

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

**MODELADO MATEMÁTICO DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO POR
MEDIO DE LÁMPARAS INFRARROJAS.**

Memoria de Residencia

Ingeniería en Electrónica

PRESENTA

Carolina Caballero Aguilar

ASESOR INTERNO

Ing. Odilio Orozco Magdaleno

ASESORES EXTERNOS

Dr. Eloy Edmundo Rodríguez Vázquez

Ing. Lucía Limones Pérez

Índice

CAPÍTULO I. GENERALIDADES.....	3
1.1 Introducción	3
1.2 Antecedentes de la empresa	3
1.3 Antecedentes del proyecto.....	4
1.2.1 Industrias con el sistema AFP	6
1.2.2 Modelos Matemáticos del sistema de calentamiento.	11
1.5 Planteamiento del problema	15
1.6 Nombre del proyecto	17
1.7 Objetivos generales y específicos.....	17
1.8 Justificación	17
1.9 Alcances y Restricciones.....	18
1.10 Metodología para el desarrollo del proyecto	19
CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	20
2.1 Fibra de carbono.....	21
2.2 Resina Epoxi.....	24
2.3 Automated Fiber Placement (AFP)	26
2.4 Ecuaciones de calor de Fourier.....	27
2.5 Ecuación de enfriamiento de Newton.....	29
2.6 Sistema de calentamiento por medio de lámparas IR	29
2.7 Matlab	30
CAPÍTULO III. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO	31
3.1 Modelo Matemático Etapa 1	32
3.2 Modelo Matemático Etapa 2	36
3.3 Programa en MATLAB.....	41
3.4 Análisis de los resultados de la simulación	43
CONCLUSIONES.....	50
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1.1 Introducción

En ésta memoria de residencia se presenta el diseño de un sistema de calentamiento utilizando lámparas infrarrojas, así como el modelado matemático de dicho sistema. Con ayuda del software Matlab se pretende mostrar la forma gráfica del sistema de calentamiento en función de tiempo. Haciendo énfasis de diferentes métodos que utilizaremos para poder visualizar las zonas de calor con mayor influencia en el aspa eólica de fibra de carbono.

1.2 Antecedentes de la empresa



Fig. 1.1 Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, CIDESI.

El Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (Fig. 1.1), CIDESI, se fundó el 9 de marzo de 1984. Pertenece al Sistema de Centros del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT. (CIDESI, 2013)

CIDESI contribuye al desarrollo del sector productivo del país, a través de proyectos de Investigación e Innovación, así como servicios tecnológicos especializados de alto nivel, en sus sedes ubicadas en los Estados de Querétaro, Nuevo León, dentro del Parque de Investigación e Innovación Tecnológica, en el Estado de México y en Tijuana dentro del Consorcio Tecnológico de Baja California.

CIDESI está certificado bajo la norma ISO-9001:2008 y bajo estándares específicos de importantes empresas, es el primer Centro CONACYT que se certifica bajo la norma aeroespacial AS-9100 B.

Ha sido distinguido con el Premio Nacional de Tecnología y con el Premio Estatal de Exportación del Estado de Querétaro. Proveedor de la industria automotriz, autopartes, aeroespacial, energía, petroquímica, electrónica, electrodomésticos y alimenticia, entre otros sectores. CIDESI es Miembro de Alianza de National Instruments, Casa de Diseño de Texas Instruments y Freescale.

Misión

"Crear soluciones de alto valor para nuestros clientes basadas en investigación aplicada y desarrollo experimental". (CIDESI, 2013)

Visión

"Ser una institución de clase mundial, autosuficiente, con reconocimiento nacional e internacional por sus productos y servicios de alto impacto". (CIDESI, 2013)

1.3 Antecedentes del proyecto

Durante mucho tiempo en la industria eólica, la elaboración de las aspas para los aerogeneradores ha sido de manera manual, es decir que el fabricante utiliza métodos no automatizados, por lo tanto limita la productividad y calidad del producto entregado debido comúnmente al error humano.

Actualmente las tecnologías Colocación de Cinta Automatizada y Colocación de fibra Automatizada (ATL y AFP por sus siglas en inglés) no han sido desarrolladas de manera productiva y son pocas las industrias que tienen consigo un prototipo de esta naturaleza.

La tecnología AFP es un proceso que se enfoca en un sistema de encintado en plano por medio de una máquina automática, dicha máquina está compuesta de

los siguientes sistemas que pueden considerarse como los principales para su funcionamiento, tales como:

- Cabezal.
- Brazo robótico.
- Molde.
- Comunicación serial.
- Control.
- Estructura.
- Computadora.
- Monitoreo.
- Entre otros.

El presente trabajo se enfocará principalmente en el desarrollo del cabezal, ya que en ella se encuentran diversos sistemas como son: de corte, avance de la fibra preimpregnada y el sistema de calentamiento para el curado de la misma.

Se consideran algunos tipos de cabezales con diferentes tipos de fuente de calor (Láser, lámparas IR, rodillos calientes, aire caliente) todos con el mismo propósito de que el calor sea controlable y a la vez, que puedan llegar a la temperatura adecuada. Para esto, se recurre primordialmente el modelado matemático del sistema de calentamiento. En la bibliografía recaudada estos sistemas se representan en dos dimensiones (i, j) , por ende permite el desarrollo de un nuevo modelo con el que tenemos la opción de poder graficar en tres dimensiones (i, j, k) y con ello, poder llevar a cabo su respectivo análisis.

A continuación se ejemplifican distintas fuentes de calor de cabezales de algunas industrias que cuentan con la tecnología AFP, haciendo énfasis en que el principal propósito de este trabajo es representar el modelo matemático del sistema de calentamiento que permita realizar el análisis de las variaciones de temperatura en

función del tiempo de una placa de fibra de carbono al ser expuesta a una fuente de calor.

1.2.1 Industrias con el sistema AFP

- a) AUTOMATED DYNAMICS AUTOMATED DYNAMICS, es una empresa que se dedica a la manufactura de piezas industriales, por lo que buscan siempre la calidad en sus productos, repetitividad y ahorro de tiempos, esto lo logran a través de la implementación de una fuente de calor por medio de luz láser, sin embargo, han encontrado inconvenientes al utilizarlo, ya que debido a que la luz láser se caracteriza por ser puntual, fue necesario el desarrollo de sistemas ópticos que permitieran ampliar el rango de luminosidad, de tal forma que la luz emitida por el láser logrará abarcar el ancho de la fibra de carbono pre-impregnada que AUTOMATED DYNAMICS utiliza para la manufactura de piezas. La figura 1.2 muestra el cabezal utilizado por la empresa AUTOMATED DYNAMICS. (Automated Dynamics, 2016)



Fig. 1.2 Cabezal con Láser de la empresa Automated Dynamics.

b) CORIOLIS COMPOSITES

Con la ayuda del Robot Quantec Kuka, CORIOLIS COMPOSITES dispone de un cabezal que puede manipular dos tipos de fuentes de calor; luz láser y lámparas infrarrojas. Como se puede observar en las figuras siguientes ambos tipos de fuentes de calor, tienen características diferentes las cuales se mencionaran a continuación.

➤ Laser heating device

Este sistema utiliza diodos láser de alta potencia para alcanzar velocidades máximas, garantizando al mismo tiempo una buena cohesión entre las capas.

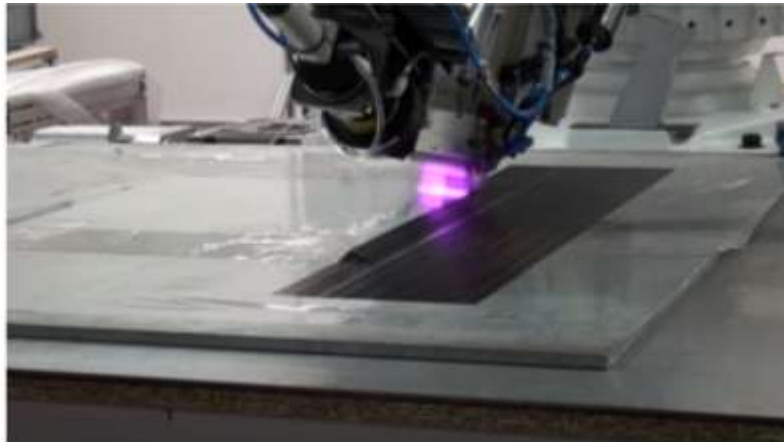


Fig. 1.3 Cabezal con Láser de la empresa Coriolis Composites

A continuación se expone de manera puntual las principales características del láser Heating Device

- Control de potencia,
- Potencia de 3kW a 12kW.
- Líquido refrigerante y Pilas como alimentación para los Diodos Láser.

- Adaptación para cambiar de material, puede ser Termoplásticos, fibra de carbono Pre-impregnada.
- Rápida comunicación con el prototipo para hacer el cambio de material.

➤ Infra red heating device

Este tipo de cabezal involucra en su sistema de calentamiento lámparas infrarrojas, en la figura 1.4 se puede observar el foco de luminosidad de la lámpara con respecto a la placa de fibra de carbono, es importante hacer énfasis ya que dependiendo de la distancia de esta y la velocidad del cabezal, puede afectar en el curado de la fibra pre-impregnada, haciendo que su consistencia no sea adecuada para los estándares de calidad que la pieza a manufacturar requiera. Por ejemplo: Mala adherencia de la resina, manchas, estrías, afloramiento de las fibras, etc. (Bendezú Reyes, 2007)



Fig. 1.4 Infra-Red Heating Device, Coriolis Composites.

Se muestran las principales características del cabezal Infra Red Heating Device (CORIOLIS, 2016)

- Regulación de la potencia de calentamiento manualmente.
- Doble Filamento de la lámpara IR
- Pirómetro para el censado de temperatura.
- Temperatura de 30°C a 60°
- Diseño Robusto.

c) MTORRES

La máquina TORRESFIBERLAYUP ha sido específicamente diseñada para la fabricación de componentes aeronáuticos de fibra de carbono de gran curvatura o planas, a alta velocidad y gran productividad. Este tipo de cabezal utiliza lámparas IR en el sistema de calentamiento, además de trabajar con cintas de fibra de carbono no Pre-impregnada. (MTorres, 2016)

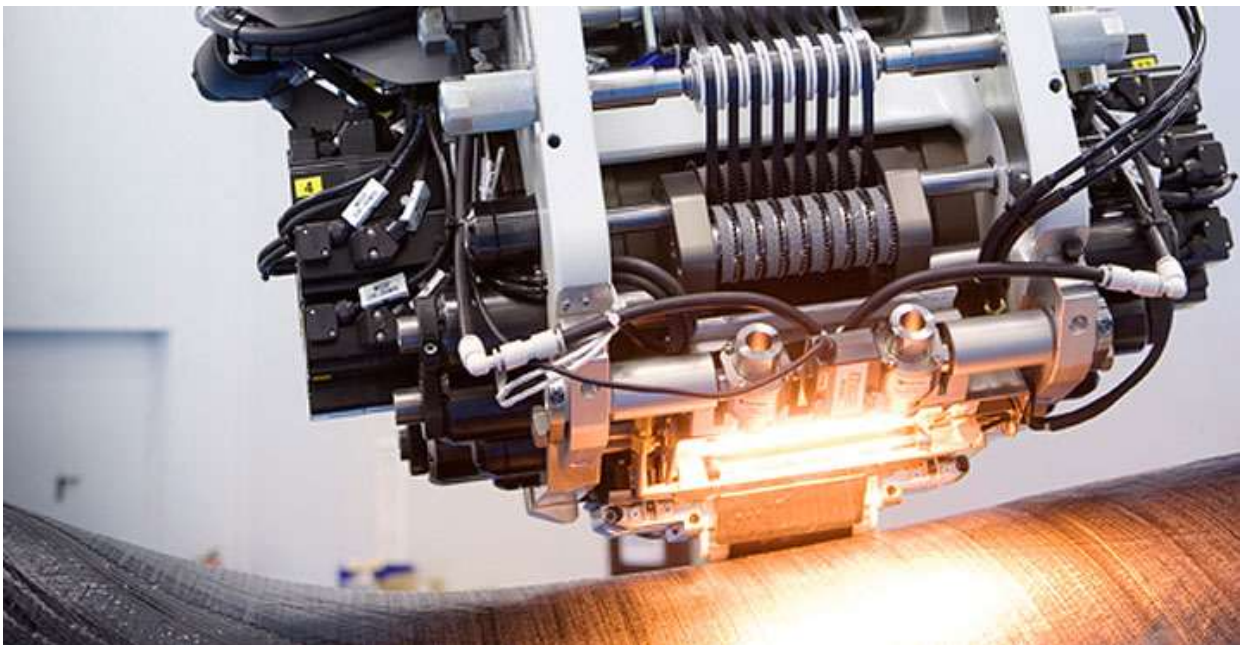


Fig. 1.5 Máquina TORRESFIBERLAYUP.

Características de la máquina TORRESFIBERLAYUP

- Sistema de rototraslación.
- Sistema de corte por ultrasonido integrado en el cabezal.
- Cabezal multicinta.
- Marcador de contorno con láser

d) MIKROSAM

En la empresa MIKROSAM se trabaja con dos de las técnicas más conocidas en la manufactura de materiales compuestos, AFP/ATL (Automated Fiber Placement y Automated Tape Laying), el cabezal puede adaptarse a fibras orgánicas e inorgánicas, todo esto depende del requerimiento del cliente, superficie o molde y presupuesto (MIKROSAM, 2016).

Por otro lado el cabezal cuenta con un sistema de calentamiento por conducción a través de rodillos calientes que van ejerciendo fricción de tal forma que la fibra de carbono se adhiere al molde.

Con base en la necesidad de la pieza a manufacturar se pueden emplear diferentes tipos de herramientas, brazos articulados, columnas de diferentes tamaños, tal como se muestra en la figura 1.6.



Fig. 1.6 Máquina Automated Fiber Placement (AFP)

Características:

- Mikrosam combina su experiencia interdisciplinaria en materiales compuestos haciendo que el cabezal pueda acondicionarse para trabajar con fibras orgánicas e inorgánicas, polímeros, etcétera.
- Diversas herramientas para distintos materiales (Pre-impregnado unidireccional, material Pre-impregnado de tela, material de la película, la cinta seca) (MIKROSAM, 2016)

1.2.2 Modelos Matemáticos del sistema de calentamiento.

Se propone diseñar un modelo matemático para visualizar la influencia del calor de la lámpara IR o cualquier otro tipo de fuente de calor con respecto a la placa de fibra de carbono, para realizar el modelo matemático del sistema, se encontró que existen modelos de calentamiento con distintos tipos fuentes de calor. A continuación explicaremos cada uno de ellos.

a) Modelo térmico láser con transformaciones intermedias en calentamiento.

El siguiente Artículo muestra un modelo térmico aplicado a procesos de tratamiento superficial empleando un láser como fuente de energía. (E. Ukar, 2010)

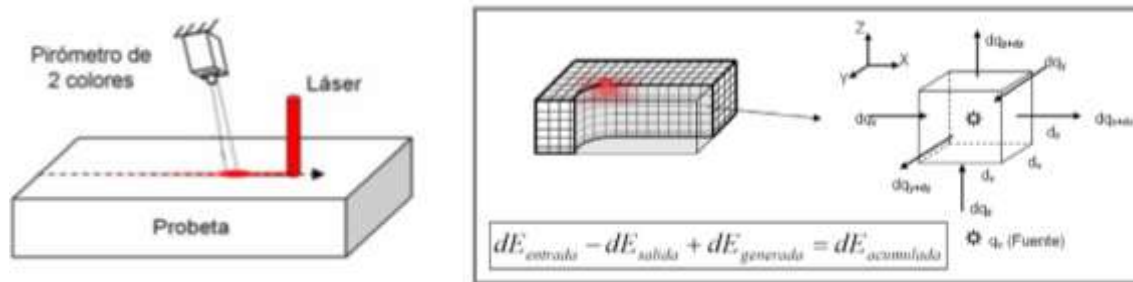


Fig. 1.7 Desarrollo del modelado matemático.

En la figura 1.7 se muestra la transmisión de calor por medio de Láser, se considera que el calor por convección puede ser despreciable, ya que una de las principales características de este es el elevado gradiente térmico que se alcanza en la zona de incidencia de este, esto hace que únicamente se esté considerando la radiación en un punto específico y por medio de un pirómetro se monitorea la temperatura en un instante de tiempo, ya que el tiempo de enfriamiento de la zona de trabajo es muy rápida.

Para poder determinar la zona de calentamiento se recurre al uso del software Matlab, donde por medio de programación es posible simular el algoritmo encontrado en este artículo, la figura 1.8 se puede observar que el láser por ser puntual afecta en una determinada zona de la probeta a calentar.

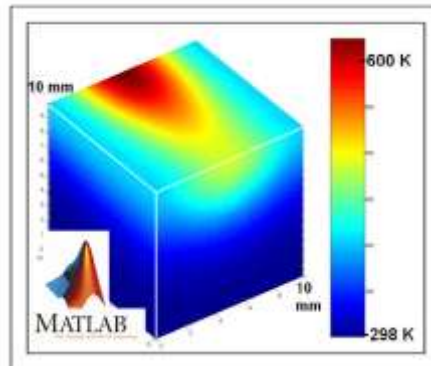


Fig. 1.8 Simulación del modelado en MATLAB

- b) Sistema de control térmico diseñado para el proceso AFP (Thermal Control System Design for automated fiber placement process)

En el presente trabajo se hace mención acerca del uso del proceso de manufactura AFP tal como lo muestra la figura 1.9 que describe el proceso en general tanto como el control del cabezal, el brazo robótico y simulaciones de diferentes tipos de controladores, sin embargo nos enfocaremos en la parte del control de temperatura que utilizan y de la simulación del modelado para su análisis, esto con el fin de converger diferentes modelos y poder realizar el más conveniente con base en la necesidad del proyecto. (Khan, Thermal Control System Design For Automated Fiber Placement Process, 2011)

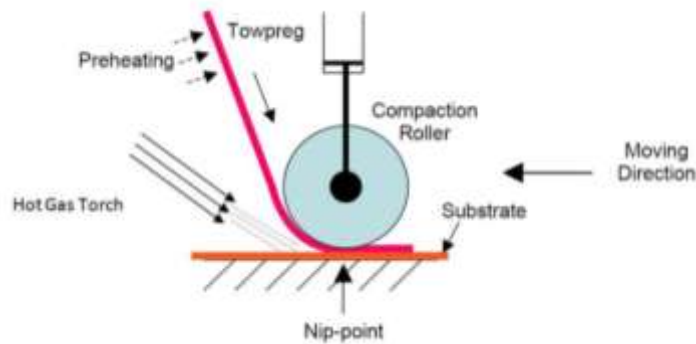


Fig. 1.9 Proceso AFP.

Como podemos observar en la figura 1.10, el plano de la derecha muestra la parte central del análisis del modelo matemático (T_h, T_n, T_1, T_2) ya que estas secciones son las más afectadas directamente por la radiación del aire caliente a la placa de fibra de carbono provocando así el curado de este.

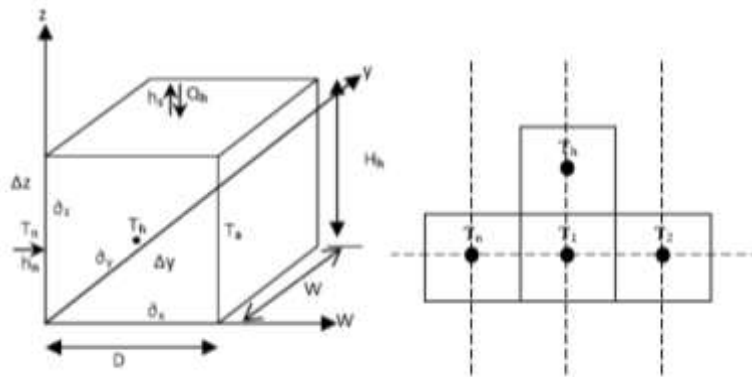


Fig. 1.10 Modelo a desarrollar.

La figura 1.11 muestra gráficamente las variaciones de la temperatura con respecto al tiempo, la parte T_h es la más afectada ya que está expuesta directamente al aire caliente mientras que las demás secciones alcanzan la temperatura por medio de conducción del aire caliente en un determinado tiempo.

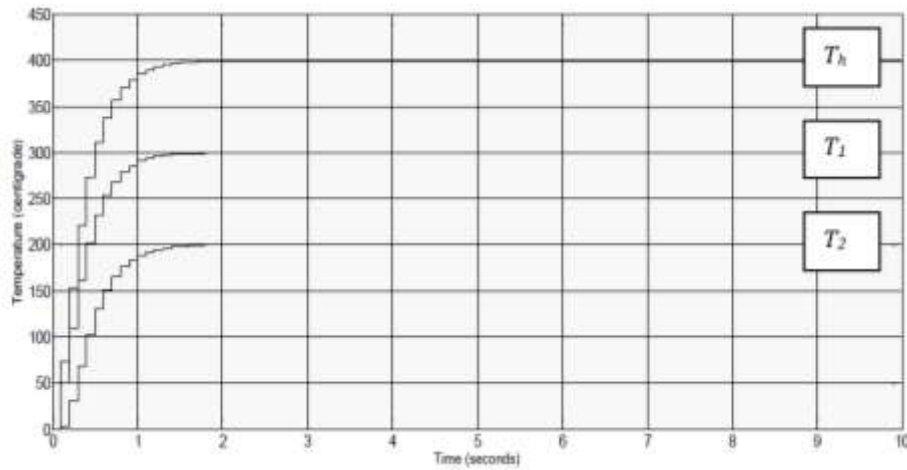


Fig. 1.11 Gráfica de temperatura del modelo.

1.5 Planteamiento del problema

Actualmente en la industria, los materiales compuestos como lo son fibra de carbono o fibra de vidrio, están revolucionando el concepto de seguir utilizando metales ferrosos y no ferrosos, ya que por su liviandad, resistencia y que no es corrosible ante cambios ambientales, debido a esto la industria automotriz, la tecnología aeroespacial, la industria eólica, entre otras áreas de manufactura, están optando por la utilización de este tipo de material compuesto para su conveniencia.

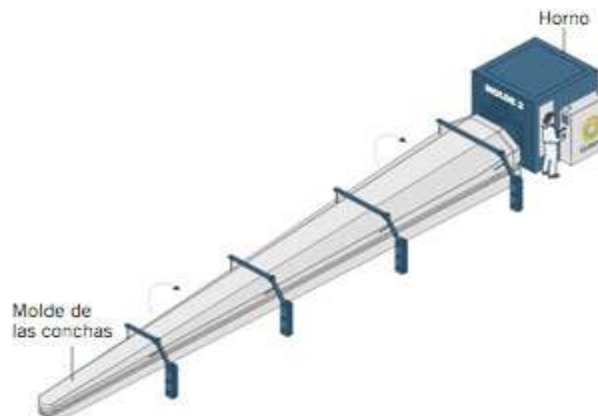


Fig. 1.12 Fabricación de una viga con fibra de carbono.

Durante mucho tiempo en la industria eólica, la elaboración de las aspas para los aerogeneradores ha sido de manera manual, es decir que el fabricante utiliza métodos no automatizados, por lo tanto limita la productividad y calidad del producto entregado debido comúnmente al error humano, tal es el caso de industrias de fabricación de aspas eólicas que utilizan fibra de vidrio y carbono. Gamesa es una empresa mundialmente reconocida en cuestiones de manufactura de álabes con fibra de carbono, el proceso que ellos utilizan son AFP, por lo que explican que el proceso de curado de la fibra de carbono Pre-impregnada, lleva ciertos pasos que es necesario considerar, uno de ellos es la temperatura ya que por lo regular para que la fibra actúe ante el molde, es necesario calentarla hasta que esta logre adherirse a la pieza a realizar. Cabe mencionar que la fibra de carbono Pre-impregnada necesita aproximadamente una temperatura de un rango de 18-32°C. (Gamesa, 2010)

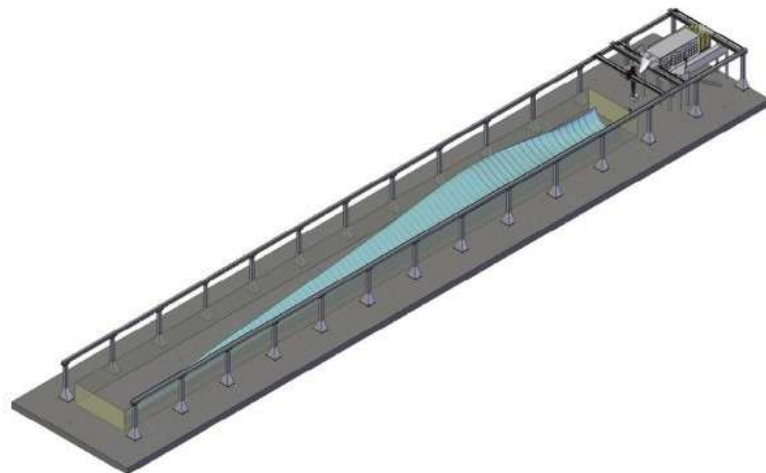


Fig. 1.13 Área de desempeño de CORIOLIS COMPOSITES

1.6 Nombre del proyecto

MODELADO MATEMÁTICO DE UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO POR MEDIO DE LÁMPARAS INFRARROJAS

1.7 Objetivos generales y específicos

Objetivo General

Desarrollar un modelado matemático haciendo uso del software Matlab para simular un sistema de calentamiento por medio de lámparas infrarrojas.

Objetivos Específicos

- Investigación de calentamiento por medio de lámparas infrarrojas, así como la tecnología AFP.
- Construir e implementar el sistema de calentamiento por medio de lámparas IR.
- Diseño de modelado matemático y programación en Matlab.
- Pruebas y mejoras del modelo.

1.8 Justificación

CIDESI junto con el apoyo de Centro Mexicano de Innovación en Energía Eólica (CEMIE), trabajan en conjunto para diseñar un prototipo el cual servirá para el acomodo de capas de fibra de carbono Pre-impregnada en el proceso de reparación de aspas eólicas.

El desarrollo del proyecto se considera el sistema de calentamiento de un cabezal que involucre un sistema de rodillos para el avance y aplicación de la fibra de carbono. Con el propósito de poder curar la fibra de carbono al momento de su aplicación se requiere de la implementación de lámparas infrarrojas, con ello el diseño de un sistema de calentamiento.

Es importante mencionar que en este reporte se hará énfasis en el modelo matemático del sistema de calentamiento con ayuda del software Matlab, ya que

como primera etapa del sistema de calentamiento se requiere hacer simulaciones de este.

Con esto se pretende mejorar los procesos de manufactura de aspas eólicas para los generadores de energía, esto con el afán de hacerlos de mejor calidad, facilidad de operación y reducir el tiempo de producción. Cabe mencionar que esta tecnología puede ir evolucionando dependiendo las necesidades de los procesos y en un futuro poder mejorar el prototipo.

1.9 Alcances y Restricciones

Considerando que este proyecto es muy complejo y que involucra diversas etapas, se propone hacer investigaciones acerca del sistema de calentamiento y con la ayuda del modelo matemático nos permitirá conocer qué tipo lámpara será la adecuada para llegar a la temperatura que requiera el curado de la fibra de carbono.

Es importante mencionar que existen diversos tipos de inconvenientes, uno de ellos es la temperatura, en el curado de la fibra de carbono pre-impregnada es de fácil alcance, sin embargo; como bien se sabe las lámparas infrarrojas pueden llegar a temperaturas de hasta 300°C, por esta razón se propone un control de potencia para que éste regule el calor proporcionado por la lámpara IR, con ayuda del modelado matemático se podrá observar con claridad el comportamiento de la fibra de carbono ante variaciones de calor y la velocidad del cabezal para ver la adherencia de los materiales (resina epoxi y fibra de carbono pre-impregnada) mediante simulaciones.

Cabe hacer mención que el proyecto seguirá en desarrollo, por lo que se buscará optimizar rendimiento y comunicación con el usuario. Para eso se propone desarrollar un software para mejorar el sistema de control. Esto con el propósito de presentar un beneficio a aquellas industrias que hasta la fecha siguen implementando el uso del método.

1.10 Metodología para el desarrollo del proyecto

I. Investigación de calentamiento por lámparas infrarrojas.

Realizar investigación para tener antecedentes del proyecto, así como buscar patentes, estudio y selección de componentes a utilizar para el desarrollo del Dimmer.

II. Modelado del sistema de calentamiento.

Simulación del sistema de calentamiento en el software Matlab

III. Desarrollo del sistema de control de temperatura de la lámpara (Dimmer).

Elaboración del sistema de control de temperatura de la lámpara infrarroja capaz de mantener una temperatura de 30°C para el calentamiento de la fibra de carbono.

IV. Pruebas y mejora de prototipo

Comprobar el funcionamiento de la simulación del modelado, realizar modificaciones finales.

V. Elaboración de la documentación final del proyecto.

Elaboración de reporte de residencia y conclusiones finales.

CAPÍTULO II. FUNDAMENTO TEÓRICO

Para realizar el modelo matemático del sistema de calentamiento del proyecto, es importante considerar el estudio de la manufactura de materiales compuestos y de temas relacionados a la termodinámica, ya que son la base fundamental de los diferentes fenómenos físicos y químicos que se presentan como el curado de la fibra de carbono, en este apartado se describe cada uno de ellos.

2.1 Fibra de carbono



Fig. 2.1 Fibra de Carbono Prepreg

Los materiales compuestos se definen como las combinaciones de dos o más materiales a partir de una unión química o no química. Estos materiales que forman el compuesto, poseen mejores propiedades que las que presentan por separado como: fibra de carbono, fibra de vidrio, polímeros, etcétera. (Miravete, 2007)

Los componentes del material compuesto no deben disolverse ni fusionarse completamente entre ellos, es decir, los materiales se deben poder identificar por medios físicos, ya que son heterogéneos. El hecho de que los materiales compuestos sean heterogéneos muchas veces hace que también sean anisotrópicos (sus propiedades dependen de la orientación del material de

refuerzo), por lo que hace que sus propiedades no serán las mismas en todo su volumen.

La fibra de carbono es un material compuesto que fue desarrollado por y para la industria aeronáutica-aeroespacial a principio de los años 80 por la necesidad de contar con los materiales más ligeros y resistentes ante cambios climáticos.

✓ Tipos de fibra de carbono

Existen diferentes tipos de fibra de carbono, estos se generan a partir de las temperaturas de tratamiento de calentamiento, por el momento se han identificado tres tipos diferentes:

- La fibra de carbono de alto módulo (HM) es la más rígida y requiere la mayor temperatura en el tratamiento.
- La fibra de carbono de alta resistencia (HR) es la más fuerte y se carboniza a la temperatura que proporciona la mayor resistencia tensil.
- El último tipo de fibra de carbono (III) es a más barata; la rigidez es menor que en las anteriores pero la asistencia es buena. Este tipo tiene la temperatura más baja en el tratamiento. (Miravete, 2007)

✓ Propiedades de la fibra de carbono

Se distinguen por sus características específicas elevadas. Las fibras HM tienen un módulo específico 70 veces superior al de las aleaciones.

Tabla 2.1 Propiedades de diferentes fibras de carbono provenientes de PAN
(Miravete, 2007)

Designación	Alta resistencia (HR)	Alto modulo (HM)	III
Díámetro de hilo(μm)	8	7	7-8
Densidad (Kg/m^3)	1740-1760	1810-1870	1820
Módulo de elasticidad (GPa)	230	390	290
Resistencia de atracción (GPa)	2, 6-5	2,1-2,7	3,1
Elongación a la rotura (%)	2	0,7	1,1
Módulo específico	130	210	160
Coefficiente expansión térmica ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	2,56	2,56	2,56

2.2 Resina Epoxi

Las resinas epóxicas son polímeros termoestables en estado líquido que al ser mezclados con un catalizador en una proporción definida provocan una reacción de endurecimiento. Las resinas epóxicas son ampliamente usadas en sectores industriales, como adhesivos, revestimientos y aditivos. En las áreas aeronáuticas, naval y deportes de alto rendimiento es usada con fibra de Carbono para fabricación de materiales compuestos que superan en resistencia a las aleaciones metálicas tradicionales, permitiendo al mismo tiempo disminuir peso y mejorar el rendimiento. (CarboKit, 2016)



Fig. 2.2 Resina Epóxica

- ✓ Propiedades de la Resina Epoxi
 - Humectación y de adherencia son óptima.
 - Buen aislamiento eléctrico.
 - Buena resistencia mecánica.
 - Resisten la humedad.
 - Resisten el ataque de fluidos corrosivos.
 - Resisten temperaturas elevadas.
 - Excelente resistencia química.
 - Poca contracción al curar.
 - Excelentes propiedades Adhesivas.

✓ Características Típicas

Tabla 2.2 Características Típicas (EPOLYGLAS, 2016)

Tiempo de curado	3-5 Horas
Constante Dieléctrica	5.5
Rigidez Dieléctrica	100 Kv/cm
Temperatura de operación máxima	110 °C
Resistencia a la Tensión	450 Kg/cm ²
Contracción	0.05% - 0.07%
Absorción de humedad de sumergido	24 Hrs. 0.06%
Densidad	1.6

Tabla 2.3 Propiedades térmicas de varios materiales ingenieriles (CET: coeficiente de expansión térmica, CT: Conductividad térmica) (Miravete, 2007)

Material	CET(10 ⁻⁶ /°C)	CT(W/m°C)
Fibra de vidrio	8.6	1.02
Fibra de Carbono (alquitrán)	-1/10	500
Fibra de Carbono (PAN)	-1/10	15-75
Resina de Poliéster	50-100	0.11-0.28
Resina de Epoxi	30-55	0.17-0.5
Tejido Carbono/epoxi	0	10/20

La resina epóxica de baja viscosidad para Fibra de Carbono. Esta resina está diseñada para implementarse con sistemas de infusión, moldeo por transferencia de resina y Hand Lay-up (Rodillo o brocha). Esta resina ha sido utilizada con éxito en componentes aeroespaciales y automotrices.

Gracias a su baja viscosidad se logra una buena humectación con fibras de alto y bajo gramaje, al mismo tiempo se distingue por su alto brillo y transparencia ya que no genera burbujas y tiene resistencia a los rayos UV. (Quintium, 2015)

2.3 Automated Fiber Placement (AFP)

El sistema AFP (Automated Fiber Placement) que consiste en la aplicación automática de varias bandas pre-impregnadas individuales a través de un mandril a alta velocidad, utilizando una cabeza de colocación de control numérico repartiéndolo, fijando, y cortando cada banda durante la colocación.

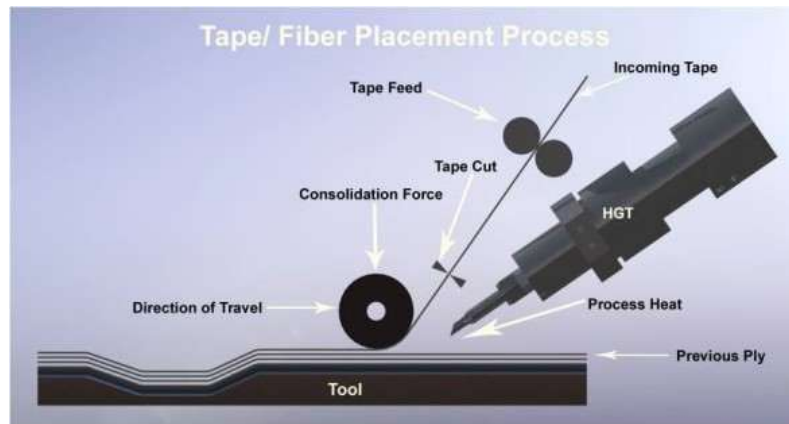


Fig. 2.3 Ejemplo de aplicación de sistema AFP

Para que una pieza esté curada, necesita estar a una temperatura máxima de 180°C dependiendo de la velocidad del cabezal, la cantidad de resina y la superficie o molde. (Contreras, 2014)

Una vez conformada la pieza se cuece literalmente en la autoclave, el gran horno que las deja acabadas después de someterlas a 180°C de temperatura.

Ventajas

- La velocidad de deposición

- Reducción de los desechos
- Mejora de la uniformidad parte a parte
- Reducción de peso
- Permite la dirección de las fibras
- Permite una mayor complejidad de los componentes y funciones.

2.4 Ecuaciones de calor de Fourier

Las ecuaciones de calor de Fourier son importantes para el análisis y comprensión de la placa fibra de carbono, se debe tener en cuenta que se manejará fibra de carbono pre-impregnada por lo que es necesario conocer las constantes de conductividad térmica de los diferentes materiales, es decir, fibra de carbono y resina epoxi.

Para el estudio de estas ecuaciones se tiene que “ J ” conocido como la densidad de corriente de energía (energía por unidad de área y por unidad de tiempo), que se establece en la barra debido a la diferencia de temperaturas entre dos puntos de la misma. La ley de Fourier afirma que hay una proporcionalidad entre el flujo de energía J y el gradiente de temperatura como la ecuación 2.1. (P., 1950)

$$J = K \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

K constante característica del material denominada conductividad térmica.

$\frac{\partial T}{\partial x}$ Variación de temperatura con respecto a la distancia del material.

Para la mejor comprensión de la ecuación de calor de Fourier se considera la figura 2.4, que representa un elemento de la barra de longitud dx y sección S . La

energía que entra en el elemento de volumen en la unidad de tiempo es JS , y la energía que sale se representa como $J'S$.

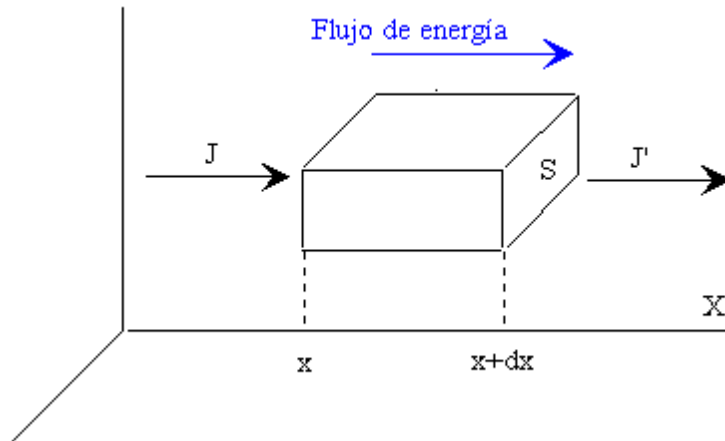


Fig. 2.4 Diagrama de ecuación de Calor de Fourier (P., 1950)

La energía del elemento cambia, en la unidad de tiempo, en una cantidad igual a la diferencia entre el flujo entrante y el flujo saliente tal como se describe en la ecuación 2.2.

$$JS - J'S = -\frac{\partial J}{\partial x} S dx \quad \text{Ec. 2.2}$$

Esta energía, se emplea en cambiar la temperatura del elemento. La cantidad de energía absorbida o cedida (en la unidad de tiempo) por el elemento es igual al producto de la masa de dicho elemento por el calor específico y por la variación de temperatura ecuación 2.3.

$$(\rho S dx) c \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Igualando ambas expresiones, y teniendo en cuenta la ley de Fourier, se obtiene la ecuación diferencial que describe la conducción térmica \propto de la ecuación 2.4.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \alpha = \frac{K}{\rho c} \quad \text{Ec. 2.4}$$

2.5 Ecuación de enfriamiento de Newton

La ley de enfriamiento de Newton establece la razón de cambio en la temperatura $T(t)$ de un cuerpo es proporcional a la diferencia entre la temperatura del medio $M(t)$ y la temperatura del cuerpo. Es decir la ecuación 2.5, indica que:

$$\frac{dT}{dt} = -K(M(t) - T(t)), \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde

K es una constante de enfriamiento.

$\frac{dT}{dx}$ Es la pérdida de calor por unidades de tiempo y T , T_0 son, respectivamente, las temperaturas del cuerpo y del medio ambiente.

Donde T y T' son las temperaturas en casa uno de dos reservorios en contacto.

2.6 Sistema de calentamiento por medio de lámparas IR



Fig. 2.5 Sistema de calentamiento por Lámparas IR de Coriolis Composites

Se ha comprobado que las lámparas IR por la facilidad de controlar la potencia, se puede utilizar para grandes aplicaciones, tales como: calentamiento de comida, secado de pintura, incubadora de aves, etcétera. En el curado de la fibra de

carbono, es necesario considerar la temperatura que se le esté aplicando a la placa de fibra de carbono.

El sistema de curado mediante lámparas de calentamiento, superficies reflectantes y sistemas de rotación para el caso de mandriles, pueden ofrecer temperaturas de curado del orden de 170°C. Debido a que las lámparas producen focos de calor muy concentrados es necesario asegurarse que se produce un curado homogéneo en toda la pieza mediante sistemas de rotación de mandril. El tipo de lámparas habitualmente usadas son las lámparas infrarrojas. (Miravete, 2007)

2.7 Matlab

La plataforma de Matlab está optimizada para resolver problemas de ingeniería y científicos. El lenguaje de Matlab, basado en matrices, es la forma para expresar las matemáticas computacionales. Los gráficos integrados facilitan la visualización de los datos y la obtención de información a partir de ellos.

Matlab cuenta con una vasta librería de toolboxes preinstaladas que permiten trabajar con algoritmos esenciales para su dominio. El entorno de escritorio ayuda a experimentar, explorar y descubrir.



Fig. 2.6 Programa de Simulación MATLAB

CAPÍTULO III. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

3.1 Modelo Matemático Etapa 1

Para realizar el modelo matemático del sistema de calentamiento de la fibra de carbono preimpregnada, se plantea utilizar lámparas infrarrojas como fuente principal de calor.

En esta primera etapa del proyecto se lleva a cabo el análisis del modelado matemático del sistema de calentamiento, la figura 3.1 representa parte de la fibra de carbono en 2D (x, y), dónde la placa recibe el calor directamente de la lámpara con el fin de que la resina epoxi se active y realice el curado de la fibra de carbono.

En la siguiente figura se ilustra el análisis del comportamiento térmico en un enmallado de 3x2 en la placa de fibra de carbono.

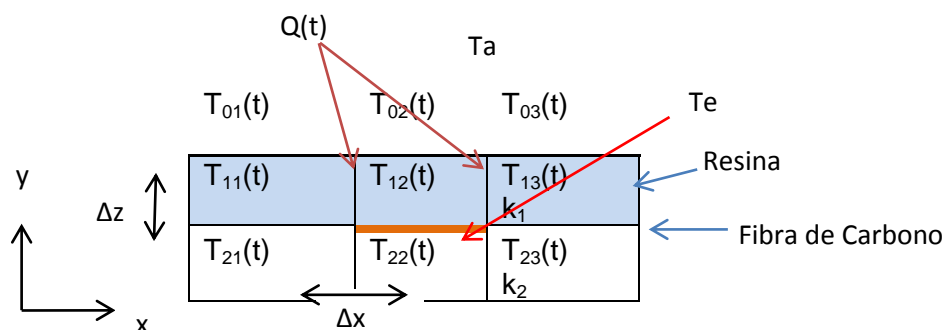


Fig. 3.1 Diagrama de la Fibra de Carbono

Para el sistema de calentamiento se hace énfasis en la parte central (parte de color rojo) de T_{12} y T_{22} , ya que en esta parte es donde influye más el calor de las lámparas y podemos ver el cambio de temperatura en la placa de fibra de carbono.

$$T_e = \frac{T_{12} + T_{22}}{2} \quad \text{Ec. 3.1}$$

El modelado se realizó tomando como referencia (Lee, 2016) como un primer acercamiento en el cálculo de resultados del sistema de calentamiento. Esto con el fin de aproximar errores en el sistema y modificar el sistema de calentamiento a 3D (x, y, z) .

Con base en la ecuación de Fourier y analizando el sistema de calentamiento de la figura 3.1, llegamos a la siguiente ecuación 3.2.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K_1 \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] + K_2 V \frac{\partial T}{\partial x} + Q(t) \quad \text{Ec. 3.2}$$

Teniendo en cuenta que $K_3 = K_2 V \frac{\partial T}{\partial x}$

Dónde:

k_1 = Constante térmica de la Resina Epoxi.

k_2 = Constante térmica de la Fibra de carbono.

V = Velocidad del cabezal.

$Q(t)$ = Calor de la lámpara IR.

$\frac{\partial T}{\partial t}$ = Variante de temperatura en el tiempo.

Ahora se analiza la temperatura en las posiciones siguientes en el plano (x, y) , teniendo en cuenta que no solo se analiza en un solo punto, si no en el área a analizar, es decir, el espesor del material y con esto aproximarse al punto focal de la parte a calentar, con ayuda de una gráfica de la figura 3.2, podemos comprender mejor.

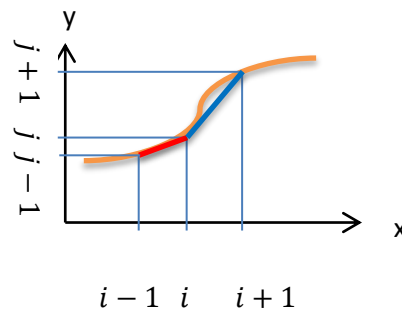


Fig. 3.2 Pendientes de temperatura para las ecuaciones (3), (4) y (5).

Enseguida se escriben las ecuaciones de calor de Fourier:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \propto \frac{T_{(i,j)}(t) - T_{(i-1,j)}(t)}{\Delta x} \quad \text{Ec. 3.3}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \propto \frac{T_{(i+1,j)}(t) - 2T_{(i,j)}(t) + T_{(i-1,j)}(t)}{(\Delta x)^2} \quad \text{Ec. 3.4}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \propto \frac{T_{(i,j+1)}(t) - 2T_{ij}(t) + T_{(i,j-1)}(t)}{(\Delta y)^2} \quad \text{Ec. 3.5}$$

El periodo de muestreo se representa de la siguiente manera, involucrando a la temperatura y el tiempo.

$$\frac{\partial y}{\partial t} \propto \frac{T_{(i,j)}^n - T_{(i,j)}^{n-1}}{\Delta T} \quad \text{Ec. 3.6}$$

Ahora se sustituyen los valores de las ecuaciones (3.3, 3.4, 3.5, 3.6) en la ecuación 3.2 y se genera la ecuación 3.7, quedando de la siguiente manera:

$$\frac{T_{(i,j)}^n - T_{(i,j)}^{n-1}}{\Delta T} = K_1 \left[\frac{T_{(i+1,j)}^n - 2T_{(i,j)}^n + T_{(i-1,j)}^n}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{(i,j+1)}^n - 2T_{(i,j)}^n + T_{(i,j-1)}^n}{(\Delta y)^2} \right] + K_3 \left[\frac{T_{(i+1,j)}^n - T_{(i-1,j)}^n}{2\Delta T} \right] + Q^n \quad \text{Ec. 3.7}$$

Como se puede apreciar en la figura 3.1, la parte importante para saber el calentamiento de la fibra de carbono con la resina es la sección Te .

$$Te(t) = \frac{T_{22}(t) + T_{12}(t)}{2} \quad \text{Ec. 3.8}$$

O bien se puede expresar de la siguiente manera.

$$Te^n = \frac{T_{22}^n - T_{12}^n}{2} \quad \text{Ec. 3.9}$$

De la ecuación 3.9 se discretiza con respecto en el espacio y se considera la ecuación 3.7 para reescribir las nuevas ecuaciones 3.10 y 3.11.

$$\frac{T_{12}^n - T_{12}^{n-1}}{\Delta T} = K_1 \left[\frac{T_{22}^n - 2T_{12}^n + Ta}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{13}^n - 2T_{12}^n + T_{11}^n}{(\Delta y)^2} \right] + K_3 \left[\frac{T_{22}^n - Ta}{2\Delta x} \right] + Q^n \quad \text{Ec. 3.10}$$

$$\frac{T_{22}^n - T_{22}^{n-1}}{\Delta T} = K_2 \left[\frac{Ta - 2T_{22}^n + T_{12}^n}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{23}^n - 2T_{22}^n + T_{21}^n}{(\Delta y)^2} \right] + K_3 \left[\frac{Ta - T_{12}^n}{2\Delta x} \right] + Q^n \quad Ec. 3.11$$

Para escribir la ecuación en variables de estado de la ecuación 3.7 se analiza las derivadas de los puntos T_{22}^n y T_{12}^n .

$$\frac{dT_{12}(t)}{dt} = K_1 \left[\frac{T_{22}(t) - 2T_{12}(t) + Ta(t)}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{13}(t) - 2T_{12}(t) + T_{11}(t)}{(\Delta y)^2} \right] + K_2 \left[\frac{T_{12}(t) - Ta(t)}{2\Delta x} \right] + Q(t) \quad Ec. 3.12$$

$$\frac{dT_{22}(t)}{dt} = K_2 \left[\frac{Ta(t) - 2T_{22}(t) + T_{12}(t)}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{23}(t) - 2T_{22}(t) + T_{21}(t)}{(\Delta y)^2} \right] + K_2 \left[\frac{Ta(t) - T_{12}(t)}{2\Delta x} \right] + Q(t) \quad Ec. 3.13$$

Basándonos en la forma de variables de estado tenemos que los vectores de estado serán T_{12} y T_{22} .

$$\dot{\bar{X}} = \bar{A}\bar{x} + \bar{B}\bar{u} \quad Ec. 3.14$$

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_{12}(t)}{dt} \\ \frac{dT_{22}(t)}{dt} \end{bmatrix} = \bar{A} \begin{bmatrix} T_{12}(t) \\ T_{22}(t) \end{bmatrix} + \bar{B} \begin{bmatrix} Ta(t) \\ Q(t) \\ T_{11}(t) \\ T_{13}(t) \\ T_{21}(t) \\ T_{23}(t) \end{bmatrix} \quad Ec. 3.15$$

De la ecuación 3.15, solamente sustituimos de las ecuaciones 3.12 y 3.13, la ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_{12} \\ \dot{T}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2K_1 \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right) & \frac{K_1}{\Delta x^2} + \frac{K_2}{2\Delta x} \\ \frac{K_2}{\Delta x^2} - \frac{K_3}{2\Delta x} & -2K_2 \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{12} \\ T_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_1}{\Delta x^2} - \frac{K_3}{2\Delta x} & 1 & \frac{K_1}{\Delta y^2} & \frac{K_1}{\Delta y^2} & 0 & 0 \\ \frac{K_2}{\Delta x^2} + \frac{K_3}{2\Delta x} & 0 & 0 & 0 & \frac{K_2}{\Delta y^2} & \frac{K_2}{\Delta y^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ta(t) \\ Q(t) \\ T_{11}(t) \\ T_{13}(t) \\ T_{21}(t) \\ T_{23}(t) \end{bmatrix} \quad Ec. 3.16$$

3.2 Modelo Matemático Etapa 2

Para la segunda etapa, se considera un modelo en el que se pueda analizar un sistema en 3 ejes es decir (i, j, k) como se ilustra en la figura 3.3, teniendo en cuenta que analizaremos el eje K, mostrando la estructura, tanto del material a calentar como la distancia de la lámpara, analizando en el punto de enfoque de la lámpara hacia la resina para que esta actúe con la fibra de carbono.

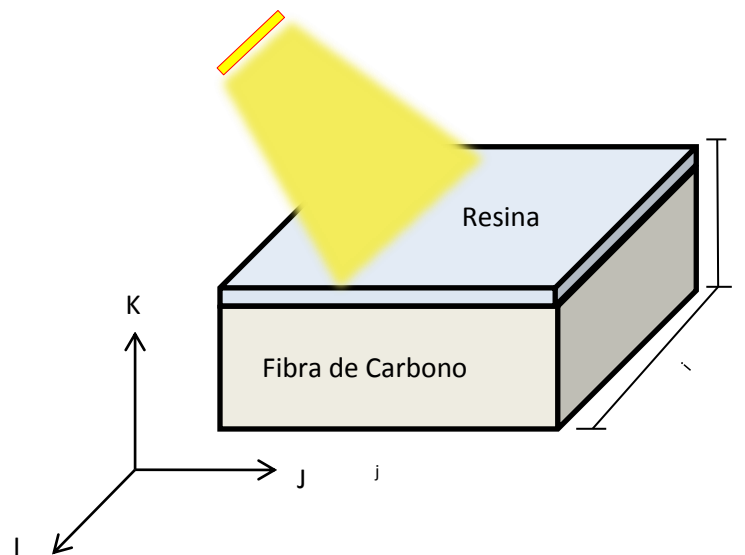


Fig. 3.3 Placa de Fibra de Carbono

Para el desarrollo del modelado matemático se considera éste modelo físico en 3D, se pretende validar de manera experimental haciendo uso de las ecuaciones de calor de Fourier y la ley de enfriamiento de Newton.

Para comprender y visualizar cómo la lámpara IR actúa con la resina y fibra de carbono, se propone el uso del Software Matlab gracias a la versatilidad que éste presenta para involucrar las ecuaciones antes mencionadas.

Al discretizar en el espacio, la placa se representa como malla de Euler, de esta manera podemos saber cuánto calor ocupa en ese instante algún punto en especial, tal y como se muestra en la figura 3.4. Posteriormente se analizará el

cambio de temperatura en una cara del enmallado y se valorarán la zona que estamos examinando.

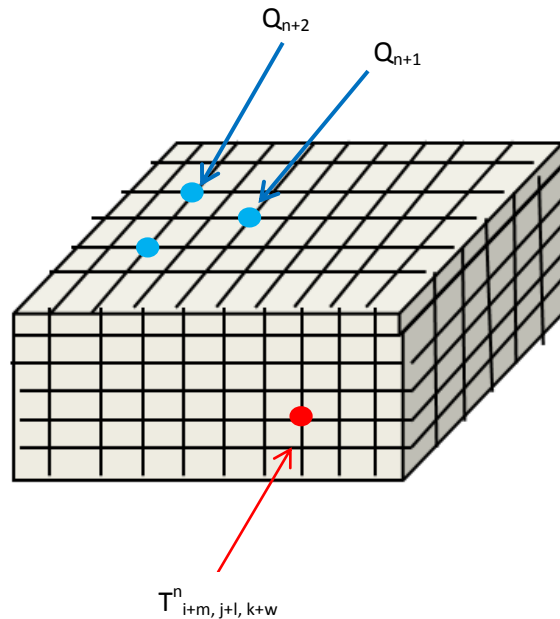


Fig. 3.4 Placa de Fibra de Carbono en malla.

Considerando anteriormente que $Q(t)$ es la intensidad de calor y K_q es la constante térmica del material. Tenemos que la Ecuación de Calor de Fourier es:

$$\nabla^2 T = K_1 \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + K_v \frac{\partial T}{\partial t} + Q(t) \quad \text{Ec. 3.17}$$

Donde

$$K_1 = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad \text{Ec. 3.18}$$

λ = Conductividad térmica.

c_p : Constante térmico del sistema.

ρ : Densidad del material.

K_v = Es una constante de velocidad del cabezal.

Como se analiza en el espacio, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = K_1 \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + K_v \frac{\partial T}{\partial t} + Q(t) \quad \text{Ec. 3.19}$$

Anteriormente se mencionó que el modelo se discretizará en el espacio y con la ayuda de la malla de Euler se podrá variar la temperatura dependiendo de qué plano estemos analizando ($T_{i+m,j+l,k+w}^n$).

Como se había detallado principalmente, las ecuaciones para discretizar en el espacio quedarán de la siguiente manera, teniendo en cuenta las ecuaciones 3.17, 3.18 y 3.19 pero ahora con una distribución tridimensional (i, j, k).

$$\frac{\partial T(t,x,y,z)}{\partial t} \propto \frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k}^{n-1}}{\Delta T} \quad \text{Ec. 3.20}$$

$$\frac{\partial^2 T(t,x,y,z)}{\partial t^2} \propto \frac{T_{i,j,k}^n - 2T_{i,j,k}^{n-1} + T_{i,j,k}^{n-2}}{\Delta T^2} \quad \text{Ec. 3.21}$$

$$\frac{\partial^2 T(t,x,y,z)}{\partial x^2} \propto \frac{T_{i+1,j,k}^{n-1} - 2T_{i,j,k}^{n-1} + T_{i-1,j,k}^{n-1}}{\Delta x^2} \quad \text{Ec. 3.23}$$

$$\frac{\partial^2 T(t,x,y,z)}{\partial y^2} \propto \frac{T_{i,j+1,k}^{n-1} - 2T_{i,j,k}^{n-1} + T_{i,j-1,k}^{n-1}}{\Delta y^2} \quad \text{Ec. 3.24}$$

$$\frac{\partial^2 T(t,x,y,z)}{\partial z^2} \propto \frac{T_{i,j,k+1}^{n-1} - 2T_{i,j,k}^{n-1} + T_{i,j,k-1}^{n-1}}{\Delta z^2} \quad \text{Ec. 3.25}$$

Teniendo las ecuaciones anteriores, se reescribe la ecuación 3.26 quedando de la siguiente manera:

$$K_1 \left[\frac{T_{i,j,k}^n - 2T_{i,j,k}^{n-1} + T_{i,j,k}^{n-2}}{\Delta T^2} \right] + K_v \left[\frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k}^{n-1}}{\Delta T} \right] + Q_{i,j,k}^n = \frac{T_{i+1,j,k}^{n-1} - 2T_{i,j,k}^{n-1} + T_{i-1,j,k}^{n-1}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j+1,k}^{n-1} - 2T_{i,j,k}^{n-1} + T_{i,j-1,k}^{n-1}}{\Delta y^2} + \frac{T_{i,j,k+1}^{n-1} - 2T_{i,j,k}^{n-1} + T_{i,j,k-1}^{n-1}}{\Delta z^2} \quad \text{Ec. 3.26}$$

Ahora únicamente se despeja la ecuación y las variables importantes.

$$\left[\frac{K_1}{\Delta T^2} + \frac{K_2}{\Delta T}\right]T_{i,j,k}^n = -Q_{i,j,k}^n - \left[\frac{K_1}{\Delta T^2}\right]T_{i,j,k}^{n-2} + \left[\frac{2K_1}{\Delta T^2} + \frac{K_2}{\Delta T} - \frac{2}{\Delta x^2} - \frac{2}{\Delta y^2} - \frac{2}{\Delta z^2}\right]T_{i,j,k}^{n-1} + \left[\frac{1}{\Delta x^2}\right][T_{i+1,j,k}^{n-1} + T_{i-1,j,k}^{n-1}] + \left[\frac{1}{\Delta y^2}\right][T_{i,j+1,k}^{n-1} + T_{i,j-1,k}^{n-1}] + \left[\frac{1}{\Delta z^2}\right][T_{i,j,k+1}^{n-1} + T_{i,j,k-1}^{n-1}] \quad Ec. 3.27$$

La ecuación de Calor de Fourier se transforma de la siguiente manera:

$$T_{i,j,k}^n = C_1 T_{i,j,k}^{n-1} + C_3 T_{i,j,k}^{n-2} + C_3 T_{i+1,j,k}^{n-1} + C_4 T_{i-1,j,k}^{n-1} + C_5 T_{i,j+1,k}^{n-1} + C_6 T_{i,j-1,k}^{n-1} + C_7 T_{i,j,k+1}^{n-1} + C_8 T_{i,j,k-1}^{n-1} + C_9 Q_{i,j,k}^n \quad Ec. 3.28$$

Las constantes quedarían de la siguiente manera:

$$A_1 = \frac{1}{\left[\frac{k_1}{\Delta T^2} + \frac{k_2}{\Delta T}\right]} \left[\frac{2k_1}{\Delta T^2} + \frac{k_2}{\Delta T} - \frac{2}{\Delta x^2} - \frac{2}{\Delta y^2} - \frac{2}{\Delta z^2}\right] \quad Ec. 3.29$$

$$A_2 = \frac{1}{\left[\frac{k_1}{\Delta T^2} + \frac{k_2}{\Delta T}\right]} \left[-\frac{k_1}{\Delta T^2}\right] \quad Ec. 3.30$$

$$A_3 = A_4 = \frac{1}{\left[\frac{k_1}{\Delta T^2} + \frac{k_2}{\Delta T}\right]} \left[\frac{1}{\Delta x^2}\right] \quad Ec. 3.31$$

$$A_5 = A_6 = \frac{1}{\left[\frac{k_1}{\Delta T^2} + \frac{k_2}{\Delta T}\right]} \left[\frac{1}{\Delta y^2}\right] \quad Ec. 3.32$$

$$A_7 = A_8 = \frac{1}{\left[\frac{k_1}{\Delta T^2} + \frac{k_2}{\Delta T}\right]} \left[\frac{1}{\Delta z^2}\right] \quad Ec. 3.33$$

$$A_9 = \frac{1}{\left[\frac{k_1}{\Delta T^2} + \frac{k_2}{\Delta T}\right]} \quad Ec. 3.34$$

Ahora se planteará las ecuaciones de enfriamiento de Newton que en su teoría menciona que es necesario considerar la constante de enfriamiento en este caso K_3 .

$$\frac{\partial T}{\partial t} + K_3(T - T_a) = Q \quad Ec. 3.35$$

Se discretiza en el espacio, por lo tanto de la ecuación 3.35 se reescribirá de la siguiente forma:

$$\frac{T_{i,j,k}^n - T_{i,j,k}^{n-1}}{\Delta T} + K_3(T_{i,j,k}^n - Ta) = Q_{i,j,k}^n \quad Ec. 3.36$$

Donde:

K_3 = Constante de enfriamiento de Newton

Ta = Temperatura ambiente

Ahora de la ecuación 3.36 agruparemos para después despejar $T_{i,j,k}^n$.

$$\left[\frac{1}{\Delta T} + K_3\right] T_{i,j,k}^n = Q_{i,j,k}^n + K_3 Ta + \frac{1}{\Delta T} T_{i,j,k}^{n-1} \quad Ec. 3.37$$

Se despeja la ecuación 3.37.

$$T_{i,j,k}^n = B_1 T_{i,j,k}^{n-1} + B_2 Ta + B_3 Q_{i,j,k}^n \quad Ec. 3.38$$

Las constantes quedarían de la siguiente manera:

$$B_1 = \frac{1}{\frac{1}{\Delta T} + K_3} \left[\frac{1}{\Delta T}\right] \quad Ec. 3.39$$

$$B_2 = \frac{1}{\frac{1}{\Delta T} + K_3} [K_3] \quad Ec. 3.40$$

$$B_3 = \frac{1}{\frac{1}{\Delta T} + K_3} \quad Ec. 3.41$$

Ahora teniendo en cuenta las ecuaciones de enfriamiento de Newton, la ecuación de calor de Fourier y las constantes necesarias para su aplicación, se involucra condiciones de tamaño de la placa, así como como condiciones de frontera, en la programación en el software Matlab, tal como se muestra en la siguiente sección.

3.3 Programa en MATLAB

%Modelado de Sistema de Calentamiento

```
clear, clear T
clc
Ti=-18; %input('\n Temperatura Inicial de la fibra de carbono(°C): '); %temperatura inicial
Tm=18; %input('\n Temperatura del medio (°C): '); temperatura del medio
Tf=33; %input('\n Temperatura final alcanzar (°C): '); %temperatura final
v=.01;%input('\n Velocidad del cabezal (m/s): '); velocidad del cabezal
Qc=20; %input('\n Calor proporcionado por la Lámpara (J): '); tiempo
Yf=3; %ciclos for hasta donde llega la placa
Xf=22;
Zf=10;
Lx=20; %distancias
Ly=10;
Lz=7;
Tie=11; % Tiempo de simulación
Tfin=30; % intervalo de tiempo
AT=Tie/Tfin;
AX=Lx/Xf; % Incrementos de análisis
AY=Ly/Yf;
AZ=Lz/Zf;
a1=0.2; % constantes de temperatura térmica
b1=15;
c1=0.5;
a2=0.25;
b2=30;
c2=0.69314;
a3=0.3;
b3=25;
c3=0.5;
T(1, :, :) = Tm * ones(Xf, Yf, Zf); % condiciones iniciales
T(2, :, :) = Tm * ones(Xf, Yf, Zf);

for n=3:1:Tf
    for j=1:1:Yf
        for i=1:1:Xf
            for k=1:1:Zf
                if (k<5)
                    k1=a1;
                    k2=b1;
                    k3=c1;
                end
                if (k==5)
                    k1=a2;
                    k2=b2;
                    k3=c2;
                end
                if (k>5)
                    k1=a3;
                    k2=b3;
                end
            end
        end
    end
end
```

```

k3=c3;
end
if j==2&&i==11&&k==1
    Q(n,i,j,k)=Qc;
else
    Q(n,i,j,k)=0;
end
A9=(1/((k1/(AT)^2)+(k2/AT)));
A1=(A9)*(((2*k1)/(AT)^2)+((k2)/(AT))-(2/(AX)^2)-(2/(AY)^2)-(2/(AZ)^2));
A2=(A9)*((k1)/(AT)^2);
A3=(A9)*(1/(AX)^2);
A4=(A9)*(1/(AX)^2);
A5=(A9)*(1/(AY)^2);
A6=(A9)*(1/(AY)^2);
A7=(A9)*(1/(AZ)^2);
A8=(A9)*(1/(AZ)^2);
B3=(1/((1/(AT)^2)+(k3)));
B1=(B3)*(1/AT);
B2=(B3)*(k3);

if (j==1 || j==Yf || i==1 || i==Xf || k==1 || k==Zf)
    T(n,i,j,k)=B1*T(n-1,i,j,k)+B2*Tm+B3*Q(n,i,j,k); %Ecuación de enfriamiento de Newton
else
    T(n,i,j,k)=A1*T(n-1,i,j,k)+A2*T(n-2,i,j,k)+A3*T(n-1,i+1,j,k)+A4*T(n-1,i-1,j,k)+A5*T(n-1,i,j+1,k)+A6*T(n-1,i,j-1,k)+A7*T(n-1,i,j,k+1)+A8*T(n-1,i,j,k-1)-A9*Q(n,i,j,k); %Ecuación de calentamiento de Fourier
end
end
end
end
To(:,:,2)=T(n,:,2,:);
figure(1)
image(To)
grid on
Qo(:,:,2)=Q(n,:,2,:);
% figure(2)
% image(Qo)
grid on
reply = input('Enter para visualizar en periodos de segundo','s');
end

```

3.4 Análisis de los resultados de la simulación

Para realizar el análisis correspondiente a los resultados obtenidos en la simulación, es importante enfatizar que hicimos el estudio en el eje K de la placa de fibra de carbono como se ilustra en la figura 3.5, ya que en esa parte podemos visualizar cómo la radiación de la luz infrarroja calienta y cura el pre-impregnado de fibra de carbono.

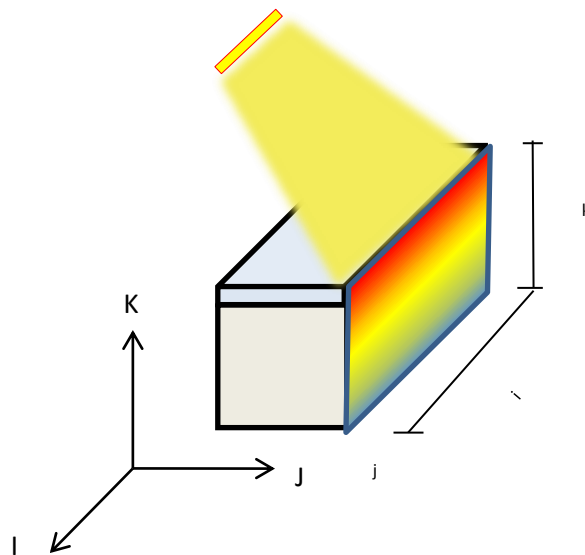


Fig. 3.5 Eje K parte del análisis del modelado.

La fibra pre-impregnada tiene que estar a una temperatura inicial entre -18°C y 18°C del molde, por lo que al aplicar calor de una lámpara infrarroja de 400w provocará que la resina de la fibra pre-impregnada se adhiera al molde, formando así capas de fibra de carbono y logrando una placa con dimensiones de 22 cm de largo y 10cm de ancho.

Para el análisis de la simulación se propone un intervalo de tiempo de 0 a 30 segundos. Sin embargo se mostraran con iteraciones de cada 3 segundos para poder visualizar de mejor manera el gradiente de temperatura de la placa de carbono. Por lo que la figura 3.6 se expone tales variaciones con un estado inicial en -18°C de la placa de fibra de carbono.

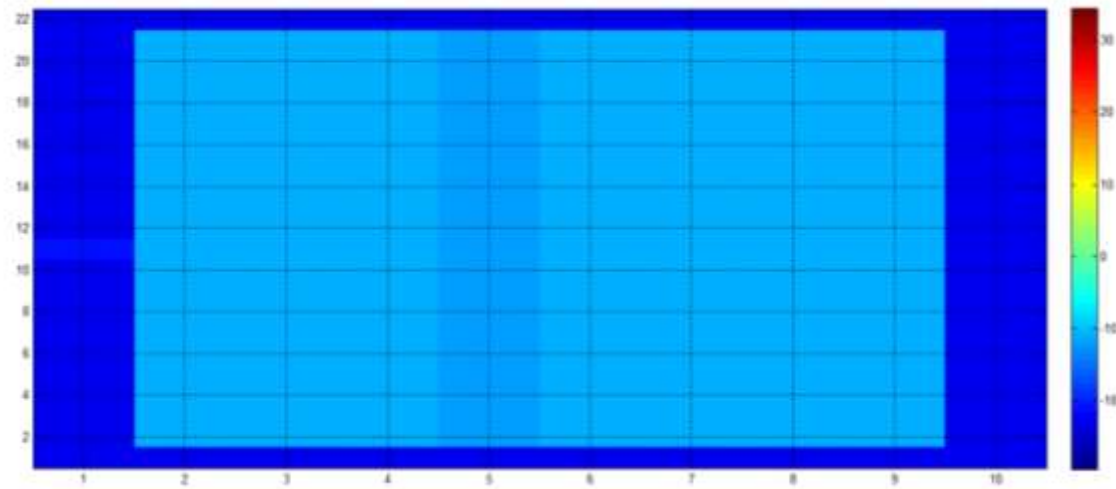


Fig. 3.6 Primer intervalo de tiempo en el eje K de la placa de fibra de carbono.

Pasando los primeros 3 segundos, la placa se puede observar como la temperatura de la placa va incrementando llegando así a -10°C tal como se muestra en la figura 3.7.

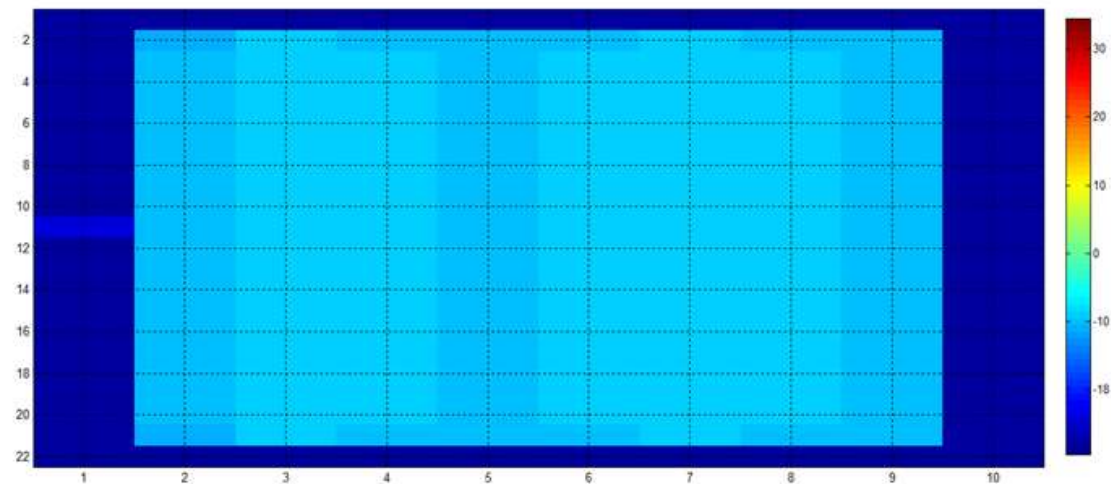


Fig. 3.7 Placa de fibra de carbono, 3 segundos.

En la figura 3.8 se logra visualizar que la placa llega a una temperatura de 4°C a 6 segundos conforme para el intervalo de tiempo.

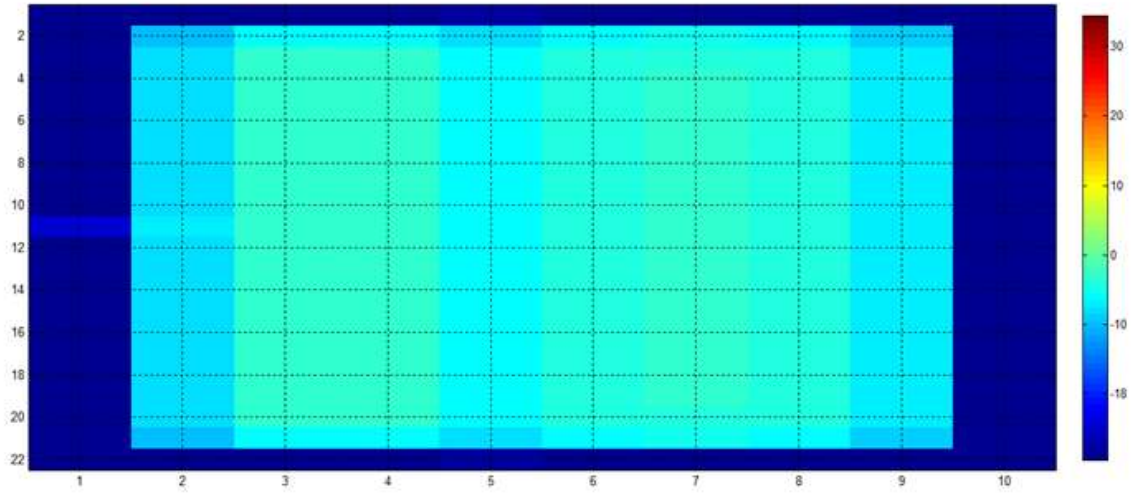


Fig. 3.8 Placa de fibra de carbono, 6 segundos.

Pasando 9 segundos, se observa en la figura 3.9 que la temperatura cambia a 8°C. Con esto comprobamos que la lámpara infrarroja calienta a la placa rápidamente.

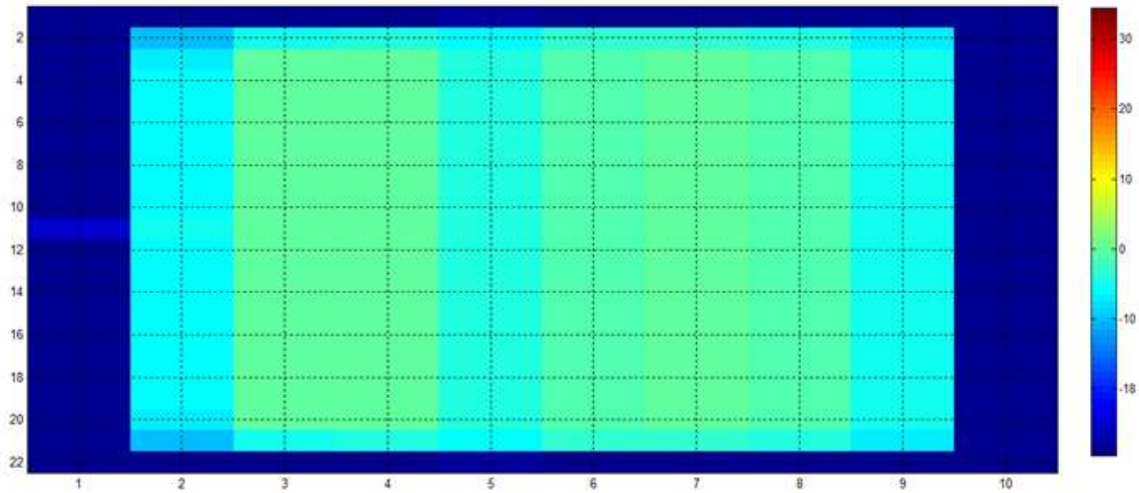


Fig. 3.9 Placa de fibra de carbono, 9 segundos.

En la figura 3.10 se logra visualizar que la temperatura de la placa incrementa llegando así a 11°C en un tiempo de 12 segundos.

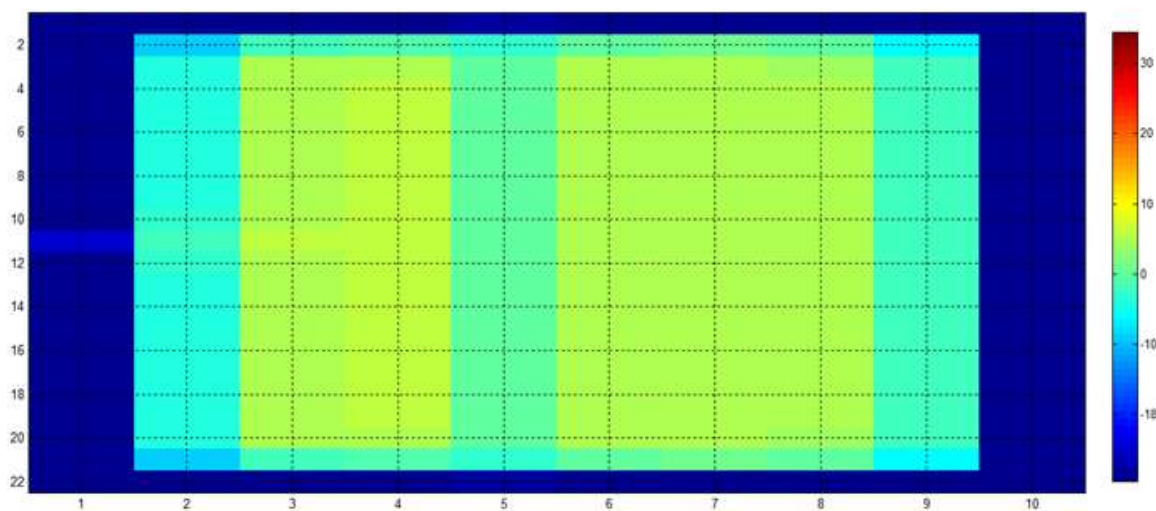


Fig. 3.10 Placa de fibra de Carbono, 12 segundos.

Posteriormente a los 15 segundos, se puede ver que la temperatura de la placa llega a 14°C, tal como lo muestra la figura 3.11.

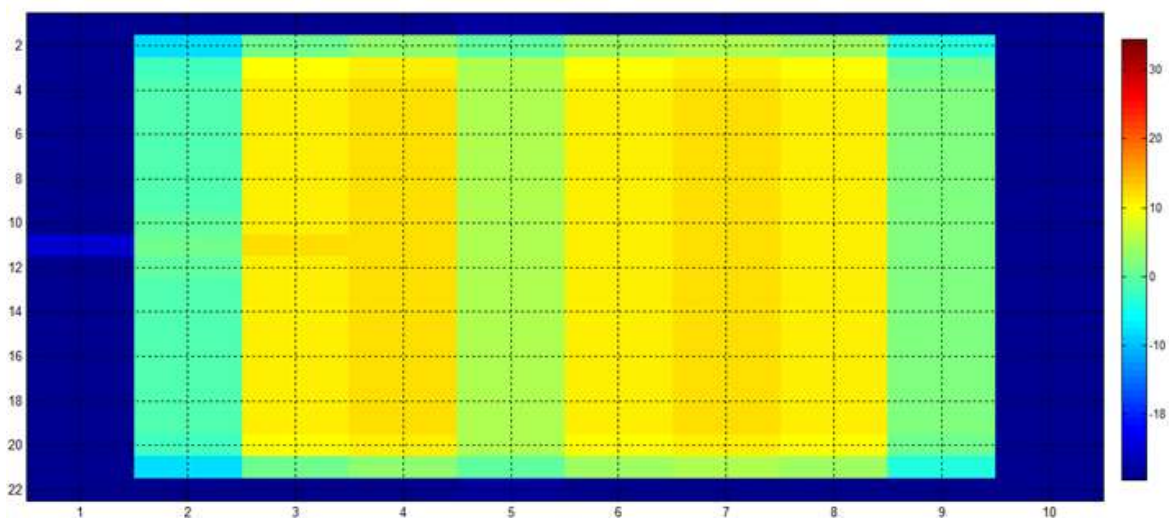


Fig. 3.11 Placa de fibra de carbono, 15 segundos.

Después de 18 segundos de calentamiento de la placa, en la figura 3.12 se muestra que se logra alcanzar 20°C, poco a poco se calentará por completo la placa de fibra de carbono.

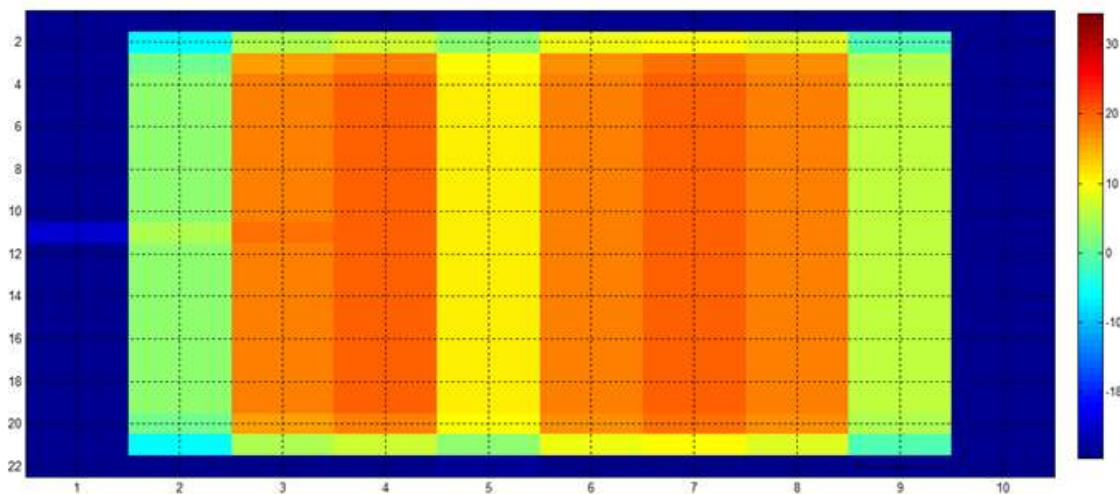


Figura 3.12 Placa de fibra de carbono, 18 segundos.

En la figura 3.13 la placa logra tener una temperatura de 22°C.

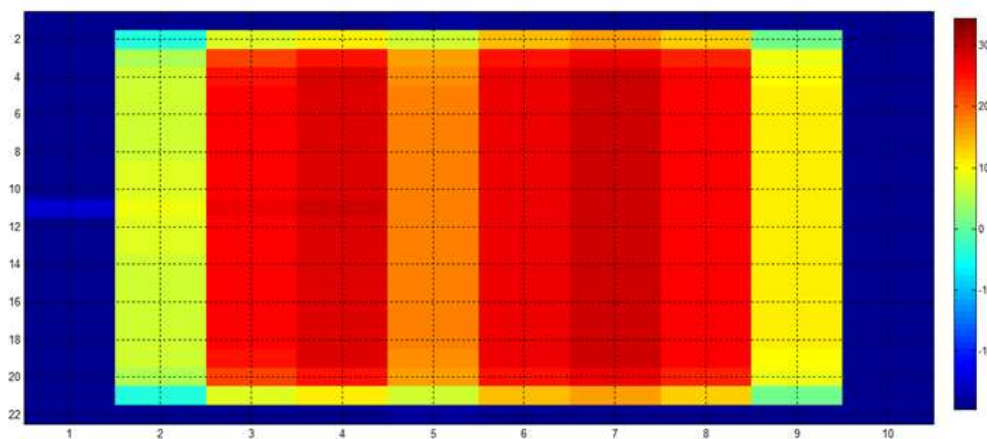


Figura 3.13 Placa de fibra de carbono, 21 segundos.

Ahora se puede ver que la temperatura llega a los 30°C en solo 24 segundos como se visualiza en la figura 3.14.

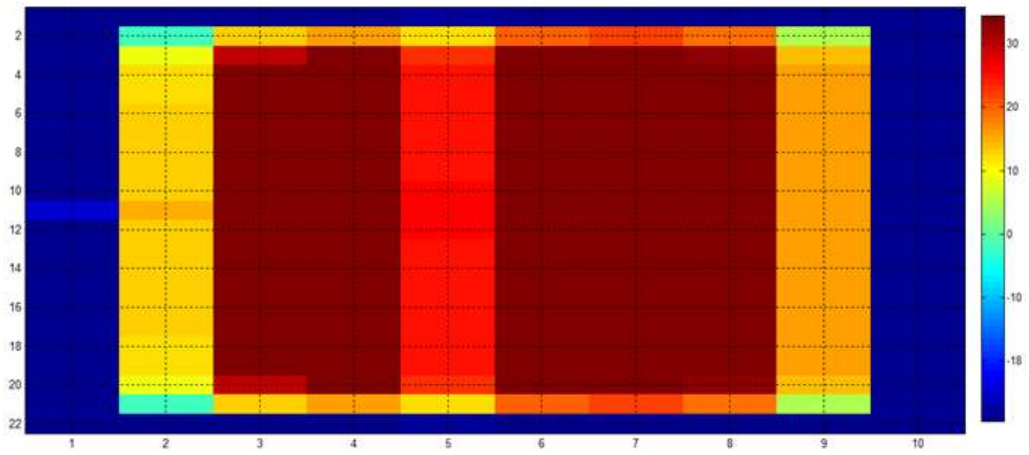


Figura 3.14 Placa de fibra de carbono, 24 segundos.

En la figura 3.15 se logra observar que la placa se va calentando a una temperatura de 32°C ahora lo hace uniformemente.

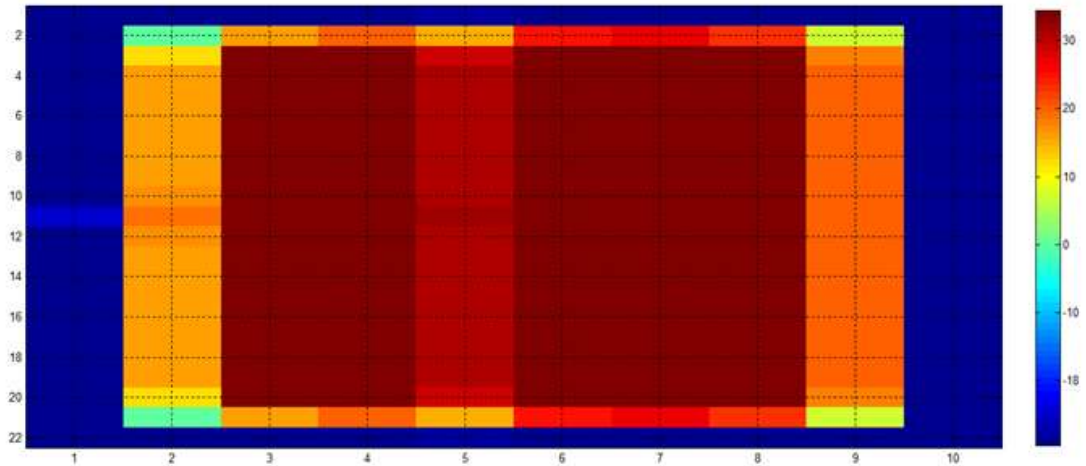


Figura 3.15 Placa de fibra de carbono, 27 segundos

En la placa se logra observar que el calor se va calentando en su totalidad, llegando a tener una temperatura de 33°C a los 30 segundos.

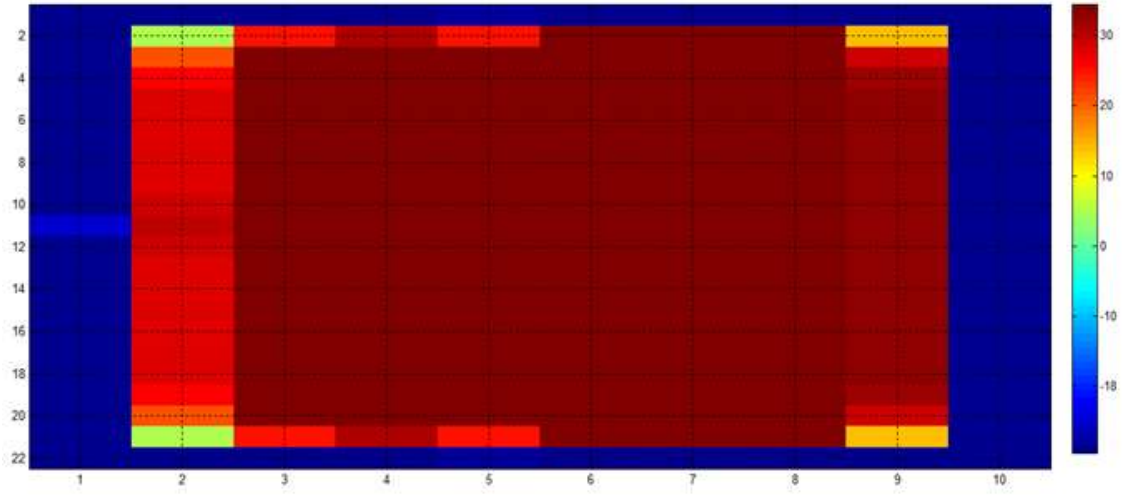


Figura 3.16 Placa de fibra de carbono, 30 segundos.

CONCLUSIONES

En esta memoria de residencia como se puede apreciar, es el comienzo de un proyecto de gran tamaño, que a futuro puede llegar a provocar un cambio considerable en la evolución de utilizar nuevas tecnologías para la reparación de aspas eólicas en aerogeneradores en México por medio de la manufactura AFP con fibra de carbono. Para llegar a esto es necesaria la elaboración de una serie de pasos, desde el diseño, simulación y pruebas de cada sistema mencionando con anterioridad, en este caso se obtuvo la distribución de calor que puede llegar a generar una lámpara infrarroja en una placa de fibra de carbono.

Las aplicaciones para este proyecto son muchas y en todas las áreas posibles de sector ingenieril en procesos de manufactura, por lo que se sigue fomentando el desarrollo teórico-práctico de este mismo. En mi opinión es necesario realizar pruebas a la parte de curado, debido a la falta de tiempo y que lamentablemente se carecía de fibra pre-impregnada no se pudieron realizar pruebas físicas, sin embargo se pretende dar seguimiento posteriormente como un proyecto para la obtención del grado de especialidad.

Como he mencionado, en este proyecto es un trabajo en equipo que involucra áreas como química, electrónica, mecánica, robótica, por lo que se seguirá trabajando en equipo con el grupo de trabajo en CIDESI.

En particular, se logran los objetivos satisfactoriamente en la cual aprendí a desarrollar un modelado matemático de un sistema, gracias a la ayuda de ingenieros, maestros y doctores de CIDESI.

Por otra parte considero necesario el mencionar que se obtuvieron conocimientos en el ámbito académico y personal ya que se reafirmaron y mejoraron las habilidades en las materias de control, termodinámica, uso e implementación del software Matlab. Así como también tuve la oportunidad de convivir y trabajar con compañeros de diferentes áreas de la ingeniería para lograr un mismo fin.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCUDYNE SYSTEMS, INC. (2016). *ACCUDYNE SYSTEMS*. Recuperado el 11 de MAYO de 2016, de <http://www.accudyne.com/composites-automation/automated-fiber-placement-afp.htm>
- Automated Dynamics. (2016). *Automated Dynamics*. Recuperado el 11 de Mayo de 2016, de <http://www.automateddynamics.com/article/thermoplastic-composite-basics/developmental-processes/laser-processing-of-thermoplastic-composites>
- CIDESI. (2013). *Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial*. Recuperado el 06 de Mayo de 2016, de <http://cidesi.com/wsite/nosotros/index.php>
- CompositesWorld. (2016). *CompositesWorld*. Recuperado el 11 de MAYO de 2016, de <http://www.compositesworld.com/articles/fabrication-methods>
- Contreras, A. J. (03 de Nov de 2014). *ENGINEERING&MATERIALS*. Recuperado el 09 de Jun de 2016, de Tecnología de laminado y automatizado en materiales compuestos:
<https://materialsbreakthroughs.wordpress.com/2014/11/03/tecnologia-de-laminado/>
- CORIOLIS. (2016). *CORIOLIS COMPOSITES*. Recuperado el 11 de Mayo de 2016, de http://www.coriolis-composites.com/Customer_Services.html
- E. Ukar, S. M. (2010). Modelo térmico láser con transformaciones intermedias en calentamiento. *XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica (2010)*, 3.
- EPOLYGLAS. (2016). *EPOLYGLAS*. Recuperado el 19 de 05 de 2016, de <http://www.epolyglas.com/resinas.htm>
- Gamesa. (2010). *Gamesa*. Recuperado el 06 de Mayo de 2016, de <http://www.gamesacorp.com/es/>
- Khan, S. (2007-2016). *Cite Seer X*. Recuperado el 01 de Junio de 2016, de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.634.2592&rep=rep1&type=pdf>
- Khan, S. (March de 2011). *Thermal Control System Design For Automated Fiber Placement Process*. Montreal, Quebec, Canada.

Lee, M. (20 de Enero de 2016). *Digital Library and Archive*. Recuperado el 02 de junio de 2016, de https://theses.lib.vt.edu/theses/available/etd-03232004-203236/unrestricted/DISSERTATION_LEE.pdf

MIKROSAM. (2016). *INNOVATIVE COMPOSITE MANUFACTURING SOLUTIONS*. Recuperado el 11 de MAYO de 2016, de <http://www.mikrosam.com/new/article/en/automated-fiber-placement-the-complete-system/>

Miravete, A. (2007). Materiales Primas. En A. Miravete, *Materiales Compuestos I* (pág. 6). Barcelona, España: Editorial Reverté.

MTorres. (2016). *Aeronáutica TORRESFIBERLAYUP*. Recuperado el 11 de MAYO de 2016, de <http://www.mtorres.es/es/aeronautica/productos/fibra-de-carbono/torresfiberlayup>

P., P. A. (1950). Curso teórico-práctico de ecuaciones diferenciales aplicado a la Física y Técnica. Biblioteca Matemática.

Quintium. (2015). *Fibra de Carbono*. Recuperado el 19 de 05 de 2016, de <http://www.quintum.com.mx/resinas.php>