

Aplicaciones prácticas para el desarrollo aeronáutico y aeroespacial



EMAVI
SELLO EDITORIAL



Colección:
Gestión, Ciencia y Poder Aeroespacial

Aplicaciones prácticas para el desarrollo aeronáutico y aeroespacial



Colección:

Gestión, Ciencia y Poder Aeroespacial



**FUERZA AÉREA
COLOMBIANA**
ASÍ SE VA A LAS ESTRELLAS



EMAVI
SELLO EDITORIAL

Aplicaciones prácticas para el desarrollo aeronáutico y aeroespacial

Rafael Andrés Robayo Salazar
Julián Portocarrero Hermann
Amparo Borrell
María Dolores Salvador
Adolfo Fernández
Marta Suárez
Rut Benavente
Cristian Barría Huidobro
Saúl Ortega Alvarado
Valentina Abril-Melgarejo
Thomas Tegethoff
Ricardo Santa
Diego Morante
María José Gómez Gómez
María Paula Roncancio Sarmiento
Daniel Gómez



EMAVI
SELLO EDITORIAL

Aplicaciones prácticas para el desarrollo aeronáutico y aeroespacial

/ Rafael Andrés Robayo Salazar, ... [y otros 15]; -Santiago de Cali: Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suárez", EMAVI, 2022.

262 páginas.; ilustraciones col, cuadros, gráficos; 17x24 cm.

Incluye bibliografía al final del cada capítulo

ISBN: 978-958-53777-4-5

ISBN (Digital): 978-958-53777-5-2

(Colección: Gestión, Ciencia y Poder Aeroespacial)

1. Aplicaciones Aeroespaciales – Colombia 2. Industria Aeroespacial – Colombia – 3. Desarrollo Aeronáutico- 4. Materiales compuestos

I Julián Portocarrero Hermann (autor), ii Amparo Borrell (autor), iii María Dolores Salvador (autor), iv Adolfo Fernández (autor), v Marta Suárez (autor), vi Rut Benavente (autor), vii Cristian Barría Huidobro (autor), viii Saúl Ortega Alvarado (autor), ix Valentina Abril-Melgarejo (autor), x Thomas Tegethof (autor), xi Ricardo Santa (autor), xii Diego Morante Granobles (autor), xiii María José Gómez Gómez (autor), xiv María Paula Roncancio Sarmiento (autor), xv Daniel Gómez (autor), xvi Colombia. Fuerza Aérea Colombiana. Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suárez" (EMAVI).

629.1072 -dc 21.

TL 565 A65 2022 LC

Catálogo SIBFA 991243211507231

©Escuela Militar de Aviación
"Marco Fidel Suárez" (EMAVI)

©EMAVI Sello Editorial

© Varios autores

Sección Investigación EMAVI
Carrera 8 # 58-67 (La Base) Cali-Colombia
Teléfono: +57 (2) 488 1000, Ext. 68841

Dirección

BG. Andrés Guzmán Morales

Subdirección

CR. Sergio Javier Moncayo Velásquez
Escuela de Formación y Jefe de Estado Mayor

Comando Grupo Académico

TC. Yadira Cárdenas Posso

Jefe Sección Investigación

MY. Héctor Fabio Calvo Valencia

Ira. Edición: 200 ejemplares

Santiago de Cali, Valle del Cauca, 2022

Apoyo Gestión de Publicaciones Científicas

PS. Diana María Mosquera Taramuel
diana.mosquerat@emavi.edu.co

Corrección de Estilo: Sección Investigación

Diseño y Diagramación Editorial: Paola Andrea Bolaños Dorado

Publicado en Colombia–Published in
Colombia

Contenido relacionado

<https://www.emavi.edu.co/es/investigacion/editorial-emavi>

Las instituciones editoras de esta obra no se hacen responsable de las ideas expuestas bajo su nombre, las ideas publicadas, los modelos teóricos expuestos o los nombres aludidos por los autores. El contenido publicado es responsabilidad exclusiva de los autores, no refleja la opinión de las directivas, el pensamiento institucional de las Universidades editoras, ni genera responsabilidad frente a terceros en caso de omisiones o errores.

El Sello Editorial de la Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suárez" se adhiere a la filosofía de acceso abierto. Este libro está licenciado bajo los términos de la Atribución 4.0 de Creative Commons, que permite el uso, el intercambio, adaptación, distribución y reproducción en cualquier medio o formato, siempre y cuando se dé crédito al autor o autores originales y a la fuente.

Tabla de Contenido

Prólogo.....	7
Parte I.	
Estructuras y aplicaciones aeroespaciales.....	11
Capítulo 1.	
Desarrollo de materiales compuestos ablativos para aplicaciones aeroespaciales en la Escuela Militar de Aviación.....	13
Capítulo 2.	
Obtención mediante técnicas no convencionales de materiales cerámicos avanzados para aplicaciones espaciales.....	39
Parte II.	
Incursionando el espacio y el ciberespacio.....	73
Capítulo 3.	
El Ciberespacio y la nueva transformación a la zona de operaciones.....	75
Capítulo 4.	
El problema de la ciberseguridad en la aviación.....	109
Capítulo 5.	
El JWST y las nuevas generaciones de telescopios espaciales en el estudio de la esencia del Universo.....	139
Parte III.	
Entornos académicos y tecnologías emergentes.....	187
Capítulo 6.	
¿Son las tecnologías aditivas un impulsor de la competitividad? La importancia de las estrategias y la innovación en procesos.....	189

Capítulo 7.

El impacto de los estilos de liderazgo en la Inteligencia Emocional y la Efectividad Operativa de los Alféreces y Cadetes de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”	231
--	-----

Prólogo

La Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez” viene consolidando un evento de carácter científico y académico conocido como la “Semana Universitaria EMAVI”, que busca promover la apropiación social del conocimiento y fortalecer la misión docente, investigativa, de extensión y la cooperación académica nacional e internacional en conceptos relacionados con el espacio y el ciberespacio, apoyados en la construcción e implementación de políticas públicas de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación, para responder a los desafíos productivos y sociales que permitan el desarrollo del país y de la Fuerza Aérea Colombiana; la cual forma parte de la Semana Mundial del Espacio en Colombia, un evento organizado por la Vicepresidencia de la República de Colombia, que celebra la ciencia y la tecnología con temas relacionados con el espacio y sus nuevas investigaciones.

Este encuentro académico reúne conferencistas profesionales de carácter nacional e internacional, dentro de escenarios con el fin de compartir experiencias, intercambiar, socializar y difundir el descubrimiento y resultado de investigaciones, a través de la retroalimentación y del aprendizaje.

Resultado de la gestión de este evento, se reciben ponencias respaldadas por un artículo de investigación, que una vez sometidas a un proceso de evaluación científica, y expuestas al público, son avaladas para ser publicadas en un producto resultado de actividades de generación de nuevo conocimiento, compactados en una publicación seriada bajo la Colección “Gestión, Ciencia y Poder Aeroespacial” bajo el Sello Editorial de la Escuela Militar de Aviación.

Producto de la Semana Universitaria “Gestión para el Desarrollo Aéreo y Espacial de Iberoamérica” celebrada en el 2021, desarrollada en cuatro congresos internacionales propuestos por cada programa académico,

Administración Aeronáutica, Ingeniería Informática, Ingeniería Mecánica y Ciencias Militares Aeronáuticas, se centró en trabajar los siguientes focos temáticos: Geopolítica, Historia Contemporánea, Derechos Humanos, Derecho Internacional Humanitario, Gestión, Innovación y Liderazgo Aeronáutico y Espacial, Ingeniería y Tecnología Aeroespaciales, Ciencia del Espacio, Apropiación y Desarrollo de Tecnologías Emergentes con Aplicación Aeroespacial, Sistemas de Defensa del Espacio Aéreo y de Ciberespacio, Procesos y Reglamentación Aeronáutica, Retos Aeroespaciales y Desarrollo Aeroespacial en Iberoamérica, entre otros; que hoy se ven reflejados en esta publicación titulada Aplicaciones prácticas para el desarrollo aeronáutico y aeroespacial, desarrollado por el personal de docentes de la Escuela Militar de Aviación y en coautoría con personal externo a la institución.

En este sentido, el libro se divide en tres partes: la primera parte de centra en las estructuras y aplicaciones aeroespaciales, la segunda parte en la incursión del espacio y el ciberespacio y la tercera parte, en los entornos académicos y las tecnologías emergentes.

El capítulo uno presenta el desarrollo de materiales compuestos ablativos para aplicaciones aeroespaciales en la Escuela Militar de Aviación, dentro de un marco conceptual sobre los sistemas de protección térmica, un análisis bibliométrico de la producción científica asociada al tema y finalmente incluye algunos resultados que relacionan la obtención y caracterización de este tipo de materiales en la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez” de la Fuerza Aérea Colombiana. Los compuestos ablativos obtenidos se basan en una matriz polimérica de resina poliéster reforzada con residuos o sub-productos industriales finamente molidos (particulados) y fibra de vidrio corta dispersa al azar. Estos polímeros ablativos han sido caracterizados mediante ensayos de ablación térmica por llama directa y análisis termogravimétricos, reportando resultados promisorios para ser utilizados en la fabricación de toberas de motores cohete.

El capítulo dos aborda la obtención mediante técnicas no convencionales de materiales cerámicos avanzados para aplicaciones espaciales, con el fin de aumentar el rendimiento y la eficacia de las misiones espaciales. Esta necesidad nos conduce al desarrollo de nuevos espejos

primarios con una masa mínima y una calidad óptica muy alta, los cuales deben tener un bajo o nulo coeficiente de expansión térmica y que a la vez sea homogéneo en un amplio rango de temperaturas (-150 °C a +400 °C), para asegurar una perfecta estabilidad dimensional frente a los cambios bruscos de temperatura y alta durabilidad en condiciones extremas.

El capítulo tres presenta los avances que se han realizado en el Ciberespacio y la nueva transformación a la zona de operaciones, donde se aborda el caso del ciberespacio, cuyos efectos han permeado todo el quehacer humano, incluido el nivel militar. Se estudia el concepto de Zona de Operaciones y se analiza -en comparación a otros ejemplos tecnológicos- el impacto que el ciberespacio ha tenido en ella. Se aporta a la discusión con recomendaciones sobre cómo adoptar apropiadamente esta nueva disrupción tecnológica en las instituciones militares.

El capítulo cuatro analiza el problema de la ciberseguridad en la aviación, donde se aborda la evolución que se ha tenido como humanidad, profundizando en la última etapa de evolución tecnológica, se identifica como los cambios evolutivos han estado acompañados de un periodo de inmadurez, lo que ha provocado fallas en dichos avances tecnológicos. Como segunda parte se aborda a detalle cómo el humano ante estos cambios tecnológicos ha optado por un modelo reactivo antes que proactivo; lo cual ha originado graves problemas en temas de ciberseguridad considerando que este avance tecnológico tiene una dependencia asociada que provoca múltiples vulnerabilidades ante esta forma de gestión y evolución tecnológica desproporcionada.

El capítulo cinco presenta el nuevo Telescopio espacial James Webb (lanzado en diciembre de 2021) y las nuevas generaciones de Telescopios de este tipo en el estudio de la esencia del Universo, un estudio detallado a nivel técnico y científico sobre el Observatorio JWST y cómo está revolucionando nuestro conocimiento sobre el Cosmos. Se abordan cronológicamente los procesos y desafíos para la consolidación del JWST por parte de NASA, ESA, CSA y las múltiples compañías involucradas en su implementación. También se presentan las grandes preguntas científicas que este instrumento ayudará a responder, que van desde el descubrimiento y estudio de nuevos mundos hasta el entendimiento de

la evolución de galaxias y la solución al enigma de la materia y energía oscuras.

El capítulo seis discute si ¿son las tecnologías aditivas un impulsor de la competitividad? La importancia de las estrategias y la innovación en procesos, si mejoran la productividad, y por consiguiente la ventaja competitiva. Las tecnologías aditivas son una innovación tecnológica de Industria 4.0 y tienen gran potencial en Colombia, pero no siempre generan los resultados esperados. El objetivo de este estudio es analizar como las tecnologías aditivas, estrategias, e innovación en proceso interactúan para generar resultados positivos, separado por el sector aeroespacial y la industria en general.

El capítulo siete expone el impacto de los Estilos de liderazgo en la Inteligencia Emocional y la Efectividad Operativa de los Alféreces y Cadetes de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”, un trabajo de grado desarrollado por las cadetes Gómez Gómez María José y Roncancio Sarmiento María Paula, y tiene como finalidad mostrar el impacto del liderazgo transformacional y transaccional en la inteligencia emocional y la efectividad operativa de los Alféreces y Cadetes de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”. Este estudio, es novedoso por cuanto no existe registro de estudios previos que hayan tenido la intención de estudiar la interacción entre las variantes abordadas en el título.

Por su parte, esta obra proporciona al lector una ventana al tema aéreo y espacial, tecnologías emergentes, aplicaciones de materiales para la construcción de cohetes, la seguridad ciberespacial, el descubrimiento del universo; aquellas estrategias de gestiones tecnológicas, operativas y humanas para su gestión, que se trabajan desde las aulas, pero que sirven de intercambio cultural, científico y laboral para los futuros oficiales de la fuerza o aquellos emprendedores o lectores que quieren sumergirse en el mundo del espacio terrestre y ultraterrestre.

MY. Héctor Fabio Calvo Valencia

Jefe Sección Investigación

Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”

Fuerza Aérea Colombiana

I **PARTE**



**ESTRUCTURAS Y
APLICACIONES
AEROESPACIALES**

Capítulo

1

Desarrollo de materiales compuestos ablativos para aplicaciones aeroespaciales en la Escuela Militar de Aviación

Dr. Rafael Andrés Robayo Salazar*

*Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”
Fuerza Aérea Colombiana*

Correo: rafael.robayo@emavi.edu.co

ORCID: 0000-0003-1687-2885

Dr. Julián Portocarrero Hermann*

*Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”
Fuerza Aérea Colombiana*

Correo: julian.portocarrero@emavi.edu.co

ORCID: 0000-0002-4573-1435

-
- 1 Doctor en Ingeniería con énfasis en Ingeniería de los Materiales. Investigador del Programa de Ingeniería Mecánica de la Escuela Militar de Aviación.
 - 2 Ingeniero Mecánico con estudios doctorales. Docente Investigador Programa de Ingeniería Mecánica de la Escuela Militar de Aviación.
- * Miembros del Grupo de Investigación en Estudios Aeroespaciales (GIEA) – Fuerza Aérea Colombiana (FAC).

Resumen

Dentro de los retos más grandes de la industria aeroespacial se encuentra el desarrollar sistemas de protección térmica cada vez más livianos y resistentes a altas temperaturas para aplicaciones como la protección de naves espaciales, satélites, superficies aerodinámicas, cargas útiles y la fabricación de elementos de propulsión como los motores cohete (cámaras de combustión y toberas), entre otras. Los materiales compuestos ablativos surgen como una solución a esta necesidad, siendo los polímeros ablativos los más versátiles. Este capítulo presenta un marco conceptual sobre los sistemas de protección térmica, un análisis bibliométrico de la producción científica asociada al tema y finalmente incluye algunos resultados que relacionan la obtención y caracterización de este tipo de materiales en la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez” de la Fuerza Aérea Colombiana. Los compuestos ablativos obtenidos se basan en una matriz polimérica de resina poliéster reforzada con residuos o subproductos industriales finamente molidos (particulados) y fibra de vidrio corta dispersan al azar. Estos polímeros ablativos han sido caracterizados mediante ensayos de ablación térmica por llama directa y análisis termogravimétricos, reportando resultados promisorios para ser utilizados en la fabricación de toberas de motores cohete.

Abstract

One of the challenges of the aerospace industry is to develop thermal protection systems that are increasingly lightweight and resistant to high temperatures for applications such as the protection of spacecraft, satellites, aerodynamic surfaces, payloads and the manufacture of propulsion elements such as engines rocket (combustion chambers and nozzles), among others. Ablative composite materials emerge as a solution, with ablative polymers being the most versatile. This chapter presents a conceptual framework on thermal protection systems, a bibliometric analysis of the scientific production associated with the subject (ablative materials) and finally includes some results that relate the obtaining and characterization of this type of materials in the Military Aviation School “Marco Fidel Suárez” from the Colombian Air Force. The ablative composites obtained are based on a polymeric matrix of polyester resin reinforced with inorganic wastes or industrial by-products (particulates) and randomly dispersed short glass fiber. These

ablative polymers have been characterized by direct flame thermal ablation test and thermogravimetric analysis, reporting promising results for use in the manufacture of rocket engine nozzles.

Palabras clave: Ciencia de los materiales, industria aeroespacial, materiales compuestos ablativos, motores cohete, sistemas de protección térmica.

Keywords: Ablative composites, aerospace industry, material science, rocket engines, thermal protection systems.

Introducción

Actualmente, el desarrollo de nuevos materiales que respondan a las cada vez más exigentes necesidades de la industria aeroespacial se considera un reto para la ciencia e ingeniería. Las extremas condiciones de servicio a las que son sometidos los materiales en el campo aeroespacial son diversas, pero sobre todo se concentran en los entornos de altas temperaturas.

Como lo afirman Natali et al., (2018), los materiales ablativos son la base de toda la industria aeroespacial; estos materiales de sacrificio (fungibles) permiten la producción de componentes de propulsión (como motores de cohetes líquidos y sólidos) o protegen vehículos y sondas durante el vuelo hipersónico a través de una atmósfera planetaria. En efecto, según la NASA, las capacidades futuras de los vehículos de reingreso dependerán de la calidad de los sistemas de protección térmica (TPS) que se desarrollen y que estén disponibles para su implementación (NASA, 2008). Al respecto, algunos materiales no poliméricos se han utilizado con éxito como TPS; sin embargo, debido a su versatilidad, los polímeros ablativos (PAs) representan la familia más amplia. De hecho, en comparación con los ablativos no poliméricos, como los metales de alto punto de fusión y los polímeros inorgánicos (u óxidos o carburos metálicos), los PAs tienen algunas ventajas intrínsecas, como su densidad ajustable, mayor resistencia al choque térmico y menor costo (Natali et al., 2018).

Como se mencionó anteriormente, el desarrollo de TPS desempeña un papel importante en la fabricación de componentes de propulsión para

la industria aeroespacial, especialmente en el campo de la cohertería. La cámara de combustión del cohete, propulsores y/o boquillas deben diseñarse para soportar temperaturas de operación superiores a los 1600–2000 °C en un ambiente ablativo severo (Tang y Hu, 2017). Normalmente, el motor-cohete es fabricado por mecanizado de aleaciones de acero, aluminio o titanio (zona estructural) y recubierto internamente con sistemas de protección térmica (zona ablativa) (Mohan Kumar et al., 2017). En efecto, para el sector aeroespacial colombiano es una necesidad fabricar TPS y PAs con materiales de fácil adquisición y disponibilidad local, que le permitan la construcción de motores cohetes, necesarios para el lanzamiento de cargas útiles o picosatélites en el futuro previsible (Robayo-Salazar et al., 2020).

Este capítulo de libro aborda inicialmente el marco conceptual de los materiales compuestos ablativos. A continuación, describe los tipos de TPS y su clasificación, haciendo énfasis en los PAs. Complementariamente, se presenta un análisis bibliométrico de la producción científica asociada al tema. Finalmente, se incluyen algunos resultados que relacionan la obtención, caracterización y aplicación de este tipo de materiales en la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez” (EMAVI) de la Fuerza Aérea Colombiana (FAC).

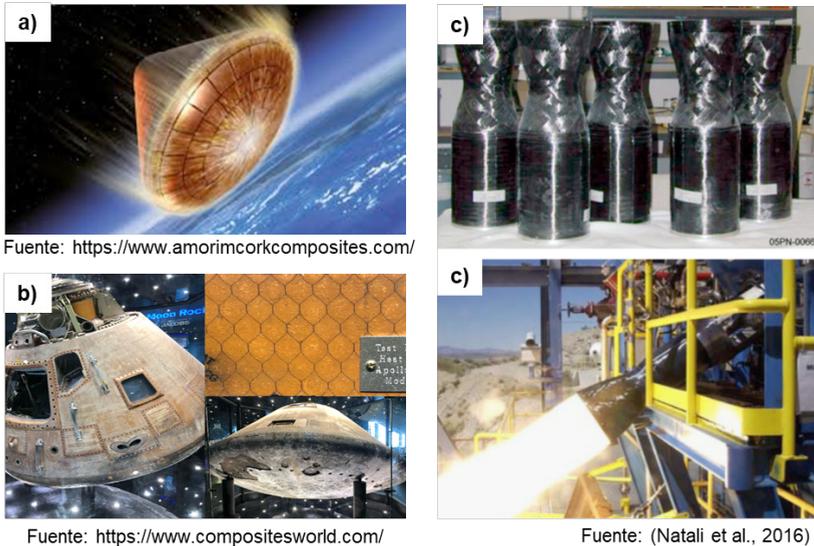
2. Marco teórico

2.1. Marco conceptual sobre materiales compuestos ablativos

Los materiales ablativos son reconocidos como materiales de sacrificio (fungibles), cuyo desempeño permite clasificarlos como TPS en elementos recuperables, que son expuestos a elevadas temperaturas (≥ 1500 °C) durante su operación (NASA, 2008). Las funciones de un material ablativo se resumen en el hecho de ser refractario, aislante térmico, autoconsumible y resistente tanto al desgaste como a los esfuerzos térmicos (Maldonado Villa et al., 2014). En general, los sistemas de protección térmica interpretan un papel fundamental en diversas industrias, pero sobre todo para la industria aeroespacial, en la fabricación de escudos térmicos para la protección de las naves espaciales en su reingreso a la atmósfera terrestre y la manufactura de motores cohete, específicamente las boquillas de escape de los gases de combustión o también denominadas toberas. La Figura 1 muestra las principales aplicaciones de los TPS en el campo aeroespacial.

Figura 1

Aplicaciones en entornos hipotérmicos de los sistemas de protección térmica (TPS).

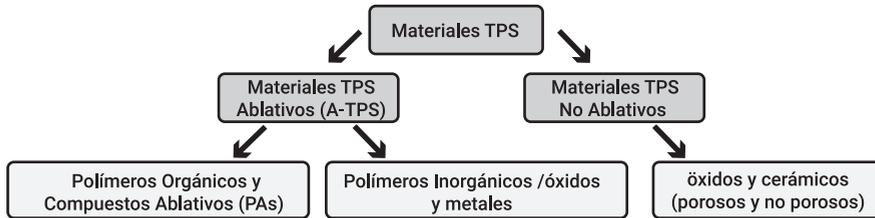


Nota. a) Escudos térmicos para la protección de naves espaciales en su reingreso a la atmósfera terrestre. Fuente: <https://www.amorimcorkcomposites.com/>. b) Ejemplo de aplicación de escudos térmicos en el Apollo 11 Command Module Columbia (Moon Capsule). Fuente: <https://www.compositesworld.com/>. c) Aplicación de los materiales compuestos ablativos en componentes de propulsión tipo toberas de motor cohete. Fuente: Tomado de "Progress in Materials Science" por Natali et al., 2016, Volume 84, December, pp. 192-275.

Dependiendo del entorno hipotérmico en el que sean sometidos estos materiales, se han desarrollado muchos tipos de formulaciones. Al respecto, la Figura 2 representa una clasificación de las diferentes clases de TPS basados en estos dos principios: materiales TPS ablativos (A-TPS) y materiales TPS no-ablativos.

Figura 2

Clasificación de los sistemas de protección térmica (TPS).

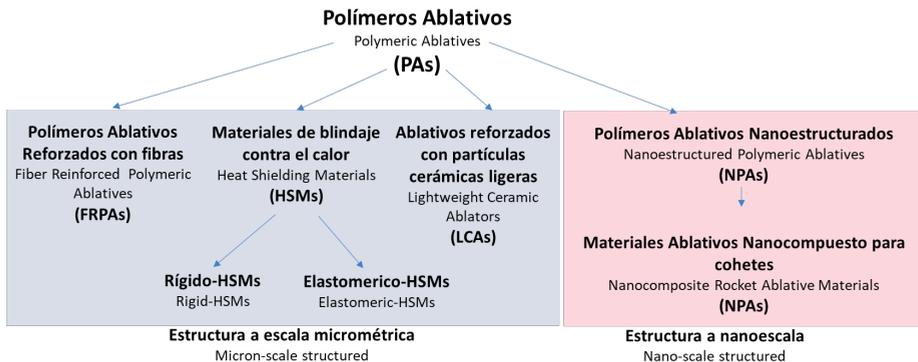


Nota. Tomado de “Progress in Materials Science” por Natali et al., 2016, Volume 84, December, pp. 192-275.

Dentro de los A-TPS, se destacan por su gran variedad y versatilidad los PAs, los cuales a su vez corresponden, en la mayor parte de las aplicaciones, a materiales compuestos de matriz polimérica, como por ejemplo los polímeros ablativos reforzados con fibras (FRPAs). La Figura 3 presenta una clasificación más detallada de los diferentes tipos de PAs. En general, los PAs poseen la capacidad de ajustarse a una amplia variedad de temperaturas de servicio. La posibilidad de reducir el peso ($\approx 90\%$) de los escudos térmicos o componentes de propulsión con el uso de PAs, sin sacrificar las propiedades ablativas, es la razón que convierte a este tipo de TPS en los más utilizados en la industria aeroespacial (Astola et al., 2017).

Figura 3

Clasificación de los materiales poliméricos ablativos (PAs).



Nota. Tomado de “Progress in Materials Science” por Natali et al., 2016, Volume 84, December, pp. 192-275.

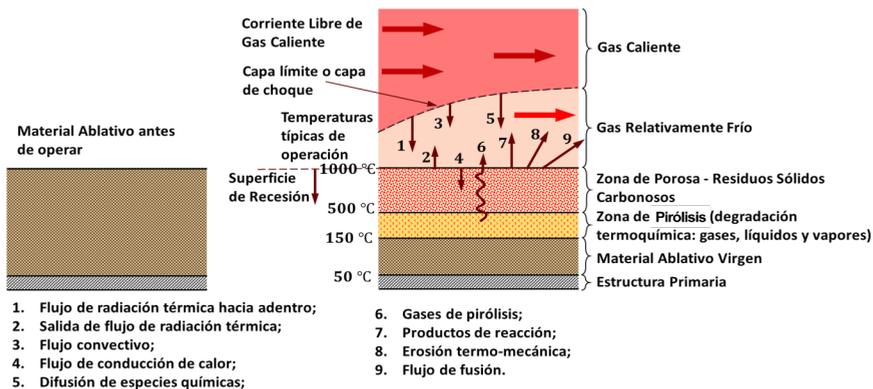
Respecto a los PAs, comúnmente se utilizan resinas poliméricas (fenólicas, epoxi, poliéster y viniléster) como matriz. Estas resinas son termoestables y su desempeño a elevadas temperaturas es limitado (Aranzazu Rios et al., 2013); por tal razón, son modificadas (reforzadas) con la incorporación de refuerzos particulados (rellenos) cerámico u óxidos refractarios (hafnio [HfO₂], circonio [ZrO₂], tántalo [Ta₂O₅], itrio [Y₂O₃] o alúmina [Al₂O₃]), y al mismo tiempo reforzadas con fibras cortas de tipo carbono, asbestos o vidrio (Asaro et al., 2017; Krzyzak et al., 2018; Kucharczyk et al., 2018; Quiñonez et al., 2012). Al respecto, la incorporación de partículas tipo perlita expandida o vermiculita (8-32 % en volumen)(Krzyzak et al., 2018) (3-10 % en peso) (Kucharczyk et al., 2018), partículas mesoporosas de sílice (5-20 % en peso) (Asaro et al., 2017), óxido de circonio (25 % en peso) (Pulci et al., 2018) y negro de carbón (5-20 % en peso) (Koo et al., 2007) entre otras, han demostrado un efecto positivo sobre el desempeño ablativo de los PAs. Como se presenta en los resultados de esta investigación, algunas escorias (subproductos industriales) y residuos cerámicos también han promovido adecuados desempeños térmicos en PAs basados en resinas poliéster (Robayo-Salazar y Portocarrero Hermann, 2020).

Cuando los PAs son expuestos a temperaturas por encima del límite de degradación térmica de la matriz (resina termoestable) (>200°C), su estructura experimenta un fenómeno de pirolisis intensiva, tal y como se muestra en la Figura 4. La degradación de la matriz genera gases de pirolisis (productos volátiles) relativamente fríos, los cuales forman una capa protectora que actúa como barrera contra el flujo de calor que impacta directamente al PAs. Al mismo tiempo, estos gases controlan la difusión y velocidad de las reacciones químicas entre las especies de combustión y la matriz polimérica virgen. Adicionalmente, la pirolisis produce una capa carbonizada o un residuo carbonoso en la superficie del PAs, absorbiendo durante este proceso de conversión una gran cantidad de energía térmica. Al respecto, el carbón es considerado un material ablativo de alto rendimiento. Esta capa carbonizada promueve la retención parcial (aglomeración) de los rellenos incorporados (partículas) y el proceso de ablación se puede llevar a cabo de manera efectiva, ya que el material puede continuar absorbiendo calor endotérmicamente (Pulci et al., 2018). Aun cuando esta capa presenta propiedades ablativas, el residuo carbonizado y los rellenos pueden erosionarse mecánicamente y sufrir delaminación, reduciendo el desempeño y rendimiento del PAs. Debido a estos fenómenos, las fibras cortas de carbono, vidrio y/o asbestos se ha incorporado con éxito como

materiales de refuerzo, logrando mantener la integridad del compuesto ablativo, aumentando así su resistencia a la erosión y a los esfuerzos termomecánicos (Mohan Kumar et al., 2017; Natali et al., 2016; Robayo-Salazar y Portocarrero Hermann, 2020).

Figura 4

Representación gráfica de las zonas formadas durante la exposición a altas temperaturas de un PAs.



Nota. Adaptado de *Rocket propulsion*, de Sutton y Biblarz, 2010.

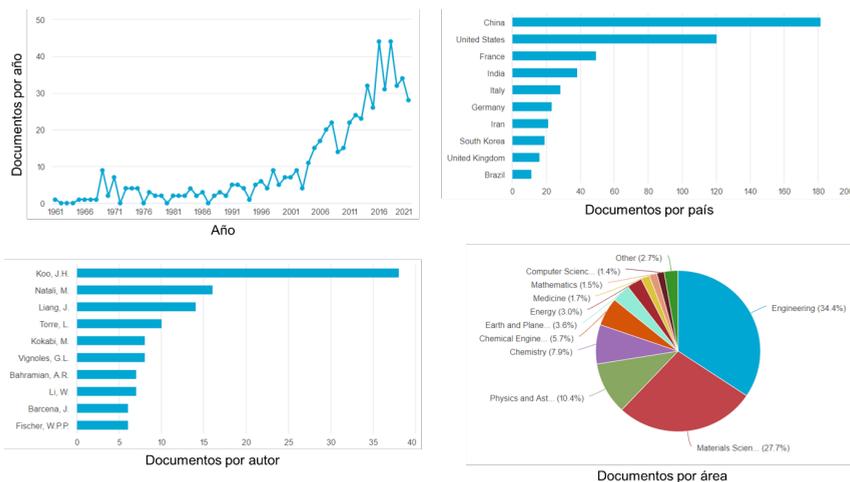
3. Análisis bibliométrico

Con el fin de conocer el comportamiento de la producción científica y el interés internacional sobre la línea de investigación de materiales compuestos ablativos se realizó un análisis bibliométrico. Este análisis se basó en los resultados de búsquedas avanzadas realizadas en la base de datos Scopus de Elsevier y se emplearon como palabras claves dos combinaciones: la primera combinación incluyó las palabras “Ablative” AND “Composite” AND “Material”. La segunda combinación fue más específica e incluyó las palabras “Polymeric” AND “Ablative” AND “Composite” AND “Material”. El motor de búsqueda en ambos casos incluyó la formula TITLE-ABS-KEY (TITULO-RESUMEN-PALABRAS CLAVES). El rango de análisis fue el de todos los tiempos. Los resultados obtenidos corresponden a los reportados hasta el día 12 de septiembre de 2021, fecha en la cual se realizaron las consultas en Scopus. A partir de los datos bibliométricos extraídos con la segunda búsqueda, se realizó un mapeo de coocurrencias de las palabras claves (minería de textos) utilizando el código fuente libre VOSviewer.

La primera búsqueda, que se presenta en la Figura 5 arrojó un total de 589 documentos publicados entre los años 1961 y el presente (2021). China es el país que más publicaciones reportó, con un total de 181 documentos, seguida por los Estados Unidos con 120 documentos y Francia con 49 documentos. Como lo demuestra la Figura 5, existe un gran interés en las grandes potencias que lideran actualmente la carrera espacial, dada la necesidad de desarrollar materiales ablativos o sistemas de protección térmica para sus naves espaciales y satélites. Al respecto, en los últimos años la carrera espacial ha sido renovada, y el desarrollo de importantes proyectos aeroespaciales ha hecho que el programa espacial de China tome mayor relevancia. Por su parte, el autor con más publicaciones relacionadas con esta búsqueda es Joseph Koo de la *University of Texas* (Austin, Estados Unidos) con 38 documentos, seguido por Maurizio Natali de la *Università degli Studi di Perugia* (Perugia, Italia) con 16 documentos y Jun Liang del *Beijing Institute of Technology* (Pekín, China) con 14 documentos. La distribución de documentos por áreas de conocimiento arrojó como primer resultado las Ingenierías con un 34,4 % (405 documentos), seguido por la Ciencia de los Materiales con el 27,7 % (326 documentos) y la Física y Astronomía con el 10,4 % (123 documentos). Este primer análisis bibliométrico demuestra una tendencia de crecimiento del número de publicaciones relacionadas con los materiales compuestos ablativos, en general. Adicionalmente, dentro de las entidades patrocinadoras se destacan los departamentos de defensa y las fuerzas aéreas de cada país, tal y como es el caso de Colombia.

Figura 5

Análisis bibliométrico de la combinación “Ablative” AND “Composite” AND “Material” (TITLE-ABS-KEY). Base de datos Scopus.

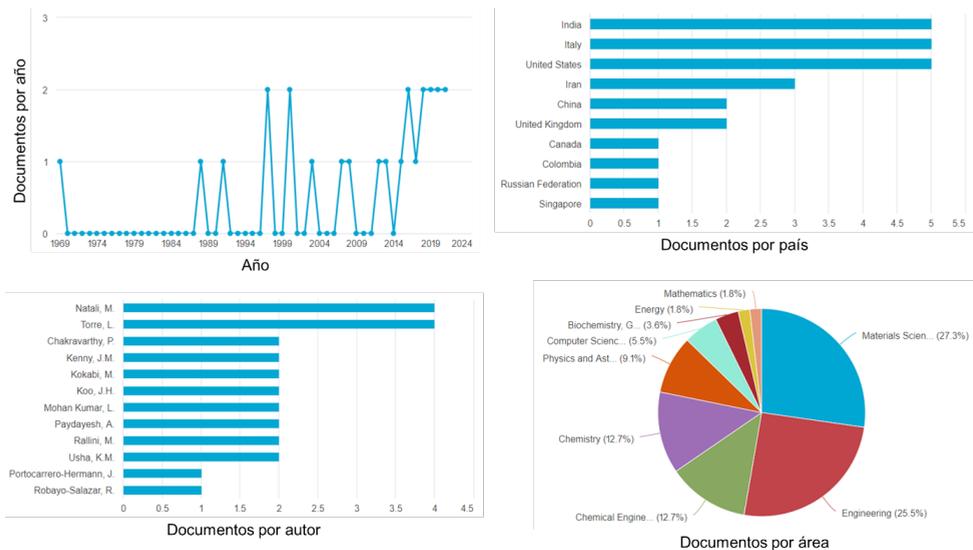


Fuente: Elaboración propia.

La segunda búsqueda como se muestra en la Figura 6 arrojó resultados más específicos, reportando un total de 24 documentos publicados entre los años 1969 al 2021. Dentro de los países con más publicaciones en el tema se destacan India, Italia y Estados Unidos, con 5 documentos cada uno. Dentro de los autores con más publicaciones relacionadas se destacan Maurizio Natali y Luigi Torre, ambos de la *Università degli Studi di Perugia* (Perugia, Italia), con un total de 4 documentos. Para esta búsqueda, el número de documentos por área de conocimiento sitúa a la Ciencia de los Materiales como la de mayor interés, con un 27,3 % (15 documentos), seguida por las Ingenierías con un 25,5 % (14 documentos) y la Ingeniería Química con un 12,7 % (7 documentos).

Figura 6

Análisis bibliométrico de la combinación “Polymeric” AND “Ablative” AND “Composite” AND “Material” (TITLE-ABS-KEY). Base de datos Scopus.



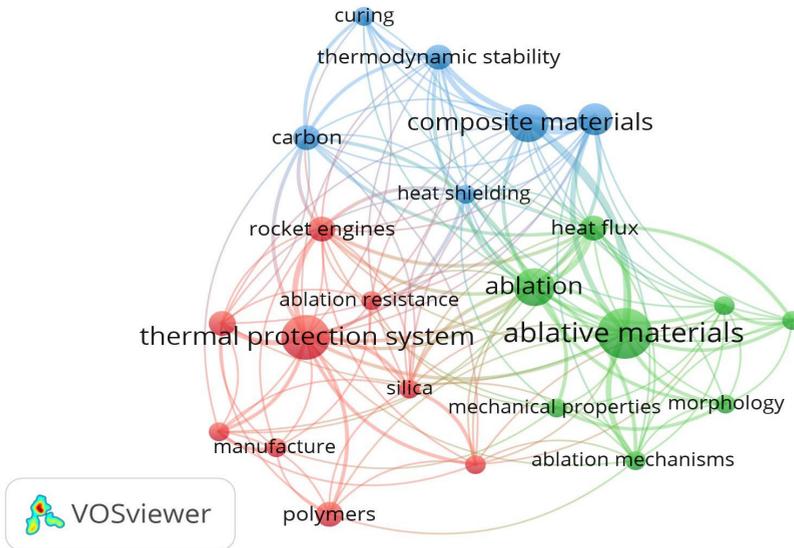
Fuente: Elaboración propia.

El análisis de coocurrencias de las palabras claves (*keywords*) reportadas en esta segunda búsqueda se puede observar en la Figura 7. Como se evidencia, existen tres clústeres relacionados con las

siguientes palabras claves: “sistemas de protección térmica” (*thermal protection systems*) (color rojo), “materiales ablativos” (*ablative materials*) (color verde) y “materiales compuestos” (*composites materials*) (color azul). Adicionalmente, se destaca la relación de coocurrencias con la palabra “motores cohete” (*rocket engines*), siendo esta una de las aplicaciones más interesantes para este tipo de materiales en el campo aeroespacial, tal y como fue resaltado en el ítem 2.1 del presente capítulo.

Figura 7

Análisis de concurrencias de las palabras claves (keywords) resultado del análisis bibliométrico de la combinación “Polymeric” AND “Ablative” AND “Composite” AND “Material” (TITLE-ABS-KEY) en Scopus.



Fuente: Elaboración propia, realizada a través del Programa Vosviewer.

A la fecha, Colombia reporta 1 documento (Robayo-Salazar et al., 2020) indexado en Scopus relacionado con los materiales compuestos ablativos de matriz polimérica, aunque cabe resaltar que el número de publicaciones en revistas nacionales especializadas (no indexadas en Scopus) es superior como se evidencia en la Tabla 1 y se relacionan a la

EMAVI de la FAC como la institución pionera en la nación en esta línea de investigación. En efecto, las investigaciones en la EMAVI relacionadas con materiales compuestos ablativos tuvieron origen en el año 2008, cuando se inició un proyecto para el desarrollo del cohete colombiano en el Centro de Investigación en Tecnologías Aeroespaciales (CITAE) de la FAC. En el marco de dicho proyecto, las múltiples restricciones para la llegada de un material ablativo norteamericanos motivaron el planteamiento del primer estudio enfocado a la obtención de un material ablativo colombiano para la tobera del cohete que se diseñaba en aquel entonces. A partir de ese momento, múltiples investigaciones han surgido desde el Programa de Ingeniería Mecánica (PIMEC) de la EMAVI, con la participación de cadetes, docentes, investigadores y oficiales de la FAC. Se destaca al Profesor Julián Portocarrero Hermann como uno de los líderes y pioneros en esta línea de investigación. Actualmente, el PIMEC adelanta investigaciones en harás de obtener nuevas formulaciones de materiales compuestos ablativos que sean aptos para la manufactura de componentes de propulsión (cámaras de combustión y toberas) de motores cohetes, con la ventaja de poseer un significativo menor peso que los elaborados a partir de materiales convencionales (metales refractarios). En este sentido, el propósito de estas investigaciones es el obtener motores cohete de menor peso con el fin de incrementar la relación empuje/peso de los cohetes experimentales (tipo sonda) que actualmente se diseñan y construyen en la EMAVI con fines científicos, tecnológicos y militares.

Tabla 1

Publicaciones de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez” de la Fuerza Aérea Colombiana sobre materiales compuestos ablativos de matriz polimérica en revistas especializadas.

Año	Título	Referencia
2012	Construcción y evaluación de una tobera a escala menor basada en material compuesto para cohetes de órbita baja.	(Quiñonez et al., 2012)
2014	Evaluación del comportamiento térmico de materiales compuestos de matriz polimérica en prototipos de toberas para cohetes de órbita baja.	(Maldonado Villa et al., 2014)

2014	Evaluación del comportamiento mecánico de los materiales compuestos en toberas para cohetes de órbita baja.	(Maldonado et al., 2014)
2019	Comportamiento ablativo de compuestos de matriz polimérica y su aplicación en el campo aeroespacial.	(Robayo-Salazar et al., 2019)
2019	Compuestos ablativos de matriz polimérica (resina poliéster) reforzada con materiales de desecho industrial y fibra de vidrio.	(Hermann et al., 2019)
2020	Polymeric ablative composite materials and their application in the manufacture of aerospace propulsion component.	(Robayo-Salazar et al., 2020)
2020	Materiales compuestos ablativos y sistemas de protección térmica. Capítulo 3 en: "Materiales Compuestos. Clasificación, Procesamiento y Aplicaciones: Soluciones para los sectores aeronáuticos, aeroespacial y defensa".	(Robayo-Salazar y Portocarrero Hermann, 2020)

Fuente: Elaboración propia.

4. Materiales y metodología

A partir del análisis de la bibliografía especializada y una revisión de las materias primas disponibles localmente para la producción de materiales compuestos ablativos, para esta investigación se seleccionó la resina poliéster como matriz polimérica y fibra de vidrio corta (4 mm) como el material de refuerzo dispersa al azar. Así mismo, como una contribución a la economía circular de los subproductos industriales de la región y la posibilidad de utilizar materias primas de bajo costo, se seleccionaron como refuerzos particulados cuatro residuos, que corresponden a tres escorias; siderúrgica (1), de aluminio (2) y de fundición (3), y un residuo cerámico (4) proveniente de la demolición de obras civiles (ver Figura 8). Estos residuos fueron finamente molidos utilizando un molino de bolas, hasta obtener un tamaño de partícula

inferior a las 200 μm . La Tabla 2 muestra las proporciones utilizadas para la obtención de los 4 tipos de PAs.

Figura 8

Materias primas utilizadas para la obtención de los PAs.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2

Proporciones de los PAs (porcentaje (%) en peso de cada componente).

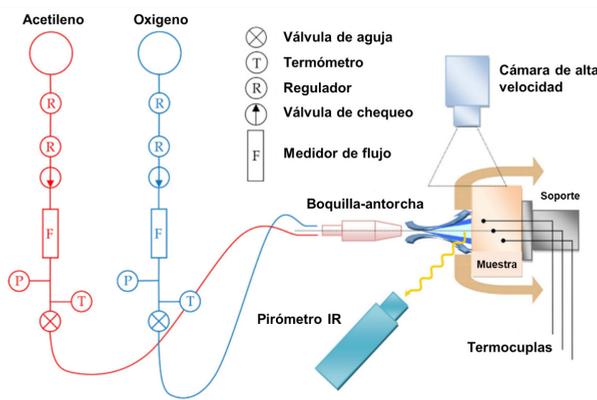
Ablativo	Refuerzo particulado (%)				Fibra de Vidrio (%)	Resina Poliéster (%)
	Escoria Siderúrgica	Escoria de Aluminio	Escoria de Fundición	Residuo Cerámico		
PA _s -1	0	0	0	67		
PA _s -2	67	0	0	0	3	30
PA _s -3	0	67	0	0		
PA _s -4	0	0	67	0		

Fuente: Elaboración propia.

Los PAs fueron obtenidos mediante un proceso de mezclado de los componentes y moldeo de placas rectangulares de 5 mm de espesor, las cuales fueron sometidas a un proceso de curado térmico (60 °C por 6 horas) para su posterior evaluación. La caracterización de los PAs incluyó la determinación de su comportamiento ablativo mediante una prueba de llama directa, adaptando el procedimiento establecido por la norma ASTM E285 (ASTM International, 2015) como se muestra en la Figura 9. La adaptación consistió, entre otras cosas, en utilizar un soplete de gas de propano/propileno MAP-PRO Worthington como fuente de la llama. El registro de la temperatura se llevó a cabo a través de la ubicación de termopares sobre la cara opuesta a la incidencia de la llama y la utilización de una cámara FLIR E40 para el registro del perfil térmico de los PAs. Complementariamente, se realizó un análisis termogravimétrico (TGA) según la norma ASTM E1131 (ASTM International, 2020), a través de un analizador termogravimétrico TGA/DSC 2 Star System Mettler Toledo. La termogravimetría permitió determinar los cambios de masa (masa residual) como resultado de la variación de temperatura (25-900°C). Además, la derivada de la masa en función de la temperatura (DTG) representa la tasa de pérdida de masa y permitió identificar la temperatura a la que se produjo la máxima descomposición de los PAs.

Figura 9

Montaje experimental típico para el ensayo de llama directa (ASTM E285).



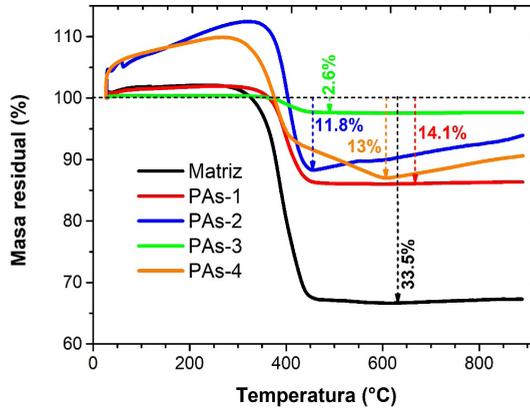
Nota. Adaptado de "Progress in Materials Science" por Natali et al., 2016, Volume 84, December, pp. 192-275.

5. Resultados y discusión

La caracterización de los PAs se realizó a través de ensayos de llama directa (ASTM E285) y análisis termogravimétricos (TGA). En primera instancia, los resultados obtenidos mediante el ensayo de TGA se pueden observar en la Figura 10. Estos reflejan que la incorporación de los refuerzos particulados (1: escoria siderúrgica, 2: escoria de aluminio, 3: escoria de fundición y 4: residuo cerámico) promueve una mayor estabilidad térmica en los PAs, en comparación con la matriz basada 100 % en resina poliéster. Por su parte, la Figura 11 corresponde a la primera derivada (DTG) de la curva TGA. Esta brinda información acerca de la tasa con la cual se genera la pérdida de masa y permite identificar la temperatura a la que se produce la máxima descomposición en los PAs. En la Figura 11 (DTG) se observa un pico de degradación máximo para los PAs-1, PAs-2, PAs-3 y PAs-4 de 397°C, 404°C, 395°C y 376°C, respectivamente, con relación a la matriz que reporto un pico máximo de descomposición entorno a los 386°C. Al respecto, los PAs iniciaron la pirolisis en un rango de temperatura aproximado a los 280-350°C, tal y como se puede observar en la Figura 10 (TGA). No obstante, las mayores pérdidas de masa se registraron entre los 350-450°C. Por medio de esta técnica (TGA) se pudo determinar que, a partir de los 600°C, las reacciones de pirolisis se desaceleraron dando origen a la capa carbonosa. En el TGA como se muestra en la Figura 10, los PAs-1, PAs-2, PAs-3 y PAs-4 reportaron una masa residual de 85,9 %, 88,2 %, 97,4 % y 87,0 %, respectivamente, en comparación con la matriz de resina poliéster virgen que alcanzó una masa residual total de 66,5 %. En efecto, estos niveles de reducción de la pérdida de masa pueden deberse al alto contenido (67 %) de las partículas de refuerzo en la matriz.

Figura 10

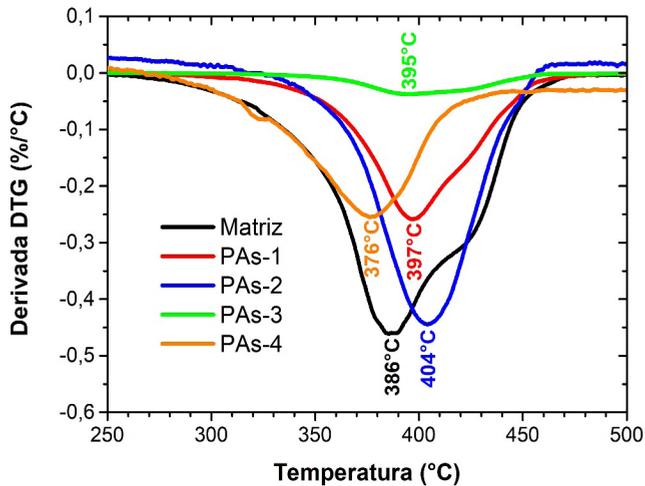
Curvas termogravimétricas (TGA) de los PAs en comparación con la matriz (100 % resina poliéster).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11

Curvas de la derivada del peso DTG de los PAs en comparación con la matriz (100 % resina poliéster).



Fuente: Elaboración propia.

A pesar de que los resultados obtenidos mediante el ensayo de TGA demuestran el aporte positivo que generan las partículas de refuerzo sobre el comportamiento térmico de los PAs, durante este ensayo tan solo se alcanzó un umbral de temperatura de 900 °C; un valor muy inferior a la temperatura real de funcionamiento de los componentes de propulsión, como la cámara de combustión y la tobera de un motor cohete, que pueden alcanzar valores superiores a los 3.000 °C. Así mismo, otra limitante es que la velocidad de calentamiento durante el ensayo de TGA no es comparable con las condiciones reales de servicio, dado que durante el ensayo de TGA se trabajó con una tasa de calentamiento de 10°C/min, mientras que en las condiciones de trabajo de un motor cohete estas razones de cambio de temperatura pueden alcanzar, según (Natali et al., 2016), los $\approx 100.000^\circ\text{C}/\text{min}$, así mismo, el ensayo de TGA no puede reproducir el esfuerzo cortante causado por los gases de combustión o por el vuelo de reingreso a la atmósfera terrestre, y, por lo tanto, no se puede evaluar la erosión mecánica de los PAs (Robayo-Salazar y Portocarrero Hermann, 2020).

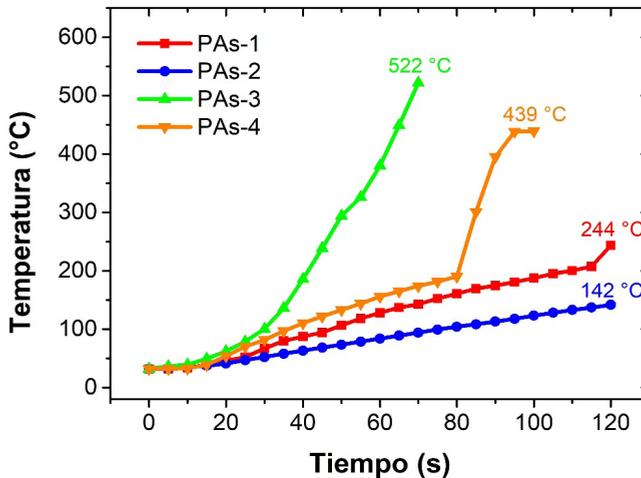
Es por esta razón que en esta investigación se optó por complementar el análisis con la aplicación del método de llama directa propuesto por la norma ASTM E285. Cabe anotar que este procedimiento es considerado como la forma más común, económica y confiable de realizar una prueba que simule parcialmente el ambiente térmico y abrasivo que se presenta al interior de un motor cohete o sobre la superficie de elementos recuperables durante su reingreso a la atmósfera terrestre. Es decir, este método de ensayo es más idóneo para caracterizar el desempeño ablativo de materiales y/o componentes que serán sometidos a erosión termomecánica, como las toberas de motor cohete y los revestimientos para el control del calentamiento aerodinámico de superficies de vehículos espaciales y cargas útiles (Natali et al., 2016).

En efecto, la Figura 12 muestra las curvas de temperatura vs. tiempo de ensayo (llama directa) obtenidas para los PAs. Esta temperatura fue registrada a través de termopares ubicados en la superficie de la cara opuesta a la incidencia de la llama, tal y como se representa gráficamente en la Figura 9. En este sentido, estos valores de temperatura son, en conjunto, un indicador de la capacidad aislante para cada material compuesto, teniendo en cuenta que la temperatura de la llama incidente es de alrededor de dos mil grados centígrados (2000°C). El tiempo máximo de ensayo fue de 120 segundos, no obstante, solo los PAs-1 y PAs-2 lograron soportar la acción de la llama durante todo este tiempo. Por el contrario, los PAs-3 y PAs-4 lograron resistir

durante 70 y 100 segundos, respectivamente, tiempo a partir del cual la llama traspasó la placa, afectando los termopares instalados sobre la superficie e interrumpiendo de esta forma el ensayo. La máxima temperatura registrada en la cara opuesta a la incidencia de la llama para los PAs-1, PAs-2, PAs-3 y PAs-4 fue de 244 °C, 142°C, 522°C y 439 °C, respectivamente. Estos valores de temperatura coinciden con los registrados a través la cámara termográfica FLIR E40 enfocada sobre la misma cara opuesta a la incidencia de la llama (ver Figura 13). En efecto, los PAs-1, PAs-2, PAs-3 y PAs-4 alcanzaron un nivel de aislamiento térmico del 87,8 %, 92,9 %, 73,9 % y 78,1 %, respectivamente, si se tiene en cuenta que la temperatura de la llama incidente registra los 2000 °C. Estos resultados demuestran que, entre los materiales evaluados, son la escoria siderúrgica (PAs-2) y el residuo cerámico (PAs-1) los refuerzos particulados que mejor rendimiento térmico promueve en los PAs. Adicionalmente, se pudo corroborar la formación de la capa carbonosa (ver Figura 14) sobre la superficie de los PAs expuestos a la llama directa, como resultado del fenómeno de pirolisis intensiva que sufre la matriz polimérica, tal y como fue descrito en el ítem 2.1 del presente capítulo.

Figura 12

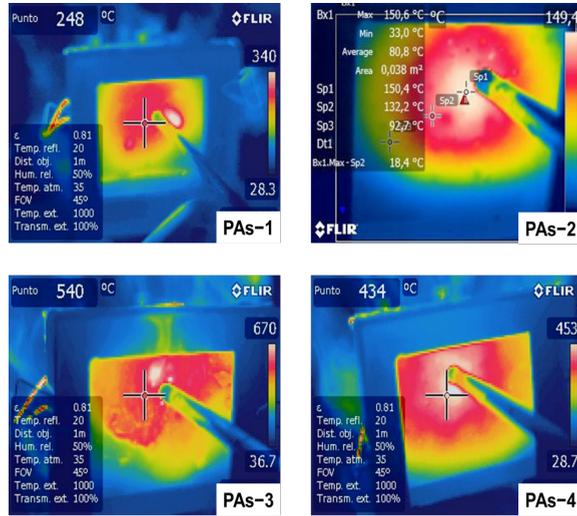
Curvas de temperatura vs. tiempo de ensayo de ablación (ASTM E285) de los PAs.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 13

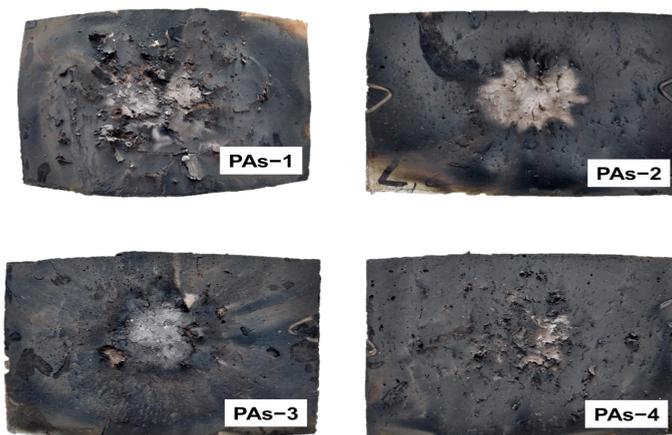
Perfiles termográficos registrados en la cara opuesta a la incidencia de la llama a través de una cámara termográfica FLIR E40.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 14

Formación de la capa carbonosa en los PAs. Inspección visual de la cara expuesta a la incidencia directa de la llama durante el ensayo ablativo (ASTM E285).



Fuente: Elaboración propia.

Como dato complementario, al finalizar el ensayo de ablación, las placas de PAs-1, PAs-2, PAs-3 y PAs-4 reportaron una pérdida de masa del 9,1 %, 8,5 %, 13,1 % y 13,0 %, respectivamente. Si se observa, estos valores coinciden con los desempeños ablativos reportados por estos mismos materiales, evidenciando un comportamiento inversamente proporcional entre la pérdida de peso ($\text{PAs-2} < \text{PAs-1} < \text{PAs-4} < \text{PAs-3}$) y nivel de aislamiento térmico ($\text{PAs-2} > \text{PAs-1} > \text{PAs-4} > \text{PAs-3}$).

En general, estos resultados en su conjunto avalan el uso de los PAs como materiales ablativos o sistemas de protección térmica. Adicionalmente, como se ha mencionado anteriormente, una de las ventajas de los PAs es su baja densidad. En efecto, al comparar la densidad de los PAs obtenidos en la EMAVI ($\text{PAs-1} = 1,88 \text{ g/cm}^3$; $\text{PAs-2} = 1,95 \text{ g/cm}^3$; $\text{PAs-3} = 1,70 \text{ g/cm}^3$; $\text{PAs-4} = 1,99 \text{ g/cm}^3$), con la de otros materiales comúnmente utilizados en la fabricación de motores cohetes, tales como las aleaciones de acero ($7,84 \text{ g/cm}^3$), aluminio ($2,79 \text{ g/cm}^3$) o titanio ($4,60 \text{ g/cm}^3$) (Suton y Biblarz, 2010), se puede corroborar la importancia de este desarrollo y la posibilidad de reducir el peso de la aplicación final. Al respecto, una de las aplicaciones de mayor interés para estos materiales es la manufactura de componentes de propulsión tipo toberas de motores cohetes (Robayo-Salazar et al., 2020). Cabe destacar que, producto de estos resultados, en la EMAVI se adelantan actualmente investigaciones complementarias que posibilitaría la transferencia de estos hallazgos en la construcción de cohetes tipo sonda aptos para el transporte a baja altura de pequeñas cargas útiles (Robayo-Salazar et al., 2021). Así mismo, estos resultados han impulsado toda una línea de investigación en PAs y TPS en el GIEA de la FAC.

Conclusiones

Esta investigación ha demostrado la posibilidad de obtener y caracterizar materiales compuestos ablativos a partir de materias primas de fácil adquisición y bajo costo, los cuales podrían ser utilizados para la fabricación de componentes de propulsión como las toberas de los motores cohete. Cabe resaltar que estos materiales fueron diseñados a partir de un alto contenido de residuos o subproductos industriales, tales como: escoria siderúrgica, escoria de aluminio, escoria de fundición y residuo cerámico.

El análisis bibliométrico presentado en este capítulo de libro demuestra el actual interés científico sobre el estudio de los sistemas de protección térmica y materiales ablativos. En efecto, esto ha hecho que en la Escuela Militar de Aviación de la Fuerza Aérea Colombiana se promueva el desarrollo de una línea de investigación enfocada en la síntesis, caracterización y optimización de TPS tipo PAs, con la validación de otros tipos de modificadores y/o refuerzos (particulados y fibras) y su aplicación directa en la manufactura de componentes de propulsión, como las toberas de los cohetes tipo sonda o de órbita baja, en respuesta a una necesidad específica de la industria aeroespacial nacional y en especial de la FAC.

Finalmente, de los resultados obtenidos se pudo concluir que el residuo cerámico (PAs-1) y la escoria siderúrgica (PAs-2) promueven los mejores desempeños ablativos y térmicos entre los PAs obtenidos y caracterizados. En efecto, el nivel de aislamiento térmico alcanzado por estos compuestos fue del 87,8 % (PAs-1) y 92,9 % (PAs-2), si se tiene en cuenta que la llama incidente registró una temperatura de 2000°C y las máximas temperaturas registradas en la cara opuesta a la incidencia de la llama para el PAs-1 y PAs-2 fueron de 244 °C y 142 °C, respectivamente. Por su parte, la pérdida de masa de estos compuestos fue de tan solo el 9,1 % (PAs-1) y 8,5% (PAs-2).

Referencias

- Aranzazu Rios, M. L., Muñoz Cárdenas, V. P., Giraldo, Cárdenas, M. J., Gaviria, G. H., y González Rojas, F. A. (2013). Modelos cinéticos de degradación térmica de polímeros: una revisión. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 12 (23), 113–130. <https://doi.org/10.22395/rium.v12n23a9>.
- Asaro, L., Manfredi, L. B., Pellice, S., Procaccini, R. y Rodriguez, E. S. (2017). Innovative ablative fire resistant composites based on phenolic resins modified with mesoporous silica particles. *Polymer Degradation and Stability*, 144, 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2017.07.023>.
- ASTM International. (2015). ASTM E285, *Standard test method for oxyacetylene ablation testing of thermal insulation materials*. <https://doi.org/10.1520/E0285-08R15>.
- ASTM International. (2020). ASTM E1131, *Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry*. <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E1131>.
- Astola, P. J., Rodríguez, M. A., Botana, F. J. y González-Rovira, L. (2017). Caracterización de elementos de protección térmica de materiales compuestos mediante análisis térmicos. *Revista de La Asociación Española de Materiales Compuestos*, 2 (4), 34–41.
- Hermann, J. P., Osorio, J. D., y Robayo-Salazar, R. A. (2019). Compuestos ablativos de matriz polimérica (resina poliéster) reforzada con materiales de desecho industrial y fibra de vidrio. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 19 (36), 223–237. <https://doi.org/10.22395/rium.v19n36a11>.
- Koo, J. H., Pilato, L. A. y Wissler, G. E. (2007). Polymer nanostructured materials for propulsion systems. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 44 (6), 1250–1262. <https://doi.org/10.2514/1.26295>.
- Krzyzak, A., Kucharczyk, W., Gaska, J. y Szczepaniak, R. (2018). Ablative test of composites with epoxy resin and expanded perlite. *Composite Structures*, 202 (January), 978–987. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.018>.
- Kucharczyk, W., Dusiński, D., Żurowski, W. y Gumiński, R. (2018). Effect of composition on ablative properties of epoxy composites modified

- with expanded perlite. *Composite Structures*, 183, 654–662. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.047>.
- Maldonado, J., Portocarrero, J., Acuña, M. y Valbuena, J. (2014). Evaluación del comportamiento mecánico de los materiales compuestos en toberas para cohetes de órbita baja. *Revista colombiana de Materiales*, 5, 303–309. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/materiales/article/view/19614>.
- Maldonado Villa, J., Portocarrero Hermann, J., Rodríguez Adaime, C., Valbuena Cocunubo, J. J. y Acuña Lizarazo, M. E. (2014). Evaluación del comportamiento térmico de materiales compuestos de matriz polimérica en prototipos de toberas para cohetes de órbita baja. *Revista Científica General José María Córdova*, 12 (13), 275–290. <https://doi.org/10.21830/19006586.163>.
- Mohan Kumar, L., Usha, K. M., Anandapadmanabhan, E. N. y Chakravarthy, P. (2017). Effect of fibre orientation on the properties and functional performance of ablative materials for solid rocket motors. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 70 (9), 2407–2413. <https://doi.org/10.1007/s12666-017-1102-1>.
- NASA. (2008). Sistema y materiales de protección termica (TPS). Centro de Investigación Ames. <https://www.nasa.gov/centers/ames/spanish/research/humaninspace/humansinspace-thermalprotec.html>.
- Natali, M., Kenny, J. M. y Torre, L. (2016). Science and technology of polymeric ablative materials for thermal protection systems and propulsion devices: A review. *Progress in Materials Science*, 84, 192–275. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.08.003>.
- Natali, M., Kenny, J. M. y Torre, L. (2018). Chapter 15 - Thermoset Nanocomposites as ablative materials for rocket and military applications. In Q. B. T.-T. (Second E. Guo (Ed.), *Thermosets (Second Edition). Structure, Properties, and Applications* (pp. 477–509). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101021-1.00015-0>.
- Pulci, G., Paglia, L., Genova, V., Bartuli, C., Valente, T. y Marra, F. (2018). Low density ablative materials modified by nanoparticles addition: Manufacturing and characterization. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 109, 330–337. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.03.025>.
- Quiñonez, D., Lizcano, Y., Vaquez, C., Maldonado, J. y Portocarrero, J. (2012). Construcción y evaluación de una tobera a escala menor

basada en material compuesto para cohetes de órbita baja. *Revista Inge@UAN*, 2 (4), 13–21.

Robayo-Salazar, R., Portocarrero-hermann, J., Díaz-Padrón, U., y Patiño-Castrillón, O. (2019). Comportamiento ablativo de compuestos de matriz polimérica y su aplicación en el campo aeroespacial. *Revista Informador Técnico*, 83 (2 (suplemento I)), 7–27.

Robayo-Salazar, R., Portocarrero-Hermann, J., Díaz-Padrón, U. y Patiño-Castrillón, O. (2020). Polymeric Ablative Composite Materials and their Application in the Manufacture of Aerospace Propulsion Components. *Revista Facultad de Ingeniería*, 29 (54), e10662. <https://doi.org/10.19053/01211129.v29.n54.2020.10662>.

Robayo-Salazar, R., Portocarrero-Hermann, J., Meneses-Suta, J., Salgado-Díaz, J., Martínez-Riaño, S., Delgado, F. y Gómez-Ruge, A. (2021). Diseño, construcción y prueba estática experimental de un motor-cohete de combustible solido. *Revista UIS Ingenierías*, 20 (2), 97–108. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n2-2021009>.

Robayo-Salazar, R. y Portocarrero Hermann, J. (2020). Capítulo 3. Materiales compuestos ablativos y sistemas de protección térmica. In *Materiales Compuestos. Clasificación, Procesamiento y Aplicaciones: Soluciones para los sectores aeronáuticos, aeroespacial y defensa* (Primera Ed, pp. 103–130). Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”.

Rodríguez, E. S. (2012). Desarrollo de materiales compuestos avanzados basados en fibras de carbono para la industria aeroespacial. *Anales de La Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 64, 1–6. http://www.ancefn.org.ar/biblioteca/anales/tomo_64/16.pdf.

Suton, G. P. y Biblarz, O. (2010). *Rocket Propulsion Elements* (Eighth Edi). John Wiley y Sons, Inc.

Tang, S. y Hu, C. (2017). Design, Preparation and Properties of Carbon Fiber Reinforced Ultra-High Temperature Ceramic Composites for Aerospace Applications: A Review. *Journal of Materials Science y Technology*, 33 (2), 117–130. <https://doi.org/10.1016/J.JMST.2016.08.004>.

Capítulo 2

Obtención mediante técnicas no convencionales de materiales cerámicos avanzados para aplicaciones espaciales

Amparo Borrell¹

Maria Dolores Salvador¹

Alfonso Fernández²

Marta Suárez²

Rut Benavente¹

-
- 1 Instituto de Tecnología de Materiales, Universitat Politècnica de València (UPV), Camino de Vera S/N, 46022, Valencia, Spain.
 - 2 Nanomaterials and Nanotechnology Research Center (CINN-CSIC), Universidad de Oviedo (UO), Principado de Asturias (PA), Avda. de la Vega, 4-6, 33940, El Entrego, Spain.

Resumen

Diversos organismos industriales del sector aeroespacial están trabajando para desarrollar nuevos conceptos y tecnologías de fabricación basadas en materiales cerámicos que permiten combinar propiedades y funcionalidades excepcionales en aplicaciones específicas, como puede ser la dilatación nula, módulo de Young específico >100 GPa y conductividad térmica $>100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. El objetivo principal es aumentar el rendimiento y la eficacia de las misiones espaciales. Esta necesidad nos conduce al desarrollo de nuevos espejos primarios con una masa mínima y una calidad óptica muy alta, los cuales tienen que tener un bajo o nulo coeficiente de expansión térmica y que a la vez sea homogéneo en un amplio rango de temperaturas (-150 °C a $+400$ °C), para asegurar una perfecta estabilidad dimensional frente a los cambios bruscos de temperatura y alta durabilidad en condiciones extremas. Los materiales del sistema aluminosilicatos de litio, LAS (en su fase de beta-eucryptita), reforzados con segundas fases (alúmina, SiC, grafeno, etc.) son de gran interés tecnológico debido principalmente a sus propiedades térmicas, mecánicas y baja reactividad química. Por otra parte, el estudio de estos materiales compuestos fabricados mediante tecnología no-convencional (Microondas y Spark Plasma Sintering, SPS), son actualmente un desafío para la industria aeroespacial, por sus propiedades térmicas y eléctricas. La combinación de un calentamiento rápido junto con la reducción drástica en el tiempo de ciclo y el ahorro energético hace que las técnicas no convencionales sean una clara alternativa a otro tipo de calentamientos convencionales.

Abstract

Several industrial organizations in the aerospace sector are working to develop new concepts and manufacturing technologies based on ceramic materials that combine exceptional properties and functionalities in specific applications, such as near-zero thermal expansion coefficient, specific Young's modulus >100 GPa and thermal conductivity $>100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. The main objective is to increase the performance and efficiency of space missions. This need leads to the development of new primary mirrors with minimum mass and very high optical quality, which have to have a low or zero thermal expansion coefficient and at the same time be homogeneous over a wide temperature range (-150 °C to $+400$ °C), to ensure perfect dimensional

stability against sudden temperature changes and high durability in extreme conditions. The lithium aluminosilicates, LAS system, materials (in their beta-eucryptite phase) reinforced with second phases (alumina, SiC, graphene,...) are of great technological interest mainly due to their thermal and mechanical properties and low chemical reactivity. On the other hand, the study of these composite materials fabricated by non-conventional technology (Microwave and Spark Plasma Sintering, SPS), are currently a challenge for the aerospace industry, due to their thermal and electrical properties. The combination of rapid heating together with the drastic reduction in cycle time and energy savings, makes non-conventional techniques a clear alternative to other types of conventional heating.

Palabras clave: Aluminosilicatos de litio, coeficiente de expansión térmica, grafeno, microondas, propiedades mecánicas, Spark Plasma Sintering.

Keywords: Coefficient of thermal expansion, graphene, lithium aluminosilicates, mechanical properties, microwaves; Spark Plasma Sintering.

Introducción

Los últimos 50 años se han caracterizado por un avance vertiginoso en materia científica y tecnológica. En la actualidad el aporte tecnológico es fundamental en todas las áreas y, su mejora y especificación es tan rápida que la demanda de nuevos materiales es continua. El diseño de estos nuevos materiales avanzados se realiza, por lo tanto, para satisfacer las limitaciones existentes actualmente, buscando unas propiedades inusuales con alto valor añadido. El reto se encuentra en obtener materiales con excelentes prestaciones mecánicas, combinadas con funcionalidades excepcionales para aplicaciones específicas.

En el campo de la microelectrónica, la óptica de precisión y la tecnología aeroespacial, los materiales ultraestables son muy importantes, ya que son aquellos que mantienen la estabilidad dimensional al cambiar de temperatura. Este tipo de materiales son requeridos en muchos tipos de

dispositivos de precisión en los que tenga que asegurarse esta estabilidad en alguno de los componentes con los cambios de temperatura.

En el área de la tecnología aeroespacial, las cerámicas monolíticas compuestas por aluminosilicatos de litio (LAS), son una clara alternativa para su empleo en espejos de satélite, ya que poseen tres características muy importantes: un coeficiente de expansión térmica (CET) nulo o negativo, altas propiedades mecánicas y baja densidad superficial.

El interés por los materiales base LAS alcanzó una gran importancia a partir de los años cincuenta desde los estudios de Roy et al. (Roy et al. 1950) (en los que se establecieron las relaciones de fases y los diagramas de equilibrio para este sistema. Estos diagramas son aún referencia imprescindible en cualquier estudio del sistema LAS. Las propiedades de dilatación térmica de los aluminosilicatos de litio son las características más interesantes de este sistema. Así, a mediados del siglo pasado ya se estudiaron estas propiedades con detalle (Abdel-Fattah y Abdellah, 1997), acotando zonas en el diagrama de fases de Roy en las que el coeficiente de dilatación térmica es prácticamente nulo o negativo. González-Peña hizo un interesante resumen acerca de estos primeros estudios de materiales cerámicos a partir de aluminosilicatos de litio (Schulz, 1974).

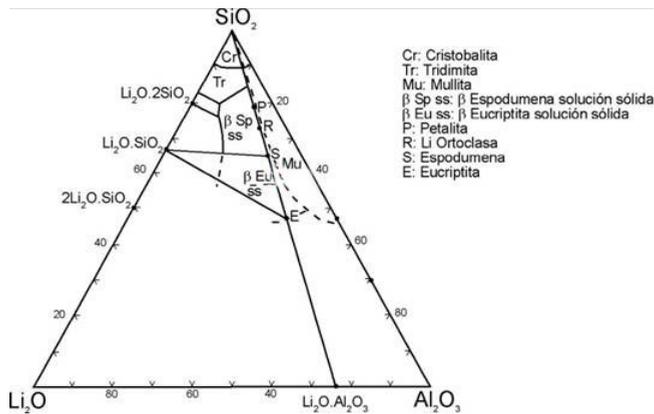
En la Figura 1, se puede observar el diagrama de fases del sistema $\text{Li}_2\text{O}:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ obtenido por Roy y Osborn (Roy et al., 1950). Este diagrama muestra las fases principales y sus relaciones del sistema LAS, aunque, como puede observarse, hay amplias zonas composicionales en las que estas relaciones no están descritas o son únicamente orientativas.

Frecuentemente, los materiales con CET negativo tienen unos valores de resistencia a la fractura muy baja, debido a una fuerte anisotropía entre las diferentes orientaciones cristalográficas, en las que una de ellas presenta un comportamiento negativo y las otras dos positivas. Esta anisotropía puede causar microfisuras que dan como resultado valores bajos en las propiedades mecánicas (Wang et al., 2012). En este sentido, el aluminosilicato de litio ha sido uno de los sistemas más estudiados en las últimas décadas, ya que presenta unas singulares características en dos de sus estructuras: la eucryptita (LiAlSiO_4) y la espodumena ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$) (García-Moreno et al., 2013). No obstante, hay que destacar que la β - eucryptita presenta un CET negativo en un amplio rango de temperaturas. Su estructura es equivalente a la

estructura rellena del cuarzo, en la que la mitad de los iones Si^{4+} han sido reemplazados por iones Al^{3+} , con iones Li^+ para compensar (Roy et al., 1950).

Figura 1

Diagrama de fases del sistema LAS



Nota. Adaptado de “Compositional and Stability Relationships Among the Lithium Aluminosilicates: Eucryptite, Spodumene, and Petalite.” por Roy et., 1950, *Journal of the American Ceramic Society* 33 (5): 152–59.

El CET negativo de la β -eucryptita se debe a una elevada anisotropía en su estructura cristalina (Ogiwara et al., 2011). Al aumentar la temperatura del material, la elongación que se produce en los ejes cristalográficos a y b, se ve compensada con la contracción que se produce en el eje c (García-Moreno et al., 2013). Esta anisotropía produce grandes tensiones residuales térmicas que derivan en microfisuraciones o microgrietas espontáneas en los granos de β -eucryptita. Los estudios actuales estiman que estas microgrietas y, por lo tanto, el CET, dependen del tamaño de grano, cuanto mayor sea este, la longitud de las microgrietas es mayor, lo que conduce a un CET más negativo y viceversa (Shyam, 2012).

Aunque el sistema LAS ha sido ampliamente estudiado en los últimos 40 años, las principales aplicaciones derivadas del comportamiento térmico de sus fases se basan principalmente en materiales vitrocerámicos, siendo mucho más escasos los estudios y aplicaciones de este sistema como material cerámico. El interés y la dificultad de

obtener materiales cerámicos basados en LAS en estado sólido están en sus inusuales y excelentes propiedades mecánicas, ópticas y térmicas, las cuales son completamente diferentes a las del material LAS vitrocerámico. Estudios previos sobre las propiedades dilatométricas de la β - eucryptita en estado sólido (García-Moreno et al., 2010), han puesto de manifiesto una relación entre la temperatura de sinterización de los materiales basados en β - eucryptita y la expansión térmica de los mismos.

Para conseguir el material LAS en estado sólido cristalino se puede actuar por una doble vía. Por un lado, se puede intervenir en el proceso de síntesis, diseñando un material con una combinación de fases adecuada que mejore las propiedades mecánicas, manteniendo sus propiedades térmicas (García Moreno et al., 2010). Por otro lado, se puede intervenir en el proceso de sinterización, empleando técnicas no convencionales (Benavente et al., 2014).

Las técnicas no convencionales que mejor resultado están proporcionando en este momento son: la sinterización por descarga eléctrica pulsada (del inglés, Spark Plasma Sintering, SPS) y la sinterización mediante radiación de microondas.

La sinterización de materiales cerámicos mediante radiación de microondas ha ganado importancia en los últimos años, como método de procesado rápido, flexible, económico y medioambientalmente sostenible, debido a sus ventajas frente a otras técnicas de calentamiento (Borrell et al., 2012; Borrell et al., 2013; Goldstein et al., 1999).

Las principales características asociadas al proceso de microondas se resumen en: un calentamiento volumétrico rápido y uniforme, mejora de la tasa de producción, mejora en la densificación y las propiedades mecánicas e inhibición del crecimiento de grano (Mazaheri, Zahedi y Hejazi, 2008; Ebadzadeh y Valefi, 2008), lo que la hace especialmente interesante para la sinterización de polvos cerámicos nanoestructurados. Esta técnica de microondas se ha empleado para la sinterización de una amplia variedad de cerámicas que van desde materiales dieléctricos a cerámicas transparentes (Cheng et al., 2002; Upadhyaya et al., 2001).

En este trabajo se propone el calentamiento por microondas y Spark Plasma Sintering, como técnicas de sinterización no convencionales, para obtener materiales basados en aluminosilicatos de litio en estado sólido y sin fase amorfa y, así, mejorar las propiedades finales

del material respecto a las obtenidas mediante sinterización por técnicas convencionales. El equipo de microondas, utilizado en este trabajo, ha sido especialmente diseñado para la obtención de piezas cerámicas de LAS con una alta densidad, baja proporción de fase vítrea y altas propiedades mecánicas. La densificación, el comportamiento microestructural, el coeficiente de expansión térmica y las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos base LAS obtenidos en estado sólido cristalino mediante microondas y SPS serán evaluados y comparados con la técnica convencional.

2. Metodología

2.1 Materiales de partida

El material de β - eucryptita empleado en este estudio ha sido sintetizado siguiendo la ruta de síntesis propuesta por (García-Moreno et al., 2010) con una composición química correspondiente a una relación de $\text{Li}_2\text{O}:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{SiO}_2$ de 1:1.1: 2.5. El polvo fue compactado mediante prensado isostático en frío con una presión de 200 MPa obteniéndose unas probetas de dimensiones de 15 mm de altura y 10 mm de diámetro. La densidad en verde de los compactos fue de aproximadamente, $1.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, es decir, un 49 % respecto a su densidad teórica ($2.39 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$).

Para la obtención de materiales compuestos $\text{LAS-Al}_2\text{O}_3$, se ha seleccionado, por una parte, la alúmina $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Taimei TM-DAR Chemicals Co. Ltd, Japón) con un tamaño medio de partícula de 160 nm. La $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ es la única estructura termodinámicamente estable en un amplio rango de temperaturas. Las mezclas de polvo se dispersaron en etanol y se procesaron en un molino de atrición de alta energía (Union Process, EE. UU), durante 1 h a 400 RPM. La composición de la mezcla fue LAS/10 vol% Al_2O_3 .

Otro de los materiales investigados en este trabajo ha sido el grafeno (GRAPHENEA S. A., pureza 99,99 %). Este óxido de grafeno fue sintetizado por el método Hummers modificado (Novoselov et al., 2004). El grafeno es una estructura formada por una única lámina de carbono con empaquetamiento hexagonal en la que la distancia C-C es de 0.142 nm (Tian et al., 2014). La preparación de los compuestos LAS/Grafeno se realizó mediante procesamiento coloidal. El óxido de grafeno (GO) se suministró en forma de suspensión (3.2 % en peso en agua destilada). Se suspendieron 10 g de β - eucryptita en 100 ml de agua y se

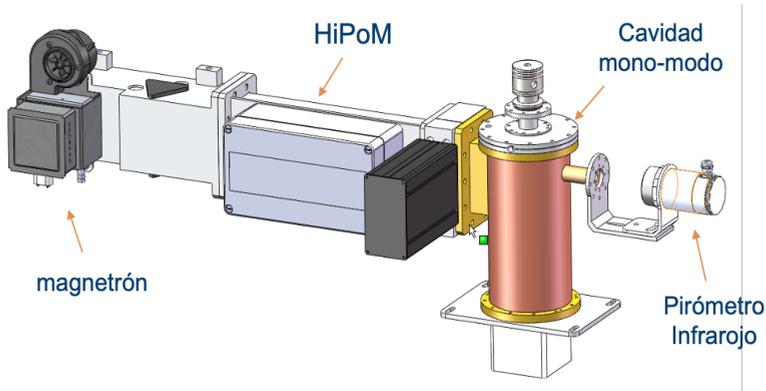
dispersó con agitación continua durante 30 minutos. De manera gradual, se fue añadiendo la suspensión de GO con dos contenidos diferentes: 0.5 y 1 % en peso. La suspensión se sonicó durante 30 minutos en una sonda ultrasónica (UP 400 S, Hielscher, Alemania). La suspensión final se criogenizó en un baño de nitrógeno líquido y se liofilizó (Cryodos-50, Telstar, España), durante 24 h. La mezcla de polvo seco se molió y se tamizó con una malla de 60 μm .

2.2 Sinterización de los materiales

Las muestras en verde se sinterizaron mediante el empleo de un equipo con una cavidad cilíndrica de 12 mm de diámetro que opera en el modo TE_{111} con una frecuencia de resonancia de 2.45 GHz y una potencia máxima de 300 W (Borrell et al., 2013). La cavidad resonante está acoplada por un iris cuyas dimensiones se han optimizado para esta aplicación (ver Figura 2). Entre la cavidad y la fuente de potencia de microondas se coloca un circulador con carga de agua que protege a la fuente de reflexiones indeseadas. Para evaluar la potencia consumida por la carga se emplea un reflectómetro de seis puertos que permite medir las potencias incidentes y reflejadas. Por último, la dimensión longitudinal de la cavidad es variable, de tal manera que la cavidad es sintonizable para así acoplar más o menos potencia y seguir un perfil de calentamiento preestablecido. La temperatura de la muestra se controla durante todo el proceso mediante un pirómetro de radiación infrarroja (Optris CT-Laser LT, 8-14 μm), que se concentra en la muestra de ensayo a través de una pequeña abertura circular en la pared de la cavidad. La emisividad del material LAS a diferentes temperaturas se calculó previamente. Las muestras se sinterizaron a 1200 y 1250 °C en aire con una velocidad de calentamiento de 100 °C·min⁻¹ y un tiempo de estancia a la máxima temperatura de 5 y 10 min, el enfriamiento fue controlado en todo momento. Por lo tanto, las muestras están expuestas al campo de microondas durante todo el proceso: calentamiento, estancia y enfriamiento.

Figura 2

Equipo de microondas diseñado para la sinterización de los materiales.



Nota. Adaptado de “Microwave Sintering of Zirconia Materials: Mechanical and Microstructural Properties” por Borrell et al., 2013, International Journal of Applied Ceramic Technology 10 (2): 313–320.

La otra técnica no convencional utilizada es el Spark Plasma Sintering, SPS HP D25/1 (FCT Systeme GmbH, Rauenstein, Alemania). El material se coloca en una matriz de grafito con un diámetro interior de 20 mm. Se utilizó una corriente continua de 1300 A para el calentamiento Joule con pulsos de corriente eléctrica de 30 segundos (800 A). Durante el ciclo térmico se aplica una presión de 50 MPa. Las muestras se sinterizaron a 1200 y 1300 °C en vacío con una velocidad de calentamiento de 100 °C·min⁻¹ y un tiempo de estancia a la máxima temperatura de 2 min, el enfriamiento fue controlado en todo momento.

El proceso de calentamiento convencional se llevó a cabo en un horno eléctrico (Thermolyne tipo 46100) en aire a 1200 y 1300 °C con una estancia de 2 h. La velocidad de calentamiento fue de 10°C·min⁻¹.

2.3 Caracterización de los materiales

La densidad aparente de las muestras sinterizadas se midió por el principio de Arquímedes (ASTM C373-88. *Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products*, 1988). Las propiedades nanomecánicas, como la dureza y el módulo de Young de las muestras se obtuvieron mediante la técnica de nanoindentación (Modelo G200, MTS Company).

Para llevar a cabo las indentaciones se utilizó una punta de diamante Berkovich nueva con radio <20 nm. Previamente las muestras se prepararon mediante técnicas metalográficas. Tras el corte, la superficie fue lapeada y pulida, con un paso final con pasta de diamante de $0.25\ \mu\text{m}$. Las propiedades nanomecánicas se evaluaron a partir de los datos de carga-desplazamiento utilizando el método ampliamente aceptado de Oliver y Pharr (1992).

Las fases cristalinas de los compuestos cerámicos se determinaron mediante difracción de rayos X (XRD, BRUKER AXS D5005, Karlsruhe, Alemania). Las mediciones se realizaron en el rango $15\text{-}70^\circ$ y el tamaño de paso y el tiempo de lectura fueron 0.02° y 0.3° s, respectivamente.

El comportamiento térmico de los materiales sinterizados se estudió en un dilatómetro Netzsch DIL-402-C, enfriado mediante un dispositivo de nitrógeno líquido acoplado. El intervalo de temperaturas estudiado está comprendido entre los entre $-150\ ^\circ\text{C}$ y $+450\ ^\circ\text{C}$. Las dimensiones de las muestras ensayadas son de $12 \times 10 \times 3$ mm.

Las secciones de la superficie de fractura de las muestras sinterizadas se observaron con un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (MEB-EC, HITACHI S-4800, Tokio, Japón). Los espectros Raman se obtuvieron utilizando un microscopio Raman confocal (WITec, Ulm, Alemania) con un láser de 532 nm. Se registraron hasta 20 espectros a lo largo de todo el espesor de los composites pulidos.

3. Resultados y Discusión

3.1 Materiales LAS

La Tabla 1 muestra los parámetros de sinterización y las densidades relativas de los polvos densificados de β - eucryptita en función de la técnica de sinterización: convencional (SC), spark plasma sintering (SPS) o microondas (SM).

Tabla 1

Condiciones de sinterización y valores de densidad relativa para las distintas muestras de LAS.

Técnica de sinterización	Temperatura de sinterización (°C)	Velocidad de calentamiento (°C·min⁻¹)	Tiempo de estancia (min)	Densidad relativa (% teórica)
Convencional	1200	10	120	88.9 ± 0.5
	1300			90.1 ± 0.5
SPS	1200	100	2	98.3 ± 0.5
	1300			99.1 ± 0.5
Microondas	1200	100	5	98.1 ± 0.5
	1250			98.3 ± 0.5
Microondas	1200	100	10	98.6 ± 0.5
	1250			98.8 ± 0.5

Los materiales obtenidos mediante técnicas no convencionales alcanzaron una mayor densidad en comparación con las muestras sinterizadas por SC. Un aumento de la temperatura no supone una mejora significativa en la densificación observada en ninguno de los casos. Las muestras sinterizadas a 1200 °C por SM con 10 minutos de tiempo de permanencia presentan una mejora de la densidad, hasta un 9 %, en comparación con las muestras sinterizadas a la misma temperatura y con 2 h de tiempo de permanencia. El tiempo empleado en el ciclo convencional es, aproximadamente 360 minutos y en el ciclo no convencional es de 30 minutos. Las diferencias económicas y de coste de tiempo son notables.

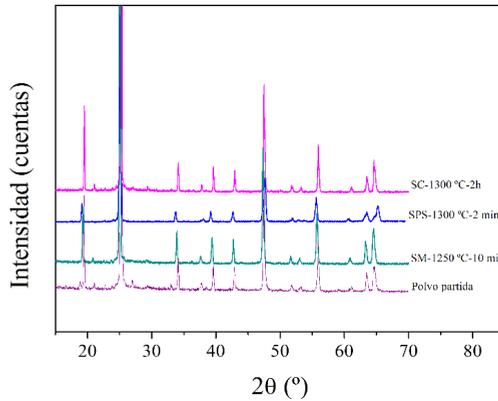
El calentamiento por microondas se ha reconocido como un método prometedor para mejorar la densificación de los materiales cerámicos (Gil-Flores et al., 2020). Durante el calentamiento por microondas, la energía se transfiere electromagnética al material y no como un flujo de calor térmico, lo que permite calentar el material a mayor velocidad y acortar el tiempo de sinterización. La rápida densificación de las muestras mediante SPS se atribuye a la mayor velocidad de densificación debido a mecanismos como la reordenación de las partículas y la ruptura de aglomerados con la ayuda de la presión la presión aplicada y las velocidades de calentamiento más rápidas.

Mediante el reordenamiento de las partículas, el proceso SPS también impide el aumento del tamaño de los poros, lo que generalmente se observa en las primeras e intermedias etapas de la sinterización (Yucheng y Zhengyi 2002).

La Figura 3 muestra el difractogramas del polvo de partida y de las muestras sinterizadas a la temperatura máxima para cada método de sinterización. En todos los casos, la fase común es la estructura β - eucryptita. (archivo PDF #870602 y 251183) (García-Moreno et al., 2010).

Figura 3

DRX del polvo LAS de partida u sinterizado por los diferentes métodos.



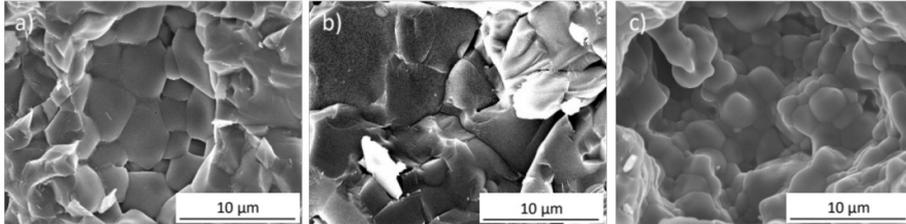
Nota. Adaptado de “Negative Thermal Expansion of Lithium Aluminosilicate Ceramics at Cryogenic Temperatures.” por García-Moreno et al., 2010, Scripta Materialia 63 (2): 170–73.

Las trazas de las fases de cuarzo y espodumena presentes en el polvo inicial no se observan en las muestras sinterizadas. En todos los casos, se han obtenido materiales sin fase vítrea.

La Figura 4 representa la superficie de fractura MEB-EC de las muestras de LAS sinterizadas por SC, SPS y SM a la temperatura de sinterización más alta de cada método empleado. Las muestras obtenidas por SC muestran porosidad abierta en comparación con las muestras de SM y SPS donde se observa una porosidad residual cerrada. Estos datos son coherentes con los valores de densidad (ver Tabla 1).

Figura 4

Superficie de fractura de los materiales LAS obtenidos mediante SC (a), SPS (b) y SM (c).



Fuente: Elaboración propia a partir de Ghosh et al., (2009).

El tamaño de grano es inferior a 8 μm para todos los materiales obtenidos; SM 1250 $^{\circ}\text{C}$: 2-3 μm ; SPS 1300 $^{\circ}\text{C}$: 4-5 μm y SC 1300 $^{\circ}\text{C}$: 6-7 μm , aproximadamente. La presión uniaxial aplicada (50 MPa) por el equipo de SPS durante el ciclo de sinterización promueve la densificación durante el ciclo de calentamiento. En el SPS, los materiales se calientan por efecto Joule, lo que hace que la superficie de partículas reciba todo el calor y, por tanto, estas superficies son más reactivas (Ghosh et al. 2009). Esto puede producir un tamaño de grano mayor, en comparación con la técnica de microondas, en la etapa final de la sinterización.

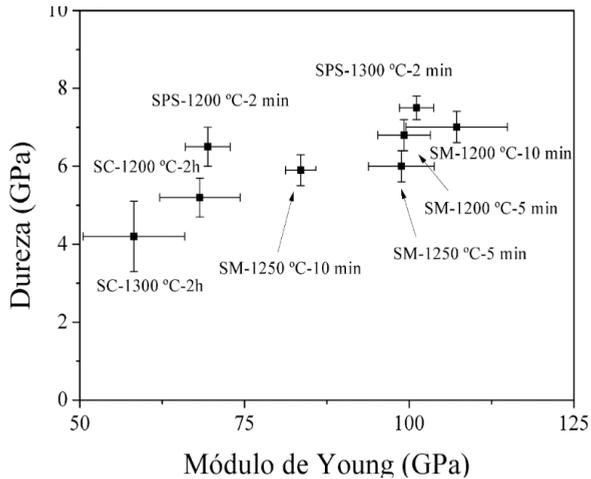
La β - eucryptita además de ser un material dieléctrico es también un material absorbente de las microondas desde baja temperatura (temperatura ambiente $\sim 25^{\circ}\text{C}$) hasta la alta temperatura ($>1400^{\circ}\text{C}$). Al calentar los materiales con energía de microondas, la sinterización se produce debido a un autocalentamiento del material y la temperatura máxima se encuentra en el núcleo del material. Este efecto puede conducir directamente a la segunda etapa de la sinterización, la densificación y el cambio microestructural (Coble, 1963) saltándose, o recorriendo rápidamente, la primera etapa, que es la responsable de provocar los cuellos entre los granos y el engrosamiento.

La relación entre la dureza y el módulo de Young se promedia desde 250 a 750 nm de profundidad y se presenta en la Figura 5. Los bajos valores mecánicos obtenidos en las muestras de CS se deben a su baja densidad y la pequeña fase vítrea formada alrededor de los granos de β - eucryptita. Esta fase amorfa ha comenzado a tener una influencia en las propiedades mecánicas. El contenido de vidrio aumenta con

temperatura de sinterización, aunque en este estudio, el contenido es realmente muy escaso a la máxima temperatura de sinterización, como se ha demostrado mediante el análisis de DRX.

Figura 5

Valores de dureza y el módulo de Young de los materiales de LAS obtenidos por diferentes técnicas de sinterización.



Fuente: Elaboración propia

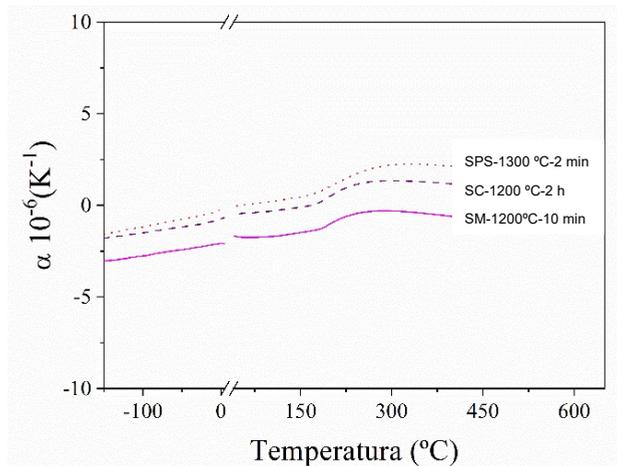
Las técnicas no convencionales ofrecen una amplia gama de muestras sinterizadas con diferentes combinaciones de dureza y valores de módulo de Young. El valor máximo de dureza (7.5 GPa) se alcanza para la muestra sinterizada con SPS a 1300 °C, con un valor de 104 GPa de módulo de Young, mientras que el valor máximo del módulo de Young se alcanza para la muestra SM sinterizada a 1200 °C (110 GPa), con un valor de dureza de 7.1 GPa.

En la Figura 6 se presenta el coeficiente de expansión térmica (CET, referido a 25°C) de las muestras sinterizadas por SC a 1200 °C, SM a 1200 °C y SPS a 1300 °C. Estas muestras han sido elegidas con base en los mejores valores mecánicos obtenidos. El rango de temperatura para esta medición es de temperaturas criogénicas (-150 °C hasta +450 °C). El interés de incluir las temperaturas criogénicas en esta medición radica en las aplicaciones espaciales de los materiales de β - eucryptita como potenciales sustratos en los espejos de los satélites espaciales. En todos los casos, la tendencia de los valores de CET de las muestras sinterizadas es la misma: muy baja, controlada y cercana a cero.

La muestra obtenida por microondas muestra los valores más negativos de CET. Este efecto puede atribuirse a diferencias de estequiometría/composición obtenidas por la variación en las condiciones de procesamiento (parámetros de sinterización/cristalización de cristalización) y los procesos de desorden del Li, además del tamaño de grano (y, por tanto, a la microfisuración) (Ramalingam y Reimanis, 2012). Por lo tanto, los valores más negativos de CET para las muestras sinterizadas por microondas pueden surgir debido al desorden posicional del Li y al aplastamiento de las láminas tetraédricas en la estructura.

Figura 6

Coefficiente de expansión térmica del material LAS obtenido por SPS, SC y SM.



Fuente: Elaboración propia

Los valores negativos del CET en los materiales obtenidos por microondas

abren una nueva posibilidad de obtener materiales compuestos con propiedades mejoradas, ajustando su CET cercano a cero con materiales que presenten un CET positivo. Por lo tanto, en los próximos apartados se han investigado las posibilidades de fabricar composites de base LAS con segundas fases de alúmina y grafeno. Estos materiales aportan, por un lado, propiedades mecánicas y, por otro, propiedades eléctricas.

3.2 Materiales LAS- Al_2O_3

Los composites de LAS/ Al_2O_3 se sinterizaron por microondas a 1100 y 1200 °C con velocidades de calentamiento de 10 °C·min⁻¹ y estancias de 10 minutos.

La Tabla 2 muestra la densidad relativa y los valores de las propiedades mecánicas de los compuestos de LAS/ Al_2O_3 obtenidos mediante sinterización por microondas. Como se puede observar, los valores de módulo de Young son muy altos (>100 GPa) y los valores de densidad se acercan al valor teórico (100 % T.D).

Tabla 2

Condiciones de sinterización, densidad relativa, módulo de Young y dureza de los compuestos de LAS/ Al_2O_3 obtenidos por la técnica del microondas.

Temperatura de sinterización (°C)	Tiempo de estancia (min)	Densidad relativa (% teórica)	Módulo de Young, E (GPa)	Dureza, H (GPa)
1100	10	99.0 ± 0.1	102 ± 4.2	7.9 ± 0.6
1200	10	99.1 ± 0.1	97 ± 3.9	6.7 ± 0.5

Fuente: Elaboración propia.

Es importante tener en cuenta que la densificación de los materiales compuestos de LAS/ Al_2O_3 se logró a una temperatura relativamente baja (1100 °C) mediante el método de sinterización de microondas, si lo comparamos a las temperaturas que se obtienen por métodos tradicionales (1350 °C) (García-Moreno et al., 2011). La reducción de la temperatura evita la formación de fase vítrea, con un efecto positivo en las propiedades mecánicas finales de los materiales.

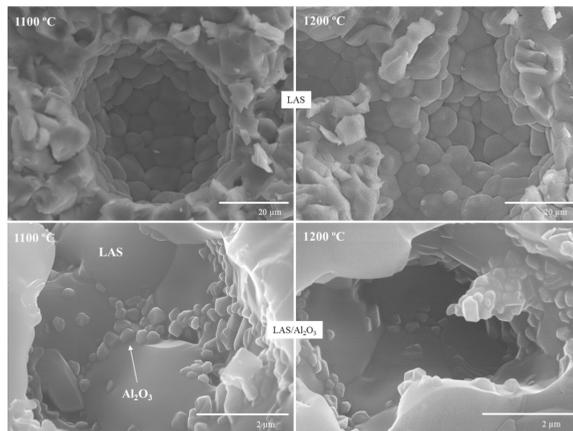
Los compuestos de LAS/ Al_2O_3 presentan unas propiedades mecánicas sustancialmente superiores a las de los materiales monolíticos de LAS (SM 1200: H = 4.8 ± 0.5 GPa y E = 61 ± 3.5 GPa). Un refuerzo del 10 vol% de Al_2O_3 en la matriz de LAS, conduce a un aumento de las

propiedades mecánicas del 40% y del 60 % en los valores de dureza y módulo de Young, respectivamente. Los valores E y H obtenidos para estos composites son excelentes para ambas temperaturas, pero los obtenidos a 1100 °C son extraordinarios. El excepcional valor de módulo de Young alcanzado a baja temperatura permite diseñar y fabricar materiales con propiedades específicas deseadas, por ejemplo, para su uso en aplicaciones espaciales.

La superficie fractura de los composites de LAS/ Al_2O_3 se muestra en la Figura 7. Existe una diferencia entre el tamaño de grano de β - eucryptita en los materiales de LAS (5-6 μm) y el obtenido en los composites de LAS/ Al_2O_3 (2-3 μm). La alúmina, homogéneamente dispersa en la matriz de LAS, actuó como inhibidor de la de los granos de β - eucryptita. La inhibición de los granos puede deberse, por un lado, a la posición de las partículas de alúmina en los límites del grano, lo que fomentaría una mayor densidad y un refuerzo mecánico y, por otro lado, la dispersión homogénea de las partículas de alúmina puede mejorar la distribución del campo electromagnético en el interior de la muestra, y conducir a una absorción de energía de microondas más constante y uniforme por parte de ambas fases en todo el compuesto. En términos de porosidad, los composites de LAS/ Al_2O_3 obtenidos a 1100 °C y 1200 °C revelan una eliminación completa de la porosidad residual.

Figura 7

MEB-EC de la superficie de fractura de las muestras de LAS y LAS/ Al_2O_3 sinterizadas por microondas a 1100 y 1200 °C.

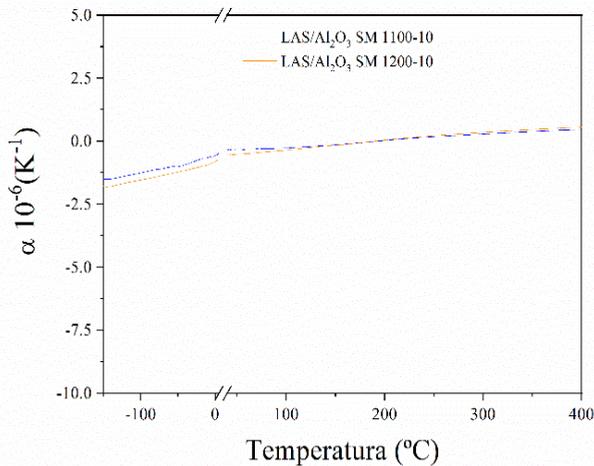


Fuente: Elaboración propia.

La Figura 8 muestra las curvas de CET frente a la temperatura para los composites de LAS/ Al_2O_3 sinterizados con tecnología de microondas a 1100 °C y 1200 °C. Todos los materiales han tenido un comportamiento dilatométrico muy estable y cercano a cero. La adición de alúmina conduce a una mayor estabilidad con una menor dispersión de los valores dilatométricos a lo largo de todo el rango de temperatura. Los valores dilatométricos no cambian de forma significativa al aumentar la temperatura. Esto indica que no es necesario utilizar altas temperaturas de sinterización para obtener materiales compuestos de LAS/ Al_2O_3 con propiedades térmicas mejoradas.

Figura 8

CET de los composites LAS/ Al_2O_3 sinterizados mediante microondas.



Fuente: Elaboración propia.

3.3 Materiales LAS-GRAFENO

En el apartado anterior, se ha estudiado la posibilidad de reforzar una matriz de LAS con una segunda fase de alúmina con el objetivo de obtener composites con unas propiedades mecánicas mejoradas y una mayor estabilidad dimensional con la temperatura. Los composites obtenidos

han demostrado, a su vez, poseer buenas propiedades dieléctricas, lo que les habilita como material cerámico avanzado para formar parte de dispositivos en aplicaciones relacionadas con las comunicaciones por satélite, redes inalámbricas de área local. Una alternativa al empleo de la alúmina para obtener composites de LAS con mejores propiedades mecánicas y dilatométricas, podría ser el uso de materiales carbonosos como segunda fase. A diferencia de los composites con alúmina, la adición de un refuerzo carbonoso otorgaría al composite de una disminución de la resistividad eléctrica y, por lo tanto, lo habilitaría para otro tipo de aplicaciones.

Los materiales carbonosos, entre ellos el grafeno, han demostrado ser buenos absorbentes de microondas, es decir, se calientan fácilmente por radiación microondas. Esta característica les permite ser utilizados como subsectores de microondas para calentar indirectamente la matriz en la que se encuentren distribuidos, o para actuar como un receptor catalizador en diferentes reacciones heterogéneas (Menéndez et al., 2010; Chandrasekaran et al., 2013). Por lo tanto, el objetivo principal de este apartado es el de diseñar composites LAS/Grafeno, con propiedades mecánicas superiores a las del material monolítico, con una resistividad eléctrica lo más baja posible y, sobre todo, con un coeficiente de expansión térmica controlado y/o cercano a cero.

Para poder obtener materiales densos a temperaturas relativamente bajas, con tiempos de sinterización cortos y tamaños de grano controlados, se ha seleccionado la técnica de sinterización no-convencional por microondas como método de consolidación de los composites LAS/Grafeno. Para poder evaluar la viabilidad de obtener estos composites por microondas y estudiar las posibles ventajas que esta técnica presenta en las propiedades finales frente a las obtenidas por los métodos convencionales, se empleará también la sinterización convencional.

Los composites de LAS/Grafeno se sinterizaron por microondas a las temperaturas de 1200 y 1250 °C utilizando velocidades de calentamiento de 100 °C·min⁻¹ y 10 minutos de tiempo de estancia a la temperatura máxima. La sinterización se realiza en vacío para impedir la descomposición del grafeno.

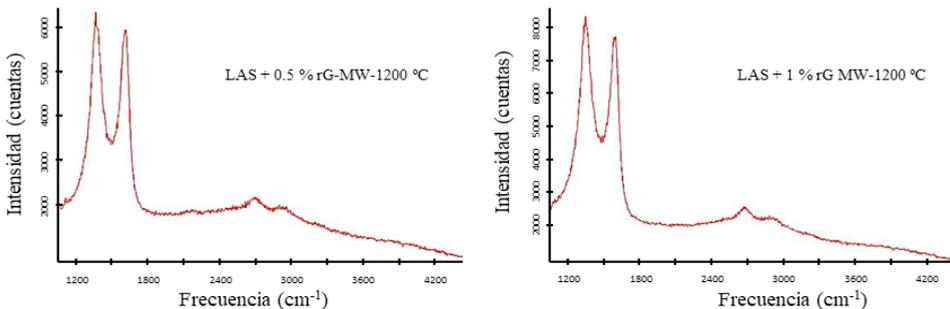
Se realizó un estudio completo de espectroscopia Raman para evaluar el comportamiento del grafeno al ser sometido a radiación de microondas. La espectroscopia Raman es una técnica muy útil para evaluar la

reducción térmica del óxido de grafeno (etiquetado como rG) a lo largo del compuesto. La Figura 9 muestra el espectro Raman correspondiente a las muestras de LAS + 0.5 wt% rG y LAS + 1 wt% rG sinterizadas por radiación de microondas a 1200 °C. Los efectos de la reducción del óxido de grafeno durante la sinterización se muestran en las bandas D y G, las cuales sufren cambios significativos y confirman el éxito de la reducción del óxido de grafeno mediante la sinterización (Zhu et al., 2010).

Se observaron dos pequeños picos en todos los materiales compuestos: una banda 2D sensible a la estructura aromática C en torno a 2695 cm^{-1} y un pico adicional a 2945 cm^{-1} atribuido al modo de combinación G + D inducido por el desorden o la banda D + D' (Elias et al., 2009). Los resultados indican que se ha producido la reducción térmica del óxido de grafeno durante el proceso de sinterización por microondas a 1200 °C.

Figura 9

Espectros de Raman de los composites LAS + 0.5 wt% rG y LAS + 1 wt% rG sinterizados por microondas a 1200 °C.



Fuente: Elaboración propia.

Como consecuencia, en los últimos años, el número de procesos que combinan el uso de materiales de carbono y el calentamiento por microondas ha aumentado en comparación con otros métodos basados en el calentamiento convencional (Menéndez et al., 2010; Chandrasekaran et al., 2013). En trabajos anteriores, se encontró que el LAS es un excelente material para absorber la energía de las microondas y, por otro lado, se sabe que el grafeno tiene un alto factor de pérdida

dieléctrica en comparación con el LAS cerámico (Benavente et al., 2015; A. Al-Hartomy et al., 2012).

La Tabla 3 muestra las densidades relativas de los composites LAS-rG obtenidas para las dos temperaturas de sinterización.

Tabla 3

Densidades relativas de los composites LAS + 0.5 wt% rG y LAS + 1 wt% rG sinterizadas por microondas.

Material	Temperatura de sinterización (°C)	Tiempo de estancia (min)	Densidad relativa (% teórica)
LAS + 0.5 wt% rG	1200	10	92.5 ± 0.4
	1250	10	95.1 ± 0.3
LAS + 1 wt% rG	1200	10	91.9 ± 0.5
	1250	10	94.2 ± 0.4

Fuente: Elaboración propia.

Las densidades relativas medidas para los materiales compuestos muestran una disminución a medida que aumenta el contenido de grafeno. De los resultados obtenidos se desprende que el grafeno como segunda fase afecta directamente a las densidades de los compuestos de LAS estudiados. Esto puede deberse a algunos factores importantes: la escasa adherencia entre el grafeno y la matriz de LAS, la falta de transferencia de calor por conducción del grafeno a la matriz cerámica, la aglomeración del grafeno o la ausencia del efecto microplasma (Chandrasekaran et al., 2013). El efecto microplasma provocaría un aumento de la temperatura local de las láminas de grafeno. Asimismo, las láminas de grafeno deberían calentarse rápidamente debido a: (a) la alta absorción de la radiación de microondas y, (b) la transferencia de calor a la matriz de LAS. Debido a la naturaleza del calentamiento volumétrico de las microondas todas las láminas de grafeno podrían absorber simultáneamente las microondas y la temperatura de las partículas de LAS que rodean al grafeno también debería aumentar. Por lo tanto, la velocidad de calentamiento de la mezcla sería mucho mejor que la de los componentes puros, y el resultado positivo (y esperado)

sería un aumento de los valores de densidad incluso a temperaturas más bajas que las del material LAS denso (1200 °C). Evidentemente, esto no ha ocurrido. Por lo tanto, el grafeno no está actuando como un susceptor durante el proceso de sinterización, como se pensaba inicialmente.

Para verificar este hecho, se ha realizado la sinterización del mismo material utilizando el calentamiento convencional a 1200 °C en vacío con 2 h de tiempo de mantenimiento. Los valores de densidad obtenidos fueron: LAS + 0.5 wt% rG (90.2 %) y LAS + 1 wt% rG (91.3 %). Los valores de densidad fueron muy bajos para todos los materiales. Por lo tanto, se ha demostrado que a pesar de tener un alto factor de pérdida dieléctrica y ser un excelente conductor eléctrico, el grafeno no actúa como un buen susceptor y no mejora la sinterabilidad de la matriz. Una conclusión importante es que no hubo ningún efecto debido al microplasma generado por el grafeno en un entorno de microondas.

La Tabla 4 muestra los valores de la dureza (H) y el módulo de Young (E) para los distintos materiales sinterizados por convencional y microondas. Las bajas densidades registradas para los diferentes composites se reflejan en una fuerte caída de las propiedades mecánicas en comparación con las alcanzadas con las que se obtenían para los materiales monolíticos LAS.

Tabla 4

Módulo de Young y dureza de las muestras de LAS/0.5 wt% rG y LAS/1 wt% rG sinterizadas por convencional y microondas.

Material	Condiciones de sinterización (°C)	Módulo de Young (GPa)	Dureza (GPa)
LAS + 0.5 wt% rG	SC-1200-2 h	64 ± 11	3.0 ± 0.7
	MW-1200-10 min	60 ± 6	4.1 ± 0.9
LAS + 1 wt% rG	SC-1200-2 h	59 ± 12	3.0 ± 1.1
	MW-1200-10 min	36 ± 11	2.4 ± 0.9

Fuente: Elaboración propia.

El aumento del porcentaje de grafeno hasta el 1 wt% no resulta en una ligera mejora de las propiedades mecánicas. En ambos casos y teniendo en cuenta los valores de densidad, es posible decir que el grafeno como segunda fase en composites conduce a una disminución de las propiedades mecánicas, proporcional a la cantidad de grafeno. Estos datos también confirman que el grafeno no actúa como suscepto durante el calentamiento por microondas.

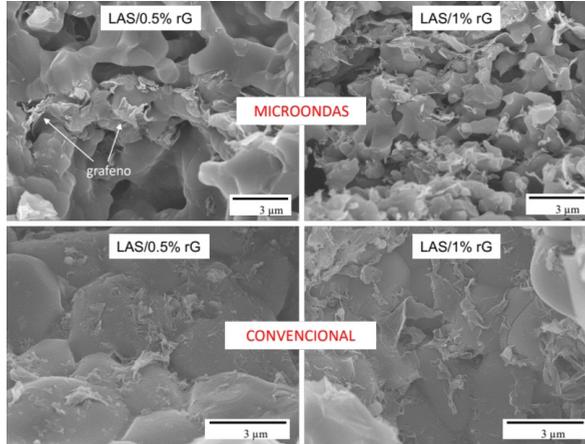
Para evaluar la dispersión del grafeno dentro de la matriz cerámica, las muestras han sido examinadas por microscopía electrónica de barrido de emisión de campo. La Figura 10 muestra las imágenes MEB-EC de las superficies de fractura de las muestras sinterizadas por microondas y convencional. En todas las imágenes se observan granos de β -eucryptita y las láminas de grafeno.

Las imágenes de MEB-EC muestran que la dispersión de las láminas de grafeno en la matriz de LAS es bastante homogénea. Se observa que hay una clara diferencia en el tamaño de grano de la β -eucryptita alcanzada en función de la presencia de grafeno y su porcentaje dentro de la matriz.

En sinterización convencional, el crecimiento del grano de la matriz de LAS es similar al que se registró en el material monolítico (LAS: $\sim 3.5 \mu\text{m}$; LAS/0.5 wt% rG: $\sim 3.6 \mu\text{m}$; LAS/1 wt% rG: $\sim 3.2 \mu\text{m}$). En el caso del composite con el 1 wt% rG se observa una ligera inhibición del crecimiento de grano debida a la presencia de grafeno. En sinterización por microondas, la medida del tamaño de grano del LAS en el composite no se ha podido realizar con exactitud debido a la morfología que presenta el material, aunque se aprecia que el tamaño de grano es menor que el alcanzado en SC, y que es menor con un 1 wt% rG, independientemente de la temperatura y tiempo de estancia del proceso de sinterización. En el material monolítico de LAS obtenido por SM, el tamaño alcanzado por los granos de β -eucryptita fue de, aproximadamente, el doble que el del polvo de partida (LAS polvo: ~ 1.0 - $1.5 \mu\text{m}$; LAS SM: $\sim 2.2 \mu\text{m}$). Por lo tanto, estos resultados indican que, en la sinterización por microondas, el grafeno inhibe el crecimiento de grano de LAS, en mayor medida que por convencional.

Figura 10

Imágenes MEB-EC de la superficie de fractura de los composites sinterizados por microondas y convencional.

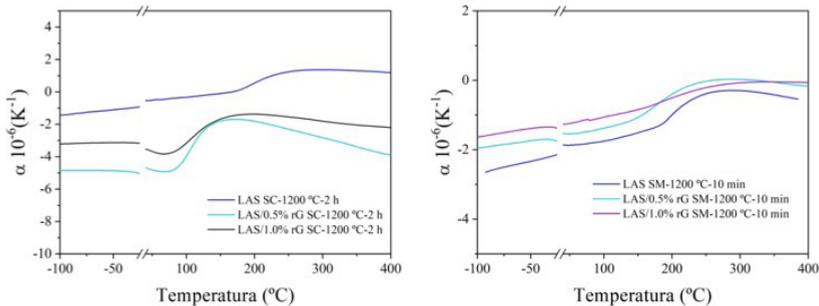


Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de expansión térmica (CET referido a 25 °C) de las muestras sinterizadas por convencional a 1200 °C-2 h y microondas a 1200 °C-10 minutos, como se presenta en la Figura 11. El rango de temperaturas para estas mediciones va desde las temperaturas criogénicas de -150 °C a 400 °C.

Figura 11

Coefficiente de expansión térmica de las muestras sinterizadas por convencional a 1200 °C-2 h y microondas a 1200 °C-10 minutos.



Fuente: Elaboración propia

Los valores del CET son negativos y cercanos a cero, en todos los casos. Se observa que a medida que aumenta el contenido de grafeno en los composites el valor del CET se aproxima ligeramente a cero. midieron los valores de CET de las láminas de grafeno obtenidas mediante el secado de suspensiones de grafeno en un vidrio de reloj. Los valores de CET medidos en un rango de temperatura de 30-300 °C, muestran dos tendencias distintas: De 30 °C a 160 °C se obtiene un valor negativo constante de $-6.7 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ y de 160 °C a 300 °C el valor descende a $-1.2 \cdot 10^{-9} \text{ K}^{-1}$. Por lo tanto, cabría esperar que la adición de grafeno en una matriz diera lugar a valores de CET más negativos. Los valores de CET de los materiales compuestos obtenidos mediante la tecnología de microondas no muestran el comportamiento esperado. En el caso de los composites con 0.5 wt% de rG, los valores de CET son ligeramente inferiores a los obtenidos para el material monolítico LAS para todas las temperaturas de sinterización. En el caso de los materiales compuestos con 1 wt% de rG, los valores de CET presentan el mismo orden que los obtenidos para el material LAS. Hay que resaltar que la porosidad también desempeña un papel importante en los valores de CET.

Los valores de resistividad eléctrica de los materiales LAS-rG se resumen en la Tabla 5. Como resultado del proceso de reducción, el óxido de grafeno no conductor se transformó en un material conductor.

Tabla 5

Resistividad eléctrica de los materiales LAS-rG obtenidos mediante diferentes condiciones de sinterización.

Material	Condiciones de sinterización (°C)	Resistividad eléctrica (W·cm)
LAS + 0.5 wt% rG	SC-1200-2 h	---
	MW-1200-10 min	$(1.1 \pm 0.5) \cdot 10^7$
LAS + 1 wt% rG	SC-1200-2 h	$(5.2 \pm 1.0) \cdot 10^6$
	MW-1200-10 min	43.0 ± 5.0

Fuente: Elaboración propia

Los composites obtenidos mostraron un comportamiento de resistividad eléctrica isotrópica debido a que el proceso de microondas

no aplica ninguna presión direccional durante el ciclo de sinterización como es el caso en otros procesos, por ejemplo, la sinterización por SPS (Centeno et al., 2013). La adición de cantidades muy pequeñas de grafeno en la matriz de LAS conduce a un aumento exponencial de la conductividad eléctrica del compuesto en comparación con el LAS monolítico que no presenta comportamiento conductivo.

El umbral de percolación de los materiales compuestos estudiados se encuentra en torno al 1 wt% en peso (SM-1200-10 min), por lo tanto, al aumentar el contenido de grafeno se produce un aumento de las conexiones entre láminas. En el caso de los CNTs o CNFs, se necesitan cantidades en torno al 7-10 vol% para que los composites cerámicos sean conductores de la electricidad (Borrell et al., 2011).

El valor de resistividad eléctrica obtenido ($\sim 40 \Omega \cdot \text{cm}$) con LAS + 1 wt% rG sinterizado por microondas va a permitir dar forma al compuesto mediante la técnica de electromecanizado (EDM) (Lopez-Esteban et al., 2010; Hanaoka et al., 2013) Esta técnica puede ser una alternativa eficaz para fabricar componentes de formas complejas a partir de materiales duros, aunque se requiere un valor mínimo de conductividad eléctrica ($< 100 \Omega \cdot \text{cm}$) (Kozak et al., 2004).

Conclusiones

La principal ventaja del uso de la técnica de sinterización por spark plasma sintering y microondas, en comparación con la técnica convencional, son los diferentes mecanismos involucrados en el calentamiento, principalmente (i) una considerable disminución en la escala de tiempo, lo que en la mayoría de los casos supone un menor consumo de energía, (ii) una reducción del número de etapas involucradas en el proceso global, eliminando la necesidad de otros reactivos, equipos, etc. y (iii) el incremento de la eficiencia del proceso global. Estas ventajas significan que los productos finales obtenidos de los procesos asistidos por sinterización no-convencional serán probablemente más competitivos económicamente que los obtenidos utilizando técnicas tradicionales.

En este trabajo se han obtenido materiales LAS mediante sinterización por microondas, con propiedades mecánicas y térmicas excelentes en comparación con la técnica convencional. Los materiales muestran

un tamaño de grano pequeño y muy similar al de partida debido a la rápida y eficaz densificación alcanzada por microondas. Los datos dilatométricos estudiados, incluyendo el intervalo de temperatura criogénica, muestran un coeficiente de expansión térmica controlado y negativo en todo el rango de temperaturas.

La selección de materias primas de aluminosilicato de litio con composiciones controladas, es esencial a la hora de obtener materiales con unas prestaciones deseadas. Ha sido posible la obtención de composites densos de LAS/ Al_2O_3 mediante sinterización no-convencional, con una alta estabilidad química, una mejora del ~ 50 % en las propiedades mecánicas y una mayor estabilidad dilatométrica, respecto al material monolítico LAS.

El empleo de grafeno como segunda fase ha derivado en un aumento hacia valores positivos del coeficiente de expansión térmica. Los valores de conductividad eléctrica alcanzados añaden una nueva funcionalidad a los materiales de LAS estudiados.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo financiero recibido por la Generalitat Valenciana para realizar estancias de personal investigador doctor BEST/2021/084 y BEST/2021/082. A. Borrell, agradece al Ministerio de Ciencia e Innovación su contrato RYC-2016-20915.

Referencias

- A. Al-Hartomy, Omar, Ahmed A. Al-Ghamdi, Falleh Al-Salamy, Nikolay Dishovsky, Rossitsa Shtarkova, Vladimir Iliev, y Farid El-Tantawy. (2012). *Dielectric and Microwave Properties of Graphene Nanoplatelets /Carbon Black Filled Natural Rubber Composites*. *International Journal of Materials and Chemistry* 2 (3): 116–22. <https://doi.org/10.5923/j.ijmc.20120203.06>.
- Abdel-Fattah, W. I. y Abdellah, R. (1997). “Lithia Porcelains as Promising Breeder Candidates — I. Preparation and Characterization of β -Eucryptite and β -Spodumene Porcelain.” *Ceramics International* 23 (6): 463–69. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(96\)00054-5](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(96)00054-5).
- ASTM C373-88. (1988). *Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products*. PA: ASTM Int. West Conshohocken.
- Benavente, R., Borrell, A., Salvador, M. D., Garcia-Moreno, O., Peñaranda-Foix, F. L. y Catala-Civera, J. M. (2014). “Fabrication of Near-Zero Thermal Expansion of Fully Dense β -Eucryptite Ceramics by Microwave Sintering.” *Ceramics International* 40 (1 PART A): 935–41. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.06.089>.
- Benavente, R., Salvador, M.D., Peñaranda-Foix, F.L., García-Moreno, O. y Borrell, A. (2015). “High Thermal Stability of Microwave Sintered Low-Er β -Eucryptite Materials.” *Ceramics International* 41 (10): 13817–22. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884215015916>.
- Borrell, A., Rocha, V.G., Torrecillas, R. y Fernández, A. (2011). “Surface Coating on Carbon Nanofibers with Alumina Precursor by Different Synthesis Routes.” *Composites Science and Technology* 71 (1): 18–22. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.09.011>.
- Borrell, A., Salvador, M. D., Peñaranda-Foix, F.L. y Cálata-Civera, J. M. (2013). “Microwave Sintering of Zirconia Materials: Mechanical and Microstructural Properties.” *International Journal of Applied Ceramic Technology* 10 (2): 313–320. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7402.2011.02741.x>.
- Borrell, A., Salvador, M. D., Peñaranda-Foix, F.L., Plaza-González, P. J., García-Baños, B. y García-Nieto, S. (2013). “Adaptive Microwave System for Optimum New Material Sintering.” *IEEE*

- MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2–5. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2013.6697540>.
- Borrell, A., Salvador, M.D., Rayón, E. y Peñaranda-Foix, F. L. (2012). "Improvement of Microstructural Properties of 3Y-TZP Materials by Conventional and Non-Conventional Sintering Techniques." *Ceramics International* 38 (1): 39–43. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.06.035>.
- Centeno, A., Rocha, V.G. G. , Alonso, B., Fernández, A., Gutierrez-Gonzalez, C.F. F., Torrecillas, R. y Zurutuza, A.(2013). "Graphene for Tough and Electroconductive Alumina Ceramics." *Journal of the European Ceramic Society* 33 (15–16): 3201–10. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2013.07.007>.
- Chandrasekaran, Sekaran, Tanmay Basak, and Ramanathan Srinivasan. (2013). "Microwave Heating Characteristics of Graphite Based Powder Mixtures." *International Communications in Heat and Mass Transfer* 48: 22–27. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.09.008>.
- Cheng, Jiping, Dinesh Agrawal, Yunjin Zhang, and Rustum Roy. (2002). "Microwave Sintering of Transparent Alumina." *Materials Letters* 56 (4): 587–92. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)00557-8](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00557-8).
- Coble, R. L. (1963). "A Model for Boundary Diffusion Controlled Creep in Polycrystalline Materials." *Journal of Applied Physics* 34 (6): 1679–82. <https://doi.org/10.1063/1.1702656>.
- Ebadzadeh, T., y Valefi, M.(2008). "Microwave-Assisted Sintering of Zircon". *Journal of Alloys and Compounds* 448 (1): 246–49. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.02.032>.
- Elias, D. C., Nair, R. R., Mohiuddin, T. M. G., Morozov, S.V., Blake, P., Halsall, M. P., Ferrari, A. C. et al. (2009). Control of Graphene's Properties by Reversible Hydrogenation: Evidence for Graphane. *Science (New York, N.Y.)* 323 (5914): 610–13. <https://doi.org/10.1126/science.1167130>.
- Fernández Valdés, A. García Moreno, O. y Torrecillas San Millán. R. (2010). *Materiales basados en aluminosilicatos de litio con coeficiente de expansión térmica negativos en un amplio intervalo de temperatura, procedimiento de preparación y uso.*

- García-Moreno, O., Borrell, A., Bittmann, B., Fernández, A. y Torrecillas, R. (2011). "Alumina Reinforced Eucryptite Ceramics: Very Low Thermal Expansion Material with Improved Mechanical Properties." *Journal of the European Ceramic Society* 31 (9): 1641–48. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.03.033>.
- García-Moreno, O., Fernández, A., Khainakov, S. y Torrecillas, R. (2010). Negative Thermal Expansion of Lithium Aluminosilicate Ceramics at Cryogenic Temperatures. *Scripta Materialia* 63 (2): 170–73. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.03.047>.
- García-Moreno, O., Waltraud M. Kriven, Moya, J. S. y Ramón Torrecillas. (2013). "Alumina Region of the Lithium Aluminosilicate System: A New Window for Temperature Ultrastable Materials Design." *Journal of the American Ceramic Society* 96 (7): 2039–41. <https://doi.org/10.1111/jace.12428>.
- Ghosh, Santonu, Atul H Chokshi, Pilhwa Lee, y Rishi Raj. (2009). "A Huge Effect of Weak Dc Electrical Fields on Grain Growth in Zirconia." *Journal of the American Ceramic Society* 92 (8): 1856–59. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03102.x>.
- Gil-Flores, L., M.D. Salvador, F.L. Penaranda-Foix, A. Fernández, M. Suarez, R. Rosa, P. Veronesi, C. Leonelli, and A. Borrell. (2020). "Effect of Frequency on MW Assisted Sintering: 2.45 GHz versus 5.8 GHz." *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 63 (S1). <https://doi.org/10.3233/JAE-209108>.
- Goldstein, A., N. Travitzky, A. Singurindy, y M. Kravchik. (1999). Direct Microwave Sintering of Yttria-Stabilized Zirconia at 2.45 GHz. *Journal of the European Ceramic Society* 19 (12): 2067–72. [https://doi.org/10.1016/s0955-2219\(99\)00020-5](https://doi.org/10.1016/s0955-2219(99)00020-5).
- Hanaoka, D., Y. Fukuzawa, C. Ramirez, P. Miranzo, M.I. Osendi, and M. Belmonte. (2013). "Electrical Discharge Machining of Ceramic/Carbon Nanostructure Composites." *Procedia CIRP* 6: 95–100. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.03.033>.
- Kozak, Jerzy, Kamlakar P. Rajurkar, y Niraj Chandarana. (2004). "Machining of Low Electrical Conductive Materials by Wire Electrical Discharge Machining (WEDM)." *Journal of Materials Processing Technology* 149 (1): 266–71. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.11.055>.

- Lopez-Esteban, S., C.F. Gutierrez-Gonzalez, G. Mata-Osoro, C. Pecharroman, L.A. Diaz, R. Torrecillas, y J.S. Moya. (2010). "Electrical Discharge Machining of Ceramic/Semiconductor/Metal Nanocomposites." *Scripta Materialia* 63 (2): 219–22. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.03.062>.
- Mazaheri, Mehdi, A.M. Zahedi, y M.M. Hejazi. (2008). "Processing of Nanocrystalline 8 mol% Yttria-Stabilized Zirconia by Conventional, Microwave-Assisted and Two-Step Sintering." *Materials Science and Engineering: A* 492 (1): 261–67. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.03.023>.
- Menéndez, J.A., A. Arenillas, B. Fidalgo, Y. Fernández, L. Zubizarreta, E.G. Calvo, y J.M. Bermúdez. (2010). Microwave Heating Processes Involving Carbon Materials. *Fuel Processing Technology* 91 (1): 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.08.021>.
- Novoselov, K. S., A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, y A. A. Firsov. (2004). Electric Field in Atomically Thin Carbon Films. *Science* 306 (5696): 666–69. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>.
- Ogiwara, T., Yoshimasa, N., Kazuo, S. y Osamu K. (2011). Low-Temperature Sintering of High-Strength β -Eucryptite Ceramics with Low Thermal Expansion Using Li₂O-GeO₂ as a Sintering Additive. *Journal of the American Ceramic Society* 94 (5): 1427–33. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2010.04279.x>.
- Oliver, W.C., y Pharr, G.M. (1992). An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments. *Journal of Materials Research* 7 (06): 1564–83. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>.
- Pillars, W. W. y Donald R. Peacor. (1973). The Crystal Structure of Beta Eucryptite as a Function of Temperature. *American Mineralogist* 58 (1972): 681–90. http://www.minsocam.org/ammin/AM58/AM58_681.pdf.
- Ramalingam, S. y Reimanis, I. E. (2012). Effect of Doping on the Thermal Expansion of β -Eucryptite Prepared by Sol-Gel Methods. Edited by A. Krell. *Journal of the American Ceramic Society* 95 (9): 2939–43. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2012.05338.x>.

- Roy, R., Osborn, E. F. (2021). The System Lithium Metasilicate-Spodumene-Silical. Accessed October 5, <https://pubs.acs.org/sharingguidelines>.
- Roy, R., Della, M. ROY, y E. F. Osbotn. (1950). Compositional and Stability Relationships Among the Lithium Aluminosilicates: Eucryptite, Spodumene, and Petalite. *Journal of the American Ceramic Society* 33 (5): 152–59. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1950.tb12780.x>.
- Schulz, H. (1974). Thermal Expansion of Beta Eucryptite. *Journal of the American Ceramic Society* 57 (7): 313–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1974.tb10909.x>.
- Shyam, A., Muth, J. y Lara-Curzio. E. (2012). Elastic Properties of β -Eucryptite in the Glassy and Microcracked Crystalline States. *Acta Materialia* 60 (16): 5867–76. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.07.028>.
- Su, Yanjie, Hao Wei, Rungang Gao, Zhi Yang, Jing Zhang, Zhaohui Zhong, and Yafei Zhang. (2012). “Exceptional Negative Thermal Expansion and Viscoelastic Properties of Graphene Oxide Paper.” *Carbon* 50 (8): 2804–9. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.02.045>.
- Tian, X., Santanu S., Aron P., Matthew L. Moser, Irina K., Elena Bekyarova, Mikhail E. Itkis, and Robert C. Haddon. (2014). Optical and Electronic Properties of Thin Films and Solutions of Functionalized Forms of Graphene and Related Carbon Materials. *Carbon* 72: 82–88. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.01.054>.
- Upadhyaya, D. D., A. Ghosh, K. R. Gurusurthy, and R. Ram Prasad. (2001). Microwave Sintering of Cubic Zirconia. *Ceramics International* 27 (4): 415–18. [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(00\)00096-1](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(00)00096-1).
- Wang, L. D., Z. W. Xue, Y. Cui, K. P. Wang, Y. J. Qiao, and W. D. Fei. (2012). Thermal Mismatch Induced Disorder of Beta-Eucryptite and Its Effect on Thermal Expansion of Beta-Eucryptite/Al Composites. *Composites Science and Technology* 72 (13): 1613–17. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2012.06.013>.
- Yucheng, Wang, and Fu Zhengyi. (2002). “Study of Temperature Field in Spark Plasma Sintering.” *Materials Science and Engineering: B* 90 (1–2): 34–37. [https://doi.org/10.1016/S0921-5107\(01\)00780-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5107(01)00780-2).

Zhu, Chengzhou, Shaojun Guo, Youxing Fang, y Shaojun Dong. (2010).
"Reducing Sugar: New Functional Molecules for the Green Synthesis
of Graphene Nanosheets." *ACS Nano* 4 (4): 2429–37. <https://doi.org/10.1021/nn1002387>.

II PARTE

**INCURSIONANDO
EL ESPACIO Y EL
CIBERESPACIO**



Capítulo 3

El Ciberespacio y la nueva transformación a la zona de operaciones

Dr. Cristian Barría Huidobro

Centro de Investigación en Ciberseguridad (CICS)

Universidad Mayor de Chile

Correo: cristian.barría@umayor.cl

ORCID: 0000-0002-5840-7407

Resumen

La humanidad ha convivido con conflictos bélicos desde sus inicios, motivando el desarrollo de tecnologías que provean ventajas contra potenciales adversarios. Estos mismos desarrollos han aportado, por medio de diversas transformaciones, nuevos avances a la sociedad en tiempos de paz. Luego de ello, sin embargo, estos nuevos avances parecen regresar mejorados al campo de batalla. La presente investigación aborda el caso del ciberespacio, cuyos efectos han permeado todo el quehacer humano, incluido el nivel militar. Se estudia el concepto de Zona de Operaciones y se analiza -en comparación a otros ejemplos tecnológicos- el impacto que el ciberespacio ha tenido en ella. Se aporta a la discusión con recomendaciones sobre cómo adoptar apropiadamente esta nueva disrupción tecnológica en las instituciones militares.

Abstract

Humanity has coexisted with war since its beginnings, motivating the development of technologies that provide advantages against potential adversaries. These same developments have brought, through various transformations, new advances to society in times of peace. After that, however, these new developments seem to return to the battlefield improved. The present research addresses the case of cyberspace, whose effects have permeated all human endeavors, including the military level. The concept of the Zone of Operations is studied and the impact that cyberspace has had on it is analyzed in comparison with other technological examples. It contributes to the discussion with recommendations on how to appropriately adopt this new technological disruption in military institutions.

Palabras clave: Ciberespacio, zona de operaciones, transformaciones tecnológicas.

keywords: Cyberspace, zone of operations, technological transformations.

Introducción

El conflicto es un fenómeno tan antiguo como la vida misma. Desde el enfrentamiento entre insectos por la posesión de un territorio hasta guerras a gran escala, todos esos eventos comparten el mismo espíritu en común: la oposición entre dos o más actores con intereses contrapuestos, que se transforman en manifestaciones de fuerza, para lo cual se hace uso de herramientas propias (extremidades, cuernos, huesos) o externas (piedras, fuego, terreno).

Para la humanidad, el conflicto fue impulsando la creación de nuevas herramientas, las cuales fueron forjando el destino de civilizaciones completas, tanto por la aplicación directa de la fuerza, como también por el desarrollo tecnológico que fue derivando de esta necesidad de innovar. Incluso en tiempos de paz, la creatividad de científicos, artesanos y mentes ávidas de conocimiento fueron aportando directa o indirectamente a la llegada de tecnologías que eventualmente alteraron la forma de combatir.

Para bien o para mal, los desarrollos tecnológicos, culturales, políticos y sociales de las comunidades en paz están estrechamente vinculados con la definición de ganadores y perdedores durante tiempos de guerra. La expansión e intercambio cultural del periodo helenístico se vio impulsado por las exitosas conquistas militares de Alejandro Magno (Bosworth, 1995), así como los conflictos precolombinos determinaron a aquellas culturas que se alzaron como las más dominantes en el Nuevo Mundo: hablamos de Mayas (Foster, 2005), Aztecas (Hassig, 1992) e Incas (Espinoza Soriano, 1995). Los conflictos del periodo Edo en Japón representaron la caída del último Shogun y el inicio del periodo imperial de esa nación, decantando en grandes transformaciones sociales, políticas y culturales durante el periodo denominado la Restauración Meiji (Totman, 1980). El fin de la Primera Guerra Mundial trajo consigo diversas innovaciones tecnológicas, junto con la caída de grandes imperios como el austrohúngaro y el alemán (“Causes and Effects of World War I”, 2021). Por su parte, la Segunda Guerra Mundial se tradujo en un impulso tecnológico sin precedentes, transformando hasta el día de hoy el balance de las fuerzas políticas y militares del mundo (Burton, 2021).

Por supuesto, todos los cambios, innovaciones, transformaciones y avances en distintas áreas no se pueden explicar únicamente por el conflicto mismo, ya que forman parte de interacciones mucho más complejas que exceden al efecto único del combate o incluso a las motivaciones detrás de la guerra,

pero de igual forma no es posible ignorar al conflicto como variable relevante en los fenómenos anteriormente descritos.

En este contexto, no es de extrañar que la humanidad haya deseado encontrar formas para incrementar sus ventajas a la hora de enfrentar a un adversario. La evolución de las armas es un ejemplo de ello: desde el uso de piedras y palos como medios para extender el rango y poder de las propias extremidades, hasta la aparición de misiles intercontinentales que pueden alcanzar a un objetivo a distancias extremas. Todas las sociedades humanas han buscado lograr algún tipo de ventaja ante la eventualidad de un conflicto contra potenciales adversarios, y de esa necesidad fueron surgiendo mentes innovadoras que, directa o indirectamente, aportaron al desarrollo de diversas herramientas y mecanismos empleados en la guerra.

El artista y escultor más importante del Renacimiento, Leonardo Da Vinci, diseñó un gran número de armas y dispositivos de guerra, incluyendo los que se pueden considerar como los ancestros de tanques y helicópteros (ver Figuras 1 y 2). La creatividad y el ingenio no discriminan entre los campos del saber, por lo cual no es de extrañar que un excepcional pintor y escultor como Da Vinci haya visto en los conflictos bélicos otra fuente de inspiración en la cual verter su genialidad innovadora (Cianchi et al., 2009; Moon, 2016).

El presente trabajo tiene como objetivo tratar el caso del ciberespacio como nuevo protagonista de las innovaciones tecnológicas que están alterando el mundo militar y, especialmente, las denominadas Zonas de Operaciones. El documento se estructura de la siguiente forma: Tras la presente introducción, la sección II define el concepto de Zona de Operaciones y proporciona un análisis sobre la evolución de este. La sección III recorre algunas de las transformaciones tecnológicas más importantes que han alterado las zonas de operaciones, para dar paso a la sección IV, donde se analiza el caso del ciberespacio y su impacto en el conflicto bélico moderno. Finalmente, en la sección Conclusiones se condensan los distintos tópicos tratados, proveyendo opiniones sobre el impacto del ciberespacio en las zonas de operaciones, junto con los caminos que pueden seguir los ejércitos modernos para incorporar esta nueva dimensión de guerra.

Figura 1

Prototipo de vehículo armado, diseñado por Leonardo Da Vinci.



*Fuente: Archivio Museo Nazionale della Scienza e della Tecnologia
Leonardo Da Vinci (2015).*

Figura 2

Prototipo de aeronave, diseñada por Leonardo Da Vinci.



*Fuente: Archivio Museo Nazionale della Scienza e della Tecnologia
Leonardo Da Vinci (2015).*

Zona de operaciones y la evolución del campo de batalla

El Estado Mayor de la Defensa de España define la Zona de Operaciones como “el área o conjunto de áreas del teatro de operaciones con efectos operativos y, además, administrativos, económicos y disciplinarios, donde se despliegan personal y fuerzas militares españolas para el desarrollo de su misión en el contexto de una operación”.

De esta definición se desprende la relación entre los medios empleados por las fuerzas militares y el tamaño de la zona de operaciones, puesto que tanto la cantidad de recursos desplegados (ya sean humanos, tecnológicos o de otra índole), como las capacidades de dichos recursos (alcance del armamento, comunicaciones entre unidades), delimitan el área efectiva en el cual las fuerzas pueden operar.

Así, un contingente de los tiempos antiguos, armados con espadas y escudos estaban relegados a aquellas distancias en las cuales podían caminar sin experimentar fatiga, y a un nivel más acotado, a la distancia con la cual podían con lanzas y espadas. Lo anterior describe una potencial zona de operaciones con una extensión proporcionalmente acotada en términos de kilómetros efectivos, aspecto que se ejemplifica en la Figura 3.

En el otro extremo, un contingente moderno que posee piezas de artillería, cohetes y fusiles de largo alcance, puede enfrentar a potenciales adversarios a distancias muy superiores. La zona de operaciones en este caso se extiende a varios kilómetros, como se ilustra en la Figura 4.

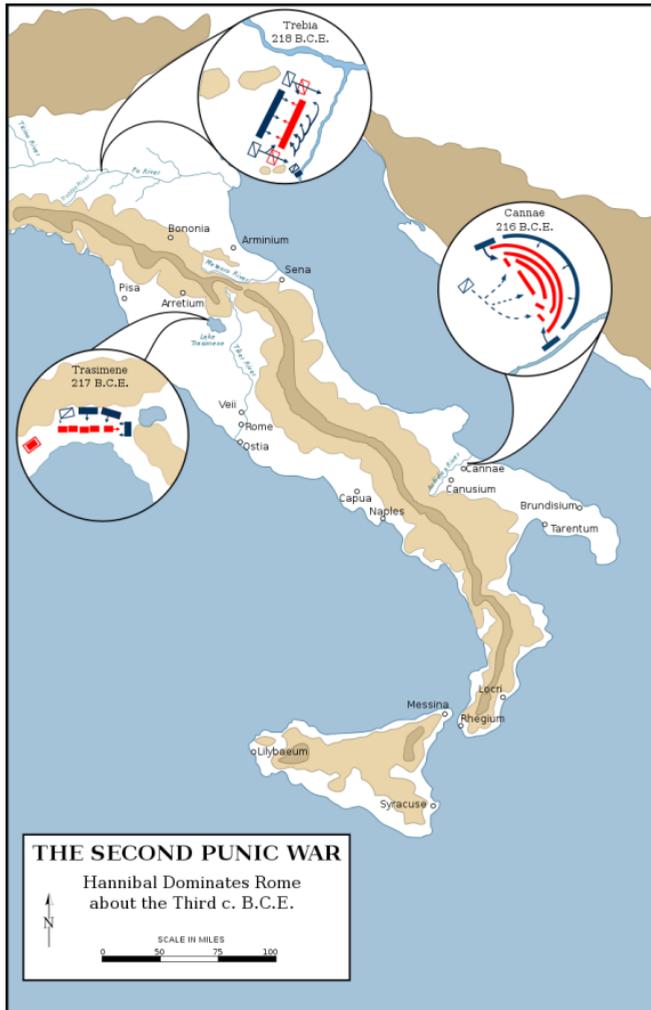
En otras palabras, el campo de batalla que vieron aquellos soldados de la Antigüedad es sustancialmente más pequeño que el de hoy en día. Una zona de operaciones más extensa provee de beneficios estratégicos importantes, pero también supone desafíos mayores. El despliegue y reposicionamiento de fuerzas en zonas geográficas más extensas requiere de una capacidad de comunicación rápida y eficaz, aspecto que la tecnología se ha encargado de cubrir. Si miramos las técnicas de antaño, empleando banderas, sonidos y otros medios, es comprensible que la zona de operaciones fuese relativamente pequeña, al menos comparada con las capacidades actuales que permiten comunicar órdenes y todo tipo de mensajes de manera rápida en extensas distancias.

En resumen, el campo de batalla está determinado por las zonas de operaciones de las fuerzas en conflicto, y dichas zonas se ven afectadas por

los recursos (especialmente los tecnológicos) que en ellas intervienen. En la siguiente sección se exploran algunos casos emblemáticos.

Figura 3

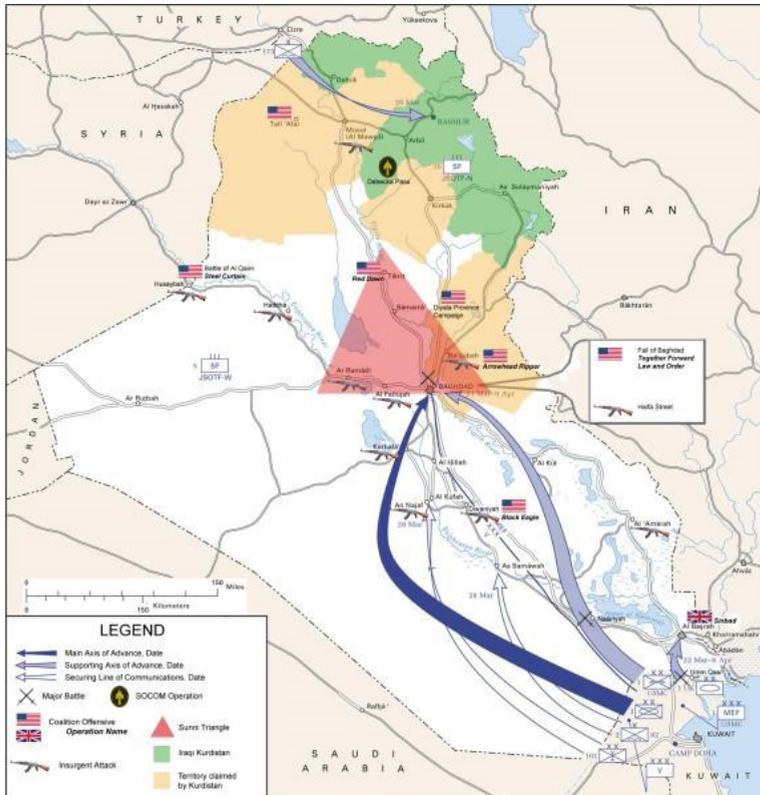
Distribución geográfica de batallas durante la Segunda Guerra Púnica, en zonas puntuales de la península itálica. En el costado izquierdo se muestra la batalla del Lago Trasimeno, en la zona superior la batalla del Trebia, y al costado derecho la batalla de Cannas.



Fuente: Wikipedia Commons (2021).

Figura 4

Distribución geográfica de la guerra de Irak. Se aprecia el avance de las tropas aliadas a través de prácticamente todo Irak.



Fuente: Wikipedia Commons (2021).

El Impacto de la Tecnología sobre las Zonas de Operaciones

Para dimensionar apropiadamente el efecto que han tenido ciertos avances tecnológicos en aspectos militares tan relevantes como lo es la zona de operaciones, repasamos brevemente tres casos emblemáticos. A pesar de que no son los únicos ejemplos que ameritan estudio, resultan suficientes para comprender el impacto de la tecnología.

Armas de Fuego

Cuando se habla de transformaciones tecnológicas en el campo de batalla, uno de los casos más recurrentes es el de la introducción de las armas de fuego. La capacidad de arrojar proyectiles a gran velocidad con la ayuda de la pólvora fue sentando las bases para una serie de desarrollos tecnológicos que transformaron de manera irreversible la forma de entender el combate.

A pesar de que la pólvora remonta sus orígenes a los complejos y organizados experimentos llevados a cabo por alquimistas chinos durante el siglo IX, su aplicación en herramientas de combate requirió esencialmente un siglo completo de prototipos, invenciones y desarrollos tecnológicos que fueron particularmente impulsados por las dinastías Song y Jin, cuyos conflictos bélicos vieron el surgimiento de las “lanzas de fuego”, en torno al año 1000 (Andrade, 2017).

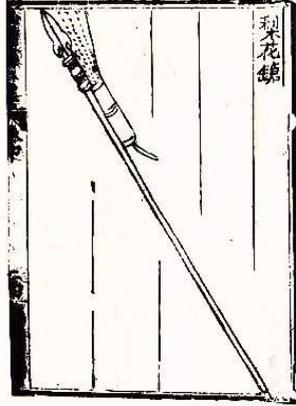
Estas lanzas de fuego consistían en un bastón o vara larga, en cuyo extremo se fijaba un tubo lleno de pólvora, al cual se le prendía fuego, expulsando así el material incandescente hacia el enemigo (ver Figura 5). Posteriores mejoras a las lanzas de fuego extendieron la longitud de los tubos e incluyeron fragmentos metálicos, transformándose en versiones rudimentarias de los actuales tiros.

La evolución de las armas de fuego fue extendiendo el rango en el cual las tropas podían atacar efectivamente a sus adversarios, cambiando la forma de pensar y aplicar la estrategia militar, así como también los aspectos tácticos y operacionales: los ejércitos de Napoleón disponían de unos 150 metros de distancia respecto de sus adversarios, mientras que en tiempos de la guerra franco-prusiana dicho rango ya se había extendido hasta los 400 metros.

El rango extendido que proveen las armas de fuego es probablemente el ejemplo más simple y directo para comprender el efecto de estos avances tecnológicos en la zona de operaciones: contar con la capacidad de enfrentar adversarios a mayor distancia no solo proporciona una ventaja de combate explícita al eliminar (parcialmente) la necesidad del combate cuerpo a cuerpo, junto con los riesgos elevados asociados a la lucha a distancia de cuchillo, sino también abre opciones de maniobra de tropas y recursos. En la Figura 6 se ofrece una comparativa gráfica del rango de diversas armas de fuego modernas.

Figura 5

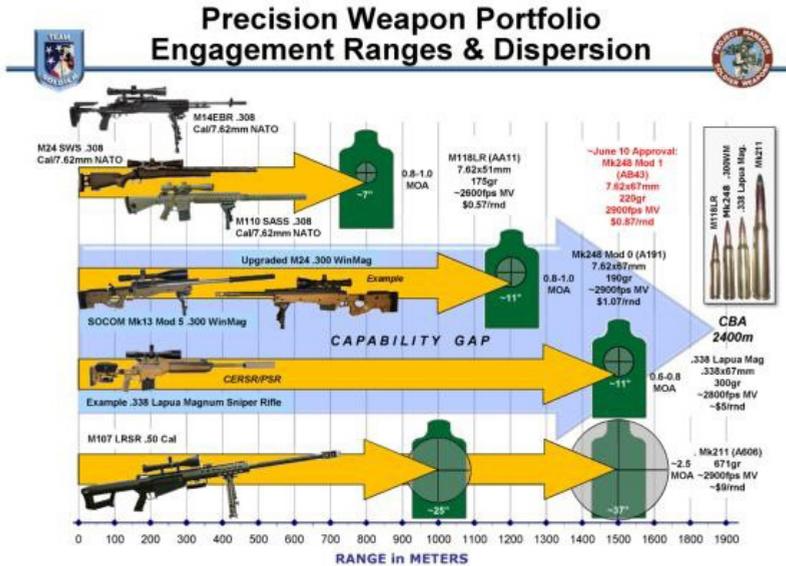
Descripción dibujada de una lanza de fuego.



Fuente: Wikipedia Commons (2021).

Figura 6

Comparación gráfica del alcance entre algunos fusiles actualmente en uso.



Fuente: Wikipedia Commons (2021).

La posibilidad de cubrir mayores áreas de terreno de manera efectiva permite a las fuerzas poder coordinar defensas mucho más eficientes y flexibles que aquellas ofrecidas por los ejércitos de antaño.

Por supuesto, a medida que las tecnologías militares se van extendiendo en el mundo, estas ventajas pasan a ser parte de la norma para todos los posibles combatientes, abriendo nuevos ángulos de riesgo que los estrategas evidentemente deben considerar.

Esto no solo al nivel más autoevidente (ej.: posicionamiento defensivo y contramaneobras durante las operaciones), sino que también impulsa otros cambios estratégicos en términos tecnológicos: aquellas armaduras curvas, diseñadas para desviar flechas y golpes cortantes, eventualmente debieron ser reemplazadas por nuevos materiales capaces de resistir impactos balísticos. El equipamiento militar en general, es otro aspecto muy relevante de analizar a la hora de captar los efectos de tecnologías -como la de las armas de fuego- en el pensamiento estratégico preventivo y defensivo de cada época.

También a nivel logístico hubo una transformación asociada al uso de las armas de fuego. Almacenar y transportar armamento, municiones y explosivos, se volvió un problema debido a la sensibilidad de estos artefactos ya fuera al movimiento, la humedad, o la estabilidad química. Los trenes logísticos se hicieron, en este sentido, blancos por defecto de la acción adversaria.

Si bien el manejo seguro de munición y explosivos es una práctica estandarizada y cuidadosamente respetada en la era actual, un descuido en las labores logísticas era particularmente grave en los tiempos antiguos, donde las fórmulas químicas y los mecanismos existentes en las armas de fuego eran muy distintos a lo que son hoy en día. Existía una posibilidad real de autosabotear accidentalmente las líneas de suministro, o bien incapacitar (e incluso matar) a los propios soldados, producto de explosiones no intencionales.

Como se puede apreciar, las armas de fuego no solo expandieron la zona de operaciones a través del alcance extendido de estos instrumentos de combate, sino que transformaron otras tecnologías y procesos existentes, por cuanto los mismos demandaban toda clase de contramedidas o desarrollos similares en condiciones de contrarrestar la ventaja alcanzada por uno de los bandos.

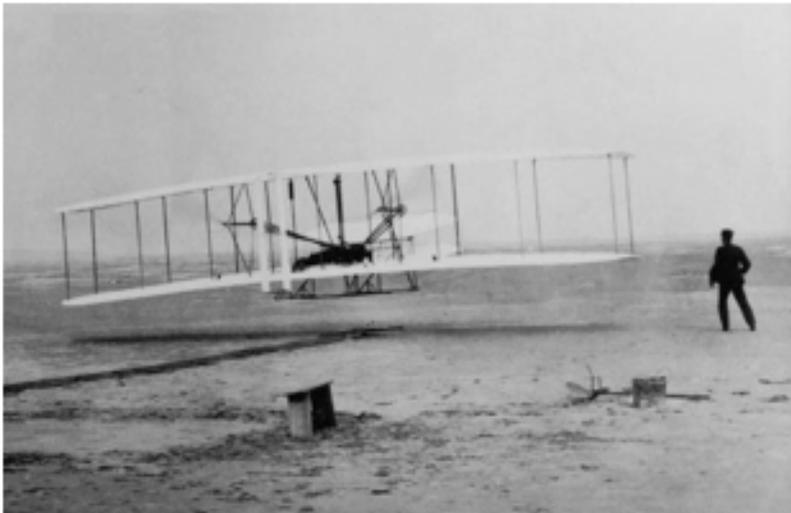
Aviación

El primer despegue de los hermanos Wright en 1977 se convertiría en la antesala de otra importante transformación de la guerra: La inclusión del espacio aéreo como dominio de combate.

Si bien las primeras operaciones militares que involucraron el uso práctico de máquinas aéreas vieron la luz en Francia durante los últimos años del siglo XVIII a través del empleo de globos aerostáticos especialmente adaptados, no es sino hasta el siglo XIX que surge la aviación propiamente tal, a través de los dirigibles cumplían ofensivas directas, arrojando bombas a objetivos específicos. Esto, a diferencia de los aeroplanos de la época, los cuales no portaban armamento y se enfocaban en operaciones de reconocimiento espacio con el pasar de los años los aviones fueron adaptados para portar y operar armas de distinto tipo lo cual eventualmente fomentaría la construcción de aeronaves diseñadas desde un comienzo para fines militares.

Figura 7

Fotografía del “Kitty Hawk Flyer” la máquina voladora inventada por los hermanos Wright.



Nota. Fotografía de Wilbur y Orville Wright. Tomada de “Wilbur y Orville Wright, Pictorial Materials: A Documentary Guide” por Renstrom, A. G. (1982). Washington: Library of Congress, p. 57.

Figura 8

Fotografías de edificios destruidos tras el bombardeo sobre Guernica.



Fuente: The Guardian (2015).

El desarrollo de la aviación militar llamó rápidamente la atención de analistas y estudiosos, quienes previeron un papel mucho más protagónico de las fuerzas aéreas en los conflictos futuros (ejemplos de esto son el informe del general sudafricano Jan Christiaan Smuts, y el libro “Command of the Air” escrito por el general Italiano Giulio Douhet). Posteriores eventos bélicos como los bombardeos sobre Guernica, Dresde, Hamburgo y Tokio respaldaron estas predicciones de manera contundente (ver Figuras 8 a 10), encontrando su máxima expresión en los ataques aéreos con bombas nucleares en Hiroshima y Nagasaki (ver Figura 11).

La aviación no solo trajo un nuevo dominio de combate, sino que también afectó fuertemente a los otros dominios ya existentes (tierra y mar), ya fuera generando nuevas sinergias estratégicas -por ejemplo, extendiendo la capacidad de reconocimiento y recopilación de inteligencia para las fuerzas terrestres, o proyectando la fuerza naval mediante portaviones- como también fortaleciendo o impidiendo la capacidad de operación individual de un dominio concreto, según se trate de fuerzas aliadas o enemigas. La superioridad aérea se convirtió así en una prioridad estratégica.

Figura 9

Fotografía con vista en altura de Dresde posterior al bombardeo.



Fuente: BBC (2020).

Figura 10

Vista aérea de Hamburgo tras el bombardeo.



Fuente: The History Learning Site (2021).

Figura 11

Comparativa fotográfica entre las explosiones nucleares ocurridas en Hiroshima y Nagasaki.



Fuente: The History Daily (2016).

A semejanza del caso de las armas de fuego, la aviación introdujo una serie de variables que afectaron directa o indirectamente a la zona de operaciones, variables que siguen cambiando hasta el día de hoy. Más allá de las evidentes capacidades de combate que fueron desarrollando los aviones, permitiendo atacar objetivos distantes con una rapidez sin precedentes, también fue necesario desarrollar infraestructuras y capacidades mecánico-industriales especialmente diseñadas para satisfacer los requerimientos técnicos, logísticos y operativos asociados al uso de estas naves de guerra.

Por un lado, la aviación transformó la zona de operaciones al permitir una proyección de fuerza tanto desde bases convencionales como desde el mar a través de los portaviones (ver Figura 12). Esta última mezcla entre poderío naval y aéreo sigue siendo uno de los principales factores diferenciadores que separan a las fuerzas armadas dominantes del resto (Rubel, 2011).

Figura 12

Fotografía de flota estadounidense, con un portaviones a la cabeza.



Fuente: Popular Mechanics (2016).

El área geográfica que pueden cubrir los aviones abrió diversas opciones tácticas que han regido el desarrollo de nuevos prototipos de combate, pero adicionalmente, las diversas armas que poseen estas máquinas extienden su capacidad de fuego mucho más allá del área directa sobre la cual operan, permitiendo desplazarse desde una base dada, atacar un objetivo y retirarse rápidamente.

Por otro lado, los desafíos logísticos generados por el ingreso de la aviación al mundo de la guerra resultaron ser particularmente complejos, redefiniendo así las proporciones presupuestarias requeridas para crear y mantener una fuerza de combate eficiente y apta para un rápido despliegue.

Desde la perspectiva industrial, y de manera similar al caso del mundo naval, la aviación fue creando nuevas alianzas estratégicas entre instituciones castrenses, organizaciones gubernamentales y empresas privadas, para poder enfrentar los desafíos técnicos y tecnológicos que supone el desarrollo de una fuerza aérea moderna.

Estados Unidos es un claro ejemplo de esta sinergia cívico-militar creada por los requerimientos de la fuerza moderna y, muy especialmente de la aviación militar.

Cohetes

El desarrollo de cohetes está estrechamente relacionado con el de las armas de fuego, pero su evolución dio frutos sustancialmente diferentes. Mientras que las antiguas armas de fuego evolucionaron en precisos rifles y devastadoras piezas de artillería, los cohetes dieron paso a distintos tipos de misiles balísticos, cuya obra cúlmine (hasta el momento) son los misiles balísticos intercontinentales (Intercontinental Ballistic Missiles, ICBM), proyectiles capaces de impactar objetivos a distancias inimaginables, teniendo también la capacidad de portar armamento nuclear.

Si bien los primeros cohetes cumplían un papel bastante acotado en los conflictos, su evolución dio paso a una de las herramientas bélicas más importantes en el establecimiento de la doctrina de la Destrucción Mutua Asegurada o (MAD por sus siglas en inglés), y los (ICBM), (Cimbala, 1985).

Los extensos rangos efectivos de los ICBM cambiaron las reglas del juego en lo que respecta al tamaño de la zona de operaciones, ya que prácticamente cualquier lugar del mundo pasaba a ser un objetivo alcanzable desde cualquier base que posea las versiones más modernas de estas armas.

Este letal empate -legado de la Guerra Fría- define hasta el día de hoy el equilibrio entre las principales potencias militares del mundo, lo cual nos da una idea muy clara del impacto generado por esta tecnología.

Al igual que los otros ejemplos de desarrollo tecnológico que se han descrito, los ICBM han causado o potenciado cambios en otras áreas, pero a diferencia de esos otros ejemplos, el desarrollo de los ICBM en términos ofensivos avanzó mucho más rápido que cualquier veta tecnológica defensiva que les pudiera hacer frente.

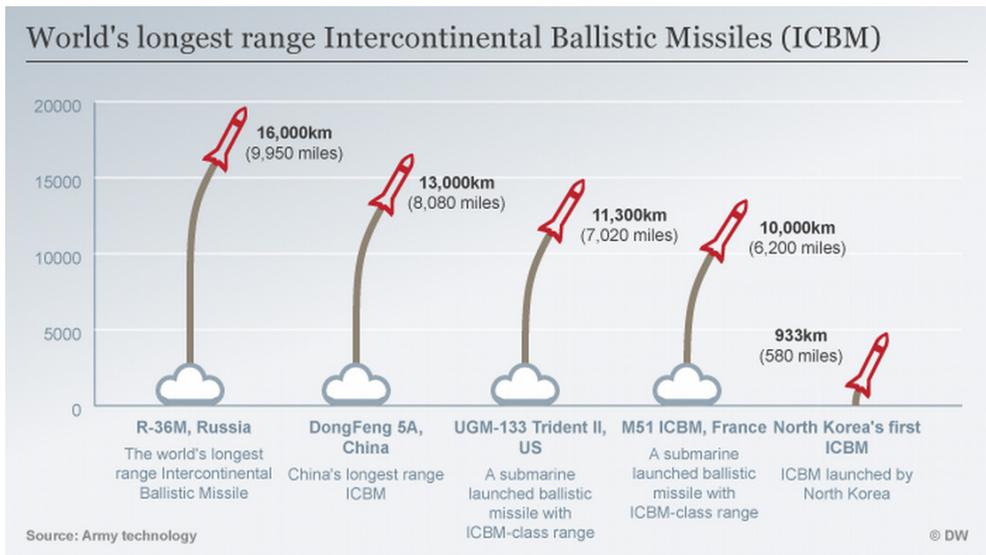
La inclusión de innovaciones tales como los Vehículos de Reentrada Múltiples e Independientes (MIRV, por sus siglas en inglés) sellaron el desequilibrio vigente entre ataque y defensa, estableciendo la amenaza

del MAD a un nivel incluso más masivo que en los años de la Cortina de Hierro (Davis y Schilling, 1973; Potter, 1978).

Si bien los ICBM no lograron esto por sí solos, ya que su poder destructivo va estrechamente relacionado con las armas nucleares, su papel protagonista es innegable. De manera resumida, esta tecnología se mantiene como uno de los ejemplos más extremos de la ampliación de la zona de operaciones mediante la capacidad de atacar adversarios a distancias intercontinentales, llegando al extremo de sobrepasar ampliamente las capacidades tecnológicas defensivas existentes, aportando a un escenario geopolítico internacional de paz basada en la omnipresente amenaza del MAD.

Figura 13

Comparativa gráfica de alcance entre diferentes modelos de ICBM.



Fuente: DW Army Technology (2017).

Figura 14

Ilustración de un ICBM Peacekeeper de los Estados Unidos, donde se destacan en color rojo sus MIRV.



Fuente: Wikipedia Commons (2009).

Figura 15

Prueba de un ICBM estadounidense Peacekeeper y sus MIRV.



Fuente: Wikipedia Commons (2005).

4. El Ciberespacio y la Transformación de la Zona de Operaciones Moderna

Los avances tecnológicos descritos en la sección anterior comparten un factor común muy importante: su aparición no solo transformó la guerra, también se transformaron en requisitos prácticamente obligatorios para que los ejércitos pudieran tener opciones reales de vencer a sus potenciales adversarios: es imposible concebir un ejército actual cuyos combatientes no dispongan de armas de fuego, o que no dispongan de una fuerza aérea, o que no posean algún tipo de misil. El ciberespacio no es la excepción, irrumpiendo en el quehacer militar de tal forma, que no es factible considerar a un ejército actual que evada y/o ignore estas nuevas ventajas -y exigencias- digitales (Kaspersen, 2015).

La historia nos entrega valiosas lecciones sobre el apropiado aprovechamiento de las tecnologías para establecer decidoras ventajas militares: el Imperio de Japón modernizó su ejército y armada durante la restauración Meiji, medidas que probaron ser crucialmente efectivas durante la primera guerra sinojaponesa de 1894 y en la guerra ruso-japonesa de 1904, instancias en las cuales la reformada doctrina terrestre, el poderío naval y el uso de mecanismos de apoyo como el telégrafo convergieron en aplastantes victorias a favor de la bandera del sol naciente. El telégrafo en esos tiempos era visto como el corazón de las comunicaciones, de manera similar a como hoy vemos a Internet y al ciberespacio; en 1914 ya se hablaba de que lograr que un adversario no pudiera hacer uso de sus mecanismos telegráficos equivalía a generar un gran apagón en sus comunicaciones.

Tanto en la Primera como en la Segunda Guerra Mundial, los desarrollos tecnológicos aplicados a la aviación y la marina fueron los protagonistas que sellaron el destino de ambos conflictos. La modernización de los dominios del aire y el mar fueron los catalizadores para la ejecución de efectivas campañas terrestres, estableciendo ventajas estratégicas que no habrían sido posibles con tecnologías más anticuadas. Incluso otras tecnologías disruptivas como las armas nucleares dependían de otros dominios independientes para poder cumplir su objetivo. Recordemos que fueron aviones los que permitieron el lanzamiento de las bombas nucleares en Hiroshima y Nagasaki.

Un ejemplo moderno de la supresión de adversarios mediante el empleo de ventajas tecnológicas es la Guerra del Golfo, conflicto en el cual Estados Unidos y sus aliados expulsaron a las fuerzas iraquíes de

de considerable alcance, entre otros aspectos. La confrontación con las fuerzas regulares iraquíes fue breve, pasando rápidamente a una guerra asimétrica donde grupos insurgentes con el tiempo se convirtieron en un problema mucho mayor y más complejo de enfrentar.

Otros conflictos modernos como la invasión de Afganistán también fueron reflejo de esta doctrina de superioridad generalizada, mediante el empleo de herramientas tecnológicas que rigieron la forma de llevar a cabo el combate: el uso de misiles de alto poder destructivo fue dando paso a ataques con misiles de precisión, realizando operaciones a objetivos puntuales a larga distancia, en vez de buscar la destrucción de recintos completos. En tiempos recientes, los misiles perdieron protagonismo en estos “ataques quirúrgicos”, para dar paso al uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV, Unmanned Aerial Vehicle), más conocidos como “drones”. Esto ciertamente se puede considerar como otro paso en la evolución de la zona de operaciones, ya que todas estas herramientas previamente mencionadas suponen nuevas variables que los estrategas deben incluir en la ecuación militar, tanto en el papel ofensivo como defensivo.

Y en este dinámico ambiente es donde el ciberespacio surge como un conjunto de oportunidades y desafíos que los ejércitos del mundo están aprendiendo a conocer. Si bien el ciberespacio no posee una definición única y globalmente aceptada -situación que se repite con casi todos los términos “ciber” (Lehto, 2019), en el presente trabajo se va a entender como la manifestación virtual de las interacciones entre todos los sistemas, redes, datos y usuarios humanos o no humanos que se comunican a través de mecanismos interconectados (Barriá, 2021).

A diferencia de otros desarrollos tecnológicos mencionados anteriormente, el ciberespacio y su impacto para el mundo militar se vuelve más complejo de evaluar, ya que representa interacciones abstractas, cuyos efectos no siempre se manifiestan de forma directa en el mundo físico. Si conocemos el armamento utilizado por dos ejércitos, podemos teorizar con relativa facilidad sobre las potenciales ventajas de cada uno en términos de alcance efectivo de tiro y poder de fuego; caso similar ocurre al evaluar vehículos de combate: sus modelos y cantidades permiten tener una idea preliminar de la situación en la cual se encuentra cada contendor. Posteriormente se pueden incluir más variables importantes que aporten a un análisis más completo: experiencia, resiliencia logística, capacidad operacional conjunta, entre muchos otros.

Lo anterior no es inmediatamente aplicable al ciberespacio. Conocer la cantidad de servidores que existen en un país no es un indicador de ciber poder, así como la cantidad de dispositivos móviles existentes en un recinto militar no es indicador de la capacidad de su personal para ejecutar ciber operaciones. En ese sentido, se requiere de un análisis más exhaustivo para poder estimar de manera apropiada la capacidad de un grupo para proyectar poder en el ciberespacio, lo cual pareciera ser contradictorio con la aparente obviedad de la creciente dependencia de las personas hacia las tecnologías de la información y las comunicaciones. Para cualquier observador -civil o militar- puede ser relativamente evidente esta fuerte digitalización del quehacer humano en todo ámbito, pero la comprensión del fenómeno asociado a esta digitalización no es particularmente trivial, especialmente si miramos aquellas grandes interacciones internacionales que se generan día a día en estos entornos virtuales.

Para el ámbito de la defensa, el ciberespacio puede representar un incremento en la agilidad operativa, al permitir coordinaciones y correcciones prácticamente al instante, independientemente de las distancias que separen a los distintos grupos de interés. El ciberespacio entonces se convierte en el escenario donde estos nuevos actores digitales interactúan, ya sea para realizar acciones dentro del mundo virtual, o bien para permitir la ejecución de alguna actividad o tarea en el mundo físico. No obstante, este campo de posibilidades y optimización trae consigo amenazas que -al igual que el ciberespacio mismo- resultan muchas veces abstractas y difíciles de perfilar.

Las instituciones de defensa, cuando se integran al ciberespacio, se encuentran no solo con las acciones de sus adversarios tradicionales, sino que también con otros posibles adversarios que no necesariamente rinden tributo a una bandera específica. Grupos delictuales, individuos con ganas de poner a prueba sus habilidades, organizaciones terroristas y muchos otros actores fuera de lo que son las fuerzas regulares, se suman al conjunto de amenazas a las cuales se deben enfrentar. Un aspecto muy interesante de esta realidad es que los encuentros entre estos combatientes digitales no dependen de la existencia de conflicto armado alguno, marcando una aguda diferencia con las otras tecnologías que han transformado el quehacer militar: los conflictos en el ciberespacio pueden darse en tiempos de paz, incluso entre fuerzas regulares. Si el rango extendido de las armas de fuego modernas amplió el área efectiva de fuego en la zona de operaciones, el ciberespacio trajo la instantaneidad

y la omnipresencia, junto con una pseudoindependencia de la situación política que rige la diferencia entre paz y guerra.

En cierta medida, con el ciberespacio, la zona de operaciones abandona las fronteras geopolíticas. Donde sea que exista un dispositivo interconectado, se abre la posibilidad de una explotación de sus vulnerabilidades mediante un ciberataque, el cual puede ser perpetrado desde cualquier parte del mundo. Pero esta ventaja es bidireccional: el ciberespacio no discrimina, por lo cual incluso personas individuales pueden configurar complejos vectores de ciberataque, causando perjuicios de manera completamente independiente a todo contexto de conflicto.

La naturaleza biyectiva del ciberespacio también se refleja en otros dominios de la guerra, producto de la creciente integración de tecnologías interconectadas en sistemas, vehículos y herramientas de combate. Esto en el sentido de que estas tecnologías están otorgando nuevas y mejoradas capacidades militares, a costa de una creciente dependencia tecnológica, la cual puede transformarse en una debilidad letal para los ejércitos modernos.

La paradoja técnico-militar de hoy subyace en la importancia de asimilar, comprender e integrar de manera efectiva las nuevas ventajas que ofrece la tecnología, ventajas que a su vez se transforman en los nuevos objetivos prioritarios de potenciales adversarios, quienes hoy más que nunca se vuelven más difíciles de individualizar, dada la naturaleza pseudo anónima del ciberespacio.

La instrucción militar deberá encontrar un equilibrio entre la capacitación en materias tecnológicas, y la formación "low tech" que permita a los soldados tener plena independencia para poder cumplir sus tareas en escenarios altamente adversos, donde la tecnología de apoyo no exista o haya sido neutralizada.

Este desafío impuesto por el ciberespacio y sus tecnologías asociadas impacta distintos niveles de la formación militar: por un lado está la evidente carga de trabajo que generará la inclusión de estos contenidos adicionales, además de aspectos financieros y logísticos, pero por otro lado también podría implicar que la carrera militar -en sus etapas formativas tempranas- deba extender su duración para poder abarcar de manera eficaz la entrega de conocimientos necesarios para enfrentar estos nuevos requerimientos de capacitación, con la evidente

consecuencia de que se requerirán más años para que una persona pueda ser considerada como apta para desempeñar tareas castrenses.

Discusión

El ciberespacio y prácticamente todos los otros conceptos “ciber” imponen un debate entre académicos y especialistas, por cuanto no existen definiciones cien por ciento establecidas.

No obstante, el principal debate de este tipo para el mundo de la defensa pareciera ser la determinación de si el ciberespacio constituye un dominio propio de la guerra (como la tierra, el aire, el mar, y el espacio exterior) o no. Cuando hablamos de la relevancia del ciberespacio para las fuerzas armadas, sin duda que resulta importante esta categorización a la hora de planificar la integración de este concepto a las instituciones militares.

Por un lado, se considera que el ciberespacio constituye su propio dominio de guerra, al contener elementos que existen e interactúan únicamente en el ciberespacio. Por ejemplo, un malware diseñado para extraer información de sistemas que operan en redes adversarias solo existe digitalmente, operando y eventualmente desapareciendo exclusivamente en el ciberespacio, a pesar de que las consecuencias de sus acciones puedan repercutir en el mundo físico.

Por otro lado, todos los demás dominios sirven directa o indirectamente de prestaciones provistas por y a través del ciberespacio. Por ejemplo, los sistemas modernos que permiten acciones conjuntas entre fuerzas de tierra, mar y aire se basan mayoritariamente en tecnologías interconectadas del ciberespacio, transformándose en medios para el logro de objetivos. Desde esa perspectiva, el ciberespacio cumple un papel instrumental al servicio de los demás dominios.

No obstante, ambas visiones exponen lados reales del ciberespacio, por lo cual el autor del presente artículo sostiene que el ciberespacio opera tanto como un dominio independiente como también a nivel de apoyo periférico para otros dominios.

En ese sentido, es posible establecer una relación entre el dominio del aire y el del ciberespacio: ambos poseen ámbitos de acción que son únicos e independientes, pero también ambos pueden prestar apoyo a las operaciones de los otros dominios.

De igual forma, ni las fuerzas aéreas ni el ciberespacio pueden ganar conflictos por sí solos, ya que, a pesar de su capacidad para anular a potenciales adversarios, existen aspectos de la guerra que requieren de otro tipo de operaciones (por ejemplo, capturar una ciudad o bloquear rutas de abastecimiento marítimas).

Cuando observamos el concepto de Multiplicador de Fuerza, entendido como “el término militar con el que se designa a cualquier factor que aumente de modo significativo la efectividad de un individuo o un grupo”, pareciera evidente que el ciberespacio puede encajar dentro de esta idea también, ya que tanto las ciber operaciones como las tareas de apoyo a otros dominios pueden traducirse en un aumento de la efectividad en la ejecución de operaciones tradicionales por parte de las tropas regulares.

Esta cualidad multiplicadora de fuerza es claramente compartida también con el dominio del aire, el cual como ya se ha esgrimido, también posee la dualidad entre su naturaleza de dominio independiente y su papel instrumental.

Cabe destacar que ciertos conceptos más tradicionales también han sufrido o están sufriendo cambios en función de la evolución de estos. Tal es el caso del campo de batalla, concepto habitualmente entendido como “aquella porción del ambiente operacional donde se desarrolla una operación militar”, pero cuya denominación lentamente está cambiando a espacio de batalla, “para transmitir la idea de que el área definida había revelado poseer una multiplicidad de dimensiones”.

La irrupción del ciberespacio y de nuevas tecnologías de la información ha llamado a reevaluar nuestro entendimiento de la guerra, así como a crear nuevas clasificaciones que logren describir mejor las complejas interacciones que se están estableciendo en los conflictos modernos.

En ese contexto, el general James Mattis y el teniente coronel Frank Hoffman empezaron a hablar el año 2005 de “guerra híbrida”, concepto con el que se describió el conflicto armado en el cual se hace uso de medios no convencionales, como la delincuencia y el terrorismo, en complemento al despliegue de fuerzas tradicionales, todo esto bajo un uso extendido de operaciones de la información.

En este conjunto heterogéneo de enfoques, el ciberespacio tiene la capacidad para cumplir tareas que apoyen los objetivos de la guerra

híbrida, o bien para apoyar el cumplimiento de estas tareas por parte de otros dominios.

Los conflictos que se libran actualmente en el ciberespacio no están atados a declaraciones formales de guerra, y en ellos participan tanto individuos y organizaciones civiles como militares, transformando la interacción entre ambos mundos, pero más aún, desdibujando los límites de lo permisible en tiempo de paz.

Los conflictos del futuro seguramente serán la evolución de lo que en su momento intentaron conseguir los mecanismos de propaganda durante la Guerra Fría: utilizar medios no combativos para mermar la estabilidad y capacidades del adversario.

En el caso de la ciberguerra, se colocan sobre la mesa nuevas variables mucho más complejas que el uso de los medios de difusión de antaño (como la televisión y la radio). El potencial impacto del empleo de medios no combativos en el ciberespacio, puede efectivamente traducirse en consecuencias similares a las de ciertas operaciones militares tradicionales, y todo esto bajo el amparo del pseudo anonimato.

Si antiguamente era evidente el origen de una transmisión de radio en la cual se hablaba sobre la vileza del adversario, el despliegue de un *malware* en servidores ajenos no solo puede ser realizado ocultando el origen, sino que también se puede realizar de tal forma que se pueda culpar a organizaciones o naciones que no necesariamente estén involucradas.

Esto supone cuestionamientos legales y éticos. Si una nación ejecuta un ciberataque sobre un adversario, dejando pistas que culpen a un tercero, ¿cuáles criterios son aplicables para establecer responsabilidades, si el adversario decide iniciar hostilidades tradicionales contra ese tercero? ¿Se puede hablar de proporcionalidad de parte del adversario al levantar armas por una situación ocurrida netamente en el mundo digital?

Podemos ir incluso más lejos, ¿cuánto cambia el escenario anterior, si el conflicto es producido por ciberataques de origen civil? ¿Hasta qué punto un país puede ser responsabilizado militarmente por las acciones de organizaciones criminales o activistas?

Esto último implica una evolución de las guerras subsidiarias, ya que las fuerzas regulares podrían impulsar, incitar y/o financiar movimientos civiles con intereses comunes para acechar y eventualmente socavar ciertas capacidades de un adversario. Esos grupos incluso podrían ser

parte de la población de la nación adversaria, o simplemente de otros países sin involucramiento en las hostilidades digitales.

Estas tácticas -se rumorea- ya están siendo empleadas por ciertas superpotencias, con la intención de mermar la estabilidad de sus adversarios. La idea es simple: si es posible generar suficiente caos en el territorio adversario sin recurrir a las armas, su capacidad de combate se encontrará lo suficientemente reducida como para no poder enfrentar un conflicto tradicional, forzando la imposición de la voluntad propia mediante mecanismos diplomáticos y geopolíticos, en lugar de los medios combativos tradicionales.

El ciberespacio ha desatado una serie de transformaciones que ya estamos presenciando en la sociedad moderna, pero también está mostrando los inicios de una serie de interacciones que invitan al debate técnico, moral y jurídico, por cuanto muchos de los fenómenos que ya se están manifestando en la vida civil y militar, no harán más que seguir su evolución acelerada, complejizando el establecimiento de reglas claras que nos permitan establecer una integración armónica entre las dinámicas y cambiantes tecnologías de hoy, y la impredecibilidad de la naturaleza humana.

Conclusiones y trabajo futuro

La historia nos muestra que los avances tecnológicos han transformado la zona de operaciones una y otra vez, y han sido aquellas fuerzas lo suficientemente visionarias como para hacer suyos estos cambios, las que finalmente han logrado crear y preservar ventajas estratégicas que, a su vez, han impactado los equilibrios de poder hasta el día de hoy.

No cabe duda de que el ciberespacio es el protagonista de una nueva revolución tecnológica, la cual está dictando la forma de entender los conflictos modernos, por lo cual es de extrema importancia que las fuerzas regulares sepan reconocer estas transformaciones y adaptarse a ellas.

La modernización militar no se limita a la adquisición de herramientas y armas nuevas, sino que también a la transformación estructural de las entidades castrenses, para poder seguir el ritmo al vertiginoso avance tecnológico de los tiempos de hoy.

La implementación de sistemas de TI, de software especializado y otras herramientas, no es verdaderamente útil sin el respaldo organizacional correspondiente, lo cual a su vez llama a una adaptación cultural y administrativa que fomente el uso responsable de las nuevas tecnologías entre el personal.

Un equipo de personas debidamente capacitado se transforma en el verdadero catalizador de progreso tecnológico, facilitando no solo la integración de las ventajas que ofrece el ciberespacio, sino que también el establecimiento de una cultura digital responsable, en la cual se fomente un uso apropiado de estas ventajas, reduciendo así potenciales riesgos que puedan surgir.

Para el público general, puede ser paradójico que el componente más importante del mundo “ciber” no sea el software, ni las redes o las grandes tecnologías, sino las personas, aunque los especialistas en ciberseguridad lo verán como la respuesta más lógica.

Una correcta adopción e integración del ciberespacio va mucho más allá de la mera adquisición de productos de software o de la contratación de servicios especializados: se requiere de un apoyo organizacional unificado y transversal, donde exista un compromiso desde la cúpula decisonal hacia abajo. Por eso resulta imprescindible involucrar activamente a los Altos Mandos en las iniciativas de modernización digital y ciberseguridad, de modo tal que las campañas de comunicación internas y las actividades de concientización cuenten con el respaldo suficiente como para ser realmente efectivas. La adopción de tecnologías digitales debe estar fuertemente unida al uso responsable de las mismas, especialmente en el ámbito de la defensa.

Si bien es cierto que ciertas herramientas o dispositivos tecnológicos pueden ser desplegados rápidamente para apoyar las operaciones y comunicaciones de las fuerzas regulares, su uso en entidades que no sean tecnológicamente maduras expone a sus integrantes a riesgos propios (y a veces específicos) del ciberespacio.

Por contrapartida, en instituciones donde existe capacitación y concientización constante en estas materias, no solo facilita una implementación e integración mucho más fluida y eficiente de nuevas tecnologías, sino que también reduce los potenciales riesgos a niveles totalmente controlables.

Como se mencionó anteriormente, la zona de operaciones se ve fundamentalmente transformada con la integración del ciberespacio y, al igual que ocurrió con otras revoluciones tecnológicas como la aviación militar, no es factible ignorar esta nueva dimensión sin perder ventajas estratégicas importantes.

Potenciales adversarios ya están explorando y explotando las virtudes y defectos del ciberespacio, construyendo las vías digitales que el día de mañana podrían significar la diferencia entre lograr o no una superioridad tecnológica en el caso de un conflicto.

El ciberespacio cambia -en cierto sentido- las reglas de la guerra, ya que no es necesaria la existencia de un conflicto activo y declarado para la ejecución de ciber operaciones militares.

Esto supone una diferencia crucial entre el ciberespacio y otros dominios de combate, ya que no existe un reposicionamiento de vehículos y naves que pueda ser observado por potenciales adversarios. En el ciberespacio todas las fuerzas son desplegadas de manera silenciosa y sin dejar las instalaciones propias, aunque también es cierto que ciertas ciber operaciones pueden beneficiarse de acciones físicas y reubicación de personal.

Y así como el ciberespacio desdibuja límites geopolíticos, también altera el tipo de fuerzas que pueden interactuar en conflictos digitales: la zona de operaciones ahora es compartida con grupos hacktivistas, ciberdelincuentes, individuos solitarios con intereses propios, y también con potenciales adversarios.

El ciberespacio representa un cambio de paradigma para los conflictos del futuro, un cambio que ya en la actualidad está siendo aprovechado por las grandes potencias mundiales. Cuán preparados se encontrarán los distintos ejércitos para enfrentar conflictos a gran escala en el ciberespacio, dependerá de las acciones que se lleven a cabo hoy. El llamado es a la proactividad y la colaboración.

No obstante, el ciberespacio no será el único dominio de guerra que seguirá evolucionando. También es menester de los tomadores de decisiones, velar por una apropiada adaptación ante los nuevos cambios que observará la zona de operaciones en el aire, el mar y la tierra, cambios que estarán fuertemente influenciados por las capacidades tecnológicas asociadas al ciberespacio.

Lo anterior invita a reflexionar sobre cómo podemos generar estrategias y tácticas efectivas para enfrentar las operaciones del mañana. Un buen punto de partida puede ser el identificar aquellas variables de cambio que influyen la evolución de la zona de operaciones, de modo tal que se puedan establecer los ajustes más apropiados para balancear cada variable.

En este contexto, el autor del presente estudio postula que aquellos factores son la letalidad, el alcance, la velocidad y la precisión, aspectos que están siendo abordados en nuevas investigaciones.

- **Letalidad** hace referencia a la capacidad de las fuerzas desplegadas para neutralizar al adversario y sus recursos. A modo de ejemplo, dos misiles de igual alcance y autonomía pueden ser diferenciados en función de su capacidad destructiva. Tanto las fuerzas de aire, como las de mar y las de tierra pueden ser comparadas con sus equivalentes del lado opositor, en función de su capacidad destructiva.
- **Alcance** es un aspecto abordado hasta cierto punto en el presente documento. La capacidad de las fuerzas para atacar de manera efectiva al adversario a mayores distancias supone beneficios estratégicos y tácticos de elevada importancia, puesto que supone que ventaja difícil de sortear. No es difícil imaginar la relevancia del alcance a la hora de un enfrentamiento en cualquiera de los dominios tradicionales, ya sea mediante la comparación de alcance de piezas de artillería, cañones montados en buques de guerra, misiles aire-tierra, entre otros, pero la noción de alcance también es relevante para las ciberoperaciones. En algunos casos -por ejemplo- puede ser necesario interceptar comunicaciones inalámbricas, para lo cual se requiere poder establecer posición a una distancia suficiente como para capturar los datos que se desean analizar.
- **Velocidad** corresponde al tiempo con el cual los contingentes militares pueden ser efectivamente desplegados y enfrentar al adversario conforme a las necesidades del conflicto, reposicionando unidades y recursos a voluntad. Resulta sencillo imaginar ejemplos en los dominios tradicionales (tanques, aviones o barcos más rápidos), aunque también aplica para el ciberespacio: las velocidades de transmisión de datos impactan tanto a ciberoperaciones 100 % digitales, como a aquellas operaciones tradicionales que hagan uso de tecnologías interconectadas (sistemas de comunicación, transferencia de datos, sincronizadores, entre otros).

- **Precisión** hace referencia a la capacidad de las fuerzas para alcanzar a sus objetivos de manera exacta, reduciendo los márgenes de error que puedan traducirse en ataques fallidos o que causen daños colaterales a partes no involucradas en el conflicto (por ejemplo, civiles). En los dominios tradicionales, este factor es sumamente relevante cuando se busca neutralizar objetivos puntuales de alta importancia (por ejemplo, altos oficiales, sistemas de armamento móviles, entre otros), mientras que para el ciberespacio se traduce en la capacidad de identificar y atacar específicamente aquellos dispositivos y/o sistemas y/o redes que se pretende neutralizar o infiltrar, evitando caer en distractores digitales que simulen ser los objetivos reales.

En la Figura 17 se propone una representación gráfica de esta relación cuádruple de factores que moldean la evolución de la zona de operaciones.

Figura 17

Factores participantes en la Evolución de la Zona de Operaciones.



Fuente: Elaboración propia (2021).

Este tipo de herramientas podrán aportar a los estrategias y otros tomadores de decisiones, ya sea en etapas de planificación militar, como también durante evaluaciones in situ de operaciones en curso.

Referencias

- A look back at the Wright brothers' first flight. Space Center Houston. (2019). Retrieved 5 November 2021, from <https://spacecenter.org/a-look-back-at-thewright-brothers-first-flight/>.
- Andrade, T. (2017). *La edad de la pólvora: Las armas de fuego en la historia del mundo* (1st ed., p. 44). Grupo Planeta.
- Barría, C. (2021). El Ciberespacio y sus Ámbitos en la Vida Humana: Presente y Futuro. *Cuaderno de trabajo*, (3), 1-27.
- Bosworth, A. (1995). *Conquest and empire*. Cambridge University Press.
- Burton, K. (2021). The Scientific and Technological Advances of World War II | The National WWII Museum | New Orleans. The National WWII Museum | New Orleans. Retrieved 5 November 2021, from <https://www.nationalww2museum.org/war/articles/scientific-and-technological-advances-world-war-ii>.
- Causes and Effects of World War I. *Encyclopedia Britannica*. (2021). Retrieved 5 November 2021, from <https://www.britannica.com/summary/Causes-andEffects-of-World-War-I>.
- Cianchi, M., Laurenza, D., Pedretti, C., y Leonardo. (2009). *Leonardo*. Tikal Ediciones.
- Cimbala, S. (1985). Forever MAD: Essence and Attributes. *Armed Forces y Society*, 12 (1), 95-107. <https://doi.org/10.1177/0095327x8501200105>.
- Davis, L. y Schilling, W. (1973). *All You Ever*.
- Wanted To Know About MIRV and ICBM Calculations But Were Not Cleared To Ask. *Journal Of Conflict Resolution*, 17 (2), 207-242. <https://doi.org/10.1177/002200277301700203>.
- Douhet, G. y Ferrari, D. (1942). *The command of the air*. Coward-McCann.
- Espinoza Soriano, W. (1995). *La Civilización Inca* (pp. 46-67). Istmo.
- Estado Mayor de la Defensa. (2018). *Glosario de Terminología de Uso Conjunto* (p. 30).
- Foster, L. (2005). *Handbook to life in the ancient Maya world* (pp. 147-149). Oxford University Press.

- Hassig, R. (1992). *War and society in ancient Mesoamerica* (p. 137). University of California Press.
- Kaspersen, A. (2015). *Cyberspace: the new frontier in warfare*. *World Economic Forum*. Retrieved 5.
- Lehto, Martti. (2019). *Cyberspace and cyber warfare*. *Cyber Defence in Industry 4.0 Systems and Related Logistics and IT Infrastructures*, 99-109. NATO Science for Peace and Security.
- Moon, F. (2016). *Machines of Leonardo Da Vinci and Franz Reuleaux* (p. 34). SPRINGER.
- Museo Nazionale della Scienza e della Tecnologia. *Museoscienza.org*. (2021). Retrieved 5 November 2021, from <https://www.museoscienza.org/en>.
- Potter, W. C. (1978). *Coping with MIRV in a MAD World*. *Journal of Conflict Resolution*, 22(4), 599-626. <https://doi.org/10.1177/002200277802200403>.
- Rubel, R. C. (2011). *The future of aircraft carriers*. *Naval War College Review*, 64 (4), 12-27.
- Totman, C. (1980). *The collapse on the Tokugawa bakufu, 1862-1868*. University Press of Hawaii.
- Word Economic Forum (2015). *Cyberspace: the new frontier in warfare*. <https://www.weforum.org/agenda/2015/09/cyberspace-the-new-frontier-in-warfare/>
- Wright, O. (1977). *How we made the first flight*. Dept. of Transportation, Federal Aviation Administration, Office of General Aviation Affairs.

Capítulo 4

El problema de la ciberseguridad en la aviación

Saúl Ortega Alvarado¹

Universidad Mayor de Chile

Correo: saul.ortega@umayor.cl

¹ Magíster en Seguridad Informática. Docente de la Universidad Mayor de Chile.

Resumen

En la actualidad se están produciendo procesos de transformación digital, en ocasiones muy agresivos, que introducen capacidades de proceso digital a casi todo lo que nos rodea y el entorno aeroespacial no es una excepción a esta tendencia, estos cambios de transformación digital deben estar acompañados de una adecuada gestión de ciberseguridad para resguardar la disponibilidad, integridad y confidencialidad de los activos involucrados. En la primera parte de este trabajo se aborda la evolución que se ha tenido como humanidad, profundizando en la última etapa de evolución tecnológica, se identifica como los cambios evolutivos han estado acompañados de un periodo de inmadurez, lo que ha provocado fallas en dichos avances tecnológicos. Como segunda parte se aborda a detalle el cómo el humano ante estos cambios tecnológicos ha optado por un modelo reactivo antes que proactivo; lo cual ha originado graves problemas en temas de ciberseguridad considerando que este avance tecnológico tiene una dependencia asociada que provoca múltiples vulnerabilidades ante esta forma de gestión y evolución tecnológica desproporcionada. Como siguiente punto se aborda cómo esta evolución tecnología y falta de visión proactiva en seguridad, ha ocasionado múltiples brechas de seguridad en los ambientes de la aeronáutica civil y militar; para finalizar y como último punto se abordan posibles soluciones a esta problemática identificada.

Abstract

Currently, digital transformation processes are taking place, sometimes very aggressive, which introduce digital process capabilities to almost everything around us and the aerospace environment is no exception to this trend, these digital transformation changes must be accompanied by an adequate cybersecurity management to safeguard the availability, integrity and confidentiality of the assets involved. The first part of this work addresses the evolution that has taken place as humanity, delving into the last stage of technological evolution, identifying how evolutionary changes have been accompanied by a period of immaturity, which has led to failures in these technological advances. The second part of the paper discusses in detail how humans have opted for a reactive rather than a proactive model in the face of these technological changes,

which has caused serious problems in cybersecurity issues, considering that this technological progress has an associated dependence that causes multiple vulnerabilities in the face of this form of management and disproportionate technological evolution. The next point addresses how this technological evolution and lack of proactive vision in security has caused multiple security breaches in civil and military aeronautics environments; finally, as a last point, possible solutions to this identified problem are addressed.

Palabras clave: Aeronáutica, ciberseguridad, digitalización, educación digital, evolución tecnológica y seguridad de la información.

Keywords: Aeronautics, cybersecurity, digitization, digital education, technological evolution and information security.

Evolución de un mundo analógico a digital: una revolución que no se detiene desde la aparición del "Homo sapiens" hace 350.000 años, la humanidad ha evolucionado mucho a nivel social, cultural y muy recientemente a un nivel tecnológico.

Las seis edades identificadas acorde al microbiólogo y divulgador científico Pol Bertran Prieto son:

1. Edad de Piedra (2.500.000 a.C. - 6000 a.C.).
2. Edad de los Metales (6000 a.C. - 3300 a.C.).
3. Edad Antigua (3300 a.C. - 476 d.C.).
4. Edad Media (476 d.C. - 1492 d.C.).
5. Edad Moderna (1492 d.C. - 1789 d.C.).
6. Edad Contemporánea (1789 d.C. - actualidad) (Médico plus, 2020).

Quizá ahora esta sea la Edad del Internet. Actualmente nadie se plantea la vida sin conexión a la red digital global, las múltiples interacciones en diversas áreas, como: las comunicaciones, energía, almacenamiento, el comercio, servicios de transporte, etc. pero la gran mayoría de las personas desconocen cómo se ha llegado a tener una red globalizada (National Geographic, 2020).

El poder automatizar y el proceso de digitalización es inminente: desde el comienzo de la primera Revolución Industrial, entre los siglos XVIII y XIX, donde se mecanizaron los procesos de producción, transformando la economía agraria y artesanal en otra liderada por la industria.

Pasando por la segunda transición, en el siglo XX, donde se trajo la producción en serie, con la aparición de fábricas y líneas de montaje que permitieron fabricar productos para el gran consumo.

Paro así en el siglo XX llegar a una nueva transformación. El despliegue de la electrónica y la informática en los procesos industriales permitió automatizar las líneas de producción y que las máquinas reemplazaran a las personas en tareas repetitivas.

La convergencia de las tecnologías de la información con la sensórica y la robótica están transformado la internet tradicional (información y personas) en internet de las cosas (IoT). Y este nuevo escenario aplicado a la industria ha producido un impacto disruptivo en esta, abriendo un escenario de enormes oportunidades basado en el aprovechamiento de la informática (Del Val, 2016).

De forma histórica el comunicador Javier Flores identifica los siguientes ítems claves de esta última transformación digital:

- 1950: Los ordenadores “se hablan” por la línea telefónica a través de módems diseñados originalmente para transmitir señales de radar de la Fuerza Aérea de Estados Unidos.
- 1960: Vince Cerf presenta el primer protocolo que se convertiría en «ARPANET, un proyecto de investigación y que probablemente no pasaría de las 128 redes» El Instituto de Investigación de Standford es uno de los dos nodos que forman la ARPANET del Gobierno Estadounidense y que terminaría siendo el germen de Internet. Básicamente ARPANET se trataba de una red de ordenadores encargadas por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos y que buscaba ser el medio de comunicación entre sus diferentes instituciones.
- 1970: En el Xerox PARC se desarrolla el estándar Ethernet, que conecta ordenadores e impresoras por medio de redes de área local.
- 1980: El estándar TCP/IP indica cómo deben intercomunicarse las redes, sentando los cimientos de Internet y la web como la conocemos hoy día.

- 1984: La división militar de ARPANET se separó del proyecto, argumentando motivos de seguridad nacional.
- 1985: Finales de año, en la red de ARPANET había ya 2,000 ordenadores conectados por TCP/IP. En 1987 eran 30.000 y en 1989 159.000.
- 1990: Varias fuentes ofrecen software para “navegar” en la web. El más popular de los primeros navegadores es Netscape Navigator.
- 2000: Todo dispositivo conectado a Internet necesita una dirección; se crea el sistema IPv6 para ampliar el número de direcciones, pues empieza a escasear debido a la gran cantidad de personas y aparatos conectados.
- 2010: El sistema IPv6 puede abarcar hasta 340 undecillones (1066) de direcciones. Las redes móviles 4 G aumentan su alcance, lo que permite la explosión del dispositivo móvil.
- 2019: Con el uso del 5 G se realizó la primera operación teleasistida usando esta tecnología. Inteligencia artificial, Big Data, biometría (National Geographic, 2020).

La transformación digital lo está cambiando todo, tanto que se estima que casi un 40% de las empresas desaparecerá por falta de adaptación al cambio.

En las últimas dos décadas el Internet ha transformado por completo nuestras vidas, dejándonos en medio de una revolución en donde los protagonistas son nada más y nada menos que el Big Data, el Machine Learning, la industria 4.0, la nube y el IoT, etc. (Núñez, 2018).

Hemos pasado de ser una sociedad analógica, basada en el papel, a una sociedad digital. La facilidad de acceso a la información, el hecho de que la gran mayoría sea gratuita, la velocidad con la que corre el cambio tecnológico son fuertes razones para este proceso de digitalización.

El crecimiento tecnológico, nace como un estado neutral lo cual permite a una tecnología carecer de sesgos para un uso inadecuado. Uno de estos casos es el que Marta Peirano identifica dentro de su libro. El enemigo conoce el sistema, la creación de Google.

Lawrence Page y Serguéi Brin tratan de mejorar el buscador de la Biblioteca Digital del Departamento de Informática de la Universidad de

Standford. Quieren implementar un sistema que «entienda exactamente lo que preguntas y te conteste exactamente lo que tú quieres», estableciendo una jerarquía en los resultados de cada búsqueda, priorizando los textos más citados y los autores más reputados.

Larry Page y Serguéi Brin lanzaron su buscador en 1998, desde el garaje de Susan Wojcicki en Menlo Park. A finales de año, ya habían indexado dos millones y medio de webs.

Su objetivo oficial ha sido «organizar la información del mundo y hacerla universalmente accesible y útil». Su código deontológico: «Don't do Evil» («no hagas el mal») (Peirano, 2019).

La tecnología no produce por sí sola la transformación digital. Es necesaria e imprescindible, pero no suficiente. La transformación digital es un proceso de cambio que utiliza la tecnología, a veces como mero instrumento, y otras veces como requisito estratégico.

De lo reactivo a lo proactivo - ¿Cómo ha evolucionado la ciberseguridad?

La evolución de la tecnología ha generado una evolución en la manera como se llevan a cabo una gran cantidad de actividades que competen al entorno empresarial. Actualmente, la tecnología dirige innumerables procesos en el ámbito corporativo; lo que implica una gran cantidad de ventajas como la automatización, el acceso a información, el almacenamiento amplio de datos y mucho más. Sin embargo, también implica un porcentaje de riesgo debido al hackeo, por ejemplo:

- Robo de datos
- Espionaje corporativo
- Sustracción de información financiera
- Sabotaje
- Etc.

En los últimos años, el panorama de ciberamenazas ha cambiado mucho más rápido de lo que nadie podía imaginar. Hemos sido testigos de la evolución de estos peligros y hemos asistido a los principales ciberataques que han ocurrido en los últimos años como WannaCry,

NotPeyta, las brechas de datos en Equifax y Uber, los ciberataques a British Airways, Under Armour y Ticketmaster.

En la década de los 70, la seguridad en las empresas estaba centrada en garantizar el buen uso de la información por parte de los empleados confiando en el sentido común para garantizar la seguridad de la organización. Sin embargo y debido a la inclusión y evolución de la tecnología, aparecieron nuevos riesgos que hicieron que esta "seguridad" quedara obsoleta.

Uno de los principales motivos por los que el avance de la tecnología propulsó un cambio en la tendencia de seguridad de las empresas vino motivado principalmente por los virus que se convirtieron en los principales motores de crecimiento para la seguridad de la información a nivel mundial debido a la globalidad de sus objetivos (INCIBE, 2015).

Alejandra Moran identifica que:

La ciberseguridad es el conjunto de herramientas, políticas, conceptos de seguridad, salvaguardas de seguridad, directrices, métodos de gestión de riesgos, acciones, formación, prácticas idóneas, seguros y tecnologías que pueden utilizarse para proteger los activos de la organización y los usuarios en el ciberentorno. Los activos de la organización y los usuarios son los dispositivos informáticos conectados, los usuarios, los servicios/aplicaciones, los sistemas de comunicaciones, las comunicaciones multimedios, y la totalidad de la información transmitida y/o almacenada en el ciberentorno. Las propiedades de seguridad incluyen una o más de las siguientes: disponibilidad, integridad, que puede incluir la autenticidad y el no repudio; confidencialidad (Morán, 2019).

La popularización de los ordenadores personales en los años 80 llevó al desarrollo de las primeras herramientas de ciberataque y sentó las bases de las futuras amenazas. Así aparecía en escena la primera generación de ciberamenazas caracterizada por la capacidad de réplica de los programas maliciosos. A pesar de que Internet aún no se había extendido, el malware llegaba a los ordenadores a través de disquetes, CD o memorias USB. Ante el impacto de los ataques de virus, se empezó a trabajar en los primeros productos comerciales de antivirus tradicionales.

En los años 80 los sistemas informáticos de las empresas disponían de pocas medidas de seguridad, comenzaron a comercializarse los antivirus

y empezaron a contratar guardias de seguridad para la protección de ciertas instalaciones.

La segunda generación de ataques surgió en la década de 1990, a partir de la adopción de Internet por parte de usuarios y empresas. La conectividad nos unió a todos y los hackers se profesionalizaron especializándose en robar dinero, empezaron a usar técnicas que fueron las precursoras de las que utiliza la ciberdelincuencia actual. Para hacer frente a esta segunda generación, se desarrolló el primer firewall de “inspección de estado” de la industria.

En la década de los 90, se hacía un uso de internet sin la concienciación adecuada de los empleados, la información se almacenaba en dispositivos extraíbles con pocas medidas de seguridad y la seguridad física en las instalaciones seguía siendo insuficientes.

En los años 2000 llegó la tercera generación de amenazas, los ciberdelincuentes explotaban vulnerabilidades informáticas de sistemas operativos, hardware y aplicaciones. Era un campo totalmente nuevo y las vulnerabilidades aparecían por todas partes. También tuvo una gran relevancia la adopción masiva del correo electrónico y las posibilidades de ingeniería social que ofrecía. Se combinaron firewalls y antivirus para proteger los sistemas de los ciberataques, asentando la base de las infraestructuras de seguridad empresariales de hoy en día. Pero la protección proporcionada comenzó a caer frente a la velocidad a la que los ataques evolucionaban en sofisticación e impacto.

En la década del 2010, los ciberataques alcanzaron niveles de sofisticación sin precedentes. Los criminales se unieron en organizaciones profesionales y empezaron a desarrollar malware de día cero. Los ciberataques se volvieron sigilosos y difíciles de identificar, los virus podían estar ocultos en todos los sitios, desde documentos adjuntos, información comercial falsa hasta archivos de imagen. Todo lo que un usuario tenía que hacer para caer en la trampa era hacer clic en el documento malicioso y su dispositivo se infectaba. Los ataques de cuarta generación consiguieron que la seguridad basada en la detección dejase de ser eficaz para proteger a las empresas al no poder reconocer las amenazas desconocidas. Ante esta situación, se desarrollaron soluciones de seguridad avanzada con tecnología de prevención de amenazas para bloquearlas antes de que pudieran actuar.

En esta década, los dispositivos móviles de las empresas disponían de pocas medidas de seguridad que impidan la fuga de información de la

corporación. Empiezan los planes sólidos de concientización de los empleados sobre seguridad de la información, al igual que empieza a haber un mayor control relacionado con la privacidad de la información para evitar su fuga. Se empiezan a usar herramientas de cifrado de información a nivel corporativo y personal. Y nacen las primeras leyes de protección de infraestructuras críticas.

A principios de 2017 cuando aparecieron en escena herramientas de hackeo filtradas de la industria militar. Este malware dio lugar a ataques con múltiples vectores que causaron importantes pérdidas no solo económicas sino también para la reputación de grandes empresas. El malware actual puede propagarse por toda la infraestructura TI desde un solo dispositivo. Tuvo especial relevancia WannaCry que afectó a 300.000 ordenadores en 150 países, y NotPetya, que causó pérdidas de 300 millones de dólares.

El teletrabajo y el uso compartido de la información en la nube se convierten en una tendencia global. Los electrodomésticos disponen ya de acceso a Internet y los riesgos amplían su alcance, el riesgo ahora está en casa.

Ante la nueva generación de amenazas, y atendiendo a las distintas herramientas que la tecnología pone a nuestro alcance, se ha comenzado a explorar motores basados en Inteligencia Artificial. Mediante el uso de tecnologías de Inteligencia Artificial (IA) se puede emular y automatizar la intuición de un analista, los algoritmos pueden analizar millones de indicadores conocidos y buscar otros similares. Como resultado, se puede producir un feed en inteligencia de amenazas que favorece la prevención de ataques antes de que ocurran por primera vez (Hard2bit, 2019).

La seguridad absoluta no existe, poca atención provoca en los gobernantes respecto de la seguridad física, de la información de personas y gobiernos, la protección de todo tipo de recursos, de información, sistemas, de fronteras, comunicaciones, de los aspectos físicos, geográficos e informáticos, tan necesarios de proteger (hasta años recientes); lo que en sí mismo es una vulnerabilidad, donde la definición que se use para explicar el nivel de seguridad y atención que se tenga de esta, depende de la óptica de estudio o de la autoridad que la defina, y lo que por ella debe entenderse para concientizar, aplicar y proteger, y en el peor de los casos defender (Morán, 2019).

La necesidad de Ciberseguridad debe convertirse en una inclusión obligada legalmente en el tema, desde los aspectos introductorios hasta la aplicación y monitoreo de la situación y avances actuales. Incluso la creación de un observatorio internacional que facilite el aprendizaje, la generación de recursos humanos, materiales, herramientas, profundización en cifrado, y temas selectos de ciberdefensa para cuerpos especiales, generación de leyes modelo, homologación de definiciones, que de preferencia estuviera relacionada con algún tratado existente o nuevo, que facilite en la región los parámetros actuales de Ciberseguridad de todos, para todos dado el impacto masivo peligroso que tendría un ciberataque para cualquier país, ello facilitaría la protección de las distintas infraestructuras de un país; algo así como la ONU de la Ciberseguridad, lo más viable para un avance común en la protección de problemas comunes para la comunidad de países contra los ciberdelincuentes (Morán, 2019).

Problemas reales de ciberseguridad en aeronáutica

Podemos definir como defensa aérea: Aquellas operaciones activas y acciones pasivas que se conducen para prevenir, contrarrestar, neutralizar o minimizar los daños que pueda causar un ataque procedente del aire contra los centros vitales de la Nación, la población civil, sus recursos y las fuerzas militares, para negar el empleo ilícito del espacio aéreo.

Las consecuencias de un ciberataque ya no se limitan a meras violaciones de datos o encriptación de archivos: los riesgos de interrupciones operativas son muy reales y, en la industria aeronáutica, los profesionales de la seguridad simplemente no pueden permitirlo. Como se demostró en el reciente ataque al Colonial Pipeline, el riesgo de daños colaterales es alto.

La industria no solo debe asegurarse de que cuenta con las medidas de ciberseguridad adecuadas, sino que también debe exigir a sus proveedores estándares más altos. Un ataque reciente a Singapore Airlines resultó en la liberación de información privada de más de 580.000 usuarios, gracias a un ataque sigiloso y altamente sofisticado que apuntó a la cadena de suministro, infiltrándose en los servidores de un servicio de pasajeros de un proveedor de la aerolínea.

Se ha entrado en una nueva era de ciberataques, una en la que ninguna empresa u organización es inmune a las infracciones y que han ido más allá de un problema a escala humana. Es responsabilidad de estas organizaciones reevaluar constantemente sus estrategias de ciberseguridad y apoyarse en las tecnologías disponibles para proteger de manera dinámica a sus usuarios y mantenerse un paso por delante de los ciberdelincuentes (Ávila, 2021).

Según los Términos de Referencia Aircraft cybersecurity (RMT.0648—ISSUE 1—17.5.2016) de la European Aviation Safety Agency (EASA), los sistemas de las aeronaves han pasado de basarse en sistemas simples, propietarios y aislados, a arquitecturas mucho más complejas, que usan protocolos estándar y plataformas de propósito general, cuya documentación técnica está disponible públicamente y con conexiones vía satélite (SATCOM) que pueden incluir conexiones a Internet, lo que aumenta de forma considerable la superficie de exposición a los ciberataques.

Estas nuevas capacidades digitales, orientadas a facilitar la operación de las aeronaves, mejorar su mantenimiento, ahorrar costes y lograr un mayor confort de los pasajeros, también implican nuevos riesgos, que tienen la capacidad potencial de ser catastróficos (Acero, 2020).

Las amenazas cibernéticas en la aviación civil y militar son una realidad en un ámbito global cada vez más tecnificado. El sector de la aviación civil depende cada vez en mayor medida de la disponibilidad de sistemas de tecnología de información y comunicaciones, así como de la integridad y confidencialidad (CID) de los datos. La amenaza de posibles incidentes cibernéticos para la aviación civil evoluciona de forma constante (Pérez, 2019).

Algunas amenazas son compartidas con otros sectores de la industria, pero otras son específicas de la aviación. Dentro de las amenazas cibernéticas en la aeronáutica, podemos incluir el malware, que puede afectar negativamente a la seguridad de las aeronaves, por el acceso no autorizado a los sistemas, o por el uso, revelación, denegación, interrupción, modificación o destrucción de la información digital presente en los sistemas de la aeronave (Acero, 2020).

Esas amenazas también pueden afectar a la seguridad en vuelo creando problemas en el control de tráfico, provocando maniobras anticolidión, distracciones, incremento de la carga de trabajo de pilotos y controladores, desconfianza en el sistema afectado y en las tripulaciones o, en

el peor de los casos, un accidente aéreo. Particularmente los investigadores han demostrado vulnerabilidades en distintas tecnologías inalámbricas muy usadas por las aeronaves que carecen de los mecanismos básicos de ciberseguridad. Con la necesaria interconectividad de los sistemas incrementa considerablemente el riesgo en un ámbito donde los efectos disruptivos pueden ser devastadores (Pérez, 2019).

El principal problema de añadir conectividad y capacidades de proceso digital a una aeronave es que, si no se ha previsto las medidas de seguridad lógica adecuadas, se puede sufrir un ciberataque que, en casos extremos, puede afectar a seguridad física de la aeronave (Acero, 2020).

Para la aviación civil asegurarse que los procedimientos adecuados de ciberseguridad se encuentran disponibles en los aeropuertos y toda la infraestructura de apoyo es crítico para mantener las operaciones en cada aspecto de esta industria, desde el Wi-Fi hasta los dispositivos de Internet de la Cosas (IoT), un ciberataque podría causar una interrupción generalizada en las operaciones e incluso la pérdida de vidas humanas.

Según el Airports Council International, hay más de 17.000 aeropuertos comerciales en el mundo y esa cifra se eleva a más de 41.000 si consideramos aeródromos y aeródromos militares (Ávila, 2021).

Bajo el contexto de poder tener una visión amplia de los elementos que hay que resguardar en la aeronáutica y con la tendencia alcista sobre los ataques a ambientes de infraestructura crítica (IC), término usado por los gobiernos para describir activos que son esenciales para el funcionamiento de una sociedad y su economía, por parte de los ciberdelincuentes el coronel Carlos Febrillet Rodríguez, identifica las infraestructuras críticas (IC) dentro de la aeronáutica para la fuerza aérea.

1. Alimentación eléctrica de instalaciones: Militares, Sensores, Centros de Mando y Control, etc.
2. Monitorización del flujo de los recursos e inteligencia financiera en apoyo a operaciones de interdicción.
3. Electrónica (Sensores y Comunicaciones), especialmente lo relativo a Inteligencia Electrónica (Febrillet, 2021).

Dada la naturaleza polifacética y multidisciplinaria de la ciberseguridad en la aeronáutica, y en vista de que los ciberataques pueden afectar de forma simultánea una amplia gama de áreas y propagarse con

rapidez, es necesario crear una visión común y definir una estrategia de ciberseguridad (OACI, 2019).

Las principales vulnerabilidades y amenazas en la industria aeronáutica pueden deberse a la condición de espacio global común y a la elevada tecnificación y complejidad de los sistemas que los componen, como identifica el comandante investigador José Ignacio Pérez Benítez. Una aeronave moderna implica muchos sistemas embarcados con millones de líneas de código. Esto supone más dificultad en todas las fases del ciclo de vida e incrementa considerablemente el riesgo de fallo lógico en cualquiera de sus componentes (Pérez, 2019).

Entre las amenazas que se consideran destacan las siguientes: la tecnificación y vinculación al dominio cibernético del sector aeroespacial, así como el peso creciente de la informática en los sistemas embarcados. El hecho de que actualmente se prioriza la seguridad operativa y funcional, frente la seguridad cibernética. En el nuevo entorno aeroespacial altamente digitalizado, hay una clara necesidad previa de seguridad cibernética, para poder lograr una adecuada seguridad aeroespacial. Es decir, ahora hay una vinculación entre la ciberseguridad de la aeronave y la aeronavegabilidad de la misma (Acero, 2020).

Estamos ante un entorno complejo altamente tecnificado, interconectado y de ámbito global, donde hay que proteger no solo las aeronaves y sus sistemas embarcados, sino también los sistemas de navegación, las estaciones de control y seguimiento de satélites, los sistemas de control aéreo, los sistemas meteorológicos, las instalaciones aeroportuarias con todos sus sistemas de información asociados, los sistemas de mantenimiento y de gestión logística, los entornos de desarrollo, los canales de distribución del software, los procedimientos de actualización, la organización de la ciberseguridad, las estructuras de mando y control, etc. Se necesita una aproximación integral que permita generar la necesaria confianza a los usuarios, a los gobiernos y a las empresas.

Si nos centramos en el plano técnico existen múltiples vectores de ataque: actualizaciones de software de misión, de las bolsas electrónicas de vuelo, los interfaces de cabina, contenidos infectados en sistemas multimedia, falta de aislamiento efectivo entre sistemas vitales y no vitales para el vuelo, falta de supervisión de puntos de acceso y

conexión, etc. Pero si hubiese que elegir uno, sin duda sería el de las comunicaciones inalámbricas.

Muchos sistemas de comunicaciones inalámbricas de las aeronaves carecen de mecanismos básicos de seguridad, dejándolos expuestos a ataques. Hay que tener en cuenta que muchos de estos sistemas entran en servicio cuando la seguridad no estaba en la mente de los diseñadores. El auge de las radios definidas como software tiene incidencia directa en el incremento de la posibilidad de ataques a este tipo de sistemas a un coste muy bajo.

Se ha demostrado que, en la mayoría de los casos, es suficiente una radio definida como software, un ordenador de bajo costo, una antena, un amplificador de señal y software open-source de libre acceso para que un atacante con conocimientos y presupuesto moderados sea capaz de desarrollar ataques remotos a este tipo de tecnologías (Pérez, 2019).

Un ejemplo de estas vulnerabilidades es el ADS-B (Automatic Dependent Surveillance Broadcast)

El ADS-B es un sistema que determina la posición de la aeronave mediante navegación vía satélite y periódicamente la emite de forma inalámbrica, permitiendo que pueda usarse por otras aeronaves o por el control de tránsito aéreo y visualizar su posición y altitud en las pantallas sin necesidad de radar.

Este sistema emite mucha información, identificación del vuelo, identificación del avión, posición (latitud/longitud), altitudes, régimen de ascenso/descenso, ángulos y velocidad sobre el terreno, indicaciones de emergencia (cuando se selecciona algún código), etc., todo ello sobre enlaces sin cifrar, sin ningún tipo de autenticación o integridad, lo que permite manipularla o hacer spoofing aeronaves como de las estaciones de control en tierra.

Los ataques pasivos al ADS-B pueden hacerse, además de con los medios descritos anteriormente, adquiriendo un receptor ADS-B o acudiendo a uno de los múltiples servicios en internet que proporcionan datos ADS-B al instante.

Un ataque activo tipo sería la generación de un avión fantasma. Mediante la emisión de nuevos mensajes ADS-B de un avión inexistente

(fantasma), los sistemas los van a interpretar como una aeronave real, lo cual puede llegar a forzar a realizar maniobras innecesarias para evitar una colisión.

Otro ataque sería la denegación de servicio. Usando la técnica anterior, inundar los sistemas con múltiples aviones fantasma con la intención de que los sistemas de vigilancia, de los aeropuertos o de las propias aeronaves no se puedan utilizar.

Existen otras posibilidades de ataque activo como modificación de trayectorias, generación de falsas alarmas, aeronaves desaparecidas o spoofing de aeronaves, siempre generando, eliminando o manipulando mensajes de forma aislada o en combinación con otras técnicas como manipulando transpondedores en cabina para modificar la dirección y simular ser otra aeronave distinta.

Otro sistema vulnerable es ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System). Se trata de un sistema del año 1978. Existe un cifrado estándar para este sistema, pero no se ha implantado de forma generalizada. Se utiliza para la transmisión de mensajes cortos entre el avión y las estaciones de tierra con distintos fines como informes de rendimiento, comunicaciones interactivas con la tripulación, planes de vuelo antes del despegue, incidencias técnicas o de otro tipo, etc.

Los ataques activos al sistema ACARS consisten en la inyección, modificación o borrado de mensajes, que puede usarse para provocar, por ejemplo, actualizaciones falsas de planes de vuelo, información meteorológica falsa, alertas innecesarias, etc.

Algunas aeronaves tienen el sistema ACARS conectado al FMS9 lo cual incrementa considerablemente el riesgo. En concreto, en la conferencia "Hack in the Box 2013" en Amsterdam se demostró que con equipos comprados en ebay se pueden ver y manipular los mensajes y enviar código malicioso al FMS. En primer lugar, se localiza el avión con ADS-B, luego se usan mensajes ACARS para subir malware al FMS y posteriormente manipular el sistema cambiando planes de vuelo, predicciones meteorológicas, información del avión, o incluso controlar el avión si el piloto automático está conectado.

ADS-B y ACARS son los sistemas que parecen acumular más literatura en relación con comunicaciones inalámbricas no protegidas, pero no son los únicos. El GPWS (Ground Proximity Warning System) es otro ejemplo a considerar.

El GPWS es un sistema que alerta a los pilotos sobre la proximidad del terreno, que comenzó su vida a finales de los años 60. Usa un radioaltímetro para calcular la distancia al terreno que sigue patrones estándar de frecuencia de emisión y barrido. Se usa el cambio de frecuencia y el tiempo de ida y vuelta de la señal emitida para calcular la altura sobre el terreno.

Un posible ataque consistiría en emitir una ráfaga de frecuencias simulando la señal de vuelta en el rango y momento adecuados. De esta forma se puede simular que el terreno se aproxima rápidamente. Con este tipo de ataque no se espera provocar un accidente, sino más bien una maniobra para evitar una colisión. También se podría anular el sistema mediante una denegación de servicio, que el sistema no es capaz de detectar y con ello, aumentar la posibilidad de un accidente.

Algo similar ocurre con el TCAS (Traffic Collision Avoidance System). Un Sistema de los años 80 que, con independencia de equipos en tierra, proporciona resolución de conflictos y alertas ante una amenaza de colisión aérea entre aeronaves.

El TCAS también utiliza canales de comunicación sin autenticación. En este caso, un requisito a resolver para un potencial atacante sería el alcance, ya que la velocidad de una aeronave hace que rápidamente quede fuera del mismo. Esto puede solucionarse desplegando múltiples antenas con la separación física adecuada.

En cualquier caso, la intención del atacante es emitir señales de alerta de proximidad de una aeronave inexistente para provocar maniobras innecesarias.

Un último ejemplo de comunicaciones no protegidas sería el ILS (Instrument Landing System). El ILS es un sistema de aterrizaje por instrumentos que permite que un avión sea guiado y aterrizado con precisión durante la aproximación a la pista de aterrizaje, incluso en condiciones de baja visibilidad.

El ILS se compone de equipos en tierra, que emiten las señales y equipos a bordo del avión, que las procesa y permite guiar al piloto horizontal (localizador) y verticalmente (senda de planeo) hasta la pista de aterrizaje.

Un atacante pretenderá generar lóbulos de señal falsos que repliquen los legítimos del sistema con la intención de desencadenar múltiples

aproximaciones frustradas, causar que el avión toque la pista antes de lo previsto o que la sobrevuele por completo.

Lo que más dificulta este posible ataque serían las limitaciones físicas, ya que habría que situar el equipamiento próximo a la pista de aterrizaje. Es algo difícil, pero no imposible. No obstante, una vez que el avión está en el localizador, se puede generar una senda de planeo falsa, emitiendo un lóbulo con más potencia y a cierta distancia del aeropuerto, lo que es más sencillo ya que estaría fuera de la zona de protección física.

Entonces, ¿qué se puede hacer para resolver o mitigar estas amenazas? ¿se puede hacer algo?

Podríamos pensar inicialmente que con aplicar medidas técnicas adecuadas ya sería suficiente. Por ejemplo, podríamos dar seguridad a las comunicaciones inalámbricas, incorporando autenticación y cifrado, también podríamos pensar en utilizar siempre sistemas redundantes, es decir, duplicando sistemas para que en caso de fallo siempre haya otro disponible; resistentes, que soporten condiciones de temperatura y presión extremas, pero que también sean capaces de resistir ataques físicos o eléctricos y resilientes, que utilicen distintas tecnologías para realizar la misma función y, de esta forma minimizar los efectos de ataques dirigidos a tecnologías concretas.

Todas estas medidas técnicas aportan seguridad, pero ¿qué ocurre si el jefe de mantenimiento no registra los incidentes mecánicos? ¿Y si se actualiza el software embarcado siguiendo un procedimiento no escrito? ¿O si un técnico utiliza la memoria USB de su ordenador particular infectado para transferir datos de misión a un sistema embarcado? ¿Y si un contrato de mantenimiento no cubre la posible incorporación de nuevas funcionalidades, o se alcanza obsolescencia funcional porque el mantenimiento no contempla la posibilidad de adaptarse a un nuevo entorno actualizado? (Pérez, 2019).

Posibles soluciones

La Administración Federal de Aviación de los Estados Unidos (FAA) pronosticó que el tránsito aéreo doméstico crecerá a una tasa promedio del 2% cada año durante los próximos 20 años (Ávila, 2021).

Garantizar la ciberseguridad en una industria aeronáutica civil o militar es complejo. La ciberseguridad posee procedimientos necesarios para asegurar que, con los sistemas que se disponen puedan proteger adecuadamente la información almacenada, los datos y comunicaciones, utilizando las estrategias necesarias para la protección de contraataque de la ciberdefensa que es una parte esencial de la Ciberseguridad (Febrillet, 2021).

En la era de la guerra cibernética y los ciberataques patrocinados por estados nacionales, asegurar tanto los aeropuertos comerciales grandes como los aeródromos más pequeños debe ser una prioridad (Ávila, 2021).

El entorno aeronáutico se enfrenta a riesgos específicos, por ejemplo, actividades interrumpidas por dependencias SAFETY/SECURITY no previstas, datos radares corruptos, saturación de procesamiento por obsolescencia de sistemas, sistemas de mantenimiento comprometidos, falta de resiliencia, resistencia o redundancia en los sistemas, uso de COTS, etc. Estos factores deben ser incorporados a herramientas específicas (Pérez, 2019).

Algunos ejemplos de salvaguardas a aplicar podrían ser:

- Aislar funciones críticas desde la fase de diseño.
- Sistemas redundantes, resistentes y resilientes.
- Refinar los contratos con los proveedores, con respecto a:
 - Responsabilidades bien definidas.
 - Habilitaciones de seguridad.
 - Incorporar todos los tipos de mantenimiento.
- Realizar inspecciones de calidad.
- Elaborar un plan de concienciación.
- Incorporar autenticación y cifrado en las comunicaciones inalámbricas.
- Incorporar infraestructura de clave pública en la entrada de datos a sistemas críticos, etc.

En primer lugar, siempre conviene acudir a metodologías internacionalmente reconocidas. Entre ellas podemos citar MAGERIT, OCTAVE, CRAMM, MEHARI o SP800-30 entre otras.

Será necesario contar con herramientas que faciliten el trabajo. El análisis de riesgos es una actividad compleja, metódica y cíclica. El análisis debe hacerse tanto en la fase de especificación, como en la de desarrollo y, por supuesto, durante la operación del sistema. El problema es que no hay herramientas que traten los riesgos aeronáuticos de forma específica, o al menos el autor de este artículo no las ha encontrado. ENISA (European Union Agency for Cybersecurity) publica un inventario de metodologías y herramientas con plantillas de atributos que describen en detalle dichas metodologías y herramientas (Pérez, 2019).

La visión de la Organización de Aviación Civil Internacional - OACI sobre la ciberseguridad mundial es que el sector de la aviación civil sea resiliente a los ciberataques y siga siendo seguro y fiable en todo el mundo, al tiempo que continúa innovando y creciendo.

Esto puede lograrse mediante:

- El reconocimiento de parte de los Estados de sus obligaciones en virtud del Convenio sobre Aviación Civil Internacional (Convenio de Chicago) de velar por la seguridad operacional y la seguridad y continuidad de la aviación civil, incluida la ciberseguridad;
- La coordinación de la ciberseguridad de la aviación entre las autoridades estatales a fin de garantizar una gestión eficaz y eficiente de los riesgos de ciberseguridad a escala mundial; y
- El compromiso de todas las partes interesadas de la aviación de profundizar la resiliencia en este ámbito y protegerse contra los ciberataques que pudieran afectar la seguridad operacional, la seguridad de la aviación y la continuidad del sistema de transporte aéreo (OACI, 2019).

La estrategia se alinea con otras iniciativas de la OACI relativas a la ciberseguridad y se coordina con las disposiciones pertinentes sobre gestión de la seguridad operacional y la seguridad de la aviación. La finalidad de la estrategia se cumplirá mediante un conjunto de

principios, medidas y actividades contenidos en un marco que descansa sobre siete pilares:

1. Cooperación internacional.
2. Gobernanza.
3. Leyes y reglamentos eficaces.
4. Política de ciberseguridad.
5. Intercambio de información.
6. Gestión de incidentes y planificación ante emergencias.
7. Creación de capacidad, instrucción y cultura de ciberseguridad.

Países como España muestran un ejemplo de la permeabilidad que debe tener la implementación de estas medidas sugeridas por la OACI. La Estrategia de Seguridad Aeroespacial Nacional española señala una serie de líneas de acción, entre las que destacan las siguientes: fortalecer la prevención, detección, vigilancia y respuesta a ciberataques, el fomento del empleo de productos certificados y acreditados, concienciar al sector aeroespacial en ciberseguridad e implantar una política de seguridad integral (lo que implica un enfoque holístico y multidisciplinar del problema).

Dicha política de seguridad integral, incluye, entre otras medidas: la promoción de la redundancia, resiliencia y resistencia de los sistemas aeroespaciales, incluidos los sistemas de tecnología de la información (IT) y la gestión de la obsolescencia de los mismos, algo que no es nada sencillo en este momento, por la falta de expertos en la detección y gestión de la obsolescencia (Acero, 2020).

El uso de tecnologías “disruptivas” como la IA puede ayudar a cumplir con algunas de estas propuestas.

La máquina de ajedrez que había ganado a Kasparov usaba la fuerza bruta, que no es exactamente lo mismo que pensar. Esa «inteligencia» está basada en su capacidad de entender la lógica del juego y calcular de antemano todas las permutaciones posibles para escoger las que tienen más probabilidad de ganar. Esto después se llamaría inteligencia de vieja escuela, pero entonces era la única inteligencia artificial disponible y es perfecta para resolver problemas con una base lógica de manera eficiente y con un alto grado de precisión. La clase de cosas

que no se les dan bien a los humanos. Su desarrollo estaba basado en la representación lógica y abstracta de los procesos cognitivos: circuitos que imitan lo que los humanos hacen. Con la red de los ochenta llega un nuevo chico al barrio, llamado conectivismo. Y la apuesta de los conectivistas es que la única forma de imitar lo que el cerebro hace es imitando exactamente lo que es. No de manera simbólica sino literal, simulando neuronas. Y no enseñarle de manera semántica, programando la lógica de las estructuras del pensamiento como se programa a una máquina, sino a partir de ejemplos, como se enseña a un niño o a un animal. La máquina de jugar al ajedrez ya no aprendería las reglas de cada pieza para calcular todas las permutaciones posibles y escoger la que proyectara el mejor resultado. En su lugar, estudiaría una base de datos con todas las jugadas que han conseguido más ventaja en partidas anteriores y las aplicaría en el contexto apropiado, aprendiendo de sus propios éxitos y fracasos, refinando el juego hasta llegar a una imbatible perfección (Peirano, 2019).

Con la explosión del big data, se tenía el historial de compras de cada persona y los datos de su perfil. Tenían los datos de su tarjeta de puntos, de su seguro médico, de sus aficiones televisivas. Sabían quién compraba compulsivamente a las dos de la mañana, quién preparaba cuidadosamente su boda y quién acababa de perder un vuelo en una ciudad que no era la suya. Podían calcular cuál era el máximo que podían sacarle a cada uno. Este algoritmo de precios dinámicos nunca juega a favor del consumidor. Es completamente oportunista y no tiene sentimientos.

Las aerolíneas fueron las primeras en escalar el sistema. ¿Quién no se ha encontrado con que la oferta que trataba de comprar ha cambiado de precio antes de llegar a la caja? ¿O que un billete que has mirado hace solo unas horas ha duplicado su precio cuando lo vas a comprar? ¿O que un viaje nacional de tres horas es más caro que un vuelo intercontinental de doce horas? Como ocurrió con la burbuja del cable, la liberalización del espacio aéreo provocó una burbuja de aerolíneas cuya competencia desplomó los precios con la conocida fase de absorciones, fusiones y rescates. Hoy la mitad del mercado europeo se concentra en cinco grupos: Ryanair, Lufthansa Group, AIG, Easy Jet y Air France-KLM. En Estados Unidos son Southwest Airlines, American Airlines, Delta Airlines, United Airlines y Air Canada. El precio de un billete ya no depende tanto del precio del combustible, el número de pasajeros y la distancia del trayecto; depende sobre todo de la oferta y la demanda (Peirano, 2019).

La inteligencia artificial (IA) habilitó la ciberseguridad

Con algoritmos eficientes de aprendizaje automático y una integración perfecta de la inteligencia artificial en las aplicaciones de ciberseguridad, es posible la detección de amenazas al instante y la respuesta automatizada a incidentes, y se mejora continuamente. Los motores de correlación de amenazas efectivos que detectan ataques en sus primeras etapas se volverán más refinados como la defensa de primera línea para las organizaciones.

Al observar estos hitos en ciberseguridad, se hace evidente que el panorama de amenazas está en constante evolución. Es posible que pronto veas el mensaje “Todos tus archivos se han cifrado. Tienes 56 horas para enviar el pago y recuperar tus archivos”. Los ciberataques ya no son una preocupación solo para empresas y gobiernos; cada individuo conectado a Internet es susceptible. La ciberseguridad es responsabilidad de todos (Manage Engine, 2021).

Con la IA los equipos humanos reciben una visibilidad ampliada que es esencial para garantizar la seguridad en sus entornos digitales. En una industria que funciona las 24 horas del día, los 7 días de la semana, durante todo el año, solo la IA de autoaprendizaje es capaz de adaptarse a ese ritmo. La IA no duerme, no descansa y nunca se aleja del escritorio; es capaz de adaptarse y evolucionar a medida que los entornos digitales cambian y crecen. Fundamentalmente, la IA autónoma es capaz de detectar anomalías instantáneamente en redes complejas y ayudar a estos equipos neutralizando estas amenazas de forma autónoma.

Aeropuertos como El Dorado en Bogotá, Colombia han adoptado soluciones de inteligencia artificial para enfrentar los desafíos que presentan la ciberseguridad. Con más de 35 millones de pasajeros al año, El Dorado es el tercer aeropuerto más grande de América. Como una organización con visión de futuro, este aeropuerto reconoció la necesidad de una ciberseguridad de vanguardia para proteger a sus pasajeros y su tecnología, ya que cualquier brecha en el entorno aeroespacial podría ser desastrosa.

Al implementar la tecnología de inteligencia artificial, el equipo no solo puede detectar y responder de manera autónoma a las amenazas, sino que también está automatizando el proceso de investigación, lo que permite más tiempo para concentrarse en las tareas estratégicas que importan.

En aeropuertos comerciales, aspectos como redes Wi-Fi gratuitas, facturación en línea, sistemas automatizados de facturación de equipaje, pasaportes electrónicos y controles fronterizos no tripulados, son innovaciones que han ayudado a mejorar la eficiencia, pero también son puertos de acceso para ciberdelincuentes que buscarán comprometer un solo dispositivo y luego moverse lateralmente a través de toda la red (Ávila, 2021).

Es evidente que todavía hay mucho que hacer para mejorar la ciberseguridad del entorno aeroespacial y que es algo que afecta a todos los sectores implicados, desde los fabricantes de aeronaves y de aviónica, a los operadores logísticos, pasando por los proveedores de servicios de control aéreo, o las empresas operadoras de las aeronaves, la implementación de una gestión correcta de la ciberseguridad, así como de tecnologías que fortalezcan y ayuden a lograr estos objetivos (Acero, 2020).

Metodología

En vista de la naturaleza de la investigación que es llevada a cabo, se ha optado por la utilización de un conjunto de la combinación de tres metodologías como estructura de trabajo. En primera instancia, se hará uso de una metodología de Systematic Literature Review (SLR) para la sección de trabajos relacionados previos (Kitchenham, 2009).

Esta búsqueda sistemática de la literatura permitió seleccionar las taxonomías y métodos de securitización adecuados y relevantes para el presente trabajo en desarrollo. Considerando criterios de clasificación como: la sensibilidad de los datos a tratar, el impacto de estos datos en las organizaciones o su uso y restricciones para el control de acceso, así como la clasificación de los datos a partir de la confidencialidad, integridad y disponibilidad que esta requiere.

El SLR tratado en este trabajo tiene la intención de responder a la siguiente pregunta de investigación:

QR1 - ¿Cuáles son los modelos de securitización propuestos para los modelos de evolución tecnológica dentro de la aeronáutica?

Responder a esta pregunta nos permitirá identificar los mecanismos adecuados para implementar y gestionar modelos de evolución tecnológica en áreas de la aeronáutica.

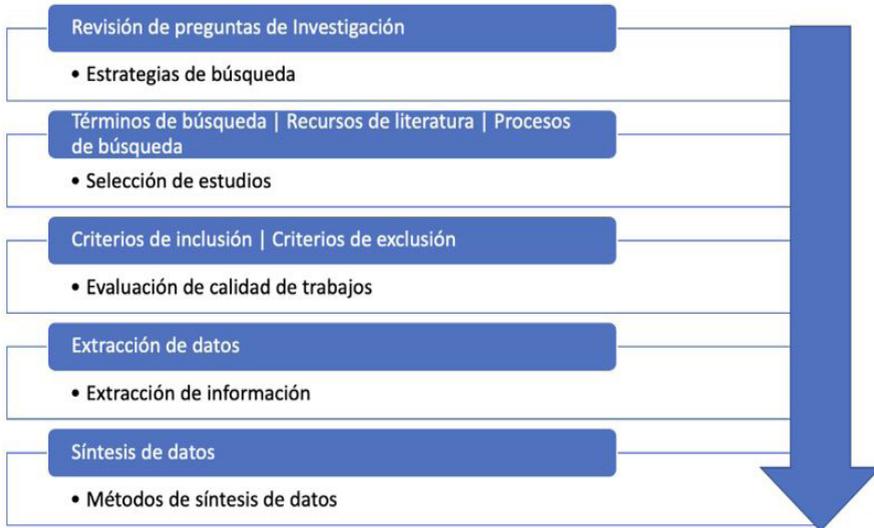
Metodología SLR

Aplicación de la metodología para realizar el proceso de investigación a través de la SLR recomendado por Kitchenham y Charters (Kitchenham, 2009).

En la Figura 1 este proceso comprende seis etapas (1) definición y revisión de las preguntas de investigación, (2) definición de la estrategia de búsqueda y realización de la búsqueda proceso, (3) selección de estudios a analizar, (4) evaluación de la calidad de los estudios seleccionados, (5) extracción de datos de los estudios y (6) síntesis de los resultados.

Figura 1

Protocol for conducting SLR in the software engineering domain.



Fuente: Kitchenham, 2009.

A continuación, se explica con más detalle estas etapas y cómo se llevaron a cabo en este trabajo.

Estrategia de búsqueda

El propósito de esta etapa es encontrar estudios que ayuden a responder las RQ identificadas, y comprende tres pasos:

1. La definición de los términos de búsqueda,
2. La definición de los recursos bibliográficos (es decir, las bibliotecas digitales que se utilizarán),
3. Llevar a cabo el proceso de búsqueda.

A continuación, se detallan estos pasos.

Términos de búsqueda

La definición de los términos de búsqueda involucró varias actividades con el fin de obtener las Query Strings o Cadena de Consulta (QS) utilizadas para recuperar los estudios que ayudan a responder las RQ.

Estas actividades son las siguientes:

1. Identificar los términos más relevantes considerados en las preguntas más frecuentes.
2. Identificar sinónimos o alternativas para estos términos.
3. Crear los términos de búsqueda que conectan los términos con operadores lógicos OR. Esto permite encontrar estudios que coinciden con ellos.
4. Redactar los términos de búsqueda con un operador y término de búsqueda.
5. Generalizar los términos de búsqueda, si es posible, utilizando una tarjeta salvaje.

Recursos de literatura

Se seleccionaron cuatro fuentes de literatura en función de su relevancia para esta SLR: INSUDE, INCIBE, OACI, entre otras. Las búsquedas consideraron solo las publicaciones reportadas en estas bibliotecas desde enero de 2009 hasta enero de 2021.

Proceso de búsqueda

Como primer paso se realizó una identificación manualmente por parte del investigador guía y el estudiante durante una etapa previa. Este proceso tiene la intención de identificar las palabras clave para el desarrollo de la investigación y considerando que no todos los motores

de búsqueda de las bibliotecas digitales admiten una cadena de consulta compleja con operadores lógicos y comodines que pudiera construir el conjunto de datos que luego se usó en el resto del proceso SLR.

Como segundo paso se automatizó la búsqueda con el uso de la QS en el conjunto de bibliotecas digitales consideradas. Este proceso de validación mostró que cada estudio preseleccionado fue encontrado y seleccionado de forma automática e identificó los artículos incluidos en los resultados de la búsqueda, lo que indica que la selección automática fue precisa.

Selección de estudios

La relevancia de cada estudio seleccionado fue calificada por el autor, este calificó todos los estudios y estos fueron evaluados por su relevancia donde se definió mediante criterios de inclusión y exclusión.

Los criterios de inclusión consideraron:

1. Paper que agrupan, clasifican o enumeran métodos que permitan tipos de amenazas existentes en entornos de la aeronáutica.
2. Paper que indican propiedades o características del tipo de securitización a brindar a los entornos de ciberseguridad en aeronáutica.
3. SLR previas en el mismo dominio de estudio.

Los criterios de exclusión consideraron:

1. Paper que tienen una antigüedad inferior al 2009.
2. Paper que están entre 2009 y 2021 y no tienen más de 5 citas.
3. Que la conferencia del paper donde fue publicado tenga un índice de impacto bajo.
4. Paper ya almacenados en el conjunto de datos inicial (es decir, artículos duplicados).

Cada artículo fue evaluado por el investigador y este indicó la relevancia del artículo utilizando los criterios de inclusión y exclusión después de leer su título, resumen y palabras clave. En muy pocos casos, fue

necesario revisar rápidamente un estudio para determinar su relevancia para esta SLR. La relevancia de cada artículo se indicó mediante tres valores: relevante, irrelevante e incierto. Relevante significa que el estudio satisface al menos uno de los criterios de inclusión y ninguno de los de exclusión. Irrelevante significa que el estudio satisface al menos un criterio de exclusión. La relevancia de un estudio es incierta en cualquier otro caso.

Extracción de datos

Una vez obtenida la lista final de trabajos que se utilizarán para responder a las RQs, llenamos un formulario de extracción de datos (Kitchenham, 2009) que incluye para cada estudio: identificador del estudio, año de publicación, nombre (s) del autor, fuente, URL, título del artículo. El formulario ayuda a organizar e indexar la información, esta información fue recuperada y revisada por el autor.

Síntesis de datos

Luego de realizar la recuperación de información, dicha información fue agrupada y organizada para ayudar a responder las QRs planteadas originalmente. Para ello, se utilizó un enfoque de síntesis cuantitativa ya que permite representar los tipos de vulnerabilidades existentes y métodos de securización propuestos.

Resultados obtenidos

La búsqueda utilizada en la cadena de consulta (QS) en las cuatro fuentes de literatura recuperó 43 documentos (incluidos los artículos duplicados). Luego de retirar los artículos duplicados, obtuvimos 21 artículos que fueron analizados considerando los criterios de inclusión y exclusión. Estos criterios se aplicaron después de leer el título, el resumen y las palabras clave de cada artículo, y solo en unos pocos casos el artículo fue revisado en su totalidad. Como resultado de este paso, se identificó un conjunto de 11 estudios, que se redujo a 8 artículos luego de aplicar los criterios de evaluación de calidad por parte del investigador.

Conclusiones

Ante un panorama cada vez más tecnificado, donde muchos actores e intereses entran en juego. La amenaza cibernética es una realidad y representa un riesgo importante en el entorno aeronáutico.

Es necesario gestionar los modelos de seguridad en al área de forma proactiva y conseguir detectar intrusiones e implementar una adecuada defensa activa y en profundidad. Una adecuada concienciación y entrenamiento del personal implicado resulta fundamental.

Las medidas técnicas aportan seguridad, pero es necesario seguir una aproximación integral que cubra otras áreas de actuación.

Los análisis de riesgos se presentan como una herramienta básica de apoyo a la decisión permite saber que resguardos habría que aplicar, ya sean organizativas, procedimentales o técnicas. Es importante usar una metodología reconocida para evitar omisiones.

El factor humano es de suma importancia que el sector de la aviación civil y militar, se requiere aumentar el número de funcionarios calificados y conocedores tanto de la aviación como de la ciberseguridad. Esto puede hacerse aumentando la conciencia sobre la ciberseguridad, así como con educación, contratación e instrucción.

Deberían incluirse planes de estudio pertinentes a la ciberseguridad específicamente relacionada con la aeronáutica: Deberían buscarse formas innovadoras de fusionar e interconectar las profesiones tradicionales de tecnología de información y cibernética con las profesiones pertinentes de la aviación.

Referencias

- Acero, M. F. (2020). *El problema de la ciberseguridad aeroespacial*. Recuperado: 29 septiembre de 2021, desde: <https://www.conectaindustria.es/tecnologia/000952/el-problema-de-la-ciberseguridad-aeroespacial>.
- Ávila, E. (2021, mayo). *Ciberseguridad en la industria aérea, una conversación necesaria*. Revista T21. Diversificación del financiamiento, vol. 261.
- Febrillet Rodríguez, Fard, C. C. (2021). *Tecnología e infraestructura crítica para las operaciones de defensa aérea de la fuerza aérea de República Dominicana*. seguridad, ciencia y amp; Defensa, 5 (5), 22–31. Recuperado: 29 septiembre de 2021, desde: <https://revista.insude.mil.do/index.php/rscd/article/view/58>.
- Hard2bit (Actualizada: febrero de 2019). *Cómo ha evolucionado la ciberseguridad en los últimos 25 años y cómo ha sido la evolución de seguridad en las empresas [blog]*. Recuperado: 29 septiembre, desde: <https://hard2bit.com/blog/como-ha-evolucionado-la-ciberseguridad-en-los-ultimos-25-anos-y-como-ha-sido-la-evolucion-de-seguridad-en-las-empresas/>.
- Instituto Nacional de Ciberseguridad (INCIBE) (actualizada: 11 de marzo 2015). *La seguridad vista desde sus inicios*. Recuperado: 29 septiembre de 2021. <https://www.incibe.es/protege-tu-empresa/blog/seguridad-desde-inicio>.
- Kitchenham, B. Pearl Brereton, O. Budgen, D. Turner, M. Bailey, J. and Linkman, S. (2009). *Systematic literature reviews in software engineering-A systematic literature review*. *Information and Software Technology*, 51(1), 7-15.
- Manage Engine Log 360. *Evolución de la ciberseguridad: una breve cronología [blog]*. (Actualizada: abril de 2021). Recuperado: 28 septiembre de 2021, desde: <https://www.manageengine.com/latam/log-management/infografia-evolucion-ciberseguridad.html>.
- Médico Plus (actualizada: 26 de noviembre 2020). *Las 6 edades de la historia de la humanidad*. Recuperado: 01 octubre de 2021, desde: <https://medicoplus.com/ciencia/edades-historia-humanidad>.

- Morán Espinosa, A. (2019, oct.) Ciberseguridad: Aprendizaje disruptivo en la protección de infraestructuras críticas y la Seguridad Nacional. *Ciberseguridad, ciberdefensa “las amenazas en el ciberespacio”*, vol. 5 (5), 73-85.
- National Geographic (actualizada: 05 de febrero 2020). *7 fechas claves en internet: de lo analógico a lo digital*. recuperado: 01 octubre de 2021, desde: https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/7-fechas-claves-internet-analogico-a-digital_13994.
- Núñez, A. (2018). *De un mundo análogo a uno digital: una revolución que no para* [blog]. Recuperado: 01 octubre de 2021), desde: <https://blog.andresnunez.com/de-un-mundo-analogo-a-uno-digital-una-revolucion-que-no-para/>.
- Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). (2019). *Estrategia de ciberseguridad de la aviación*. Canadá: OACI.
- Peirano, M. (2019). *El enemigo conoce el sistema: manipulación de ideas, personas e influencias después de la economía de la atención*. (1ra. ed.). España: debate.
- Pérez Benítez , J. I. (2019, oct.) Ciberseguridad: aprendizaje disruptivo en la protección de infraestructuras críticas y la seguridad nacional. *Ciberdefensa aeroespacial*, vol. 5 (5), 86-94.
- Val Román, J. (2016). *Industria 4.0: la transformación digital de la industria*. Valencia, España: Conferencia de Directores y Decanos de Ingeniería Informática - CODDII. <http://coddii.org/wp-content/uploads/2016/10/Informe-CODDII-Industria-4.0.pdf>

Capítulo 5

El JWST y las nuevas generaciones de Telescopios Espaciales en el estudio de la esencia del Universo

Dra. Valentina Abril-Melgarejo¹
Space Telescope Science Institute (STScI), AURA
Correo: vabrilmelgarejo@stsci.edu
ORCID: 0000-0002-2764-6069

¹ PhD. en Astrofísica y Cosmología. Space Telescope Science Institute (STScI), AURA 3700 San Martin Drive Baltimore, MD 21218.

Resumen

Vivimos un momento histórico y coyuntural en la reactivación de la exploración espacial mediante grandes misiones para volver a poner los objetivos de la humanidad en el espacio exterior. Nuestro conocimiento y entendimiento del Universo han aumentado considerablemente gracias a los avances tecnológicos en esta área. Los telescopios espaciales son herramientas poderosas para observar el Universo a gran resolución que conllevan a descubrimientos sobre múltiples fenómenos, con la ventaja de que no están limitados por la turbulencia atmosférica y están directamente expuestos a la radiación de los cuerpos que se estudian. En el surgimiento de la nueva generación de Telescopios espaciales cuyos espejos primarios tienen un área colectora mayor y son más poderosos que los actuales, el James Webb Space Telescope (JWST) es pionero y desde su concepción, fabricación, lanzamiento y puesta en servicio ha representado un desafío sin precedentes para la comunidad científica, dada su alta complejidad técnica e instrumental. JWST opera en uno de los puntos de Lagrange (L2) de la órbita terrestre que se encuentra aproximadamente a cuatro distancias tierra-luna y su lanzamiento fue realizado con éxito el 25 de diciembre de 2021 desde el puerto espacial de la ESA en la Guayana Francesa. En este artículo se presenta un resumen detallado a nivel técnico y científico sobre el Observatorio JWST. Abordaré cronológicamente los pasos y desafíos para la consolidación del JWST por parte de NASA, ESA, CSA y las múltiples compañías involucradas en su implementación. También presentaré las grandes preguntas científicas que este instrumento ayudará a responder, que van desde el descubrimiento y estudio de nuevos mundos hasta el entendimiento de la evolución de galaxias y la solución al enigma de la materia y energía oscuras.

Palabras clave: Exploración espacial, Telescopios espaciales, Astrofísica, Óptica, Aeronáutica.

Abstract

We are living a historic moment in the reactivation of space exploration through major missions with the aim of addressing humanity's goals back into outer space. Our knowledge and understanding of the Universe have considerably increased thanks to the technological advances in this area. Space Telescopes are powerful tools to observe the Universe at high resolution leading to discoveries about multiple phenomena, with the advantage that they are not limited by atmospheric turbulence and are directly exposed to radiation from the studied objects. In the emergence of the new generation of space telescopes whose primary mirrors have a larger collecting area and are more powerful than the current ones, the James Webb Space Telescope (JWST) is a pioneer and since its conception, manufacture, launch and commissioning has represented an unprecedented challenge for the scientific community, given its high technical and instrumental complexity. JWST operates in one of the Lagrange points (L2) of the Earth's orbit which is approximately four Earth-Moon distances away and was successfully launched on 25th December 2021 from the ESA Space port in French Guayana. Along this article I present a detailed technical and scientific Review about the space Observatory JWST. I chronologically address the steps and challenges to the buildup of the JWST by NASA, ESA, CSA and the multiple companies involved in its implementation. I will also present the big science questions that this instrument will help answer, ranging from the discovery and study of new worlds to the understanding of galaxy evolution and the solution to the enigma of dark matter and dark energy.

Keywords: Space Exploration, Space Telescopes, Astrophysics, Optics, Aeronautics.

Introducción

La curiosidad por los fenómenos que ocurren en el Universo ha acompañado al hombre a través de su historia en la búsqueda constante por conocer su origen y su relación con la Naturaleza que lo rodea. La astronomía fue un motor de desarrollo importante en la antigüedad, pues en la regularidad de los movimientos de la Luna, el sol y los planetas se instauró un modelo organizacional del tiempo que hoy conocemos como calendario, que permitió conocer los tiempos propicios para la implementación de la agricultura que ha sido una actividad fundamental para la supervivencia de nuestra especie (Robert, 2015; Broda, 1985).

Múltiples fenómenos que se observan a simple vista en la bóveda celeste como eclipses y cometas orbitando en el sistema solar interior con colas de gas ionizado (plasma) y material superficial (hielo y polvo) que se sublima (Capria, 2002), causaban terror a pesar de su belleza, pues no se conocían los mecanismos por los que se producen. Astrónomos en el mundo antiguo registraron estos fenómenos y se dieron a la tarea de estudiarlos a pesar del temor que producían (Richard J., 1997). Dichos registros fueron útiles para conocer posteriormente la verdadera dinámica de nuestro planeta y su lugar en el Universo como un planeta más que orbita una estrella de masa media a la que llamamos Sol, lo que revolucionó la visión del hombre y abrió la puerta a grandes descubrimientos posteriores, pasando de un modelo geocéntrico (propuesto por Claudio Ptolomeo, en el *Almagesto* del siglo II d. C., Ptolomeo (1515)) a uno que ponía el centro del sistema en el Sol conocido como modelo Heliocéntrico (propuesto por primera vez por Giordano Bruno y Nicolás Copérnico en su obra *De Revolutiobus Orbium Coelestium* en 1543 (Copernicus, 1965)).

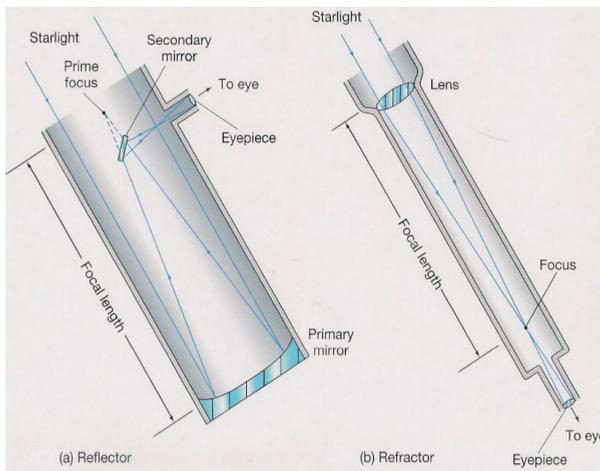
El próximo gran paso en la exploración del Universo lo daría Galileo Galilei en 1609 quien construyó un instrumento óptico usando un arreglo lentes convergentes y divergentes con la finalidad de magnificar imágenes de objetos lejanos (ver Figura 1), con un principio similar al empleado por los catalejos navales para observar naves que se acercaban, con la diferencia de que Galileo dirigió su mirada a la bóveda celeste. Este telescopio refractor le permitió a Galileo descubrir que los objetos celestes estaban lejos de ser solo esferas perfectas e inmutables, como se creía en aquella época, sino que tenían ciertas particularidades que no son observables a simple vista, como que la Luna tiene cráteres, que Saturno tenía una especie de “orejas” (anillos), que Júpiter tenía un sistema de satélites (Ío, Europa, Ganímedes y Calisto – sistema galileano)

y que Venus presentaba fases por estar en una órbita más cercana al Sol que la Tierra, esto entre muchos otros descubrimientos (Galilei, 1610). Este fue el surgimiento del Telescopio, un instrumento fundamental en la exploración astronómica que ha tenido una evolución fascinante en los últimos siglos.

60 años después de la invención del primer telescopio, fue Issac Newton quien desarrolló un telescopio reflector más potente y preciso usando espejos en vez de lentes (ver Figura 2), lo que da ventajas como que se reducen las aberraciones cromáticas, hay más opciones en el diseño del telescopio ya que la luz es fácilmente dirigida en diferentes direcciones usando un conjunto de espejos secundarios y además el poder de magnificación (aumento) es mayor que en el caso de los lentes. En 1668 Newton utilizó un espejo primario parabólico para recolectar la luz de objetos celestes lejanos, los rayos de luz convergen en el foco de la parábola del espejo y antes de converger se posiciona un espejo secundario plano cuya finalidad es dirigir el foco hacia un lado donde se posiciona un ocular y el observador puede ver la imagen magnificada del objeto en estudio.

Figura 1

Comparación entre las configuraciones ópticas de un Telescopio Reflector (a la izquierda) y uno refractor (a la derecha).



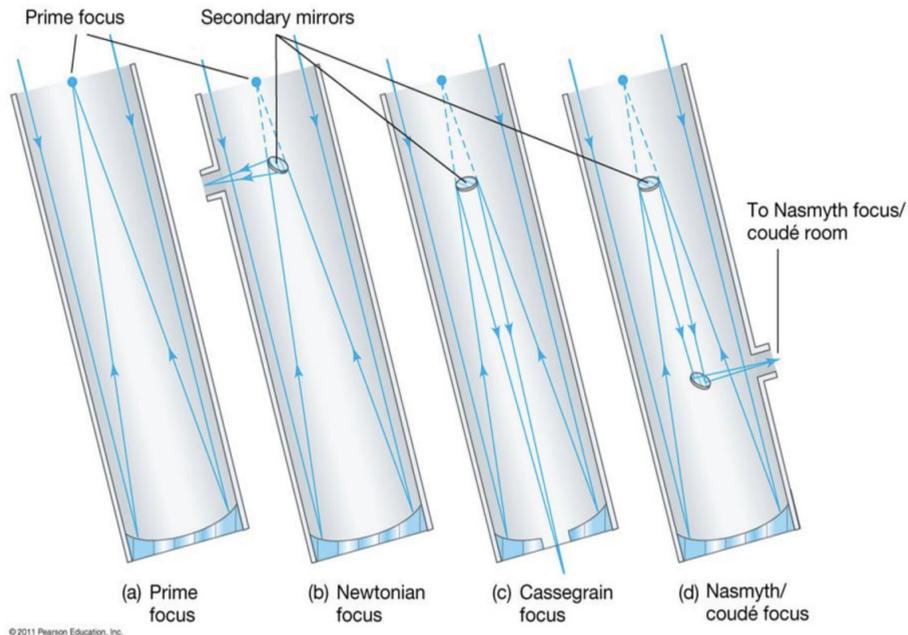
Fuente: Department of Physics and Astronomy, U. of Tennessee.

Desde este desarrollo los telescopios se han venido transformando con áreas colectoras más amplias y con combinaciones ópticas más complejas para corregir aberraciones y otros efectos. Hacia finales del siglo XVII se desarrolló el telescopio Cassegrain que se compone de un espejo primario cóncavo parabólico, un segundo espejo convexo con curvatura hiperbólica dirige los rayos de luz hacia el centro del espejo primario y alargando la distancia focal más allá del largo del Instrumento, como se muestra en la Figura 2 (Dhillon, 2010).

Figura 2

Tipos de telescopios reflectivos: a) Foco primario (sin uso de espejos secundarios), b) Newtoniano, c) Cassegrain, d) Coudé y/o Nasmyth.

Crédito: 2011 Pearson Education, Inc.



Fuente: Dhillon (2010).

Esto permite que el foco se genere fuera del telescopio lo que es propicio para la instalación y operación de instrumentos de medición de grandes dimensiones que se instalan en la parte inferior del Telescopio (ver Figura 2). Este tipo de telescopio fue desarrollado en 1672 y su diseño es atribuido a Laurent Cassegrain, un sacerdote y científico francés (Beckman, 2021). Este diseño de Telescopio se sigue usando en

la actualidad en varios observatorios alrededor del mundo como en el Telescopio de 2.1 m de diámetro de San Pedro Mártir en México¹.

Algunos instrumentos como espectrógrafos de alta resolución, o de campo integral, tienen estructuras ópticas complejas con la finalidad de lograr una alta sensibilidad, lo que se traduce físicamente en instrumentos muy pesados y de grandes dimensiones no pueden operar en la parte inferior del telescopio. La solución para operar estos instrumentos es montarlos sobre plataformas fuera del telescopio, donde la luz debe ser redirigida. Una de las variantes del Cassegrain es el telescopio coudé (ver Figura 2, Dhillon, 2010), utilizado en telescopios con montura ecuatorial, que en vez de dirigir la luz en dirección del espejo primario utiliza dos espejos auxiliares para dirigir los rayos de luz primero a lo largo del eje de declinación y luego a lo largo del eje polar hacia un lado del telescopio, lo que permite tener una plataforma lateral para albergar grandes instrumentos. Un ejemplo de este tipo de telescopio es el Telescopio de 1.93m del Observatorio de Haute Provence² en Francia que tiene dos focos, uno Cassegrain y otro coudé que se pueden utilizar dependiendo de los instrumentos en operación y las propuestas de observación programadas.

Para la generación de Telescopios actuales de 8 a 12m de diámetro que tienen montura alti-azimutal, como los 4 telescopios unitarios que se encuentran en el Very Large Telescope (VLT) en Chile, o los Telescopios gemelos del Observatorio Keck en Hawái, la opción de diseño es similar al coudé pero con una disposición óptica adaptada a los movimientos alti-azimutales del telescopio, conocida como Nasmyth (ver Figura 3, Dhillon, 2010). Este tipo de telescopio tiene varios espejos secundarios para dirigir la luz horizontalmente (paralelamente al eje de altitud) hacia plataformas laterales fijas que albergan instrumentos colosales como aquellos que operan en estos observatorios.

1 Para ver las especificaciones técnicas del Telescopio de 2.1m en la página del OAN San Pedro Mártir (<https://www.astrossp.unam.mx/es/usuarios/telescopios/tel2m>)

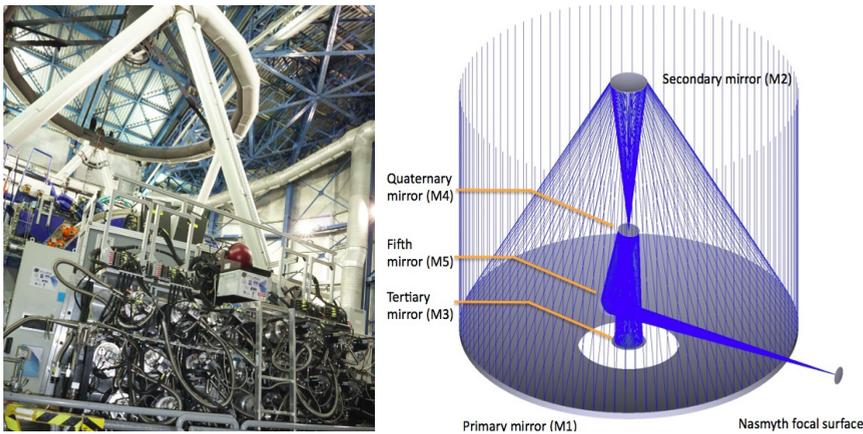
2 Para ver las especificaciones técnicas del Telescopio de 1.93m en la página del Observatoire de Haute-Provence (<http://www.obs-hp.fr/ohp.shtml>)

En la Figura 3 se presenta el instrumento MUSE, un espectrógrafo de campo integral operando en el foco Nashmyth de uno de los telescopios del VLT, que permite observar objetos en tres dimensiones, dos espaciales (declinación y ascensión recta) y una espectral (Abril-Melgarejo, 2016). Con esto se generan cubos de datos que han permitido estudiar en detalle sin precedentes galaxias muy lejanas y observar por separado sus componentes: estrellas, gas (en diferentes fases), polvo interestelar y materia oscura. Los datos de este instrumento son parte fundamental de mi trabajo de investigación en evolución de galaxias junto con datos de telescopios espaciales (Boselli et al., 2019, Abril-Melgarejo, et al., 2021). En cada uno de los Telescopios Unitarios del VLT hay dos plataformas Nashmyth a cada lado del telescopio y un foco Cassegrain, esto permite que tres instrumentos diferentes estén instalados en el telescopio todo el tiempo. Para operar los diferentes instrumentos uno de los espejos auxiliares se ubica en diferentes configuraciones (ángulos) para usar dirigir la luz al foco (instrumento) que he desea usar, esto hace este tipo de telescopios muy versátiles y multifuncionales.

Las futuras generaciones de Telescopios en tierra tendrán espejos primarios con diámetros de entre 20 a 40m y contarán con espejos primarios segmentados, con unidades hexagonales independientes que se calibran con una precisión micrométrica para obtener la curvatura apropiada como si se tratara de espejos monolíticos. Los arreglos hexagonales ofrecen una estructura muy estable y constituyen la configuración más eficiente para minimizar los espacios entre cada segmento para operar los cambios de curvatura necesarios para el funcionamiento de los telescopios.

Figura 3

Izquierda: el Telescopio Unitario 4 del Very Large Telescope (VLT), donde se observa en primer plano el instrumento MUSE sobre la plataforma Nashmyth del Telescopio. Detrás se ve la estructura que sostiene el espejo secundario por Abril-Melgarejo, 2018.



Nota. Derecha: Modelo de camino óptico de rayos de luz para el futuro ELT del European Southern Observatory (ESO) que tendrá un espejo primario de 39m. La luz es enviada a un foco lateral hacia una plataforma, misma configuración que para los actuales telescopios de 8 m del VLT. Fuente: ESO.

Estos telescopios que están previstos para iniciar operaciones a finales de esta década contarán con una configuración Nashmyth-Cassagrain operando varios instrumentos que tendrán dimensiones comparables a un telescopio entero de 8 m, por lo que serán muy poderosos para explorar muchas de las preguntas actuales en Astrofísica en sobre la evolución del Universo función del tiempo cósmico y a diferentes escalas (desde el sistema solar hasta las galaxias más lejanas).

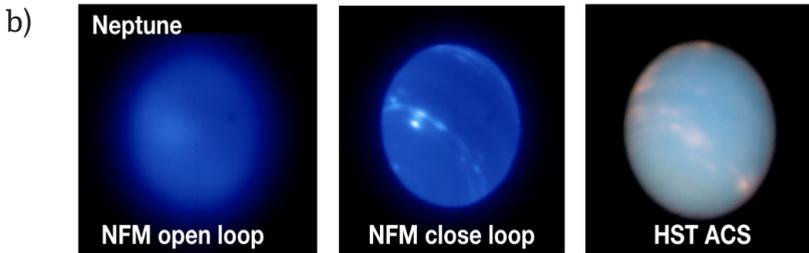
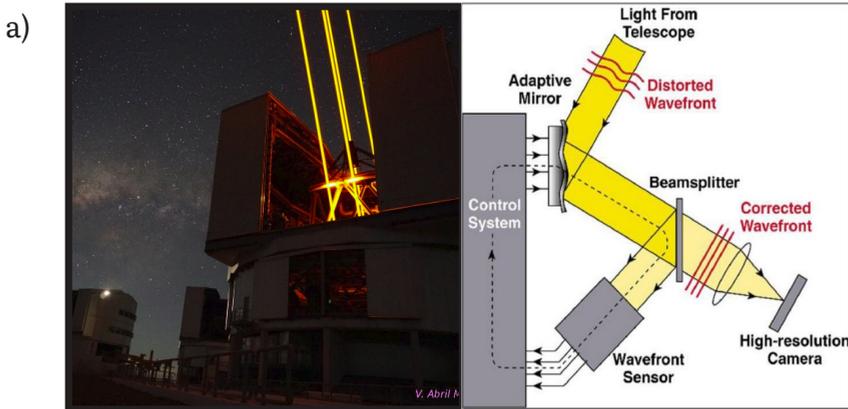
Ahora bien, el avance en cuanto a telescopios en tierra ha sido considerable llegando a tener telescopios del tamaño de estadios y que generarán datos con resoluciones muy altas (del orden de decenas de micro-arcosegundos), los telescopios espaciales, aunque mucho más pequeños siguen siendo fundamentales para la investigación astronómica logrando mejores resoluciones que sus contrapartes en Tierra y sin limitación de opacidad

especialmente en longitudes de onda cortas (rayos X, UV, visible e Infrarrojo). Esto sucede porque vivimos en el fondo de un océano de gas de decenas de kilómetros de espesor que es nuestra atmósfera, que tiene varias capas con diferentes temperaturas y densidades. La dinámica del gas en la atmósfera es muy compleja con movimientos caóticos que producen deformación de fuentes de luz provenientes del espacio por múltiples refracciones que cambian en fracciones de segundo (en promedio 100Hz), lo que se conoce como turbulencia atmosférica. Una forma de medir la turbulencia es mediante el seeing astronómico que es la medida en segundos de arco del diámetro de la imagen deformada de una fuente puntual lejana. El seeing varía durante periodos cortos de tiempo y se monitorea durante todo el tiempo de observación.

Una solución muy ingeniosa para el problema de la turbulencia es el sistema de Óptica Adaptativa que consiste en la medición de los frentes de onda deformados provenientes de una fuente puntual lejana (estrella o estrella falsa producida por láser de Sodio en la atmósfera) y la consecuente deformación de los espejos secundarios a una frecuencia de cientos de veces por segundo (~500 Hz), que compensa la deformación original de la imagen y tiene como resultado la producción de frentes de onda planos o casi planos como los que se observarían fuera de la atmósfera (ver Figura 4). Un ejemplo de esto puede se presenta en la parte inferior de la Figura 4 donde se ve una imagen del planeta Neptuno observada con el instrumento MUSE en el VLT. Sin corrección el planeta se ve borroso, y una vez aplicada la imagen obtenida es de muy alta resolución comparable con la resolución de la imagen del planeta con el Telescopio espacial Hubble (HST).

Figura 4

Esquina Superior Derecha: Foto desde la Plataforma del VLT en la cima del Cerro Paranal en Chile se observa el edificio y cúpula abierta del UT4. Sobresale la parte superior del telescopio y los rayos láser de sodio que se proyectan en el cielo para crear imágenes de estrellas falsas que hacen parte del sistema de óptica adaptativa para censar la turbulencia.



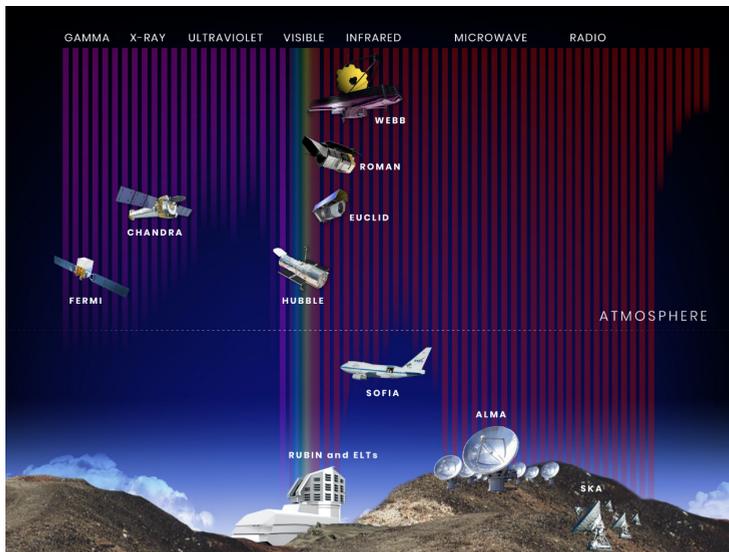
Nota. a) Esquema sobre el funcionamiento de censado de frentes de onda deformados por turbulencia y corregidos por medio de deformaciones sucesivas a espejos secundarios, por Abril-Melgarejo, 2018. Fuente: Livermore National Laboratory and NSF Center for Adaptive Optics.

b) Imagen de Neptuno observada con MUSE del VLT sin y con corrección por óptica adaptativa y comparada con la imagen del Hubble. Fuente: AIP/ P. Weillbacher.

Además de la turbulencia, la atmósfera terrestre es opaca a la mayoría de longitudes de onda del espectro electromagnético, teniendo algunas ventanas de transmisividad en el óptico (con longitudes de onda que van de 400nm del violeta hasta 700 nm del rojo) y en ondas de radio principalmente (ver Figura 5). El último efecto que deben enfrentar los astrónomos observacionales es el brillo del cielo, pues los átomos y moléculas en la atmósfera alta absorben luz que proviene del suelo, de las ciudades principalmente, y la reemiten en longitudes de onda precisas creando un patrón de líneas de emisión que interfieren con observaciones especialmente en el infrarrojo. Tanto la opacidad de la atmósfera que impide observar en gran parte del espectro electromagnético desde tierra como las deformaciones de imagen por turbulencia del gas y el brillo del cielo, hacen evidente la necesidad de poner telescopios en el espacio donde la luz llega directamente de los cuerpos celestes en estudio. Los telescopios espaciales además ofrecen la ventaja de tener imágenes con alta resolución con tamaños mucho menores a los de telescopios en Tierra y sin restricción de cobertura en el espectro electromagnético, lo que los hace indispensables para el entendimiento de diferentes fenómenos físicos presentes en el cosmos que no podemos ver en Tierra abriendo ventanas a nuevos descubrimientos.

Figura 5

Opacidad de la atmósfera Terrestre en función de la Longitud de onda.



Nota. Las barras verticales representan la proporción a la que la radiación en distintas longitudes de onda puede penetrar en la Atmósfera. La línea horizontal es una referencia hasta donde se encuentra la atmósfera. Para ilustrar se presentan varios Telescopios espaciales y en Tierra que observan en distintas longitudes de onda entre ellos Hubble, Webb, Chandra y ALMA. También se muestran algunos de los futuros Telescopios de nueva generación que operarán en Tierra como Rubin y el ELT y en el espacio como Euclid y Roman. Como se ve aquí los telescopios en Tierra están muy limitados debido a la opacidad atmosférica. Fuente. NASA, STScI.

2. Importancia de los Telescopios Espaciales y el resurgimiento de la Exploración Espacial

La carrera espacial que tuvo sus inicios después de la segunda guerra mundial con un máximo desarrollo en las décadas de los años 50 y 60 ha marcado un hito ya que nuestra especie ha puesto sus intereses en el conocimiento del espacio exterior. Los retos que implica poner cualquier cuerpo en órbita son grandes ya que para escapar del campo gravitacional de la tierra se requiere una velocidad mínima de 11 km/s, y para acelerar dicho cuerpo se requiere una cantidad ingente de energía. Así se desarrollaron varias generaciones de cohetes y transbordadores que empezaron a poblar varias órbitas con pequeños satélites. Gran parte de la tecnología diseñada y desarrollada para operar en el espacio ha tenido implicaciones importantes para nuestra vida en la tierra, solo para citar un ejemplo, gracias a sistemas satelitales y a la teoría de relatividad general hoy contamos con el sistema de posicionamiento global o GPS que nos ayuda a ubicarnos en tierra de manera muy precisa.

Se han enviado al espacio muchos instrumentos con diferentes propósitos científicos y de exploración que ya han llegado a los confines del sistema solar para explorar planetas enanos, como la nave New Horizons, y otros han salido del sistema solar como las naves Voyager que se encuentran ya explorando el medio interestelar en la vecindad solar. Un paso fundamental en el desarrollo espacial ha sido también el envío de seres vivos muy frágiles, como nosotros, que pueden sobrevivir solo si se generan condiciones especiales de presión y temperatura como las que existen dentro de la Estación espacial internacional. Este ha sido el mayor reto y logro de la exploración espacial teniendo como referente la llegada del hombre a la Luna dentro de la misión Apolo en 1969. Ahora el objetivo es volver a la Luna con una tripulación más equitativa e

incluyente con la misión Artemis y también llevar a nuestra especie a Marte y otros planetas en el transcurso de este siglo.

La exploración espacial también ha estado acompañada por observaciones de telescopios espaciales e instrumentos satelitales de medición que orbitan no solo alrededor de la Tierra sino de otros planetas de nuestro sistema solar y nos han permitido tener un panorama de alta resolución de las superficies de Mercurio, Venus, Marte y algunas Lunas de planetas exteriores, algunos de los cuales son candidatos para formar colonias humanas en el futuro. En cuanto al conocimiento de la estructura del Universo y la exploración de planetas que orbitan otras estrellas, los telescopios espaciales han tenido un papel fundamental permitiendo obtener datos muy profundos de objetos muy lejanos o muy tenues en varias longitudes de onda permitiendo explorar sus componentes y distintos fenómenos asociados a un mismo objeto.

Los telescopios en general son máquinas de tiempo pues en la configuración espacio-tiempo entre más lejanos los objetos observados más en el pasado los estamos observando pues la luz ha tomado un tiempo en recorrer la distancia entre el objeto y nosotros. Como ejemplo la distancia de la Tierra al sol es de 8 minutos luz, lo que significa que los fotones que nos llegan del sol salieron de su fotosfera hace 8 minutos, entonces observamos el estado del sol de hace 8 minutos. La Galaxia más cercana a la nuestra es Andrómeda que se encuentra a 2 millones de años luz por lo que todas sus características observadas se remontan a 2 millones de años atrás.

Desde 1990 que se lanzó Hubble, el primer telescopio espacial, diferentes organizaciones espaciales e instituciones alrededor del mundo han invertido en el diseño y construcción de telescopios espaciales y satélites de telemetría en diferentes longitudes de onda para realizar proyectos científicos en diferentes áreas. En la Tabla 1 se presenta un resumen de características físicas y de operación de diferentes telescopios espaciales que operan en distintas bandas del espectro electromagnético. En esta Tabla se pueden comparar los diferentes tiempos de operación, tipos de telescopios y masas de los diferentes observatorios espaciales³.

3 Algunos datos físicos del Observatorio espacial Webb y su comparación con características del Telescopio Hubble con material audiovisual se puede consultar en Webb vs. Hubble Telescope (<https://www.jwst.nasa.gov/content/about/comparisonWebbVsHubble.html#firstgalaxies>)

Tabla 1

Fechas de operación, y un resumen de características principales de siete de los principales telescopios espaciales lanzados desde 1990.

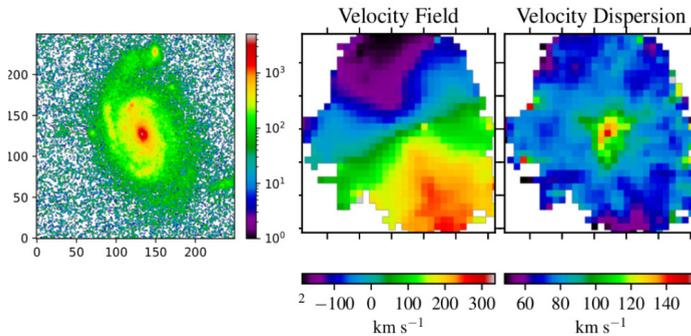
Telescopio	Agencia Espacial	Fecha de lanzamiento	Fin de Operación	Banda espectral	Lugar de Operación	Tipo de Telescopio	Masa (kg)
Hubble	NASA/ESA	Abril 24 1990	En Operación	UV, Visible y NIR	Órbita terrestre altura 600 kms	2.4 m Cassegrain Ritchey-Chretien	11000
Spitzer	NASA/JPL-Caltech	Agosto 25 2003	Enero 30 2020	MIR, FIR	Órbita Heliocéntrica a 1.0143 UA	0.85 m Cassegrain Ritchey-Chretien	950
Herschel	ESA	Mayo 14 2009	Junio 17 2013	FIR y submilimétrico	Punto de Lagrange L2	3.5 m Cassegrain	3400
Chandra	NASA	Julio 23 1999	En Operación	Rayos X	Semi-eje mayor 80800 km	1.2 m arreglo de 8 espejos	5900
XMM-Newton	ESA	Diciembre 10 1999	En Operación	Rayos X	Órbita geocéntrica Excéntrica 114000 / 20000 kms	3 Telescopios con 58 espejos cada uno	3800
WMAP	NASA	Junio 30 2001	Octubre 20 2010	Microondas	Punto de Lagrange L2	Arreglo de antenas	835
Planck	ESA	Mayo 14 2009	Octubre 23 2013	Microondas	Punto de Lagrange L2	Arreglo de receptores	1900

Nota. Las siglas para distintas bandas de la región infrarroja del espectro en la columna de Banda espectral corresponden a: NIR- Cercano infrarrojo, MIR- Mediano infrarrojo y FIR lejano infrarrojo. De igual manera, la sigla correspondiente a Ultravioleta es UV.

En el campo de la Astrofísica las grandes preguntas y debates sobre la naturaleza de diferentes fenómenos se hacen en grandes colaboraciones utilizando observaciones conjuntas de instrumentos montados en telescopios espaciales y en Tierra, pues ofrecen visiones complementarias para resolver problemas abriendo paso a nuevo conocimiento y a una serie de nuevas preguntas derivadas de la aplicación del método científico. En la Figura 6 presentó un ejemplo de los resultados del estudio conjunto de datos espaciales y de instrumentos en Tierra como en el caso de la dinámica de galaxias que nos da información no solo de la estructura de la materia que vemos (estrellas, gas y polvo), sino también de los halos de materia oscura que contienen las galaxias, cuyo impacto gravitacional podemos medir con las curvas de rotación del gas y las estrellas.

Figura 6

Observaciones de una galaxia lejana ($z \sim 0.7$) utilizando HST (Izquierda) y MUSE VLT (centro y derecha).



Nota. Los datos de alta resolución de HST permiten modelar la morfología en detalle de la galaxia trazando la distribución de sus poblaciones estelares, mientras que los datos tomados en tierra, aunque de menor resolución tienen la información espectral que permite obtener la dinámica de la galaxia obteniendo los mapas de velocidad de rotación y velocidad de dispersión del gas ionizado a lo largo del disco de la galaxia. Fuente: V. Abril-Melgarejo.

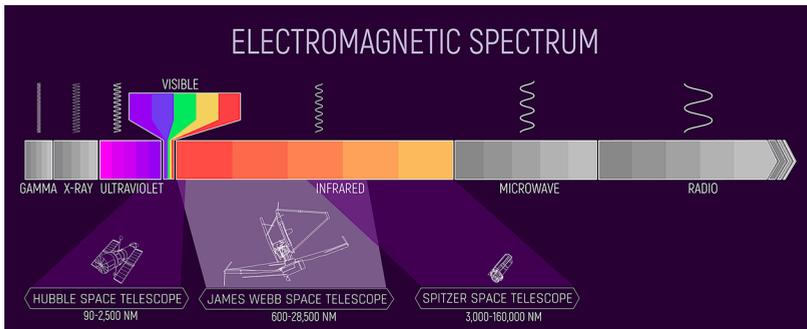
La exploración espacial tuvo una disminución de actividad en cuanto al retorno a la Luna y a llevar al hombre a otros planetas, sin embargo, se ha tenido mucho éxito con múltiples misiones robóticas que han explorado todo el sistema solar y como se ve en la Tabla 1, los telescopios espaciales son parte fundamental de la exploración espacial. Las agencias espaciales se preparan para volver a enviar humanos al espacio en viajes interplanetarios, lo que ha supuesto un resurgimiento de la exploración espacial. Gracias a lo anterior estamos a puertas de presenciar uno de los eventos más importantes de este siglo que es la puesta en marcha y los primeros datos científicos del nuevo telescopio espacial James Webb (JWST) en el que han participado la NASA, la ESA, la CSA y otras instituciones contratistas en Estados Unidos y alrededor del mundo. Este colosal observatorio espacial ha tomado tres décadas de desarrollo superando múltiples dificultades y desafíos que han requerido de expertos en muchas áreas, ya que JWST es el primer telescopio de una nueva generación de telescopios espaciales que utilizan un escudo solar y un gran espejo segmentado.

2.1 Importancia de las observaciones en el Infrarrojo

De la Tabla 1 vemos que hay una variedad de telescopios espaciales que han operado en distintas partes del espectro electromagnético, y de todos ellos hay una parte importante del infrarrojo cercano y medio que no está siendo cubierto por los telescopios activos. JWST observará con sus cuatro instrumentos del cercano infrarrojo (0.6 mm) hasta el lejano infrarrojo (28.5 mm), lo que le dará la capacidad de estudiar desde planetas orbitando otras estrellas y sistemas planetarios en formación hasta galaxias muy antiguas en etapas muy tempranas de su evolución (ver Figura 7).

Figura 7

Rangos espectrales de operación de los telescopios espaciales Hubble (UV, visible y NIR), JWST (NIR y MIR) y Spitzer (FIR).



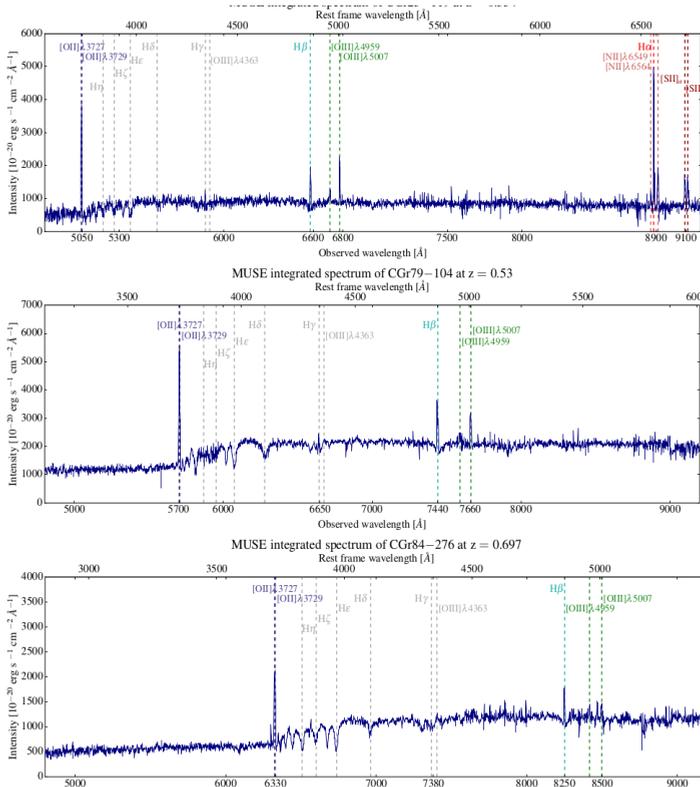
Nota. JWST tendrá un papel protagonista para explorar en alta resolución espacial y espectral distintos tipos de objetos astronómicos que no son observables en el UV o visible, como objetos con altas cantidades de polvo u objetos a alto corrimiento al rojo cuyas características espectrales más fuertes residen en el infrarrojo cercano y medio. Fuente: NASA y J. Olmsted [STScI].

Las observaciones en el infrarrojo son muy importantes por dos razones fundamentales, una tiene que ver con que esta radiación puede atravesar nubes densas de gas y polvo, donde los fotones ionizantes provenientes de estrellas jóvenes masivas (en UV y azul) son dispersados o absorbidos por el polvo y reemitidos en el infrarrojo por lo que se puede trazar la distribución espacial de esta componente. La segunda razón para

observar en el infrarrojo es que las fuentes de luz que se alejan son observadas en longitudes de onda más largas, en lo que se conoce como corrimiento al rojo. Para ilustrar este efecto en la Figura 8 presento datos del instrumento MUSE para tres galaxias a distintos corrimientos al rojo (z) que son un indicador de distancia en el Universo, pues a mayor z más lejanas son las galaxias. Las tres galaxias tienen características espectrales propias de galaxias que forman estrellas activamente con varias líneas de emisión. A medida que z aumenta las líneas espectrales se corren hacia el rojo (a la derecha del espectro) y algunas líneas van saliendo del rango de detección. Para las primeras galaxias que son también las más lejanas las características espectrales más fuertes que en el marco de referencia de las galaxias se originan en el UV o en el visible se observan en el infrarrojo. Entonces JWST será capaz de obtener las características fotométricas y espectrales de galaxias muy lejanas (con $z > 6$).

Figura 8

Efecto de corrimiento al rojo para tres galaxias a diferentes distancias (diferentes z).



Nota. Entre más lejanas las galaxias las características espectrales estarán corridas hacia longitudes de onda más largas (hacia la derecha en las figuras). El rango espectral que se muestra aquí corresponde a la ventana de detección del instrumento MUSE-VLT. Algunas de las líneas que aparecen en la primera galaxia (indicadas con líneas rojas) desaparecen para las galaxias que están más lejanas. Por ello es importante tener datos espectrales en el infrarrojo para cubrir estas características espectrales. Fuente: [Tesis Doctoral V. Abril-Melgarejo](#) (Abril-Melgarejo, 2020).

En la Figura 9 se muestra una imagen de Hubble en el visible de los pilares de la creación que son nebulosas de gas y polvo de nuestra galaxia, donde se están formando nuevas estrellas. En esta imagen se ven filamentos oscuros correspondientes a la distribución de polvo que absorbe la luz visible en ondas cortas opacando la mayoría de las estrellas dentro de la nebulosa. A la izquierda en comparación se muestra una imagen del mismo campo también tomada por Hubble usando un filtro en el infrarrojo cercano. Lo que es evidente, es que en la imagen infrarroja se observan más estrellas que están al interior de la estructura, y la nebulosa de polvo se vuelve casi transparente.

Esta es solo una muestra del poder de las observaciones en el infrarrojo que complementan las observaciones en el rango visible.

Figura 9

Pilares de la creación en visible e infrarrojo, observados por el Telescopio Espacial Hubble con el instrumento Wide Field Camera (WFC3).



Fuente: NASA, ESA (STScI) and the Hubble Heritage Team.

Los telescopios infrarrojos captan la radiación térmica a bajas temperaturas provenientes de objetos muy lejanos o fríos como sistemas estelares en formación, estrellas de baja masa, entre otros, por lo que necesitan un sistema criogénico para disminuir su temperatura a niveles cercanos al cero absoluto ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$) y así evitar el ruido producido por la radiación térmica propia del instrumento o de objetos cercanos que pueden interferir con la observación. Los Telescopios infrarrojos generalmente operan en órbitas alejadas de nuestro planeta (ver Tabla 1), para evitar que la radiación térmica de este contamine las observaciones. Los telescopios como Spitzer y Herschel han adoptado dos tipos de órbitas que los ponen en puntos de operación alejados a nuestro planeta pero que siguen el movimiento de traslación del mismo para tenerlos siempre en un lugar de referencia fijo durante todo el año. Spitzer operaba en una órbita heliocéntrica casi del mismo tamaño de la terrestre, pero en otro punto de la órbita girando a una velocidad angular ligeramente menor, lo que lo mantenía girando detrás de nuestro planeta y aumentando año tras año la distancia relativa entre el ambos. Este tipo de órbita se cataloga en inglés como Earth-trailing que significa órbita de seguimiento de la Tierra. Otros telescopios como Kepler han usado también este tipo de órbitas.

En el caso del telescopio Herschel operó en el punto de Lagrange 2 del sistema Sol-Tierra. Los puntos de Lagrange corresponden a cinco posiciones en las que el potencial gravitacional del sistema tiene máximos y mínimos, son puntos de equilibrio estable en los que un tercer cuerpo con masa despreciable con respecto a los otros puede orbitar de manera sincronizada con el cuerpo más pequeño del sistema, en este caso la Tierra, por lo que parece estar estacionario con respecto a esta. En este lugar de la órbita operará también James Webb, por lo que la experiencia recolectada con Herschel es muy importante tanto para su viaje hasta esa posición como para la operación de este nuevo observatorio infrarrojo (ver Sección 6.1).

Además de una órbita en un lugar alejado de la Tierra también es muy importante proteger los telescopios infrarrojos de la radiación solar, por esta razón se han desarrollado escudos térmicos que aíslan el telescopio y sus instrumentos de la potente radiación térmica del sol. Desde Spitzer hasta James Webb los escudos solares han venido evolucionando y aumentando de tamaño según las necesidades y tamaño del Telescopio (Ver Sección 4). Estos escudos son parte fundamental para la refrigeración

de los telescopios junto con el sistema criogénico que normalmente utiliza gases líquidos como Helio o Nitrógeno para refrigerar al máximo los instrumentos.

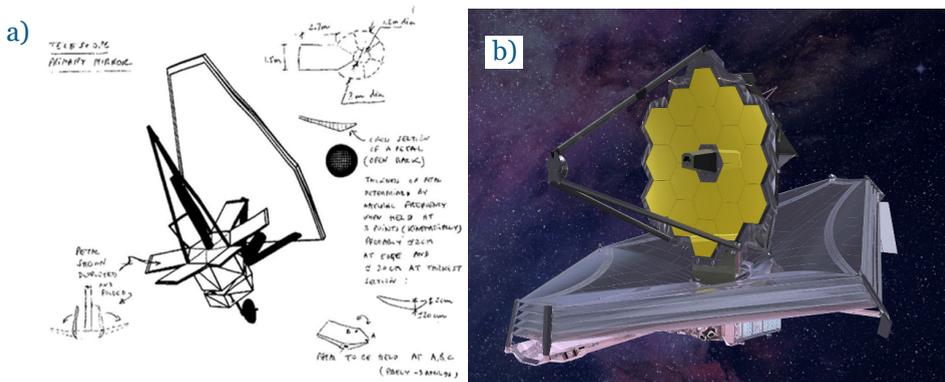
Las observaciones en el infrarrojo han abierto una ventana muy importante de la exploración en todos los campos de la astrofísica permitiendo ver lo invisible, penetrando en sistemas dominados por polvo en donde se forman estrellas y planetas y ampliando el límite del Universo profundo que podemos observar, pues JWST podrá observar las primeras etapas de las primeras galaxias del Universo que hoy no podemos detectar.

3. Resumen técnico del JWST, tres décadas de desarrollo

Figura 10

a) *Primer Boceto del Next Generation Space Telescope (NGST), dibujado en una servilleta por Pierre Bely y Peter Stockman que reposa en los archivos del Goddard Space Flight Center.*

b) *Composición artística del modelo final del JWST con casi 30 años de diferencia.*



Fuente: GSFC - NASA.

El JWST ha pasado por un largo proceso desde su concepción a principios de la década de los 90 hasta la fabricación y ensamblaje de cada una de sus partes. Ha supuesto grandes retos científicos, en ingeniería y de coordinación en una gran colaboración internacional. También ha tenido varios periodos con dificultades de presupuesto y técnicas que han venido retrasando considerablemente su fecha de

lanzamiento. A continuación, presento un resumen de la historia de JWST⁴ (Ilingworth, 2016).

Del 13 al 15 de septiembre de 1989 y cercano al lanzamiento de Hubble, se desarrolló en el Space Telescope Science Institute (STScI) en Baltimore, un workshop dedicado a las siguientes generaciones de telescopios espaciales en UV, visible e infrarrojo para recolectar las visiones de los científicos hacia la puesta en marcha de nuevos telescopios espaciales con espejos primarios de hasta 10m.

En la Figura 10 se puede apreciar el primer diseño de un nuevo concepto de telescopio espacial infrarrojo con un escudo solar cuyos espejos se despliegan en forma de flor y con una estructura que se extiende con soportes largos que alberga el espejo secundario. Detrás del telescopio hay una caja donde están ubicados los instrumentos. Este diseño fue hecho por Pierre Bel y Peter Stockman Astrónomos expertos en desarrollo de telescopios espaciales del Space Telescope Science Institute (STScI), en 1990. Sorprende que este primer bosquejo tenga características que se mantuvieron muy similares al diseño final del telescopio como la torre del telescopio, la caja de instrumentos y la estructura que sostiene el espejo secundario. En cuanto a la forma del espejo primario esta cambió radicalmente por una configuración más eficiente del área colectora y el escudo solar que se exhibe para este primer diseño no es simétrico por lo que la presión de radiación hace que este hipotético telescopio no sea estable y que gire de manera descontrolada al estar expuesto a la radiación solar. Este Telescopio fue llamado el Next Generation Space Telescope (NGST) y fue pensado para que tuviera un espejo primario inicial de 10m de diámetro.

En septiembre de 1993 se conforma un comité científico con el apoyo de NASA y AURA (Association for Research in Astronomy) para el estudio de conceptos para nuevos telescopios UVOIR (del ultravioleta al infrarrojo). El comité del “HST y más allá” publica un reporte en 1995 con la finalidad de considerar un sucesor de Hubble que tuviera un espejo primario mucho mayor y con una cobertura espectral más amplia. Hacia finales de 1996 el Goddard Space Flight Center (GSFC) y el STScI evalúan la factibilidad del proyecto obteniendo el apoyo de tres equipos aeroespaciales diferentes de auditoría. El 6 de agosto de 1998 se publica el reporte titulado “El Telescopio Espacial de Nueva Generación: Visitando la época en que las galaxias eran jóvenes”, que

4 Basada en información pública de archivo en línea: “History, Origins of JWST” del Space Telescope Science Institute (STScI). (<https://www.stsci.edu/jwst/about-jwst/history>)

sienta las bases para que NASA empiece a realizar las convocatorias a la industria según los objetivos científicos y especificaciones técnicas iniciales del telescopio. A inicios del nuevo milenio la industria se involucra con estudios de Fase A para estimar costos de fabricación de un diseño técnico preliminar considerando distintas componentes mecánicas, electrónicas y operacionales del nuevo telescopio. Con esta finalidad la NASA selecciona equipos en el GSFC, la Northrop Grumman (antigua TRW) y Ball Aerospace. A su vez los estudios de instrumentos dentro del observatorio involucraron a la agencia espacial europea (ESA) y a la agencia espacial canadiense (CSA) en lo que sería el inicio de la colaboración internacional hacia Julio de 1999.

En agosto de 2002 NASA cambia el nombre del NGST bautizándolo James Webb, quien fue administrador de NASA durante las misiones Apolo entre 1961 y 1968. NASA selecciona el diseño presentado por Ball Aerospace para continuar con estudios en Fase B que involucra más detalles de diseño estimando costos y evaluando el rendimiento del diseño elegido. En este punto el equipo encargado del diseño del primer instrumento, la Cámara de infrarrojo cercano (NIRCam) comienza a trabajar en el diseño.

En marzo de 2004 la construcción de JWST comienza con aquellas componentes que requieren un proceso a largo plazo como los segmentos hexagonales del espejo primario y los instrumentos científicos. En febrero de 2005 se definen los requerimientos de diseño según los objetivos científicos de la misión. Más tarde ese año NASA aprueba al Ariane 5 de la ESA como vehículo de lanzamiento del preciado JWST. En la segunda mitad de 2006 los equipos de los instrumentos NIRCam y MIRI (Instrumento de Mediano Infrarrojo), logran aprobar las evaluaciones de rendimiento en condiciones de vuelo para sus diseños finales.

Entre 2007 y 2008 la construcción del Telescopio comienza y se da luz verde a las Fases C y D que consisten en diseños detallados, pruebas de rendimiento y el ensamblaje de distintas componentes del observatorio. Las primeras pruebas de lanzamiento se realizan en 2008 al módulo ISIM (Integrated Science Instruments Module) que es la estructura que alberga los 4 instrumentos científicos a bordo del telescopio. Esta estructura llega al GSFC donde se reproducen las condiciones de vibración y cambios de temperatura extremos que el telescopio deberá soportar para salir del campo gravitacional terrestre. El funcionamiento de ISIM es fundamental ya que la estructura asegura una posición adecuada para los instrumentos y los protege de

las inclemencias del lanzamiento y de su largo viaje por el espacio hasta el lugar de operación.

En marzo de 2010 todas las partes del JWST aprueban las pruebas críticas de diseño que se traducen en que todas las partes cumplen con los requerimientos de operación de la misión, es decir que se garantiza que observatorio sobrevivirá a las condiciones de lanzamiento, viaje al punto L2 y operación. Una parte crítica es el escudo protector desplegable ya que es la primera vez que este tipo de escudo con múltiples capas se abrirá de manera autónoma en el espacio. A finales de 2011 todos los espejos finalizan su fabricación, pulido y adhesión de una fina capa de oro. Los espejos son a su vez sometidos a condiciones criogénicas en las que tendrán que operar en el espacio, obteniendo buenos resultados de estabilidad térmica.

En enero de 2012 son enviados los instrumentos MIRI y NIRISS desde la ESA y CSA respectivamente al GSFC. Allí se colectan también los segmentos del espejo primario y el espejo secundario enviados por Ball Aerospace y Northrop Grumman, junto con la estructura de soporte de los espejos. En 2013 llegan al GSFC el resto de los espejos y los instrumentos NIRCам y NIRSpec para continuar con el ensamblaje. En 2014 se realizan pruebas criogénicas y de despliegue y doblado del escudo solar. Este proceso se repite múltiples veces para asegurar esta fase delicada del proceso de despliegue del telescopio. Se comienza también con la fabricación de los giroscopios que darán estabilidad al observatorio, los tanques de combustible y los paneles solares que proveerán de energía al sistema de propulsión y a los instrumentos. También ISIM se somete a pruebas criogénicas para evaluar la eficiencia y rendimiento de los cuatro instrumentos científicos, con resultados positivos. En octubre de 2015 se termina el montaje del espejo primario con los 18 segmentos acoplados a la estructura de base, también se monta la estructura para el espejo secundario, y este se instala en su sitio. El Optical Telescope Element (OTE) se ensambla completamente a principios de 2016, este está conformado por el espejo primario, espejo secundario y espejos auxiliares que envían la luz hacia el módulo de instrumentos ISIM.

En diciembre de 2017 se realiza en el Johnson Space Center el test final de todo el observatorio ensamblado. En 2018 James Webb se envió al Space Park en California donde por tres años fue sometido a pruebas rigurosas para asegurar su operación óptima en las condiciones en las que operará en el espacio. A finales de 2020 y en plena pandemia

se lanzó la convocatoria para recibir propuestas de observación en el Ciclo 1 de operación, la respuesta de la comunidad fue bastante alta con una participación de 1200 propuestas provenientes de grupos de investigación en todo el mundo.

El 24 de septiembre de 2021 el Telescopio completo, en su configuración de lanzamiento es enviado por barco desde Redondo beach en California hasta Kourou en la Guayana Francesa para su lanzamiento. Este viaje de 9400 km tomó 16 días a bordo del MN colibrí⁵ en un contenedor fabricado especialmente para Webb con condiciones ambientales controladas y de aislamiento máximo para evitar contaminación del exterior. Durante su viaje el barco atravesó el canal de Panamá para pasar del Océano Pacífico al Caribe y finalmente llegar al lugar de lanzamiento en el Centro Espacial Guyanés.

El costo total estimado de Webb es de 10.000 millones de dólares, que ha sido mucho mayor a las primeras estimaciones, lo que sucede con todas las misiones espaciales. Como referencia el costo de construcción y lanzamiento de Hubble fue de 1500 millones de dólares, sin embargo, si se suman los costos de operación y las reparaciones hechas el monto total asciende a 11.300 millones de dólares. A lo largo del proceso anteriormente descrito, se han previsto varias fechas para el Lanzamiento de JWST: 2011, 2016, 2018, 2019 y 2021. Esto debido a cortes de presupuesto, problemas técnicos, más pruebas requeridas, entre otros. La ventaja que ofrecen estos retrasos es que se han podido aplicar muchas pruebas críticas que aseguran la robustez del observatorio. Una de las partes más desafiantes ha sido la construcción, despliegue y doblado del escudo solar. En el lugar de lanzamiento se realizaron las últimas pruebas de acople con el lanzador Ariane 5 y finalmente el 25 de diciembre de 2021, se dieron todas las condiciones para el inicio del viaje cósmico de JWST (Sección 5).

El lanzamiento de JWST fue un evento histórico en el que se concretaron todos los esfuerzos de un gran equipo internacional que durante 3 décadas había soñado con ver este magnífico Observatorio en acción⁶.

5 El telescopio espacial Webb de la NASA llega a la Guayana Francesa tras un viaje por mar. <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-s-webb-space-telescope-arrives-in-french-guiana-after-sea-voyage>.

6 Línea de tiempo resumida del desarrollo de JWST en Webb Project History NASA/ Webb. (<https://webbtelescope.org/webb-science/the-observatory/mission-timeline>)

4. Características físicas del Observatorio JWST para su uso científico

El JWST es un telescopio infrarrojo con un espejo primario de 6.5 m de diámetro (tres veces más grande que Hubble) y con una configuración Cassegrain que se compone de un espejo secundario, uno terciario y otro de movimientos finos que dirigen la luz a los diferentes instrumentos científicos con sus filtros, ubicados detrás del espejo primario. El espejo primario de JWST tiene un área colectora de 25 m² que es cinco veces más amplia que la de Hubble con 4.5 m², esto se traduce en mayor resolución espacial de las imágenes y la detección de objetos muy tenues, viendo más en el pasado del Universo. Webb es pionero en su diseño, es el primer telescopio despegable que se ha fabricado, y que además se ensamblará a sí mismo durante su viaje al lugar de operación, en una sincronía de procesos muy delicados que se darán en las condiciones hostiles del espacio, no en vano se le conoce como el Telescopio Origami. Estas características, que se probarán por primera vez, ya hacen parte del diseño de futuros telescopios de tamaños similares que usarán también escudos solares y tendrán un aspecto similar a Webb como el telescopio LUVOIR⁷.

El Observatorio tiene una masa total de 6200 kg, que corresponde a un poco más de la mitad de la masa de Hubble (11100 Kg), y consta de dos partes principales establecidas por efecto del escudo solar. Uno es el lado frío protegido por el escudo donde está ubicado el Optical Telescope Element, que es el encargado de la recolectar y detectar la radiación infrarroja que nos llega del espacio. La segunda parte corresponde al lado caliente que da la cara al sol contiene los paneles solares que proveen al observatorio de energía extra, el sistema de comunicación compuesto de antenas de alta ganancia que mantienen al Telescopio conectado con las salas de control en Tierra, apuntadores estelares para guiar la posición del telescopio según las observaciones a realizar y una aleta para equilibrar la presión de radiación manteniendo el centro de masa del telescopio estable. El lado frío solo por acción del escudo llega a tener temperaturas criogénicas de alrededor de 36K (-237 °C), mientras que el lado caliente alcanza los 383K (110 °C), lo que supone un gradiente de temperatura entre ambas partes de ~350 K (NASA GSFC - JWST Sunshield, 2021). Se proyecta que el tiempo de actividad del telescopio sea de 5 años según el combustible con que cuenta para

7 Página oficial del Observatorio NASA-LUVOIR (<https://www.luvoirtelescope.org/>)

las pequeñas correcciones de órbita que necesita periódicamente dependiendo de la eficiencia con la que se use el combustible. Gracias a la alta eficacia y precisión del lanzamiento y a las correcciones de trayectoria exitosas, el tiempo de misión se ha prolongado a 10 años o más. Parte del combustible también se usa para el sistema criogénico para refrigerar y mantener el observatorio a temperaturas hasta de 7 K (-266°C), temperatura necesaria para las observaciones a mediano y lejano infrarrojo con el instrumento MIRI.

Como se presentó en la Sección 3, las diferentes instituciones que han intervenido en el proceso de hacer el JWST una realidad han tenido roles definidos. En la Tabla 2 presento un resumen de las contribuciones que agencias espaciales, sector industrial e institutos científicos han tenido durante el proceso de concepción, construcción y ensamblaje de James Webb. Este ha sido sin duda uno de los proyectos colaborativos mundiales más importantes y ambiciosos del mundo que ha requerido de las mejores capacidades de científicos e ingenieros de todo el mundo y una sincronización sin precedentes para desarrollar este nuevo concepto de Telescopio Espacial.

Tabla 2

Resumen de las principales instituciones entre agencias espaciales, Institutos científicos e industria que han participado en la concepción, fabricación, lanzamiento, calibración y manejo de datos del JWST.

Papel dentro de JWST	Instituciones	Misión a cargo
Lider de la Misión	NASA Goddard Space Flight Center	Lidera los equipos y comités científicos. Responsable del ensamblaje final del Optical Telescope Element
Contratista	Ball Aerospace / Northrop Grumman	Fabricación de los espejos hexagonales del espejo primario, espejo secundario y estructura que los alberga.
Contratista	Northrop Grumman Aerospace Systems	Fabricación del escudo solar y pruebas de despliegue y doblado.
Coordinación de Operaciones	STScI	Calibración de los instrumentos científicos en el espacio, recepción, manejo y reducción de los datos.
Agencia internacional / colaborador	ESA	Provee Sitio de lanzamiento y lanzador Ariane 5. Construcción de instrumentos MIRI en colaboración con JPL y NIRSpec en solitario.
Agencia internacional / colaborador	CSA	Provee el instrumento NIRISS y el sensor que guía orbital de alta precisión Fine Guidance Sensor (FGS).
Operador de ensamblaje / contratista	Johnson Space Center 1 y 2 / Northrop Grumman 2	1. Ensamblaje de todo el observatorio: Optical Telescope Element + Escudo Solar. 2. Pruebas críticas finales de todo el observatorio en condiciones espaciales

Fuente: Elaboración propia.

En las siguientes subsecciones presento detalles y características de las diferentes componentes de JWST como son su espejo primario segmentado, escudo solar y los cuatro instrumentos científicos que componen la carga útil (payload) del telescopio⁸.

⁸ Para mayor información sobre las características generales de JWST y preguntas frecuentes consultar [FAQ NASA-Webb](#) y [ESA Science and exploration](#).

4.1 Componentes principales del Observatorio espacial

El JWST tiene tres Módulos principales: El Optical Telescope Element (OTE) que contiene toda la óptica (espejos de varios órdenes), El Spacecraft Element (SE) que contiene el escudo solar térmico y la caja de operaciones de la nave (spacecraft bus), y el Integrated Science Instrument Module (ISIM) que alberga los instrumentos científicos y de guía. El OTE y el ISIM están sostenidos por una estructura sólida en forma de maya conocida como Backplane (BP). A continuación, presento un resumen de cada módulo.

4.1.1 Módulo OTE: Elementos ópticos del Telescopio

Figura 11

Módulo OTE que contiene la estructura óptica del Observatorio con los espejos primario y secundarios.



Fuente: NASA/Chris Gunn.

El espejo primario, es un espejo segmentado compuesto de 18 segmentos hexagonales⁹, cada uno con dimensiones de 1.3 m de ancho. Los espejos están hechos de Berilio que es un material muy resistente y liviano

9 Para más información sobre los espejos del JWST consultar el sitio [NASA Webb STScI - Mirrors](https://www.nasa.gov/press/202201/20220101-jwst-mirrors).

siendo un material predilecto para este tipo de estructuras. La masa total de los espejos es de 705 kilogramos (NASA GSFC - JWST OTE, 2021).

El espejo primario tiene un color dorado pues está recubierto por una capa muy delgada de oro, ya que este material es altamente reflectivo en el infrarrojo. Una vez ensamblado el espejo primario, es un reflector parabólico que tiene un área total de 25 m² con una distancia focal de 131.4 m (NASA GSFC - JWST OTE, 2021). La resolución de imagen lograda con esta óptica es de 0.07 arcosegundos (arcs) y la resolución limitada por difracción a una longitud de onda de 2 mm es de 0.0317 arcoseg / pixel, comparable a la resolución de Hubble (instrumentos ACS y WFC3 con resolución de 0.03arcs/pixel), pero logrando imágenes más profundas lo que dará más detalles de los objetos observados¹⁰.

4.1.2 Módulo SE: Escudo Térmico y Caja de operaciones de la nave

A. El escudo solar, es una estructura en forma de cometa del tamaño de una cancha de tenis que provee al telescopio de sombra, protegiéndolo de la radiación infrarroja del Sol, la Tierra y la Luna. Para proveer refrigeración consta de 5 capas de aislamiento térmico desplegables con material altamente flexible y resistente llamado *Kapton* recubierto con una capa de aluminio por ambas caras y una capa extra de silicón dopado (que tiene un color rosado metálico) por la cara que da al sol para las primeras dos capas, ya que este material refleja eficientemente la radiación solar¹¹. Las capas de *Kapton* son extremadamente delgadas, la primera de 0.05 milímetros y las siguientes cuatro de 0.025 mm, así mismo, los recubrimientos de aluminio y silicón son de 100nm y 50 nm respectivamente (NASA GSFC - JWST Sunshield, 2021). Las capas cuentan con refuerzos y costuras especiales para resistir micro impactos de meteoritos y evitar que las capas se rasguen.

10 Con datos simulados de objetos muy lejanos, como galaxias muy brillantes se puede visualizar una comparación directa de la resolución esperada con Webb vs. la resolución de Hubble para los mismos objetos ([Simulated infrared images Webb vs Hubble](#)). Webb ofrece un poder resolutivo mucho más alto gracias a su área colectora mayor y sus instrumentos más sensibles.

11 Para profundizar sobre los recubrimientos del escudo solar consultar NASA GSFC [Sunshield membrane Coatings](#).

Figura 12

a) Esquema de corte transversal del escudo térmico.

b) Escudo solar totalmente plegado.



Nota. a) Ilustra cómo funciona el sistema de refrigeración de multicapas donde la radiación térmica después de varias reflexiones internas entre capas se dirige eficientemente hacia afuera produciendo un gradiente de temperatura considerable ($\sim 350\text{K}$). Fuente. STScI.

Entre capa y capa existe vacío y suceden reflexiones sucesivas que terminan dirigiendo la radiación térmica hacia los lados del escudo, fuera del observatorio, de manera segura. Este proceso se repite entre cada capa hasta que en la última la radiación térmica es mínima. Según modelos térmicos el gradiente de temperatura entre el lado caliente y frío que provee el escudo (de $\sim 350\text{K}$ alcanzando una temperatura mínima de 36K a -237°C) hace que el telescopio pueda operar los instrumentos en el cercano infrarrojo sin necesidad de usar el sistema criogénico, suponiendo un ahorro en combustible (NASA GSFC - JWST Sunshield, 2021). El *Kapton* es una película de poliamida altamente resistente a un rango muy amplio de temperaturas, su tolerancia mínima se encuentra en -269°C y la máxima en 400°C , además de que no cambia de estado o estructura ni se incinera en el límite de temperatura más alta (NASA GSFC - JWST Sunshield, 2021).

El escudo térmico fue fabricado y desplegado múltiples veces desde 2016 (cuando la última capa fue fabricada), en un cuarto limpio especial en la Northrop Grumman en California para asegurarse de tener un proceso perfecto tanto de despliegue como de doblado, ya que las capas del escudo son muy delgadas y el riesgo de desgarre es alto. El método de despliegue

y doblado se perfeccionó durante varios años y los test críticos han sido exitosos.

Este escudo provee un ambiente térmico estable para la operación de los instrumentos científicos y la alineación apropiada de los segmentos del espejo primario a medida que el telescopio cambia de orientación en su órbita con respecto al sol. Las dimensiones totales del escudo solar que tiene forma de cometa alargada son de 21.2 x 14.2 m, aunque cada capa tiene un tamaño definido siendo la primera capa más grande y plana, y la última la más pequeña y curvada. En la configuración final las capas son templadas y separadas verticalmente teniendo la menor separación hacia el centro del telescopio y la mayor en los extremos. Este escudo solar es un hito en diseño, ingeniería y ciencia de materiales, pues es bastante resistente, con una forma que maximiza la cobertura y a su vez es muy liviano, dando una protección eficaz al telescopio en condiciones térmicas extremas gracias a la combinación tan eficiente de materiales y al sistema de multicapas.

B. La Caja de Operaciones de la nave o spacecraft bus está ubicada en la parte inferior del escudo solar, es decir la cara que da al sol, y contiene diferentes subsistemas que proveen las funciones de operación de todo el Observatorio. Esta cavidad está protegida de la radiación solar por *Kapton* con recubrimiento compuesto de aluminio y silicón. En esta parte del telescopio se encuentran seis subsistemas que tienen diferentes funciones como: proveer energía eléctrica, control de altitud, comunicaciones con Tierra, manejo de datos, propulsión y control térmico (NASA GSFC - JWST Spacecraft bus, 2021):

- La energía para el funcionamiento de todas las componentes eléctricas del observatorio viene del arreglo de paneles solares (subsistema de energía eléctrica), convirtiendo la luz solar en flujo eléctrico con una potencia de 2000 watts. El subsistema de control de altitud mantiene el telescopio en una órbita estable, evaluando constantemente su orientación y apuntando a una posición inicial para las observaciones a objetos específicos. El centro de control de operaciones en Tierra entra en contacto con el observatorio mediante el subsistema de comunicaciones que contiene antenas de alta precisión, a las cuales envía comandos y tareas a realizar, a su vez el telescopio transmite los datos de su estado de operación y datos científicos de vuelta al centro de control. La tasa máxima de transferencia de datos (Deep Space Network) es de 28 megabits por segundo (Mbps). El subsistema

de manejo de datos se encarga de transmitir las órdenes del sistema de comunicaciones hacia las partes involucradas en los comandos recibidos, de igual forma, este subsistema contiene un dispositivo para almacenar los datos científicos y se encarga de la interacción entre los instrumentos científicos y el sistema de comunicación para enviar las observaciones recolectadas.

- El subsistema de propulsión está conformado por tanques de combustible y pequeños cohetes que se encargan de realizar correcciones de órbita cuando el subsistema de control de Altitud lo determina. El propelente utilizado por el subsistema de propulsión es hidrazina (N_2H_4) y el oxidante es tetraóxido de nitrógeno (N_2O_4) (Webb User Documentation STScI, 2017). Finalmente, el subsistema de control de temperatura mantiene una refrigeración constante en toda la caja de operaciones, mediante radiadores térmicos.

4.1.3 Módulo ISIM: Instrumentos Científicos a bordo del JWST

Figura 13

Módulo ISIM que contiene cuatro instrumentos científicos y uno de calibración, ensamblados en su estructura y con protección térmica.



Fuente: NASA / Chris Gunn.

El ISIM (Integrated Science Instrument Module) es el núcleo de detección del telescopio pues allí residen los cuatro instrumentos científicos y el instrumento de guiado de navegación, a bordo de JWST, con una masa total de 1400 kg que representa el 23 % del peso total del Observatorio (Kramer, 2002). El ISIM representa la carga útil (payload) del Observatorio, con una estructura robusta que está protegida térmicamente y cuenta radiadores térmicos para expulsar el exceso de calor propio del funcionamiento de los instrumentos al espacio ayudando a que se mantengan en refrigeración constante. Los instrumentos se ubican detrás del espejo primario recibiendo la luz recolectada por este, gracias a la configuración de espejos secundarios que se combinan para dirigir la luz hacia un instrumento en específico por cada observación.

El Módulo ISIM (NASA GSFC- JWST ISIM, 2021), también contiene algunos subsistemas adicionales y se divide en tres regiones. La región 1 corresponde al sistema criogénico que hace posible refrigerar los detectores a 39K y un conjunto de radiadores térmicos que cumplen dos funciones, la primera como protectores de la estructura y la segunda para refrigerar de manera pasiva los instrumentos. La región 2 es el compartimento de electrónica de los instrumentos que está en una cavidad con un ambiente de temperatura controlada. La última región corresponde a los subsistemas de vuelo integral, de manejo de datos y la electrónica de control de refrigeración para MIRI, ubicados en la caja de operaciones de la nave.

Los instrumentos son NIRCam, NIRSpec, NIRISS y MIRI, todos con características y capacidades específicas adaptados a diferentes objetivos científicos y cubriendo diferentes partes del espectro infrarrojo cercano y medio. Diferentes instituciones alrededor del mundo se encargaron de las distintas componentes para cada instrumento siendo todos muy complejos con distintas configuraciones de elementos en su interior. Los cuatro instrumentos contienen las capacidades de tomar imágenes y espectros, algunos de ellos además cuentan con coronógrafos. A continuación, presento un resumen para cada uno de los instrumentos¹²:

- **NIRCam (Near-Infrared Camera).** Fue fabricado por la Universidad de Arizona en asocio con NASA. Este instrumento tendrá la misión de realizar imágenes de campo amplio (2x2

12 Para más información sobre cada instrumento seguir los links indicados en la página [NASA Goddard Space Flight center \(GSFC\)- JWST ISIM.](#)

arcominutos²) en un rango espectral de 0.6 – 5 mm, con dos canales espectrales de 0.6 – 2.4 mm y 2.4 – 5 mm, permitiendo obtener datos del mismo campo en dos filtros distintos simultáneamente (Greenhouse et al., 2010) gracias a un componente óptico llamado beam splitter, que divide las trayectorias de los rayos de luz según su longitud de onda. La configuración de detectores es simétrica permitiendo obtener imágenes de alta resolución de 0.032"/pixel¹³ para longitudes de onda cortas y de 0.065"/pixel para longitudes de onda larga. Operará a ~40K con asistencia de los radiadores pasivos de ISIM y cuenta con coronógrafos para bloquear la luz de objetos muy brillantes. NIRCam permitirá hacer mapeos del cielo de gran extensión y a alta resolución espacial, lo que permitirá estudiar la formación de las primeras estrellas y galaxias, la evolución de estrellas jóvenes en nuestra galaxia, objetos del sistema solar exterior, entre muchos otros.

- **NIRSpec (Near-Infrared Spectrograph).** Fue producido por ESA en asocio con Airbus y Space Germany, con algunas componentes aportadas por el GSFC-NASA. Es un espectrógrafo que operará en el rango de 0.6 – 5.3 mm y tendrá dos modos de observación, uno multi-objetos (MOS) y otro de espectroscopia de campo integral o IFU. En modo MOS el instrumento cubre un campo de visión amplio de 9 arcominutos² que permite observar hasta 100 objetos simultáneamente usando una rejilla llena de compuertas muy pequeñas que se abren y se cierran según la configuración deseada conocida como micro-shutter array (MSA). En la configuración IFU se podrá producir un cubo de datos que obtendrá una imagen (de 3x3 arcossegundos²) en dos dimensiones de un objeto y de cada pixel tendrá el espectro correspondiente. NIRSpec es el primer espectrógrafo con capacidades MOS y IFU que se lanzará al espacio por lo que marca el comienzo de una nueva era para estas técnicas observaciones. Este instrumento permitirá observar la distribución química de galaxias distantes con alta formación estelar en el pasado del Universo, así como trazar su dinámica y también investigar sobre la composición atmosférica de exoplanetas.
- **NIRISS (Near-Infrared Slitless Spectrograph).** Fue desarrollado por la Agencia Espacial Canadiense (CSA), junto con el instrumento

13 Por nomenclatura las unidades de arco del sistema sexagesimal corresponden a: 1 arcominuto = 1' y un arcossegundo = 1". En este contexto un grado sexagesimal 1 = 60' o 3600". En Astronomía es común utilizar el sistema sexagesimal para designar las dimensiones de extensión de un campo de visión en el cielo. Como referencia el diámetro de la Luna llena es de medio grado o 29'.

Fine Guidance Sensor (FGS). Dentro de las capacidades de NIRISS está el de la toma de imágenes a alta resolución, interferometría de alto contraste y espectroscopía sin rendija (usando grismas: prismas + rejillas de difracción) dentro de un campo de visión de $2.2' \times 2.2'$ en un rango espectral de 0.6 – 5 mm. Esto permitirá obtener imágenes y espectros de baja y media resolución de muchos objetos en un mismo campo de visión. La dirección del eje espectral se puede variar para tomar distintas configuraciones y evitar que espectros de objetos cercanos se superpongan. El FGS tiene como misión apuntar el telescopio hacia los diferentes objetos blanco con una alta precisión, mediante una cámara de alta resolución de guía que da las coordenadas precisas al observatorio. El NIRISS contiene un coronógrafo y uno de sus objetivos es estudiar objetos muy brillantes y otros débiles que están en su cercanía, con esto se espera obtener detección directa de planetas en otros sistemas estelares.

- **MIRI (Mid-Infrared Instrument)**. Este instrumento fue fabricado por el Consorcio Europeo con la ESA y el JPL-NASA. MIRI cuenta con una cámara ultrasensible y un espectrógrafo que operarán en el mediano infrarrojo con una cobertura de 5 a 28 mm, lo que permitirá el estudio de poblaciones estelares en galaxias distantes, la estructura y dinámica de sistemas estelares y planetarios en formación, y diferentes objetos en nuestro sistema solar como cometas y cuerpos del cinturón de Kuiper. El espectrógrafo tiene 2 modos, uno a alta resolución ($l/Dl=100$ a 7.5 mm) con un rango de 5 a 12 mm usando rendija larga y uno a alta resolución ($l/Dl= [2070 - 3770]$) en un rango de 4.9 a 28.8 mm usando IFU con un campo de visión de $3.7' \times 7'^{14}$. La temperatura nominal de operación de MIRI es de 7 K lo que implica un proceso de criogenización muy eficiente en adición a la refrigeración que provee el escudo solar. Con su cámara compuesta de tres detectores de Silicio dopado con Arsénico (Si: As), MIRI tomará imágenes de campo amplio en varios filtros de banda ancha, lo que resultará en coloridos mosaicos con un alto nivel resolutivo. Su espectrógrafo de mediana resolución permitirá estudiar las características físicas de objetos distantes y muy tenues.

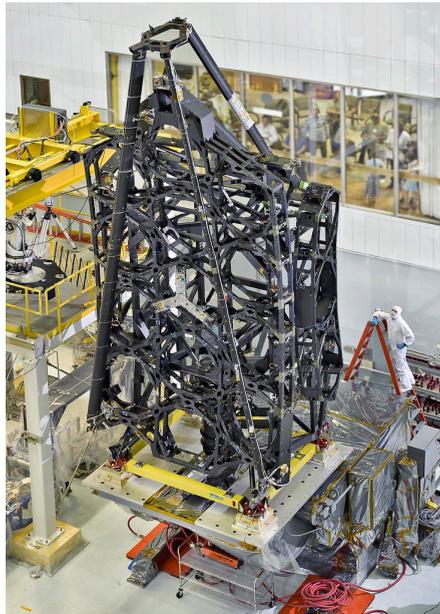
4.1.4 Backplane: El esqueleto del Telescopio

14 Para más información sobre MIRI consultar la página oficial de la U. de Arizona dedicada a este instrumento: <http://ircamera.as.arizona.edu/MIRI/instrument.htm>.

Con la finalidad de sostener los módulos OTE y ISIM que conjuntamente pesan 2400 kg, se desarrolló en la Northrop Grumman una estructura sólida en forma de maya (ver Figura 14) hecha con un material de granito especialmente modificado con adiciones de titanio e invar (aleación de Hierro y Niquel: FeNi36, con adiciones de manganeso y cromo), con la finalidad de minimizar dilataciones y contracciones térmicas a las bajas temperaturas de operación, además de garantizar una estabilidad casi absoluta (hasta 32 mm, NASA GSFC- JWST Backplane, 2021), necesaria para las observaciones de precisión que se planean realizar. Esta estructura está diseñada de forma que los extremos laterales del espejo primario y los soportes del espejo secundario se puedan doblar para el lanzamiento y desplegar en el espacio.

Figura 14

Estructura de soporte de alta estabilidad para la óptica e instrumentos del Telescopio. El material de esta estructura en forma de maya consiste de un tipo de grafito enriquecido de titanio e invar.



Fuente: NASA / Chris Gunn.

5. Lanzamiento y etapas de despliegue del Telescopio

Figura 15

- a) Lanzamiento del cohete Ariane 5 con el JWST a bordo.
b) Esquema de las secciones interiores del cohete Ariane 5.

a)



b)



Nota. a) Lanzamiento desde el Centro Espacial Guyanés de la Guayana Francesa. Fuente: GSFC NASA / Chris Gunn. b). El cohete Ariane 5, en su parte inferior está dedicada al almacenamiento de combustible y el mecanismo de ignición. En la parte superior el compartimento de carga útil donde fue transportado el JWST. Fuente: ESA / Ariane Space.

El Observatorio espacial fue lanzado exitosamente el 25 de diciembre de 2021 desde la Guayana Francesa, a bordo del Cohete Ariane 5 (ver Figura 15). Las instituciones encargadas fueron el Centro Espacial Guyanés en coordinación con la ESA, Ariane 5 y el Centro Nacional de Estudios Espaciales de Francia (CNES).

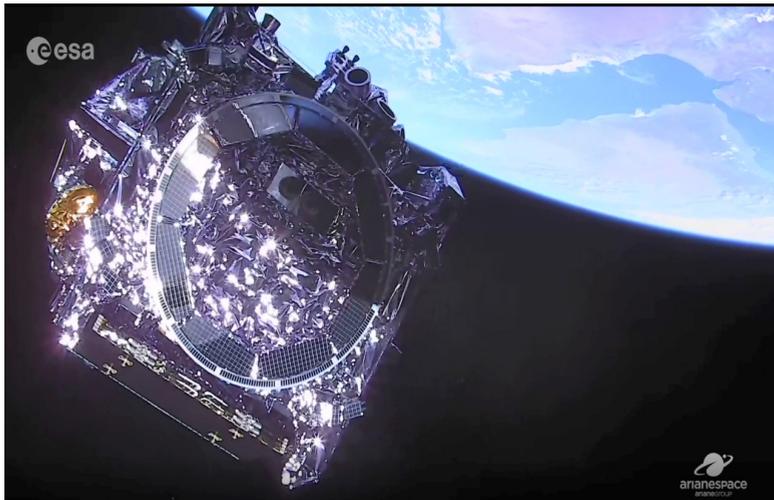
Ariane 5 es el vehículo espacial europeo y ha sido muy exitoso lanzando tanto misiones de agencias espaciales como satélites comerciales. En él han sido lanzadas misiones como Bepicolombo en 2004, el Telescopio

espacial Herschel en 2009 y Rosetta en 2018, este último llevado con éxito hasta el punto L2 donde operará JWST lo que marca un precedente de éxito. Ariane 5 ha tenido una evolución en su diseño y han operado varias versiones, la última con denominación ECA (Evolved Cryogenic, modul A) que opera desde 2018 fue el encargado de lanzar a James Webb.

El Ariane 5 se divide en dos partes, un núcleo inferior con dos propulsores laterales que utilizan propelente sólido y la parte superior que aloja la carga útil y tiene propulsores de propelente líquido (ver Figura 15). El cohete está hecho de un compuesto de fibra de carbono y polímero que ofrece aislamiento térmico, acústico y protección contra el estrés aerodinámico propios del lanzamiento. La cabina que contendrá a JWST tiene dimensiones de 5.4 m de diámetro y 17 m de altura (ESA Launch vehicles - Ariane 5, 2021).

Figura 16

Momento del desacople del JWST del último módulo de propulsión del Ariane 5, sobrevuelo sobre el planeta Tierra. Este es el inicio del viaje hacia L2 del JWST con su propio sistema de propulsión.



Fuente: ESA / Ariane Space.

La ventana de lanzamiento se abrió desde el 22 de diciembre de 2021 y el lanzamiento se efectuó finalmente el 25 de diciembre de 2021 a las

7:20 ET (tiempo de la costa este de Estados Unidos)¹⁵. A continuación, presento la secuencia de lanzamiento y despliegue del telescopio¹⁶.

- El cohete Ariane 5 empieza la ignición de los propulsores de combustible sólido. El cohete debe acelerar hasta mínimo 11 Km/s que es la velocidad de escape del campo gravitacional de la Tierra. Todo el cohete va a estar expuesto a muy altas temperaturas, vibraciones mecánicas y acústicas.
- Una vez que los cohetes de combustible sólido agotan el propelente son arrojados al océano atlántico.
- Cuando Ariane 5 sobrepasa la atmósfera se deshace de su protección contra el rozamiento del aire, que es la cabeza del cohete.
- Sigue acelerando hasta que se agota la sección de propelente líquido que es arrojado. El telescopio solo queda con la última sección del propulsor de Ariane 5 que lo llevará hasta 25 min después del lanzamiento. Este propulsor además puede imprimir unas oscilaciones controladas para distribuir luz y sombra uniformemente, ya que el telescopio en este punto tiene su escudo solar doblado por lo que tiene algunas partes expuestas. Cuando se acaba el propelente se expulsa la última sección de Ariane 5.
- 30 min de vuelo: Ya JWST queda a disposición de su propio propulsor y sistema de navegación en la caja de control de la nave (Figura 16). En este punto comienza lo que se denomina como los 10 días de pánico que es el tiempo de despliegue y armado del Telescopio. Se despliegan entonces los paneles solares para proveer de energía eléctrica al observatorio. El telescopio estará viajando inclinado con respecto al plano del sol y con el escudo solar doblado aportando sombra, lo que le dará protección durante las primeras etapas del viaje
- 23 horas: Se despliega la antena del sistema de comunicación.

15 Para ampliar información sobre cómo se desarrolló el lanzamiento del JWST consultar las notas de prensa de [NASA-GSFC](#) y [NASA-Webb](#) donde se encuentra material fotográfico y videos del lanzamiento.

16 Un seguimiento en vivo y con registro histórico sobre el viaje del JWST al lugar de operación, el proceso de comissioning de los instrumentos y la operación científica se pueden seguir en: <https://webb.nasa.gov/content/webbLaunch/whereIsWebb.html>.

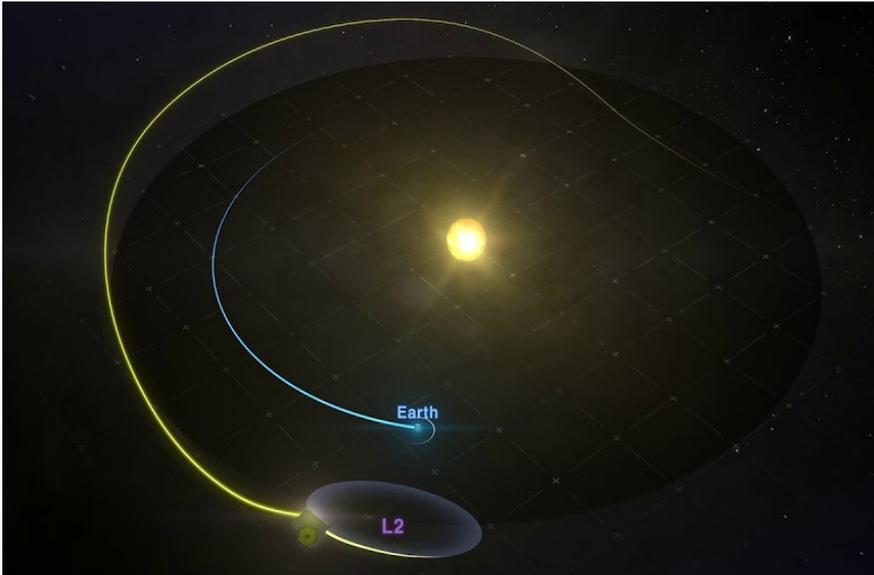


- 1 día: El telescopio pasa cerca de la Luna para obtener un empuje gravitacional
- 3 días: se despliegan las dos secciones principales del escudo solar que están protegidas con capas adicionales de Kapton con recubrimiento de silicon que se tienen que enrollar antes de que el escudo empiece a desplegarse.
- 4 días: La Torre del Telescopio que contiene los módulos OTE y ISIM se separa del escudo solar.
- 5 días: Se despliega un alerón de popa que sirve para equilibrar la presión de radiación del sol y mantener estable el centro de masa del telescopio.
- 6 días: Se completa el despliegue y templado del escudo solar con sus 5 capas.
- 11 días: La estructura del espejo secundario se desdobla poniéndolo en el foco del espejo primario. Se despliega el radiador del ISIM.
- 12 -14 días: Las secciones laterales del espejo primario se desdoblan para tomar su posición de operación y el espejo primario queda completo. En este punto el Telescopio está totalmente desplegado. El Observatorio sigue su viaje mientras desde el centro de Control en Tierra en el STScI y el GSFC de NASA se hacen pruebas de calibración.
- 29 días: El Telescopio llega al punto L2 que será su lugar de operación por la próxima década.

5.1 Lugar de operación L2

Figura 17

Ilustración artística de la órbita de JWST alrededor del punto L2 del sistema Tierra-Sol a medida que este último también se mueve alrededor del sol con la misma velocidad angular de la Tierra. Esta imagen fue tomada de un video desarrollado por GSFC de NASA para ilustrar la dinámica de JWST en el transcurso de un año.



Fuente: GSFC.

Después de un viaje de 29 días, el JWST llegó a su lugar de operación totalmente desplegado y desde allí ha seguido un proceso de calibración de aproximadamente seis meses por medio de comandos para probar que todos los sistemas e instrumentos alcancen las condiciones óptimas de operación. Como se mencionó en la Sección 2.1 los puntos de Lagrange son lugares en un sistema de tres cuerpos donde hay mínimos y máximos del potencial gravitacional por lo que objetos ubicados en esos puntos orbitan de manera sincronizada con la Tierra. JWST se encuentra en el punto de Lagrange 2, a 1.5 millones de kilómetros de distancia, lo que corresponde a aproximadamente 4 veces la distancia Tierra-Luna. La razón principal para operar el JWST allí es para alejarlo lo máximo posible de la radiación infrarroja del sol, la Tierra y la Luna que pueden

interferir con las observaciones, además de que esa ubicación ofrece una órbita estable y sincronizada con nuestro planeta.

El Telescopio James Webb no estará estático en el punto L2 sino que más bien estará orbitando alrededor del y se irá moviendo con él en el transcurso del año. Visto desde la Tierra a medianoche, la órbita de Webb completa un ciclo de 1 millón de kilómetros de diámetro dos veces por año marcando una espiral alargada (ver Figura 14).

A diferencia de su predecesor el telescopio espacial Hubble (HST) ubicado en una órbita terrestre de 600km de altura (ver Tabla 1), James Webb no podrá tener acceso a ser reparado ni a recibir mantenimiento, por lo que su puesta en servicio debe ser un proceso preciso y perfecto. Sin embargo, el largo tiempo en el que ha sido desarrollado este observatorio ha dado al equipo técnico una experiencia de 20 años con lo que el despliegue, viaje y proceso de calibración han sido totalmente exitosos hasta la primavera de 2022 y se espera la publicación de las primeras imágenes científicas a inicios del verano¹⁷.

6. Discusión: Preguntas científicas que abordará JWST

Los descubrimientos que nos aguardan con JWST son innumerables y los científicos trabajando en diversos problemas de la Astrofísica y Cosmología modernas estamos muy atentos a lo que develaran los datos de los diferentes instrumentos infrarrojos a bordo del Observatorio. El primer ciclo de observaciones empezará a ejecutarse aproximadamente seis meses después del lanzamiento cuando se complete del proceso de “commissioning” (puesta a punto) en el que se calibran todos los instrumentos y se hacen pruebas de todos los sistemas.

¹⁷ **Nota Importante:** El periodo de puesta a punto culminó el 12 de Julio de 2022 con la publicación de las primeras imágenes y espectros de JWST usando todos sus instrumentos, lo que ha demostrado su gran poder resolutivo con un campo profundo sobre el cúmulo de galaxias SMACS 0723, la nebulosa planetaria Southern Ring Nebula en la que se descubrió un sistema binario estelar en el centro con MIRI, la región de formación estelar de nuestra galaxia la nebulosa Carina, el grupo compacto de galaxias el Quinteto de Stephan y el espectro del exoplaneta donde se detectó la presencia de Vapor de agua. Toda la información sobre las imágenes y espectros públicos se puede encontrar en: <https://webbtelescope.org/news/first-images/gallery>.

Para el primer ciclo de observaciones¹⁸ se lanzó una convocatoria a finales de 2020 en el que se recibieron alrededor de 1000 propuestas de científicos de todo el mundo, entre ellas tres Astrofísicas colombianas son Principal Investigator (PI) o CoPI de propuestas a las que se ha otorgado tiempo de observación y serán de las primeras científicas en utilizar observaciones del JWST. Sofía Rojas PhD (c) del Instituto Max Planck de la Universidad de Heidelberg investigará las propiedades físicas de las primeras galaxias en la época de reionización del Universo, María Claudia Ramírez PhD. Investigadora Postdoctoral en la U. de Heidelberg por su parte estudiará la formación de estrellas masivas y sistemas planetarios relacionados¹⁹ y Andrea Guzmán PhD (c) de la Universidad de Berna, estudiará la composición de atmósferas en exoplanetas. Estas investigadoras además son miembros del colectivo CHIA²⁰ que propende por la equidad de género en el ejercicio de la Astrofísica en nuestro país, por lo que sus logros con JWST son un excelente precedente para nuestra comunidad científica.

Los tópicos de investigación actuales en los que JWST será fundamental se pueden organizar en cuatro grandes campos de los cuales se desglosan una serie de preguntas de las que aún no tenemos respuesta o tenemos una visión parcial. A continuación, presento una lista muy general de tópicos y preguntas bajo estudio correspondientes a cada categoría.²¹

18 Todas las propuestas de Observación aprobadas para el primer ciclo de JWST pueden ser consultadas en: <https://www.stsci.edu/jwst/science-execution/approved-programs/cycle-1-go>.

19 Nota de prensa del Periódico El Espectador titulada: [“Dos colombianas entre las científicas que analizarán las primeras observaciones del telescopio espacial James Webb”](#).

20 Colombianas Haciendo Investigación en AstroCiencias (CHIA) es un colectivo de Profesionales en Astrofísica y ciencias del espacio que propende por la equidad de género e inclusión en estas áreas en el país, además por el progreso profesional de sus miembros. Para más información artículo sobre Participación de colombianas en ciencias del espacio en Colombia. y página web del colectivo: <https://astrochias.com/>.

21 Esta lista no es exhaustiva, se pretende presentar algunas de las principales preguntas que están bajo estudio activo de la comunidad científica. Para más información consultar el resumen de los campos científicos en [Explore the Cosmos with Webb](#).

1. El Universo Lejano y distribución en la red cósmica de las galaxias:

- a. ¿Cómo ocurrió el proceso de reionización?
- b. ¿Cómo se formaron las primeras estrellas y Galaxias y cómo estas últimas ensamblaron sus masas?, ¿qué proceso ha dominado la adquisición de masa de las galaxias, acreción de gas de la red cósmica o las fusiones de galaxias?
- c. ¿Cuál es la evolución de estructuras densas de galaxias como grupos y cúmulos?
- d. ¿Cuál es la Naturaleza y el papel de la Materia y Energía Oscuras?, ¿se pueden comprobar observacionalmente otras teorías de gravitación o Campos?

2. Evolución de galaxias en el tiempo cósmico:

- a. ¿Cuál ha sido la evolución morfológica, estructural y dinámica de las galaxias a través del tiempo cósmico?
- b. ¿Cómo evolucionan las galaxias en distintos ambientes?
- c. ¿Cuál es la distribución de elementos químicos y moléculas a lo largo de sus estructuras?
- d. ¿Por qué mecanismos las galaxias han apagado su capacidad para formar estrellas?
- e. ¿Los agujeros negros supermasivos en los centros de las galaxias co-evolucionan con la galaxia huésped?

3. El ciclo de vida estelar

- a. ¿Cómo se forman y evolucionan las estrellas de distintas masas a partir de una nube de gas y polvo?, ¿Cuáles son los mecanismos de colapso?
- b. ¿Si la formación estelar se da en grupos de poblaciones estelares (de la misma nube molecular), cómo se separan dinámicamente de sus

grupos para conformar en su mayoría sistemas binarios o algunas estrellas aisladas como el sol?

- c. ¿Cómo sucede el proceso de enriquecimiento químico del medio interestelar para diferentes tipos de poblaciones estelares y a nivel galáctico?
- d. ¿Cómo se forman los sistemas planetarios y depende este proceso del tipo y masa de la estrella anfitriona?

4. Nuestro sistema solar y otros mundos orbitando otras estrellas:

- a. ¿Cómo son las atmósferas de planetas rocosos como la tierra que orbitan otras estrellas?
- b. ¿Hay vida en otros lugares de nuestro sistema solar o en otros sistemas estelares?
- c. ¿Cómo se formó nuestro sistema solar y qué pistas nos pueden dar los objetos en sus confines?
- d. ¿Cómo se dio la vida en nuestro planeta?
- e. ¿Es nuestro sistema solar un caso atípico de sistema planetario?

Contribuir a responder estas preguntas es el objetivo primordial al utilizar un Telescopio tan sofisticado como JWST que nos permitirá alcanzar nuevos límites dándonos imágenes y espectros a una resolución, sensibilidad y profundidad sin precedentes para investigar fenómenos que nos eran inalcanzables hasta ahora. Sin embargo, lo más impactante que nos aguarda será lo desconocido, descubrimientos que se salen de lo que pensamos o sabemos hasta ahora, o que nos dan respuestas que no esperábamos. Todo esto ya es una realidad que comenzó el 25 de diciembre de 2021 cuando JWST emprendió su viaje a las estrellas.

Referencias

- Abril-Melgarejo, V. (2016). Galaxias en 3D: Una visión panorámica del Universo. *Revista Hipótesis: Apuntes científicos Uniandinos*, No. 21, Facultad de Ciencias, Universidad de los Andes, Colombia, p. 72-82.
- Abril-Melgarejo, V. (2020). *Galaxy evolution in dense environments observed by the IFS MUSE, a kinematic approach*. Marseille, France: Doctoral dissertation, Aix-Marseille Université.
- Abril-Melgarejo, V., Epinat, B., Mercier, W., Contini, T., Boogaard, L. A., Brinchmann, J.,... Richard. (2021). The Tully-Fisher relation in dense groups at $z=0.7$ in the MAGIC survey. *Astronomy and Astrophysics*, 647, A152.
- Beckman, J. (2021). *Optical Astronomy. Multimessenger Astronomy*. Springer, Cham, p. 1-44.
- Boselli, A., Epinat, B., Contini, T., Abril-Melgarejo, V., Boogaard, L., Pointecouteau, E.,... Weilbacher, P. (2019). Evidence for ram-pressure stripping in a cluster of galaxies at $z=0.7$. *Astronomy and Astrophysics*, 631, A114.
- Broda, J. (1985). Astronomy, Cosmology, and Ideology in Pre-Hispanic Mesoamerica. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 385 (1), 81-110.
- Capria, M. (2002). Sublimation mechanisms of comet nuclei. *Cometary Science after Hale-Bopp*. Springer, Dordrecht, p. 161-177.
- Copernicus, N. (1965). *De revolutionibus orbium coelestium*. Bruselas: Norimbergae, Apud J. Petreium, 1543; [Bruxelles, Culture et Civilisation, 1966].
- Dhillon, V. (2010, 09 03). *Coudé and Nasmyth*. Retrieved from http://www.vikdhillon.staff.shef.ac.uk/teaching/phy217/telescopes/phy217_tel_coude.html.
- ESA Launch vehicles - Ariane 5. (2021, 11 28). *Ariane 5*. Retrieved from https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Launch_vehicles/Ariane_5.
- Galilei, G. (1610). *Sidereus nuncius*. Apud Thomam Baglionum. Retrieved from <https://doi.org/10.5479/sil.95438.39088015628597>.

- Greenhouse, M., Drury, M., Dunn, J., Glazer, S., Greville, E., Henegar, G.,... Voyton, M. (2010). Status of the James Webb Space Telescope integrated science instrument module system. *Space Telescopes and Instrumentation 2010: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*. SPIE., (Vol. 7731, pp. 73-94).
- Kramer, H. (2002). JWST (James Webb Space Telescope) Review article. Retrieved from eoPortal Directory Missions database: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/j/jwst>.
- llingworth, G. (2016). NGST: The Early Days of JWST. *STSci Newsletter*, 33 (01), 6-10.
- NASA GSFC - JWST OTE. (2021, 11 28). NASA GSFC. Retrieved from <https://webb.nasa.gov/content/observatory/ote/mirrors/index.html>.
- NASA GSFC - JWST Spacecraft bus. (2021, 11 28). Retrieved from SPACECRAFT BUS: <https://jwst.nasa.gov/content/observatory/bus.html>.
- NASA GSFC - JWST Sunshield. (2021, 11 28). *About the Sunshield*. Retrieved from NASA webpage: <https://webb.nasa.gov/content/observatory/sunshield.html>.
- NASA GSFC- JWST Backplane. (2021, 11 28). THE BACKPLANE. Retrieved from <https://webb.nasa.gov/content/observatory/ote/backplane.html>.
- NASA GSFC- JWST ISIM. (2021, 11 28). THE ISIM y INSTRUMENTS. Retrieved from <https://jwst.nasa.gov/content/observatory/instruments/index.html>.
- Ptolemeo, C. (1515). *Almagestum*. Venecia, Italia: Petrus Lichtenstein.
- Richard J., H. (1997). *Catastrophism: Asteroids, comets and other dynamic events in earth history*. Verso.
- Robert, H. (2015). The roles of observational astronomy in ancient Greece. *Scientific Culture*, 1 (2), 47-56.
- Webb User Documentation STSci. (2017, 05 17). *JWST Propulsion*. Retrieved from <https://jwst-docs.stsci.edu/jwst-observatory-hardware/jwst-spacecraft-bus/jwst-propulsion>.

III PARTE



**ENTORNOS ACADÉMICOS
Y TECNOLOGÍAS
EMERGENTES**

Capítulo 6

¿Son las tecnologías aditivas un impulsor de la competitividad? La importancia de las estrategias y la innovación en procesos

Dr. Ricardo Santa

*Colegio de Estudios Superiores de Administración
CESA*

Correo: ricardo.santa@cesa.edu.co

ORCID: 0000-0003-2584-2928

Dr. Thomas Tegethoff

*Colegio de Estudios Superiores de Administración
CESA*

Correo: thomas.tegethoff@cesa.edu.co

ORCID: 0000-0003-4007-0508

Dr. Diego Morante

*Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”
Fuerza Aérea Colombiana*

Correo: dmorante75@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6543-1694

Resumen

Objetivo: Las iniciativas de Industria 4.0 tienen como objetivo mejorar la productividad, y por consiguiente la ventaja competitiva. Las tecnologías aditivas son una innovación tecnológica de Industria 4.0 y tienen gran potencial en Colombia, pero no siempre generan los resultados esperados. El objetivo de este estudio es analizar como las tecnologías aditivas, estrategias, e innovación en proceso interactúa para generar resultados positivos, separado por el sector aeroespacial y la industria en general.

Diseño metodológico: Los resultados del estudio se obtuvieron mediante la utilización de modelos de ecuaciones estructurales con 945 cuestionarios usables de colaboradores de organizaciones colombianas, de los cuales 423 corresponden al sector aeroespacial.

Resultados: Los resultados iniciales indican que las tecnologías aditivas no tienen un impacto significativo directo en los resultados operacionales. Solamente a través de la interacción de las tecnologías aditivas con la innovación en proceso se consiguen impacto en la eficacia operacional.

Implicaciones prácticas: Para que las tecnologías aditivas puedan contribuir efectivamente a los resultados de la organización es necesario desarrollar estrategias que apoyen la innovación en las organizaciones. Especialmente la implementación de innovaciones en procesos requiere atención ya que pueden cambiar las estrategias organizacionales al ampliar el horizonte estratégico a través de la adquisición de nuevas competencias y capacidades.

Originalidad y valor: Los resultados de esta investigación muestran capacidades y estrategias actuales que las organizaciones en general y del sector aeroespacial deberían desarrollar para seguir siendo competitivas. Es posible que los resultados se pueden aplicar a otras organizaciones en países en vías de desarrollo.

Palabras claves: Efectividad operacional, estrategia, Industria 4.0, innovación en procesos, impresión 3D, tecnologías aditivas.

Abstract

Purpose: Industry 4.0 initiatives aim to improve productivity, and therefore competitive advantage. Additive technologies are a technological innovation of Industry 4.0 and have great potential in Colombia, but they do not always generate the expected results. The objective of this study is to analyze how additive technologies, strategies, and innovation in process interact to generate positive results, separated by the aerospace sector and the industry in general.

Methodological design: The results of the study were obtained through structural equation modeling with the use of 945 usable questionnaires from collaborators of Colombian organizations, of which 423 correspond to the aerospace sector.

Results: Initial results indicate that additive technologies do not have a direct significant impact on operational results, neither in organizations in general nor in organizations in the aerospace sector directly. Only through the interaction of additive technologies with process innovation is an impact on operational effectiveness achieved.

Practical implications: For additive technologies to be able to contribute effectively to the results of the organization, it is necessary to develop strategies that support innovation in organizations. Especially the implementation of process innovations requires attention since they can change organizational strategies by broadening the strategic horizon through the acquisition of new skills and capabilities.

Originality and value: The results of this research show current capabilities and strategies that organizations in general and the aerospace sector should develop to remain competitive. It is possible that the results can be applied to other organizations in developing countries.

Keywords: Operational effectiveness, Strategy, Industry 4.0, Process innovation, 3D printing, Additive technologies.

Introducción

La competitividad es el elemento clave en la supervivencia de la organización, generar beneficios y contribuir al desarrollo económico, social y político del Estado (Carmel, 2011; Qureshi, 2015). Consecuentemente, las organizaciones buscan mejorar su competitividad, ya sea por medios internos o con ayuda del gobierno. Una iniciativa del gobierno alemán tuvo especial impacto mundialmente. Primeramente, la iniciativa llamada Industria 4.0 (Industrie 4.0 en alemán) tenía como objetivo incrementar la competitividad de dos de los sectores más importantes de la industria alemana. En este sentido, el sector automotor contribuye con 188 millardos de euros (equivalentes al 15.6 % de las exportaciones) y el sector de maquinaria con 176 millardos de euros (14.6% de las exportaciones) a las exportaciones de Alemania (Oficina federal alemana de estadística – Destatis).

El concepto principal de Industria 4.0 se entiende como la digitalización de toda la cadena productiva, desde los proveedores hasta el cliente final, minimizando la intervención humana en toda la cadena de valor. En tales condiciones, el objetivo es combinar la producción con servicios de alta calidad y procesos inteligentes de monitoreo y toma de decisiones en un entorno de tiempo real. Esta producción autoorganizada integra personas, maquinas, sistemas, productos, logística a través de la comunicación directa entre ellos con el objetivo de hacer más eficiente toda la cadena de valor de la organización (Ahuett-Garza y Kurfess, 2018; Bartodziej, 2017; Müller y Däschle, 2018).

El concepto de Industria 4.0 comprende los siguientes componentes:

- Internet de las cosas a través de la cual se integran los sistemas, servicios y productos con el fin de establecer una comunicación eficiente, al instante y en forma adecuada.
- Computación en la nube o Cloud computing, que ofrece una gran capacidad de almacenamiento e incluye el acceso a la información en cualquier lugar.
- Robotización, con la consecuente interconexión de todos los procesos de producción.
- Big Data, o el manejo de inmensas cantidades de datos recogidos en la red y analizados adecuadamente y en forma automática.
- Modelamiento al instante a través del uso de datos al instante.

- Servicios de internet por demanda en el momento adecuado.
- Realidad aumentada a través de la inserción de elementos digital es en la realidad.
- Interfaces digitales - humanas.
- Fabricación descentralizada a través de tecnologías aditivas.
- Fábricas inteligentes basados en la integración digital.
- Blockchain como elemento de trazabilidad descentralizada.

En este sentido, la Industria 4.0 no contempla el uso de solo uno de los componentes sino enfatiza en la integración de varios componentes para aumentar la eficiencia de toda la cadena de valor en la oferta de un producto o servicio (Bartodziej, 2017; Carney, 1998; Haleem y Javaid, 2019; Kumar y Kumar, 2019).

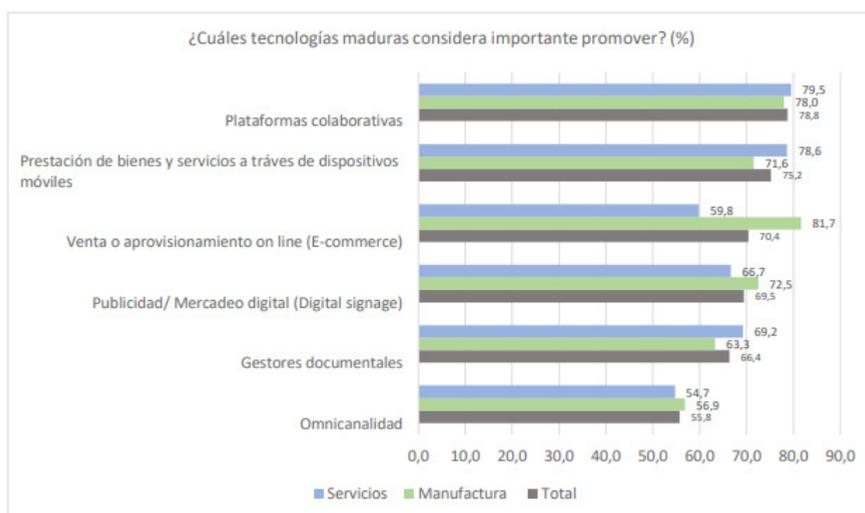
Pero los conceptos de Industria 4.0, que fueron inicialmente pensados para el sector manufacturero de Alemania traspasaron las fronteras de los sectores industriales y nacionales y hoy en el día encontramos estas mismas iniciativas tanto en diferentes países del mundo como en los diferentes sectores económicos, desde la construcción hasta telecomunicaciones o de comidas. Hoy en el día, algunos autores hablan de una cuarta revolución industrial, la revolución digital, mientras que otros autores de una revolución industrial 3.5, ya que se basa en el manejo de la información o la era de la información (Bartodziej, 2017). Independientemente como se quiera llamar, la Industria 4.0 tiene un impacto profundo en la forma de producir y de competir de todos los sectores productivos de una nación.

Colombia no es ajena a esta situación y las organizaciones colombianas son conscientes de que la Industria 4.0 los va a afectar de alguna manera, ya sea en el sentido positivo de ganar más competitividad al poner en funcionamiento elementos de Industria 4.0 o de perder competitividad al no hacerlo. La Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI) lleva realizando encuesta para estimar el estado de las organizaciones colombianas en la implementación de Industria 4.0 en territorio nacional. En su encuesta del 2019, el 63,5 % de sus afiliados tienen una estrategia de transformación digital (en el año 2016, esta cifra fue del 25,1 %). El 88.2 % de las organizaciones conocen el concepto

de Industria 4.0 (en el año 2016, este valor fue de 43.7 %). De la misma forma, son conscientes de que el impacto es en toda la organización y no solo en un área específica (93.2 %). Sin embargo, pareciera que todavía existe alguna confusión sobre el significado de Industria 4.0, ya que el 73.5 % todavía opina que será un el impacto será a través de un canal de comercialización digital, y un 60 % de que la Industria 4.0 se relaciona con un servicio o producto digital, desconociendo que Industria 4.0 es un proceso global que integra a toda la organización en toda su cadena de valor. La siguiente Figura 1 parece confirmar esta impresión, ya que menciona como los aspectos más importantes promover plataformas colaborativas, canales digitales para ofrecer servicios o productos o mercadeo, pero dejando por fuera los aspectos de la manufactura inteligente manejada a través de la interconexión digital en toda su cadena de valor.

Figura 1

Tecnologías de Industria 4.0 a promover

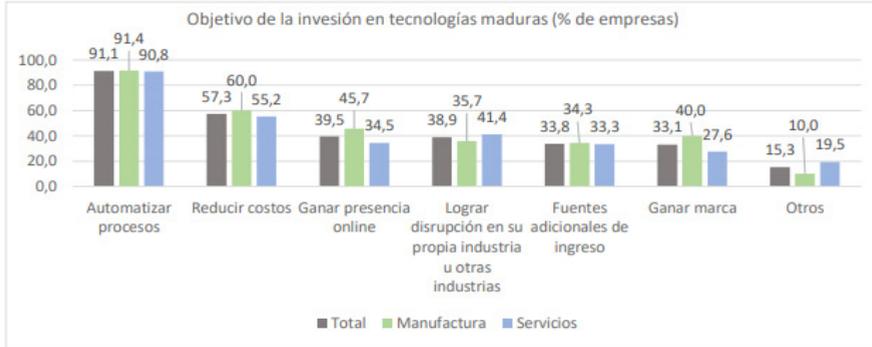


Fuente: Encuesta de transformación digital ANDI 2019.

En la Figura 2 esta impresión se contrasta con los objetivos de las iniciativas de Industria 4.0, que pretende automatizar proceso o reducir costos.

Figura 2

Objetivos de la inversión en Industria 4.0



Fuente: Encuesta de transformación digital ANDI 2019.

Sin embargo, esta encuesta no especifica ni evalúa los resultados obtenidos a través de la implementación de iniciativas de Industria 4.0 en las organizaciones colombianas. Es importante entonces determinar si estas iniciativas han tenido un impacto sustancial en los resultados de las organizaciones y si se han cumplido los objetivos trazados por las mismas. Ya que Industria 4.0 abarca un universo de iniciativas posibles para mejorar los resultados organizacionales, este estudio se centra en determinar el impacto de las tecnologías aditivas como un elemento para influenciar las estrategias y los cambios en los procesos productivos y generar un aumento en la efectividad operacional. Debido a la infraestructura deficiente y la topografía colombiana, las tecnologías aditivas y la inherente posibilidad de producción descentralizada en pequeños lotes presentan ventajas que debería ser explotadas por las organizaciones colombianas.

Consecuentemente, la pregunta de investigación de este trabajo es “¿Cuáles son los factores que impulsan la implementación de tecnologías aditivas en las organizaciones y su impacto en la competitividad, representado por efectividad operacional?”. Adicionalmente se pretende responder esta misma pregunta para la industria en general y para la industria aeroespacial en específico.

Para responder a esta pregunta se utilizará la metodología de ecuaciones estructurales con las percepciones de colaboradores de diferentes organizaciones colombianas.

1. Marco teórico

1.1 Efectividad operacional y competitividad

La competitividad es un elemento esencial en la supervivencia de toda organización y por lo tanto debe hacer parte fundamental dentro de las estrategias empresariales (Porter, 1985, 1990; Reamer, 2017). Es importante entonces definir que es la competitividad o en su defecto la ventaja competitiva que tiene la organización frente a sus competidores. En este sentido el Foro Económico Mundial (WEF en sus siglas en inglés) considera que la competitividad es el conjunto de factores que determinan la productividad de un país. Este conjunto de factores incluye tanto las instituciones, políticas, infraestructura y la sociedad. En tanto, el *World Competitiveness Center* propone que la competitividad es la forma en que los países, regiones y organizaciones gestionan y organizan sus competencias y habilidades para lograr un crecimiento económico a largo plazo y de esta forma aumentar el bienestar.

Por consiguiente, se deben resaltar 3 aspectos fundamentales de la competitividad. Inicialmente el objetivo, el cual es el bienestar de la nación. Segundo, la capacidad de la nación de producir y distribuir los bienes y servicios. Y, por último, la forma de medir la competitividad (Dobrovic et al., 2018; Siggel, 2006; Waheeduzzaman y Ryans, 1996). Cabe señalar que la efectividad operacional no es lo mismo que la estrategia de una organización, ambos componentes son necesarios para adquirir una ventaja competitiva frente a la competencia, pero tienen componentes diferentes. La estrategia consiste en realizar actividades y rutinas diferentes a los competidores, o, si se ejecutan actividades similares, realizar estas actividades en forma diferente. Efectividad operacional, en cambio, consiste en realizar las mismas actividades que la competencia, pero en forma más eficiente y mejor (Porter, 1996, 2004).

Efectividad operacional tiene 5 diferentes dimensiones que permiten medir su impacto en la organización (Santa et al., 2019):

- **Calidad:** La calidad es uno de los conceptos más importantes en la satisfacción de los usuarios. Significa darle al cliente lo que necesitan o quieren en el momento adecuado. Adicionalmente,



desde el punto de vista organizacional, calidad también significa producir sin defectos. Consecuentemente, la mayoría de las organizaciones, indiferentemente de sus procesos productivos, manejan concepciones como tiempos de entrega, servicios posventa, tiempos de entrega, garantías, o formas de servicio, entre otros, para satisfacer al cliente y ofrecerle la mejor calidad que esta espera (Russell y Taylor, 2008; Santa et al., 2009; Yang, 2011).

- **Velocidad:** La velocidad es el tiempo de respuesta necesario para responder a requerimientos del cliente o en desarrollar un nuevo producto o servicio. Adicionalmente también es la capacidad de la organización en responder cambios legales, en los mercados y las necesidades de los clientes. Por consiguiente, la velocidad es un concepto esencial en la ventaja competitiva, ya que permite responder en forma acelerada a cualquier situación (Russell y Taylor, 2008; Santa et al., 2014; Tidd y Bessant, 2020).
- **Flexibilidad:** Cuando se habla del concepto de flexibilidad es importante notar que este término está íntimamente ligado a la velocidad. Flexibilidad no solo significa poder responder en un tiempo adecuado a cambios de último momento del cliente, sino también la capacidad de la organización de anticiparse a los cambios del mercado y hacer los ajustes necesarios. De la misma forma, flexibilidad incluye cambios en los procesos de producción, en los diseños del producto o servicio y cualquier cambio que pueda surgir durante el proceso de producción en toda la cadena de valor (Tidd y Bessant, 2020; Verdu-Jover et al., 2004).
- **Confiabilidad:** Es el elemento fundamental para el cliente cuando adquiere el producto. Se refiere en esencia a que el producto cumpla con sus especificaciones predeterminados bajo los parámetros ambientales esperados y que cumpla con lo prometido por el oferente del producto o servicio. Confiabilidad es uno de los elementos centrales en obtener la satisfacción del cliente, en conjunto con la calidad (Zhang et al., 2021).
- **Costo:** Reducir los costos es una de las metas más importantes de toda organización. La reducción de costos se puede lograr al reducir los desperdicios, mejorar la eficiencia de todos los procesos y actividades de la organización y conseguir los objetivos organizacionales con el menor costo posible. De esta forma, la organización estará en capacidad de ofrecer el producto o servicio a un menor precio al

cliente, o en su defecto, obtener un mayor margen de utilidad (Diefenbach et al., 2018; Ketokivi y Mahoney, 2020; Russell y Taylor, 2008).

1.2 Tecnologías aditivas

Las tecnologías aditivas son una parte significativa dentro del concepto de Industria 4.0 debido a las implicaciones en su producción descentralizada y la posibilidad de producción diferenciada en pequeños lotes y de alta complejidad (Ahuett-Garza y Kurfess, 2018; Berman, 2012). Bajo el concepto de tecnologías aditivas se entiende una producción en la cual el producto se genera en una impresión 3D en forma de una capa encima de otra capa. De esta forma se genera poco o nulo desperdicio y se permiten figuras mucho más complejas que con las tecnologías sustractivas o manufactura tradicional (Horst et al., 2018; Khajavi et al., 2014). El actual desarrollo en materiales susceptibles para la impresión 3D, que van desde materiales amigables con el medio ambiente (PLA – ácido poliláctico por sus siglas en inglés y generada a partir del azúcar) hasta filamentos de metal, resinas, nitinol (filamentos usados en la medicina) o carbono, permiten un alto grado de flexibilidad en realizar diseños para la impresión 3D (Kearns, 2017; Šafka et al.). Debido a estas características, las tecnologías aditivas se consideran un elemento importante dentro del concepto de Industria 4.0, en especial cuando se integra dentro de una línea de producción automatizada sin mayor injerencia humana (Haleem y Javaid, 2019; Horst et al., 2018).

Las tecnologías aditivas son una forma de producción generada a partir de los años 80 del siglo pasado, aunque solamente con la expiración de las patentes respectivas amplió su campo de acción, saliendo del entorno del sector salud – impresión de órganos – y trascendió a otros sectores de la industria manufacturera. Hoy en el día las aplicaciones se encuentran en todos los sectores, desde la producción de algo tan sencillo como lo son los juguetes hasta elementos tan complejos y de alta calidad como lo son componentes aeroespaciales. En especial este último sector se ha beneficiado de esta nueva tecnología, ya que requiere piezas de alta complejidad y precisión en materiales premium y en pequeños lotes (Froes y Boyer, 2019; Lyons, 2014; Najmon et al., 2019; Uriondo et al., 2015). De tal forma que la ESA (*European Space Agency*) y la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) se encuentran evaluando la posibilidad de diseñar una base en marte y la luna con partes impresas automáticamente en el suelo marciano y lunar con

materiales disponibles en este entorno. La misma academia ha evaluado estas posibilidades para el avance de la humanidad (Liu et al., 2021; O'Neill, 2015; Rogers et al., 2020).

Entre las aplicaciones actuales de las tecnologías aditivas se encuentran no solo la parte automotriz, sino también aplicaciones en el sector comida, en los sectores de juguetería y medicina, o en el sector de la construcción. En la actualidad existen casas fabricadas bajo el concepto de tecnologías aditivas, lo mismo automóviles o comida.

El interés sobre la aplicación de las tecnologías aditivas en la industria aeroespacial se ha incrementado en la comunidad académica ante todo por las posibilidades que brinda esta nueva tecnología para el avance en la investigación aeroespacial. Especialmente la ventaja de poder producir en forma descentralizada y componentes de alta complejidad y de diferentes materiales predestina la tecnología aditiva como un elemento esencial en la industria aeroespacial (Lyons, 2014; Mohd Yusuf et al., 2019; Schiller; Shapiro et al., 2016). En especial la fusión por haz de electrones, fusión selectiva por láser y otros procesos de deposición de metales, como la fabricación aditiva de alambres y arcos son considerados como elementos claves para partes de cohetes, aviones y otros vehículos aeroespaciales (Uriondo et al., 2015). Otra ventaja significativa del uso de las tecnologías aditivas en la industria aeroespacial es el recorte de los tiempos de espera en los procesos (*lead time*) de producción y la alta flexibilidad en los diseños de las partes aeroespaciales (Kumar y Krishnadas Nair, 2017). Estas ventajas las han reconocido organizaciones grandes como Boeing o Airbus. Decenas de miles de partes producido por tecnologías aditivas ya han sido instalado en aviones militares o comerciales que han representado ahorros de más de USD 3 millones por avión (Najmon et al., 2019). Con el desarrollo de nuevos materiales para la impresión 3D se abre el campo para mejora la producción en el sector aeroespacial y la conquista del espacio (Schiller; Shapiro et al., 2016).

Al considerar las ventajas de las tecnologías aditivas, creando productos con menos desperdicio y en forma más eficiente, y adicionalmente diseños mucho más compleja y la capacidad de producción en lotes pequeños, proponemos la primera hipótesis sobre la relación entre las tecnologías aditivas y la efectividad operacional:

H1: Las tecnologías aditivas tienen un impacto positivo y fuerte sobre la efectividad operacional.

1.3 Estrategias

Las estrategias son un elemento fundamental de cualquier organización. Una estrategia adecuada define los objetivos a mediano y largo plazo que la organización quiere alcanzar y la forma en como alcanzar dichos objetivos (Porter, 1996). Es importante recalcar que organizaciones pueden tener objetivos similares, pero debido a la diferencia en capacidades, habilidades y recursos, las estrategias para alcanzar dichos objetivos pueden ser diferentes en cada organización (Barney, 2001; Porter, 1996). El concepto de Industria 4.0 ha tenido un impacto profundo en el diseño de las estrategias organizaciones. Los cambios en la forma de producción, aunque los objetivos y metas sigan siendo los mismos, requieren un cambio de estrategias. Tanto las habilidades y competencias de la organización cambian en este proceso de implementación de iniciativas de industria 4.0, como la forma de poder alcanzar las metas y objetivos (Akdil et al., 2018; Erdogan et al., 2018; Hernandez-de-Menendez et al., 2020).

Generar una ventaja competitiva requiere de una estrategia adecuada que contempla las capacidades y los recursos existentes o las formas como adquirir estas habilidades necesarias en caso de no existir dentro de la organización (Hernandez-de-Menendez et al., 2020). En este sentido, la estrategia no solo debe considerar la utilización de las capacidades existentes, sino también el desarrollar los programas e iniciativas para adquirir las capacidades necesarias para poder generar beneficios a partir de iniciativas de Industria 4.0.

Las tecnologías aditivas, como parte de Industria 4.0 requieren, por un lado, unas estrategias adecuadas para poder generar los beneficios esperados por esta nueva tecnología, y por otro lado generan cambios en los procesos internos de la organización, los cuales también debe ser integrados en forma estratégica en el concepto organizacional. De la misma forma, al implementarse las tecnológicas aditivas dentro de una organización cambian las capacidades y habilidades, lo cual genera un nuevo horizonte estratégico para la organización. Por consiguiente, proponemos que existe una relación entre tecnologías aditivas y la estrategia organizacional:

H2: Las tecnologías aditivas tienen un impacto positivo y significativo sobre las estrategias organizacionales.

De la misma forma, las estrategias tienen como objetivo final mejorar la ventaja competitiva de la organización a través de la efectividad

operacional. Consecuentemente, las estrategias deben diseñarse de tal forma que generen cambios en procesos, estructuras, la consecución y utilización de los recursos organizacionales y mejorar de esta forma la efectividad operacional y en consecuencia existe una relación entre las estrategias y la efectividad operacional.

H3: Las estrategias organizacionales tienen un impacto positivo y significativo sobre la efectividad operacional.

1.4 Innovación en procesos

Innovar es un factor fundamental en cualquier estrategia organizacional (Anning-Dorson et al., 2017; De Massis et al., 2018; Teece et al., 1997). Siendo el concepto de Industria 4.0 una innovación trascendental en la forma de manejar la producción u ofrecer servicios, y de tal forma que ya se considera como la 4.^a revolución industrial, es necesario generar, impulsar y administrar adecuadamente la innovación dentro de la organización (Frank et al., 2019; Ibarra et al., 2018; Müller et al., 2020; Reischauer, 2018).

Para tal efecto es necesario definir inicialmente el concepto de innovación, en especial porque la innovación se considera como el principal promotor de la competitividad de una organización y una fuente significativa de la ventaja competitiva. Una gerencia de innovación y una cultura innovadora dentro de una organización permiten mejorar la eficiencia de los procesos, conquistar mercados nuevos, generar productos y servicios novedosos y al servicio del cliente, y, en general, apoyar la supervivencia de la organización en el tiempo y en los mercados (Sarkar, 2010). Mas allá de manejar un proceso de innovación dentro de la organización como algo adicional o algo que no se puede tomar en serio, Industria 4.0 obliga a las organizaciones a repensar su modelo de negocio, su forma de manejar su oferta de productos y servicios y como llegar al cliente, es decir, en realizar cambios innovadores dentro de la organización que permitan mejorar su eficiencia (Ibarra et al., 2018; Müller y Däschle, 2018; Wu et al., 2009).

Dependiendo del contexto, existen diferentes definiciones del concepto de innovación. Para Benamati et al., (2010) y para Evangelista y Vezzani (2010), la innovación es todo proceso que genere conocimiento para la organización y su aplicación dentro de la organización. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) amplía el

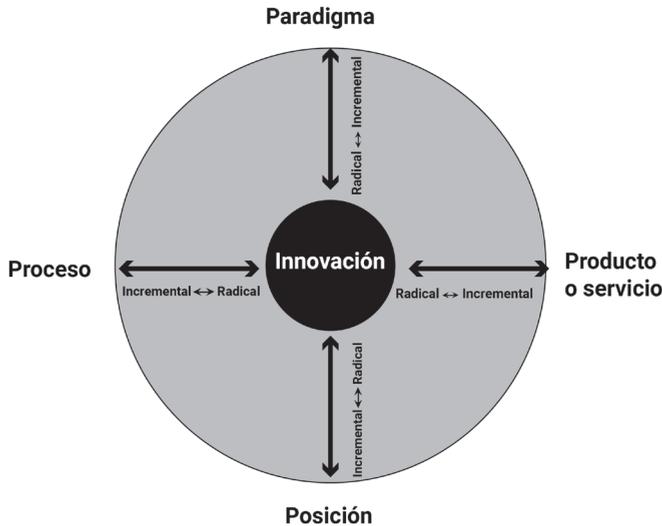
concepto para incluir no solo innovaciones tecnológicas, sino también la innovación organizacional que implica cambios desde la estructura de la organización hasta cambios en procedimientos, rutinas, procesos y actividades. Otra definición considera que la innovación es cualquier proceso o adaptación para mejorar la competitividad de la organización (Eunni et al., 2005; Verhaeghe y Kfir, 2002).

En general, el acercamiento hacia el concepto de innovación se puede definir desde el punto de vista de un resultado, de un proceso y de una mentalidad de cambio. Considerando estos enfoques, la innovación como resultado comprende todos los cambios en los productos, la cadena de suministros, el diseño de productos o servicios novedosos, los procesos y las actividades o en general, todos los resultados del modelo de negocio de la organización. De la misma forma, la innovación también se puede considerar como un proceso, ya que define y diseña las actividades, procesos y rutinas organizacionales para lograr los resultados de iniciativas de la innovación. Por último, también es necesario que exista una mentalidad de innovación dentro de la organización, una cultura innovadora que permite realizar los cambios, experimentar con los mismos, y aceptar que en algunos casos se pueda fallar (Kahn, 2018; Timur y Antanas, 2017). En consecuencia, la innovación es transversal a toda organización y no solo puede ser manejado por unas pocas personas o áreas. Se requiere el apoyo constante no solo de la gerencia sino de todos los colaboradores de todos los niveles organizacionales.

El modelo de Tidd y Bessant ha sido ampliamente discutido dentro de un marco de un modelo de innovación para las organizaciones (Eveleens, 2010; Ferreira et al., 2015; Tidd y Bessant, 2020). En la Figura 3, Tidd y Bessant (2020) sugieren un espacio de innovación dentro del cual se pueden ubicar la organización de acuerdo a su forma de innovar (radical o incremental) o en que aspecto organizacional se encuentran innovando (producto, posición, procesos o paradigmático).

Figura 3

Modelo de innovación de Tidd y Bessant.



Fuente: Elaboración propia, adaptado de Tidd y Bessant, 2020.

En este sentido, las iniciativas de Industria 4.0 se ubican ante todo el espacio de innovación en procesos, ya que modifican las formas de producir y de ofrecer productos y servicios a los clientes, más no necesariamente el producto o servicio en sí mismo. El producto puede ser el mismo, pero la forma de producirlo, y de llevarlo al cliente cambia hacia un proceso más eficiente, veloz y eficiente (Bartodziej, 2017; Ibarra et al., 2018; Müller y Däschle, 2018).

Siendo las tecnologías aditivas una innovación que afecta los procesos organizacionales con la meta de mejorar la eficiencia, la hipótesis 4 propone que existe una relación directa entre las tecnologías aditivas y la innovación en proceso:

H4: Las tecnologías aditivas tienen un impacto positivo y significativo sobre la innovación en procesos.

Si una organización decide cambiar sus procesos debido a la inclusión de nuevas tecnologías, estos cambios también afectan a la estrategia de la empresa. La innovación en procesos significa un cambio en las capacidades y competencias y consecuentemente se le abre un nuevo

horizonte estratégico a la organización. En este sentido, la organización estará en capacidad de redefinir o refinar su estrategia organizacional, dependiendo de los cambios en los procesos. Estos podrían mejorar la eficiencia de la organización en sus procesos de producción o e generación de servicios. Una segunda posibilidad sería que la innovación en los procesos facilite la individualización de los productos o servicios, para diferenciarse de la competencia y adquirir de esta forma ventaja competitiva. (Hervas-Oliver et al., 2016; Schoemaker et al., 2018). Por consiguiente, la siguiente hipótesis propone que:

H5: La innovación en proceso tiene un impacto positivo y significativo sobre las estrategias organizacionales.

Uno de los objetivos principales objetivos de realizar cambios en las organizaciones, como lo son innovación en los procesos, es mejorar los resultados de la empresa, ya sea a través de procesos y rutinas más eficientes o a través de producir nuevos productos o servicios. Estos cambios pueden ser planeados desde un cambio en las estrategias organizacionales o la mejora de los recursos productivos. O, de otra forma pueden ser una respuesta a cambios del entorno en el cual se mueve la organización, como lo pueden ser cambios en la legislación, en los gustos de los consumidores, o tecnologías nuevas, entre otros (Ettlie y Reza, 1992; Lee et al., 2019; Najafi-Tavani et al., 2018; Tegethoff et al., 2020). Por tal motivo proponemos la siguiente hipótesis:

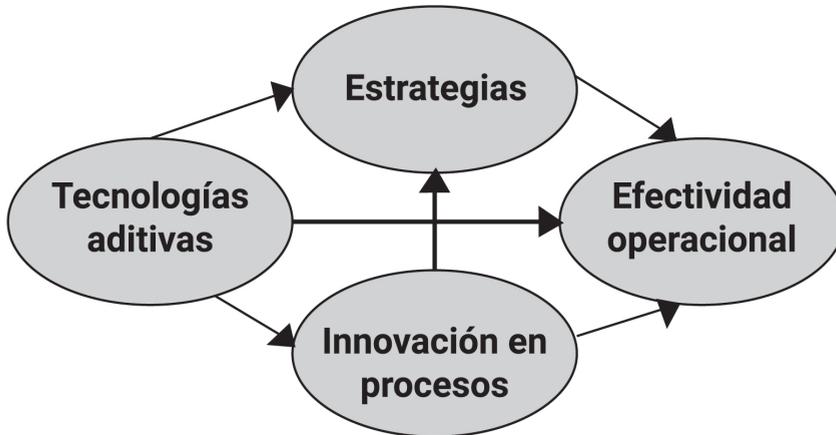
H6: La innovación en procesos tiene un impacto positivo y significativo sobre la efectividad operacional.

1.5 Modelo

Considerando las hipótesis presentadas en el marco teórico, el modelo teórico a evaluar es el siguiente:

Figura 4

Modelo teórico



Fuente: Elaboración propia.

2. Metodología

Este estudio es de carácter exploratorio. No hay evidencia de estudios sobre las tecnologías aditivas (Haleem y Javaid, 2019; Horst et al., 2018; Ibarra et al., 2018; Kagermann, 2015) como parte de iniciativas de Industria 4.0 y su relación con la efectividad operacional, estrategias e innovación en procesos en la región y en Colombia. De acuerdo a la literatura, los estudios exploratorios se realizan cuando no hay o existe poca evidencia de fenómeno a estudiar y la literatura en general solo proporciona un idea general vagamente relacionados con el problema (Elman et al., 2020; Hair et al., 2010). Este estudio tiene como primera fase una fase exploratoria sobre la aplicación de las tecnologías aditivas en las organizaciones, a través de entrevistas, para determinar las variables importantes a considerar.

Este estudio aborda problemas en la implementación de Industria 4.0 que afecta a muchas organizaciones colombianas y para evaluar las percepciones se diseñó un cuestionario con las preguntas relacionadas con las variables de interés basadas en la primera fase. Este cuestionario fue suministrado en forma virtual, ya que debido a la pandemia existente en el país es complejo realizar encuestas presenciales. Por otro lado,

también se ha pensado en aprovechar los beneficios de las encuestas en forma online. Entre estas ventajas se encuentra la rapidez de envío y de respuesta, los costos bajos de la misma, la posibilidad de dirigirlo directamente a la muestra seleccionada y de interés para el estudio, el aumento del alcance, la posibilidad de anonimato del encuestado, la obligatoriedad de responder a todas las preguntas, entre otros (Evans, 2005; Evans y Mathur, 2018). Este cuestionario fue suministrado a diferentes actores dentro de las organizaciones, entre ellos gerentes, tecnólogos, personal administrativos y operativos, ya que estos pueden tener percepciones diferentes respecto al fenómeno a estudiar (Orlikowski y Gash, 1994; Schein, 1996).

Las secciones de la encuesta se desarrollaron basados en el modelo de innovación de Tidd y Bessant (2020), en el modelo de efectividad operacional de Santa et al., (2014), en el modelo de estrategia de Porter (Porter, 1996), y en los conceptos de tecnologías aditivas y de Industria 4.0 de Haleem y Javaid (2019), Horst et al., (2018), Ibarra et al., (2018), Kagermann (2015) y Steenhuis y Pretorius (2017). El cuestionario contiene adicionalmente una sección demográfica para poder caracterizar a la organización y el sector en el cual se encuentra el sujeto encuestado. De la recolección de 994 encuestas se consideraron usables 945 (95 %). De estos, la gran mayoría correspondieron al sector aeroespacial, seguido de otros sectores y el sector gobierno.

Debido al alto interés del sector aeroespacial sobre este estudio, y para poder realizar una comparación, se ha realizado el mismo análisis sobre el impacto de las diferentes variables en la efectividad operacional para la industria en general y para la industria aeroespacial en particular. Como se observa en la Figura 5, del total de las 945 encuestas válidas, 423 (44,8 %) corresponden al sector industrial aeroespacial.

Figura 5

Sector industrial de la organización del encuestado

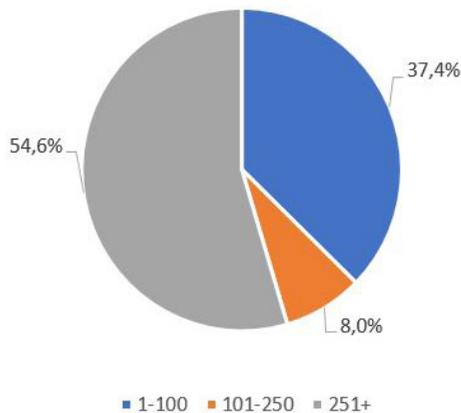


Fuente: Elaboración propia.

De la misma forma como podemos ver la Figura 6, más de la mitad de los encuestados (54,6 %) trabajan en organizaciones con más de 251 empleados, mientras que solo el 8 % trabajan en organizaciones con una cantidad de empleados entre 101 y 250.

Figura 6

Tamaño de la organización del encuestado

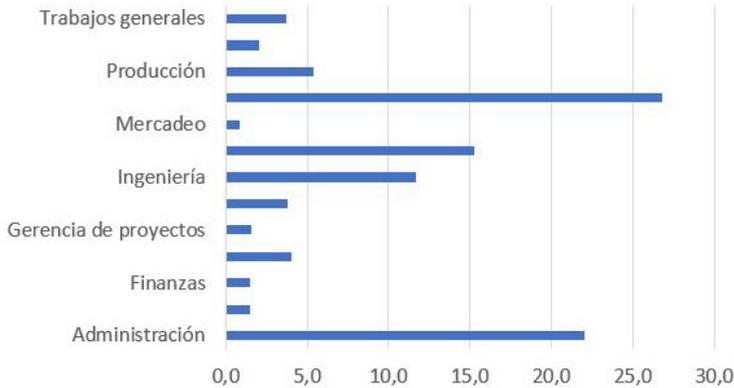


Fuente: Elaboración propia.

Por último en la Figura 7, de los datos se puede apreciar que la gran mayoría de los encuestados son del área de administración y de otro, seguido de logística e ingeniería.

Figura 7

Área de responsabilidad del encuestado



Fuente: Elaboración propia.

Para realizar el análisis estadístico o análisis multivariante se utilizó el software SPSS (SSPS Inc. & IBM Company, Chicago, Ill, EE.UU) y AMOS - Analysis of Moment Structures (AMOS Development Corporation, Spring House, Penn., EE.UU). Estos programas se usaron tanto para realizar el análisis factorial confirmatorio y el modelado de ecuaciones estructurales y de esta forma medir la robustez del modelo y el impacto de las variables en el modelo establecido.

El análisis factorial confirmatorio (CFA en sus siglas en inglés) fue utilizado para validar la robustez del modelo de acuerdo a las indicaciones de Hair et al., (2010), Byrne (2016) y Hooper et al., (2008). El indicador de Alfa de Cronbach fue evaluado de acuerdo con estos parámetros establecidos y debido a que todos los valores se encuentran por encima de 0.7 se puede afirmar que la consistencia interna del modelo se logra (Bujang et al., 2018; Nunnally, 1978; Taber, 2017).

El modelo presenta la siguiente información:

Tabla 1

Datos generales del modelo

	Industria aeroespacial	Industria en general
Número de muestras distintas	325	325
Grados de libertad	264	264
Chi cuadrado	789,641	901,152

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2

Alfa de Cronbach

Variable	Ítems	Alpha de Cronbach	
		Industria en general	Sector aeroespacial
Tecnologías aditivas	8	0.94	0.92
Estrategias	6	0.93	0.91
Innovación en procesos	4	0.94	0.91
Efectividad operacional	7	0.95	0.93

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, los siguientes indicadores fueron evaluados para determinar la robustez del modelo:

- **CFI:** El índice de ajuste comparativo (CFI por sus siglas en inglés) tienen un valor de 0.953 (Industria en general) y 0.942 (sector aeroespacial), superior a la frontera del 0.9 establecido por los parámetros por parte de Bentler (1990) y Marsh et al., (2020).
- **EL CMIN/DF:** La razón de chi-cuadrado sobre los grados de libertad (CMIN/DF por sus siglas en inglés) de 3.413 (industria

en general y 2.98 (sector aeroespacial) se encuentran dentro del rango de 2 a 5 establecido por la literatura, confirmando de esta forma la robustez del modelo (Byrne, 2016; Carmines y McIver, 1981; Marsh y Hocevar, 1985).

- **RMSEA:** Los errores de aproximación (RMSEA por sus siglas en inglés) tienen un valor de 0.059 (industria en general) y 0.06 (sector aeroespacial). La literatura considera un valor cercano a 0.05 como aceptable para la robustez de modelo (Bentler, 1990; Jöreskog y Sörbom, 1982; Marsh et al., 2020).
- **NFI:** Los Índices de ajuste normalizado (NFI por sus siglas en inglés) tiene un valor 0.94 (industria en general) y 0.92 (sector aeroespacial) y son superiores al 0.9 que se considera aceptable (Marsh et al., 2020; Streiner, 2006).
- **RFI:** Los índices de ajuste relativo (RFI por sus siglas en inglés) tiene un valor de 0.93 (industria en general) y 0.90 (sector aeroespacial) y se consideran aceptable por estar por encima del 0.9 propuesto por la literatura (Marsh et al., 2020; Streiner, 2006).
- **IFI:** Los índices de ajuste incremental (IFI en sus siglas en inglés) corresponde a 0.95 (industria en general) y 0.94 (sector aeroespacial) son superiores al 0.9 que define la literatura como mínimo para tener un buen ajuste (Marsh et al., 2020; Streiner, 2006).
- **TLI:** El índice de Tucker-Lewis (TLI por sus siglas en inglés) es de 0.95 para la industria en general y de 0.93 para el sector aeroespacial y se encuentran de esta forma por encima del 0.9 exigido por la literatura (Marsh et al., 2020; Streiner, 2006).

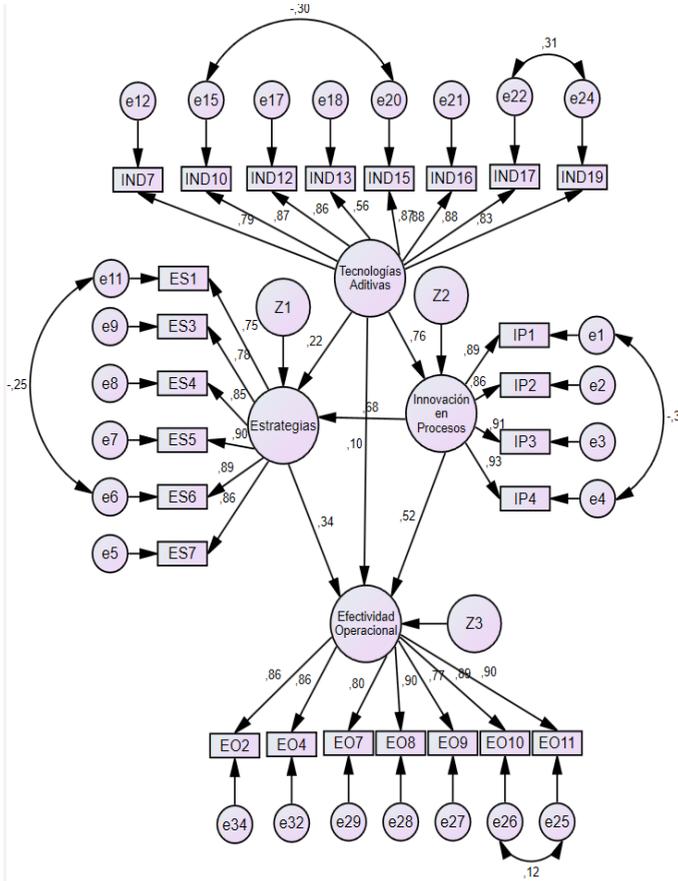
Considerando los indicadores presentados los dos modelos son robustos y válidos para realizar el diagrama de ruta dentro del modelado de ecuaciones estructurales y determinar el impacto y la interrelación de las variables de interés.

3. Resultados

3.1 Resultados para la Industria en general

Figura 8

Resultados SEM – Industria en general



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con estos resultados solo se rechaza la hipótesis 1 propuestas en el marco teórico. En este sentido, las tecnologías aditivas no tienen impacto en la efectividad operacional (Hipótesis 1, $\beta = 0,1$; $P = 0,05$). De acuerdo con el análisis estadístico existe una fuerte relación entre las tecnologías aditivas y la innovación en procesos (Hipótesis 4, $\beta = 0,76$; $P < 0,001$), entre innovación en procesos y efectividad operacional ($\beta = 0,52$; $P < 0,001$), y entre la innovación en procesos y las estrategias

organizacionales (Hipótesis 5, $\beta = 0,68$; $P < 0,001$). En tanto, existe una relación mediana entre la estrategia y la efectividad operacional (Hipótesis 3, $\beta = 0,34$; $P < 0,001$) y relación débil entre tecnologías aditivas y estrategias (Hipótesis 2, $\beta = 0,22$; $P < 0,001$), e.

Tabla 3

Resultados de la industria en general

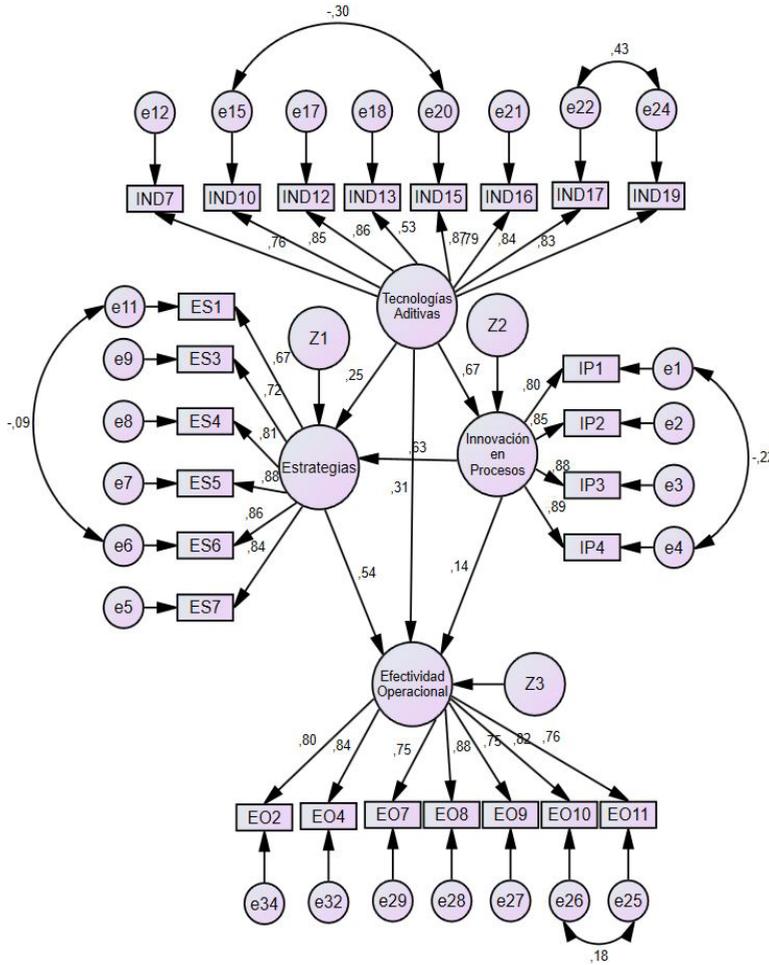
			Estimate	S.E.	C.R.	P
Innovación_ en_Procesos	<-	Tecnologías_Adi- tivas	,888	,051	17,312	***
Estrategias	<-	Tecnologías_Adi- tivas	,247	,050	4,932	***
Estrategias	<-	Innovación_en_ Procesos	,665	,048	13,925	***
Efectividad_ Operacional	<-	Tecnologías_Adi- tivas	,113	,040	2,820	,005
Efectividad_ Operacional	<-	Innovación_en_ Procesos	,486	,049	9,930	***
Efectividad_ Operacional	<-	Estrategias	,326	,047	6,982	***

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Resultados para el sector aeroespacial

Figura 9

Resultados SEM - Sector aeroespacial



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados, solo se rechaza la hipótesis 6 propuestas. La innovación en procesos no tiene una relación significativa con la efectividad operacional (Hipótesis 6, $\beta = 0,14$; $P = 0,008$). En tanto, la relación entre tecnologías aditivas y la innovación en procesos es fuerte

(Hipótesis 4, $\beta = 0,67$; $P < 0,001$), lo mismo la relación entre estrategias y efectividad operacional (Hipótesis 3, $\beta = 0,54$; $P < 0,001$) y la relación entre innovación en procesos y las estrategias (Hipótesis 5, $\beta = 0,53$; $P < 0,001$). La relación entre las tecnologías aditivas y las estrategias es débil (Hipótesis 2, $\beta = 0,25$; $P < 0,001$) al igual que la relación entre tecnologías aditivas y la efectividad operacional (Hipótesis 1, $\beta = 0,31$; $P < 0,001$).

Tabla 4

Resultados para el sector aeroespacial

			Estimate	S.E.	C.R.	P
Innovación_ en_Procesos	<-	Tecnologías_ Aditivas	,714	,058	12,265	***
Estrategias	<-	Tecnologías_ Aditivas	,264	,051	5,169	***
Estrategias	<-	Innovación_ en_ Procesos	,615	,055	11,138	***
Efectividad_ Operacional	<-	Tecnologías_ Aditivas	,291	,040	7,225	***
Efectividad_ Operacional	<-	Innovación_ en_ Procesos	,123	,046	2,670	,008
Efectividad_ Operacional	<-	Estrategias	,479	,053	9,079	***

Fuente: Elaboración propia.

4. Discusión

Con este restudio se ha respondido la pregunta de investigación “¿Cuáles son los factores que impulsan la implementación de tecnologías aditivas en las organizaciones y su impacto en la competitividad, representado por efectividad operacional?”. De la misma forma se evidencian resultados diferentes para la comparación entre los β de la industria en general y del sector aeroespacial muestra los siguientes resultados:

Tabla 5

Comparación industria v/s aeroespacial

			Industria		Aeroespacial	
			β	P	β	P
Innovación_en_	<-	Tecnologías_Aditivas	0.76	***	0.67	***
Procesos						
Estrategias	<-	Tecnologías_Aditivas	0.22	***	0.25	***
Estrategias	<-	Innovación_en_	0.68	***	0.53	***
		Procesos				
Efectividad_	<-	Tecnologías_Aditivas	0.10	,005	0.31	***
Operacional						
Efectividad_	<-	Innovación_en_	0.52	***	0.14	,008
Operacional		Procesos				
Efectividad_	<-	Estrategias	0.34	***	0.54	***
Operacional						

Fuente: Elaboración propia.

De esta forma podemos sugerir que las tecnologías aditivas, como una innovación nueva tiene una estrecha y fuerte relación con la innovación en procesos y de esta forma se confirma la propuesta de Steenhuis y Pretorius (2017) y de Baumers y Holweg (2019). Estos autores proponen que las tecnologías aditivas representan una innovación en la organización y como tal afectan los procesos de esta, en algunas industrias en forma incremental, mientras que en otras en forma radical. Los resultados, tanto como para la industria, como para el sector aeroespacial muestran que las organizaciones entienden la importancia que tienen las tecnologías aditivas en realizar innovaciones en sus procesos y rutinas y que estos cambios son necesarios.

Por otro lado, los cambios es procesos organizacionales tienen como consecuencia cambios en las estrategias organizacionales debido a que estos cambios, que tienen como objetivo mejorar la posición competitiva y afrontar los cambios en el entorno, generan cambios en las capacidades y competencias de la organización y de esta forma amplían el horizonte estratégico (Kahn, 2018; Schroeder, 1990). Esta visión se confirma con los resultados de este estudio al tener la innovación en procesos un impacto

significativo en las estrategias y es válido no solo para las organizaciones de todos los sectores sino también para el sector aeroespacial.

Es interesante observar que las tecnologías aditivas tienen poco impacto tanto en la efectividad operacional y tampoco en las estrategias organizacionales en el sector aeroespacial. Para las organizaciones de los otros sectores, el impacto de las tecnologías aditivas es bajo en la estrategia y no existe hacia la efectividad operacional. Estos resultados contradicen la literatura en la cual las tecnologías aditivas disparan la productividad de las organizaciones e incrementan la ventaja competitiva significativamente (Khorram Niaki y Nonino, 2017; Sonar et al., 2020). Las causales de esta situación pueden ser múltiples. Por un lado, pareciera que en las organizaciones existe poco conocimiento de esta nueva tecnología y sus beneficios y por lo tanto no existe proceso adecuado para implementar dichas innovaciones y consecuentemente no existe un impacto sobre las estrategias. Por otro lado, puede ser que el costo inicial de aplicar las tecnologías aditivas sea demasiado alto para la organización. De esta forma, no se evidencia un impacto significativo en la efectividad operacional, demostrando la poca importancia que se le da a esta nueva tecnología. Otra posible causal podría ser también que se considera un cambio significativo en los procesos de la organización, cambios los cuales no está dispuesto a afrontar. En este sentido pareciera que la cultura organizacional y una jerarquía estricta y poco flexible impiden la innovación en las organizaciones (Liao, 2018; Segal y Segal, 1983). Debido a que las tecnologías aditivas no generan un cambio significativo en las estrategias de la organización, tampoco pueden generar el impacto que se podría esperar si se aplica en forma adecuada esta innovadora tecnología.

Para la industria en general, la innovación en procesos tiene un impacto mediano en la efectividad operacional, lo mismo que las estrategias. En este sentido pareciera que las organizaciones no están aprovechando los beneficios que las innovaciones les proporcionan. A pesar de que las estrategias tienen un impacto en la efectividad operacional, los resultados sugieren que las estrategias solo se concentran en una parte de la organización o no se comunican adecuadamente dentro de la organización. La literatura propone que una estrategia adecuadamente implementada aumenta significativamente la efectividad operacional y los resultados de la organización (Mills y Bourne, 2002; Siam, 2017; Stede et al., 2006; Yuliansyah et al., 2017). De la misma forma, la innovación en proceso tiene como objetivo mejorar la posición competitiva de la organización y de esta forma mejorar los resultados (Duhaylongsod

y De Giovanni, 2019; Hervas-Oliver et al., 2014; Ruiz-Jiménez y del Mar Fuentes-Fuentes, 2013). Pero pareciera que en las organizaciones colombianas estos objetivos no se están cumpliendo.

Es interesante observar que en la industria aeroespacial la innovación en procesos no tiene un impacto sobre la efectividad operacional. La innovación y los cambios requiere de componentes internas y externas y al existir solamente recursos internos, la innovación se dificulta (Speldekamp et al., 2020). La diferencia podría radicar en que la industria aeroespacial depende en gran medida en a) las conexiones de las diferentes organizaciones del sector aeroespacial y b) de condiciones dadas por los diferentes gobiernos (Hilpert, 2015). En este sentido, la cooperación tanto con organizaciones extranjeras o locales se podría dificultar debido al alto grado de regulación que se tienen sobre el sector. De la misma forma, los controles necesarios sobre los proveedores dificultan los cambios en la organización y de esta forma, las organizaciones permanecen relativamente estáticos en sus procesos, que han funcionado (Varoutsy y Scapens, 2018). No sorprende entonces que las organizaciones del sector aeroespacial tienen dificultades en cambiar procesos y rutinas y de esta forma mejorar su eficiencia operacional. Por otro lado, la innovación en procesos también tiene un impacto sobre las estrategias de las organizaciones del sector aeroespacial, este impacto es menor.

Sin embargo y este es otro resultado interesante, el impacto de las estrategias en la efectividad operacional en la industria aeroespacial es mayor que en la industria en conjunto. La industria aeroespacial requiere y exige un alto grado de seguridad en sus productos y proceso. La efectividad operacional presenta cinco componentes: flexibilidad, costos, confiabilidad, calidad y velocidad. Es precisamente que la calidad y la confiabilidad son elementos sumamente significativos en este sector industrial, ya que una falla podría tener como consecuencia la pérdida de vidas humanas. Es por esta razón que las organizaciones de este sector definen estrategias para poder aumentar la efectividad operacional. Estas estrategias pueden ser análisis de Big Data, procesos y rutinas estandarizadas, controles de calidad exigentes, diseño de productos confiables y duraderos, entre otros (Badea et al., 2018; Braziotis et al., 2017; El Souri et al., 2019). De esta forma, las organizaciones del sector aseguran que los productos que ofrecen tengan las características exigidas por sus clientes y que estos puedan recibir un producto de calidad, confiable y de acuerdo con sus necesidades.

En este sentido, la estandarización de los procesos y rutinas es de alta importancia, debido a la creciente complejidad y costos de los sistemas aeroespaciales y las innovaciones en los procesos son cuidadosamente planificadas y ejecutadas (Bozzano et al., 2017). Es posible que, en otras industrias, debido al posible menor riesgo y menores inversiones, las organizaciones están más propensas a implementar innovaciones en sus procesos y rutinas.

Conclusiones

Este estudio presenta dos diferentes resultados diferentes para la industria en general y para la industria aeroespacial. En este sentido, las organizaciones de todos los sectores deben poner especial atención en la implementación de tecnologías aditivas, ya que estas generan un aumento en la productividad y de esta forma en la ventaja competitiva. Existen diferentes posibilidades de implementar tecnologías 3D en los procesos de producción, ya sea por adquirir la tecnología y la maquinaria respectiva o contratar una externalización de un servicio de impresión 3D.

De la misma forma, las organizaciones no deben olvidar que la implementación de tecnologías innovadoras genera un cambio en las competencias y capacidades de estas y amplían el horizonte estratégico. En consecuencia, deben estar dispuestas a ajustar sus estrategias para aprovechar los beneficios que podrían generar estos cambios. Pero ajustar las estrategias y cambiar procesos y procedimientos no es suficiente. Las organizaciones deben, de la misma forma, estar en capacidad de medir los cambios en la efectividad operacional causados por los ajustes en los procesos y retener los que causan efectos positivos y ajustar o cambiar los que causan efectos negativos en su efectividad operacional.

En especial las organizaciones del sector aeroespacial deberían revisar sus modelos de innovación y de cambios en sus procesos y rutinas, puesto que no contribuyen a la efectividad operacional. No hay que olvidar que la implementación de conceptos de Industria 4.0, más allá de las tecnologías aditivas, generan cambios organizacionales que tienen un impacto transversal en toda la organización. Es de esta forma, de suma importancia que se revisen los procesos y rutinas respecto al alcance, periodicidad, complejidad y forma de implementar para poder lograr un

impacto positivo en la efectividad operacional. No hay que olvidar que los conceptos de Industria 4.0 constituyen la actual cuarta revolución industrial y si las organizaciones no se adaptan a estas nuevas exigencias del mercado, ponen en peligro su supervivencia.

La gran diferencia entre los sectores aeroespacial y el resto de los sectores radica en que la industria en general entiende la importancia de la innovación en procesos sobre los resultados en la efectividad operacional y se encuentra dispuesta a realizar los cambios necesarios. Sin embargo, pareciera que no ha entendido los beneficios que podría traer la implementación en tecnologías aditivas (ya sea por medio de la externalización o por la adquisición de la maquinaria respectiva) en la productividad y no aprovechan esta nueva tecnología. En tanto, el sector aeroespacial parece estar más reacio a realizar cambios innovadores en sus procesos, pero entiende el potencial que tienen las tecnologías aditivas para la oferta de sus productos y servicios.

Referencias

- Ahuett-Garza, H., y Kurfess, T. (2018). A brief discussion on the trends of habilitating technologies for Industry 4.0 and Smart manufacturing. *Manufacturing Letters*, 15, 60-63. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.02.011>.
- Akdil, K. Y., Ustundag, A., y Cevikcan, E. (2018). Maturity and Readiness Model for Industry 4.0 Strategy. In A. Ustundag y E. Cevikcan (Eds.), *Industry 4.0: Managing The Digital Transformation* (pp. 61-94). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57870-5_4.
- Anning-Dorson, T., Odoom, R. K., Acheampong, G. y Tweneboah-Koduah, E. (2017). Innovation and organizational development: the role of organizational leadership. *African Journal of Economic and Management Studies*.
- Badea, V. E., Zamfiroiu, A., y Boncea, R. (2018). Big data in the aerospace industry. *Informatica Economica*, 22 (1), 17-24.
- Barney, J. B. (2001). Resource-based theories of competitive advantage: A ten-year retrospective on the resource-based view. *Journal of Management*, 27 (6), 643-650. <https://doi.org/10.1177/014920630102700602>.
- Bartodziej, C. J. (2017). The concept Industry 4.0. In C. J. Bartodziej (Ed.), *The Concept Industry 4.0: An Empirical Analysis of Technologies and Applications in Production Logistics* (pp. 27-50). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-16502-4_3.
- Baumers, M., y Holweg, M. (2019). On the economics of additive manufacturing: Experimental findings [<https://doi.org/10.1002/joom.1053>]. *Journal of Operations Management*, 65 (8), 794-809. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joom.1053>.
- Benamati, J., Fuller, M. A., Serva, M. A. y Baroudi, J. (2010). Clarifying the Integration of trust and TAM in E-commerce environments: Implications for systems design and management. *IEEE Transactions of Engineering Management*, 57 (3), 380-393.
- Bentler, P. M. (1990). Comparative fit indexes in structural models. *Psychological Bulletin*, 107 (2), 238-246. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.107.2.238>.

- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55 (2), 155-162. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>.
- Bozzano, M., Bruintjes, H., Cimatti, A., Katoen, J.-P., Noll, T. y Tonetta, S. (2017). Formal Methods for Aerospace Systems. In S. Nakajima, J.-P. Talpin, M. Toyoshima, y H. Yu (Eds.), *Cyber-Physical System Design from an Architecture Analysis Viewpoint: Communications of NII Shonan Meetings* (pp. 133-159). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4436-6_6.
- Braziotis, C., Tannock, J. D. T. y Bourlakis, M. (2017). Strategic and operational considerations for the Extended Enterprise: insights from the aerospace industry. *Production Planning y Control*, 28 (4), 267-280. <https://doi.org/10.1080/09537287.2016.1268274>.
- Bujang, M. A., Omar, E. D. y Baharum, N. A. (2018). A Review on Sample Size Determination for Cronbach's Alpha Test: A Simple Guide for Researchers. *The Malaysian journal of medical sciences: MJMS*, 25 (6), 85-99. <https://doi.org/10.21315/mjms2018.25.6.9>.
- Byrne, B. M. (2016). *Structural Equation Modeling With AMOS - Basic Concepts, Applications, and Programming*. Routledge.
- Carmel, S. M. (2011). Globalisation, security, and economic wellbeing. *Australian Journal of Maritime y Ocean Affairs*, 3 (4), 109-117.
- Carmines, E. G., y McIver, J. P. (1981). *Analyzing models with unobserved variables: Analysis of Covariance structures* (Vol. 7). Sage Publications Inc.
- Carney, M. (1998). The Competitiveness of Networked Production: The Role of Trust and Asset Specificity [<https://doi.org/10.1111/1467-6486.00105>]. *Journal of Management Studies*, 35 (4), 457-479. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/1467-6486.00105>.
- De Massis, A., Audretsch, D., Uhlaner, L., y Kammerlander, N. (2018). Innovation with Limited Resources: Management Lessons from the German Mittelstand. In: Wiley Online Library.
- Diefenbach, U., Wald, A. y Gleich, R. (2018). Between cost and benefit: investigating effects of cost management control systems on cost efficiency and organisational performance. *Journal of Management Control*, 29 (1), 63-89. <https://doi.org/10.1007/s00187-018-0261-5>.

- Dobrovic, J., Gallo, P., Mihalcova, B., Stofova, L., y Szaryszova, P. (2018). Competitiveness measurement in terms of the Europe 2020 strategy. *Journal of competitiveness*, 10 (4), 21-37.
- Duhaylongsod, J. B., y De Giovanni, P. (2019). The impact of innovation strategies on the relationship between supplier integration and operational performance. *International Journal of Physical Distribution y Logistics Management*, 49 (2), 156-177. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-09-2017-0269>.
- El Souri, M., Gao, J., y Simmonds, C. (2019). Integrating Manufacturing Knowledge with Design Process to Improve Quality in the Aerospace Industry. *Procedia CIRP*, 84, 374-379.
- Elman, C., Gerring, J. y Mahoney, J. (2020). *The Production of Knowledge: Enhancing Progress in Social Science*. Cambridge University Press.
- Erdogan, M., Ozkan, B., Karasan, A. y Kaya, I. (2018). Selecting the best strategy for industry 4.0 applications with a case study. In *Industrial engineering in the industry 4.0 era* (pp. 109-119). Springer.
- Ettlie, J. y Reza, E. (1992). Organizational Integration and Process Innovation. *Academy of Management Journal*, 35 (4), 795-827.
- Eunni, R. V., Post, J. E., y Berger, P. D. (2005). Adapt or adapt: lessons for strategy from the US telecoms industry. *Journal of General Management*, 31 (1), 83-105. <https://doi.org/10.1177/030630700503100105>.
- Evangelista, R. y Vezzani, A. (2010). The economic impact of technological and organizational innovations. A firm-level analysis. *Research Policy*, 39 (10), 1253-1263.
- Evans, J. R. (2005). The value of online surveys. *Internet Research*, 15 (2), 195-219. <https://doi.org/10.1108/10662240510590360>.
- Evans, J. R. y Mathur, A. (2018). The value of online surveys: a look back and a look ahead. *Internet Research*, 28 (4), 854-887. <https://doi.org/10.1108/IntR-03-2018-0089>.
- Eveleens, C. (2010). Innovation management; a literature review of innovation process models and their implications. *Science*, 800 (2010), 900-916.

- Ferreira, J. J. M., Fernandes, C. I., Alves, H. y Raposo, M. L. (2015). Drivers of innovation strategies: Testing the Tidd and Bessant (2009) model. *Journal of Business Research*, 68 (7), 1395-1403.
- Frank, A. G., Mendes, G. H. S., Ayala, N. F. y Ghezzi, A. (2019). Servitization and Industry 4.0 convergence in the digital transformation of product firms: A business model innovation perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 141, 341-351.
- Froes, F. H., y Boyer, R. (2019). *Additive manufacturing for the aerospace industry*. Elsevier.
- Hair, J. F., Black, W. C., y Babin, B. J. (2010). *Multivariate Data Analysis: A Global Perspective*. Pearson Education.
- Haleem, A., y Javaid, M. (2019). Additive manufacturing applications in industry 4.0: a review. *Journal of Industrial Integration and Management*, 4 (04), 1930001.
- Hernandez-de-Menendez, M., Morales-Menendez, R., Escobar, C. A., y McGovern, M. (2020). Competencies for Industry 4.0. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 14 (4), 1511-1524. <https://doi.org/10.1007/s12008-020-00716-2>.
- Hervas-Oliver, J.-L., Boronat-Moll, C. y Sempere-Ripoll, F. (2016). On Process Innovation Capabilities in SMEs: A Taxonomy of Process-Oriented Innovative SMEs [<https://doi.org/10.1111/jsbm.12293>]. *Journal of Small Business Management*, 54 (S1), 113-134. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jsbm.12293>.
- Hervas-Oliver, J.-L., Sempere-Ripoll, F. y Boronat-Moll, C. (2014). Process innovation strategy in SMEs, organizational innovation and performance: a misleading debate? *Small Business Economics*, 43 (4), 873-886. <https://doi.org/10.1007/s11187-014-9567-3>.
- Hilpert, U. (2015). *Routledge Handbook of Politics and Technology*. Routledge.
- Hooper, D., Coughlan, J. y Mullen, M. (2008). Structural Equation Modelling: Guidelines for Determining Model Fit. *Electronic Journal of Business Research Methods*, 6 (1), 53-60.
- Horst, D. J., Duvoisin, C. A. y de Almeida Vieira, R. (2018). Additive manufacturing at Industry 4.0: a review. *International journal of engineering and technical research*, 8 (8).

- Ibarra, D., Ganzarain, J. y Igartua, J. I. (2018). Business model innovation through Industry 4.0: A review. *Procedia Manufacturing*, 22, 4-10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.002>.
- Jöreskog, K. G. y Sörbom, D. (1982). Recent developments in structural equation modeling. *Journal of Marketing Research*, 19 (4), 404-416. <https://doi.org/10.2307/3151714>.
- Kagermann, H. (2015). Change Through Digitization—Value Creation in the Age of Industry 4.0. In H. Albach, H. Meffert, A. Pinkwart, y R. Reichwald (Eds.), *Management of Permanent Change* (pp. 23-45). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-05014-6_2.
- Kahn, K. B. (2018). Understanding innovation. *Business Horizons*, 61 (3), 453-460.
- Kearns, A. J. (2017). Cotton Cellulose Fibers in 3D Print Material.
- Ketokivi, M. y Mahoney, J. T. (2020). Transaction Cost Economics As a Theory of Supply Chain Efficiency [<https://doi.org/10.1111/poms.13148>]. *Production and Operations Management*, 29 (4), 1011-1031. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/poms.13148>.
- Khajavi, S. H., Partanen, J. y Holmström, J. (2014). Additive manufacturing in the spare parts supply chain. *Computers in Industry*, 65 (1), 50-63. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2013.07.008>.
- Khorram Niaki, M. y Nonino, F. (2017). Impact of additive manufacturing on business competitiveness: a multiple case study. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 28 (1), 56-74. <https://doi.org/10.1108/JMTM-01-2016-0001>.
- Kumar, L. J. y Krishnadas Nair, C. G. (2017). Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry. In D. I. Wimpenny, P. M. Pandey, y L. J. Kumar (Eds.), *Advances in 3D Printing y Additive Manufacturing Technologies* (pp. 39-54). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0812-2_4.
- Kumar, N. y Kumar, J. (2019). EFFICIENCY 4.0 FOR INDUSTRY 4.0. *Human Technology*, 15 (1).
- Lee, R., Lee, J.-H. y Garrett, T. C. (2019). Synergy effects of innovation on firm performance. *Journal of Business Research*, 99, 507-515. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2017.08.032>.

- Liao, Z. (2018). Corporate culture, environmental innovation and financial performance [<https://doi.org/10.1002/bse.2186>]. *Business Strategy and the Environment*, 27 (8), 1368-1375. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/bse.2186>.
- Liu, J., Li, H., Sun, L., Guo, Z., Harvey, J., Tang, Q., . . . Jia, M. (2021). In-situ resources for infrastructure construction on Mars: A review. *International Journal of Transportation Science and Technology*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2021.02.001>.
- Lyons, B. (2014). Additive manufacturing in aerospace: Examples and research outlook. *The Bridge*, 44 (3).
- Marsh, H. W., Guo, J., Dicke, T., Parker, P. D. y Craven, R. G. (2020). Confirmatory Factor Analysis (CFA), Exploratory Structural Equation Modeling (ESEM), and Set-ESEM: Optimal Balance Between Goodness of Fit and Parsimony. *Multivariate Behavioral Research*, 55 (1), 102-119. <https://doi.org/10.1080/00273171.2019.1602503>.
- Marsh, H. W. y Hocevar, D. (1985). Application of confirmatory factor analysis to the study of self-concept: First- and higher order factor models and their invariance across groups. *Psychological Bulletin*, 97 (3), 562-582.
- Mills, J. y Bourne, M. (2002). *Strategy and Performance*. Cambridge University Press.
- Mohd Yusuf, S., Cutler, S. y Gao, N. (2019). Review: The Impact of Metal Additive Manufacturing on the Aerospace Industry. *Metals*, 9 (12). <https://doi.org/10.3390/met9121286>.
- Müller, J. M., Buliga, O. y Voigt, K.-I. (2020). The role of absorptive capacity and innovation strategy in the design of industry 4.0 business Models-A comparison between SMEs and large enterprises. *European Management Journal*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.emj.2020.01.002>.
- Müller, J. M. y Däschle, S. (2018). Business Model Innovation of Industry 4.0 Solution Providers Towards Customer Process Innovation. *Processes*, 6 (12). <https://doi.org/10.3390/pr6120260>.
- Najafi-Tavani, S., Najafi-Tavani, Z., Naudé, P., Oghazi, P. y Zeynaloo, E. (2018). How collaborative innovation networks affect new product performance: Product innovation capability, process

- innovation capability, and absorptive capacity. *Industrial Marketing Management*, 73, 193-205.
- Najmon, J. C., Raeisi, S., y Tovar, A. (2019). 2 - Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. In F. Froes y R. Boyer (Eds.), *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry* (pp. 7-31). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9>.
- Nunnally, J. C. (1978). *Psychometric Theory*. 2nd edition. New York, NY: McGraw-Hill.
- O'Neill, S. (2015). 3D print a home on Mars. *New Scientist*, 226 (3023), 27. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0262-4079\(15\)30462-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0262-4079(15)30462-0).
- Orlikowski, W., y Gash, D. (1994). Technological frames: making sense of information technology in organizations. *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*, 12 (2), 174-207.
- Porter, M. (1985). *Competitive advantage: creating and sustaining superior performance*. Free Press.
- Porter, M. (1990). The Competitive Advantage of Nations. *Harvard Business Review*, 68 (2), 73-93.
- Porter, M. (1996). What is strategy. *Harvard Business Review*, 74 (6), 61-78.
- Porter, M. (2004). *Competitive Advantage*. Free Press.
- Qureshi, S. (2015). Are we making a Better World with Information and Communication Technology for Development (ICT4D) Research? Findings from the Field and Theory Building. *Information Technology for Development*, 21 (4), 511-522.
- Reamer, A. (2017). Toward a US Competitiveness Strategy. *Innovations: Technology, Governance, Globalization*, 11 (3-4), 126-132.
- Reischauer, G. (2018). Industry 4.0 as policy-driven discourse to institutionalize innovation systems in manufacturing. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 26-33.
- Rogers, H., Musilova, M., Romo, R., Ponthieux, V. P., y Foing, B. (2020, 2020). How to Build Moon Bases. 14th Europlanet Science Congress 2020,
- Ruiz-Jiménez, J. M. y del Mar Fuentes-Fuentes, M. (2013). Knowledge combination, innovation, organizational performance in

- technology firms. *Industrial Management y Data Systems*, 113 (4), 523-540. <https://doi.org/10.1108/02635571311322775>.
- Russell, R. S., y Taylor, B. W. (2008). *Operations management - Quality and competitiveness in a global environment*. John Wiley y Sons, Inc.
- Santa, R., Ferrer, M., Bretherton, P. I., y Hyland, P. (2009). The necessary alignment between technology innovation effectiveness and operational effectiveness. *Journal of Management y Organization*, 15 (2), 155-169.
- Santa, R., Hyland, P., y Ferrer, M. (2014). Technological innovation and operational effectiveness: their role in achieving performance improvements. *Production Planning y Control*, 25 (12), 969-979. <https://doi.org/10.1080/09537287.2013.785613>.
- Santa, R., MacDonald, J. B., y Ferrer, M. (2019). The role of trust in e-Government effectiveness, operational effectiveness and user satisfaction: Lessons from Saudi Arabia in e-G2B. *Government Information Quarterly*, 36 (1), 39-50. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.giq.2018.10.007>.
- Sarkar, S. (2010). *Empreendedorismo e inovação*. Escolar Editora.
- Schein, E. H. (1996). Three cultures of management: The key to organizational learning. *Sloan management review*, 38 (1), 9-20.
- Schiller, G. J. (2015). Additive manufacturing for Aerospace.
- Schoemaker, P. J. H., Heaton, S. y Teece, D. (2018). Innovation, Dynamic Capabilities, and Leadership. *California Management Review*, 61 (1), 15-42. <https://doi.org/10.1177/0008125618790246>.
- Schroeder, D. M. (1990). A dynamic perspective on the impact of process innovation upon competitive strategies [<https://doi.org/10.1002/smj.4250110103>]. *Strategic Management Journal*, 11 (1), 25-41. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/smj.4250110103>.
- Segal, D. R. y Segal, M. W. (1983). Change in Military Organization. *Annual Review of Sociology*, 9 (1), 151-170. <https://doi.org/10.1146/annurev.so.09.080183.001055>.
- Shapiro, A. A., Borgonia, J. P., Chen, Q. N., Dillon, R. P., McEnerney, B., Polit-Casillas, R. y Soloway, L. (2016). Additive Manufacturing for Aerospace Flight Applications. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 53 (5), 952-959. <https://doi.org/10.2514/1.A33544>.

- Siam, M. R. A. (2017). The effect of communication strategy on the relationship between strategy execution (organisational level) and organisational performance: a middle level managers' perspective at higher education institutions. *Journal for Global Business Advancement*, 10 (2), 158-186.
- Siggel, E. (2006). International Competitiveness and Comparative Advantage: A Survey and a Proposal for Measurement. *Journal of Industry, Competition and Trade*, 6 (2), 137-159. <https://doi.org/10.1007/s10842-006-8430-x>.
- Sonar, H. C., Khanzode, V. y Akarte, M. (2020). A Conceptual Framework on Implementing Additive Manufacturing Technology Towards Firm Competitiveness. *International Journal of Global Business and Competitiveness*, 15 (2), 121-135. <https://doi.org/10.1007/s42943-020-00015-3>.
- Speldekamp, D., Knoblen, J. y Saka-Helmhout, A. (2020). Clusters and firm-level innovation: A configurational analysis of agglomeration, network and institutional advantages in European aerospace. *Research Policy*, 49 (3), 103921. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.respol.2020.103921>.
- Stede, W. A. V. d., Chow, C. W. y Lin, T. W. (2006). Strategy, choice of performance measures, and performance. *Behavioral research in accounting*, 18 (1), 185-205.
- Steenhuis, H.-J. y Pretorius, L. (2017). The additive manufacturing innovation: a range of implications. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 28 (1), 122-143. <https://doi.org/10.1108/JMTM-06-2016-0081>.
- Streiner, D. L. (2006). Building a Better Model: An Introduction to Structural Equation Modelling. *The Canadian Journal of Psychiatry*, 51 (5), 317-324. <https://doi.org/10.1177/070674370605100507>.
- Taber, K. S. (2017). The Use of Cronbach's Alpha When Developing and Reporting Research Instruments in Science Education. *Research in Science Education*, 48 (6), 1273-1296. <https://doi.org/10.1007/s11165-016-9602-2>.
- Teece, D., Pisano, G. y Shuen, A. (1997). Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal*, 8 (7), 509-533.

- Tegethoff, T., Santa, R., Schlupe, I., Morante, D. F., y Cruz, M. L. (2020). The challenge of strategic innovation: achieving operational effectiveness in developing countries. *International Journal of Innovation Management*, 25 (03), 2150031. <https://doi.org/10.1142/S1363919621500316>.
- Tidd, J. y Bessant, J. R. (2020). *Managing Innovation: Integrating Technological, Market and Organizational Change*. Wiley.
- Timur, K. y Antanas, M. (2017). The definition and classification of innovation. *Holistica*, 8 (1), 59-72.
- Uriondo, A., Esperon-Miguez, M. y Perinpanayagam, S. (2015). The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 229 (11), 2132-2147. <https://doi.org/10.1177/0954410014568797>.
- Varoutsas, E. y Scapens, R. W. (2018). Trust and control in evolving inter-organisational relationships. *Accounting, Auditing y Accountability Journal*, 31 (1), 112-140. <https://doi.org/10.1108/AAAJ-02-2013-1218>.
- Verdu-Jover, A. J., Llorens-Montes, F. J. y Garcia-Morales, V. J. (2004). The concept of fit in Services flexibility research: an empirical approach. *International journal of service industry management*, 15 (5), 499-514.
- Verhaeghe, A. y Kfir, R. (2002). Managing innovation in a knowledge intensive technology organisation (KITO). *RyD Management*, 32 (5), 409-417. <https://doi.org/10.1111/1467-9310.00272>.
- Waheeduzzaman, A. N. M., y Ryans, J. K. (1996). DEFINITION, PERSPECTIVES, AND UNDERSTANDING OF INTERNATIONAL COMPETITIVENESS: A QUEST FOR A COMMON GROUND. *Competitiveness Review: An International Business Journal*, 6 (2), 7-26. <https://doi.org/10.1108/eb046333>.
- Wu, X., Ma, R., y Xu, G. (2009). Accelerating Secondary Innovation through Organizational Learning: A Case Study and Theoretical Analysis. *Industry and Innovation*, 16 (4-5), 389-409. <https://doi.org/10.1080/13662710903053656>.
- Yang, J. C. (2011). What is Quality. *Quality Control Journal*, 36 (8), 52-56.

- Yuliansyah, Y., Gurd, B., y Mohamed, N. (2017). The significant of business strategy in improving organizational performance. *Humanomics*, 33 (1), 56-74. <https://doi.org/10.1108/H-06-2016-0049>.
- Zhang, C. W., Pan, R., y Goh, T. N. (2021). Reliability assessment of high-Quality new products with data scarcity. *International Journal of Production Research*, 59 (14), 4175-4187. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1758355>.
- Šafka, J., Ackermann, M., Bobek, J., Seidl, M., Habr, J., y Běhálek, L. (2016). Use of composite materials for FDM 3D print technology.

Capítulo 7

El impacto de los estilos de Liderazgo en la Inteligencia Emocional y la Efectividad Operativa de los Alféreces y Cadetes de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”

SBR. María José Gómez Gómez

*Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”
Fuerza Aérea Colombiana*

AF. María Paula Roncancio Sarmiento

*Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”
Fuerza Aérea Colombiana*

Daniel Gómez

*Pontificia Universidad Javeriana – Seccional Bogotá
Correo: da-gomez@javeriana.edu.co
ORCID: 0000-0002-0576-2771*

Dr. Ricardo Santa

*Colegio de Estudios Superiores de Administración
CESA
Correo: ricardo.santa@cesa.edu.co
ORCID: 0000-0003-2584-2928*

Dr. Thomas Tegethoff

*Colegio de Estudios Superiores de Administración
CESA
Correo: thomas.tegethoff@cesa.edu.co
ORCID: 0000-0003-4007-0508*

Dr. Diego Morante

*Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”
Fuerza Aérea Colombiana
Correo: dmorante75@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6543-1694*

Resumen

El presente artículo es un resumen de trabajo de grado desarrollado por las cadetes Gómez Gómez María José y Roncancio Sarmiento María Paula y tiene como finalidad mostrar el impacto del liderazgo transformacional y transaccional en la inteligencia emocional y la efectividad operativa de los alféreces y cadetes de la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”. Este estudio es novedoso por cuanto no existe registro de estudios previos que hayan tenido la intención de estudiar la interacción entre las variantes abordadas en el título.

Se utilizó un instrumento tipo encuesta, como método de recolección de datos, con el fin de indagar a los Cadetes y Alféreces de la EMAVI. La encuesta está dividida en cuatro secciones, información demográfica, inteligencia emocional, efectividad operativa y estilos de liderazgo (Transformacional, Transaccional y falta de liderazgo). Se recolectaron 318 observaciones o datos válidos, las cuales fueron ordenados, codificados y analizados bajo la técnica de análisis estadístico de modelación por ecuaciones estructurales.

En los resultados se observa que el liderazgo transformacional, a través de la estimulación intelectual, ejerce un impacto importante en la inteligencia emocional y la efectividad operativa. Por otro lado, el liderazgo transaccional no obtuvo los mismos resultados, mostrando una relación apenas parcial con la inteligencia emocional y nula con la efectividad operativa. De igual forma, la falta de liderazgo o las acciones de los superiores que denotan la falta de este, no ejercen ningún beneficio en los cadetes y alféreces. Finalmente, la inteligencia emocional tiene una relación directa con la efectividad operativa.

Palabras clave: Liderazgo Transformacional, Liderazgo Transaccional, Falta de Liderazgo, Inteligencia Emocional, Efectividad Operativa.

Abstract

This article is a summary of the theses developed by third-year cadets Gómez Gómez María José and Roncancio Sarmiento María Paula and aims to show the impact of transformational and transactional leadership on the emotional intelligence and operational effectiveness of the Alfereces and Cadets of the Military Aviation School “Marco Fidel Suárez”. This study is novel because there is no record of previous studies that have intended to study the interaction between the variants addressed in the title.

A survey-type instrument was used as a data collection method, in order to investigate the cadets and alfereces of the EMAVI. The survey is divided into four sections, Demographic Information, Emotional Intelligence, Operational Effectiveness, and Leadership Styles (Transformational, Transactional, and Lack of Leadership). 318 observations or valid data were collected, which were ordered, coded, and analyzed under the statistical analysis technique of modeling by structural equations.

The results show that transformational leadership, through intellectual stimulation, has an important impact on emotional intelligence and operational effectiveness. On the other hand, transactional leadership did not obtain the same results, showing only a partial relationship with emotional intelligence and zero with operational effectiveness. Similarly, the lack of leadership or the actions of the superiors that denote the lack of it, do not exert any benefit on the cadets and ensigns. Finally, emotional intelligence has a direct relationship with operational effectiveness.

Keywords: Transformational Leadership, Transactional Leadership, Lack of Leadership, Emotional Intelligence, Operational Effectiveness.

Introducción

La Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez” de la Fuerza Aérea Colombiana, es una Institución de Educación Superior de carácter especial, cuya misión es formar integralmente oficiales líderes en el campo militar, profesional y aeronáutico para el desarrollo de operaciones aéreas militares, abordando las actividades propias de estos campos. Es así como organizaciones educativas y militares, como lo es la Escuela Militar de Aviación, buscan fortalecer sus procesos estratégicos, misionales y operativos, con miras a generar ingresos que permitan mantenerse en el mercado de una manera efectiva y formar personas íntegras para el servicio de la sociedad.

Uno de los aspectos a considerar para que se de esa estabilidad o sostenibilidad es la efectividad operativa que se traduce en lograr productos y servicios flexibles, confiables y de calidad (Santa et al., 2017). Uno de los factores que influye en esta lógica es el talento humano como factor dinamizador de los procesos de competencias intrapersonales, al igual que la inteligencia emocional y los diferentes estilos de liderazgo. Adicionalmente, este estudio indica que el nivel de los estilos de liderazgo desempeña un papel importante en el ambiente académico-militar y sus resultados.

Este estudio investiga como el *Liderazgo Transformacional*, el *Liderazgo Transaccional* Y la *Falta de liderazgo impactan en la Inteligencia Emocional (IE)* y la *Efectividad Operativa (EO)* en la Escuela Militar de Aviación “Marco Fidel Suárez”. Para cumplir este objetivo, se realizó una revisión de la literatura especializada donde se analizan las categorías objeto de esta investigación y se presenta un modelo hipotético, el cual es analizado por medio de ecuaciones estructurales, basado en una muestra empírica por los estudiantes de la escuela. Es importante resaltar que los estudiantes de la institución son los cadetes, alumnos de los cursos regulares durante los primeros tres años de permanencia en la Escuela o alumnos de los cursos del Cuerpo Administrativo (OCA) y de Escalonamiento (CEO) durante su fase de formación básica militar y/o de especialidad; y los alféreces, alumno de los cursos regulares durante el cuarto año de permanencia en la Escuela.

Revisión de la Literatura

Con el paso del tiempo, se ha podido evidenciar que el liderazgo ha sido una característica manifiesta en personas que se han destacado a través de la historia en diferentes momentos y eventos de relevancia para la humanidad. Por tanto, podría decirse que este tema despierta un vasto interés; sin embargo, su estudio formal, se remonta a una época muy reciente y, que deja en claro, que este es un término que no se puede encajar en una única definición, por lo que acoge diversos campos con los cuales puede relacionarse.

Por este motivo, al efectuar un acercamiento teórico a la expresión del liderazgo, se encontraron diversas maneras de explicarlo, por ejemplo, Bracho Parra y Garcia Guilianny (2013), postulan que el liderazgo como proceso, representa en las organizaciones un elemento fundamental para guiar los esfuerzos y motivaciones de las personas hacia el logro de los fines sociales para las cuales fueron creadas. Asimismo, indican que la mayoría de las escuelas que han estudiado el liderazgo, concuerdan con que puede ser definido como un proceso natural de influencia que ocurre entre una persona y sus seguidores. Por su parte Bass (1990) citado por Castro Solano (2007), plantea que el liderazgo es un tipo de interacción que se da entre los miembros de un grupo; de igual manera, Contreras Torres (2008) señala que el liderazgo ha sido estudiado para incrementar la competitividad, fomentar la productividad y garantizar la sostenibilidad de las organizaciones. Todo lo anterior, deja en claro que el liderazgo se enfoca en hacer realizar el futuro estimado, Actualmente, no se tiene en consideración a un espectador del statu quo como líder (Selman, 2008).

Lo que, si es cierto, es que existen tantas definiciones como líderes en el mundo, y por lo cual podría indicarse, que los tipos de liderazgo también son variados, pues al igual que las definiciones, gozan de diferentes características, lo cual fomenta la proliferación de estilos; estos deben relacionarse con las cualidades permanentes, innatas o adquiridas por el individuo con el fin de intervenir adecuadamente en los procesos de evolución o involución de las comunidades (Estrada, 2007).

Para el caso del presente estudio, se abordaron puntualmente tres: Liderazgo Transformacional, Liderazgo Transaccional y la Falta de Liderazgo.

Liderazgo Transformacional

Bass y Avolio (2006) citados por Bracho Parra y Garcia Guiliany (2013), plantean que este comprende un proceso enfocado en la estimulación de la conciencia de los trabajadores, a fin de convertirlos en seguidores productivos, quienes acepten y se comprometan con el alcance de la misión organizacional, apartando sus intereses particulares y centrándose en el interés colectivo. Es decir que el liderazgo transformacional se expresa cuando el líder lleva a los seguidores más allá del auto interés inmediato (Bass, 2007). Por lo tanto, teniendo en cuenta lo propuesto por Lerma (2007) citado por Bracho Parra y Garcia Guiliany (2013), se puede decir que el liderazgo transformacional presenta un conjunto de lineamientos que postulan que las personas seguirán a quien los inspire, donde los seguidores con visión se enfocan en lograr significativas metas, siendo importante actuar con entusiasmo y energía.

Por su parte, Velásquez (2006) en Bracho Parra y Garcia Guiliany (2013), indica que este tipo de liderazgo es un estilo definido como un proceso de cambio positivo en los seguidores, centrándose en transformar a otros a ayudarse mutuamente, de manera armoniosa, enfocando de manera integral a la organización; lo cual aumenta la motivación, la moral y el rendimiento de sus seguidores (ver Figura 1). De acuerdo a los hallazgos realizado por Bass (1985), citado por Gil et al., (2011) es preciso explorar nuevas modalidades de liderazgo, que permitan responder eficazmente a nuevas necesidades de trabajo, como el diseño para el cambio y la innovación, la diversidad cultural, la complejidad, el trabajo basado en el conocimiento y las organizaciones virtuales. La respuesta a estas demandas ha motivado el desarrollo de nuevos enfoques, como el ‘nuevo liderazgo’, el liderazgo auténtico, transcultural, complejo, compartido y remoto. El objetivo de este artículo es revisar los principales trabajos sobre estas nuevas formas de liderazgo. Para ello, se analizarán los principales modelos teóricos y líneas de investigación y se discutirán las implicaciones prácticas orientadas a la intervención y a la dirección de equipos de trabajo”, se evidenciaron cuatro dimensiones esenciales para este tipo de liderazgo:

- El *carisma*: los líderes muestran su visión y sirven de modelos.
- La *Estimulación Intelectual*: promueven la solución de problemas y la innovación.

- La *Consideración Individualizada*: tratan de forma cuidadosa y personal a los miembros.
- La *inspiración*: desarrollan visión compartida y espíritu de grupo.

Figura 1

Aspectos de los 4 tipos de liderazgo Transformacional.



Fuente: Elaboración propia adaptado de Bracho Parra y Garcia Guiliany (2013).

Liderazgo Transaccional

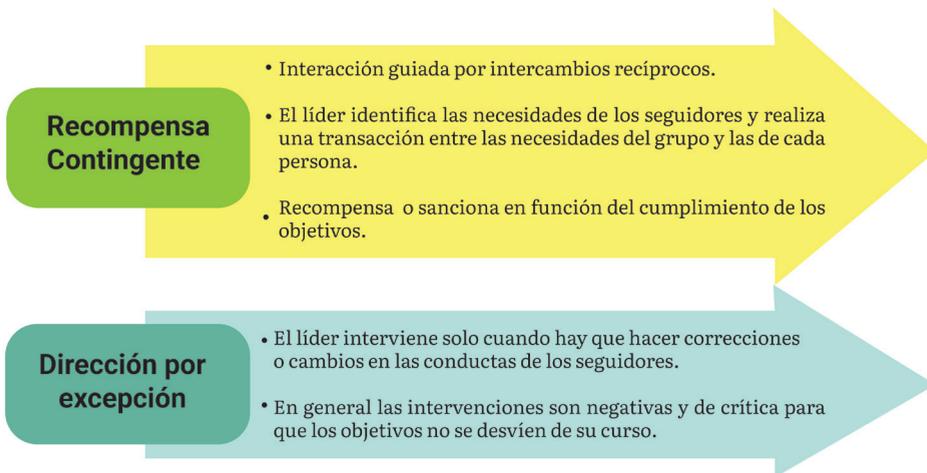
El liderazgo transaccional se refiere a la relación de intercambio entre el líder y sus seguidores con la finalidad de que sus intereses coincidan (Bass, 2007). Este tipo de liderazgo funciona a través de una especie de condicionamiento en el que los líderes premian o, por el contrario, intervienen negativamente en virtud de verificar el rendimiento de sus seguidores es de acuerdo a lo estimado o no (Lupano Perugini y Castro Solano, 2013).

Dado esto, se puede deducir que el término transaccional, expresa la existencia de un intercambio generando una dinámica en la que la consecución de objetivos de manera eficiente y eficaz contribuye a la adquisición de privilegios, con lo cual ambas partes se verían beneficiadas. En este sentido, el papel de un líder transaccional está relacionado a los modelos convencionales de cambio planificado, en donde se planea y se genera las estrategias que permitan el cumplimiento de procesos y objetivos para llevar a un fin determinado (Contreras Torres y Barbosa Ramírez, 2013).

En otras palabras, este tipo de liderazgo tiende a brindar mayor atención a la forma en como el líder incide en los seguidores permeando aspectos relacionados con las motivaciones y, que se verán reflejado en el desempeño y cumplimiento de la tarea asignada. Por lo tanto, el liderazgo transaccional es presentado en intercambio de recompensas constructivas o correctivas o evitación de disciplina para el acatamiento del seguidor (Almedia, 2007). De acuerdo con el panorama anteriormente mencionado, existen dos tipos de liderazgo transaccional, los cuales son:

Figura 2

Aspectos de los dos tipos de Liderazgo Transaccional.



Fuente: Adaptado de Lupano Perugini y Castro Solano (2013).

Falta de Liderazgo

Al hablar de liderazgo, es necesario reflexionar acerca de las situaciones o escenarios, así como las consecuencias, que pueden llegar a darse en el caso de existir falta de este; tal ausencia podría relacionarse con el término francés *Laissez-faire*, que traduce dejar hacer o dejar pasar. En palabras de Pacsi Choque et al., (2014) puede ser conceptualizado de la siguiente forma: como un líder que carece de compromiso con su organización. Es decir, que la falta de liderazgo implica que el líder tiene la mínima, o quizá nula, participación en la realización de tareas.

Por lo tanto, la expresión *Laissez-faire* denota que el líder no se involucra mucho en el proceso, por lo que, las instrucciones impartidas serán restringidas y mínimas; su intervención se da únicamente si es relevante hacerlo, y para evitar realizar un control, alude a la confianza en la motivación y la experiencia del subalterno, confiando siempre en sus competencias (Espinoza Zegarra y Canales Morales, 2020).

Campos y Campos (2015), citado por Pérez Lobo (2019), indican que este modelo de liderazgo está cargado por una apariencia negativa, dado que en él, los jefes no aportan pautas de trabajo, dejando a los empleados libertad de actuación y toma de decisiones, generando con ello, un desconcierto generalizado al recaer toda la responsabilidad al personal subordinado. Por lo cual se puede inferir que la falta de liderazgo puede tener dos causas: falta de dominio de las competencias requeridas o falta de concentración en las habilidades necesarias. Lo que puede representar un problema a corto y largo plazo.

Inteligencia Emocional - IE

El término Inteligencia Emocional (IE), es relativamente joven, aunque desde hace muchos años, en las disciplinas la filosofía o la ciencia han abordado este común con un acercamiento. Según la historia, si se hablara en términos cronológicos, podría decirse que el término es una unión de las inteligencias interpersonal e intrapersonal, presentadas por Howard Gardner en 1983; teniendo en cuenta que la primera se centra en la habilidad de conectarse y trabajar eficientemente con otras personas mientras la segunda se concibe como la habilidad de poder autoanalizarse, reflexionar, de ser contemplativo y evaluar

calladamente las acciones y sentimientos más profundos, la capacidad de conocerse a sí mismo (Emst-Slavit, 2001).

Sin embargo, los primeros en acotar la expresión fueron Salovey y Mayer en 1990 definiéndola como una clase de inteligencia social que involucra la capacidad de controlar las emociones propias y de otros, diferenciarlas y utilizar la información para guiar el pensamiento y las acciones (Salovey y Mayer, 1990, citado en Mayer y Salovey, 1993). Es decir que la inteligencia emocional incide en la capacidad para razonar y utilizar las emociones con el fin de mejorar el pensamiento, teniendo en cuenta como se perciben, desarrollan, regulan y usan (Mayer, 1998).

Indudablemente, es necesario citar a Goleman (1995), quien popularizó la concepción de la IE y la definió como un conjunto de habilidades entre las que destacan el autocontrol, el entusiasmo, la perseverancia y la capacidad para motivarse a uno mismo. Según Goleman (1995), dichas capacidades pueden ser enseñadas y aprendidas con el fin de motivar un mejor rendimiento independientemente del potencial intelectual que se haya otorgado genéticamente.

Dicho todo lo anterior, se puede identificar que no hay una definición exacta del concepto de inteligencia emocional; Sin embargo, para los efectos de la investigación, se adoptó la visión dada por Salovey y Mayer (1990) quienes, según lo expuesto por Wong y Law (2002), conceptualizaron la composición de la IE en cuatro dimensiones:

- **Autoevaluación emocional “Self Emotion Appraisal (SEA)”:**

Está relacionada con la capacidad del individuo para comprender sus emociones profundas y poder expresarlas naturalmente. Las personas que tienen una gran habilidad en esta área percibirán y reconozca sus emociones mucho antes que la mayoría de la gente.

- **Valoración y reconocimiento de la emoción en los demás “Others Emotion Appraisal (OEA)”:**

Esto se relaciona con la capacidad de las personas para percibir y comprender las emociones de las personas alrededor de ellos. Las personas que tienen un alto nivel de esta capacidad serán mucho más sensibles a los sentimientos y las emociones de los demás.

- **Regulación de la emoción en el yo “Regulation of emotions (ROE)”:**

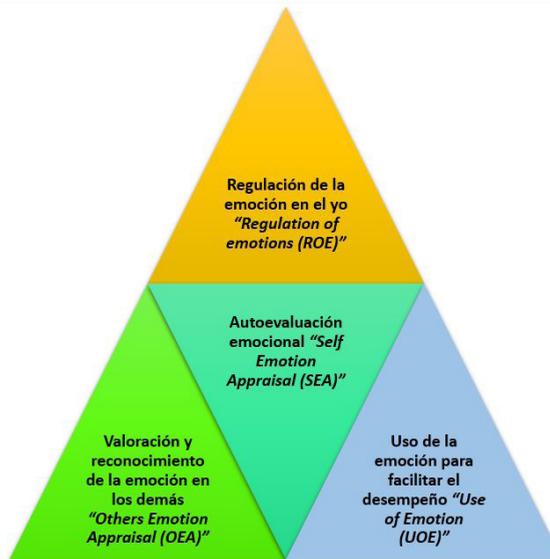
Esto se relaciona con la capacidad de las personas para regular sus emociones.

- **Uso de la emoción para facilitar el desempeño “Use of Emotion (UOE)”:**

Esto se relaciona con la capacidad de los individuos para hacer uso de sus emociones dirigiéndolas hacia una actitud constructiva actividades y desempeño personal.

Figura 3

Dimensiones de la inteligencia emocional adaptado de Salovey y Mayer (1990).



Fuente: Wong y Law (2002).

Efectividad Operativa

La competencia en el mundo organizacional cada día es mucho más evidente; encontrar aspectos que distingan una organización de otra y, sobre todo, que sea preferida por el consumidor, hacen necesaria la

búsqueda del mejoramiento continuo en los procesos, a fin de mantenerse en el mercado, adaptándose al cambio y manteniendo la calidad, todo en conjunto al tiempo que se optimizan recursos.

Es decir, que la efectividad operativa se constituye en una relación de control entre los recursos y los logros de una organización. En palabras de Gómez Gómez y Brito Aguilar (2020) *lo que no se conoce no se administra*. Conocer la manera de realizar cualquier actividad es el primer paso fundamental para garantizar el cumplimiento de las expectativas de los clientes y, por tanto, se asegura un poco más el éxito en el desarrollo del proceso.

Partiendo de reconocer que la efectividad operativa procura establecer capacidades que permitan establecer en la organización procesos que lleven a superar a la competencia y, por tanto, ganar la preferencia del consumidor, el estratega de una empresa que entiende que la competencia se extiende mucho más allá de los rivales existentes, será capaz de detectar amenazas competitivas más generales y estará mejor preparado para abordarlas (Porter, 2008).

En ese sentido, esta investigación adoptó los postulados abordados por Santa et al., (2009) expuestos en Messu Llano (2020), a través de los cuales se indica que la efectividad operacional implica el seguimiento de cinco indicadores que contribuyen a mantener la cadena de valor y efectuar un seguimiento continuo: costo, calidad, velocidad, flexibilidad y confiabilidad.

Figura 4

Los cinco indicadores de la Efectividad Operativa



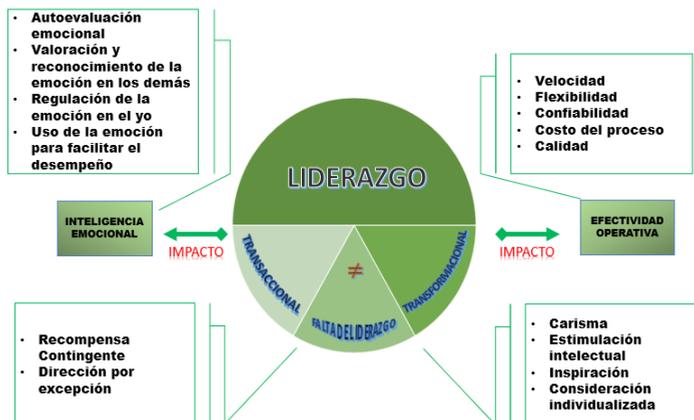
Fuente: Elaboración propia, adaptación por Santa et al. (2009) expuestos en Messu Llano (2020).

De acuerdo a lo anterior, se concibe la EMAVI como una institución en la que se pueden medir las variables propuestas; tal medición ofrece la oportunidad de indagar en un campo poco explorado, creando la posibilidad de tener un mejor proceso de formación para los futuros oficiales de la FAC; ello, teniendo en cuenta la relación de carácter positivo entre las emociones, la efectividad operacional y el liderazgo encontrada por Santa et al., (2019), con lo cual se pretende visibilizar nuevas formas de mantener una ventaja competitiva sostenible ante otras instituciones de carácter similar, tanto en la nación como internacional.

Para el caso del presente estudio, abordaron teóricamente, las temáticas asociadas con las variables: Liderazgo Transformacional, Liderazgo Transaccional, Falta de Liderazgo, Inteligencia Emocional y Efectividad Operativa con el fin de establecer la relación para la construcción del modelo teórico. A continuación, se presenta la síntesis de cada aspecto relevante de los constructos establecido:

Figura 5

Síntesis de variables analizadas.

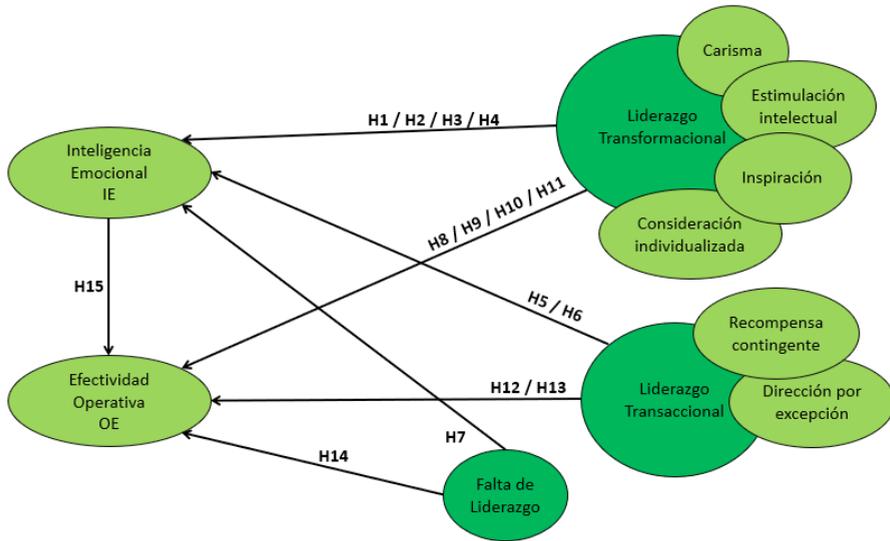


Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la revisión de la literatura, el propósito de este estudio es corroborar un modelo hipotético que busca ilustrar la relación entre el Liderazgo Transformacional, el Liderazgo Transaccional, la Falta de Liderazgo y su impacto en la Inteligencia Emocional (IE) y la Efectividad Operativa (EO) con las siguientes hipótesis como se muestra en la Figura 6.

Figura 6

Modelo teórico con las hipótesis.



Fuente: Elaboración propia.

H1: Existe un impacto entre el Carisma del Liderazgo Transformacional en la Inteligencia Emocional.

H2: Existe un impacto entre la Estimulación intelectual del Liderazgo Transformacional en la Inteligencia Emocional.

H3: Existe un impacto entre la Inspiración del Liderazgo Transformacional en la Inteligencia Emocional.

H4: Existe un impacto entre la Consideración individualizada del Liderazgo Transformacional en la Inteligencia Emocional.

H5: Existe un impacto entre la Dirección por excepción del Liderazgo Transaccional en la Inteligencia Emocional.

H6: Existe un impacto entre la Recompensa contingente del Liderazgo Transaccional en la Inteligencia Emocional.

H7: Existe un impacto entre la Falta de Liderazgo en la Inteligencia Emocional.

H8: Existe un impacto entre el Carisma del Liderazgo Transformacional en la Efectividad Operativa.

H9: Existe un impacto entre la Estimulación intelectual del Liderazgo Transformacional en la Efectividad Operativa.

H10: Existe un impacto entre la Inspiración del Liderazgo Transformacional en la Efectividad Operativa.

H11: Existe un impacto entre la Consideración individualizada del Liderazgo Transformacional en la Efectividad Operativa.

H12: Existe un impacto entre la Dirección por excepción del Liderazgo Transaccional en la Efectividad Operativa.

H13: Existe un impacto entre la Recompensa contingente del Liderazgo Transaccional en la Efectividad Operativa.

H14: Existe un impacto entre la Falta de Liderazgo en la Efectividad Operativa.

H15: Existe un impacto entre la Inteligencia Emocional en la Efectividad Operativa.

Metodología

Esta investigación es de enfoque cuantitativo que tiene como objetivo verificar si existe o no un impacto de los estilos de liderazgo: Transformacional (Carisma, Estimulación intelectual, Consideración individualizada e Inspiración), Transaccional (Recompensa contingente y Dirección por excepción) y Falta de Liderazgo; en la inteligencia emocional y la efectividad operativa en la Escuela Militar de Aviación (EMAVI), buscando así explicar, interpretar y analizar los fenómenos que se encuentren entre las variables. Para dar paso a la exploración de los diferentes constructos se utilizó una adaptación del cuestionario extraído de Santa et al., (2019) y Santa et al., (2014) modificando la terminología de algunos conceptos de acuerdo con el contexto del público objetivo. Para el analizar de los constructos se cuantificó haciendo uso del método de la escala de Likert de 5 a 1, siendo 5 Totalmente de acuerdo y 1 Totalmente en desacuerdo.

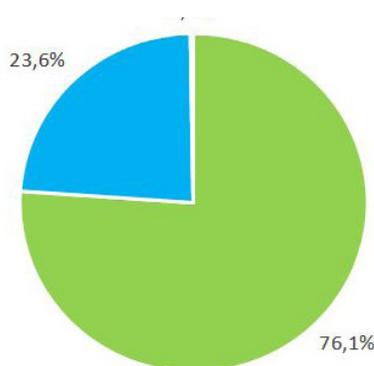
Para medir la variable de liderazgo transformacional y transaccional, se utilizó el cuestionario de estilo de Liderazgo [CELID] (Castro Solano et al., 2004) El instrumento CELID, se deriva del Multifactor Leadership Questionnaire o MLQ y da una idea de los 3 estilos de liderazgo predominantes, transformacional, transaccional y falta de liderazgo (Bass y Avolio, 1990). Debido a la naturaleza de este estudio, fue necesario utilizar las partes del cuestionario que mide el liderazgo transformacional y transaccional ya que son las variables de liderazgo elegidas para ser utilizadas en la modelación por ecuaciones estructurales (SEM). Teniendo en cuenta lo anterior, para generar el modelo de ecuaciones estructurales (SEM) se utilizaron los valores medios promedio (Average Mean Values).

Resultados

El instrumento de recolección de información se envió a través correos y redes sociales a través de un link para responder el cuestionario en línea a aproximadamente 1000 personas. La encuesta se distribuyó a los participantes que se ajustaron a los criterios de la investigación, los cuales son los estudiantes de la Escuela Militar de Aviación. En total se logró obtener 318 observaciones que desglosó los datos demográficos del público objetivo según su género, edad, papel dentro de la escuela y el año de formación dentro de la misma. Estos datos se muestran en las Figuras 7, 8, 9 y 10.

Figura 7

Género de los encuestados

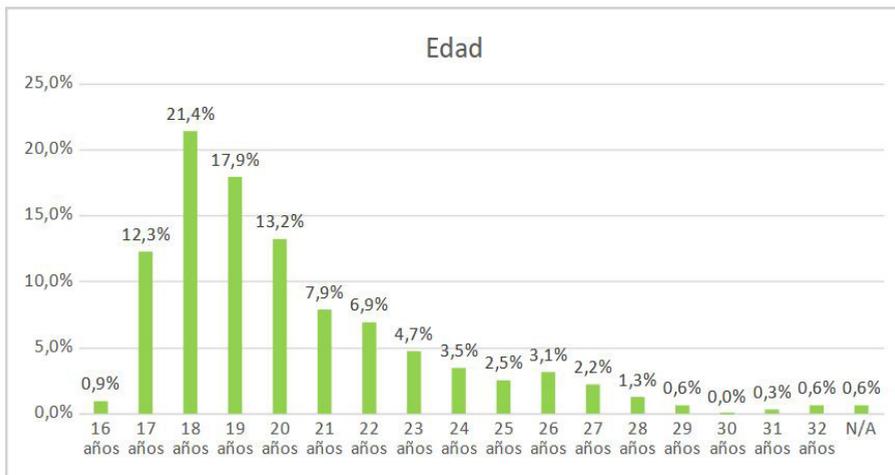


Fuente: Elaboración propia.

La Figura 7, muestra que el 76,1 % de los resultados son hombres y el 23,6 % corresponden a mujeres, es curioso que el 0,3 % confirmación que es otro tipo de género dando la conclusión que en la escuela se tienen la inclusión de identidad de género en los estudiantes. Sin embargo, se percibe que no hay igualdad de oportunidades de formación y educación a las mujeres puesto la gran mayoría son hombres.

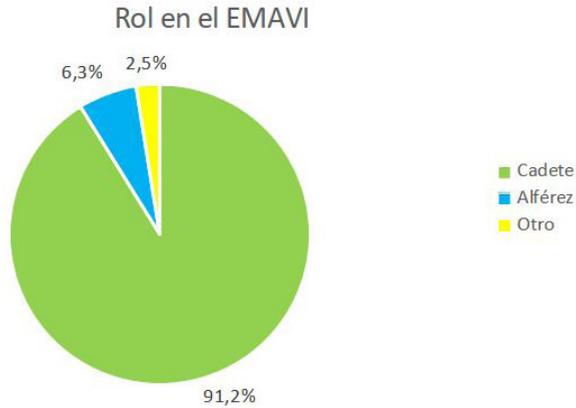
Figura 8

Edad de los encuestados



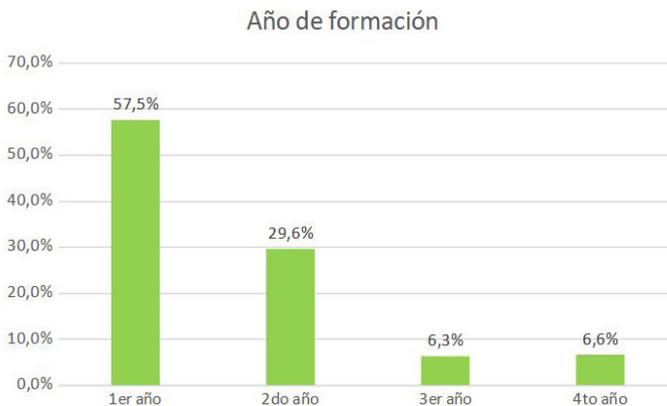
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 8, muestra que el 64,8 % de los resultados son estudiantes que están entre los 17 y 20 años. Sin embargo, a partir de los 29 años en adelante la participación es mínima puesto que son oficiales que están involucrados a la escuela, pero no realizan ninguna formación académica puesto que su ciclo de preparación finalizó.

Figura 9*Rol en el EMAVI*

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 9, muestra que el 91,2 % de los encuestados son cadetes, teniendo en cuenta que entre esos participan los cadetes regulares, CEO y OCA, y que el 6,3 % son alférez. Sin embargo, el 2,5 % respondieron que tienen otro tipo de papel dentro de la escuela. Con estos resultados hay certeza de que los encuestados entienden los fenómenos y variable de este estudio.

Figura 10*Año de formación*

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 10, muestra que el año de formación de los encuestados es adecuado para entender y responder apropiadamente las preguntas de la encuesta. La gráfica muestra que el 57,5 % de los encuestados son de primer año, seguido del 29,6 % correspondiente a los estudiantes de segundo año y el 12,9 % de los resultados mostraron que son de tercer y cuarto año. Con este resultado da un panorama que los estudiantes con menos experiencia, desde su punto de vista, han analizado como el liderazgo y la inteligencia emocional propia e incluso de sus compañeros superiores afectan su efectividad dentro de la escuela.

Análisis de datos

Los datos recopilados fueron analizados a través del software estadístico Analysis of Moment Structure (AMOS). Uno de los primeros análisis fue el Cronbach's Alpha que es una medición de la consistencia interna de cada constructo mostrando la cercanía entre los ítems y es considerado como una medida de la confiabilidad de la escala de medición (Nunnally y Bernstein, 1994). Los valores encontrados en la Tabla 1, son superiores a 0,7 lo cual muestra una consistencia interna muy bueno (Nunnally, 1978). De acuerdo con Hulin, Netemeyer y Cudeck (2001), una regla generalmente aceptada es que de 0,6 - 0,7 indica un nivel aceptable de fiabilidad y 0,8 o más un nivel muy bueno. Por lo tanto, la escala es confiable y los constructos están correlacionados entre sí.

Tabla 1

Coefficiente Cronbach's Alpha

Variable	Ítems	Alpha
Inteligencia Emocional - IE	14	,961
Liderazgo Transformacional		
Liderazgo Transaccional	15	,860
Falta de Liderazgo		
Efectividad Operativa EO	12	,941

Fuente: Elaboración propia.

Para comprobar la fiabilidad del modelo, se realizó el AFC (Análisis Factorial Confirmatorio) que se utiliza para determinar y estudiar las relaciones entre las variables observadas (Cooksey, 2007). Se estimaron las cargas factoriales, confirmando que los ítems o preguntas establecidas de los constructos latentes se correlacionaban entre sí permitiendo unos resultados favorables al estudio.

Es así como los resultados presentaron 1378 momentos con 145 parámetros distintos para estimar. El Chi-cuadrado es igual a 2313,497 con 1233 grados de libertad, con un CMIN/DF de 1,876 con un nivel de significancia (P) de 0,000 (Ver Tabla 2). Se debe tener en cuenta que Wheaton et al., (1977) sugirieron una proporción de aproximadamente cinco o menos (CMIN/DF ≤ 5.0) como criterio razonable, Marsh y Hocevar (1985) recomendaron usar proporciones tan bajas como dos o tan altas como cinco, McIver y Carmines (1981) sugirieron proporciones en el rango de 2:1 o 3:1 como indicativos de un ajuste aceptable entre el modelo hipotético y los datos de la muestra. Por tanto, el modelo tiene un ajuste aceptable.

Tabla 2

Coefficiente CMIN

Modelo	NPAR	CMIN	DF	P	CMIN/DF
Modelo predeterminado	145	2313,497	1233	,000	1,876
Modelo saturado	1378	,000	0		
Modelo independiente	52	11396,129	1326	,000	8,594

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que el valor P es significativo, la confiabilidad de cada uno de los constructos en el modelo se evaluó utilizando varios datos estadísticos de ajuste adicionales. Se consideró el índice de GFI²² con un valor de 0,787. De

²² Según el software AMOS, GFI significa the goodness of fit index en su traducción el índice de ajuste de bondad.

la misma forma, los índices NFI²³ con un valor de 0,797, RFI²⁴ con un valor de (0,782,) IFI²⁵ con un valor de (0,894,) TLI²⁶ con un valor de 0,885 y CFI²⁷ con un valor de 0,893 mostraron un ajuste adecuado del modelo (ver Tablas 3 y 4). Los valores de estos 6 índices están por encima de 0.7 y se consideran aceptables (Kline, 2015).

Tabla 3

Coficiente GFI

Modelo	RMR	GFI	AGFI	PGFI
Modelo predeterminado	,068	,787	,762	,704
Modelo saturado	,000	1,000		
Modelo independiente	,298	,132	,098	,127

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4

Comparaciones de base de línea

Modelo	NFI Deltal	RFI rho1	IFI Delta2	TLI rho2	CFI
Modelo predeterminado	,797	,782	,894	,885	,893
Modelo saturado	1,000		1,000		1,000
Modelo independiente	,000	,000	,000	,000	,000

Fuente: Elaboración propia.

23 Según el software AMOS, NFI significa the normed fit index en su traducción el índice de ajuste normalizado.

24 Según el software AMOS, RFI significa the relative fit index en su traducción el índice de ajuste relativo.

25 Según el software AMOS, IFI significa the incremental fit index en su traducción el índice de ajuste incremental.

26 Según el software AMOS, TLI significa the Tucker-Lewis coefficient en su traducción el coeficiente de Tucker-Lewis.

27 Según el software AMOS, CFI significa the comparative fit index en su traducción el índice de ajuste comparativo

Análisis de los resultados de las Hipótesis

Los resultados de la modelación de ecuaciones estructurales (SEM) se muestran en la Tabla 5, pesos de regresión y las Figuras 11,12 y 13 del modelo estructural.

Tabla 5

Pesos de regresión: (Grupo número 1 - Modelo predeterminado) del Modelo

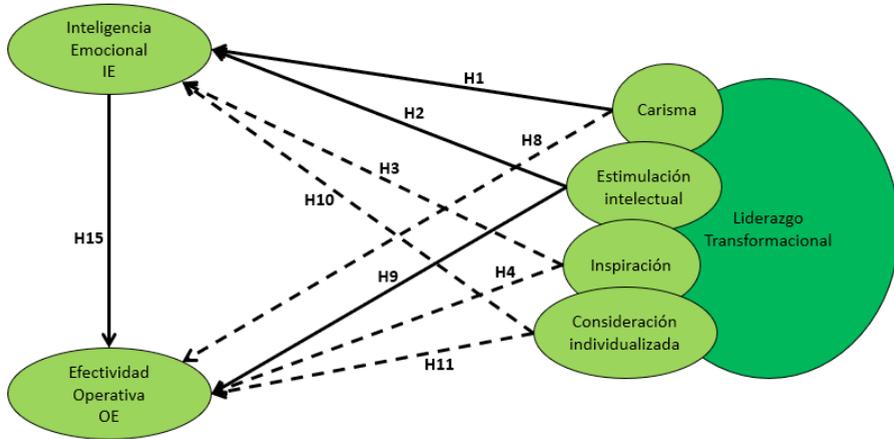
			Estimado	S.E.	C.R.	P	Resultado
IE	<---	Caris	,445	,060	7,374	***	H1: Confirmado
IE	<---	EstInt	,490	,067	7,334	***	H2: Confirmado
IE	<---	Insp	,057	,047	1,211	,226	H3: No Confirmado
IE	<---	ConInd	-,002	,042	-,040	,968	H4: No Confirmado
IE	<---	REcCon	-,126	,038	-3,338	***	H5: No Confirmado
IE	<---	DirExc	,181	,067	2,713	,017	H6: No confirmado
IE	<---	LaiFai	,004	,039	,100	,920	H7: No Confirmado
EO	<---	Caris	,090	,042	2,112	,035	H8: No Confirmado
EO	<---	EstInt	,358	,058	6,125	***	H9: Confirmado
EO	<---	Insp	,082	,033	2,476	,013	H10: No Confirmado
EO	<---	ConInd	,110	,031	3,608	***	H11: No Confirmado
EO	<---	REcCon	,015	,026	,600	,548	H12: No Confirmado
EO	<---	DirExc	-,024	,044	-,543	,587	H13: No Confirmado

			Estimado	S.E.	C.R.	P	Resultado
EO	<---	LaiFai	,018	,027	,665	,506	H14: No Confirmado
EO	<---	IE	,222	,058	3,803	***	H15: Confirmado

Fuente: Elaboración propia.

Figura 11

Modelo estructural en relación con el Liderazgo Transformacional.



Convenciones:

—————>	Relación significativa
- - - - ->	Relación no significativa

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 11 se encontró un panorama amplio de resultados. En primera parte, se ve que el carisma no tiene un impacto en la efectividad operativa pero sí tiene un impacto muy alto ustedes ven acá en la inteligencia emocional. En este sentido, la hipótesis 1 (H1) es confirmada porque su impacto y relación es significativa ($\beta = 0.47, P < 0.001$) y la hipótesis 8 (H8) no es confirmada ($\beta = 0.13, P < 0.035$). En el liderazgo

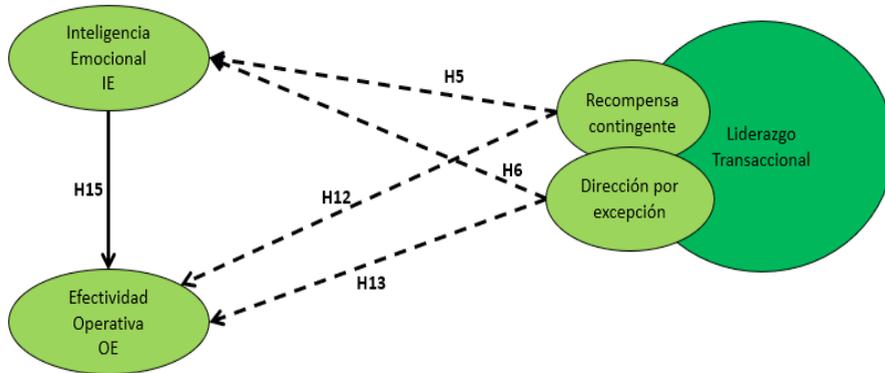
carismático para que haya un impacto en la efectividad operativa se necesita de la inteligencia emocional; es decir, cuando el líder que tiene aspectos relacionado con el carisma tiene impacto en el individuo generando motivación en sus emociones para la persona obtenga un desempeño adecuado para el cumplimiento de sus actividades.

En segunda parte, la estimulación intelectual tiene un impacto en la inteligencia emocional y en la efectividad operativa, es de esta manera que se confirman las hipótesis 2 y 9 ($H2: \beta = 0.48, P < 0.001$ / $H9: \beta = 0.48, P < 0.001$) puesto que su significancia y relación es positiva para el estudio. Con estos resultados se corrobora que es importante motivar a las personas en conocimiento frente a área de conocimiento que se esté abordando para que genere consigo un impulso emocional para el cumplimiento de objetivos dentro de la escuela. El estímulo intelectual es la característica del liderazgo más importante que reconocen los cadetes de la Fuerza Aérea Colombiana.

En tercera parte, la inspiración no tiene ningún impacto en el modelo estructurado puesto que no influye en la inteligencia emocional ni en la efectividad operativa. Es por esta razón, que las hipótesis 3 y 10 ($H3: \beta = 0.06, P = 0.226$ / $H10: \beta = 0.12, P = 0.013$) no se confirman por su falta de impacto y significancia en los resultados. Este tipo de liderazgo por inspiración es una característica de liderazgo no reconocida por los cadetes y alfereses de la escuela militar. Y en última parte, la consideración individualizada no tiene ningún impacto en la inteligencia emocional y en la efectividad operativa, en pocas palabras las hipótesis 4 y 11 no son confirmadas ($H4: \beta = 0.00, P = 0.968$ / $H11: \beta = 0.18, P = > 0.05$). El líder que considera a cada individuo por sus propias características y condiciones, generando empatía en sus relaciones no genera ninguna huella significativa en las personas.

Figura 12

Modelo estructural en relación con el Liderazgo Transaccional.



Convenciones:

	Relación significativa
	Relación no significativa

Fuente: Elaboración propia.

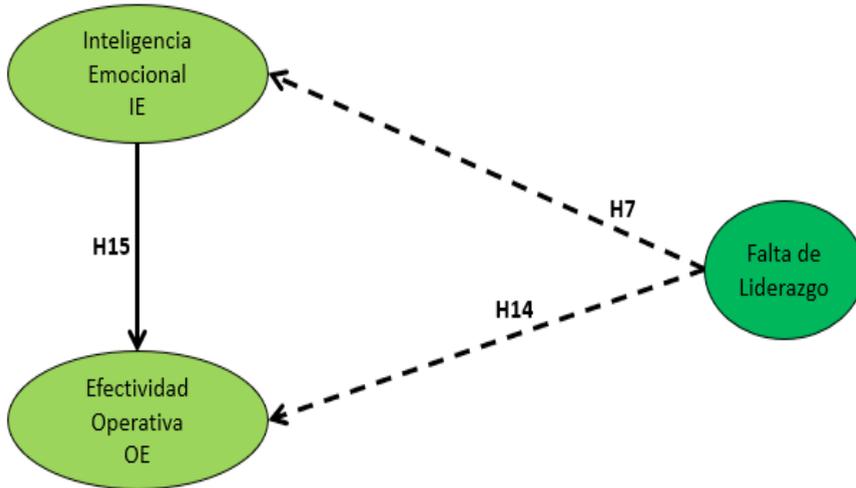
En la Figura 12 se corrobora las relaciones de las características del liderazgo transaccional en el impacto de la inteligencia emocional y la efectividad operativa. En primera instancia, la recompensa contingente no afecta ni impulsa la inteligencia emocional ni la efectividad operativa, esto quiere decir que si un líder nada recompensas o castigos a los cadetes y alférez en la escuela no va a generar en ellos algo relevante y pertinente para su formación militar y académica. De esta manera, las hipótesis 5 y 12 no son confirmadas por sus bajos índices de importancia frente a la inteligencia emocional y la efectividad operativa (H5: $\beta = -0.19$, $P > 0.05$ / H12: $\beta = 0.03$, $P = 0.548$).

Y, por último, la dirección por excepción en su relación con la inteligencia emocional y la efectividad operativa no tiene impacto, confirmando que las hipótesis 6 y 13 no son positivas ni significantes (H6: $\beta = 0.16$, $P = 0.017$ / H13: $\beta = -0.03$, $P = 0.548$). El liderazgo transaccional no sirve en la Fuerza Aérea Colombiana, pues que los estudiantes consideran que las recompensas y los tratos por excepción que se sus

líderes y superiores dan no están motivando al individuo como tal para que funcione bien en la escuela.

Figura 13

Modelo estructural en relación con la falta de liderazgo



Convenciones:

	Relación significativa
	Relación no significativa

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 13 se evidencia que la falta de liderazgo no impacta en la inteligencia emocional ni en la efectividad operativa, esto quiere decir que si no hay liderazgo en la escuela no habrá motivación emocional ni efectividad en las funciones que se realicen los cadetes y alférez. Con este resultado se evidencia que si existe un liderazgo en las Escuela Militar de Aviación y los estudiantes reconocen la importancia del liderazgo dentro de ella. Es por esto, que las hipótesis 7 y 14 (H7: $\beta = 0.06$, $P = 0.920$ / H14: $\beta = 0.03$, $P = 0.506$) no son confirmadas en esta investigación.

Vale aclarar que en las Figuras 10, 11 y 12 la hipótesis 15 si es confirmada ($\beta = 0.31$, $P < 0.001$), puesto que la inteligencia emocional si influye en la

efectividad operativa. Un cadete o alférez motivado y mente positiva genera mejor resultado dentro del EMAVI.

Conclusiones

Este estudio muestra una interacción clara entre los factores examinados, liderazgo transformacional, liderazgo transaccional, la falta de liderazgo y su impacto en la inteligencia emocional y la efectividad operativa. En el análisis de los resultados vemos que el liderazgo transformacional ejerce una relación directa y significativa con los rasgos de la inteligencia emocional y la efectividad operativa siempre y cuando la estimulación intelectual se genera en las relaciones humanas entre los líderes y los seguidores. Sin embargo, el impacto del liderazgo transaccional en la inteligencia emocional es marginal y nulo con respecto a la efectividad operativa. Y, por último, la inteligencia emocional tiene un poder predictivo directo en la efectividad operativa. No obstante, se corrobora lo planeado por la literatura, que si no hay liderazgo no hay cumplimiento con lo que se desea alcanzar, es decir, la falta de liderazgo si influye para no haya inteligencia emocional ni efectividad operativa por parte de los cadetes y alférez.

En el desarrollo de esta investigación, se comprobó la influencia documentada que puede tener el liderazgo sobre la inteligencia emocional y la efectividad operativa (Fernandez, 2005; Judge y Piccolo, 2004; Vogel y Masal, 2015; Moynihan et al., 2012). Puesto que el liderazgo transformacional representa un impacto significativo en la efectividad operativa mucho más alto que el del liderazgo transaccional, lo cual significa que las variables de la efectividad operativa (velocidad, flexibilidad, confiabilidad, costo del proceso y calidad) se verán potenciadas al ser implementadas en un grupo dirigido mediante el liderazgo transformacional específicamente por la estimulación intelectual.

En conclusión, un líder necesita ser un instrumento de motivación y de cambio, él debe influenciar emocionalmente a sus seguidores, debe ser capaz de transmitir compromiso y deseo de iniciativa además de ser capaz de interpretar las emociones de los miembros de su equipo, y también saber cómo relacionarse positivamente con los demás. Este tipo de cualidades puede generar mucho más compromiso y mejor desempeño en los seguidores que un sistema de recompensa y de castigo

como lo es el liderazgo transaccional. Finalmente, las acciones de los líderes que denotan falta de liderazgo son nocivas para el rendimiento y el compromiso de los subordinados, en el caso de este estudio, los cadetes y alféreces de la EMAVI.

Referencias

- Almedia, A. (2007). *Del liderazgo transaccional al liderazgo transformacional* (Vol. 1).
- Bass, B. M. (2007). Dos décadas de investigación y desarrollo en liderazgo transformacional. *Revista Del Centro de Investigación. Universidad La Salle*, 7 (27), 25–41.
- Bass, B. M. y Avolio, B. J. (1990). *Transformational leadership development: Manual for the multifactor leadership questionnaire*. Consulting Psychologists Press.
- Bracho Parra, O. y García Guilianny, J. (2013). Algunas consideraciones teóricas sobre el liderazgo transformacional Some Theoretical Considerations About Transformational Leadership. *Telos*, 15 (2), 165–177.
- Castro Solano, A., Lupano Perugini, M. L., Benatuil, D. y Nader, M. (2007). *Teoría y evaluación del liderazgo* (E. Paidós (ed.)).
- Castro Solano, A., Nader, M., y Casullo, M. M. (2004). *La evaluación de los estilos de liderazgo en población civil y militar argentina*.
- Contreras Torres, F. y Barbosa Ramírez, D. (2013). Del liderazgo transaccional al liderazgo transformacional: implicaciones para el cambio organizacional. *Revista Virtual Universidad Católica Del Norte*, 39, 152–164.
- Contreras Torres, F. T. (2008). Liderazgo: Perspectivas De Desarrollo E Investigación. *International Journal of Psychological Research*, 1 N.º 2, 64–72.
- Cooksey, R. W. (2007). *Illustrating Statistical Procedures: For Business, Behavioural y Social Science Research*. Tilde University Press. https://search.alexanderstreet.com/view/work/bibliographic_entity%7Cbibliographic_details%7C2454621.
- Emst-Slavit, G. (2001). Educación para todos: La Teoría de las Inteligencias Múltiples de Gardner. *Revista de Psicología de La PUCP*, XIX (2).
- Espinoza Zegarra, A. M. y Canales Morales, Y. M. (2020). Liderazgo.

- Estrada, S. (2007). El Liderazgo a través de la Historia. *Scientia et Technica* Año XIII, 13 (34), 343–348.
- Fernandez, S. (2005). Developing and Testing an Integrative Framework of Public Sector Leadership: Evidence from the Public Education Arena. *Journal of Public Administration Research and Theory*, 15 (2), 197–217. <https://doi.org/10.1093/jopart/mui014>.
- Gil, F., Alcover, C. M., Rico, R. y Sánchez-Manzanares, M. (2011). NUEVAS FORMAS DE LIDERAZGO EN EQUIPOS DE TRABAJO. *Papeles Del Psicólogo*, 32 (1), 38–47.
- Goleman, D. (1995). *Inteligencia Emocional*.
- Gómez Gómez, I. y Brito Aguilar, J. (2020). *Administración de operaciones*.
- Hulin, C., Netemeyer, R. y Cudeck, R. (2001). Can a Reliability Coefficient Be Too High? *Journal of Consumer Psychology*, 10, 55–58. <https://doi.org/10.2307/1480474>.
- Judge, T. A. y Piccolo, R. F. (2004). Transformational and Transactional Leadership: A Meta-Analytic Test of Their Relative Validity. In *Journal of Applied Psychology* (Vol. 89, Issue 5, pp. 755–768). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.89.5.755>.
- Lupano Perugini, M. L. y Castro Solano, A. (2013). Estudios sobre el liderazgo. Teorías y evaluación. *Psicodebate*, 6 (1215), 107–122.
- Marsh, H. W. y Hocevar, D. (1985). Application of confirmatory factor analysis to the study of self-concept: First- and higher order factor models and their invariance across groups. *Psychological Bulletin*, 97 (3), 562–582. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.97.3.562>
- Mayer, J. D. (1998). Una breve Sinopsis. *Revista de Psicología y Educación*, 1, 35–46.
- Mayer, J. D. y Salovey, P. (1993). The Intelligence of Emotional Intelligence. *Intelligence*, 17, 433–442.
- McIver, J. P. y Carmines, E. G. (1981). *Unidimensional scaling*. Beverly Hills : Sage Publications.
- Messu, D., Santa, R., Tegethoff, T., y Morante, D. (2020). El impacto de la inteligencia emocional, la innovación y el trabajo en equipos interdisciplinarios en la efectividad operacional. In *Regiones inteligentes. El factor humano* (pp. 51–74). Escuela Militar de Aviación "Marco Fidel Suárez" (EMAVI) Universidad Icesi.

- Nunnally, J. C. (1978). *Psychometric Theory*. 2nd edition. New York, NY: McGraw-Hill.
- Nunnally, J. C. y Bernstein, I. H. (1994). *Psychometric theory*. McGraw-Hill.
- Pacsi Choque, A. Y., Estrada Mejía, W., Pérez Vásquez, A. y Cruz Machaca, P. (2014). Liderazgo laissez faire. *Revista de Investigación Valor Agregado*, 1 (1), 67–72.
- Peréz Lobo, P. (2019). *Estudio de Liderazgo según Kurt Lewin. Un estudio de caso en la residencia Carmen Sevilla II*.
- Porter, M. (2008). *Las cinco fuerzas competitivas que le dan forma a la estrategia*.
- Santa, R., Achuri, T., Gomez, A., Franco, M., Tegethoff, T. y Morante, D. (2019). *Exploring the relationship between emotional intelligence, strategies and linkages, and operational effectiveness*.
- Santa, R., Echeverry, A. M. L., Sánchez, P. A. V. y Rios Patiño, J. I. (2014). System and operational effectiveness alignment: The case of e-government in Saudi Arabia. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 9 (3). <https://doi.org/10.1080/17509653.2014.905219>.
- Santa, R., Ferrer, M., Bretherton, P. y Hyland, P. (2010). Contribution of cross-functional teams to the improvement in operational performance. *Team Performance Management*, 16 (3). <https://doi.org/10.1108/13527591011053241>.
- Santa, R., Ferrer, M., Jørsfeldt, L. M. y Scavarda, A. (2017). The impact of the quality of the service from IS/IT departments on the improvement of operational performance: the point of view of users of technological innovations. *International Journal of Business Information Systems*, 28 (2), 125–146.
- Selman, J. (2008). *Liderazgo*. Prentice Hall. Pearson Education.
- Vogel, R., y Masal, D. (2015). Public Leadership: A review of the literature and framework for future research. *Public Management Review*, 17 (8), 1165–1189. <https://doi.org/10.1080/14719037.2014.895031>
- Wheaton, B., Muthén, B., Alwin, D., y Summers, G. (1977). Assessing Reliability and Stability in Panel Models. *Sociological Methodology*, 8, 84.

Wong, C.-S., yLaw, K. (2002). The effects of leader and follower emotional intelligence on performance and attitude: An exploratory study. *The Leadership Quarterly*, 13, 243–274. [https://doi.org/10.1016/S1048-9843\(02\)00099-1](https://doi.org/10.1016/S1048-9843(02)00099-1).

Diagramación y Diseño:
Paola Andrea Bolaños Dorado
Correo: paola6553@gmail.com
Cel: (+57) 323 595 57 51

Este libro fue diagramado utilizando fuentes tipográficas Literata en sus respectivas variaciones a 10 puntos para el contenido y Open Sans para títulos a 12 pts. Para los capitulares se usó Open Sans Extrabold a 15 pts.

Impreso en el mes de diciembre de 2022.
200 ejemplares
Just Services S.A.S
Av. Carrera 19 # 97-31
Oficina 503, Bogotá, Cundinamarca
Colombia
Cel: (57+) 300 760 2388

Esta obra es el resultado del encuentro académico “Semana Universitaria EMAVI 2021” la cual reunió conferencistas profesionales de talla nacional e internacional, expertos en conceptos relacionados con el espacio y el ciberespacio, que promueven la Ciencia, Tecnología e Innovación, para responder a los desafíos productivos y sociales que permitan el desarrollo del país y de la Fuerza Aérea Colombiana.

Por consiguiente, este libro busca proporcionar al lector, una ventana al desarrollo aéreo y espacial, que se realiza en Colombia, la proyección de sus tecnologías emergentes, aplicaciones de materiales para la construcción de cohetes, la seguridad ciberespacial, el descubrimiento del universo; aquellas apuestas y estrategias de gestiones tecnológicas, operativas y humanas que se están desarrollando y trabajando desde la academia, que sirven de intercambio cultural, científico y laboral para el mundo; promovidas desde Minciencias por la Misión de Sabios con el foco temático: Ciencias Básicas y del Espacio.

**FUERZA AÉREA
COLOMBIANA**



**ASÍ SE VA A LAS
ESTRELLAS**



ISBN: 978-958-53777-4-5

