



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v8i2.2696>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Fabricación de los Fan Blades de materiales compuestos de un motor Turbofan de uso Aeronáutico

Manufacture of composite Fan Blades for a Turbofan engine for aeronautical use

Fabricação das Pás do Ventilador composto de um motor Turbofan para uso aeronáutico

Fausto Andrés Jácome-Guevara^I
fajacome1@espe.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-3470-5813>

Luis Angel Coello-Tapia^{II}
lacoello@espe.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-1496-0331>

Jonathan Raphael Zurita-Caisaguano^{III}
jrzurita1@espe.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-4286-7596>

Diego Israel Bustillos-Escola^{IV}
dibustillos@espe.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-9112-513X>

Correspondencia: fajacome1@espe.edu.ec

***Recibido:** 24 de marzo del 2022 ***Aceptado:** 14 de abril de 2022 * **Publicado:** 20 de abril de 2022

- I. Magister en Ingeniería Mecánica mención Manufactura, Ingeniero Automotriz, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Latacunga, Ecuador.
- II. Ingeniero Aeronáutico, Tecnólogo en Mecánica Aeronáutica mención Motores, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Latacunga, Ecuador.
- III. Tecnólogo en Mecánica Aeronáutica mención Motores, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Latacunga, Ecuador.
- IV. Magister en Industria 4.0, Ingeniero en Mecatrónica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Latacunga, Ecuador.

Resumen

El presente artículo tiene por objetivo presentar y analizar diferentes aspectos en la fabricación de los fan blades de materiales compuestos de un motor Turbofan de uso Aeronáutico, a través del proceso de RTM (Resin Transfer Molding). En aviación comercial los motores turbofan son los más utilizados, la mayor parte del empuje en estos motores (aproximadamente el 80%) se produce gracias al "Fan" ubicado en la parte frontal del motor. El fan consta de múltiples fan blades (álabes del fan) que giran a altas revoluciones por minuto para succionar aire, una parte de este aire ingresa al motor (20%) y la otra parte restante genera directamente el empuje (80%), el mismo que permite a las aeronaves que incorporan dichos motores, alcanzar grandes velocidades para realizar sus vuelos de forma eficiente. Para lograr lo expuesto, es necesario que los fan blades sean fabricados con materiales adecuados (livianos y resistentes), es así que en la actualidad se utilizan en la mayoría de motores Turbofan, fan blades de materiales compuestos, que por lo general constan de refuerzos de fibra de carbono y matrices tipo epoxi.

Palabras clave: materiales compuestos; motores turbofan; fan blades; RTM; aeronaves.

Abstract

The purpose of this article is to present and analyze different aspects in the manufacture of composite fan blades of a Turbofan engine for aeronautical use, through the RTM (Resin Transfer Molding) process. In commercial aviation turbofan engines are the most used, most of the thrust in these engines (approximately 80%) is produced by the "Fan" located at the front of the engine. The fan consists of multiple fan blades that rotate at high revolutions per minute to suck air, a part of this air enters the engine (20%) and the remaining part directly generates the thrust (80%), which allows the aircrafts that incorporate these engines to reach high speeds to perform their flights efficiently. In order to achieve this, it is necessary that the fan blades are manufactured with suitable materials (light and resistant). Thus, at present, most Turbofan engines use fan blades made of composite materials, which usually consist of carbon fiber reinforcements and epoxy type matrices.

Keywords: composite materials; turbofan engines; fan blades; RTM; aircraft.

Resumo

O objetivo deste artigo é apresentar e analisar diferentes aspectos na fabricação de pás de ventiladores compostos de um motor Turbofan para uso aeronáutico, através do processo de RTM (Resin Transfer Molding). Na aviação comercial, os motores turbofan são os mais utilizados, a maior parte do impulso nestes motores (aproximadamente 80%) é produzida pelo "Fan" localizado na frente do motor. O ventilador consiste em várias pás que giram em altas rotações por minuto para sugar ar, uma parte deste ar entra no motor (20%) e a parte restante gera diretamente o impulso (80%), o que permite que a aeronave que incorpora estes motores atinja altas velocidades para realizar seus vôos de forma eficiente. Para conseguir isso, é necessário que as pás dos ventiladores sejam fabricadas com materiais adequados (leves e resistentes). Assim, atualmente, a maioria dos motores Turbofan utiliza pás de ventiladores feitos de materiais compostos, que geralmente consistem de reforços de fibra de carbono e matrizes tipo epóxi.

Palavras-chave: materiais compostos; motores turbofan; pás do ventilador; RTM; aeronave.

Introducción

Motor Turbofan

Un motor turbofan, es un motor a reacción que transforma la energía originada por la combustión (energía térmica) en energía cinética del chorro de gases que salen por la parte posterior del motor. Este tipo de motor incluye una gran "ventilador" carenado conocido como fan (ver figura 1). El motor turbofan es utilizado por la mayoría de los aviones comerciales de transporte de pasajeros.

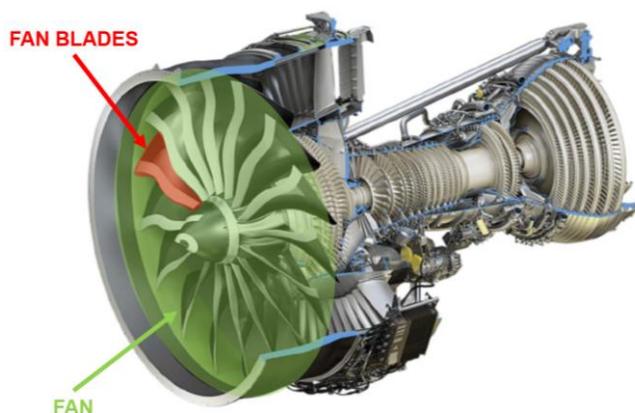


Figura 1. Motor Turbofan de uso Aeronáutico.

¿Qué es un fan blade?

El fan de un motor Turbofan, consta de múltiples fan blades (álabes del fan) que giran a altas RPM (revoluciones por minuto) para succionar aire (ver figura 1), una parte de este aire ingresa al motor aproximadamente un 20% y la otra parte restante genera directamente el empuje gracias al fan ubicado en la parte frontal del motor, que es de aproximadamente un 80% (GE Aviation, 2021).



Figura 2. Fan blade de un motor Turbofan.

Comprender las funciones de un fan blade como el de la figura 2 y los daños que pueden acumularse en el componente durante las operaciones, son información clave antes de la selección de material. Es importante investigar la microestructura del material utilizado, ya que confieren características mecánicas específicas; además se debe tener en consideración una técnica de fabricación adecuada a los materiales elegidos (Quora, 2016). En este caso se analiza los fan blades fabricados de materiales compuestos, que por lo general constan de refuerzos de fibra de carbono y matrices tipo epoxi.

Perspectiva histórica de los fan blades de materiales compuestos

El desarrollo de fan blades de materiales compuestos viene aproximadamente desde la década de los años 80, donde se comenzaron a desarrollar fan blades para motores sin conductos que nunca entraron en producción, pero fueron la base de conocimientos para el desarrollo de los fan blades pasando por diferentes diseños y procesos de fabricación. Como se observa en la figura 3, se empezaron a fabricar los Fan Blades por el proceso de RTM (Resin Transfer Molding) con tejidos 2D, luego se pasó por el método de Prepregs – Autoclave con tejidos 2D, luego por AFP (Automated Fibre Placement) –

Fabricación de los Fan Blades de materiales compuestos de un motor Turbofan de uso Aeronáutico

Autoclave con tejidos 2D, hasta llegar al día de hoy con nuevos avances en la fabricación de fan blades de cuarta generación donde se utiliza el proceso de RTM con tejidos 3D como se detallará más adelante (Upadhyay, 2018).

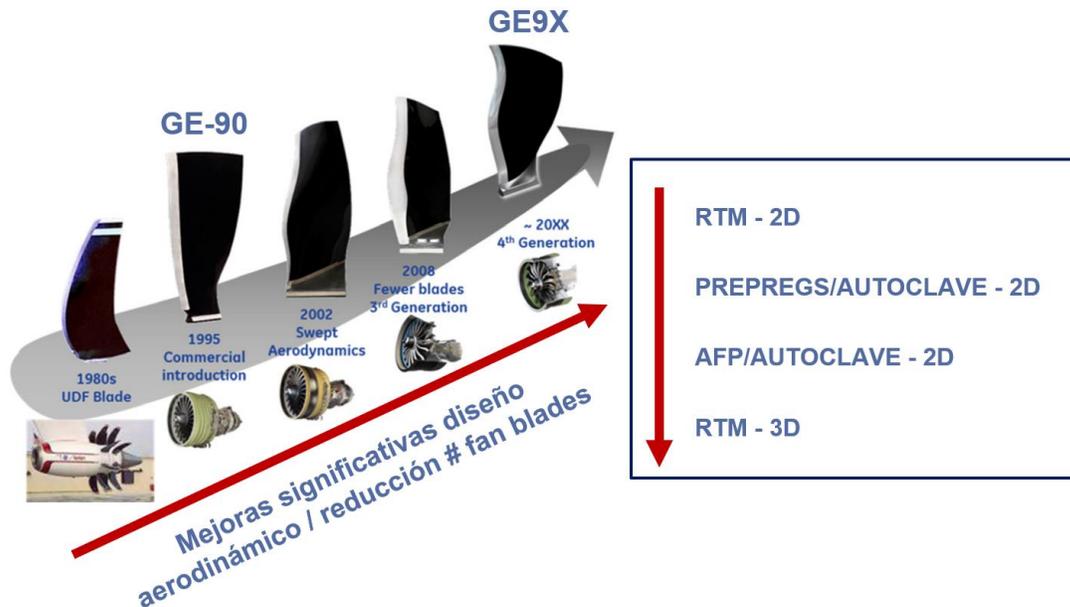


Figura 3. Perspectiva histórica de los fan blades de materiales compuestos.

La incorporación de preformas en 3D, aporta muchas ventajas al diseño de los fan blades, entre las ventajas se pueden destacar:

- Permite fabricar fan blades de mayor longitud, mayor cuerda y menor espesor.
- Aporta significativamente a mejorar la resistencia al impacto.
- Al aumentar la longitud y la cuerda, el fan contiene un menor número de fan blades, por ende, el motor pesa menos.
- El fan blade puede girar a mayores RPM, y así aumenta el empuje del motor mejorando así su rendimiento ya que el consumo de combustible es menor.

Los fan blades convencionales son fabricados de aleaciones de Titanio (Ti-6Al-4V), luego se pasó a fan blades de materiales compuestos con bordes de aleaciones de Titanio (Ti-6Al-4V) pero en la actualidad se reemplazaron los bordes de Titanio por bordes de Acero para mejorar la resistencia al impacto ya que el motor es susceptible a la ingesta de objetos extraños, y así se evitan daños (Safran, 2021). Cabe recalcar que un fan blade de materiales compuestos pesa mucho menos que un fan blade

Fabricación de los Fan Blades de materiales compuestos de un motor Turbofan de uso Aeronáutico

convencional de aleaciones de Titanio, y con la fabricación de componentes adicionales de materiales compuestos en un motor, se reduce significativamente el peso del mismo en aproximadamente 180 kilogramos.

Como ejemplo se cita uno de los motores más modernos fabricados por General Electric, el motor GE9X (ver figura 4) que tiene solo 16 fan blades de 4th generación (más delgados, más resistentes y más eficientes), mucho menos que sus predecesores (GENx – 18 fan blades, GE90 – 22 fan blades). Se redujo el número de fan blades gracias a las ventajas dadas al utilizar el proceso de fabricación de RTM con tejidos 3D, haciendo que el motor sea más eficiente consumiendo menos combustible, y generando una mayor cantidad de empuje (GE Aviation, 2021).

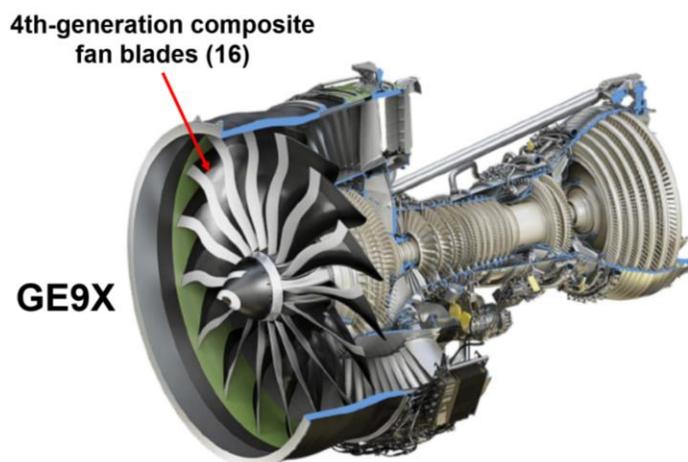


Figura 4. Motor GE9X con fan blades de 4th generación.

Estrategias metodológicas

Diseño

El diseño de un fan blade parte de las especificaciones estructurales (fuerzas centrífugas, fuerzas de flexión y cargas aerodinámicas) como se observa en la figura 5, en base a eso se define el material y el proceso de fabricación a utilizar. Una vez que se tiene un diseño preliminar se procede a realizar pruebas y análisis (estáticos, dinámicos) para verificar el diseño propuesto. Esto es un proceso iterativo hasta obtener un diseño óptimo del fan blade, optimizando tanto sus dimensiones como su forma como se indica en la figura 6 (Kumar, 2017).

Fabricación de los Fan Blades de materiales compuestos de un motor Turbofan de uso Aeronáutico

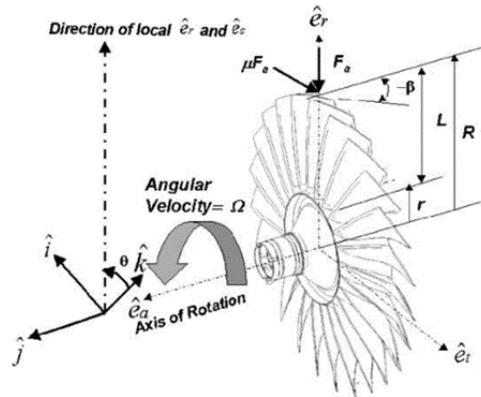


Figura 5. Especificaciones estructurales de un fan blade.

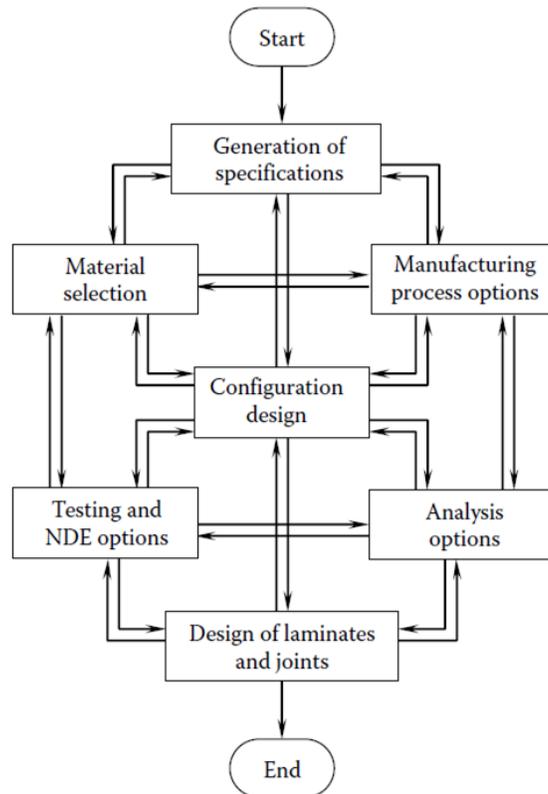


Figura 6. Proceso general de diseño de un fan blade.

Como ejemplo de diseño se considera un fan blade de 4th generación del motor General Electric GE9X, el mismo que tiene las dimensiones aproximadas como se indica en la figura 7. También en

Fabricación de los Fan Blades de materiales compuestos de un motor Turbofan de uso Aeronáutico

la figura 8 se puede observar la distribución aproximada de los espesores obtenidos luego del proceso de fabricación (Sung, 2020).

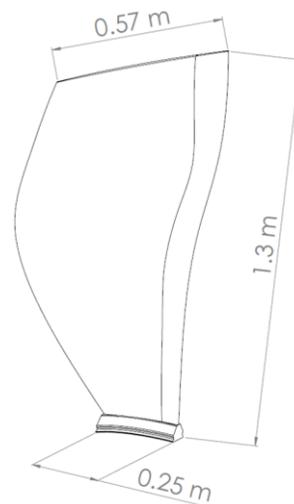


Figura 7. Dimensiones de un fan blade del motor GE9X.

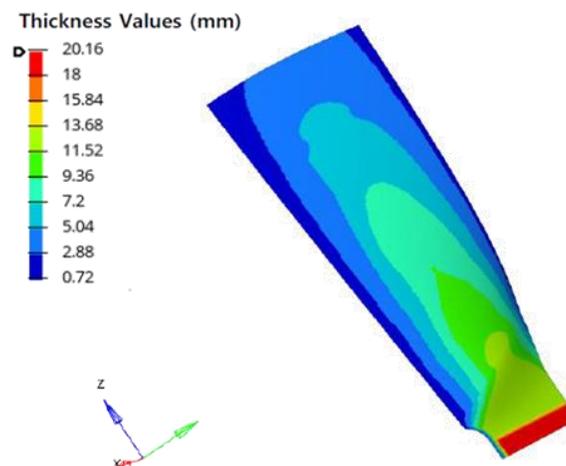


Figura 8. Distribución de los espesores de un fan blade del motor GE9X.

Volumen de producción

A nivel mundial existen pocas empresas que se dedican a la fabricación de fan blades de materiales compuestos, entre las más destacadas se tiene: CFAN con una producción aproximada de 14 000 fan blades/año, ALBANY con una producción aproximada de 20 000 fan blades/año y GKN AEROSPACE. Estas empresas en conjunto con algunos fabricantes de motores aeronáuticos como

Fabricación de los Fan Blades de materiales compuestos de un motor Turbofan de uso Aeronáutico

General Electric, CFM, Pratt & Whitney y Rolls Royce, desarrollan y fabrican fan blades de materiales compuestos para sus diferentes modelos de motores. Los motores más populares en la actualidad son el GE90, Genx y GE9X de General Electric, y el motor LEAP de CFM (GKN Aerospace, 2021).



Figura 9. Empresas fabricantes de fan blades de materiales compuestos.

Es así que, en base a una proyección realizada en el año 2018, se estima que para el año 2024 el mercado mundial de fan blades para motores turbofan de uso aeronáutico, crecerá a un ritmo importante hasta alcanzar los \$ 8 100 millones de dólares. Como idea general, un fan blade del motor GE90 en promedio cuesta aproximadamente \$ 30 000 dólares, y un motor turbofan de los más actuales cuesta en promedio aproximadamente \$ 140 millones de dólares, dicho precio variará dependiendo del modelo y fabricante (Stratview Research, 2021).

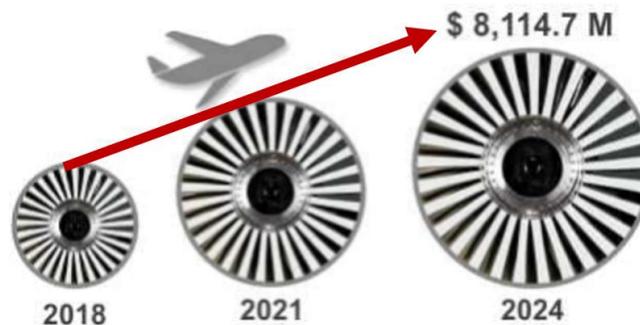


Figura 10. Proyección del mercado mundial de fan blades.

Proceso de manufactura

La fabricación de componentes aeronáuticos entre los cuales se encuentran los fan blades, deben cumplir los estándares establecidos principalmente por las autoridades aeronáuticas a través de los certificados de aprobación de producción, el sistema de gestión de la calidad aeroespacial (AS9100D) y el programa global de acreditación cooperativa para ingeniería aeroespacial (AS9100D, 2016).



Figura 11. Estándares para la fabricación de fan blades.

Es así que en la actualidad a través del desarrollo de preformas 3D, y en base a los estándares indicados anteriormente, se fabrican fan blades de materiales compuestos a través de la tecnología de RTM, optimizando la orientación de fibras, espesores, pesos, entre otros (Hasan, 2020).

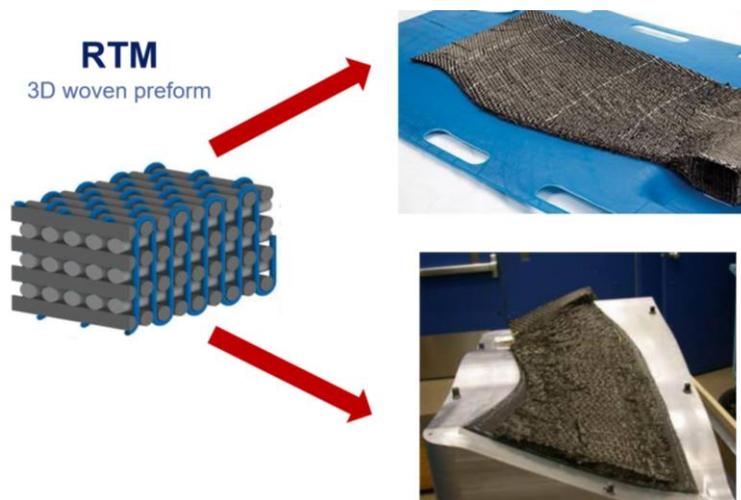


Figura 12. Tecnología de RTM para la fabricación de fan blades.

Fabricación de los Fan Blades de materiales compuestos de un motor Turbofan de uso Aeronáutico

En la figura 13, se puede observar el proceso general para la fabricación de un fan blade a través de RTM, en aeronáutica la fracción en volumen de fibra puede llegar a alcanzar hasta un 70%. Entre las ventajas que ofrece este proceso de manufactura se tiene que los volúmenes de producción son altos, se puede fabricar geometrías complejas, es un proceso automatizado y se obtienen propiedades mecánicas muy buenas con bajo contenido de poros (<1%) (Safran, 2021).



Figura 13. Proceso general para la fabricación de un fan blade a través de RTM.

De manera general en la figura 14, se detalla el layup de la infraestructura necesaria para la fabricación a través de la tecnología de RTM, pasando a través de diferentes áreas como el armado de la preforma (1-3), preparación de la resina (5), inyección y cura (6), desmolde de la parte (8) hasta la limpieza del herramental (9) para nuevamente iniciar un nuevo ciclo (Perkins, 2017).

Fabricación de los Fan Blades de materiales compuestos de un motor Turbofan de uso Aeronáutico

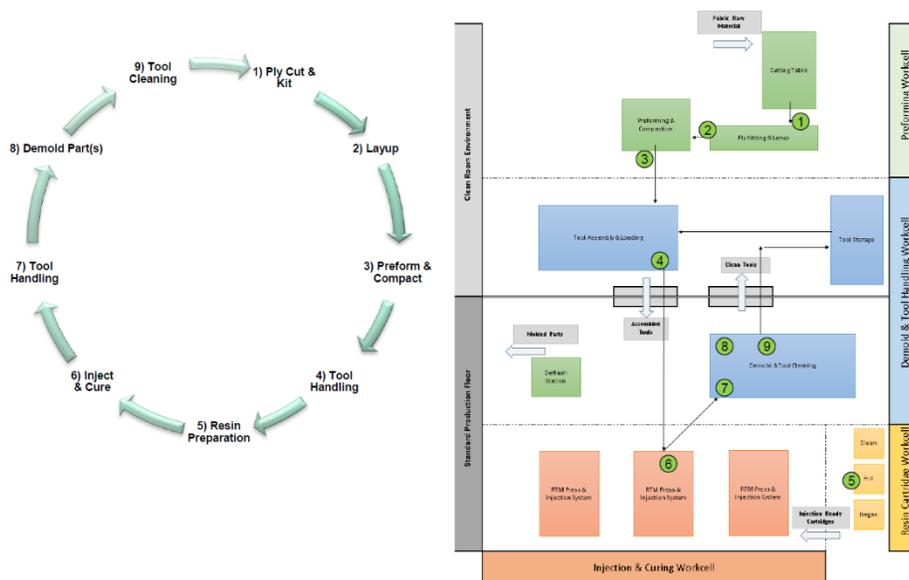


Figura 14. Layup infraestructura RTM.

Insumos y materiales

La elección de materiales para los fan blades debe basarse en ciertos aspectos que representan los requisitos mínimos de seguridad a considerar en cualquier etapa de operación. El material seleccionado también debe poseer las propiedades necesarias para incorporar la complejidad de fabricación requerida para el componente mediante RTM. Por lo general, se prefieren materiales de alta resistencia, resistencia a la fractura, alto límite de resistencia y de bajo costo. Estas propiedades contribuyen de una forma u otra en la fabricación de un motor de altas prestaciones con un mejor consumo de combustible (CFAN, 2020).

Los materiales e insumos utilizados en la fabricación de un fan blade a través de RTM son (Henkel Corporation, 2021):

- Refuerzo: Preforma de fibra de carbono 3D.
- Matriz: Epoxi de baja viscosidad.
- Refuerzo del borde de ataque de los fan blades, pueden ser de aleaciones de Titanio o Acero.
- Adhesivo estructural para adherir el refuerzo del borde de ataque al fan blade.
- Recubrimiento para los fan blades, comúnmente de poliuretano.
- Desmoldante.

Fabricación de los Fan Blades de materiales compuestos de un motor Turbofan de uso Aeronáutico



Figura 15. Materiales e insumos para la fabricación de un fan blade a través de RTM.

Análisis de costos

En base a una estimación preliminar de los costos de materiales e insumos se tiene un valor aproximado de \$ 600 dólares por fan blade como se observa en la tabla 1, y cada fan blade tendría un peso aproximado de 6 kilogramos.

Tabla 1. Costos de materiales e insumos.

ESTIMACIÓN PRELIMINAR DE COSTOS (MATERIALES+INSUMOS)							
MATERIAL	USD/m ²	USD/Kg	USD/EA	USD/GAL	SUPERFICIE REFUERZO (m ²)	MATRIZ NECESARIA (gr)	PRECIO (USD)
FC 3D woven preform	298	-	-	-	1	-	298.00
Epoxy low viscosity	-	44.05	-	-	-	643.55	28.35
Ti-6Al-4V	-	55.00	-	-	-	-	190.05
Epoxy structural adhesive	-	-	20.42	-	-	-	40.84
Polyurethane coating	-	-	-	162.50	-	-	12.36
Mold release agent	-	-	8.99	-	-	-	8.99
COSTO							~ 600

Fabricación de los Fan Blades de materiales compuestos de un motor Turbofan de uso Aeronáutico

Y en una estimación general de la producción de un fan blade, sin considerar infraestructura y equipamiento, se tiene un valor aproximado de \$ 2 105 dólares por fan blade como de detalla en la tabla 2.

Tabla 2. Costos de producción.

ESTIMACIÓN PRELIMINAR DE COSTOS (PRODUCCIÓN)	
Materiales e insumos	600
Procesamiento	400
Post-procesamiento	595
Inspección y control de calidad	510
COSTO APROXIMADO	~ 2105

Post-procesamiento

En el post-procesamiento de un fan blade se deben realizar tareas de: corte, mediciones para verificar tolerancias y pintura para protegerlo de las condiciones a las que va a estar expuesto. Luego se realizan tareas de inspección y control de calidad para verificar que cumplan con los estándares aeronáuticos establecidos, a través de ensayos no destructivos (NDT) como son: rayos-X, escaneo ultrasónico y medición e inspección detallada como se observa en la figura 16 y 17 (Rolls-Royce, 2021).

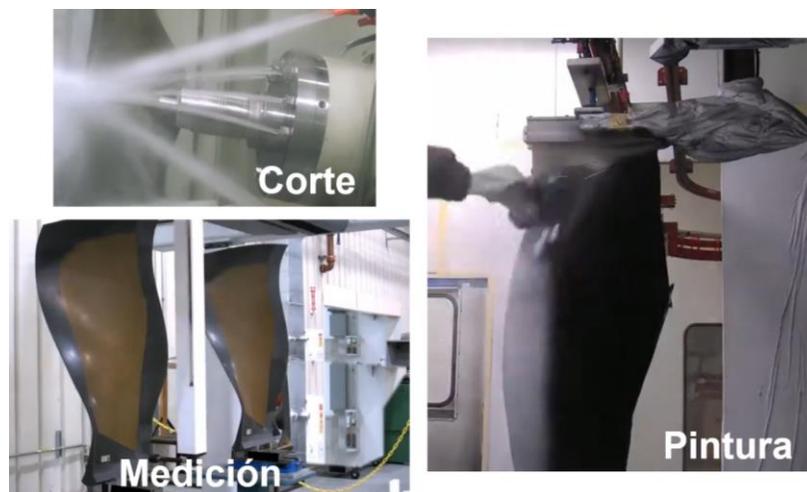


Figura 16. Post-procesamiento_1.



Figura 17. Post-procesamiento_2.

Resultados y discusión

Los diseñadores buscan continuamente formas de aumentar la eficiencia, reducir el peso y reducir el costo de los motores de los aviones. El uso de materiales compuestos se ha convertido en una práctica habitual para lograr estos objetivos. Las ventajas de la fibra de carbono son la disponibilidad, la posibilidad de fabricación, la rigidez y la elevada relación resistencia/peso. Esto da lugar a componentes que pesan casi sorprendentemente menos que sus homólogos metálicos, junto con componentes más elegantes y aerodinámicamente eficientes. Con la adición de los fan blades de material compuesto, se observan eficiencias adicionales, se tiene un ahorro de peso lo que equivale a que la aeronave pueda llevar más pasajeros. Desafortunadamente los materiales compuestos aún no han ayudado a los blades (álabes) del compresor y de la turbina, debido a las altas temperaturas de operación lo que ahorraría más peso a los motores y serían mucho más eficientes (Fromm, 2020).

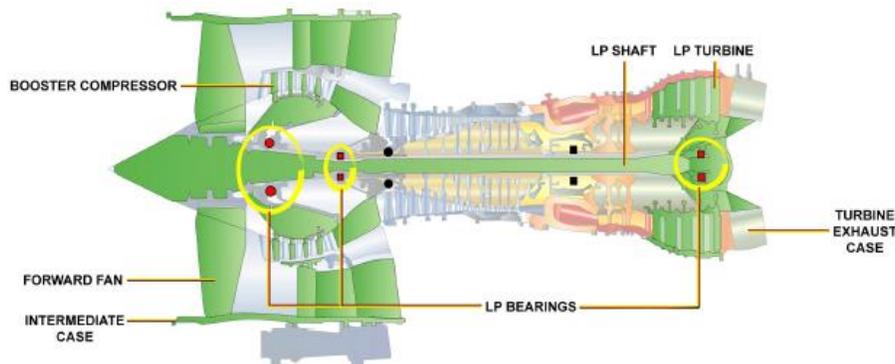


Figura 18. Álaves del compresor y de la turbina de un motor turbofan.

Además de aumentar la fuerza y la resistencia, los tejidos 3D también pueden acortar los tiempos de producción. La fabricación de componentes con tejidos 2D requiere tejer individualmente muchas capas 2D, cortar las finas capas con un tamaño y una forma determinados, y luego ensamblar y dar forma a las capas antes de la infusión de resina. El tejido en 3D produce componentes de grosor casi neto directamente, lo que reduce considerablemente el tiempo de producción y, por tanto, los costos totales. Los materiales compuestos en 3D también presentan mayores tasas de infusión de resina que reducen aún más el tiempo y los costos de producción (Textech Industries, 2021).

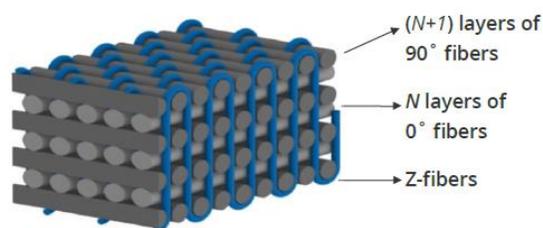


Figura 19. Ventajas de tejidos 3D.

Conclusiones

- El fan es un componente crucial de los motores turbofan, ya que sobre cada fan blade actúan cargas centrífugas, cargas de presión aerodinámica, cargas de flexión y cargas térmicas. Para poder soportar las diversas cargas, es importante realizar una selección de material adecuada para los fan blades, en la actualidad se utilizan refuerzo de fibra de carbono en 3D embebidas en una matriz epoxi de baja viscosidad.
- El desarrollo de preformas integrales en 3D, se adaptó a la tecnología RTM para fabricar fan blades de alta calidad, disminuyendo los costos y aumentando la producción. Además, al utilizar un refuerzo en 3D se pueden fabricar fan blades con una mayor longitud, mayor cuerda y menor espesor, disminuyendo la cantidad de fan blades y optimizando el rendimiento del motor en las aeronaves que lo utilizan.
- La mayor ventaja de fabricar fan blades de materiales compuestos sobre la construcción convencional en aleaciones de Titanio es su baja densidad. Esta baja densidad permite tener mayor resistencia a la fatiga, mayor resistencia a la fractura y una alta resistencia a la tracción en comparación con las aleaciones de Titanio. Por lo expuesto, el proceso de manufactura de RTM

Fabricación de los Fan Blades de materiales compuestos de un motor Turbofan de uso Aeronáutico

es una ruta de fabricación adecuada de este material compuesto. Durante el proceso, parámetros como presión, temperatura, fracción en volumen, viscosidad, permeabilidad y tiempo de llenado afectan la calidad del producto terminado y deben ser controlados.

- Los fan blades de 4th generación han sido la base para investigaciones de futuros desarrollos, donde se busca que los diseños de motores turbofan de próxima generación para aviones de transporte comercial tengan relaciones de derivación más altas y relaciones de presión del fan más bajas para mejorar el consumo de combustible y reducir las emisiones de CO₂, aumentando las eficiencias de propulsión. Además, se pueden conseguir importantes beneficios en cuanto al ruido.

Referencias

1. AS9100D. (2016). *NORMA PARA LA INDUSTRIA AEROESPACIAL*. SAE.
2. Airbus. (2011). *Technical training manual general familiarization course*. France.
3. Fromm, J. (2020). *Composite Fan Blades and Enclosures for Modern Commercial Turbo Fan Engines*. Gas Turbine Propulsion.
4. GE Aircraft Engines. (2004). *Non-linear dynamic response of a rotating radial Timoshenko beam with periodic pulse loading at the free-end*. Elsevier.
5. Gurit. (2021). *Guide to composites*. United Kingdom.
6. Hasan, Z. (2020). *TOOLING FOR COMPOSITE AEROSPACE STRUCTURES*. Elsevier.
7. Kosmatka, J. (2015). *Design and Fabrication of Integrally Damped Composite Fan Blades*. University of California.
8. Kumar, M. (2017). *Composite Structures Design, Mechanics, Analysis, Manufacturing, and Testing*. Taylor & Francis Group.
9. Kumar, M. (2017). *Composite Structures*. Taylor & Francis Group.
10. Perkins, J. (2017). *RTM Innovations in Aeroengines*. Radius.
11. Phillip, A. (2011). *COMPOSITE FAN BLADE*. United States Patent Application Publication.
12. Sung, Y. (2020). *A Study on Stacking Sequence Design of Composite Fan Blades Using Multi level Optimization*. Journal of Physics.
13. Upadhyay R. (2018). *GE-90 and Derivative Fan Blade Manufacturing Design*. Elsevier.
14. BOEING. (2020). *Current Products & Services*. BOEING. <https://www.boeing.com>

15. CFAN. (2020). *CFAN OVERVIEW*. CFAN. <https://c-fan.com>
16. GE Aviation. (2021). *GE9X Commercial Aircraft Engine*. GE Aviation. <https://www.geaviation.com>
17. GE Aviation. (2020). *GE9X Engine Achieves FAA Certification*. GE Aviation The Blog. <https://blog.geaviation.com>
18. GKN Aerospace. (2021). *Our customers and programs*. <https://www.gknaerospace.com>
19. Henkel Corporation. (2021). *Adhesive Technologies*. <https://www.henkel-adhesives.com>
20. MatWeb. (2021). *MATERIAL PROPERTY DATA*. <http://www.matweb.com>
21. Quora. (2016) *¿Cuáles son las ventajas y desventajas de utilizar materiales compuestos en un avión?* <https://www.quora.com>
22. PRI. (2020). *Aviación, Defensa y Espacio*. Performance Review Institutes. <https://es.pri.org>
23. Rolls-Royce. (2021). *Civil Aerospace*. Products & Services. <https://www.rolls-royce.com>
24. RLC. (2021). *ENGINE COMPONENTS*. <https://www.rlc-group.com>
25. Stratview Research. (2019). *Aeroengine Fan Blades Market Size, Share, Trend, Forecast, & Competitive Analysis: 2019-2024*. <https://www.stratviewresearch.com>
26. © Safran. (2021). *Aircraft propulsion*. SAFRAN. <https://www.safran-group.com>
27. Textech Industries. (2021). *3D Woven Components*. <https://www.textechindustries.com>