- III. *Yaw system (sistema de dirección)*: los componentes varían debido a si el sistema es conducido o libre y esto se define mediante la orientación del rotor que puede ser barlovento o sotavento. Los componentes pueden incluir cojinetes, motor o cadena de engranes, freno y amortiguador.
- IV. Estructura principal o góndola: brinda soporte para montar los demás componentes, esto significa que los protege.
- V. Torre: incluye la torre misma, su base y cimientos.

Un ejemplo de cómo lucen estas partes en una *HAWT* se puede apreciar en la Figura 5.

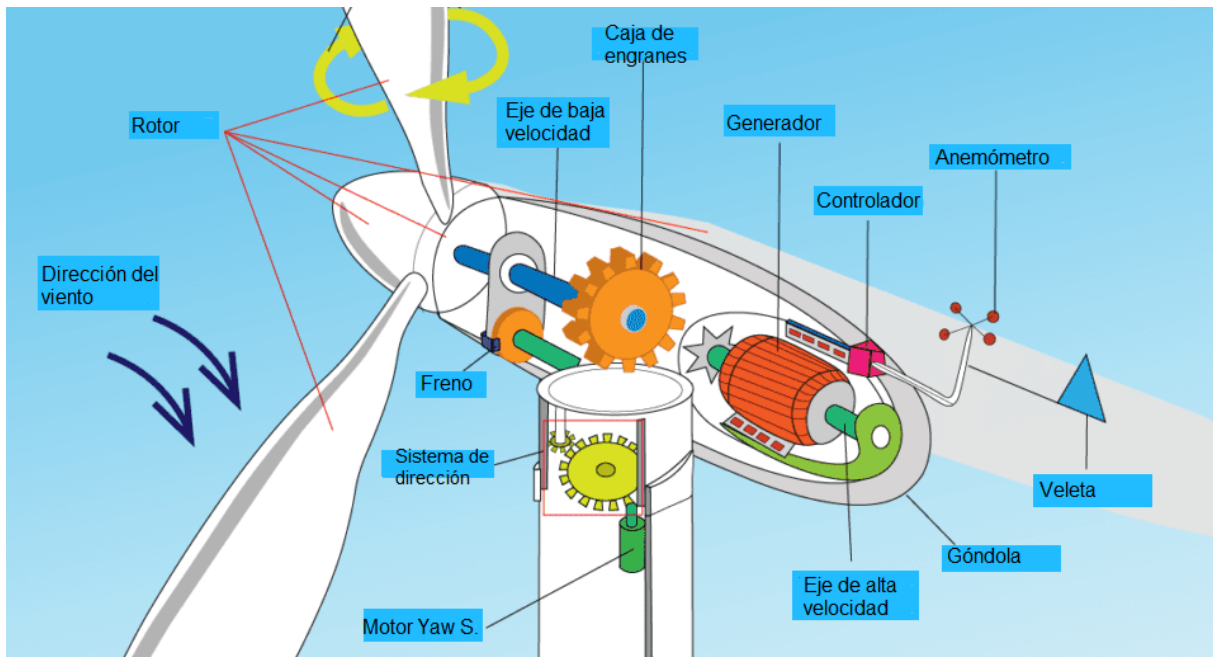


Figura 5. Componentes de una turbina de eje horizontal (Lindy Energy, 2022).

Una propiedad de las *HAWT* es que son las únicas que cuentan con rotores diseñados para extraer cierta cantidad de potencia del viento y convertirla en movimiento rotatorio (energía mecánica). Las siguientes partes son las de mayor interés relacionadas con el rotor (aspas, aerodinámica y cubo).

Aspas

Las aspas, consideradas como el componente fundamental son las encargadas de transformar la fuerza del viento en el torque necesario para generar potencia útil. Las consideraciones de diseño se pueden dividir en dos categorías: eficiencia aerodinámica y resistencia estructural.

Dentro de éstas se tiene que algunas consideraciones de diseño son: rendimiento aerodinámico, resistencia estructural, material de las aspas, reciclabilidad, manufactura del aspa, seguridad y salud del trabajador, reducción de la producción de ruido, monitorización del estado del aerogenerador, aditamentos para unir la raíz del aspa y el rotor, control pasivo u opciones de aspas inteligentes, costos (Manwell, 2002).

Los detalles considerados en la parte de la raíz del aspa son influenciados por consideraciones estructurales (Figura 6). Por ejemplo, la forma base (raíz) de la

mayoría de las *HAWTs* difiere significativamente de la forma óptima, esto se debe a los altos costos de manufactura. Los materiales característicos y los métodos de fabricación son particularmente importantes para definir la forma exacta de las aspas.

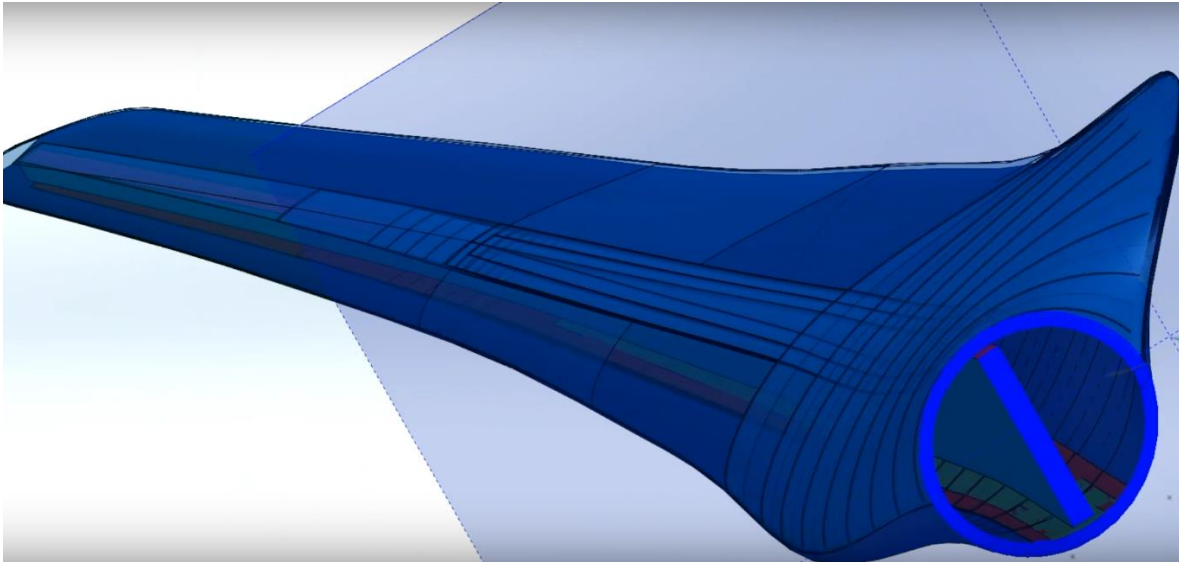


Figura 6. Aspa, punta-raíz, vista de estructura (CIATEQ A.C.)

La consideración de todos estos factores dentro del diseño de aerogeneradores es debido a que cada uno de ellos está relacionado a la eficiencia aerodinámica, lo que se busca es obtener una turbina de calidad por lo que implica que los componentes como: radio de diseño de energía (área de barrido), radio de velocidad de viento, relación de *Tip Speed Ratio (TSR)*, que se define como la velocidad en la punta del aspa, solidez, perfil aerodinámico, número de aspas, control de potencia del rotor (con *pitch*: ajuste de rotación del aerogenerador, variable o estable), orientación del rotor, sean los óptimos en la elaboración.

El tamaño del área de barrido y la longitud de las aspas están relacionados directamente a la tasa de potencia y velocidad del viento, pero esto depende del lugar de instalación de la tecnología, ya que en parques eólicos estos suelen ser de hasta 60 metros de diámetro y en pequeñas aplicaciones como zonas urbanas pueden medir hasta un metro.

Uno de los parámetros ya mencionados que es el *TSR*, afecta la eficiencia aerodinámica de una turbina, si éste cuenta con altos valores se tiene una baja

solidez de la turbina, lo cual aumenta el nivel de ruido de esta, y se requieren aspas más resistentes debido a las grandes fuerzas centrífugas, un valor optimizado está en el rango de 6-7, de acuerdo con la Norma IEC-61400-2.

Las aspas, al reducir el área son más delgadas lo que implica mayor posibilidad de que se presente flexibilidad y pandeo. La flexibilidad puede ser una ventaja, pero las aspas delgadas tienden a presentar más vibración, lo cual no es deseable en una *HAWT*. Para comprobar que esto no se presente cuando el aerogenerador ya se encuentre en funcionamiento se aplican pruebas basadas en normas internacionales, se puede apreciar en la Figura 7 una prueba estático-estructural que se lleva a cabo en CIATEQ A.C., bajo la norma **IEC 61400-2, -23 – Full-scale structural testing of rotor blades**, esto se realiza para validar el diseño de las aspas a través de pruebas de laboratorio y cargas controladas, los puntos donde se debe aplicar la fuerza se establecen en la norma.



Figura 7. Prueba estructural estática, realizada en el Laboratorio de Innovación en Energía Eólica (CIATEQ A.C.).

La selección de los perfiles aerodinámicos es importante, debido a que es necesario mantener una razón de sustentación-arrastre alta si se quiere tener un coeficiente de potencia similar.

Una de las características comunes es que usualmente a lo largo del aspa no se ocupa un solo perfil aerodinámico, es común que los perfiles pertenezcan a la

misma familia y exista una variación del espesor, cerca de la raíz se busca que sea ancho para brindar resistencia estructural y se disminuye conforme avanza hacia la punta, la longitud de la cuerda también decrece.

Para corroborar que todos los elementos que componen al aspa fueron bien seleccionados se realizan varias pruebas y repeticiones ya que se deben cumplir tanto los requerimientos estructurales como los aerodinámicos para asegurar la calidad, eficiencia y vida útil de la turbina.

La arquitectura interior del aspa está determinada por la fuerza requerida para la estructura, la cual debe ser lo suficientemente fuerte para soportar cargas extremas y resistir varios ciclos de fatiga, donde las deformaciones no deben pasar del límite permisible para la fibra que la componga. Un ejemplo de algunos de los requerimientos que deben cumplir se tiene en la norma IEC 61400-1, que habla de los requisitos de seguridad que deben cumplir los aerogeneradores (Borja, 2009).

La estructura interior puede estar compuesta de más vigas que ayudan a soportar las cargas sin aportar peso innecesario (Figura 8), entre los tipos más usados se tiene a los largueros, alas de viga (*spar cap*, *shear webs*), las primeras transfieren las cargas de la superficie a las alas de viga, ambas brindan soporte a lo largo del aspa desde el interior y existen varias configuraciones.

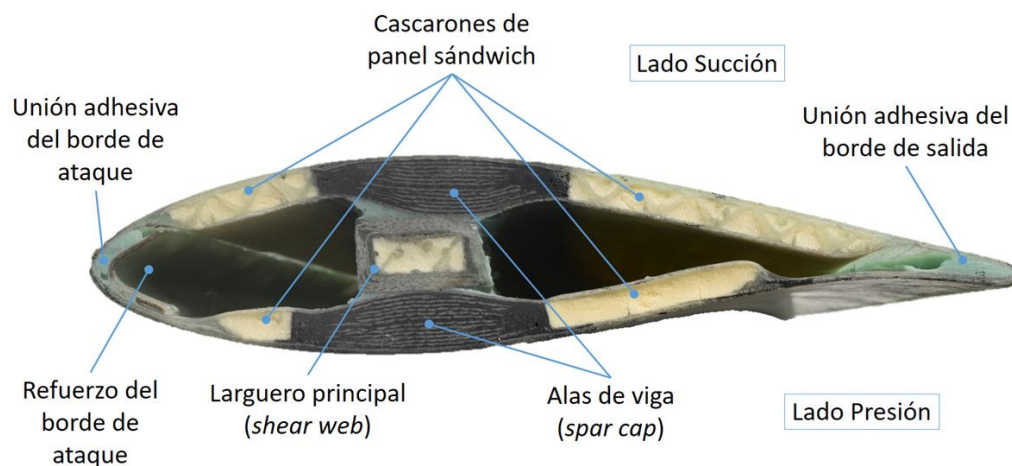


Figura 8. Estructura interna de un aspa (CIATEQ A.C.)

Uno de los principales problemas con las HAWT es que, dependiendo de la longitud del aspa, la cuerda cercana a la raíz aumenta para brindar soporte, así como el

espesor, lo cual genera problemas de transporte y peso, dependiendo del material del que se fabriquen.

Si bien, históricamente las aspas estaban hechas de madera y algunas veces ésta se cubría con tela, pero a partir del siglo 20 se comenzó a usar metal. A partir de los años 70 la mayoría de las *HAWT* se realizaron con materiales compuestos. Los más comunes consisten en fibra de vidrio y resina de poliéster, aunque el éster de vinil y láminas de madera epoxi también se usan. Recientemente las fibras de carbón fueron introducidas en la construcción de aspas, no como un sustituto de la fibra de vidrio, más bien para brindar mayor resistencia.

1.4 Métodos de fabricación para turbinas de viento de eje horizontal

La fabricación de las aspas de las *HAWT* se realiza mediante la unión de diversos materiales, uno de los principales es la fibra de vidrio, de acuerdo con Hurtado (2018): “La fibra de vidrio, que es el material más aplicado en la fabricación de aspas de pequeña, mediana y gran potencia posee propiedades mecánicas extraordinariamente buenas, aunque su módulo de elasticidad es muy alto y su manufactura es algo complicada porque carece de automatización”, la fibra de vidrio ha destacado como uno de los principales componentes debido a las cualidades que adquiere al ser mezclada con resinas y en algunos casos otras fibras, la dureza y estructura que brinda al acabado de las aspas lo ha posicionado como el pionero en la fabricación de este tipo de turbinas, existen distintos métodos con los cuales se pueden elaborar, se mencionan las más relevantes, debido a su uso en la industria, de acuerdo con Manwell, (2002) los cuales se explicarán brevemente:

Laminado manual (Wet lay-up): es un proceso en el cual se van acomodando una serie de capas de fibra de vidrio a lo largo de un molde, la fibra de vidrio está impregnada de resina de poliéster o epoxi, las cuales se endurecen gracias a la ayuda de un catalizador, con la ayuda de rodillos y paletas especiales (espátula, jalador), se ayuda introducir la resina en la fibra, se cuenta con dos partes de un molde (molde maestro) succión y presión como se observa en la Figura 8, cuando ambas partes están listas, se retira la fibra endurecida de los moldes y se unen ente

sí con los largueros en medio, la cual es fabricada de manera separada. Este método es una labor intensa además de que es difícil asegurar consistencia y evitar defectos en el aspa como burbujas de aire o arrugas en la fibra. Si el proceso se lleva a cabo de manera libre al ambiente se desprenden sustancias tóxicas para los trabajadores (Cairns y Skramstad, 2000).

Fibras Pre impregnadas (Pre-preg): en este método la resina se cura parcialmente y los refuerzos se colocan en un molde al cual se le añade calor para activar y curar la matriz del material. Una de las ventajas de usar este método es que los refuerzos quedan alineados y fijos durante la manufactura, además de evitar defectos en la fibra y así conseguir excelentes propiedades. Una de las desventajas es el costo, ya que el material parcialmente curado cuesta de 5-10 veces más que si se trabajara de manera normal el curado, además de que es costoso brindar calor constante para un buen curado de fibra para las aspas de gran longitud.

Infusión de resina (Resin infusion): aquí las fibras de vidrio secas se colocan en el molde y la resina se impulsa para introducirse en la fibra. Uno de los métodos conocidos es el moldeado por transferencia de resina asistido por vacío (VARTM, por sus siglas en inglés), en el cual el aire es retirado por una de las salidas del molde por medio de una bomba de vacío. Una bolsa de vacío es colocada a lo largo del molde (Figura 9) y se acomoda de tal forma que se pueda inyectar resina de una fuente externa a través de toda el aspa debido a la presión atmosférica y el vacío dentro de la bolsa es removido por una bomba de vacío. Este método ayuda a disminuir la formación de burbujas en el curado, lo que incrementa la calidad del aspa y los subproductos formados no son liberados al ambiente.

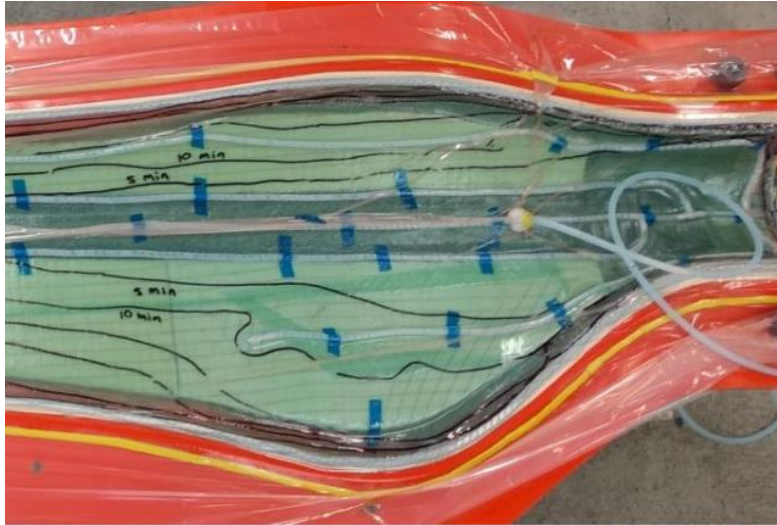


Figura 9. Vista superior de bolsa de vacío colocada en el molde para llevar a cabo infusión de resina (CIATEQ A.C.)

Moldeo por compresión (Compression Molding): La fibra de vidrio y la resina son colocadas en un molde de dos partes que luego es cerrado, el calor y la presión son aplicados cuando el producto está listo. Este método cuenta con muchas ventajas, pero no se puede usar para aspas de gran tamaño.

Técnica de saturación de resina-madera (Wood-Epoxy Saturation Technique, WEST): se trata de usar láminas de madera en vez de fibra de vidrio, el procedimiento es similar al del laminado manual, usualmente el espesor que brindan las capas de madera es mejor que el de fibra de vidrio.

La fabricación de aspas para el aprovechamiento del potencial eólico debe tomar en cuenta también la seguridad y salud de los trabajadores, como en el caso del método: laminado manual, ya que debido al desprendimiento de vapores provenientes de la resina, al curarse se convierte en un plástico inerte que puede dañar la integridad física de las personas involucradas en el proceso de elaboración de las aspas, por lo que se debe optar por el método con menor riesgo para los trabajadores sin comprometer la calidad del producto final.

El método por infusión de resina es el que se utiliza en CIATEQ A.C., tomando todas las medidas necesarias para los trabajadores y personas que están en contacto con

los materiales de fabricación, incluso si el método es seguro ya que como se menciona no hay desprendimiento de gases debido a la bomba de vacío.

Las aspas están construidas de una estructura central resistente más dos cubiertas exteriores que forman el perfil aerodinámico de forma alabeada y anchura decreciente hacia la punta de la dirección axial, Figura 10.

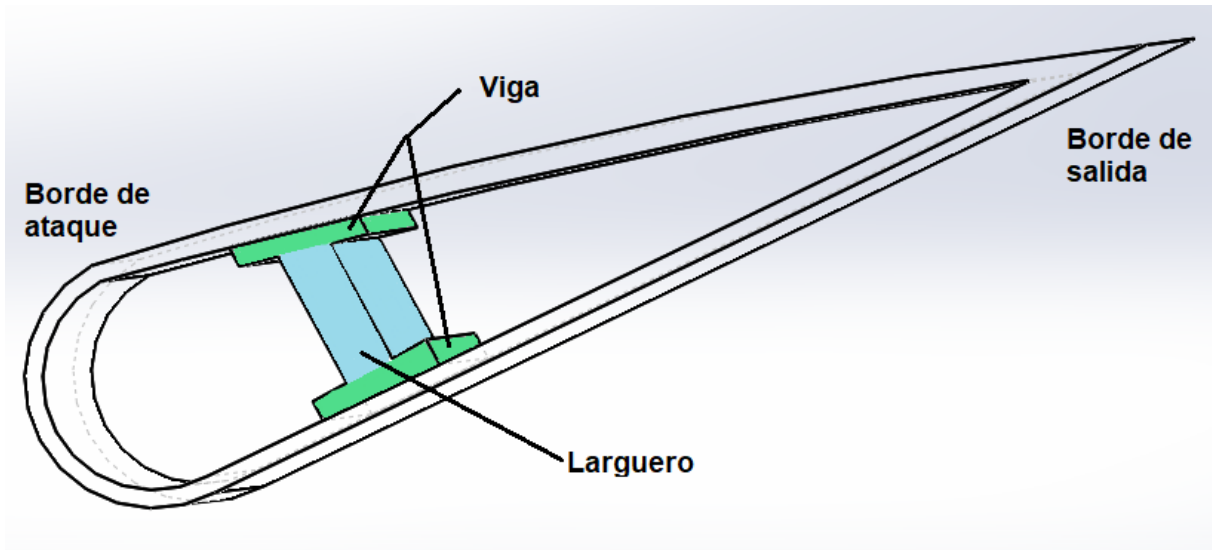


Figura 10. Aspa, estructura Interna.

Los requisitos que debe cumplir el aspa son:

- Tener una resistencia estructural adecuada a las condiciones de trabajo a la que va a ser sometida.
- Resistencia a la fatiga.
- Rigidez.
- Ligereza.
- Resistencia a daño por agentes medioambientales (erosión, corrosión).

El proceso mediante el cual se elaboran los moldes para las aspas cuando estas son de gran tamaño, no se realiza en un solo paso, se divide en secciones mediante las cuales resulta más fácil manufacturar, como se muestra en la Figura 11.



Figura 11. Submodelos maestros del lado succión del asa (CIATEQ A.C.)

De los materiales más usados que menciona Opex Energy, el que se aplica en la manufactura del asa de este proyecto es la fibra de vidrio reforzada con resina epoxy en forma de láminas preimpregnadas, lo que permite tener aspas más ligeras, mayor flexibilidad, menor deformación en temperaturas extremas y excelente resistencia a la absorción de agua.

El proceso de fabricación de los moldes para realizar ambas conchas del asa lado succión y presión (Figura 12) se considera como una de las bases más importantes de la manufactura, ya que la calidad del molde definirá si las conchas podrán obtener un nivel igual o cercano cuando sean manufacturadas, para la elaboración de los moldes se utiliza el mismo método y los mismos materiales que en la fabricación de las conchas, ya mencionados anteriormente, fibra de vidrio y resina epoxy.

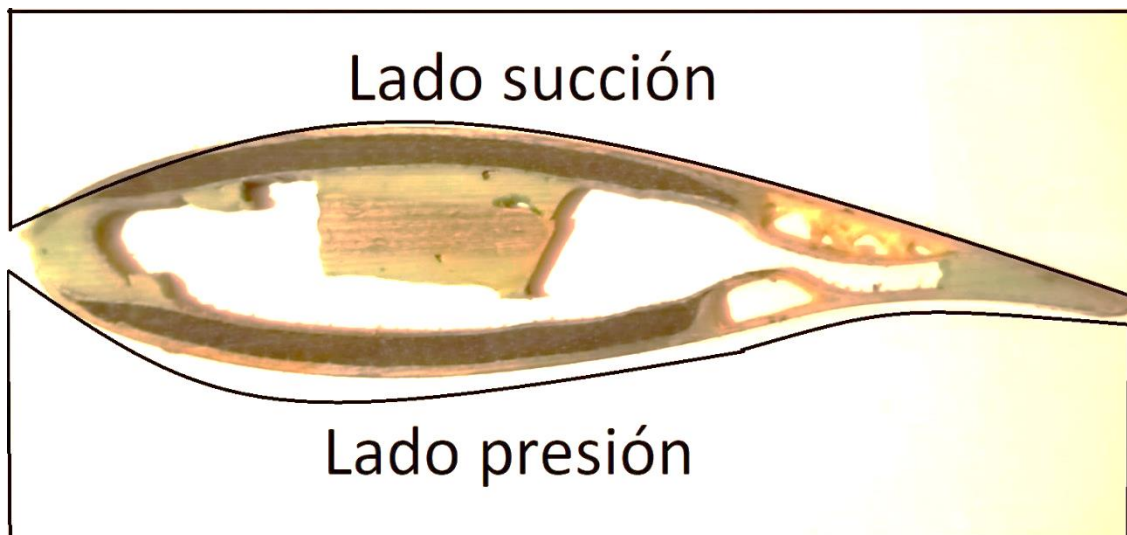


Figura 12. Lado succión y presión de un asa.

Una de las principales preocupaciones que se menciona en los métodos de elaboración de aspas es el tratamiento que se le brinda a la fibra de vidrio en

conjunto con la resina al momento de curar y el orden en que se coloque dentro del molde, ya que a partir de ello se tendrá calidad y mayor tiempo de vida en el aerogenerador.

1.5 Moldes para aspas y su diseño

La manufactura de los moldes se realiza de manera análoga a las aspas, por lo que se considera uno de los más relevantes motivos de hacer este estudio en CIATEQ, A.C. en dónde hasta el momento sólo se ha trabajado con aspas de pequeña escala. Los moldes maestros se realizan con el método infusión de resina y el proceso de añadir calor se hace mediante un encajonamiento del molde con entradas y salidas para calentadores y sopladores los cuales brindan la temperatura y movilidad requerida al aire para el proceso de curado de la resina como se muestra en la Figura 13.

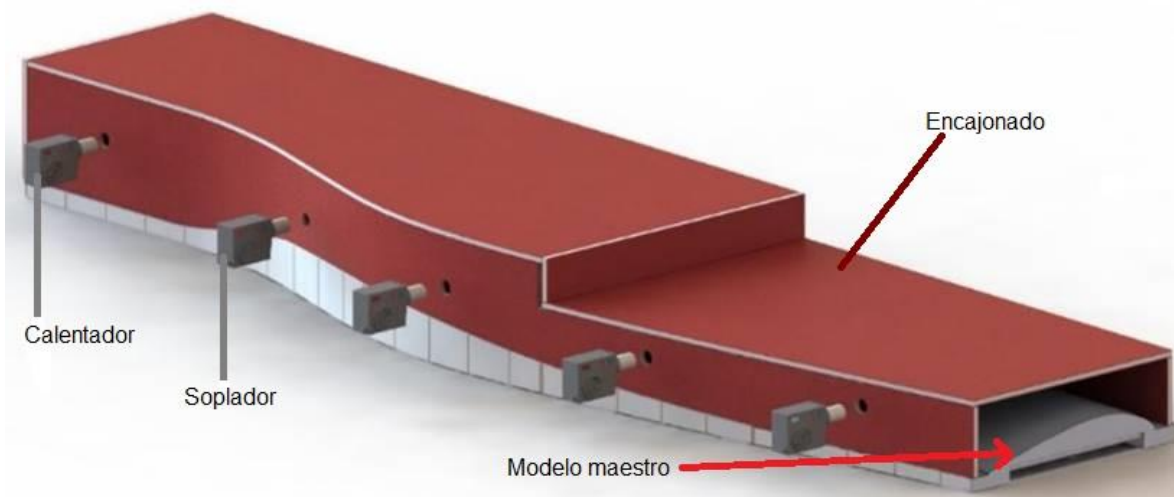


Figura 13. Encajonado del modelo maestro, aspa de 30 metros (CIATEQ A.C.)

La meta principal es lograr un buen curado de la resina mediante el uso del mismo método aplicado en CIATEQ A.C., ahora a gran escala. También se considera, como lo mencionan Campos, Mazur y Gallegos (2007) que el análisis del comportamiento del aire y el flujo de calor que se tiene en el dominio del fluido se trata de una transferencia de calor, ya que se tiene un sólido (molde maestro) y un fluido (aire caliente). En su estudio se lleva a cabo un análisis transitorio térmico pero aplicado a una turbina de gas, al ser necesario cumplir con los elementos

similares al trabajo presentado como simulación, análisis transitorio y transferencia de calor se toma como referencia, solo que en el caso del molde para el aspa, se tiene que cumplir con cierta temperatura por un número determinado de horas, se debe controlar el flujo de aire que recorrerá el interior del encajonado para una distribución homogénea de la temperatura. La geometría del molde hace complicado este proceso, por ello se realiza una simulación del fenómeno para hallar la mejor configuración de sopladores y calentadores.

Como se puede percibir dentro de los estudios citados anteriormente existe el apoyo en herramientas computacionales, como los *Computer-Aided Design (CAD)* que en su traducción al español son análisis asistidos por computadora, Softwares como SolidWorks, ANSYS, AutoCAD, son usados para hacer más sencillo el tratamiento de las piezas para su posterior análisis en una amplia gama de ámbitos, como fluidos, térmicos, eléctricos, etc.

En la publicación realizada por Corro, et al., (2015) se menciona que se pueden dar cargas de temperatura diferentes a ciertas partes del molde, las cuales simulan el calentamiento por flujo de vapor y enfriamiento con agua, el análisis fue realizado en el software ANSYS, como en la investigación presente. También se menciona que en volúmenes internos grandes, como es el caso del molde del aspa, se recomienda usar herramientas con las que ya cuenta ANSYS, como es el caso de varias métricas de malla, las cuales se desarrollarán en el capítulo 3, éstas permiten que el tipo de elemento dominante en la malla sea de diferentes geometrías y se concentre en partes estratégicas de superficies del cuerpo, en el caso del aspa debido a que la geometría de la superficie es delicada por los perfiles aerodinámicos y la torsión que tiene, ésta debe respetarse al momento de copiar el modelo.

Uno de los módulos con el cual se llevó a cabo el análisis del fenómeno del comportamiento del fluido se basa en usar la Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD) este conjunto de herramientas sirve para solucionar el modelo matemático que gobierna al fenómeno de la fluidodinámica utilizando software, para así poder trabajar con el proceso que se presente, sin embargo, sólo se consiguen soluciones aproximadas. Entre más cercana a la realidad sea la solución, se necesita mayor poder computacional.

Las funciones que se tienen en CFD son dos: diseño y aprendizaje, mediante el aprendizaje se obtienen los conocimientos del proceso a estudiar, y el diseño se centra en la evaluación de nuevos usos que se pueden dar.

Los modelos de solución con los que cuenta ANSYS dentro del apartado Fluent, sirven para discretizar linealizar y resolver el sistema de ecuaciones de gobierno, una vez integradas sobre el dominio computacional que se vaya a estudiar. (Zamora, 2016)

Una de las principales metas del análisis del fenómeno de la distribución del calor dentro del molde es el ahorro de energía en el proceso, como lo menciona Corro (2015), para lo cual se analiza el molde en operación y con base en los resultados se identifican los factores que afectan el desempeño del mismo, al mismo tiempo para el molde del aspa se puede optimizar la configuración de los sopladores y calentadores para usar el menor número y así utilizar una menor cantidad de energía eléctrica, sin comprometer la calidad del curado de la resina.

CAPITULO 2. MÉTODO DE ELABORACIÓN DE ASPA

La manufactura de aspas que se realiza en CIATEQ, se lleva a cabo en el laboratorio CEMIE-Eólico, dónde se realizan distintos tipos de aplicaciones como el diseño y fabricación, pruebas de elasticidad y estructurales; en este capítulo se describirá el proceso por el cual se han llevado a cabo las confecciones de aspas de distintos tamaños dentro del laboratorio.

Como mencionan Díaz, et al (2017), a pesar de la importancia que tienen las palas de un aerogenerador, no existe un proceso estandarizado para su creación, y han sido fabricadas con distintas técnicas de manufactura en distintos países y laboratorios de investigación en el mundo.

El principal motivo de la producción de los moldes y las aspas de los aerogeneradores con el método de Transferencia de Resina Asistido por Vacío (Vaccum Assisted Resin Transfer Molding, VARTM) por sus siglas en inglés, en CIATEQ es realizar una confección análoga como se hace en algunos laboratorios de aspas como: *Sandia National Laboratories*, *eTa- Wind Blades Solutions*, *Fibermat Composites*, *Solent Composite Systems (SCS)*, de acuerdo con Zamudio (2020).

Al realizar una infusión de resina se evitan defectos de manufactura como regiones secas o saturación incompleta de las fibras de vidrio y carbono. En 2020 se elaboró un aspa de 30 kW en el laboratorio de CEMIE-Eólico, CIATEQ, dónde la infusión de resina apoyada de bombas de vacío ayudó a evitar imperfecciones en la pieza final, debido a que la existencia de estas puede afectar las propiedades mecánicas, estructurales y aerodinámicas.

2.1 Método de Transferencia Asistido por Vacío

De los métodos mencionados en el capítulo uno, la elaboración del molde del aspa se realizó mediante el Modelo por Transferencia de Resina Asistido por Vacío.

Los pasos para la elaboración de las palas por este método se muestran de manera general en la Figura 14, y se explican con más detalle a continuación:



Figura 14. Diagrama del método de resina asistida por vacío.

1. Acomodar capas del material que va a componer la estructura interna y externa del aspa, en este caso es la fibra de vidrio y los componentes del núcleo, las cuales ya deben estar cortadas en la forma que se haya dispuesto para el aspa.



Figura 15. Molde maestro lado succión (CIATEQ A.C.).

2. Se colocan las capas de materiales en el molde abierto, donde se debe tener cuidado por la curvatura natural del mismo perfil aerodinámico, ya que no pueden existir imperfecciones, como arrugas o deformidades.



Figura 16. Burbujas visibles en la superficie entre el molde y la fibra de vidrio (CIATEQ A.C.).

Por encima de los materiales usados para formar el cascarón se dispone una capa de tela, denominada “tela desmoldante” que tiene la función de separar la bolsa de vacío del molde de resina con fibra cuando éste ya se encuentra terminado/curado.



Figura 17. Acomodo de fibra, molde lado succión (CIATEQ A.C.).

3. A lo largo del molde se colocan puntos de inicio para la inyección de la resina y puntos de salida, se colocan a lo largo del molde y están conectados a los contenedores de resina, pueden usarse los puntos de entrada y salida necesarios siempre que exista una manera ordenada y secuencial para así controlar como va avanzando la resina en el molde, como se muestra en la Figura 18. La manera en que se provoca el vacío en el molde es mediante la conexión de los puntos de salida a una bomba.

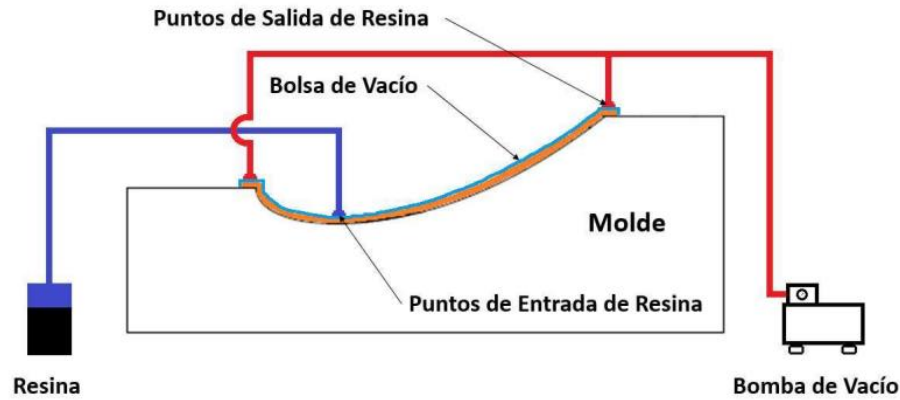


Figura 18. Arreglo del sistema de vacío, Zamudio (2020)

4. La bolsa de vacío es colocada encima de las capas de fibra y se sellan herméticamente todos los bordes del molde con cinta selladora. Todo el aire que existe dentro de las capas de material es extraído con la bomba de vacío, la diferencia de presiones entre el material que se obtiene mediante el vacío especificado y la presión atmosférica hace que el material del que se formó el preformado se comprima contra el molde.

El nivel de vacío deseado se mantiene constante en todo el proceso de la inyección de la resina y se realiza una prueba de vacío para verificar que no existan fugas.

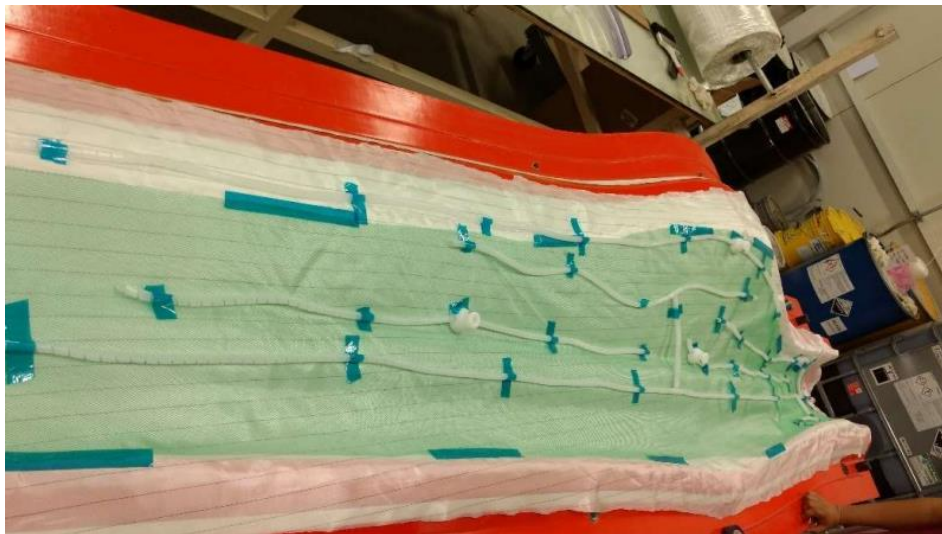


Figura 19. Arreglo de sistema de vacío, Zamudio (2020).

5. Por medio de succión, se introduce la resina a los puntos de entrada del molde, haciendo que las fibras del material del molde se impregnen debido a la fuerza de presión, este paso se detiene hasta que se dé una saturación del material completa. Concluyendo así el proceso de infusión de resina, y el tiempo que se deja a partir de este momento se revisará a continuación.



Figura 20. Frente de resina a los 5 y 15 minutos del inicio de la infusión, Zamudio (2020).

La Figura 22, indica la temperatura a la que se debe mantener el molde del aspa por un periodo de 17 horas para el curado de la resina mediante la adición de calor, la cuál es de 80 °C, de aquí se obtiene una de las características más importantes para las condiciones de frontera, es lo que se busca obtener mediante la configuración de sopladores y calentadores propuesta en este trabajo.

2.2 Curado de resina

La resina utilizada para este proyecto es epoxi, combinada con fibras de vidrio, al tener un refuerzo con este material que es relativamente fuerte y al estar embebidas en una matriz plástica se obtiene un compuesto con una resistencia específica muy alta, cuando se combina con diferentes plásticos se obtienen materiales compuestos químicamente inertes muy útiles en una gran variedad de ambientes corrosivos (Callister, Rethwisch, 2021).

Una de las razones por las que se utilizan materiales compuestos para la manufactura de aspas acorde a Silva (2016), es que un material compuesto es un conjunto de fibras resistentes dentro de una matriz de menor rigidez, de la combinación se obtiene que mezclar dos o más componentes con características diferentes nos ayuda a obtener uno con propiedades superiores.

Las resinas epoxi combinan propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión, son dimensionalmente estables, con buena adherencia, relativamente baratas y con buenas propiedades eléctricas, por lo que su extenso uso en la industria es típico. El proceso de curado de un material es un procedimiento complejo e irreversible, llegando a un estado final infusible e insoluble, al momento de culminar se le otorgan ciertas propiedades mecánicas, térmicas y de resistencia elevadas, por lo que, si se llega a filtrar alguna imperfección en el método, además de cambiar estas propiedades pueden llegar a convertir a la pieza en inadecuada para su uso, Silva (2016).

Dentro del método aplicado en el laboratorio de CIATEQ A.C. la posibilidad de la propagación de algún defecto se reduce debido al método utilizado: “Modelo por Transferencia de Resina Asistido por Vacío”, ya que al hacer uso de la bomba de vacío se tiene un control para reducción de burbujas de aire, las cuales, en caso de existir demasiadas, podrían disminuir la calidad del producto e incluso hacerlo inservible.

Una de las partes del proceso de mayor cuidado, como ya se mencionó es el acomodo y apilado de las fibras de vidrio, pero la parte crítica del proceso es la adición de calor, ya que la temperatura y presión escogidas serán las responsables de la correcta polimerización de la resina, y por consiguiente del curado de la pieza y su buen funcionamiento.

Si el curado alcanzado no es el adecuado, la resistencia y la rigidez alcanzadas por la pieza una vez esté en servicio no serán las predichas, pudiendo ocasionar el fallo mucho antes de lo esperado. El coeficiente de expansión térmica que se utilizará en el proceso de curado debe ser elegido cuidadosamente, es uno de los procedimientos donde la resina muestra propiedades, esto se da hasta que se realiza una reacción química donde se endurece mediante la aplicación de un catalizador, acoplado a este proceso para el correcto curado, se debe tener un control cuidadoso en la aplicación del calor, Silva (2016).

Las tecnologías comúnmente usadas para añadir calor al proceso en la actualidad son la bolsa de vacío y autoclave, éste último es usado en las grandes industrias manufactureras de aerogeneradores, en el caso del laboratorio de CIATEQ, A.C.,

éste se sustituye por la construcción de un modelo que funciona de manera similar, en el cual en vez de agregarse presión y temperatura sólo se agrega la segunda, consiste en colocar una especie de cajón que cubrirá al molde (la cámara que se crea entre la superficie del molde y el encajonado finalmente conformará el volumen de control que se usa en ANSYS para el análisis), el mismo que contará con entradas definidas para el número de calentadores y sopladores por definir que crean un flujo de calor sobre el interior del encajonado para lograr la polimerización de la resina. Es importante mencionar que hasta el momento el proceso sólo ha sido realizado para un aspa de 6 metros en CIATEQ AC en CIATEQ AC, por lo que se pretende llevar a mayor escala para un molde de aspa de 30 metros para un molde de aspa de 30m.



Figura 21. Encajonado usado para aspa de 6m lado succión del molde, CIATEQ A.C. (2020)

Los principales motivos por los que se usa este tipo de materiales para la fabricación de aspas son debido a las buenas propiedades mecánicas y la alta resistencia combinada con una densidad baja, por lo que es más ligera, la alta resistencia a la fatiga, buen aislamiento térmico y acústico, resistencia a la corrosión, entre otras. El siguiente paso después de que el material termina el proceso de curado, es que se abre el encajonado y la pieza final es removida, usualmente no se necesita algo

más, la calidad de la pieza debe ser alta por ambos lados, después de haber llevado el procedimiento de manera correcta, Teixeira y Souza (2019).

2.3 Temperatura de transición vítrea

Como definición general la temperatura de transición vítrea es a la que un material tras enfriarse, un líquido subenfriado cerámico o polimérico se transforma en un sólido vítreo rígido. Esta se define mediante la gráfica de volumen específico, frente a la temperatura (Callister, Rethwisch, 2021).

Dentro del curado de una resina existen dos etapas características: gelificación y vitrificación, donde las moléculas del material comienzan a unirse formando un líquido viscoso hasta llegar a un punto de gel elástico, llegando a la formación de cadenas de material curado, aquí es donde se presenta la temperatura de transición vítrea, antes de que se llegue al estado de curado, el material pasa por una temperatura llamada T_g , que corresponde al sistema sin tener aún la adición de calor, debajo de esta temperatura se tiene que las cadenas del material no se mueven, por lo que permanece en un estado sólido. Cuando se tiene una temperatura mayor, inicia la reacción de curado. El sistema de resina pasa por etapas de estar en un estado líquido a uno elastomérico, llamado punto de gel.

Este último, no afecta al proceso de curado, que continúa, se incrementa la densidad del material aumentando la T_g la cual iguala a la temperatura de curado, y aquí es donde ocurre la vitrificación, cuando éste se alcanza, la velocidad de reacción descende, y el curado se vuelve lento, es importante mencionar qué si la temperatura para el proceso de curado de la resina no se mantiene, esta nunca va a curar por completo o de manera correcta, Silva (2006).

Esta temperatura dependerá de la naturaleza de la resina y de los aditivos que esta contenga, la transición de esta temperatura implica cambios bruscos en propiedades físicas como rigidez, capacidad calorífica y coeficiente de dilatación térmica. Esta característica define el límite superior en numerosas aplicaciones de los polímeros semi cristalinos.

Los factores que la influyen son que, al calentar por encima de la temperatura, un polímero sólido amorfo se transforma desde un estado rígido a uno gomaelástico.

El valor de esta depende de las características moleculares que afectan a la rigidez de la cadena, haciendo que su flexibilidad se reduzca y T_g incrementa debido a grupos funcionales voluminosos, grupos polares, dobles enlaces y grupos aromáticos. Al igual que un incremento en el peso molecular induce un aumento en la temperatura de transición vítrea. En la Figura 22 se muestra la gráfica de temperatura que se obtuvo en CIATEQ al monitorear las temperaturas y condiciones que se observaron para la manufactura de un aspa de 6 metros análoga a la de este trabajo, donde la curva azul representa el desarrollo de temperatura exotérmico de la mezcla de resina, la curva negra representa la temperatura deseada del molde.

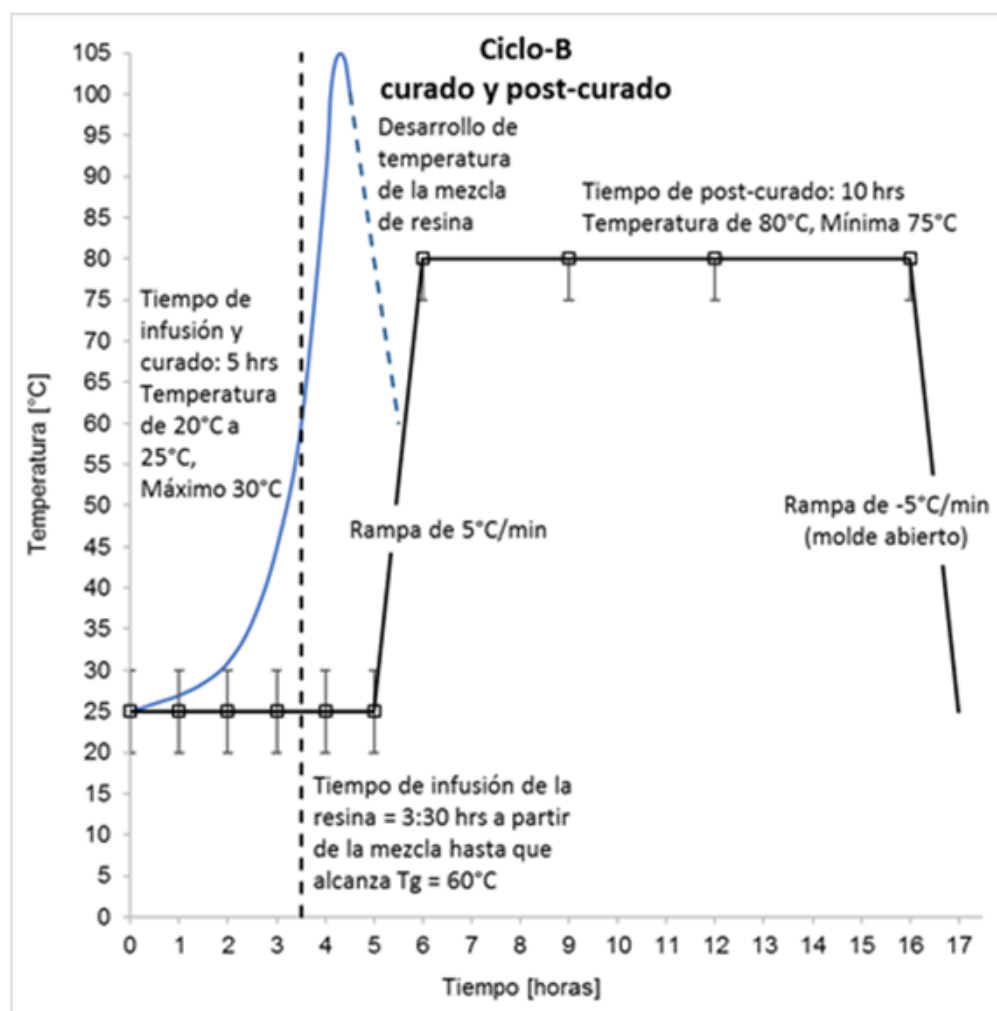


Figura 22. Gráfica de temperatura para el curado de la resina (CIATEQ A.C.).

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN DE FLUJO DE AIRE CALIENTE

El desarrollo de este capítulo se basa en conocer los diferentes escenarios propuestos para observar el comportamiento de la distribución de flujo dentro del volumen de control, además de imitar las condiciones que se tienen que cumplir para los materiales, las herramientas y ambiente que conforman a la manufactura del molde del aspa.

Dentro del software ANSYS se pueden realizar diversas simulaciones que abarcan desde análisis estructurales, eléctricos, térmicos, dinámicos, entre estos se encuentra el análisis de fluidos, CFD por sus siglas en inglés Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics), la interfaz del programa permite crear modelos y analizar una variedad de fenómenos físicos relacionados con las ecuaciones que gobiernan a la mecánica de fluidos, como la ecuación de la energía, la ecuación de continuidad y cantidad de movimiento.

ANSYS Fluent emplea el método de los volúmenes finitos para convertir las ecuaciones de gobierno de un fluido en ecuaciones algebraicas que pueden ser resueltas numéricamente.

Las cuales se presentan como transformadas de la forma Euleriana mediante el teorema de Transporte de Reynolds y el Teorema de Divergencia de Gauss.

El apartado de Fluent en ANSYS utiliza las principales ecuaciones de la mecánica de un fluido para encontrar la solución a la geometría y condiciones iniciales que se introducen en un inicio, éstas son:

- Ecuación de conservación de masa.
- Ecuación de conservación de momentum.
- Ecuación de conservación de la energía.

El primer principio básico de la dinámica de fluidos es la conservación de masa, este menciona que la masa no puede ser creada ni destruida, así que la masa que atraviesa la frontera de un sistema debe estar balanceada por una acumulación o agotamiento de masa. Para flujos compresibles es posible para la masa incrementar o disminuir dentro de un sistema de volumen fijo.

Después de aplicar los cambios necesarios, el resultado es la ecuación diferencial de conservación de masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{V} = 0$$

Ecuación 3. Conservación de masa.

Dónde, ρ es la densidad del fluido, t es el tiempo, ∇ es el vector de divergencia, $\vec{V}$ es el vector velocidad.

Para la ecuación de conservación de momentum, que es una reformulación de la segunda ley de movimiento de Newton, es necesario saber que influyen variables como las fuerzas superficiales (presión, fuerza de tensión viscosa) y las fuerzas del cuerpo (gravedad), por lo que en la ecuación se deben adicionar estas variables. Aplicando el mismo principio que a la ecuación de conservación de masa, se tiene que:

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot \vec{V}) + \vec{F}_b$$

Ecuación 4. Conservación de momentum.

Dónde p es la presión, μ es el coeficiente de viscosidad dinámica y $\vec{F}_b$ es la fuerza de presión.

En cuanto a la ecuación de la energía, ésta debe estar presente si es que en el modelo de simulación la temperatura también lo está. Esta nos permitirá obtener el valor final en las configuraciones (ANSYS Inc., 2023).

$$\frac{\partial(\rho e_t)}{\partial t} + \nabla \cdot [\vec{V}(\rho e_t + p)] = \nabla \cdot [k \nabla T + (\vec{\tau} \cdot \vec{V})] + \dot{S}_g$$

Ecuación 5. Conservación de la energía.

De lo anterior se tiene que e_t es la energía total, k la conductividad térmica, T la temperatura, $\vec{\tau}$ el tensor de esfuerzo cortante, $\dot{S}_g$ la fuente de generación de energía externa.

3.1 Programación del software

Los pasos que se realizan para llevar a cabo el análisis de fluido en ANSYS se presentan de manera general en el siguiente esquema:

Metodología de análisis térmico para el molde del aspa.

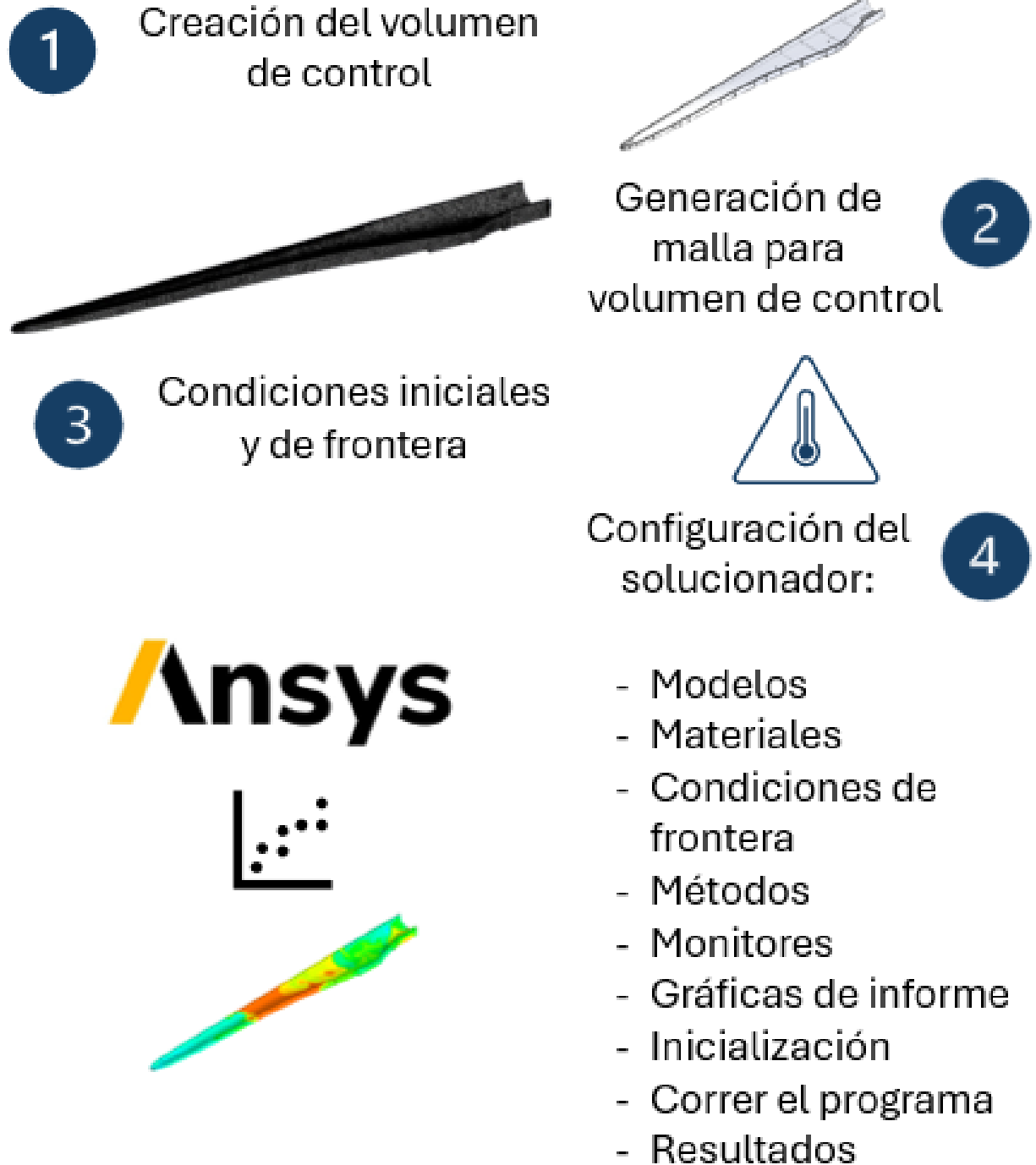


Figura 23. Metodología de análisis térmico para el molde del aspa.

3.1.1 Volumen de control

El volumen de control con el que se trabajó a lo largo de la investigación está basado en el molde del aspa general como se observó en la Figura 21, a partir de la superficie del aspa de 30 metros. Ese crea un encajonado, éste funciona como una especie de tapa creada con ayuda de un CAD, se obtiene un volumen en el cual se analiza la transferencia de calor, mostrado en la Figura 24.

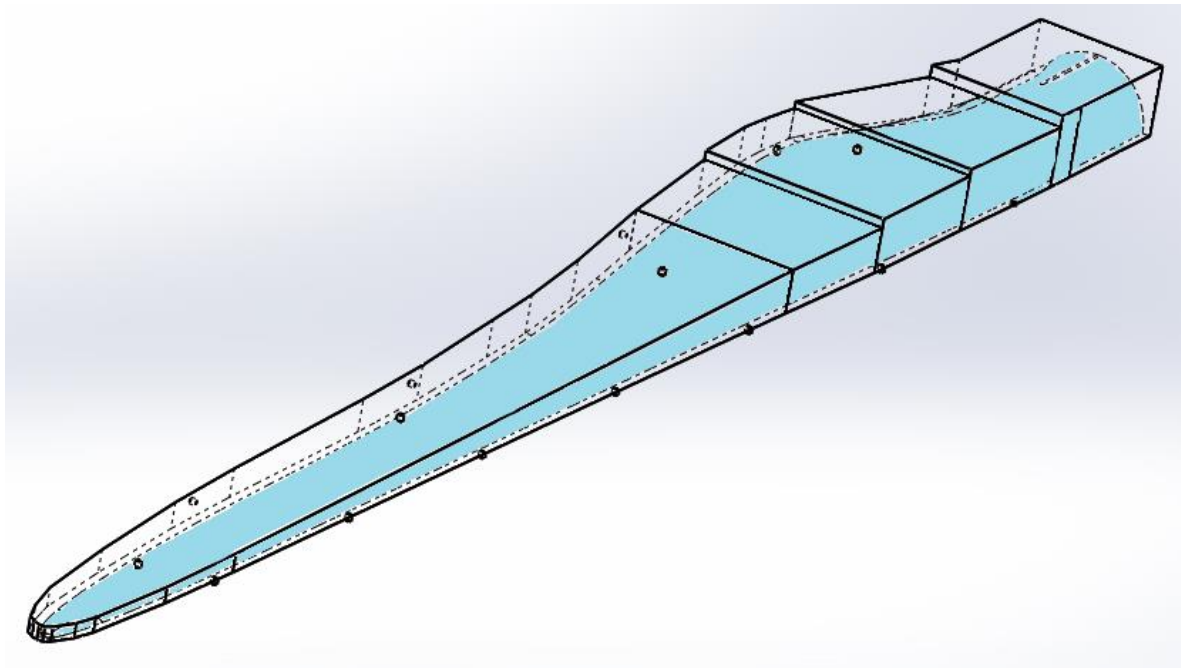


Figura 24. Región en azul: concha del lado succión del aspa, a partir de la cuál es creado el volumen de control (líneas gruesas en negro).

La creación del dominio fue realizada mediante cuerpos extruidos, teniendo como base el lado succión del aspa, éste se divide en secciones ya que se buscó adaptar el dominio de la mejor forma posible debido a que la curvatura de un aspa es una geometría irregular.

Se trabajó con el módulo Fluent de ANSYS. Para crear el volumen de control se utilizó el software SolidWorks el cual fue importado a la interfaz de ANSYS, donde se pudo iniciar la parametrización de entradas y salidas de las herramientas de inyección de lujo, calentadores y sopladores.

Mientras más grande sea el volumen de control, más elementos se analizarán al momento de correr la simulación, lo que hace más tardado el tiempo en que el software analiza el problema para brindar una solución. para la distribución del flujo. En este caso el volumen del aspa es de 22.418 m^3 .

El apartado de ANSYS *Fluent* se divide en las siguientes secciones que se muestran en la Figura 25:

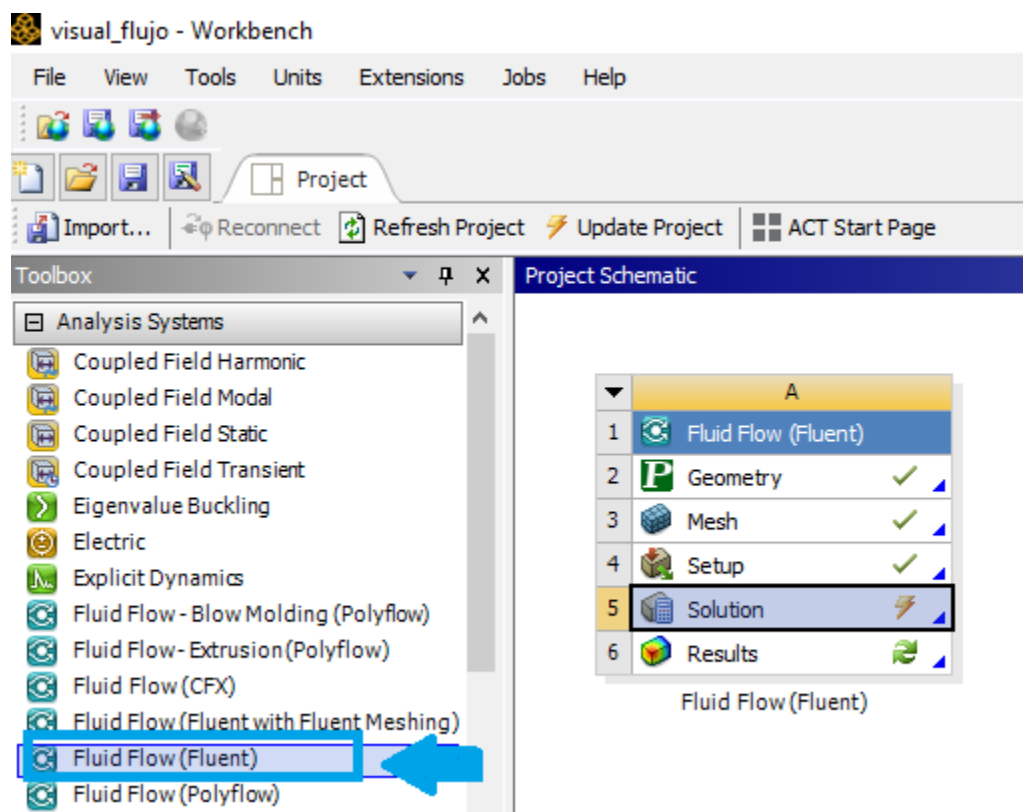


Figura 25. Pantalla principal (Workbench) de ANSYS.

Como se puede apreciar del lado izquierdo, dentro de la lista de sistemas de análisis se encuentra *Fluent*, que es mediante el cual se analiza el comportamiento del flujo dentro de nuestro volumen de control, se selecciona y se arrastra al espacio del lado derecho para así iniciar con la programación de los puntos que se pueden apreciar del lado derecho.

En la lista debajo del título Fluid Flow (Fluent), se pueden observar los pasos que se recorren para llegar al análisis de fluido que se desea obtener con esta investigación. Se dará una breve descripción a continuación:

2. Geometría (*Geometry*): Creación o importación de la figura con la que se va a trabajar, puede ir desde figuras en dos dimensiones, hasta cuerpos complejos como lo es un aspa de aerogenerador, las cuales se encuentran en tres dimensiones.
3. Malla (*Mesh*): Se puede generar de manera automática o modificar los elementos que la componen para obtener una malla definida personalizada con más elementos de análisis, en el apartado siguiente se definirá con mayor claridad como se conforman las características que pueden ser modificadas.
4. Configuración (*Set Up*): Se modifican numéricamente las condiciones con las que se rige el fenómeno al que se quiere estudiar, que es el comportamiento del fluido (aire caliente) dentro del volumen de control.
5. Solución (*Solution*): Dependiendo de cómo se realizó la configuración y la malla, se puede modificar las iteraciones que se requieran para lograr el resultado deseado del análisis, es decir el comportamiento del flujo que se quiere estudiar.
6. Resultados (*Results*): En este apartado se puede verificar si las propuestas están brindando el resultado deseado, ya que se puede graficar el alcance (área) y las temperaturas obtenidas dentro del molde.

3.1.2 Generación de malla

La malla del modelo y el volumen de control tienen una relación directa ya que dependiendo de las características del segundo la malla tendrá menor o mayor cantidad de nodos y elementos, donde la variación del tamaño de estos dependerá de las zonas de mayor interés para el usuario y del tamaño del volumen de control. La herramienta con la que se realiza es el generador de malla (*mesh generator*) que produce mallas de alta calidad en las simulaciones *CFD*, el uso que se le da es resolver las condiciones de frontera iniciales del fenómeno que se estudia.

Desde el punto de vista de ANSYS, la exactitud de la simulación depende directamente del número de elementos en la malla, entre mayor sea el número de estos, el análisis será más cercano a la realidad, pero al mismo tiempo se requiere de un mayor poder computacional para poder resolver el modelo.

Una de las ventajas que ofrece ANSYS Fluent, es que se pueden realizar distintos tipos de mallas al volumen de control que se desea analizar, es decir, si se necesita

mayor calidad en ciertas áreas donde la geometría sea irregular, como es el caso de las palas de un aerogenerador debido a los perfiles aerodinámicos, existe la posibilidad de hacer mallados en caras o áreas específicas que así lo requieran. Los elementos de la malla pueden tener distintas formas, como tetraedros, prismas y pirámides en el modo 3D, y también se incluye un modelo hexaédrico para el modo 2D, la elección de la forma de estos dependerá del análisis que se quiera realizar, aunque el control de generación de malla de superficie y volúmenes avanzados puede hacer que obtengamos resultados más específicos en ciertas áreas.

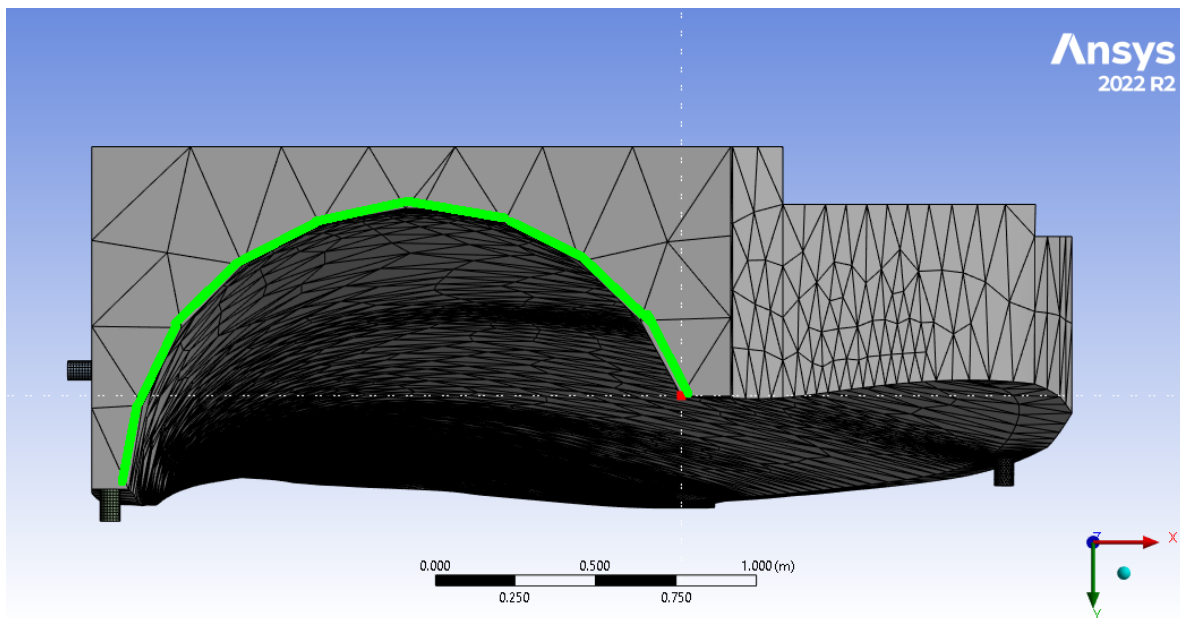


Figura 26. Malla generada por ANSYS de manera automática.

Como se puede visualizar en la Figura 26, la malla toma la forma de triángulos grandes y deformes (no equiláteros) o los bordes del molde del aspa incluso llegan a verse como una serie de líneas rectas, en lugar de una curva, por lo que la adaptación de nuestro modelo al real no es una copia similar.

3.1.2.1 Tipos de métricas de malla de ANSYS (*mesh metrics*)

Dentro de los parámetros más importantes para una simulación en ANSYS es la manera en que se realiza el mallado, como ya se mencionó éste cuenta con la capacidad de brindar uno por default, pero este es considerado básico y no es común dejar la malla generada por el software sin realizar ninguna modificación, ya

que al no ser modificada no se crea con las necesidades geométricas dónde el volumen de control lo requiere por parte del usuario.

Uno de los principales aspectos que pueden ser modificados para la malla y controlar la calidad que ésta tendrá, son las métricas de malla, dependiendo de la simulación que se va a llevar a cabo y la física involucrada, se selecciona alguno de los siguientes:

Calidad de elemento (*Element quality*): Éste relaciona la raíz cuadrada del cubo de la suma del cuadrado de las longitudes de los bordes para elementos en 3D como lo es el molde del aspa, la calidad va de 0 a 1, dónde 1 indica un cubo perfecto y 0 un volumen negativo.

Relación de aspecto (*Aspect ratio*): Proporciona una comparación de altura y ancho de un triángulo (o cuadriláteros), varía de 1 a infinito, dónde 1 equivale a un triángulo equilátero.

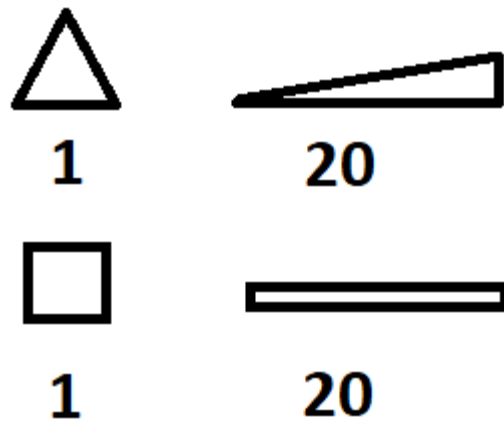


Figura 27. Deformación de los elementos de acuerdo con la calidad de Relación Aspecto.

Asimetría (*Skewness*): Medida de calidad de la malla, la cual determina que tan cerca del ideal (equilátero o equiángulo) está una cara o una celda. Valores cercanos a 1 serían elementos deformes, y 0 equiláteros.

Tabla 2. Calidad de los elementos de acuerdo con el valor de asimetría.

1	Deforme
0.9-<1	Malo

0.75-0.9	Pobre
0.5-0.75	Justo
0.25-0.5	Bueno
>0-0.25	Excelente
0	Equilátero

Calidad ortogonal (*Orthogonal quality*): El rango de calidad ortogonal es de 0 a 1, dónde un valor de cero es peor y un valor de 1 es mejor.

Con una geometría como la que se tiene, las métricas de malla son una opción que permitirá controlar la calidad de cada uno de los elementos del del volumen de control (ANSYS, 2024).

En cuanto a la creación de la malla en el molde (volumen de control), se opta por usar la métrica de malla asimetría (*skewness*), ya que es la que mejor se adapta a las geometrías irregulares, se buscará cumplir la condición de elemento bueno y excelente en la mayoría de los elementos que la conformen.

De acuerdo con ANSYS (2005) los pasos para crear una malla son:

1. Creación de la geometría.
2. Definir regiones.
3. Atributos de la malla.
4. Creación de la superficie de la malla.
5. Creación del volumen de malla.

Cada uno de estos pasos se describe para la creación de la malla del caso de estudio:

1. Creación de la geometría: En el caso de la investigación esta fue creada en el software *SOLIDWORKS* e importada dentro de la interfaz de geometría de ANSYS, donde se crea un *solid body* (cuerpo sólido) para la sección de interés de estudio.
2. Definir regiones: La delimitación de secciones de entrada y salida, se pueden definir como sólidos o caras, para las condiciones de frontera relacionadas con el aspa, como velocidad, temperatura, presión. Para el molde del aspa es importante definir las áreas de entrada de los calentadores y sopladores.

3. Atributos de la malla: Se brinda control sobre cómo se encontrarán distribuidos los elementos de la malla, esto para asegurar la mejor solución con los recursos computacionales disponibles. Se pueden hacer mallas refinadas sobre distintas superficies de la geometría. Dentro de éstos se consideran los elementos y nodos que componen al volumen de control, ya que existe una relación directa entre estos y las ecuaciones que resuelve ANSYS para llegar a la solución del problema.
4. Creación de la superficie de la malla: Ésta tiene prioridad en comparación con la malla de volumen generado, esto es debido a que resulta útil para asegurar que las escalas de longitud obtengan el efecto deseado al momento de llevar a cabo la simulación. Dentro de ésta existe una herramienta llamada *Section*, en donde la inflación es usada para resolver la malla cercana a las paredes de la geometría con el fin de capturar de mejor manera los efectos de la viscosidad en las paredes.
5. Creación del volumen de malla: La generación de una malla de volumen se da mediante los comandos *Section* y *Advancing Front Volume Mesher* (*mallado de volumen avanzado*), el cual permite la formación de mallas tetraédricas usando técnicas eficientes (ANSYS, 2005).

Una vez analizadas las configuraciones y modificaciones que se pueden realizar para un mallado en ANSYS, se define que para las simulaciones realizadas en todas las propuestas se tendrá un número aproximado a un millón de elementos a analizar para obtener mejores resultados debido al tamaño del molde.

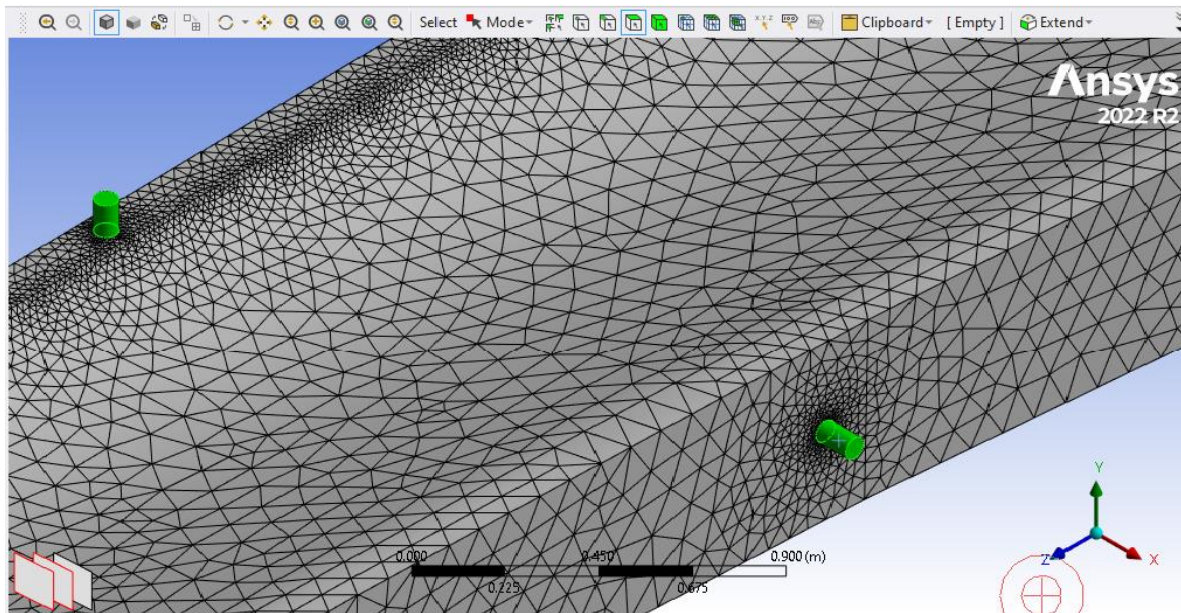


Figura 28. Acercamiento de la malla en entradas y salidas.

En la Figura 28 se tiene un acercamiento de las zonas importantes presentes en el molde del aspa y cómo se comporta la generación automática en estos puntos, estos lugares donde no se tiene un orden de la distribución de elementos se pueden corregir mediante el uso de métricas de malla, en este caso se optó por *mesh metrics*: Skewness (asimetría), los resultados obtenidos para la malla se pueden observar en la Figura 29.

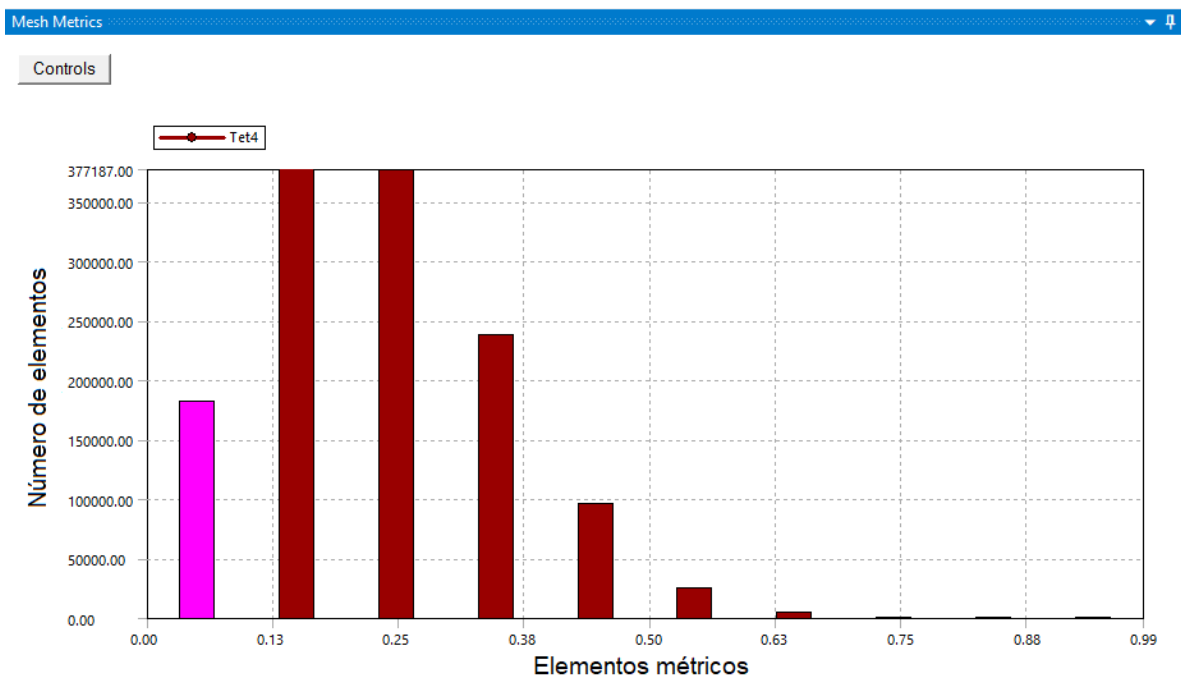


Figura 29. Resultado para Asimetría: métrica de malla, configuración final.

Después de que se genera la malla, y se cuenta con el número de elementos y nodos óptimos, se puede editar el módulo SetUp, que es donde se pueden colocar todas las variables con las que contamos; iniciando con aspectos generales como las ecuaciones con las que se trabajará.

El número de elementos que se utilizó para los modelos planteados en este trabajo fue mayor a 1 00 000, esto debido a que se trabaja con un volumen de control de 22.4 m^3 , se hace una pequeña comparación de como se verían los resultados con simulaciones efectuadas con mallas de un menor número de elementos, esto para aseverar esta idea, se mostrarán los resultados obtenidos con tres distintos tipos de malla para el caso 1, dos calentadores y dos sopladores. Los resultados se pueden leer en la Tabla 3, los cuales fueron obtenidos mediante una exportación de datos desde la superficie de interés mediante Ansys.

Tabla 3. Resultados obtenidos en tres mallas con variación de número de elementos y nodos.

Simulación	Número de elementos	Número de nodos	Temperatura promedio alcanzada [°C]
1	1 304 600	258 128	33.70
2	549 964	111 992	90.67
3	268 316	55 705	95.91

Desde el momento en que se comienza a hacer la simulación con una malla con un bajo número de elementos, el software marca de manera automática que hay un error, ya que, con esa cantidad no se está alcanzando la convergencia deseada para los resultados de las ecuaciones de energía y continuidad requeridos.

La comparación para los tres casos se realizó con las mismas condiciones de entrada, así como mismo número de iteraciones para poder verificar la variación en los resultados debido a la malla, por lo tanto, si se realizara el mismo método con las otras dos configuraciones existiría una variación en el valor de la temperatura debido a la calidad de malla, como se mencionó en este apartado.

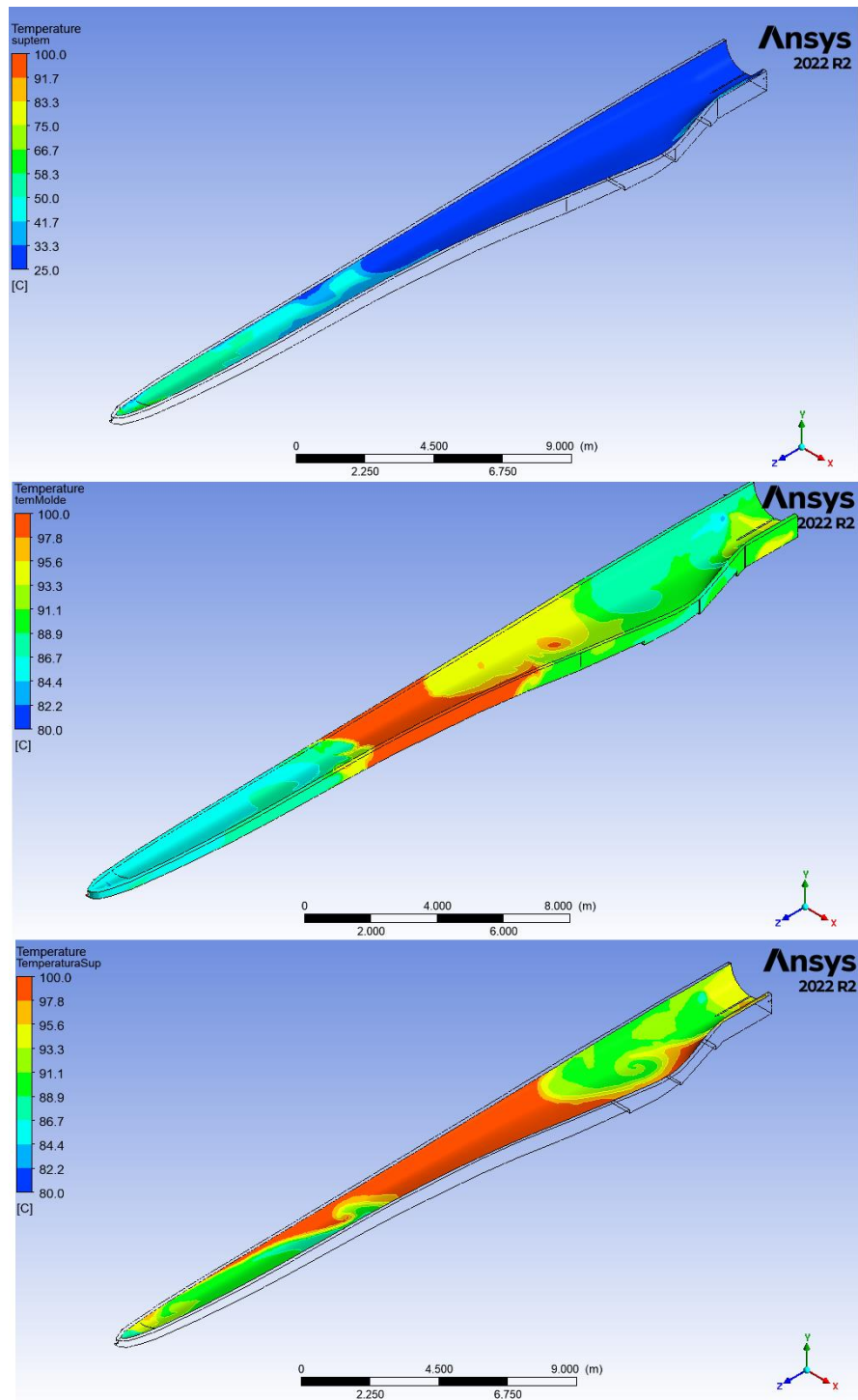


Figura 30. Comparación de resultados para las tres mallas analizadas, de arriba abajo: malla de un millón de elementos, malla de medio millón, malla de doscientos mil elementos.

En la Figura 30 se observa observar el cambio significativo que existe entre los tres casos, para la malla de mayor número de elementos se tiene una visibilidad más lenta para los contornos de temperatura, esto debido a que en cada iteración se analiza un mayor número de elementos, por lo que ‘parece’ que avanza más lento que los otros dos casos, pero en realidad el resultado que está mostrando es más cercano a la realidad ya que analiza un volumen más pequeño del molde del aspa para cada ecuación.

En cambio para la malla de menor número de elementos se está visualizando como si el análisis incluso llegara a la temperatura que se requiere para el correcto curado de la resina, sin embargo, con un número tan bajo de sopladores y calentadores no alcanza a cubrir con aire caliente la superficie del aspa, por lo que se descarta como una simulación confiable, a pesar de que la malla con medio millón de elementos muestra un avance más lento en la temperatura, los valores alcanzados tampoco tienen sentido, por lo que se descarta de igual forma.

3.1.3 Condiciones iniciales y de frontera

Las propiedades que gobiernan al fenómeno están controladas por variables conocidas y están restringidas por el molde, las condiciones ambientales, como la temperatura y el flujo brindado por las herramientas de inyección de calor, así mismo la rampa de temperatura que se debe cumplir para el correcto curado de la resina que se muestra en la Figura 22.

En el momento en el que se inyecta el flujo de aire caliente mediante los calentadores, los sopladores tendrán la función de distribuirlo dentro del molde, se busca obtener la mejor configuración entre estos para lograr y mantener una temperatura de 80°C alrededor de 17 horas.

La gráfica mostrada (Figura 22) se elaboró en CIATEQ A.C. al momento realizar un procedimiento análogo para el curado de la resina en un aspa de 6 metros de longitud y el resultado fue que la calidad del curado cumplía con los requerimientos necesarios, por lo que se busca aplicar el mismo procedimiento a un aspa de mayor tamaño, como lo es el aspa de 30 metros.

La presión dentro del molde se considera como despreciable, se trabaja con presión la atmosférica de Querétaro, que es el lugar donde se encuentra ubicado el laboratorio de CEMIE-Eólico, en el cual se encuentra el molde del aspa.

Una de las características que se toman en cuenta de manera similar al trabajo de Camacho y Darney (2016), es que el rango de temperatura de operación debe mantenerse a 80°C y mediante las entradas de calor que proporcionarán los calentadores, con su temperatura de 120°C al ser distribuida en la superficie del molde, combinada con los 75°C de los sopladores se alcanzará la temperatura homogénea de 80°C para un correcto curado de la resina.

Como se tiene que realizar la configuración de varios elementos de entrada, salida, se muestra en la Tabla 4 las variables y como se realizó la entrada de valores:

Tabla 4. Variables de entrada

Elemento	Tipo de condición	Parámetros	Unidades
Calentadores	Flujo de masa de entrada (Mass Flow inlet)	Flujo másico, temperatura	[kg/s], [K]
Sopladores	Flujo de masa de entrada (Mass Flow inlet)	Flujo másico, temperatura	[kg/s], [K]
Salidas de aire	Flujo de salida (Out Flow)	Porcentaje de salida de flujo	[kg/s]
Pared	Pared (Wall)	Flujo de calor de convección	[K]

Para las condiciones de frontera (*Boundary conditions*) nos centramos en darle toda la información de entradas y salidas que se tienen al Set Up, para la simulación del problema, se inicia con las entradas que son calentadores y sopladores, cuyos valores se encuentran indicados en la Tabla 5, respectivamente:

Tabla 5. Características de calentadores y sopladores, valores para condiciones de frontera.

Calentadores	Flujo de masa, entrada	Dirección: Normal a la frontera
		Flujo másico: $[0.04 \text{ kg/s}]$
		Temperatura: $[393.15K]$
Sopladores	Flujo de masa, entrada	Dirección: Normal a la frontera
		Flujo másico: $[0.1225 \text{ kg/s}]$
		Temperatura: $[348.15 K]$

Las salidas se marcan como flujo de salida (*outflow*), esta condición se modifica proporcionando un porcentaje del total de flujo que saldrá por medio de ésta, en caso de sólo tener una salida sería un 100%, en este caso al tener cuatro salidas para cada caso se coloca que en cada una de ellas saldrá una cuarta parte del total del flujo 25%.

Todas las partes del molde que no son entradas ni salidas se consideran una pared (*wall*) del molde, las cuales se encuentran a la misma temperatura que el ambiente ($25^\circ C$, $298.15^\circ K$), esta condición también debe ser modificada en las condiciones de entrada ya que de no hacerlo el programa lo considera una temperatura por default de $300^\circ K$ ($26.8^\circ C$), lo que podría influir en la temperatura final del molde.

3.1.4 Configuración del solucionador (solver)

Las condiciones que se introducen en la parte de la configuración son todas las que se deben cumplir como temperatura, velocidad, densidad, con la que se está inyectando el fluido, las entradas y salidas del volumen de control deben cumplir con las características físicas de los calentadores y sopladores, que se encuentran en el Anexo I.

En un inicio, para las configuraciones del solver, en la interfaz de ANSYS cuenta con un apartado dónde se activan los modelos a usar, en este caso se activa el modelo de energía debido a que la temperatura es una de las variables más importantes y existe un cambio e incremento a lo largo de la simulación para ella,

ya que se pretende encontrar una temperatura homogénea de aproximadamente 80°C a través de herramientas que inyectan 120°C y 75°C respectivamente.

Así como el modelo de turbulencia viscosidad-SST (*viscous-SST k-omega*), el cual se seleccionó debido a que el fluido de trabajo se encuentra cerca de la pared del volumen de control, que es el molde del aspa, lo que hace el comportamiento de éste inestable. Los efectos que produce la turbulencia en el ámbito de la ingeniería son: transferencia de calor, separación de flujo, mezclas, fuerza de arrastre, y caída de presión, debido a ello se realizan las simulaciones antes de llevar a cabo un proyecto, y así prevenir y mejorar estos fenómenos.

Algunos de los modelos de turbulencia con los que cuenta ANSYS involucran el número de Reynolds, este depende de la velocidad, densidad, viscosidad y diámetro o longitud en el que se encuentra contenido el fluido, este hace que se clasifique como laminar, en transición o turbulento.

Los modelos resuelven las ecuaciones de transporte para variables relacionadas con la turbulencia, la mayoría se resuelve para la energía cinética, estos se clasifican en la cantidad de ecuaciones de transporte que existen.

Debido a que la geometría con la que estamos trabajando no es simple, se puede ir direccionando el comportamiento del flujo como turbulento. Aunado a ello, la introducción de flujo forzado por parte de las herramientas de inyección en un espacio cerrado obligará a un comportamiento brusco al chocar con las paredes del molde.

ANSYS coloca por default el modelo *viscous-SST k-omega*, debido a que es el que abarca de manera general los problemas industriales simulados (oceanografía, meteorología, ingeniería ambiental, biología).

Materiales (*materials*); el software ya cuenta con algunas características de materiales cargados de manera general, como densidad, calor específico, conductividad térmica y viscosidad, en el caso del aire que es el fluido de trabajo, la densidad que tiene es la de éste a temperatura ambiente $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$. En el caso de estudio se tienen claras las condiciones de temperatura con las que se va a trabajar, la máxima es la indicada por los calentadores de 120°C , ya que es la mayor temperatura a la que se puede llegar para el aire, así que se opta por colocar

la densidad del aire del molde con respecto a esa temperatura, de acuerdo con esto el cálculo se hizo con las tablas A-1 del libro Termodinámica de Cengel (2012):

$$\text{Densidad del aire a } 120^{\circ}\text{C: } \rho_{\text{aire}} = 0.78 \text{ kg/m}^3$$

De manera ideal no se está realizando una transferencia de calor del molde del aspa hacia el ambiente en el que se está trabajando, por lo que se considera como si las paredes del molde del aspa actúan como una pared adiabática.

El siguiente módulo es condiciones de celda (*cell conditions*), en donde nuestro volumen de control es un “sólido” lleno de fluido de trabajo, que es el aire, se configura para que sea el material del que está conformado el interior del molde del aspa.

Condiciones de frontera (*Boundary conditions*), para el volumen de control se tienen que realizar diferentes modificaciones ya que se plantea elaborar tres escenarios diferentes, en cada escenario se tiene un número diferente de entradas y salidas de flujo, la cantidad de estas será variable.

Se tienen tres escenarios diferentes para visualizar cómo se comporta la temperatura, a partir de los resultados obtenidos en la primera configuración se propuso la siguiente y así con la tercera, cada una mostrará la distribución del flujo obtenida para así buscar mejoras hasta obtener la configuración ideal para realizar el secado de la fibra de vidrio, buscando el alcance total dentro del molde.

Tabla 6. Escenarios propuestos, disposición de herramientas de inyección de flujo.

No. Configuración	No. De calentadores	No. De sopladores	Temperatura alcanzada min-máx. [°C]
1	2	2	25-68
2	5	5	40-78
3	7	4	80-95

Por ejemplo, para la primera configuración (Figura 31), se tienen 4 entradas de aire caliente dos para calentadores y dos para sopladores a 120°C y 75°C colocados en

puntos estratégicos, se eligieron de esta manera para lograr ver el alcance de las herramientas de inyección dentro del molde.

Como se puede observar en la Figura 31 se tiene que las herramientas de inyección de flujo están orientadas de manera normal a la orilla del molde, de esta forma al momento de revisar los resultados se podrá verificar hasta dónde avanza el flujo que se pretende esparcir por toda la superficie de interés, que es el lado succión del molde.

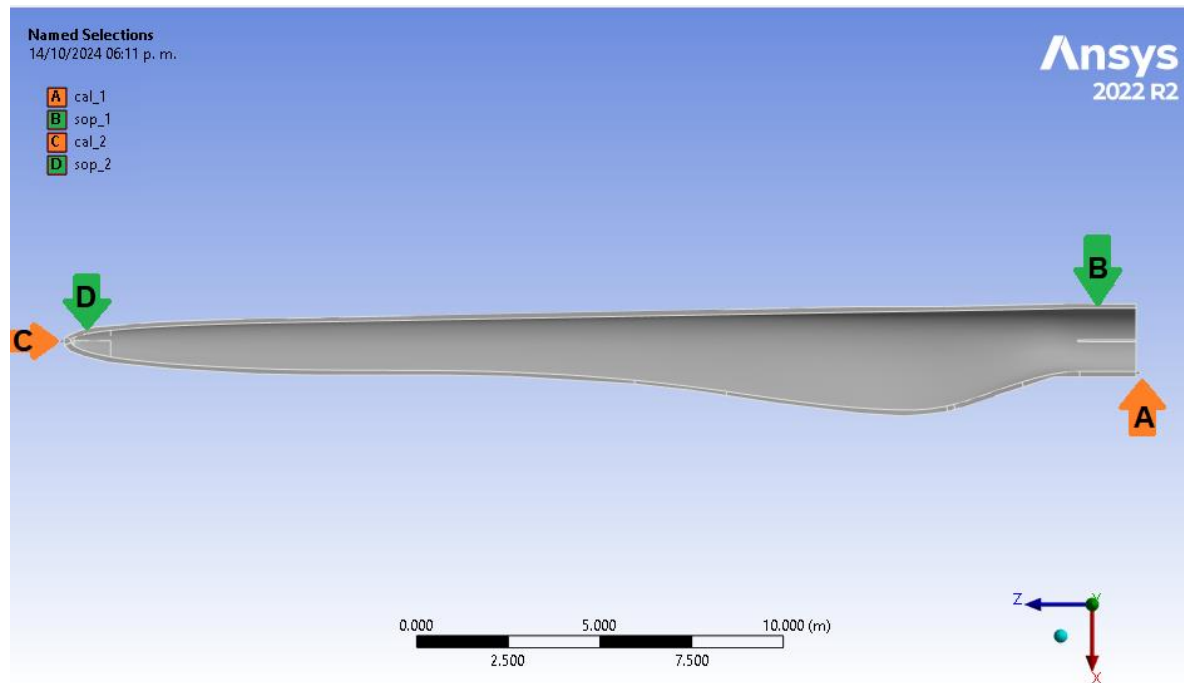


Figura 31. Primera configuración del aspa, entradas y salidas propuestas calentadores (2), sopladores (2).

Para la segunda configuración, Figura 32, se propuso una cantidad igual en calentadores y sopladores para verificar si es que la temperatura de los sopladores que es menor a la de los calentadores afecta a la temperatura final que se busca alcanzar en la superficie que está en contacto con el lado succión del molde.

Al momento de realizar los cálculos para equidistar la entrada de flujo de sopladores y calentadores, se tiene que éstos estarán separados por una distancia de 4.54 m aproximadamente, lo que demuestra que existe mucha separación entre una herramienta y otra, se puede observar en los resultados como afecta a la temperatura directamente.

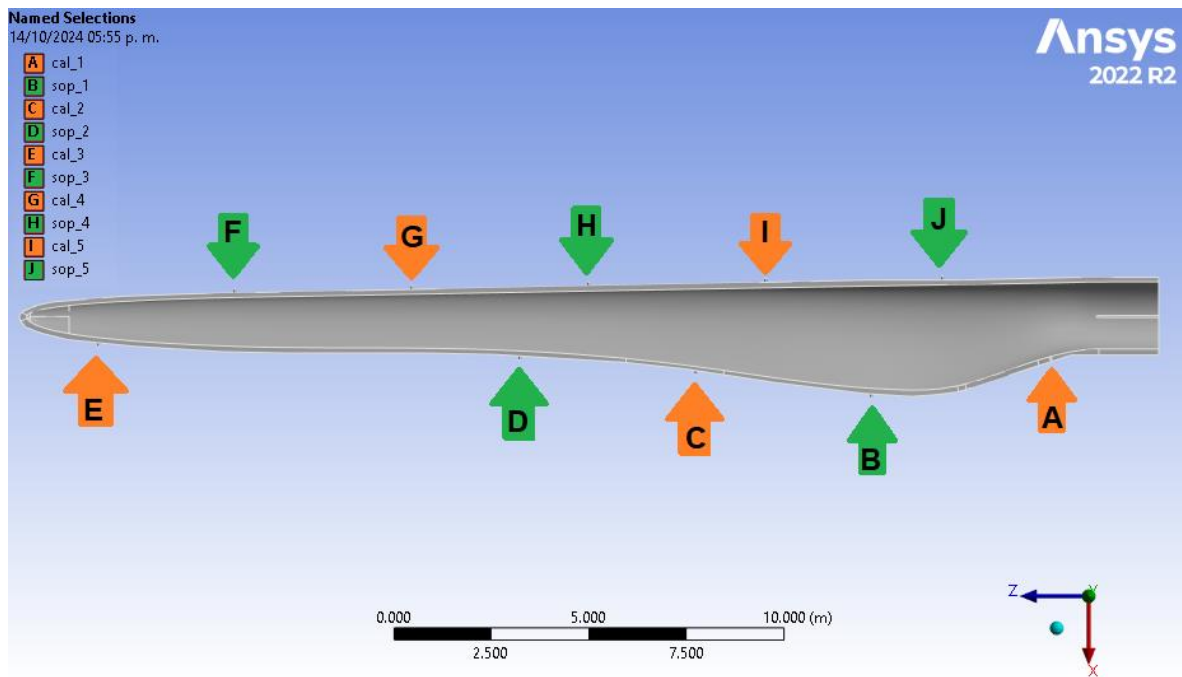


Figura 32. Propuesta de entradas y salidas para la segunda configuración (5 calentadores, 5 sopladores).

La tercera configuración propuesta Figura 33, que fue el resultado al que se llegó en conjunto con CIATEQ, consta del uso de 4 sopladores y 7 calentadores, los cuales se proponen distribuidos como se ve en la Figura 33, como la intención del sistema de calentadores y sopladores es que se llegue a la temperatura de 80°C el número de calentadores debe ser mayor, ya que los sopladores sólo servirán para la correcta distribución del flujo y como se pudo observar en las propuestas anteriores el flujo del soplador hace que disminuya la temperatura en el interior del molde.

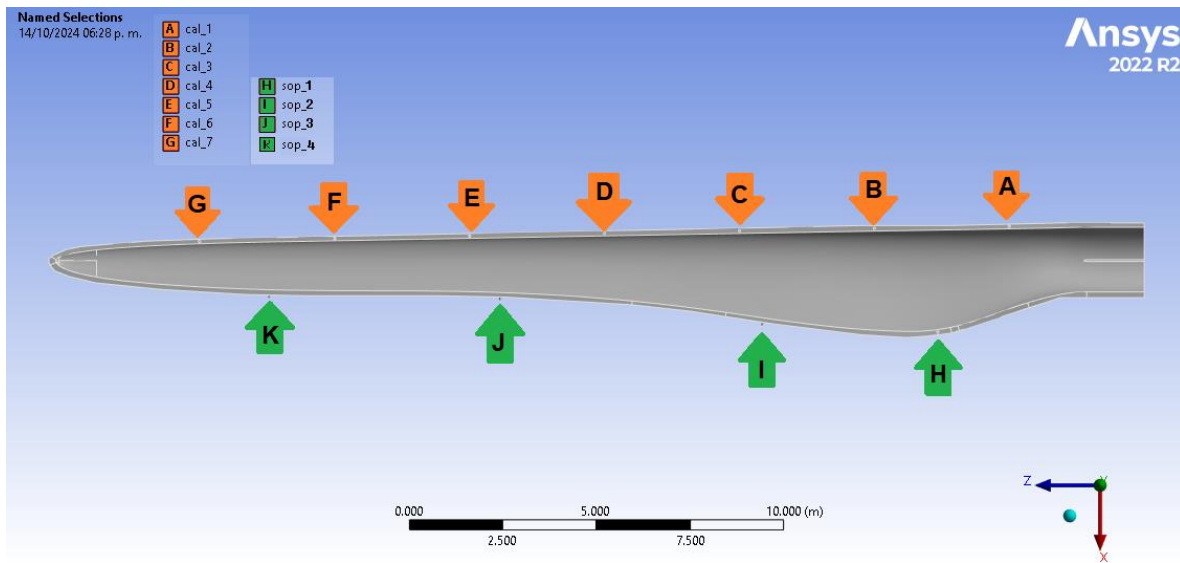


Figura 33. Configuración 3, entradas y salidas, calentadores (7) y sopladores (4).

Para esta configuración se mostró que se ordenaron de un lado del molde los sopladores y en otro los calentadores, esto se debe a que como se pudo notar en las primeras configuraciones al intercalarlos la temperatura del soplador afectaba de manera más significativa a la temperatura global dentro del molde, haciendo que esta cayera hasta 20°C , y al ser la temperatura de curado una de las variables más importantes en los procesos de manufactura de un aspa, en este caso el molde, se debe cuidar que durante todo el proceso de curado se encuentre alrededor de los 80°C especificados como se observó en la Figura 22.

En la parte superior del molde como se observa en la Figura 34, se encuentran cuatro salidas de aire caliente, se propusieron de esa manera para que el total del flujo se distribuya de manera homogénea en su salida, por decirlo de alguna forma se está forzando a que el aire caliente encuentre esas salidas y esto ayude a la distribución del flujo dentro del molde.

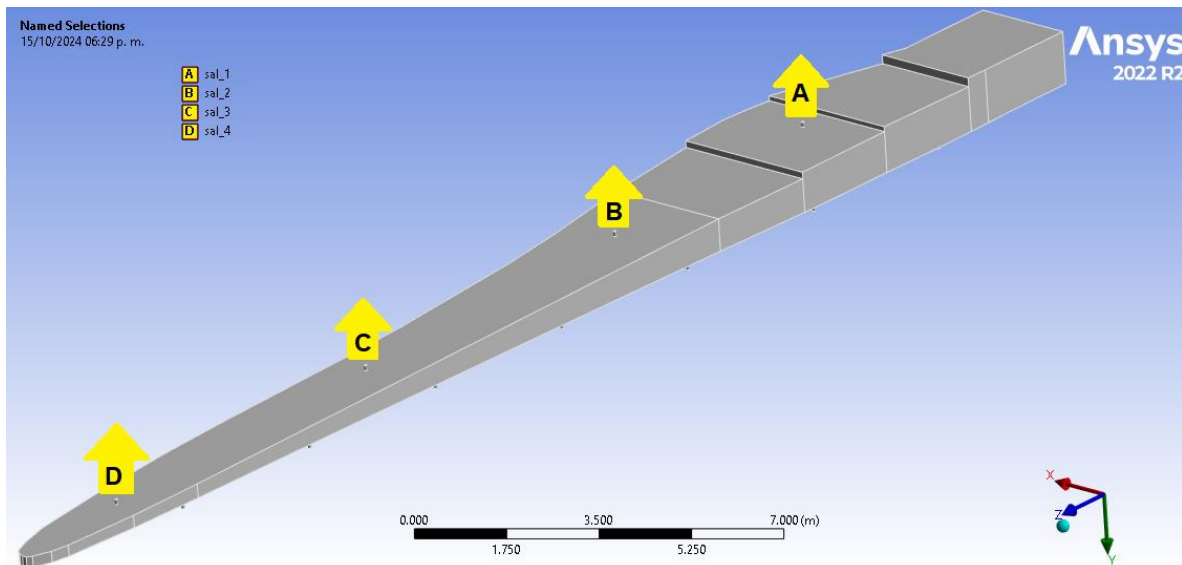


Figura 34. Salidas de aire (4).

En cuanto al apartado de Métodos (*Methods*) se debe verificar que todas las descripciones estén configuradas en segundo orden, esto es referente a las ecuaciones de gobierno que estamos utilizando como se mencionó al inicio del capítulo presente.

Los Monitores (*Monitors*), nos sirven para vigilar que las ecuaciones de continuidad y energía se estén cumpliendo mientras corre el programa, y se colocan con un valor de error residual de $1e^{-06}$, es decir una precisión de seis ceros para tener una convergencia de valores pequeña. El programa por default marca todos los valores, menos el de la ecuación de la energía en $1e^{-03}$, como se busca que el programa converja, se cambia el valor, es decir, el valor de continuidad también se reduce a $1e^{-06}$.

Gracias a las gráficas de informe (*Report Plots*), se puede obtener información de lo necesite el usuario, para las simulaciones es de interés la temperatura, flujos de entrada y salida. Se tienen varias opciones que nos ayudan a crear gráficas de informe: superficie, volumen, fuerza, flujo malla, etc. Las gráficas que se añadirán son: velocidad promedio del molde, temperatura total, continuidad: con la finalidad de saber ¿cuánto flujo entra y sale?, temperatura total en las salidas, flujo total en salidas, velocidad en las salidas.

Ya que se tiene especificado todo lo anterior para el Set Up, y se corre la simulación, existe un paso llamado Inicialización (*Initialization*) en el cual se harán las primeras 10 iteraciones de la simulación, esto se debe a que el modelo aplicará los valores que se introdujeron en el Set Up a la malla para cada una de las variables en cada una de las celdas en las que se divide. Los valores que son considerados son la presión, la velocidad, en este caso la temperatura debido a que la ecuación de energía está activa, y los parámetros de los modelos de turbulencia.

Las ventajas de inicializar el modelo son que la simulación se va a estabilizar y convergerá dependiendo de los valores iniciales. Se pueden realizar cinco tipos de inicialización, híbrida, estándar, FMG (*Full Multi Grid*, Multi Cuadrícula Completa), Iniciar de una solución previa, o Patching (parchar).

Por default la mayoría de los casos se resuelven con la híbrida, ya que esta provee una aproximación ligeramente más real mediante la imposición de un valor inicial no uniforme, al mismo tiempo que genera resultados parecidos a la que se obtendría con FMG, pero a diferencia de esta no requiere tanto poder computacional y tarda menos tiempo en llevar a cabo la simulación.

Para llevar a cabo ecuación de Laplace es resuelta para los campos de velocidad y presión mientras que todas las demás variables son resueltas basadas en un promedio arreglado del campo de valores o interpoladas.

Después de realizar este paso ya se puede correr la simulación, para que se tengan resultados certeros y ver cómo cambia la temperatura en el molde de forma “real”, se hacen alrededor de 1000 iteraciones para poder observar mejores resultados, se puede modificar el número de iteraciones que se van a realizar esto depende de los resultados que se obtienen de las variables que se analizan, para evitar sobrecargar el programa se hacen cinco series de 200 iteraciones cada una, y así verificar en las gráficas que el modelo se está comportando de la manera esperada.

Se puede realizar un análisis de flujo en el apartado de Resultados (*Results*) donde al seleccionar todas las entradas y salidas y dar clic en computar el programa arrojará una ventana contigua con el flujo total que se tiene en éstas, con esto se verifica que todo el flujo que se está inyectando por medio de los calentadores y sopladores, está saliendo.

Tabla 7. Balance de flujos de salida.

Entradas/Salidas	Flujo final [kg/s]	Suma [kg/s]	Balance [kg/s]
Cal_1	0.04	0.28	Calentadores + Sopladores =0.28 + 0.49 Salidas =-0.77 Suma 0.77 – 0.77 =0
Cal_2	0.04		
Cal_3	0.04		
Cal_4	0.04		
Cal_5	0.04		
Cal_6	0.04		
Cal_7	0.04		
Sop_1	0.1225	0.49	
Sop_2	0.1225		
Sop_3	0.1225		
Sop_4	0.1225		
Sal_1	-0.1925	-0.77	
Sal_2	-0.1925		
Sal_3	-0.1925		
Sal_4	-0.1925		

Se observa en la Tabla 7 que, al sumar los valores de entrada que es dado por los calentadores y sopladores, da un total de 0.77 kg/s , y el total de el flujo de salidas es -0.77 kg/s , por lo tanto, se verifica que todo el flujo que se está inyectando con las herramientas, está logrando salir en consecuencia existe un balance de energía y flujo: todo lo que está entrando también está saliendo del molde.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Acorde a la propuesta final con CIATEQ, se usaron siete calentadores y cuatro sopladores, conectados a las cuatro salidas propuestas en la parte de arriba del encajonado, las condiciones de frontera que se vieron en los capítulos pasados, son importantes debido a que son las entradas de nuestro modelo, por lo que la exactitud de los resultados dependerá de que estén bien representadas.

4.1 Gradientes de temperatura

En la primera configuración se obtienen los resultados que se pueden ver en la Figura 35, la temperatura que se obtiene de la mezcla de las entradas de un calentador y un soplador respectivamente avanzan hasta dos terceras partes del molde en general que se aprecia en colores verdes, amarillos y azul claro, pero con una temperatura que oscila entre los 30°C y 58°C la cual no es útil para el secado constante de 80°C que se debe obtener para la superficie del molde.

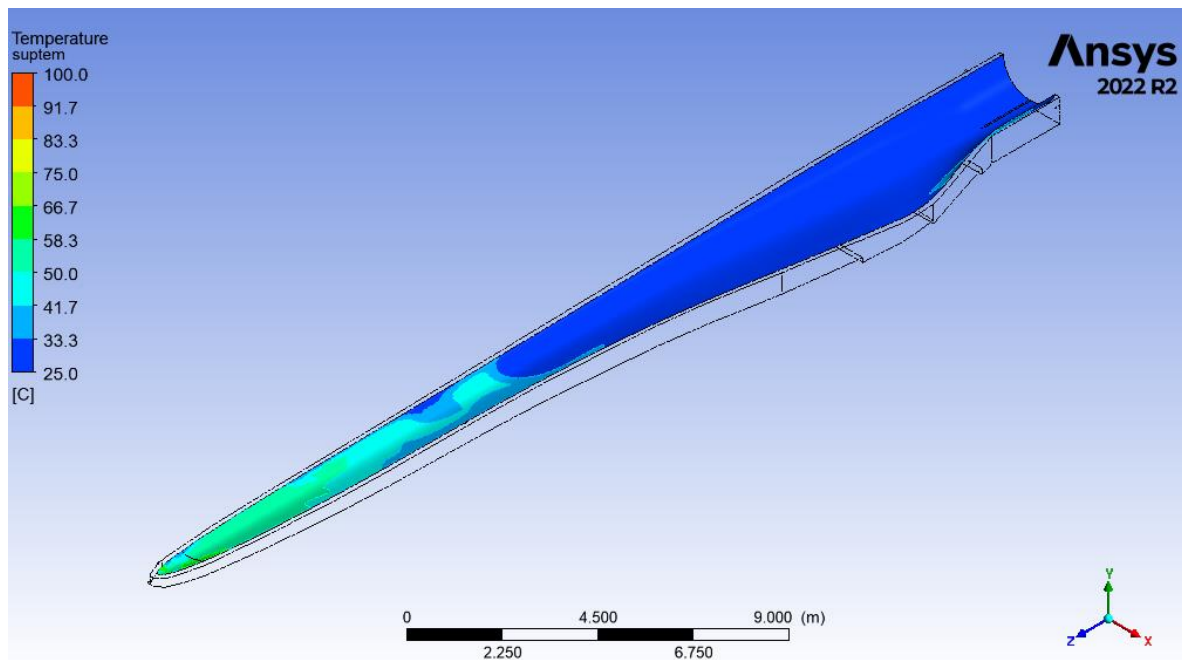


Figura 35. Temperaturas alcanzadas con la primera configuración, conformada de dos calentadores y dos sopladores.

Debido a que en la primera configuración se pudo ver el comportamiento del flujo mezclado de las dos herramientas y la temperatura aún está alrededor de 40°C

debajo de lo deseado se añadirán más calentadores que sopladores para las siguientes configuraciones y así obtener un balance entre temperatura y distribución de flujo.

Como se puede observar en la superficie de la Figura 36, se tiene que, al intercalar los calentadores y sopladores, los segundos hacen que se disipe la temperatura, pero no de la manera esperada, ya que hacen que esta reduzca y se está buscando que se llegue a un balance para lograr la temperatura de 80°C necesaria para el curado de la resina.

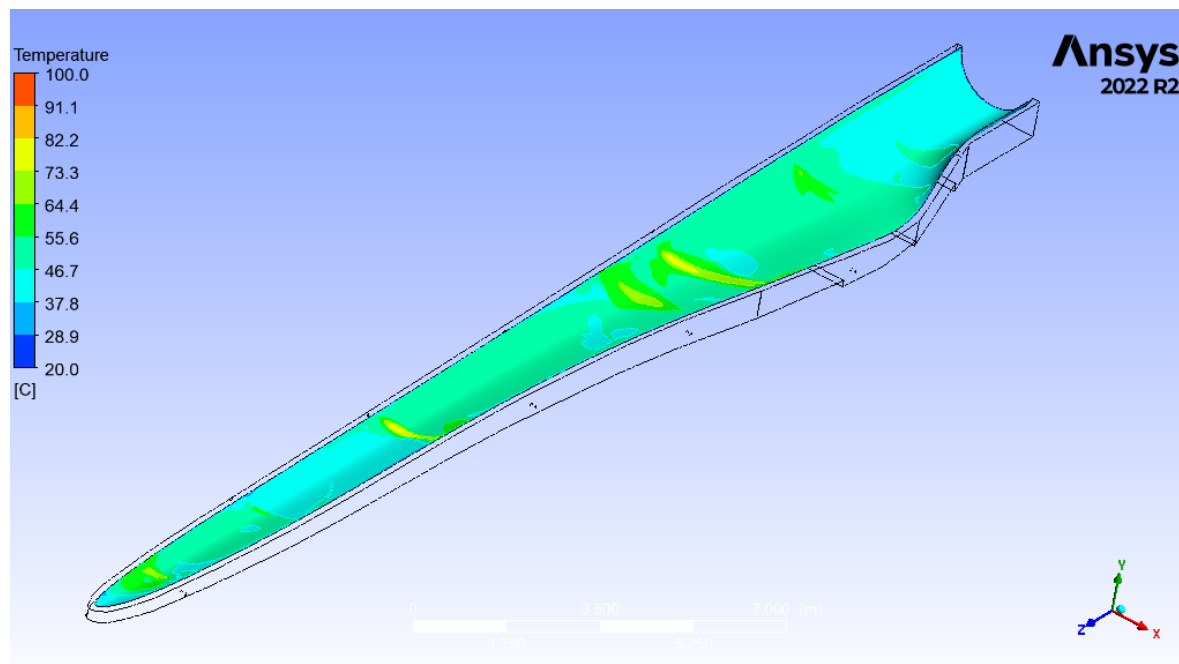


Figura 36. Temperaturas alcanzadas en la segunda configuración.

De igual manera la distancia entre los calentadores y sopladores también parece ser un problema, se observan algunos puntos de color naranja/rojo formados debido a la cercanía con las entradas de los calentadores (Figura 36) al no tener un flujo de distribución de los sopladores existe una especie de estancamiento de calor, lo cual se debe eliminar para que al momento de aplicarlo en el modelo real no exista un problema en el curado de la resina.

El comportamiento del flujo resultante para la última propuesta se puede observar en la Figura 37, la temperatura que se puede distinguir en los contornos de color

que van desde verde, amarillo, rojo y naranja alcanzan incluso los 95°C , por lo que se considera la propuesta ideal para este trabajo.

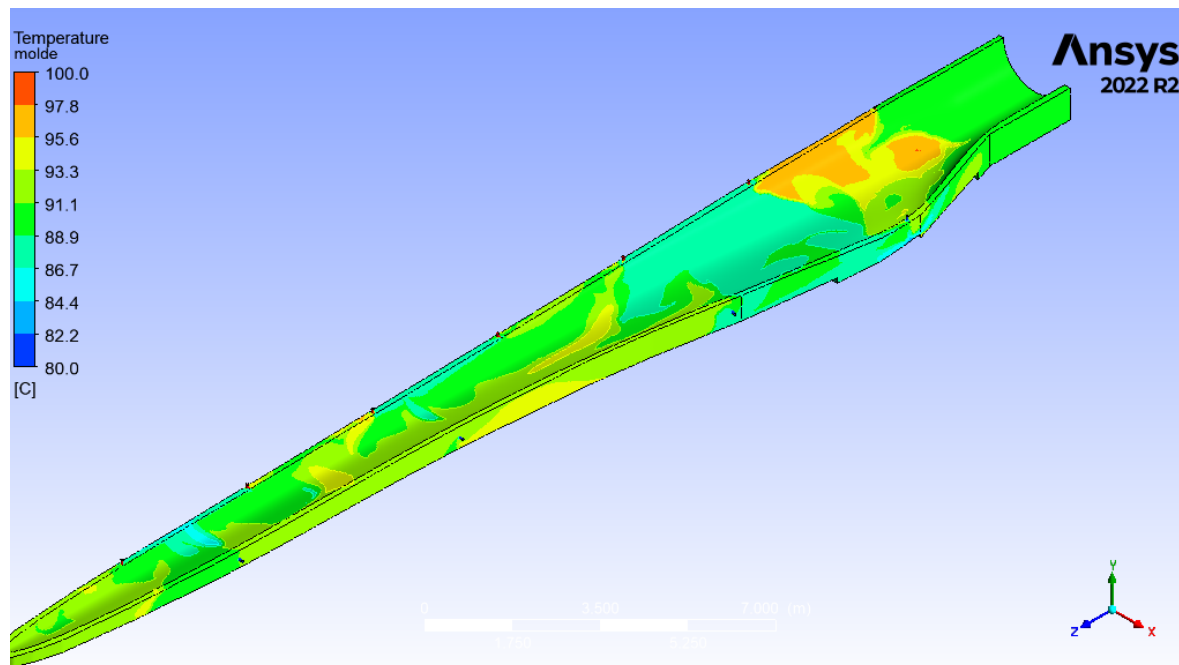


Figura 37. Temperaturas alcanzadas con la tercera configuración propuesta.

En la Figura 37 todas las temperaturas están por debajo de los 105°C que marca la gráfica mostrada en Figura 22 como máxima temperatura que debe alcanzar el curado de la resina, y la mayor parte de la superficie se encuentra entre los 80°C y 90°C , por lo que al usar esta configuración se tendrá un curado correcto de la resina, el gradiente de temperatura entre la que debe ser usada y la obtenida en la simulación, que son 10°C no se considera relevante para este caso.

4.2 Gradientes de velocidad del flujo de aire

Se observa en la Figura 38, para la línea azul que corresponde a la continuidad se encuentra cerca del valor $1e^{00}$, gracias a los valores computarizados obtenidos para los flujos finales se confirma que se está cumpliendo el principio de continuidad en la simulación ideal, que es la de la tercera configuración, el flujo de entrada y salida del molde coincide.

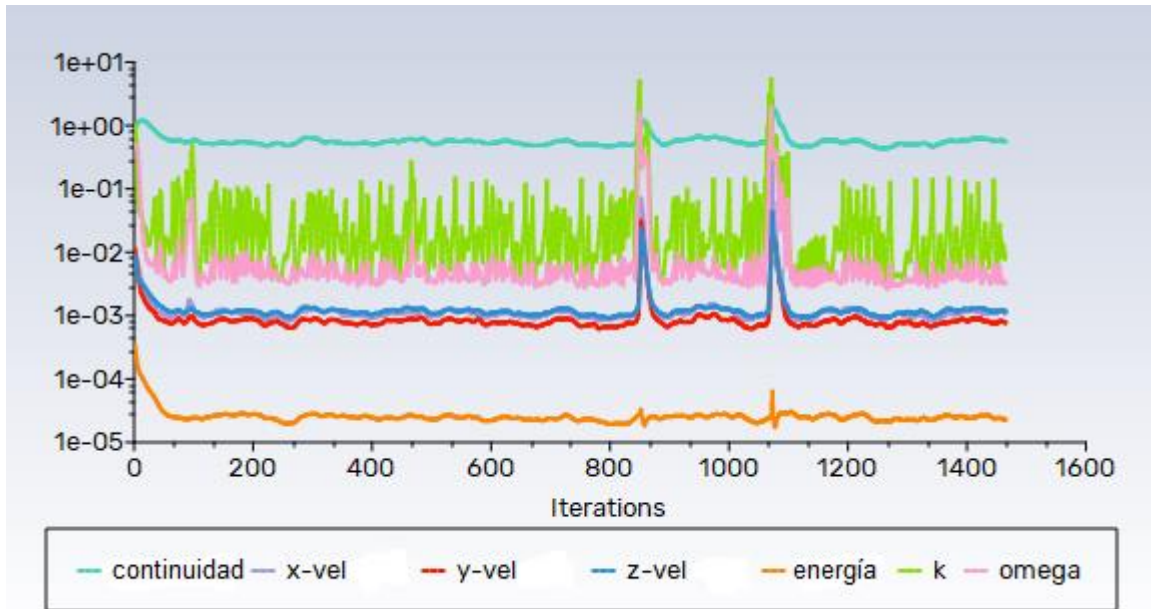


Figura 38. Gráfica de continuidad, velocidad en tres direcciones, energía y $k-\omega$.

Para la ecuación de la energía si existe un mayor acercamiento de manera gráfica al valor solicitado de $1e^{06}$, por lo que, al observar cómo baja el valor de la energía se cumple de manera correcta el valor obtenido para las ecuaciones, existiendo una convergencia con el valor solicitado al inicio de la simulación.

En la Figura 39 a que a pesar de que existe una fluctuación en el promedio de velocidad de masa dentro del volumen de control, el cual varía de 1.6 m/s y 2.06 m/s , tiene una diferencia de 0.46 m/s , el cual, no es un valor de gran magnitud y se ha mantenido en ese rango, se considera que la gráfica es estable. Al llegar a este punto consideramos el sistema en general estable, por lo que los valores de presión, temperatura y velocidad tendrán de manera final los valores presentados en esta sección.

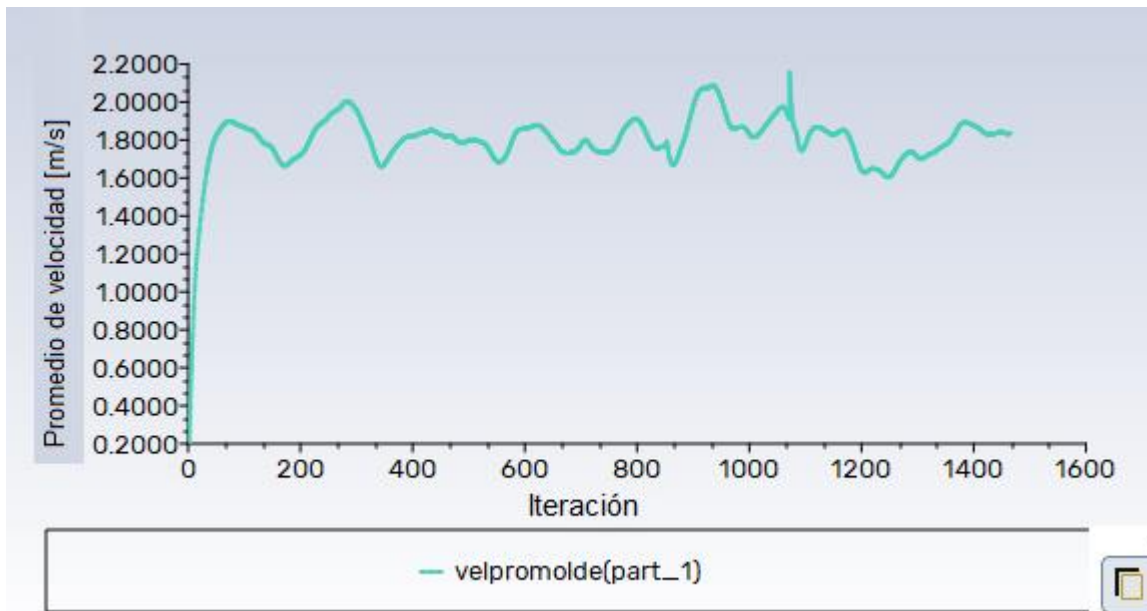


Figura 39. Velocidad promedio del molde.

Los contornos de velocidad que se presentan en la Figura 40 indican como se está distribuyendo el flujo de velocidad dentro del molde, como se observa existen partes en donde se forman vórtices de flujo, lo que podría afectar la distribución y estancarse generando focos de calor y esto generaría un mal curado de la resina. Sin embargo, el contorno de temperatura nos muestra que a pesar de que existen zonas en las que parece estar estancada, éstas no abarcan una gran parte del área de la superficie, y como se observa en las gráficas la temperatura tiende a bajar, pero lentamente por lo que no representa un riesgo para el curado del molde.

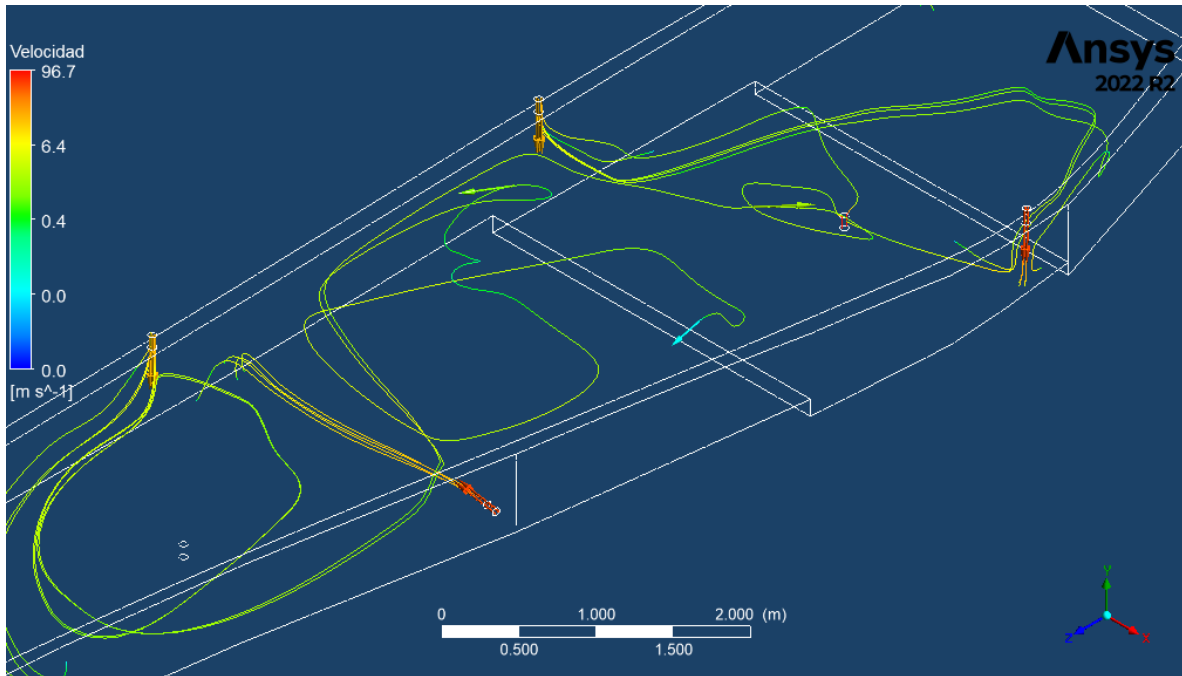
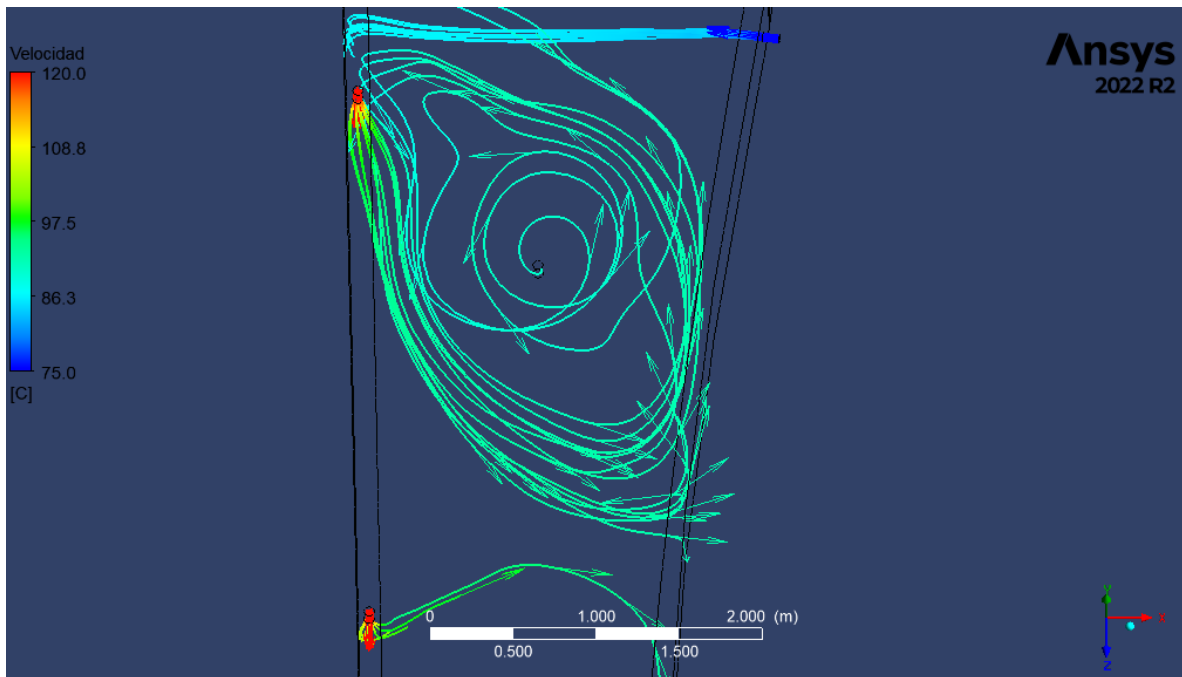


Figura 40. Flujos de velocidad dentro del molde(acercamiento).



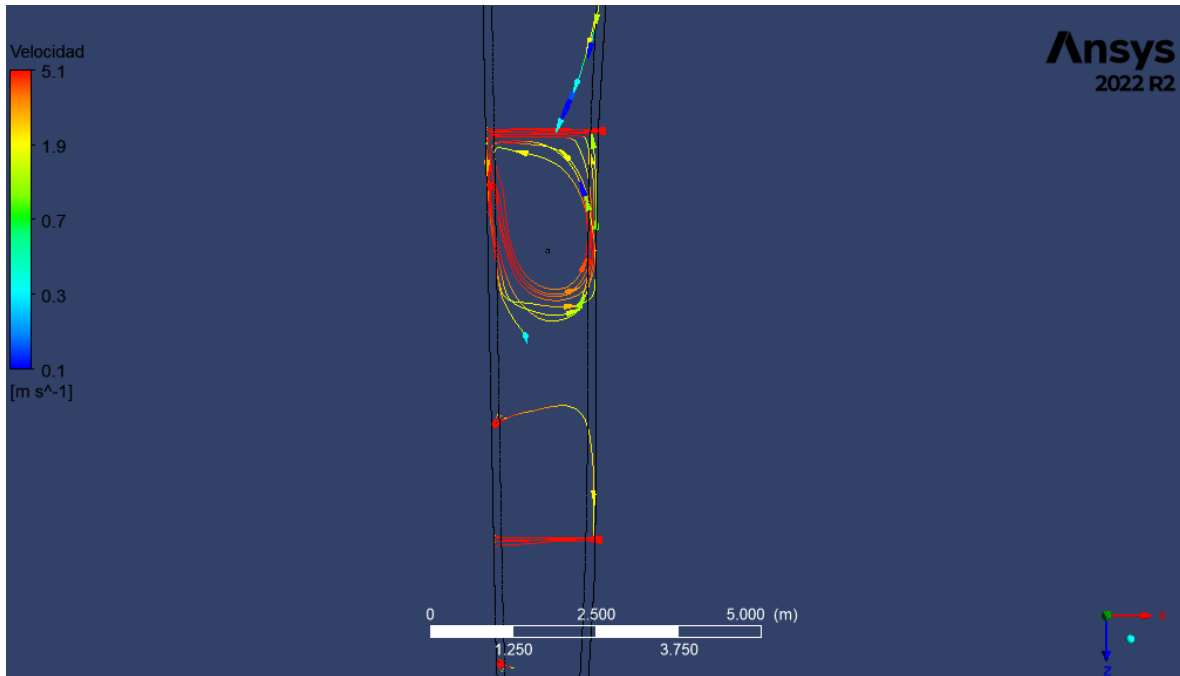


Figura 41. Campos de velocidad que muestran la turbulencia, imagen superior mayor área, inferior: parte más angosta del molde.

Dentro de la visualización de la velocidad, al colocar un símbolo en las líneas de flujo para ver la dirección que sigue, se tiene que los campos de turbulencia se comportan como se muestra en la Figura 41, para la última configuración el flujo choca con las paredes del molde, esto es debido a que el ancho del molde (2.98 m) tiene menor área para distribuirse que si se compara con el largo (30 m), por lo que al tener posicionadas así las herramientas de inyección de flujo, al momento en que se comienza a inyectar éste tiende a encontrar de manera rápida la pared del molde.

Sin embargo, como podemos observar en las figuras mencionadas la turbulencia y velocidad que se alcanzan no representan un problema para la correcta distribución del flujo y temperatura que se tiene que alcanzar para el curado de la resina, ya que como se observó en las gráficas de análisis de temperatura no existen estancamientos de calor o zonas muy grandes que afecten en la calidad del curado. Se observa que en las primeras iteraciones (Figura 42) de la simulación la temperatura cae, pero conforme se hacen más iteraciones parece similar a una

función exponencial, alrededor de 750 iteraciones se ha mantenido en un rango de 5°C , por lo que también se considera estable, incluso el hecho de que siga bajando indica que seguirá alrededor de los 80°C .

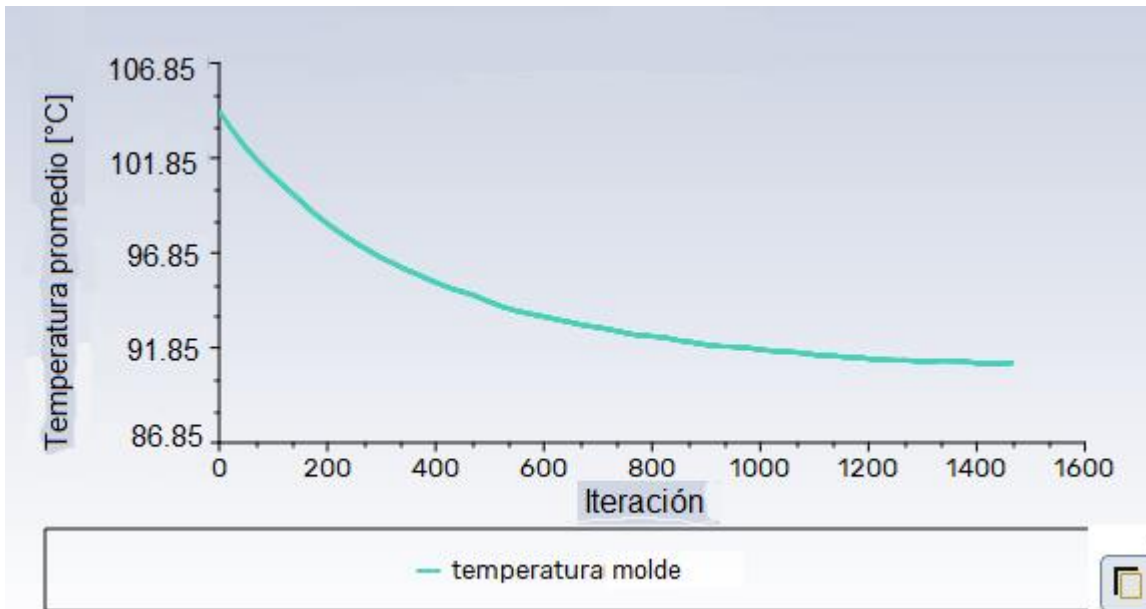


Figura 42. Temperatura total.

La temperatura del molde en general (Figura 43) es semejante a la que se busca en la superficie de interés, a diferencia de esta se observan más regiones coloreadas en verde, que indican una temperatura aproximada entre 90°C y 100°C , pero que no son reflejadas en la superficie, por lo que el hecho de que la temperatura que se está acumulando en estos puntos ayuda a mantener una temperatura constante en la superficie del molde, que es la que se debe mantener constante.

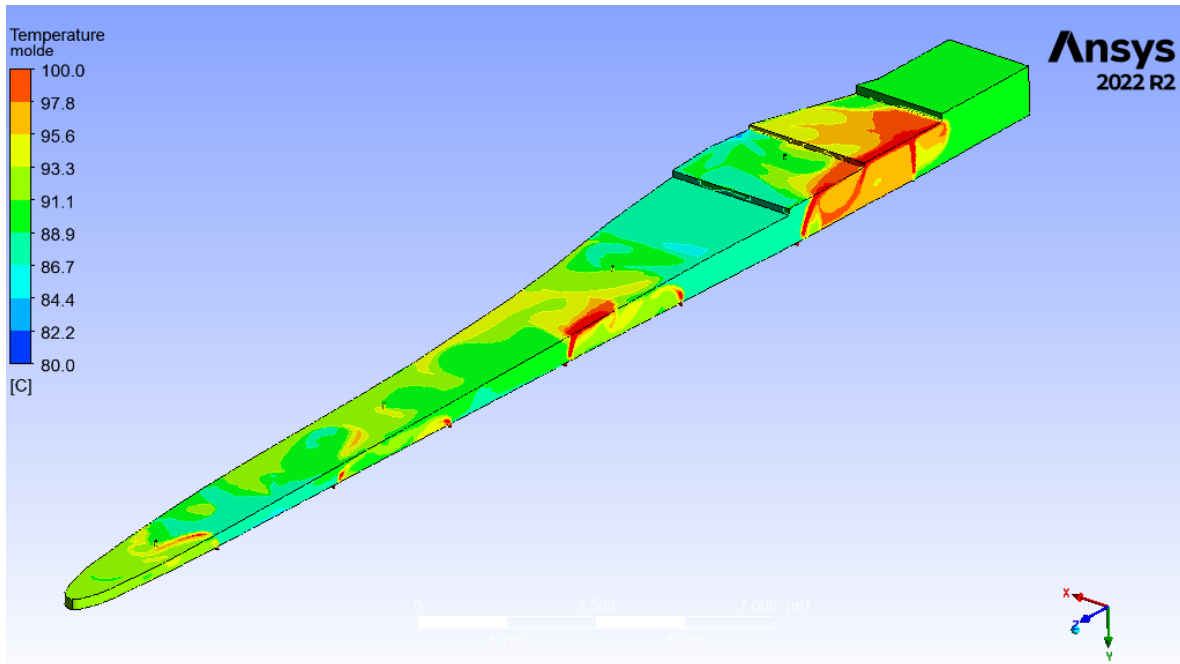


Figura 43. Temperatura del molde.

Para la temperatura que está existiendo en cada una de las salidas Figura 44, se visualiza que el comportamiento es similar al mostrado en la Figura 42, va disminuyendo, pero a partir de la iteración número 500 se encuentra en valores similares, la fluctuación que se puede observar es debido a que el flujo puede salir en cualquiera de las 4 salidas existentes, por lo que una ruta específica no es una constante, es decir el flujo no sigue una ruta definida, debido a la creación de vórtices, el choque con las paredes del molde, éste debe irse abriendo paso a su salida del volumen de control.

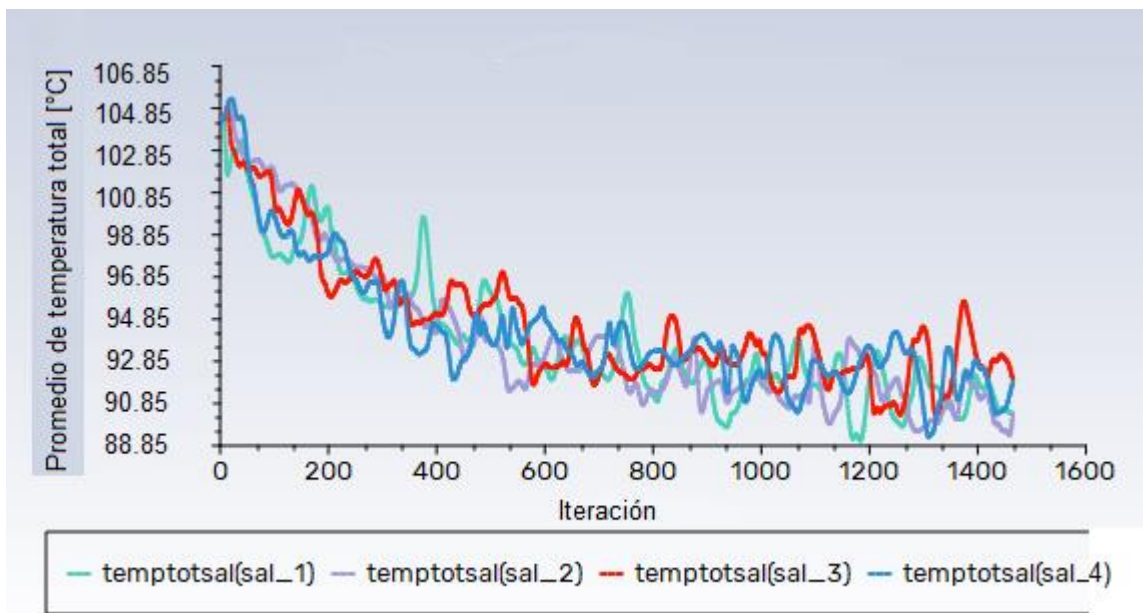


Figura 44. Temperatura total en las salidas.

El flujo total en las salidas nos indica la sumatoria de los caudales de flujo que están siendo inyectados por los calentadores y sopladores, como se indicó en la Tabla 7 se rectifica el balance que existe entre la cantidad de flujo másico que entra y sale del molde.

Para terminar, se colocaron los valores obtenidos de las temperaturas promedio de las tres configuraciones en una misma gráfica (Figura 45), a pesar de que en los casos de las primeras dos configuraciones se tiene que la temperatura tiende a subir, después de realizar varias iteraciones no se observó que la temperatura tuviera un cambio significativo al valor buscado, es decir, cercano a los 80°C.

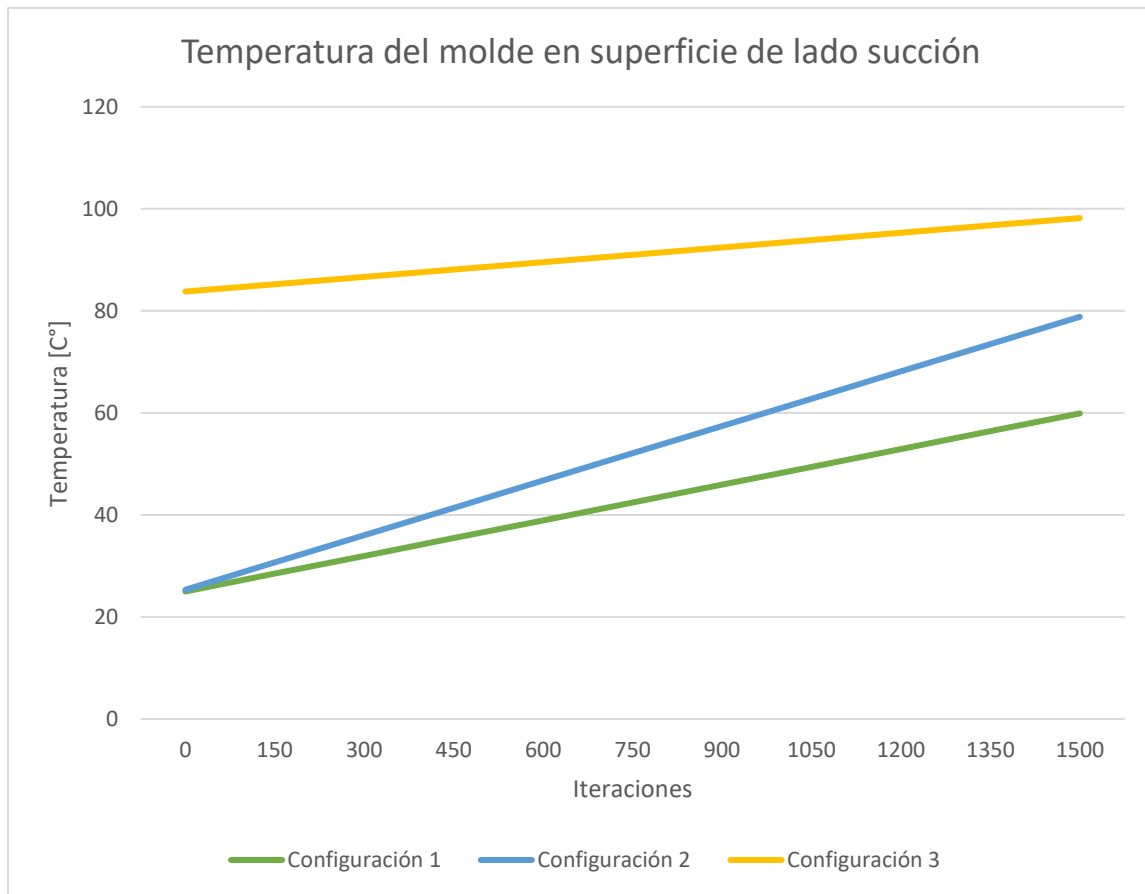


Figura 45. Comparación de los resultados de temperatura para los tres escenarios propuestos.

En cambio, para la tercera configuración se tuvo una temperatura alta desde un inicio sin presentar un gran cambio en el gradiente de temperatura que fuera preocupante para el curado de la resina, este se mantuvo en un rango no mayor a 15°C por encima del valor deseado (lo que da un total de 95°C) y como se observó en la gráfica de temperatura de la resina el valor máximo fue de 105°C , no representa un riesgo para un correcto curado. No existió un gradiente de temperatura por debajo del valor deseado de más de 3°C .

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Se hizo válida la metodología de análisis, la propuesta de distribución de los calentadores y sopladores, como pudimos observar en la Figura 37 en la extensión de la superficie de interés fue exitosa, se puede observar en los resultados del programa ANSYS los contornos de temperatura y velocidad, donde indica que la forma en que se dispone la temperatura a lo largo del molde se encuentra en intervalos cercanos a los 80 °C, el cuál es el mejor escenario obtenido.

La forma en que están distribuidas las herramientas de flujo, es decir, todos los calentadores en un borde del molde y los sopladores de otro, se pudo obtener gracias a que, en la segunda configuración, al mezclar la temperatura de un soplador con un calentador ésta bajaba de manera significativa, como se observó en las temperaturas alcanzadas en los resultados mostrados en la Figura 36, por lo que se decidió dejarlos separados.

Se analizaron los escenarios necesarios para llegar a la mejor configuración, que proporciona una temperatura dónde la mayor parte de la superficie del lado succión del molde se encuentra en el rango de 80 °C y temperaturas cercanas, lo que asegura un correcto curado de la resina.

Cada uno de los escenarios proporcionó información relevante para el caso siguiente, pudiendo así proponer mejores escenarios para llegar al ideal. El uso de ANSYS permitió visualizar el comportamiento del flujo de trabajo dentro del molde para así confirmar que las configuraciones propuestas estaban funcionando de la manera adecuada en la distribución de la temperatura requerida.

Como se observó en el apartado de resultados, las figuras muestran una temperatura homogénea cercana a la requerida de 80 °C, en la gráfica de curado de la resina, mostrada en la Figura 22 con la configuración de siete calentadores LHS-61 AirPack a una temperatura de 120 °C y cuatro sopladores SILENCE 6000 l/min a 60 Hz, colocados en el orden visto.

Al realizar las simulaciones de los dos primeros escenarios se pudo obtener una idea de cómo se estaba comportando el flujo de aire dentro del molde, por lo que se llegó a la propuesta del último escenario, que resultó ser favorable para alcanzar la temperatura que hace posible el correcto curado de la resina.

Al contar con un volumen de control tan grande, poder analizar el escenario de distribución de temperatura antes de invertir en el material para su construcción tuvo un ahorro de material y energía dentro del proyecto.

Los análisis mediante paquetes computacionales ahorran tiempo y dinero al reducir los ciclos de diseño, para el caso del análisis del encajonado del aspa se tiene que, al llevar a cabo las simulaciones mencionadas, se obtuvo un análisis previo y una idea general de cómo es que se tiene que llevar a cabo el acomodo de las herramientas para el correcto curado de la resina en el molde, así mismo el saber de cuanto será la inversión ya que se contempla usar siete calentadores y cuatro sopladores, obteniendo resultados similares a los obtenidos en las simulaciones observadas, pudiendo alcanzar la temperatura que brindó el mejor comportamiento.

Recomendaciones

Como se observó, existían algunas áreas en las que había un estancamiento de temperatura, por lo que añadir un ángulo de entrada a algunas de las herramientas para eliminarlos y así mejorar la circulación del flujo es recomendable.

De ser posible, utilizar el software ANSYS sin restricciones de licencia, se podría refinar la malla y al contar con un número de elementos mayor, las gráficas de resultados no tendrían tantas fluctuaciones como se observó en la Figura 39, se aprecia que esos picos que se encuentran en la gráfica son debido a la falta de una malla más fina, es decir con mayor número de elementos.

Referencias:

ANSYS Inc. (2005). ANSYS Workbench Products Release Notes, ANSYS Workbench Release 10.0.

ANSYS Inc. (2024) Guía del usuario para el mallado (Meshing User's Guide), Ansys Product Help.

Borja, M. (2009). *Consideraciones básicas en la selección de aerogeneradores para el Corredor Eólico del Istmo de Tehuantepec*, Instituto de Investigaciones eléctricas.

Callister W., Rethwisch D. (2018). Ciencia e ingeniería de Materiales. Segunda edición (novena edición original), Editorial Reverté.

Calvo, E. (s.f.). *Tipos de Aerogeneradores*, Opex energy: Eólica, disponible en: http://opex-energy.com/eolica/tipos_aerogeneradores.html#2._SEGUN_POTENCIA_SUMINISTRADA

Cairns, D. y Skramstand, J. (2000) Resin Transfer Molding and Wind Turbine Blade Construction, SAND99-3047. Sandia National Laboratory, Albuquerque, NM.

Camacho, A. y Darney E. (2016). "Modelado y análisis térmico de la plataforma suborbital Pixqui II". (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/419871>

Campos, A., Mazur, Z. y Gallegos A. (2007). Análisis de transferencia de calor conjugada, en estado transitorio, de la primera etapa de una turbina de gas. X congreso y exposición Latinoamericana de Turbomaquinaria. Veracruz, México.

- Cengel Y., Boles M. (2012). *Termodinámica*. México, Séptima edición. México, Mc Graw Hill.
- Cengel, Y. (2007). *Transferencia de Calor y Masa, un enfoque práctico*. México, Mc Graw Hill.
- CIATEQ A.C., Centro de Tecnología Avanzada, CEMIE-Eólico: Centro Mexicano de Innovación de Energía Eólica, Querétaro.
- Díaz J., González A., Hernández I., Escamilla A., (2017). *Desarrollo de un laboratorio para manufactura de aspas de turbinas eólicas*. Memorias del XXIII congreso internacional anual de la SOMIM 20 al 22 de septiembre de 2017 Cuernavaca, Morelos, México.
- GWEC. (2019). *Global wind report. Annual market update 2018, Global wind energy council*, Bruselas, p.11 (consultado el 12 de marzo de 2020), disponible en: <https://gwec.net/global-wind-report-2018/>
- Hemami, A. (2012). *Wind turbine technology, New York United States of America, CENANGE Learning*.
- Hurtado, R. (2018) “Metodología de selección de materiales para los álabes de un aerogenerador de eje horizontal.” (Trabajo de diploma), Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba.
- International Energy Agency (IEA). (2015) *World Energy Outlook, 2019*. Recuperado de: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
- Juárez, S. y León, G. (2014). *Energía eólica en el Istmo de Tehuantepec: desarrollo, actores y oposición social*. Revista Problemas del Desarrollo, No.178 Vol. 45.
- Letcher, T. M. (2017). *Why Wind Energy? Wind Energy Engineering*, 3–14.

- Lyndi Energy (2022) Wind turbine Nacelle, LINDY ENERGY, recuperado de:
<https://lindyenergy.com/wind-turbine-nacelle/>
- M. Damiano, A. Russo, y A. Sellitto et al. (2020). *Design of a composite wind turbine blade manufactured with the ONE-SHOT BLADE technology*, *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.366>.
- Manwell, J., McGowan, J. y Rogers A. (2009). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. Chichester, United Kingdom, Wiley.
- Martín Saravia, C., Saravia, L. J., Iparraguirre, J. & Cortínez, V. H., (2014). *Determinación de propiedades seccionales de alabes de generadores eólicos de material compuesto*. *Mecánica Computacional* Vol. 33, pp. 1117-1127
- Mathew, S. (2006). *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*, Springer.
- Murillo, L. (2022). Análisis de transferencia de calor entre una motocicleta en modo ralentí y el piloto por convección forzada mediante CFD. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Promoción y Desarrollo de Tecnologías Eólicas en México. (2020). Instituto de Investigaciones Eléctricas [página de inicio]. Recuperado de <https://www2.ineel.mx/detelm/>
- REN21. (2019). *Renewables 2019 Global Status Report* (Reporte de estado global, Renovables 2019), ren21 Secretariat, París, p. 183.

- Saravia, M., Saravia, C., Iparraguirre, L. y Cortínez, V. H. (2014). Determinación de propiedades seccionales de alabes de generadores eólicos de material compuesto. *Mecánica Computacional*, 33, 1117-1127.
- Silva, J. (2016). *Estudio del efecto del curado en las propiedades mecánicas de un material compuesto fibroso*. Depto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla.
- Tang, W. Z., Yang, L., Zhu, W., Zhou, Y. C., Guo, J. W., y Lu, C. (2016). *Numerical Simulation of Temperature Distribution and Thermal-Stress Field in a Turbine Blade with Multilayer-Structure TBCs by a Fluid–Solid Coupling Method*. *Journal of Materials Science & Technology*, 32(5), 452–458.
- Teixeira, T. A., y Souza, J. A. (2019). *Computational modeling of resin infusion process applied to small vessel hulls*. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41, 10.
- Tong, W. (2010). *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*, Gran Bretaña, Wit Press.
- TPI Composites. (2017). *Wind Turbine and Wind Blade Fundamentals*, fecha de consulta: marzo 23, 2020, recuperado de: <https://www.tpicomposites.com/English/industries/wind-energy/wind-turbine-and-wind-blade-fundamentals/default.aspx>
- Zamudio, H. (2020). *Diseño del Sistema de infusión de resina para la fabricación de aspas utilizadas en un aerogenerador de 30 kw*, fecha de consulta: marzo 22,

2023,

recuperado

de:

<http://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1020/391>

Zamora, M. (2016). *Simulación numérica de la inyección de gas en columnas de flujo oscilatorio*. Universidad Politécnica de Cartagena.

Zhao, D., Han, N., Goh, E., Cater, J., y Reinecke, A. (2019). *General introduction to wind turbines*. *Wind Turbines and Aerodynamics Energy Harvesters*, 1–20.

ANEXO

Las características de los sopladores y calentadores que se utilizan para proporcionar el flujo de calor se presentan a continuación:

Tabla 8. Características del calentador, LEISTER.

Calentador de aire		
Caudal de aire	l/min	m ³ /s
	3080	0.051
Temperatura	°C	K
	120	393.15
Salida	∅	62 mm



De las características de interés para la investigación: caudales de aire, temperaturas a las que puede inyectarse, abertura del área de soplado.

La temperatura máxima de salida del aire llega a 650°C, la temperatura máxima de entrada del aire es de 65°C, la máxima presión del fluido es de 100kPa, la salida de aire es de 62mm.

Tabla 9. Características principales del soplador, LEISTER.

Soplante de presión media		
Caudal de aire (20°C)	l/min	m ³ /s
	6000	0.1
Temperatura	°C	K
Máxima ambiente	75	348.15
Entrada de aire	200	473.15

Salida	Ø	60 mm
		

La marca LEISTER menciona que en los procesos industriales un soplante suele alimentar simultáneamente a varios calentadores de aire, su rango de uso está entre temperaturas de entrada de aire de 100°C a 200°C .

Uno de los parámetros de mayor importancia es el flujo de aire que se está inyectando, el cual es de 6000 l/min la salida de aire es de 60mm .