

Diseño e implementación de un proceso automatizado para curado de materiales compuestos

Design and implementation of an automated process for curing composite materials

Andrés Marcelo Carranco Herrera

Fuerza Aérea Ecuatoriana FAE

Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, Sangolquí, Ecuador.

acarranco@fae.mil.ec, amchc5909_@hotmail.com

Resumen

Una de las áreas prioritarias para la industria moderna es disminuir la dependencia tecnológica. Por ello es necesario plantear soluciones a las necesidades que se presentan día a día. Una de ellas es la automatización de procesos. Por ello, se plantea el diseño de un proceso de curado automatizado de materiales compuestos para contribuir a la investigación en estos materiales. Para alcanzar mejores propiedades mecánicas que requiere un producto aeronáutico a fin de soportar las cargas a las que se verá sometido el material durante una operación de vuelo es fundamental lograr un buen desempeño del proceso el curado. Para el desarrollo del sistema se utilizó una metodología conceptual, planteando diversas alternativas de solución, orientando el esfuerzo a bosquejar, dimensionar el equipo y elegir el mejor concepto del producto. Una vez definido el concepto, se materializó el sistema precisando los subsistemas de control de vacío que permite una redistribución de la matriz en las fibras de refuerzo del material compuesto durante el curado. El subsistema de tratamiento térmico se encarga de incrementar la temperatura del “composite” a fin de alcanzar las propiedades mecánicas necesarias. La automatización del proceso de curado de materiales compuestos genera óptimos resultados, consiguiendo un equipo versátil, útil y robusto. Finalmente, al emplear el equipo para el propósito que fue diseñado se evidencia la eficiencia que se tiene en el curado de materiales compuestos de manera automatizada frente a un curado manual a temperatura ambiente.

Palabras clave: Control de vacío; curado automatizado; materiales compuestos; tratamiento térmico.

Abstract

One of the priority areas for modern industry is to decrease technological dependence. Therefore, it is necessary to propose solutions to the needs that arise daily, such as process automation. For this reason, the design of an automated curing process for composite materials has been proposed in order to contribute research in composite materials. In order to achieve improved mechanical properties that an aeronautical product requires with the purpose to withstand the loads to which the material will be subjected during a flight operation, it is essential to realize an adequate performance of the curing process. For the development of the system, a conceptual methodology was used, proposing various solution alternatives, guiding the effort to sketch, size the equipment and choose the best product concept. Once the concept was defined, the system was materialized by specifying the vacuum control subsystems which allow a redistribution of the matrix in the reinforcing fibers of the composite material during curing. The heat treatment subsystem is responsible for increasing the temperature of the “composite” in order to reach the necessary mechanical properties. The automation of the composite material curing process



Fecha de Recepción: 01/10/2021 - Aceptado: 15/12/2021 – Publicado: 31/12/2021
ISSN: 2477-9253 – DOI: <https://dx.doi.org/10.24133/RCSD.VOL06.N04.2021.04>

generates optimal results, achieving a versatile, useful and robust equipment. Finally, when using the equipment for the purpose it was designed, the efficiency of the curing of composite materials in an automated way is evidenced compared to a manual curing at room temperature.

Keywords: Composite materials, automated curing, vacuum control, heat treatment.

I. Introducción

La Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE) ha cumplido a cabalidad su misión institucional de desarrollar la capacidad militar aeroespacial. Por esto se ha decidido incursionar en la investigación enfocada a desarrollar procesos automatizados en el área de materiales compuestos, cuya aplicación es muy amplia en sistemas aeronáuticos. Esta investigación pretende mejorar los procesos de manufactura y tratamiento a los materiales compuestos (MC) mediante la automatización de los mismos. Uno de los procesos críticos dentro del procesamiento de materiales compuestos se conoce como curado. Por tanto, el presente estudio será de valor para mejorar las tareas de reparación y mantenimiento, además de lograr una optimización de los recursos institucionales que se plantea realizarla a través de la automatización.

El control automático se refiere al mantenimiento de un valor deseado dentro de una cantidad o condición, midiendo el valor existente, comparándolo con el valor deseado, y utilizando la diferencia para proceder a reducirla. En consecuencia, el control automático exige un lazo cerrado de acción y reacción que funcione sin intervención humana. El elemento más importante de cualquier sistema de control automático es el lazo de control realimentado básico. El diseño de este sistema se sintetiza en la pirámide de automatización (Figura 1), en cuya base se sitúan los dispositivos de control más elementales, como sensores y actuadores, hasta el vértice superior en el cual encontramos el nivel de control y supervisión.

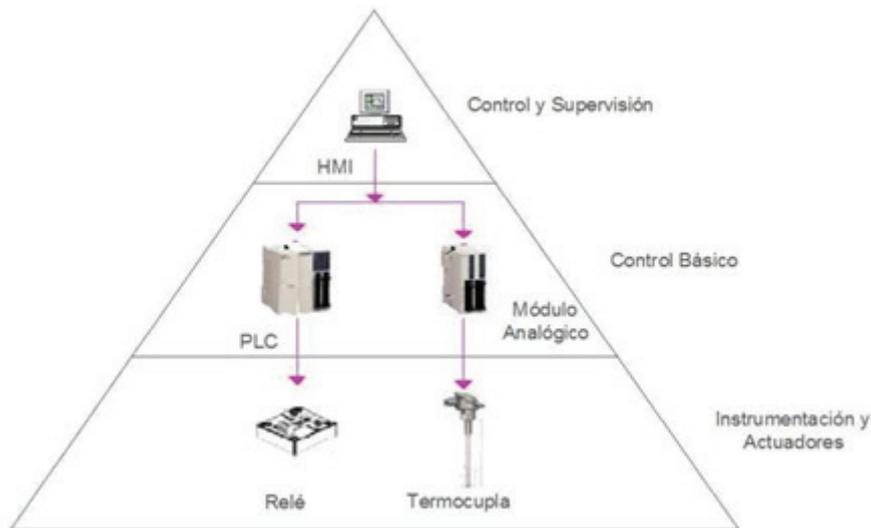


Figura 1: Pirámide de automatización en el sistema

La necesidad de disminuir la dependencia tecnológica en reparaciones de materiales compuestos para la caracterización del material compuesto, identificación de los daños estructurales más recurrentes y el crear componentes de material compuesto genera en la institución la imperiosa necesidad de investigar en este campo de la ciencia y desarrollar en la FAE material compuesto que posea iguales o mejores propiedades mecánicas que los productos de los fabricantes aeronáuticos y sean utilizados como elementos tipo parches de reparación. Los materiales compuestos son una combinación de dos o más elementos que tienen propiedades físicas, químicas y mecánicas específicas, los mismos que al combinarse obtienen propiedades mejoradas. Generalmente en el MC se distingue una fase continua, denominada matriz, que son resinas epóxicas, resinas cobaltosas unidas a la fase discontinua, llamadas fibras o refuerzos, entre las que se puede citar a la fibra de vidrio, fibra de carbono, fibra de aramida, entre otras.

El proceso de curado de materiales compuestos consiste de una etapa de conceptualización en donde se define los componentes (matriz-refuerzo) del MC, considerando las propiedades mecánicas que se necesita alcanzar, temperaturas requeridas y dimensiones del refuerzo y peso de la matriz a usarse. Sigue a la etapa de manufactura del MC donde se preparan moldes y se realiza los laminados correspondientes. Finalmente, se tiene la etapa propia de curado, en la cual aplicando presión de vacío se absorbe toda cantidad de aire en los laminados y se redistribuye de mejor manera la matriz (resinas) en el MC que coadyuva a obtener mejores propiedades mecánicas de los laminados y menor espesor. Paralelamente, se realiza la aplicación de energía calorífica que produce la solidificación de la matriz y la unión de refuerzo y matriz para concluir en un MC.

Realizar un control automático del proceso de curado del material laminado para reparaciones estructurales tiene su importancia, en vista que al controlar los procesos de vacío y tratamiento térmico los componentes laminados pueden obtener mejores propiedades mecánicas como materiales compuestos para reparaciones en aeronáutica.

El sistema portátil para el curado automático de MC consta de un gabinete eléctrico metálico robusto al cual se le adaptaron garruchas que permiten su transporte del taller al hangar o a la línea de vuelo para realizar reparaciones en sitio. Dispone de un cable de alimentación eléctrica, el mismo que permite energizar los subsistemas de vacío, tratamiento térmico, control e interfaz con el usuario. Precisamente al disponer de un HMI (Human Machine Interface), permite una fácil adaptación y comprensión del funcionamiento al operador, el mismo que, a partir de la información técnica (datasheet) de fibras y refuerzos a usarse, ingresa los datos de temperatura requerida para el curado automático del MC. El programa de curado de materiales compuestos requiere de la generación de presión de vacío permanente a fin de redistribuir de mejor manera la resina interlaminar que se coloca en los tejidos del refuerzo constante, y a su vez realiza el tratamiento térmico controlado en el laminado. Con este proceso es posible conseguir mejorar las propiedades mecánicas como la resistencia a la flexión, resistencia a la tensión y compresión, resistencia al corte a las que son sometidos componentes que se constituyen de materiales compuestos, tales como las alas de una aeronave en vuelo y componentes aeronáuticos menores

II. Materiales y Métodos

2.1. Diseño del sistema

El desarrollo del sistema busca alcanzar principalmente un diseño óptimo, modularidad, facilidad de uso y seguridad industrial, para lo cual fue necesario estudiar las especificaciones técnicas de

los materiales previo al diseño e implementación de la maleta portátil para el curado del MC. Así también, se analizó el software que se utiliza en el desarrollo del control y junto al HMI (Human Machine Interface) se busca un equipo robusto desde el punto de vista físico estructural, y a la vez versátil desde la perspectiva del usuario en el manejo del sistema.

2.1.1 Modularidad

Los equipos y sistemas del sector industrial día a día se proyectan hacia la reducción de los tamaños físicos de sus componentes y personalización y mejora de los diversos sistemas. Una manera óptima de lograr este cometido es por medio de modularidad, que permite analizar y dar mantenimiento al sistema de manera que no se interrumpa el funcionamiento de los demás subsistemas, teniendo en cuenta constantemente las características establecidas por el fabricante de manera independiente.

2.1.2 Subsistema de vacío

El sistema de vacío se diseñó de tal manera que el control de los parámetros: presión y caudal, logren un funcionamiento eficiente del mismo. El subsistema de vacío para el curado de los materiales compuestos está conformado por una bomba de vacío, acumulador de vacío, interruptor de presión de vacío (vacuóstato), instrumento de medición de presión de vacío (vacuómetro), ventosas, mangueras de conexión y bolsas de vacío, además de algunos accesorios (sellos, mangueras y racores) como se observa en la Figura 2. Estos permiten establecer las condiciones físicas necesarias para realizar el curado de materiales compuestos por vacío.

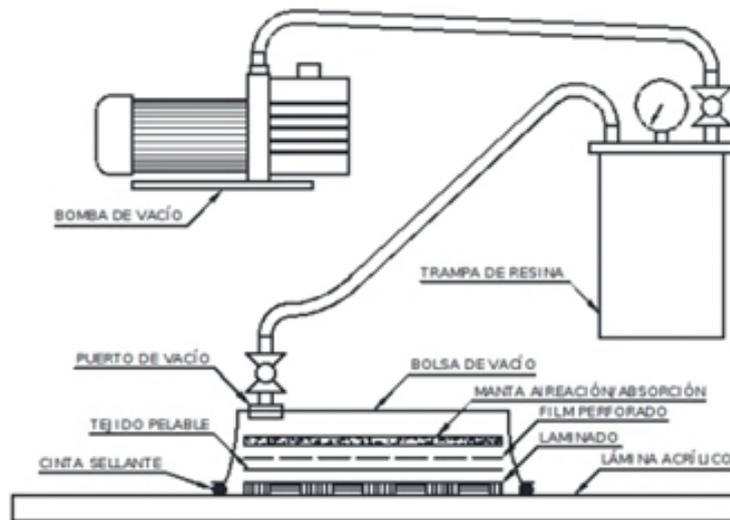


Figura 2: Esquema general de un sistema de bolsa de vacío

Nota. Principales componentes de un subsistema de vacío. Tomado de “La técnica de bolsa de vacío en cámara de vacío para la fabricación de materiales compuestos de matriz epoxi?”. (p. 24), por Arruti. 2016. Revista Ingeniería.

Para una optimización de los equipos se realizó el levantamiento de la información de la cantidad de tiempo que la bomba permanece prendida en los procesos de curado, y se determinó que la bomba permanece encendida como mínimo de 30 a 45 minutos y alcanza fácilmente los 100 ° C de temperatura en funcionamiento constante, y al ser refrigerada por aire se ve limitado su tiempo de vida útil. Así se realizaron pruebas de campo para determinar la tendencia al incremento de temperatura durante un periodo de 20 minutos, obteniéndose los valores definidos en la Tabla 1.

Tabla 1: Incremento de temperatura de bomba de vacío Becker VT 4.8 en funcionamiento continuo

ORD	TIEMPO (min)	Temperatura (° C)
1	1	36
2	2	44
3	4	57
4	6	68
5	8	77
6	10	84
7	12	90
8	15	97
9	18	99
10	20	99

Como se evidencia, la temperatura de operación sobre los 15 minutos se mantiene casi constante sobre los 95 ° C, lo cual está limitando el tiempo de vida útil de la bomba. Es por este motivo que se diseñó un circuito de control electrónico-neumático que es automatizado por la acción del vacuóstato, mismo que define una presión de vacío mínima a la que se desea prender la bomba y otra presión de vacío máxima que bordeará los 29 - 30 pulgadas de Mercurio (Hg) a nivel del mar, y varía en función de la altitud del lugar de prueba. Siendo esto una parte fundamental pero aún no suficiente, fue necesario utilizar un tanque reservorio de vacío, el cual acumula el vacío interior a través de la operación de la bomba para posteriormente alimentar y producir o mantener el vacío a los enfundados del laminado de materiales compuestos.

De esta forma se optimizó el funcionamiento de la bomba de vacío, incrementando el tiempo de vida útil de la misma y se evita el recalentamiento de la bomba que se evidenciaba cuando se operaba de manera manual. En la Figura 3 se puede observar el diseño de la conexión neumática del subsistema de vacío para corroborar lo antes mencionado.

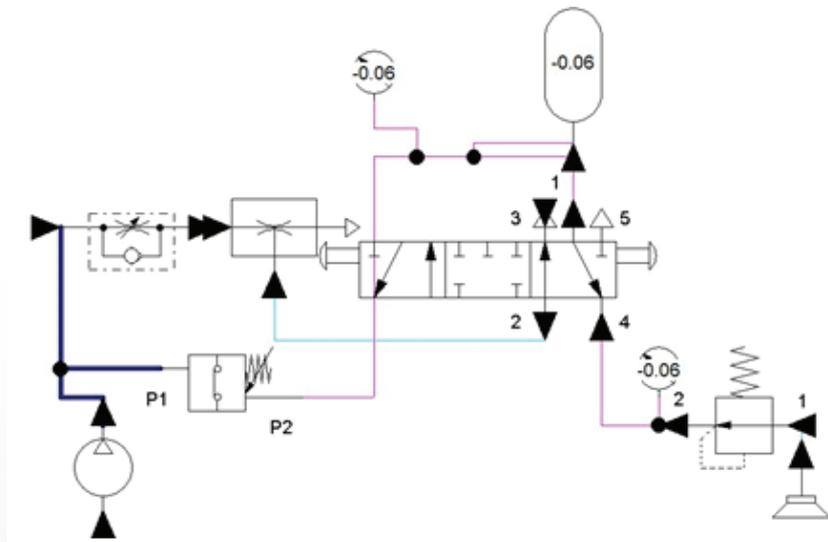


Figura 3: Diseño de circuito neumático

La bomba de vacío que se usa es una bomba de vacío de paletas sin aceite y refrigerado por aire cuyas características técnicas y de operación se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2: Características técnicas de la bomba de vacío

ORD	MAGNITUD	VALOR	UNIDADES
1	TENSIÓN NOMINAL	120	VOLTIOS
2	POTENCIA	420	WATTS
3	FASE	1	
4	MASA	11,5	KILOGRAMOS
5	MÁXIMO VOLUMEN DE ASPIRACIÓN	9,1	METROS CÚBICOS / HORA
6	REVOLUCIONES MÁX.	3200	RPM

2.1.3 Acumulador de vacío

Con la finalidad de brindar a la bomba de vacío un tiempo apreciable de reposo y no permanezca encendida durante el proceso de curado de materiales compuestos, se utiliza un tanque acumulador de vacío metálico para conectar a la bolsa de vacío que contiene el laminado de materiales compuestos.

2.1.4 Vacuómetro

El vacuómetro es el instrumento de medición que se utiliza para medir presiones de vacío o negativas. La presión de vacío es inferior a la presión atmosférica.

a) Vacuóstato

El vacuóstato controla automáticamente la acción de una bomba de vacío para prenderla y apagarla según se disponga de los valores de presión predeterminados mecánicamente a través de tornillos.

b) Mangueras

Para la conducción del aire en el proceso de vacío es necesario utilizar mangueras de poliuretano para conexión entre la bomba, el tanque acumulador de vacío, el proceso enfundado de laminado, el vacuóstato y vacuómetro.

c) Ventosas

Las ventosas son componentes que, tras aplicar una presión negativa del aire (vacío), se adhieren a las superficies poco porosas. La diferencia de presión entre la atmósfera en el exterior de la ventosa y la cavidad de baja presión en el interior de la estructura, es lo que mantiene la ventosa sujeta a la superficie.

2.1.5 Subsistema de tratamiento térmico

El subsistema de tratamiento térmico consta de los actuadores principales que es la manta térmica, la cual, por conducción directa de calor, incrementa la temperatura del laminado de matriz y refuerzo

combinados; se realiza el curado apegado a las rampas de temperatura establecidas para alcanzar unas propiedades mecánicas específicas, un esquema se observa en la Figura 4.

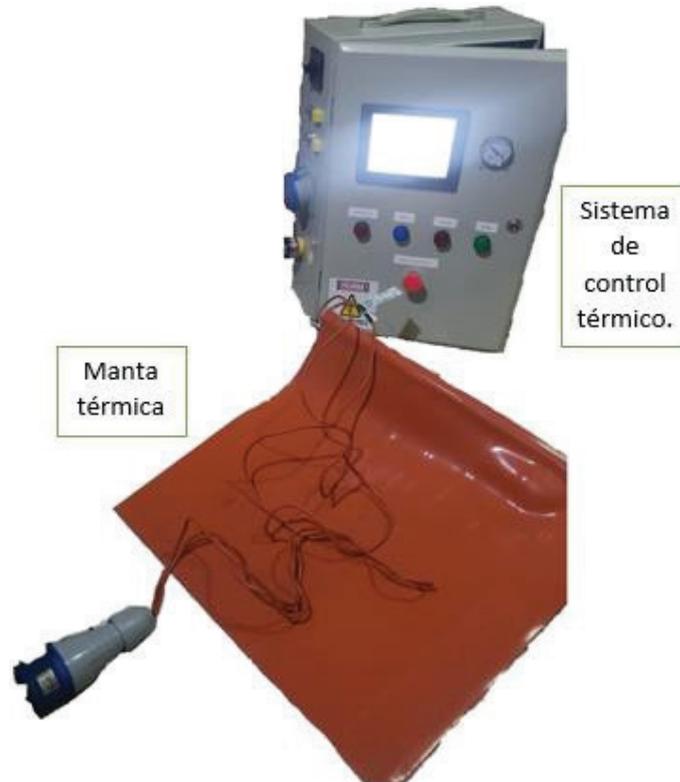


Figura 4: Esquema general del sistema térmico
Nota. Principales componentes de un subsistema de vacío.

Para la activación de las mantas, la maleta de curado automático permite el paso de corriente alterna a través de un SSR (Relé de Estado Sólido) que hace las veces de interruptor para la alimentación de la misma de acuerdo a la señal de salida emitida desde el Controlador Lógico Programable (PLC).

a) Manta Térmica

La Manta Térmica está constituida por resistencias eléctricas flexibles que están completamente cubiertas por una capa de silicón que ayuda a redistribuir el calor generado durante su alimentación eléctrica, transformando la energía eléctrica en energía térmica. La manta térmica o calefactora, dispone de un cordón eléctrico de alimentación con cables que disponen de un aislante especial capaz de soportar temperaturas superiores a los 150 ° C.

b) Termopar tipo J

Un termopar es el tipo de sensor de temperatura más usado en la industria. Generalmente está formado por dos conductores de distinto material, cuyo extremo se encuentra unido mediante una soldadura. (Alzate, Montes, & Silva, 2007).

c) Desarrollo del Algoritmo

El desarrollo del algoritmo parte desde la gráfica mostrada en la Figura 5, la cual está formada por tres rampas de ascenso temperatura, cuatro estados estacionarios de temperatura, y una rampa de descenso de temperatura. Se puede observar que el primer estado estacionario corresponde a un estado inicial, que puede ser interpretado como la temperatura ambiente hasta un instante de inicio del sistema. Secuencialmente se observa las rampas de temperatura de curado del MC con sus consecuentes temperaturas de estado estable.

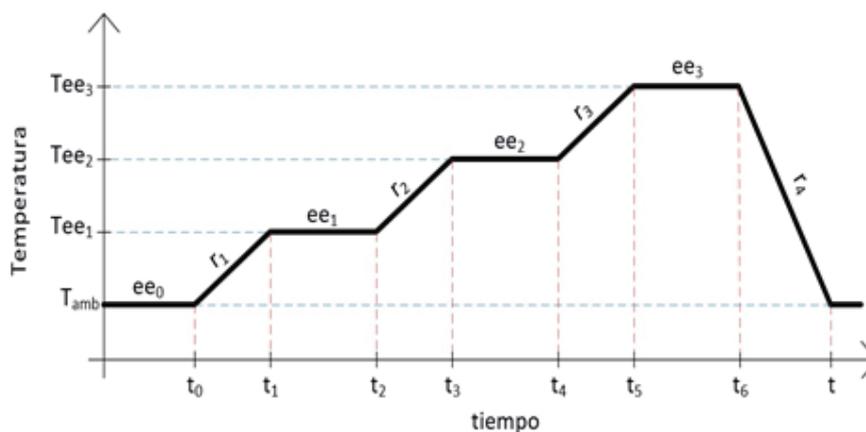


Figura 5: Rampas del Sistema de Curado. Fuente: Elaboración propia

Se optó por el diseño de un sistema que simule de manera digital el comportamiento de una rampa analógica. Por lo tanto, cada rampa de incremento de temperatura está conformada por un grupo de escalones, tal como se puede observar en la Figura 6.

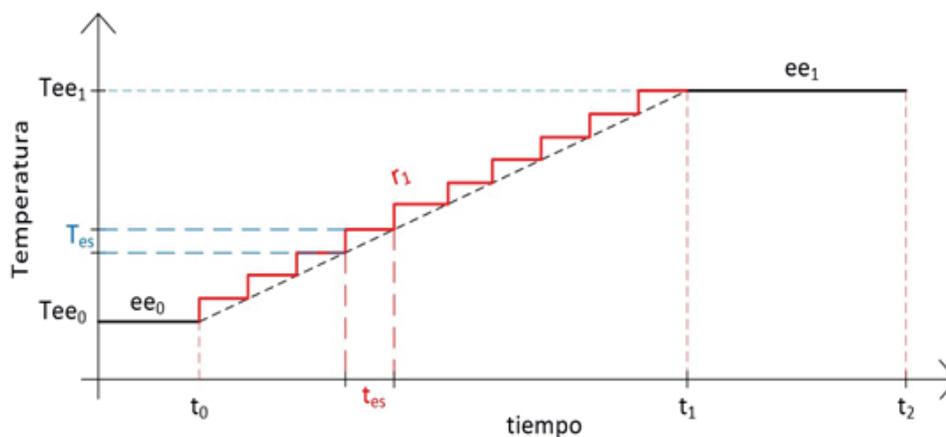


Figura 6: Rampas del Sistema de Curado.

La principal característica de estos escalones es que todos tienen el mismo incremento de temperatura en un intervalo de tiempo, cuya duración es la misma para todos los que conforman la simulación de rampa.

d) Control PID Temperatura

Los estados estacionarios de temperatura corresponden a los valores ingresados por el usuario desde la interfaz de usuario HMI, en los cuales la temperatura se mantiene estable por un determinado intervalo de tiempo. Para que las mantas térmicas mantengan los estados estacionarios, es vital el uso de un controlador, y se empleó un controlador PID.

2.1.5 Subsistema de alojamiento e interfaz de usuario

En el diseño y elección de los sistemas de alojamiento e interfaz se partió del criterio de uso de estándares, funcionalidad y utilidad. Debido a la aplicación del sistema, se requiere tener características de portabilidad, lo cual condiciona y limita el peso y dimensiones del equipo. Por esto, se ha optado por el uso de un equipo de alojamiento estándar en la industria para el tipo de aplicaciones como esta. Únicamente se ha realizado modificaciones correspondientes para tomacorrientes, puntos de conexión neumático, instrumentos de medición y HMI. El sistema de alojamiento seleccionado es un gabinete metálico de dimensiones 400 x 600 x 200 [mm].

a) Interfaz con el usuario

En vista de que el equipo será operado por personal vario, se necesita una HMI que sea interactiva, fácil de entender y que cumpla con los requerimientos mínimos de seguridad, confiabilidad y eficiencia. Este dispositivo permite hacer diseños de HMI que son bastante gráficos y detallados del proceso que se está realizando y de las acciones que se ejecutan. Además, al ser una pantalla táctil, da mucha accesibilidad y facilidad de uso con cualquier tipo de operador. Como se observa en la Figura 7.



Figura 7: Pantallas de interfaz con el usuario HMI. Fuente: Elaboración propia

2.2. Verificación experimental

Para evaluar las virtudes del equipo se planteó el análisis de dos variables presentes en el proceso de curado de materiales compuestos: presión de vacío y tratamiento térmico para lo cual se evaluaron los datos a través del diseño experimental factorial, como se tiene en la Tabla 3, que permite el estudio del efecto de cada factor sobre las salidas a analizar del experimento. Así con dos factores y dos niveles en cada factor, el experimento factorial tendrá en total de cuatro combinaciones de tratamiento, y será un diseño factorial de 2×2 .

Tabla 3: Variables DOE factorial 2x2

FACTORES	NIVELES	
TEMPERATURA	65° C	50° C
PRESIÓN DE VACÍO	19 In. Hg	17 In. Hg

En la Tabla 4 se puede observar la matriz de combinaciones de los factores antes mencionados para su posterior ensayo a tracción para definir las propiedades mecánicas de las probetas.

Tabla 4: Matriz de combinaciones de los factores

COMBINACIÓN	TEMPERATURA	PRESIÓN DE VACÍO
1	65° C	19 In. Hg
2	65° C	17 In. Hg
3	50° C	19 In. Hg

Por otro lado, las propiedades mecánicas a analizar posterior al ensayo de tracción que son las variables de salida en las que se enfoca el análisis después de la aplicación del diseño experimental son:

- Esfuerzo último de tensión;
- Módulo de elasticidad.

Una vez diseñado y fabricado el sistema portátil para el curado automático de materiales compuestos, se procede a emplear el equipo y realizar el curado de los materiales compuestos.

2.2.1 Preparación de las probetas

Inicialmente se define la cantidad de probetas necesarias para el ensayo a tracción. Para ello es necesario remitirse a la norma ASTM D3039/D3039M-17 “Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”. Esta norma entrega los lineamientos de la geometría y cantidad necesaria de probetas a ensayarse como se observa en la Tabla 5. (American Society for Testing and Materials, 2019).

Tabla 5: Parámetros de fabricación de probetas

PARÁMETRO	ESPECIFICACIÓN
Forma	Sección transversal rectangular constante
Largo mínimo	Agarre de las mordazas + 2 veces el ancho
Ancho	A requerimiento
Tolerancia del ancho	±1% del ancho
Espesor	A requerimiento
Tolerancia del espesor	±4% del espesor
Espesor del tab	A requerimiento
Material del tab	A requerimiento
Orientación de la fibra del tab	A requerimiento
Ángulo del tab	5° a 90°, inclusive

Nota. Tomado de Norma ASTM D3039/D3039M-17 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials 1. American Society for Testing and Materials. 2019. (<https://doi.org/10.1520/D3039>)

De acuerdo a la norma ASTM D3039/D3039-17, se ensayaron 5 probetas efectivas de dimensiones 130x15 [mm], esto debido a que se tendrá una longitud de agarre de la mordaza de 50x15 [mm]. (American Society for Testing and Materials, 2019).

Se realizó el laminado utilizando como refuerzo la fibra de vidrio 800 Roving y matriz la resina de Poliéster distribuyendo equitativamente la resina sobre la superficie completa de las fibras para su posterior enfundado y sellado del material para aplicar vacío junto al tratamiento térmico para completar el proceso de curado a través del presente proyecto, como se observa en la Figura 8.



Figura 8: Proceso de laminado y preparación para el curado. A) Laminación. B) Sellado y enfundado. C) Colocación de mantas térmicas. D) Programación del curado en la maleta de curado automático

2.2.2 Ensayo a tracción

El ensayo a tracción, como se observa en la Figura 9, se realizó con la ayuda de una máquina de Ensayos Universales SHIMADZU AGS-X Plus de acuerdo con los lineamientos de la Norma ASTM D3039/D3039M-17, la cual indica que se debe realizar el ensayo a una velocidad de cabezal de 2 [mm/min], con la realización del ensayo de al menos 5 muestras válidas.



Figura 9: Ensayos a tracción. A) Máquina de ensayos universales SHIMADZU. B) Probeta durante el ensayo a tracción. C) Probeta post-ensayo

Una vez terminados los ensayos de tracción, se reciben los datos obtenidos del software que almacena y graba las mediciones, como resultado se obtiene el gráfico Fuerza vs. Deformación de la probeta.

III. Evaluación de Resultados y Discusión

De acuerdo a los datos obtenidos anteriormente, se realiza una organización de la información y el cálculo del esfuerzo a tracción, definiendo la resistencia última a la tensión (sut), la resistencia a la rotura y el módulo de Elasticidad de las probetas. A continuación, se detallan los valores obtenidos de los 25 ensayos efectivos a tracción para calcular las propiedades mecánicas como se observa en la Tabla 6.

Tabla 6: Datos obtenidos durante el ensayo a tracción

ORDEN ENSAYOS	CODIGO	FUERZA MÁXIMA [N]	FUERZA ROTURA [N]	LONGITUD [mm]	ESPESOR [mm]	AREA SECCION (LxE) [mm ²]	ΔL [mm]
1	2500_A1	11492	10618	15,07	2,20	33,15	4,41
2	2500_A2	12081	11805	15,00	2,17	32,55	5,90
3	2500_A3	10659	10526	14,95	2,24	33,49	5,12
4	2500_A4	10813	10733	14,93	2,20	32,85	4,93
5	2500_A5	10758	10009	14,99	2,13	31,93	6,59
6	5017_B1	11492	10618	15,10	1,77	26,73	4,41
7	5017_B2	10965	10713	15,15	1,86	28,18	4,34

8	5017_B3	11245	10758	15,30	1,86	28,46	4,18
9	5017_B4	9642	8934	14,76	1,84	27,16	3,88
10	5017_B5	10342	9485	15,28	1,87	28,57	3,82
11	5019_C1	10671	10520	15,07	1,80	27,13	4,26
12	5019_C2	10403	10121	14,79	1,72	25,44	4,55
13	5019_C3	10171	9694	15,07	1,93	29,09	4,51
14	5019_C4	10837	10744	15,05	1,93	29,05	3,70
15	5019_C5	9809	9472	14,91	1,94	28,93	3,85
16	6517_D1	9762	9445	15,16	1,82	27,59	3,96
17	6517_D2	10403	10121	14,81	1,78	26,36	4,55
18	6517_D3	10853	10809	14,53	1,74	25,28	4,78
19	6517_D4	9912	9758	14,75	1,86	27,44	3,96
20	6517_D5	12035	11855	15,19	1,88	28,56	5,06
21	6519_E1	9762	9445	15,07	1,94	29,24	3,96
22	6519_E2	12446	12446	15,27	1,99	30,39	4,37

Con los datos generados se procede al cálculo de las propiedades mecánicas de esfuerzo de tracción, Deformación unitaria tomando en consideración que la longitud inicial de la probeta es la de la zona de trabajo, es decir 30[mm]; y finalmente se presenta el Módulo de elasticidad del material, señalados en la Tabla 7.

Tabla 7: Resumen de Propiedades mecánicas obtenidas del ensayo a tracción

ORDEN ENSAYOS	CODIGO	ESFUERZO O ÚLTIMO TENSIÓN (Sut)	ESFUERZO A LA ROTURA	$\epsilon = \Delta L/L$	$E = \sigma/\epsilon$ [Mpa]
1	2500_A1	346,62	320,26	0,15	2357,99
2	2500_A2	371,15	362,67	0,20	1887,21
3	2500_A3	318,29	314,32	0,17	1865,00
4	2500_A4	329,20	326,77	0,16	2003,26
5	2500_A5	336,94	313,48	0,22	1533,86
6	5017_B1	429,98	397,28	0,15	2925,01
7	5017_B2	389,12	380,18	0,14	2689,77
8	5017_B3	395,14	378,03	0,14	2835,96
9	5017_B4	355,03	328,96	0,13	2745,06
10	5017_B5	361,94	331,95	0,13	2842,48
11	5019_C1	393,39	387,82	0,14	2770,33
12	5019_C2	408,94	397,86	0,15	2696,32
13	5019_C3	349,70	333,30	0,15	2326,15
14	5019_C4	373,09	369,89	0,12	3025,07
15	5019_C5	339,11	327,46	0,13	2642,44
16	6517_D1	353,81	342,32	0,13	2680,37
17	6517_D2	394,62	383,93	0,15	2601,92
18	6517_D3	429,27	427,53	0,16	2694,19

19	6517_D4	361,29	355,68	0,13	2737,05
20	6517_D5	421,43	415,13	0,17	2498,63
21	6519_E1	333,91	323,06	0,13	2529,59
22	6519_E2	409,58	409,58	0,15	2811,76
23	6519_E3	387,89	383,24	0,14	2757,50
24	6519_E4	418,85	418,85	0,15	2817,35
25	6519_E5	362,15	361,40	0,12	2984,76

3.1. Descripción del DOE factorial completo

Para el desarrollo del diseño experimental por método factorial completo se considera inicialmente la combinación de las dos variables (temperatura y presión de vacío) con los dos niveles definidos en cada una.

Se crea un análisis estadístico DOE de tipo factorial, se selecciona el tipo de diseño de 2 niveles, 2 factores con número de réplicas o ensayos que se hicieron 5. A continuación, se genera la tabla de combinaciones y se realiza el análisis DOE factorial completo.

3.2. Análisis de resultados

Posterior al ensayo de tracción se analizaron visualmente las probetas y se verificó que todas se encuentren dentro de lo establecido en la norma de ensayos a tracción ASTM D3039/D3039M-17 “Método de Prueba Estándar para propiedades de Tracción de materiales compuestos de Matriz Polimérica”, evidenciándose que las probetas efectivas se rompieron en el límite de la zona de trabajo (American Society for Testing and Materials, 2019).

Los resultados se analizaron mediante inferencia estadística, usando los datos obtenidos en los diferentes ensayos para generalizar un comportamiento de acuerdo a cada una de las condiciones impuestas y generando una predicción de fidelidad de los valores encontrados, evitando de esta manera errores o incertidumbres subjetivas.

Los métodos utilizados son: Diseño experimental completo para las cuatro combinaciones bajo el curado en condiciones forzadas y el análisis de Varianza ANOVA con los cinco diferentes tipos de laminados creados.

Inicialmente se realizará el análisis DOE factorial de los diferentes factores y condiciones dispuestas en la preparación de los laminados para definir la incidencia de los factores en el Esfuerzo último a la tensión.

En la Figura 11 se observa que los factores Temperatura y presión de vacío no son significativos para la variación del Esfuerzo último a la tensión obtenido del ensayo a tracción. Únicamente se puede destacar que con los niveles de presión de vacío seleccionados presenta mayor incidencia que los niveles de temperatura.

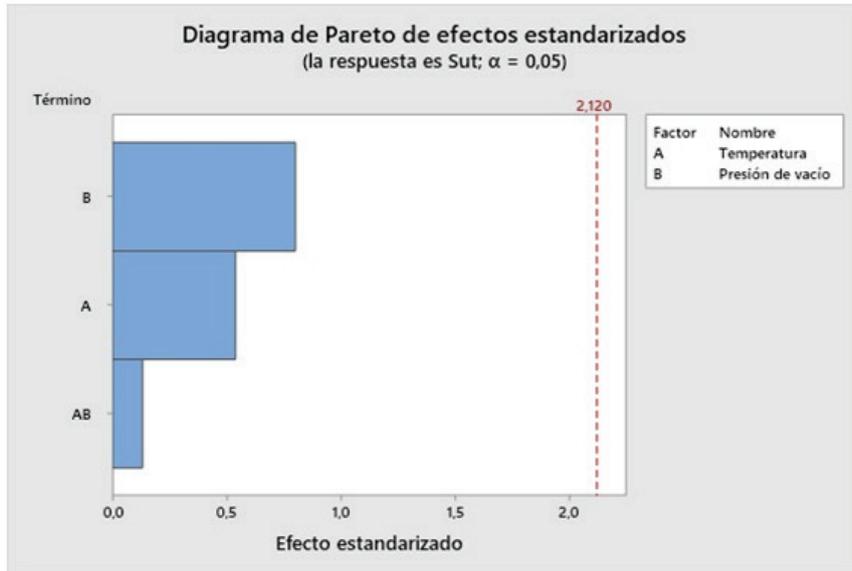


Figura 10: Análisis de Pareto considerando incidencia de factores en Esfuerzo último a la tensión.

A continuación, se realizará el análisis DOE de los diferentes factores y condiciones dispuestas en la preparación de los laminados para definir comportamiento del Módulo de elasticidad.

En la Figura 12 se observa que los factores temperatura y presión de vacío no son significativos para la variación del esfuerzo último a la tensión obtenido del ensayo a tracción. Pero observando el diagrama se observa que una interacción entre estos factores adquiere mayor importancia en el Módulo de elasticidad de las probetas.

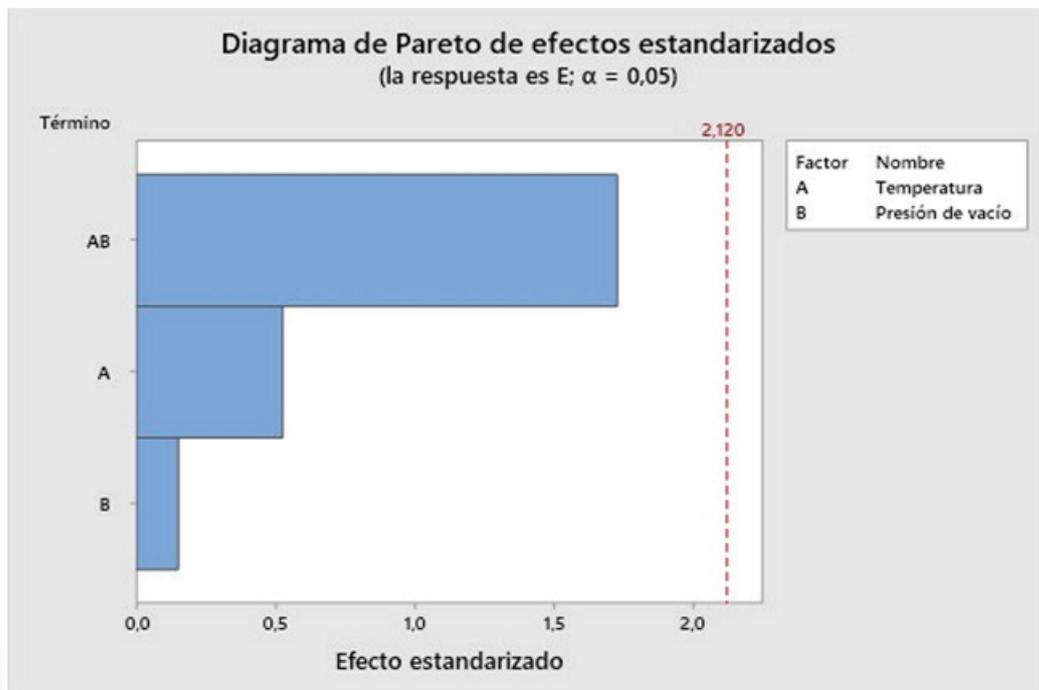


Figura 11: Análisis de Pareto considerando incidencia de factores en el Módulo de elasticidad

3.2.1 Análisis ANOVA

Este tipo de análisis busca definir cuál de las combinaciones y laminados ensayados presentan las mejores prestaciones respecto a las variables de salida analizadas. Inicialmente se realizará el análisis ANOVA de los diferentes factores y condiciones dispuestas en la preparación de los laminados para definir la incidencia en el Esfuerzo último a la tensión.

En la Figura 13 se observa claramente que la combinación Temperatura 65 ° C y Presión de vacío 17 In. Hg. (6517) genera el mayor Esfuerzo último a la tensión, definiéndolo como el más resistente alcanzando un valor de 392.086 [Mpa]. Cabe destacar que las cuatro combinaciones con tratamiento térmico y aplicación de presión de vacío presentan evidentemente mejores resistencias mecánicas a la tensión que las probetas curadas a temperatura ambiente que en promedio alcanzó 340.442 [Mpa].

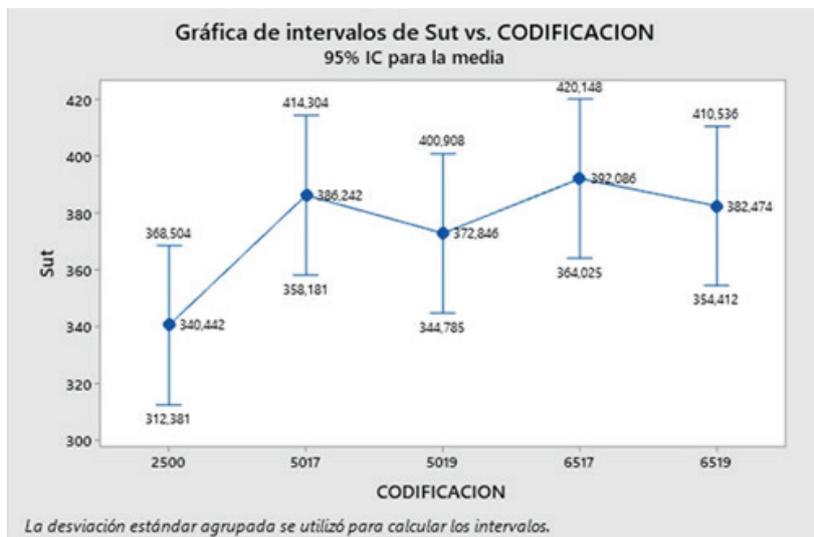


Figura 12: Gráfica de valores obtenidos de Esfuerzo último a la tracción en 5 tipos curados

En la Figura 14 se observa que la combinación 5017 (Temperatura 50 ° C y Presión de vacío 17 In. Hg) genera el mayor Módulo de elasticidad 2807.66 [MPa] en promedio, lo que se traduciría sería a causa de tener la menor deformación unitaria que se concluye como la más frágil.

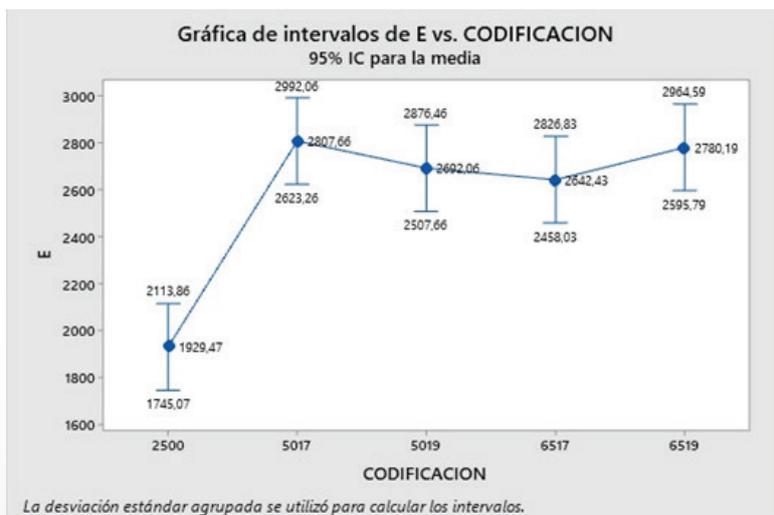


Figura 13: Gráfica de valores obtenidos para módulo de elasticidad 5 tipos laminados

3.3. Discusión

Los métodos usados para el análisis de resultados de los ensayos mecánicos a tracción son: Diseño experimental completo para las cuatro combinaciones bajo el curado en condiciones forzadas y el análisis de Varianza ANOVA, con los cinco diferentes tipos de laminados creados.

Inicialmente se realizará el análisis DOE factorial de los diferentes factores y condiciones dispuestas en la preparación de los laminados para definir la incidencia de los factores en el esfuerzo último a la tensión.

En el análisis del DOE se puede inferir que no es dependiente estrictamente a uno de los factores de entrada, como presión de vacío y el tratamiento térmico, los cuales no tienen una incidencia definitoria en los resultados obtenidos del esfuerzo último a la tensión que soportan las probetas de materiales compuestos, con lo que se define que las variables de entrada en los valores definidos al inicio, por lo que serían trabajos a futuro de realizar el curado de los materiales compuestos con otros valores que evidenciarán la incidencia de las variables en las propiedades de los materiales compuestos. Únicamente se puede destacar que con los niveles de presión de vacío seleccionados (17 y 19 pulgadas de Mercurio) presenta mayor incidencia que los niveles de temperatura.

El comportamiento del Módulo de elasticidad, considerando las variables de entrada temperatura y presión de vacío, no son significativos para la variación de este parámetro. Sin embargo, se evidencia que una interacción entre estos factores que adquiere mayor importancia en el Módulo de elasticidad de las probetas.

En el análisis ANOVA realizado se definieron las combinaciones de factores de entrada que presentaron mejores resultados en los factores de salida del análisis (Esfuerzo a la tensión y Módulo de elasticidad) en los laminados ensayados presentan las mejores prestaciones respecto a las variables de salida analizadas.

Respecto al esfuerzo último a la tensión se observa claramente que la combinación Temperatura 65 ° C y Presión de vacío 17 In. Hg. (6517) genera el mayor Esfuerzo último a la tensión con un valor de 392.086 [Mpa]. Adicionalmente es importante definir que la combinación 6519 presenta menor esfuerzo último a la tensión, lo cual se entendería que aparentemente esta combinación brinda menores prestaciones mecánicas. Cabe destacar que las cuatro combinaciones con tratamiento térmico y aplicación de presión de vacío presentan evidentemente mejores resistencias mecánicas a la tensión que las probetas curadas a temperatura ambiente que en promedio alcanzó 340.442 [Mpa].

Así también se concluye que la combinación 5017 (Temperatura 50 ° C y Presión de vacío 17 In. Hg) genera el mayor Módulo de elasticidad 2807.66 [MPa] en promedio, lo que se traduciría sería a causa de tener la menor deformación unitaria que se concluye como la más frágil. Así también cabe destacar que las cuatro combinaciones con tratamiento térmico y aplicación de presión de vacío presentan mayor módulo de elasticidad que las probetas curadas a temperatura ambiente, que en promedio alcanzó 1929.47 [MPa], evidenciando así que esta última es la más dúctil entre todas.

Valga este estudio para realizar una comparación con probetas obtenidas del borde de ataque del ala del avión A-29B Supertucano de la Fuerza Aérea Ecuatoriana, en donde se realizaron diversos ensayos mecánicos del material del componente aeronáutico antes mencionado, obteniéndose en promedio de los ensayos a tracción realizados un esfuerzo último de 365.46 [MPa]. (Carvajal, 2020)

Con este antecedente, y realizando una comparación con los resultados obtenidos con las diferentes combinaciones de curado de los laminados de fibra de vidrio Roving 800 y resina Poliéster, se obtuvo valores de esfuerzo último a la tracción entre 372 y 392 [MPa] dependiendo de la combinación de las variables presión de vacío y temperatura de curado, como se encuentra detallado en la figura 13. Con esto se puede concluir que el proceso de curado utilizando el sistema portátil automático para el curado de materiales compuestos brinda alta eficiencia para obtener características mecánicas similares a las que se tiene en aeronaves que operan actualmente en la Fuerza Aérea Ecuatoriana.

IV. Conclusiones

Se realizó la revisión de Normas ASTM que definen la metodología de ensayos para definir las propiedades mecánicas de los materiales compuestos, usándose directamente en los ensayos realizados la norma ASTM D3039/D3039M-17 que se focaliza en el ensayo a tracción.

- Se diseñó e implementó un circuito de control electrónico-neumático al subsistema de vacío para optimizar el funcionamiento de la bomba de vacío, incrementando el tiempo de vida útil de la misma.
- Se diseñó e implementó un circuito de potencia a través del uso de un Relé de Estado sólido (SSR) que recibe la señal de un controlador PID, para una alimentación eléctrica controlada durante el incremento de temperatura por las rampas de ascenso de los procesos de curado y en los períodos prolongados donde se requiere una temperatura estable.
- Se diseñó e implementó una Interfaz Humano – Máquina (HMI) para el manejo de la pantalla de manera intuitiva, para el fácil manejo por parte de cualquier usuario induciendo fácilmente el ingreso de datos y evitando errores que afecten al proceso de curado de materiales compuestos.
- Se realizó el laminado de MC en fibra de vidrio y resina de poliéster y el curado mediante el sistema portátil automático, obteniéndose propiedades mecánicas en el material similar a las existentes en el borde de ataque del avión A-29B.

Referencias Bibliográficas

- Alzate, E., Montes, J., & Silva, C. (2007). Medición de temperatura: sensores termoeléctricos. *Medición de temperatura: sensores termoeléctricos*, 1, 2.
- American Society for Testing and Materials. (2019). Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials 1. <https://doi.org/10.1520/D3039>
- Aranburu, A., & Vallejo, F. (2019). Desarrollo y automatización de nuevo proceso de fabricación de composites basado en preimpregnados de curado ultravioleta. *Revista de La Asociación Española de Materiales Compuestos*, 3, 21–28. <http://revista.aemac.org>
- Arruti, R. (2016, January). La técnica de bolsa de vacío en cámara de vacío para la fabricación de materiales compuestos de matriz epoxi. *Revista Ingeniería*, 22–29.
- Becker. (2020). VT 4.8. <https://www.becker-international.com/de/en/Briskheat>, C. (n.d.- d). ACR3 HOT BONDERS. 106–108. <https://www.briskheat.com/index.php/downloads/dl/file/id/55/>
- Briskheat, C. (n.d.). ACR ® 3 Hot Bonder Instruction Manual (Issue 24, pp. 29–56). <https://www.briskheat.com/index.php/downloads/dl/file/id/56/>
- Carvajal, A. B. (2020). Caracterización del material compuesto del borde de ataque de la pieza p/n 314-19390-402 del avión A-29 Supertucano de la Fuerza Aérea Ecuatoriana. In Espe. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Criollo, L., & Yáñez, P. (2019). Modelación computacional y determinación de propiedades mecánicas del perfil alar del avión DA-20-C1 de la Fuerza Aérea Ecuatoriana.”. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Dávila, J., Galeas, S., Guerrero, V., Pontón, P., Rosas, N., Sotomayor, V., & Valdivieso, C. (2011). *Nuevos Materiales: Aplicaciones Estructurales E Industriales*.
- Herrera, L., & Vasquez, E. (Julio de 2011). Diseño, programación e instalación de un sistema de control de supervisión y adquisición de datos de un horno lindberg para el laboratorio de tratamientos térmicos. Quito, Pichincha, Ecuador: EPN.
- Kalpakjian, S., & Steve, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México: Pearson Education.
- Mezzacasa, R., Segura, M., Irastorza, X., Harismendy, Y., & Sehrschoon, H. (2019). Fabricación flexible, eficiente y automatizada de componentes en composite de altas prestaciones. *Revista de La Asociación Española de Materiales Compuestos*, 3, 30–34. <http://revista.aemac.org>
- Núñez, M., & Pantoja, G. (2008). Diseño y construcción de un banco de pruebas para control de vacío (liposuccionador). Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Recuperado el 13 de marzo de 2021, de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/1688/1/15T00396.pdf>